منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الترموديناميك /١/

الأسس الترموديناميكية

Thermodynamic Principles

الدكتور
عيسى مراد
أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام

الدكتور
بسام بدران
مدرس في قسم هندسة الميكانيك العام

Damascus University

جامعة دمشق
١٤٤٠ - ١٤٤١ هـ
٢٠١٨ - ٢٠١٩ م

NOT FOR PUBLIC RELEASE

Bassam Badran
Damascus University

الفصل الأول

Chapter One

تعاريف ومفاهيم ترموديناميكية

Thermodynamic Definitions

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
C	سرعة الضوء	m/s
E	كمية الطاقة الكلية	J
E_{in}	كمية الطاقة الكلية الداخلة	J
E_{out}	كمية الطاقة الكلية الخارجة	J
ΔE	التغيير في الطاقة	J
e	الطاقة النوعية	J/kg
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
KE	الطاقة الحركية للمادة	J
m	الكتلة	kg
N	عدد المولات	mol
N_k	عدد مولات العنصر	mol
P	الضغط	kPa أو bar
PE	الطاقة الكامنة للمادة	J
SG	الثقالة النوعية (عدد لا بعدي)	------
T	درجة الحرارة	K أو ℃
V	الحجم	m^3

Bassam Badran Damascus University

v	الحجم النوعي	m^3/kg
w	وزن المادة	N
ρ	الكثافة	kg/m^3
ρ_{H_2o}	كثافة الماء العيارية عند درجة حرارة $(4℃)$	kg/m^3
γ_s	الوزن النوعي للمادة	N/m^3
μ	الوزن الذري = الكتلة المولية	g/mol
μ_k	الكتلة المولية للعنصر	g/mol
μ_{mix}	الكتلة المولية لخليط	g/mol

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

في كل علم من العلوم الأساسية توجد لدينا مجموعة من المصطلحات والبارامترات والمفاهيم الأساسية التي ترتبط بهذا العلم وتكون الأساس في استخراج المعادلات والقوانين المتعلقة به. علم الترموديناميك هو أحد هذه العلوم الهندسية الأساسية. ومعرفة هذه المصطلحات والبارامترات والمفاهيم يشكل الأساس الصلب لفهم مادة الترموديناميك وتطبيقاتها وباقي العلوم المشتقة منها. سنبدأ في هذا الفصل بتحديد علم الترموديناميك وتعريفه وأنواع الأنظمة المستخدمة فيه سواء أكانت هذه الأنظمة مغلقة أو مفتوحة. وسنتعرف على الواحدات *Units* المستخدمة سواء أكانت هذه الواحدات دولية أو إنكليزية. الواحدات هي **اللغة** التي نستخدمها في معرفة معنى الأرقام المحسوبة في هذا العلم. وسنتابع بعد ذلك تعريف حالة *State* النظام والشروط التي يجب أن تتحقق من أجل وجود هذا االنظام *State Postulate* والشروط التي يجب أن تتوافر لتوازن *Equilibrium* هذا النظام. كما سندرس فيما بعد العمليات *Processes* التي يقوم بها النظام بما في ذلك الدورات. وسنناقش مفهوم درجة الحرارة *Temperature* والمقاييس المستخدمة في قياسها *Temperature Scales*. وفي نهاية هذا الفصل سنطرح مفهوم القانون الصفري في الترموديناميك.

الفائدة العلمية من الفصل.

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ التعرف على المصطلحات والتعاريف الضرورية في فهم علم الترموديناميك.
- ✓ وصف كافة الواحدات المستخدمة في القياس بما فيها الدولية والإنكليزية.
- ✓ تحديد أنواع الأنظمة المغلقة والمفتوحة ووصفها بدقة.
- ✓ تعريف المبادئ الرئيسية في علم الترموديناميك.
- ✓ تحديد الحالة وشروطها.
- ✓ شروط تحقق التوازن في الأنظمة.

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ وصف العمليات التي يمكن أن يقوم بها النظام.
- ✓ وصف الدورات وأنواعها.
- ✓ التعرف على مقاييس درجات الحرارة في علم الترموديناميك.
- ✓ شرح القانون الصفري في الترموديناميك.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.1	الترموديناميك والطاقة والقوانين الأساسية.	25
2.1	الواحدات الدولية والإنكليزية.	29
1.2.1	الواحدات الأساسية.	30
2.2.1	الواحدات المشتقة.	32
3.2.1	واحدات التحويل.	33
3.1	النظام المغلق والنظام المفتوح.	33
4.1	الصفات الفيزيائية (البارامترات) لنظام.	38
5.1	الكثافة والوزن النوعي.	43
6.1	الحالة وشروط التوازن.	44
7.1	الصفة المميزة للحالة.	47
8.1	العمليات والدورات.	47
9.1	مقاييس درجات الحرارة.	49
10.1	القانون الصفري في الترموديناميك.	50
	ملخص الفصل.	52
	مسائل غير محلولة.	54
	ملحقات الفصل.	55

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

1.1 الترموديناميك والطاقة والقوانين الأساسية.

الترموديناميك. تنحدر كلمة الترموديناميك من كلمتين يونانيتين، الأولى هي *(Therme)* أي الحرارة والثانية هي *(Dynamic)* أي الحركة *Motion* وبالتالي فإن كلمة الترموديناميك تهتم بحركة انتقال الحرارة بين المواد. في عام 1849 تم ولأول مرة استخدام كلمة الترموديناميك في منشور علمي من قبل الأستاذ وليم طومسون الذي يعرف باسم لورد كالفن (*Lord Kelvin*) كما في الشكل (1−1) وفي عام 1859 ظهرت ولأول مرة كلمة الترموديناميك في كتاب لوليم رانكين (*William Rankine*) كما في الشكل (1−2).

الشكل (1−1) صورة للورد كالفن.

الشكل (1−2) صورة لوليم رانكين.

الطاقة. يمكن أن نعرف الطاقة بأنها قدرة أي نظام فيزيائي على أداء عمل ما أو إحداث تغيير ما. توجد الطاقة في الطبيعة بعدة أشكال منها الطاقة الكامنة *Potential Energy* والطاقة الميكانيكية *Mechanical Energy* والتي تسمى أيضاً بالطاقة الحركية *Kinetic Energy* والطاقة الحرارية *Thermal Energy* (*Heat*) والطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية وطاقة الضوء وغير ذلك من الطاقات.

Bassam Badran Damascus University

القوانين الأساسية *Conservation Laws*. هي المعادلات الرئيسية التي تستخدم في كافة العلوم الهندسية من أجل توصيف أي نظام. وتنقسم هذه القوانين إلى ثلاث قوانين هامة.

- قانون انحفاظ الكتلة *Conservation of Mass* والذي يقول بأن الكتلة هي قيمة ثابتة لا تخلق ولا تفنى إنما تتحول من شكل إلى آخر. لنأخذ الماء على سبيل المثال لا الحصر. عندما نستيقظ صباحاً نستعمل الماء الساخن في غسل أجسادنا، يتحرك الماء الناتج عن الغسيل إلى المجاري الرئيسية التي تقوده إلى الإنهار ثم إلى البحار أو أحواض التجميع، يتبخر الماء المجمع بواسطة أشعة الشمس ويصبح غيوماً، تتحول الغيوم عند تصادمها إلى أمطار تغذي الأرض، تقوم الأرض على ترشيح المياه عبر طبقاتها إلى أن تتجمع هذه المياه ضمن أحواض جوفية، يقوم البشر بحفر هذه الآبار الجوفية واستخراج الماء ومعالجته لاستعماله لاحقا في غسل أجسادنا. نلاحظ أن كتلة الماء التي استخدمت في غسل أجسادنا لم تنقص بل بقيت نفسها وهذا ما يؤكد قانون انحفاظ الكتلة.

- قانون انحفاظ العطالة *Conservation of Momentum* بنوعيه الخطي *Linear* والدوراني *Rotational* والذي يصف حركة المادة الخطية والدورانية والقوى المؤثرة فيها. بجمع قانون انحفاظ الكتلة مع العطالة ينتج لدينا علم ميكانيك السوائل *Fluid Mechanics* وقوانينه.

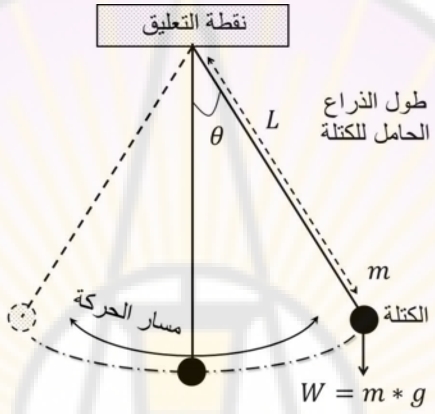
- قانون انحفاظ الطاقة *Conservation of Energy* والذي يقول بأن الطاقة لا تخلق ولا تفنى إنما تتحول من شكل إلى آخر وتبقى كميتها الكلية ثابتة. بجمع قانون انحفاظ الكتلة مع الطاقة ينتج لدينا علم الترموديناميك *Thermodynamics* وقوانينه. نلاحظ تماثل تعريف قانون انحفاظ الطاقة مع تعريف قانون انحفاظ الكتلة.

Bassam Badran
Damascus University

قام العالم أنشتاين *Einstein* في عام 1905 بوضع نظريته المشهورة التي تربط بين الكتلة والطاقة وقال بأن الكتلة تتحول إلى طاقة إذا تحركت بسرعة الضوء

$$E = m * C^2$$

حركة النواس، الموضحة في الشكل (3-1)، هي مثال واضح عن قانون انحفاظ الطاقة.

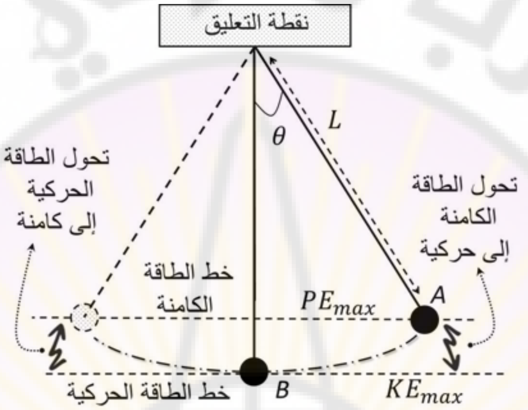


الشكل (3-1) أقسام النواس الترددي.

عندما يكون النواس منحرفاً بزاوية (θ) عن محور الثقالة (أو مايسمى محور الدوران) كما في الشكل (4-1) تكون الطاقة الكامنة *Potential Energy, PE* عند النقطة (A) أعظمية أما الطاقة الحركية *Kinetic Energy, KE* فتكون معدومة (الطاقة الكامنة هي قدرة الجسم على تخزين الطاقة أما الطاقة الحركية فهي قدرة الجسم على الحركة). عندما يُترك هذا النواس ليتحرك تحت تأثير قوى الجاذبية ($W = m * g$) فقط مع إهمال قوى الاحتكاك ومقاومة الهواء فيتحول جزء من الطاقة الكامنة عند نقطة الانطلاق (A) إلى طاقة حركية ويبدأ النواس بالحركة مكتسباً سرعة. تتزايد هذه السرعة كلما اقترب النواس من محور الثقالة إلى أن تصل إلى قيمتها الأعضمية عند النقطة (B) وتكون الطاقة الكامنة عند تلك النقطة معدومة. أي أن الطاقة الكامنة قد تحولت بالكامل إلى طاقة حركية عند حركة النواس من النقطة (A) إلى النقطة (B) وهذا يفسر ما سبق ذكره في

Bassam Badran Damascus University

تعريف قانون انحفاظ الطاقة بأن الطاقة لاتخلق ولا تفنى إنما تتحول من شكل إلى آخر وتبقى كميتها ثابتة.



الشكل (4−1) التغييرات في طاقة النواس.

ينتج عن قانون انحفاظ الطاقة الصيغة الأولى **<u>للقانون الأول في الترموديناميك</u>** *First Law of thermodynamics* والذي يعبر عن **<u>التوازن الكمي (الجبري) في الطاقة</u>** أي أن الطاقة هي مقدار **كمي** *Quantitative* يمكن قياسه.

يقول القانون الأول في الترموديناميك بأن الطاقة المقدمة إلى نظام ما (E_{in}) مطروحاً منها الطاقة الخارجة منه (E_{out}) تساوي التغيير في الطاقة ضمن النظام (ΔE) كما هو واضح في المعادلة التالية

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E \qquad (1\text{-}1)$$

تؤكد العلاقة $(1-1)$ بأن الطاقة هي خاصة ترموديناميكية يمكن قياسها. يمكن أن نفسر بأن الطاقة هي خاصة ترموديناميكية يمكن قياسها إذا فرضنا أن الإنسان يقوم على استهلاك كمية من الطعام يومياً بقيمة طاقية تعادل 4000 سعرة حرارية أي أن $(E_{in} = 4000\ calories)$ ويطرح يومياً ما يعادل 3000 سعرة حرارية أي أن

Bassam Badran
Damascus University

نتيجة الحركة الدائمة والتعرق والاستقلابات الداخلية التي ($E_{out} = 3000\,calories$) تحدث ضمن جسمه وما شابه ذلك من تلك العمليات لبقائه حياً فإن كمية الطاقة التي يختزنها الإنسان في جسمه نتيجة التطبيق المباشر للقانون الأول في الترموديناميك في العلاقة (1−1) هي 1000 سعرة حرارية ($\Delta E = 1000\,calories$) والتي تتحول في النهاية إلى مواد دهنية مختزنة.

تم أيضاً وضع صيغة **<u>القانون الثاني في الترموديناميك</u>** *Second Law of Thermodynamics* والذي يؤكد على أن كافة العمليات تحدث في اتجاه <u>تناقص (استهلاك) الطاقة</u>. أي أن الطاقة هي مقدار **كمي** *Quantitative* و**نوعي** *Qualitative* معاً. هنا النوعية تعني مدى الإستفادة من الطاقة المستهلكة. قام كلٌ من رودولف كلاسيوس ووليم رانكين ولورد كالفن في عام 1850 بوضع صيغ ثابتة ومستخدمة إلى يومنا هذا للقانونين الأول والثاني في الترموديناميك.

لكي نقوم بدراسة نظام ما ترموديناميكاً نختار إحدى النظرتين التاليتين. الأولى هي النظرة الماكروية *Macroscopic Approach* والثانية هي النظرة الميكروية *Microscopic Approach*. تقوم النظرة الماكروية على دراسة النظام كاملاً ولا تدخل في تفصيل حركة أجزائه أو مكوناته أو ذراته ويسمى علم الترموديناميك الذي يستخدم هذه النظرة باسم الترموديناميك الكلاسيكي *Classical Thermodynamics*. تقوم النظرة الميكروية على دراسة تفاصيل حركة أجزاء النظام والتفاعلات التي تحدث بين مكوناته (جزيئاته) ويسمى علم الترموديناميك الذي يعتمد هذه النظرة بالترموديناميك الإحصائي *Statistical Thermodynamics*.

2.1 <u>الواحدات الدولية والإنكليزية.</u>

الواحدات هي **<u>اللغة</u>** التي نستخدمها لكي نفسر الأرقام والنتائج التي يمكن استخراجها من تطبيق القوانين الأساسية على نظام ما ومن دون هذه اللغة يبقى أي علم وخصوصاً علم الترموديناميك مبهماً. الواحدات المستخدمة في القوانين الأساسية هي

Bassam Badran Damascus University

نوعان. النوع الأول هو الواحدات الأساسية *Primary Dimensions* مثل وحدات الكتلة *Mass* والطول *Length* والزمن *Time* وغيرها والنوع الثاني هو الواحدات المشتقة *Derived Dimensions* والتي يمكن اشتقاقها من الواحدات الأساسية مثل وحدات السرعة *Velocity* والطاقة *Energy* والفولط *Voltage* وغيرها.

1.2.1 **الواحدات الأساسية**. تنقسم الواحدات الأساسية إلى ثلاثة أنظمة وهي:

- الواحدات الدولية *Le Systeme International d'Unités, SI*. يسمى نظام الواحدات الدولية أيضاً بنظام الواحدات المترية *Metric Units* ويتألف من سبع واحدات أساسية في القياس وهي:

✓ المتر (m) في قياس الطول رمزه (l).
✓ الكيلوغرام (kg) في قياس الكتلة رمزه (m).
✓ الثانية (s) في قياس الزمن رمزها (t).
✓ الأمبير (A) في قياس التيار الكهربائي رمزه (I).
✓ الدرجة كالفن (K) في قياس درجة الحرارة رمزها (T).
✓ الكاندلا $(candela = cd)$ في قياس كثافة الإضاءة (كمية الضوء *Luminous Intensity*) رمزها (C).
✓ المول (mol) في قياس المادة *Matter* رمزه (n, N, μ).

- الواحدات الهندسية الإنكليزية *English Engineering System of Units*. ويسمى اختصاراً بنظام الواحدات الإنكليزية *English Units* ويتألف من سبع وحدات أساسية في القياس وهي:

✓ القدم $(foot = ft)$ في قياس الطول رمزه (l).
✓ باوند $(pound - mass = lbm)$ في قياس الكتلة رمزه (m).

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ الثانية (s) في قياس الزمن رمزها (t).
- ✓ الأمبير (A) في قياس التيار الكهربائي رمزه (I).
- ✓ الدرجة رانكين (R) في قياس درجة الحرارة رمزها (T).
- ✓ الكاندلا $(candela = cd)$ في قياس كثافة الإضاءة (كمية الضوء) *Luminous Intensity* رمزها (C).
- ✓ المول (mol) في قياس المادة *Matter* رمزه (n, N, μ).

- الواحدات البريطانية في قياس الثقالة *British Gravitational System of Units, BG*. يتألف هذا النظام أيضاً من سبع وحدات أساسية في القياس وهي:

- ✓ القدم $(foot = ft)$ في قياس الطول رمزه (l).
- ✓ سلغ $(slug)$ في قياس الكتلة رمزه (m).
- ✓ الثانية (s) في قياس الزمن رمزها (t).
- ✓ الأمبير (A) في قياس التيار الكهربائي رمزه (I).
- ✓ الدرجة رانكين (R) في قياس درجة الحرارة رمزها (T).
- ✓ الكاندلا $(candela = cd)$ في قياس كثافة الإضاءة (كمية الضوء) *Luminous Intensity* رمزها (C).
- ✓ المول (mol) في قياس المادة *Matter* رمزه (n, N, μ).

يبين الجدول $(1-1)$ ملخص عن الواحدات الأساسية المستخدمة في كافة العلوم الهندسية. يبين الجدول المقارنة بين الواحدات الأساسية كافة، الدولية والإنكليزية والبريطانية في قياس الثقالة. الواحدات المختلفة بين الأنظمة مبينة بالخط الأسود العريض.

Bassam Badran Damascus University

الجدول (1−1) ملخص عن الواحدات الأساسية.

الواحدات	الدولية	الإنكليزية	البريطانية
الطول (L)	$\boldsymbol{m}$	$\boldsymbol{foot}$	$\boldsymbol{foot}$
الكتلة (m)	$\boldsymbol{kg}$	$\boldsymbol{pound = lbm}$	$\boldsymbol{slug}$
الزمن (t)	s	s	s
درجة الحرارة (T)	$\boldsymbol{K}$	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{R}$
التيار (I)	A	A	A
كثافة الإضاءة (cd)	C	C	C
المول (mol)	n, N, μ	n, N, μ	n, N, μ

2.2.1 **<u>الواحدات المشتقة</u>.** تنتج الواحدات المشتقة من مركبات الواحدات الأساسية وتُستخدم في تعريف خواص (بارامترات) فيزيائية مهمة مثل:

القوة (نيوتن) $Force$ $\qquad Newton = N = kg * m/s^2$

الطاقة (جول) $Energy$ $\qquad Joule = J = N * m$

الضغط (باسكال) $Pressure$ $\qquad Pascal = Pa = N/m^2$

القدرة (واط) $Power$ $\qquad Watt = W = J/s$

يبين **الملحق** (I) والموجود في نهاية الفصل الواحدات المشتقة باسمائها ورموزها وما يكافئها من الواحدات الدولية التي تنتج عنها. يبين الملحق أيضاً الواحدات الدولية السبع المطروحة سابقاً هي <u>الواحدات الأساسية والوحيدة</u> التي يمكن استخدامها لإيجاد أي وحدة مشتقة فمثلاً الفاراد (F) هو وحدة قياس السعة الكهربائية والذي يعطى بالشكل $(m^{-2} * kg^{-1} * s^4 * A^2)$ في الواحدات الدولية.

Bassam Badran
Damascus University

يبين **لملحق** (II) والموجود أيضاً في نهاية الفصل القيم السابقة ($Prefixes$) للواحدات الدولية أو المشتقة فمثلاً عندما يعطى الضغط بالقيمة ($5\,fPa = 5\,femto\,Pascal$) فإن ذلك يعني أن الضغط يكون بقيمة ($5 * 10^{-15}\,Pa$) في الواحدات الدولية النظامية أما عندما يعطى الضغط بقيمة ($5\,YPa = 5\,Yotta\,Pascal$) فتعني أن الضغط ذو قيمة ($5 * 10^{24}\,Pa$) في الواحدات الدولية النظامية.

3.2.1 __واحدات التحويل__ *Converging Units*. واحدات التحويل هي الواحدات التي تربط بين الواحدات الدولية والإنكليزية وأهمها

$$1\,lbm = 0.45359\,kg$$

$$1\,ft = 0.3048\,m$$

$$1\,kgf = 10\,N = 10\,kg\;\;m/s^2$$

$$1\,lbf = 32.174\,lbm\;\;ft/s^2$$

$$1\,calorie\,(cal) = 4.1868\,J$$

$$1Btu\,(British\,thermal\,unit\,) = 1.0551\,kJ$$

$$1\,slug = 32.174\,lbm$$

$$1\,Ton\,(Ton\,Rerigeration) = 12000\frac{Btu}{h} = 3.5kW = 3025\frac{kcal}{h}$$

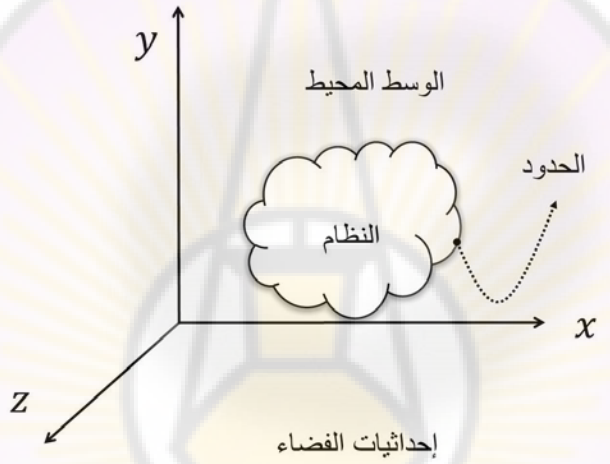
سنتعرف لاحقاً على مقاييس درجات الحرارة وكيفية الربط بينها.

3.1 __النظام المغلق *Closed System* والنظام المفتوح *Open System, Control Volume*.__

هناك مجموعة من التعريفات لكل من النظام المغلق والنظام المفتوح وسنحاول في بداية الأمر الإحاطة بها وفهمها.

Bassam Badran
Damascus University

• <u>النظام *System*</u>. يعرف النظام بأنه منطقة في فضاء معين، بغض النظر عن شكله أو حجمه، يحتوي على كمية معينة من الطاقة و/أو المادة ومحاط بمجموعة من السطوح تقوم على فصل هذا النظام عن محيطه. قد تكون هذه السطوح الفاصلة سطوحاً فيزيائية حقيقية أو سطوحاً افتراضية وهمية وذلك بحسب المنطقة المراد دراستها كما في الشكل (5−1).



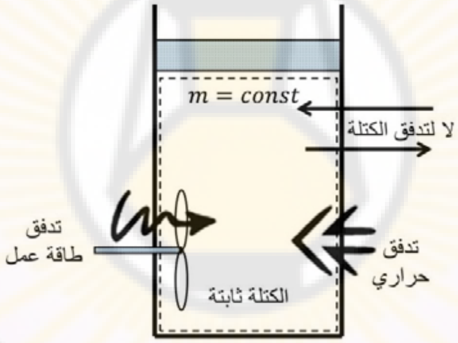
الشكل (5−1) النظام وحدوده ومحيطه.

• <u>الحدود *Boundaries*</u>. تسمى السطوح التي تحيط بالنظام وتفصله عن محيطه بالحدود. هذه السطوح المحيطة بالمنطقة المراد دراستها ترموديناميكياً ليس لها أي خواص فيزيائية وأي سماكة. تكون هذه السطوح في بعض الأحيان <u>ثابتة *Fixed*</u> مثل جدران خزان ماء أو جدران عنفة توربينية وقد تكون <u>متغيرة *Movable*</u> مثل سطوح أسطوانة – مكبس في محركات الاحتراق الداخلي (تتغير حدود المنطقة المراد دراستها نتيجة تحرك المكبس ضمن الأسطوانة). تسمح هذه السطوح للكتلة والطاقة بأشكالها بعبورها دخولاً و/أو خروجاً.

Bassam Badran Damascus University

- الوسط المحيط *Surroundings*. هو الجزء الموجود خارج سطوح المنطقة المراد دراستها (حدود النظام) ويسمى في بعض الأحيان بالوسط الخارجي.

- النظام المغلق *Closed System*. يحتوي النظام المغلق على كتلة ثابتة ($m = const$) غير متجددة ولا يسمح لأي **كتلة** بالعبور عبر حدوده. تكون حدود النظام المغلق إما حدوداً ثابتة مثل خزان ماء يحتوي على كتلة ثابتة من الماء وإما حدوداً متغيرة مثل نظام أسطوانة – مكبس في محرك احتراق داخلي لأيحتوي على صمامات كما في الشكل (6–1). يسمح هذا النظام في كلتا الحالتين **للطاقة فقط** بالتدفق عبر حدوده. عندما لا يسمح النظام بتبادل الطاقة مع الوسط المحيط فيسمى بالنظام المغلق المعزول *Isolated Closed System*.

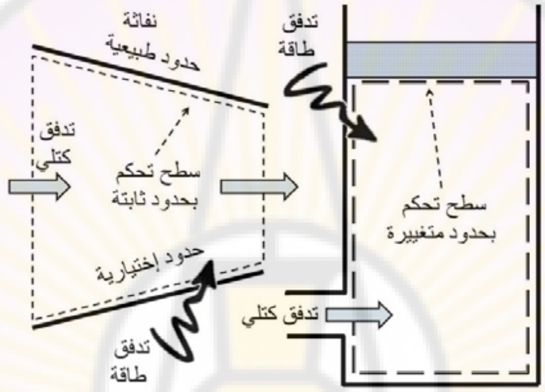


الشكل (6–1) نظام مغلق – حدود مختارة ثابتة أو متحركة – كتلة ثابتة.

- النظام المفتوح *Opened System*. نشير في أغلب التطبيقات الهندسية إلى النظام المفتوح *Opened System* باسم حجم التحكم *Control Volume* ويعطى الرمز (*CV*). يعود سبب تسمية النظام المفتوح بحجم التحكم إلى إمكانية التحكم بحجم المنطقة المدروسة حيث لا يتم فرضها علينا كما هو في النظام المغلق. تسمى السطوح المحيطة

Bassam Badran
Damascus University

بحجم التحكم بسطوح التحكم *Control Surfaces* وتعطى الرمز (CS) وهي سطوح ثابتة لا تتغير كما هو واضح في الشكل (7−1). تسمح سطوح التحكم **<u>للطاقة والكتلة</u>** بالتدفق عبر حدود هذا النظام أي أن الكتلة متغيرة ضمن هذا النظام. نختار حجم التحكم عادة داخل عنصر ميكانيكي (نفاثة) أو جهاز ميكانيكي (ضاغط أو عنفة) حيث يُسمح للكتلة بالتدفق دخولاً <u>و/أو</u> خروجاً عبر حدوده.

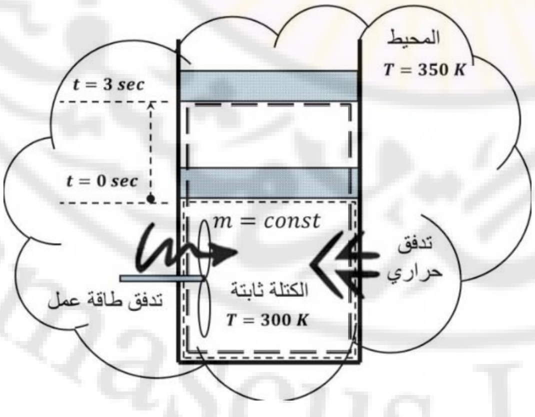


الشكل (7−1) نظام مفتوح – الحدود مختارة ثابتة أو متغيرة والكتلة تتدفق عبر الحدود.

<u>المثال التطبيقي 1−1 – عناصر النظام المغلق.</u>

حدد ماذا يحدث للغاز الموجود داخل نظام أسطوانة – مكبس والموجود في الشكل المرفق عند تستخنيه وخلطه.

الفرضيات: 1) الصمامات غير موجودة 2) سماكة الأسطوانة مهملة 3) الأسطوانة كتيمة.



Bassam Badran
Damascus University

عناصر النظام هي:

1) النظام المدروس (كتلة أو منطقة): الكتلة الموجودة داخل نظام أسطوانة – مكبس هي المعنية في الدراسة.

2) الحدود: السطوح الداخلية للأسطوانة وسطح المكبس هي حدود النظام.

التحليل: بما أن صمامات المكبس غير موجودة والأسطوانة كتيمة فلا يوجد تدفق لأي كتلة دخولاً وخروجاً عبر حدود هذا النظام وبالتالي فالنظام مغلق. في اللحظة الزمنية الابتدائية ($t = 0\ sec$) تبدأ عملية انتقال الحرارة نتيجة وجود فرق في دراجات الحرارة بين المحيط ($T = 350\ K$) والغاز ($T = 300\ K$) وتبدأ عملية الخلط (طاقة عمل) لمزج الغاز. نتيجة انتقال كمية من الحرارة من الوسط المحيط وتحويل الطاقة الحركية الناتجة عن الخلط إلى كمية طاقة حرارية إضافية، يبدأ الغاز بالتمدد إلى حدود اللحظة الزمنية النهائية ($t = 3\ sec$). نلاحظ بأن حدود النظام تغيرت نتيجة تمدد الغاز ولكن لم تتغير كتلته وبقي النظام مغلقاً.

- <u>النظام المركب *Composite System*</u>. يتكون النظام المركب من مجموعة من الأنظمة الجزئية والتي توجد في حالة توازن فيما بينها.

- <u>النظام المتجانس *Homogeneous*</u>. يكون النظام متجانساً عندما يكون التركيب الكيميائي وعلى المستوى الميكروي واحداً والخواص الفيزيائية للمادة المكونة لهذا النظام أيضاً واحدة. مثال على ذلك خزان يحتوي على الماء على شكل سائل (ماء) وعلى شكل بخار (بخار ماء). أما النظام الذي يحتوي على مجموعة من المواد بتراكيب كيميائية مختلفة وفي حالة توازن فيسمى بالنظام غير المتجانس *Heterogeneous*.

Bassam Badran
Damascus University

4.1 الصفات الفيزيائية (البارامترات) لنظام.

هناك مجموعة من الصفات الفيزيائية التي يجب أن نتعرف عليها لتحديد حالة النظام. في أغلب الأحيان نستخدم كلمة بارامتر *Parameter* عوضاً عن الخاصة الفيزيائية لوصف هذه الحالة.

- الصفة الفيزيائية *Property*.

أي صفة مميزة للمادة المكونة لنظام ما تدعى بالخاصة الفيزيائية أو البارامتر. بعض هذه البارامترات معروفة بالنسبة لنا مثل الضغط ودرجة الحرارة والحجم والكتلة وبعضها غير معروف وليس بهذه الشهرة مثل اللزوجة *Viscosity* ومعامل انتقال الحرارة *Thermal Conductivity* ومعامل المرونة *Modulus of Elasticity*.

- البارامترات المستقلة أو البارامترات العامة *Intensive Properties*.

عندما تكون هذه البارامترات غير متعلقة بكتلة النظام ومستقلة عنه تسمى بالبارامترات المستقلة مثل درجة الحرارة (T, K) والضغط (P, Pa) والكثافة $(\rho, kg/m^3)$ والكتلة (m, kg) وتكتب بالصيغة أو الرمز الكبير مثل الحجم (V, m^3). البارمترات التي نتعامل بها في الترموديناميك هي بارمترات قياسية يمكن **قياسها في التجارب** وهي درجة الحرارة (T, K) والضغط (P, Pa) والحجم (V, m^3) وبارمترات حسابية تعتمد على معادلات رياضية معينة مثل الطاقة الداخلية (U, kJ) والإنتالبي (H, kJ) والإنتروبي $(S, kJ/K)$ وطاقة هلمهولتس (A, kJ) وطاقة جبس (G, kJ) كما يلي

$$H = U + PV \qquad kJ$$

$$S = \frac{Q}{T} \qquad kJ/K$$

$$A = U - T * S \qquad kJ$$

$$G = H - T * S \qquad kJ$$

Bassam Badran Damascus University

• البارامترات المرتبطة *Extensive Properties* أو البارامترات النوعية أو البارامترات بالنسبة إلى واحدة الكتل.

عندما تكون هذه البارامترات متعلقة بواحدة كتلة النظام أي غير مستقلة فتسمى بالبارامترات المرتبطة أو البارامترات بالنسبة إلى واحدة الكتل وتعطى اسم البارامترات النوعية *Specific Properties* في أغلب الأحيان وتأخذ الصيغة أو الرمز الصغير مثل الحجم النوعي $(v = V/m)$ و الطاقة النوعية $(e = E/m)$.

• الطور *Phase*.

الطور هو المنطقة التي تكون فيها الخواص الفيزيائية أو بارامترات المادة المكونة للمنطقة واحدة فمثلاً الماء الموجود في حاوية على شكل بخار أو سائل أو صلب (جليد) له خواص فيزيائية واحدة.

• المادة وحيدة الطور *Pure Substance*.

المادة التي يكون التركيب الكيميائي فيها متجانساً في كل الاتجاهات تكون مادة وحيدة الطور. الماء على شكل سائل يشكل مادة وحيدة الطور ولا يمكن اعتبار ماء البحر مادة وحيدة الطور لإنه يحتوي على الملح.

• كتلة المادة *Amount of Matter* وعدد أفوغادرو *Avogadro Number*.

تقاس وتحدد كتلة المادة الموجودة في النظام بعدد الذرات *Molecular Number* المؤلفة لهذه المادة. الطريقة الآخرى في قياس كتلة المادة هي استخدام واحدة المول *Mole Unit*. يعرف المول على أنه:

كتلة أي مادة تحتوي على عدد الذرات نفسها الموجودة
في 12 غرام من الكربون

The mass of substance containing the same number of atoms as there are atoms in exactly 12 grams of C^{12}

$1\ atom\ of\ C^{12}\ weighs\ 12\ amu\ (atomic\ mass\ unit)$

1 gram –atomic weight of C^{12} weighs 12 gram

Bassam Badran
Damascus University

تم اختيار 12 غرام من الكربون كمرجع في قياس كتل كافة العناصر الموجودة في الطبيعة حيث عدد الذرات الموجودة في 12 غرام من الكربون هو بالقيمة التالية $(6.022141 * 10^{23} atom/mol)$ ذرة. يسمى هذا الرقم نسبة إلى مكتشفه بعدد أفوغادرو *Avogadro Number* ويرمز له (N_A) فمثلاً واحد مول من غاز النشارد (NH_3) الذي يحتوي على عدد الذرات نفسه يزن 17 غرام وواحد مول من النحاس الذي يحتوي على عدد الذرات نفسه يزن 63.54 غرام وواحد مول من الهيدروجين (H) الذي يحتوي على عدد الذرات نفسه يزن 1.0079 غرام. تسمى الكتلة المقاسة بحسب عدد الذرات الموجودة في المادة بالكتلة المولية *Molar Mass* أو الكتلة الذرية *Atomic Mass* وتعطى الرمز $(\mu, gram/mol)$. تعطى الكتلة الذرية للمركب أو العنصر بحسب الجدول الدوري للعناصر *Periodic Table* أو جدول ماندلييف *Mendeleev Table*. فعلى سبيل المثال الكتلة الذرية أو الكتلة المولية للماء ذات الصيغة الكيميائية (H_2O) وبحسب الجدول الدوري للعناصر تكون

الكتلة الذرية للهيدروجين $H = 1.007947\ g/mol$

الكتلة الذرية للأوكسجين $O = 15.999\ g/mol$

باستخدام الواحدات الدولية نجد أن

$$\mu_{H_2O} = \left(2 * 1.007947 \frac{g}{mol}\right) + \left(15.999 \frac{g}{mol}\right)$$

$$\mu_{H_2O} = 18.014894\ g/mol$$

أما باستخدام الواحدات الإنكليزية نجد أن

$$\mu_{H_2O} = \left(2 * 1.007947 \frac{lb}{lbmol}\right) + \left(15.999 \frac{lb}{lbmol}\right)$$

$$\mu_{H_2O} = 18.014894\ lb/kmol$$

Bassam Badran Damascus University

- الخليط *Mixture*.

يسمى النظام المؤلف من مجموعة من المركبات أو المكونات البسيطة *Single Component* بالخليط. الهواء على سبيل المثال يتكون من مجموعة من ذرات النتروجين والأوكسجين والأرغون فإذا رمزنا إلى عدد مولات كل عنصر بالرمز (N_k, mol) فيكون عدد مولات الخليط

$$N = \sum_{k=1}^{n} N_k \ (mol)$$

وتكون كتلة الخليط

$$m = \sum_{k=1}^{n} N_k * \mu_k \quad (g)$$

حيث $(\mu_k, g/mol)$ الكتلة المولية للعنصر (k) في الخليط. أما الكتلة المولية للخليط في

$$\mu_{mix} = \frac{m\ (g)}{N\ (mol)}$$

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(N_k * \mu_k)}{N} \quad \left(\frac{g}{mol}\right)$$

سنقوم في الكتاب الثاني بالتعرف على الخلائط الغازية وكيفية حساب باقي خواصها الفيزيائية (بارامتراتها).

المثال التطبيقي 1-2 – كتلة خليط ما.

بفرض أن لدينا خزاناً صلباً يحتوي على خليط غازي يتألف من الغازات التالية $(N_2 = 3.12\ kmol)$ و $(O_2 = 0.84\ kmol)$ و $(Ar = 0.04\ kmol)$ حدد 1) عدد مولات الخليط 2) كتلة الخليط في الخزان و3) الكتلة المولية للخليط.

Bassam Badran
Damascus University

الفرضيات: عناصر الخليط في حالة توازن.

التحليل: عدد المولات الخليط هي

$$N = \sum_{k=1}^{n} N_k$$

$$N = 3.12\ (N_2) + 0.84\ (O_2) + 0.04\ (Ar) = 4\ kmol$$

الكتلة المولية لكل عنصر (الوزن الذري) بحسب جدول العناصر هي

$$\mu_{N_2} = 14.007 * 2 = 28.014\ kg/kmol$$

$$\mu_{O_2} = 15.999 * 2 = 31.998\ kg/kmol$$

$$\mu_{Ar} = 39.948\ kg/kmol$$

$$m = \sum_{k=1}^{n} N_k * \mu_k$$

$$m = \left(3.12\ kmol * 28.014 \frac{kg}{kmol}\right) + \left(0.84 kmol * 31.998 \frac{kg}{kmol}\right) + \left(0.04\ kmol * 39.948 \frac{kg}{kmol}\right)$$

$$m = 115.9\ kg$$

الكتلة المولية هي

$$\mu_{mix} = \frac{m}{N} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(N_k * \mu_k)}{N}$$

$$\mu_{mix} = \frac{115.9\ kg}{4\ kmol}$$

$$\mu_{mix} = 28.975 \frac{kg}{kmol} \cong 29 \frac{kg}{kmol}$$

مناقشة: يمكن أن نعتمد هذه الكتلة المولية للهواء عموماً في كافة المسائل اللأحقة.

Bassam Badran
Damascus University

5.1 الكثافة Density والوزن النوعي Specific Weight.

تعرف الكثافة على إنها كتلة المادة بالنسبة إلى واحدة الحجوم وتعطى بالعلاقة

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left(\frac{kg}{m^3}\right) \qquad (2\text{-}1)$$

أما مقلوب الكثافة فيسمى بالحجم النوعي *Specific volume* والذي يُعرف بأنه حجم المادة بالنسبة إلى واحدة الكتل ويعطى بالعلاقة

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad \left(\frac{m^3}{kg}\right) \qquad (3\text{-}1)$$

إن كثافة مادة ما عموماً تتعلق بدرجة حرارته وضغطه. تتناسب الكثافة في أغلب الغازات طرداً مع الضغط وعكساً مع درجة الحرارة. السوائل والمواد الصلبة هي مواد غير قابلة للانضغاط ومن ثم فإن كثافة هذه المواد لا تتعلق بالضغط وإنما تتعلق فقط بدرجة الحرارة. فمثلا تكون كثافة الماء عند درجة الحرارة $(20°C)$ والضغط $(1\ atm)$ بقيمة $(998\ kg/m^3)$ أما إذا رفعنا الضغط إلى $(100\ atm)$ فترتفع كثافة الماء إلى $(1003\ kg/m^3)$ أي أن التغير هو بحدود 0.5 بالمئة أما إذا رفعنا درجة الحرارة الماء إلى $(75°C)$ فتنخفض الكثافة إلى $(975\ kg/m^3)$ أي أن التغير هو بحدود 2.3 بالمئة. هذه التغييرات في الكثافة نتيجة تغير الضغط أو درجة الحرارة يمكن إهمالها في الحسابات الهندسية ويمكن اعتبار السوائل والمواد الصلبة ذات كثافة ثابتة.

في بعض الأحيان يمكن أن نعبر عن الكثافة بنسبها إلى كثافة مادة أخرى عيارية معروفة وتسمى هذه النسبة بالثقالة النوعية *Specific Gravity (SG)* أو بالكثافة النسبية *Relative Density* وهي بالتالي عدد لابعدي. تُعرف الثقالة النوعية أو الكثافة النسبية على إنها نسبة كثافة مادة ما إلى كثافة مادة عيارية مقاسه عند درجة حرارة معينة. يؤخذ الماء عند درجة حرارة $(4°C)$ عادة على أنه المادة العيارية بكثافة قدرها $(\rho_{H_2o} = 1000\ kg/m^3)$. تعطى علاقة الثقالة النوعية بالشكل

Bassam Badran
Damascus University

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2o}} \qquad (4-1)$$

المواد التي تكون فيها الثقالة النوعية أكبر من الواحد تغرق في الماء والمواد التي تكون فيها الثقالة النوعية أقل من الواحد تطفو على سطح الماء. يُعرف الوزن بالنسبة إلى واحد الحجوم لمادة ما بالوزن النوعي *Specific Weight* ويساوي جداء الكثافة بتسارع الجاذبية الأرضية ويعطى

$$\gamma_s = \rho\ g \qquad \left(\frac{N}{m^3}\right) \qquad (5-1)$$

6.1 **الحالة *State* وشروط التوازن *Equilibrium*.**

- ✓ حالة النظام *State*.

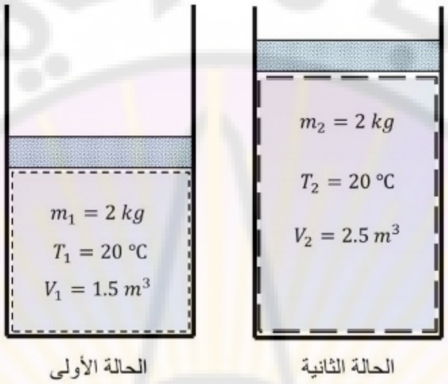
عندما يكون لدينا نظام مستقر أي لا يخضع لأي تغيرات مع الزمن مثل دخول أو خروج طاقة أو كتلة عبر حدوده فيمكننا أن نقيس بارامتراته المستقلة في كل نقطة من نقاطه. هذه البارامترات تبقى ثابتة في حال بقي هذا النظام مستقراً. تصف هذه البارامترات المستقلة والمقاسة حالة النظام *State*. الشكل (8−1) يمثل حالتين لنظام أسطوانة – مكبس. الحالة الأولى تُوصف ببارامترات الكتلة ودرجة الحرارة والحجم الثابتة أما الحالة الثانية فتوصف ببارامترات ثابتة أخرى من كتلة ودرجة الحرارة وحجم.

- ✓ شروط التوازن *Equilibrium*.

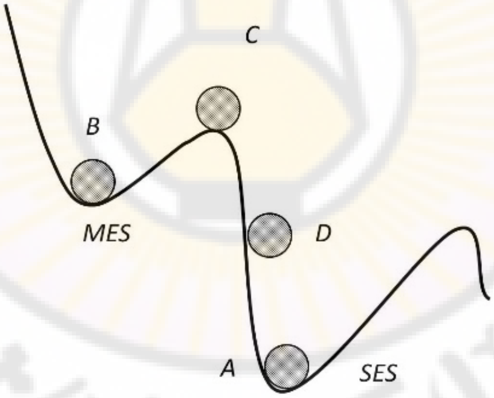
يتعامل علم الترموديناميك مع **الحالات المتوازنة *Equilibrium States* فقط** ولا يدرس الحالات العابرة *Transient States*. يبين الشكل (9−1) حالات التوازن الميكانيكي في حقل الجاذبية الأرضية والمطابقة لحالات التوازن الترموديناميكي. يمكن أن توصف الحالة المتوازنة بعدة حالات مستقرة *Stable* أو نصف مستقرة *Metastable* أو غير

Bassam Badran
Damascus University

مستقرة *Unstable*. النقاط (A,B) تمثل الحالات المستقرة وتمثل النقطة (C) حالة الاستقرار القلق بينما تمثل النقطة (D) الحالة غير المستقرة.



الشكل (8–1) تعريف الحالة.



الشكل (9–1) حالات التوازن.

تمثل النقطة (A) حالة التوازن المستقر *Stable Equilibrium State (SES)* والتي تكون فيها الطاقة أقل ما يمكن لأن أي تغير في وضعها يؤدي إلى عودتها إلى وضعها الابتدائي. يقال عن نظام مغلق إنه يحقق حالة التوازن المستقر عندما تحدث تغييرات في

Bassam Badran Damascus University

بارامتراته ويعود بعد فترة وجيزة من الزمن إلى حالته الابتدائية فمثلاً إذا كان لدينا حوض معزول يحتوي على كمية كبيرة من الماء بدرجة حرارة منخفضة ($5℃$) وتم إضافة كمية صغيرة من الماء وبدرجة حرارة مرتفعة ($40℃$) إلى الحوض فإن درجة حرارة الحوض تبقى ثابتة من دون أي تغيير. تمثل النقطة (B) حالة التوازن النصف مستقر *Metastable Equilibrium State (MES)* وتنتقل هذه الحالة إلى حالة التوازن المستقر والممثلة بالنقطة (A) عند حدوث تغييرات كبيرة نسبياً في وضعها. تمثل النقطة (C) حالة التوازن القلق حيث تنتقل هذه الحالة إلى حالة التوازن المستقر والممثلة بالنقاط (A, B) عند حدوث تغييرات صغيرة جداً. يمكن أن نستنتج أن حالة التوازن المستقر تعني ثبات بارامترات النظام عند قيم معينة من دون أي تغيير. أيضاً يمكن أن نصف حالة التوازن المستقر بعدم وجود أي قوى محركة تعمل على تغيير حالة توازنه مثل اختلاف في الضغط (قوى ميكانيكية) أو درجة الحرارة (قوى حرارية) لهذا النظام.

- ✓ نظام متوازن حرارياً *Thermal Equilibrium*.

نقول عن نظام إنه متوازن حرارياً عندما تكون درجة الحرارة في نقاطه كافة متساوية (تتم عملية تدفق كمية من الحرارة في حالة وجود فروق في درجات الحرارة = قوى محركة).

- ✓ نظام متوازن ميكانيكياً *Mechanical Equilibrium*.

نقول عن نظام إنه متوازن ميكانيكياً عندما تكون قيم الضغط (القوى المحركة) ضمن هذا النظام متساوية في نقاطه كافة.

- ✓ نظام متوازن طورياً *Phase Equilibrium*.

نقول عن نظام إنه متوازن طورياً عند درجة حرارة معينة وضغط معين عندما ينعدم تبادل الكتلة *Mass Transport* بين أطواره.

- ✓ نظام متوازن كيميائياً *Chemical Equilibrium*.

نقول عن نظام إنه متوازن كيميائياً عندما يبقى التركيب الكيميائي لهذا النظام من دون أي تغيير وبالتالي لا يوجد أي تفاعل كيميائي بين مكونات عناصر هذا النظام.

Bassam Badran Damascus University

7.1 الصفة المميزة للحالة *The State Postulate*.

يمكن وصف حالة النظام وتحديدها من خلال معرفة بارامتراته ولكننا نعرف بأنه لا توجد حاجة إلى معرفة كافة البارامترات المستقلة لوصف الحالة. ويكفي معرفة بعض البارامترات المستقلة لتحديد باقي البارامترات الآخرى وبشكل آلي. عدد البارامترات التي تكفي لوصف حالة نظام تسمى بالصفة المميزة للحالة. تعرف الصفة المميزة للحالة كما يلي:

توصف حالة نظام بسيط قابل للانضغاط كلياً بتحديد بارامترين مستقلين عامين

"The state of a simple compressible system is completely specified by two independent, intensive properties"

يعرف النظام البسيط القابل للانضغاط على إنه نظام لا تؤثر فية قوى كهربائية أو مغناطيسية أو ثقالية أو حركية أو قوى توتر سطحية. وإذا وجدت هذه القوى في النظام فيجب تحديد بارامتر آخر لتحديد الصفة المميزة للحالة فمثلا عند وجود تأثير لقوى الثقالة على النظام فيجب علينا أن نقوم بتحديد بارامتر الارتفاع بالإضافة إلى بارامترين آخرين لتحديد الصفة المميزة للحالة.

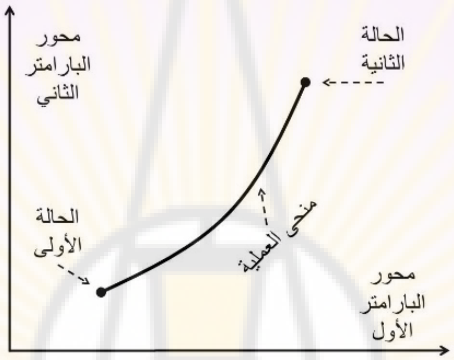
8.1 العمليات *Processes* والدورات *Cycles*.

- العملية *Process*.

عندما يقوم النظام بالانتقال من حالة متوازنة مستقرة إلى حالة أخرى متوازنة مستقرة نقول إنه خضع إلى عملية *Process* ويسمى الطريق الذي يمر به هذا النظام خلال العملية بمنحى *Path* العملية كما هو الشكل (1−10). تسمى العملية التي ينتقل

Bassam Badran
Damascus University

فيها نظام ما عبر منحى معين **<u>وبخطوات صغيرة جداً وذات أزمنة طويلة جداً</u>** بحيث يبقى فيها هذا النظام عند انتقاله من خطوة إلى أخرى بحالة توازن مستقر <u>بالعملية الشبه ستاتيكية *Quasi-Static* أو بالعملية الشبه متوازنة *Quasi-Equilibrium*</u>. كافة العمليات التي يقوم بها نظام مغلق أو مفتوح تعتمد في دراستها على العملية الشبه متوازنة أو الشبه ستاتيكية.



الشكل (1−10) العملية ومنحها.

يوضح الشكل (1−11) العملية الشبه متوازنة لنظام أسطوانة – مكبس يخضع لعملية الانضغاط تتم بخطوات قصيرة جداً على منحى عملية ما وخلال أزمنة طويلة جداً بين الخطوات لمنع أي تغييرات مفاجئة ضمن المادة المدروسة. الأزمنة الطويلة كافية لعودة المادة بعد تحرك المكبس خطوة صغيرة إلى حالتها الأولية. حركة المكبس بشكل سريع يؤدي إلى تشكل ضغوط مختلفة ضمن النظام (ضغط عالي على سطح المكبس وضغط منخفض بعيداً عن المكبس). يجب التذكير بأن العملية الشبه متوازنة هي عملية مثالية غير قابلة للتطبيق على أرض الواقع ولكن المهندسين يهتمون في هذه العمليات لسببين الأول هو إنها سهلة الدراسة والثانية هي أن هذه العمليات تنتج عملاً أعظمياً بالمقارنة مع الحالات الحقيقية. نستخدم في بعض العمليات "**السابقة أيزو**" $(Iso\, prefix)$

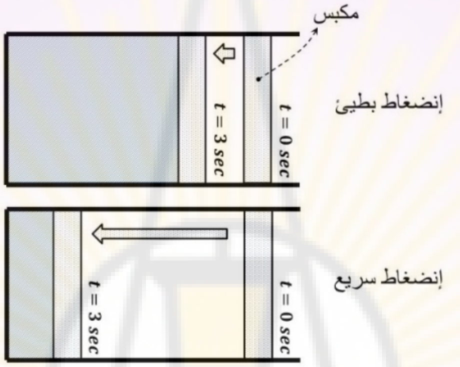
Bassam Badran Damascus University

لوصف العملية وتستخدم هذه "السابقة" للتعبير عن ثبات بارامتر ما خلال هذه العملية فمثلاً

i.العملية الإيزوثرمية ***Iso**thermal Process* تبقى فيها درجة الحرارة ثابتة.

ii.العملية الإيزوخورية ***Iso**choric Process* يبقى فيها الحجم النوعي ثابتاً.

iii.العملية الإيزوبارية ***Iso**baric Process* يبقى فيها الضغط ثابتاً.



الشكل (1-11) عملية انضغاط بطيئ وسريع.

- <u>الدورة *Cycle*</u>.

نقول إن نظاماً ما يقوم بدورة إذا عاد إلى حالته الابتدائية في نهاية إتمام العملية أي أن بارامترات الحالة الابتدائية تساوي بارامترات الحالة النهائية.

- <u>الحالة المستقرة *Steady State*</u>.

تعرف الحالة المستقرة على بأنها حالة لا يحدث فيها أي تغيرات مع الزمن أما الحالة غير المستقرة *Unsteady State* فهي عكس الحالة المستقرة تتغيير مع الزمن. عدد كبير من الأجهزة الهندسية يعمل على جريانات مستقرة *Steady Flow Devices* حيث تتم عملية تدفق مادة ما عبر حجم التحكم وسطحه بشكل مستقر *Steady Flow Process*.

• وسيط التشغيل *Working Fluid*.

المادة التي تستعمل ضمن النظام المغلق أو المادة التي تتدفق عبر حدود النظام المفتوح تسمى بوسيط التشغيل. قد يكون وسيط التشغيل ذا طور واحد مثل سائل أو غاز ولا يمكن أن يكون مادة صلبة.

9.1 مقاييس درجة الحرارة.

يتم قياس درجة الحرارة في النظام الدولي باستخدام تدريجة سيليزوس *Celsius Scale* أما في النظام الإنكليزي فيتم استخدام تدريجة فهرنهايت *Fahrenheit Scale*. في تدريجات سيليزوس تكون درجة حرارة تجمد الماء هي (0°C) ودرجة حرارة غليان الماء هي (100°C) أما في تدريجات فهرنهايت فهي (32°F) لتجمد الماء و (212°F) لغليان الماء. تستخدم في أغلب الأحيان تدريجة مرجعية مستقلة لاعلاقة لها بالمادة المستخدمة في قياس درجة الحرارة وتسمى هذه التدريجة بتدريجة الحرارة الترموديناميكية *Thermodynamic Temperature Scale* وتسمى هذه التدريجة المستقلة في النظام الدولي بتدريجة كالفن *Kelvin Scale* وتعطى الرمز (K) أما في النظام الإنكليزي فتسمى بتدريجة رانكين *Rankine Scale* وتعطى الرمز (R). تعطى العلاقات التي تربط بين تدريجة كالفن وسيليزوس ورانكين وفهرنهايت بالشكل التالي

$$T(K) = T(°C) + 273.15 \qquad (6\text{-}1)$$

$$T(R) = T(°F) + 459.67 \qquad (7\text{-}1)$$

$$T(R) = (9/5) * T(K) \qquad (8\text{-}1)$$

$$T(°F) = (9/5) * T(°C) + 32 \qquad (9\text{-}1)$$

يجب الانتباه إلى أن التغيير في درجات الحرارة في تدريجة كالفن يساوي التغيير في درجات الحرارة في تدريجة سليزوس أيضاً وكذلك الأمر التغييرات في تدريجة رانكين وفهرنهايت

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta T(K) = \Delta T(°C) \qquad (10\text{-}1)$$

$$\Delta T(R) = \Delta T(°F) \qquad (11\text{-}1)$$

10.1 القانون الصفري في الترموديناميك

(*The Zeroth Law of Thermodynamics*).

أعطي هذا القانون اسم "القانون الصفري" لأنه يأتي قبل القانون الأول والثاني في الترموديناميك حيث قام على وضعه العالم فولر *Fowler* في عام 1931. يقول القانون الصفري في الترموديناميك إنه إذا وجد جسمان (غير متصلان) في حالة توازن حراري مع جسم ثالث فإن هذين الجسمين يكونان في حالة توازن حراري فيما بينهما. يمكن أن نعطي هذا القانون صيغة أخرى لها علاقة بدرجة الحرارة والتي تقول إنه إذا وجد جسمان في حالة توازن حراري مع جسم ثالث فيجب أن تكون درجة حرارة كل منهما متساوية. هذا القانون هو الأساس في قياس بارامتر درجة الحرارة حيث يكون الجسم الثالث في هذه الحالة ميزان الحرارة *Thermometer*.

Bassam Badran
Damascus University

ملخص فصل تعاريف ومفاهيم ترموديناميكية

- الترموديناميك هو العلم الذي يتعامل مع الطاقة بأشكالها كافة (عمل وحرارة وكتلة).
- القانون الأول في الترموديناميك ينتج من قانون انحفاظ الطاقة ويؤكد بأن الطاقة هي خاصة ترموديناميكية جبرية.

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

- القانون الثاني في الترموديناميك يؤكد بأن الطاقة لها قيمة نوعية وكمية معاً وكافة العمليات تحدث في اتجاه تناقص نوعية الطاقة.
- هناك نوعان من الأنظمة، المغلقة التي لا تخترق الكتلة حدودها و المفتوحة التي يتم تبادل الكتلة عبر حدودها.
- يعبر عن البارامترات (الخواص) بشكلين، الأول غير متعلق بالكتلة ويسمى بالبارامتر المستقل والثاني مرتبط بالكتلة ويسمى بالبارامتر النوعي.
- تُعرف الثقالة النوعية أو الكثافة النسبية بأنها نسبة كثافة مادة ما إلى كثافة مادة عيارية مستقلة عند درجة حرارة معينة

$$SG = \rho / \rho_{H_2o}$$

- يُعرف الوزن بالنسبة إلى واحد الحجوم لمادة ما بالوزن النوعي *Specific Weight* ويساوي جداء الكثافة بتسارع الجاذبية الأرضية.

$$\gamma_s = \rho\, g \qquad (N/m^3)$$

- يقال عن النظام إنه متوازن ترموديناميكياً إذا حافظ على التوازن الحراري والميكانيكي والكيميائي.
- عندما يكون النظام مستقراً ولا يخضع لأي تغييرات مع الزمن فيمكننا أن نقيس بارامتراته المستقلة في كل نقطة من نقاطه. هذه البارامترات تسمى الحالة.

Bassam Badran
Damascus University

- توصف حالة نظام بسيط قابل للانضغاط كلياً بتحديد بارامترين مستقلين عامين وتسمى الصفة المميزة للحالة.
- انتقال النظام من حالة إلى آخرى تسمى بالعملية وعندما تنطبق الحالة الابتدائية على الحالة النهائية فتسمى دورة.
- في الحالة الشبه ستاتيكية أو الشبه متوازنة يكون النظام في حالة توازن دائماً.
- تدريجة درجة الحرارة في النظام الدولي هي سيليزوس وفي النظام الإنكليزي هي فهرنهايت.
- تدريجة الحرارة الترموديناميكية *Thermodynamic Temperature Scale* هي تدريجة مرجعية مستقلة عن نوعية المادة المقاسة. في النظام الدولي تسمى بتدريجة كالفن *Kelvin Scale* وتعطى الرمز (K) أما في النظام الإنكليزي فتسمى بتدريجة رانكين *Rankine Scale* وتعطى الرمز (R).
- يمكن الربط بين تدريجة كالفن وتدريجة رانكين بالعلاقات

$$T(K) = T(°\text{C}) + 273.15$$

$$T(R) = T(°\text{F}) + 459.67$$

$$T(R) = (9/5) * T(K)$$

$$T(°\text{F}) = (9/5) * T(°\text{C}) + 32$$

- القانون الصفري في الترموديناميك يقول إن أي جسمين في حالة توازن حراري يكون لهما درجة الحرارة نفسها حتى في حال عدم اتصالهما.

Bassam Badran
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

تعاريف ومفاهيم ترموديناميكية

1. استخدام الواحدات الدولية في استنتاج وحدات الضغط بمختلف أشكالها.
2. استخدام الواحدات الإنكليزية لتحويل الضغط $(1\ bar)$ إلى (lbf/ft^2).
3. الحرارة النوعية للهواء عند ضغط ثابت هي $(1.005\ kJ/kgK)$ عند درجة حرارة $(25℃)$، أوجد هذه الحرارة النوعية بالواحدات التالية 1) (J/kgK) 2) $(J/kg℃)$ 3) $(kcal/kg℃)$ و4) $(btu/lbm℉)$.
4. تستخدم استطاعة كهربائية بمقدار $(4kW)$ في تسخين ماء لمدة ساعتين، حدد الطاقة الكهربائية المستهلكة بوحدات (kWh) و (kJ).
5. يقف رجل يزن $(210\ lbf)$ في موقع ما حيث يكون فيه تسارع الجاذبية الأرضية $(g = 32.10\ ft/s^2)$ حدد وزن ذاك الرجل عندما يقف على سطح القمر حيث تسارع الجاذبية الأرضية $(g = 5.47\ ft/s^2)$.
6. حدد كتلة ووزن الهواء الموجود في غرفة بأبعاد $(6m * 6m * 8m)$ بفرض أن كثافة الهواء هي $(1.16\ kg/m^3)$ وتسارع الجاذبية الأرضية هي $(g = 32.10\ ft/s^2)$.
7. رتب المواد التالية بحسب الثقالة النوعية من الأعلى إلى الأدنى. بنزين ذو كثافة $(874\ kg/m^3)$ وزيت تسخين بكثافة $(920\ kg/m^3)$ ماء بكثافة $(1000\ kg/m^3)$ غليكوز بكثافة $(1440\ kg/m^3)$ بروميد بكثافة $(3120\ kg/m^3)$.
8. هل يختلط النفط الخام ذو الكثافة $(890\ kg/m^3)$ بالماء، استخدم الثقالة النوعية (الكثافة النسبية) في تحديد ذالك.
9. حدد الوزن النوعي لكل من الماء والنفط الخام بواحدات (N/m^3) و (lbf/ft^3).
10. يوجد لدينا هواء بدرجة حرارة وقدرها $(25℃)$ أعط هذه الدرجة بالكالفن والفرهنهايت والرانكين.

Bassam Badran
Damascus University

ملحق فصل تعاريف ومفاهيم ترموديناميكية

I.ملحق الواحدات المشتقة.

توجد في هذا الملحق مجموعة من الواحدات المشتقة بأسمائها العربية والإنكليزية ورموزها والواحدات الدولية المشتقة منها.

الوحدة المشتقة باللغة العربية	الوحدة المشتقة باللغة الإنكليزية	الاسم	رمز	الواحدات الدولية
زاوية في سطح	*plane angle*	*radian*	*rad*	$m \cdot m^{-1} = 1$
زاوية من كرة	*solid angle*	*steradian*	*sr*	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
تردد	*frequency*	*hertz*	*Hz*	s^{-1}
القوة	*force*	*newton*	*N*	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
الضغط، الإجهاد	*pressure, stress*	*pascal*	*Pa*	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
الطاقة، العمل، كمية الحرارة	*energy, work, quantity of heat*	*joule*	*J*	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
القدرة	*power*	*watt*	*W*	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$s\cdot A$	*C*	*coulomb*	*electric charge, quantity of electricity*	الشحنة الكهربائية، كمية الكهرباء
$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-1}$	*V*	*volt*	*Electric potential difference, electromotive force*	فرق الكمون، القوة المحركة الكهربائية
$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^{4}\cdot A^{2}$	*F*	*farad*	*capacitance*	المكثفة
$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-3}\cdot A^{-2}$		*ohm*	*electric resistance*	المقاومة الكهربائية
$m^{-2}\cdot kg^{-1}\cdot s^{3}\cdot A^{2}$	*S*	*siemens*	*electric conductance*	التوصيل الكهربائي
$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$	*Wb*	*weber*	*magnetic flux*	التدفق المغناطيسي
$kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$	*T*	*tesla*	*magnetic flux density*	كثافة التدفق المغناطيسي
$m^{2}\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$	*H*	*henry*	*inductance*	ملف تحريضي
K	*°C*	*degree Celsius*	*Celsius temperature*	درجة السيليزيوس
$m^{2}\cdot m^{-2}\cdot cd = cd$	*lm*	*lumen*	*luminous flux*	تدفق الإضاءة
$m^{2}\cdot m^{-4}\cdot cd = m^{-2}\cdot cd$	*lx*	*lux*	*illuminance*	الإضاءة

Bassam Badran
Damascus University

s^{-1}	*Bq*	*becquerel*	*activity (of a radionuclide)*	النشاط في النويات المشعة
$m^2 \cdot s^{-2}$	*Gy*	*gray*	*absorbed dose, specific energy (imparted)*	الجرعة الممتصة، كمية الطاقة
$m^2 \cdot s^{-2}$	*Sv*	*sievert*	*dose equivalent*	الجرعة المكافئة
$s^{-1} \cdot mol$	*kat*	*katal*	*catalytic activity*	التفاعل المحفز

الجدول السابق يعطي بعض الواحدات المعروفة بدلالة الواحدات الأساسية المترية.

II. رموز الملحقات بالواحدات الدولية. رموز الملحقة *Prefixes* والتي تضاف إلى الواحدات الدولية.

الرمز	الاسم	القيمة	
y	*Yocto*	10^{-24}	0.000 000 000 000 000 000 000 001
z	*Zepto*	10^{-21}	0.000 000 000 000 000 000 001
a	*Atto*	10^{-18}	0.000 000 000 000 000 001
f	*Femto*	10^{-15}	0.000 000 000 000 001
p	*Pico*	10^{-12}	0.000 000 000 001
n	*Nano*	10^{-9}	0.000 000 001
µ	*Micro*	10^{-6}	0.000 001
m	*Milli*	10^{-3}	0.001
C	*Centi*	10^{-2}	.010
d	***Deci***	$\mathbf{10^{-1}}$	**0.1**

Bassam Badran Damascus University

da	***Deca***	$\mathbf{10^1}$	**10**
h	*Hecto*	10^2	100
k	*Kilo*	10^3	1000
M	*Mega*	10^6	1000 000
G	*Giga*	10^9	1000 000 000
T	*Tera*	10^{12}	1000 000 000 000
P	*Peta*	10^{15}	1000 000 000 000 000
E	*Exa*	10^{18}	1000 000 000 000 000 000
Z	*Zetta*	10^{21}	1000 000 000 000 000 000 000
Y	*Yotta*	10^{24}	1000 000 000 000 000 000 000 000

III. ملحق معادلات رياضية.

في الفصول القادمة في هذا الكتاب سوف نتعرف على مجموعة من المعادلات الرياضية الضرورية في فهم القوانين الترموديناميكية.

1. التوابع المباشرة *Explicit Functions* وغير المباشرة *Implicit Functions* والتفاضل الكلي *Total Differentiation*.

إذا كان لدينا تابع (P) لدرجة الحرارة الحجم النوعي فيكون التابع مباشراً إذا كان

$$P = P(T, v)$$

والتفاضل الكلي يكون

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dT$$

فمثلاً التابع

$$P = \frac{RT}{(v-b)} - \frac{a}{v^2}$$

Bassam Badran Damascus University

حيث (a,b) ثوابت التابع هو تابع مباشر لوجود علاقة واضحة بين الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي. إذا أردنا أن نجد تابع الحجم النوعي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة يتبين لنا أن ذلك التابع هو تابع غير مباشر لأننا لا يمكن أن نجد صيغة واضحة لعلاقة الحجم النوعي مع درجة الحرارة والضغط كما في الشكل

$$P * v^3 - (bP + RT)v^2 + av - ab = 0$$

هذه الصيغة قد تكون في بعض الأجيان صعبة الحصول فكيف نجد مثلاً

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

بأخذ علاقة التابع المباشر نجد أن

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2v}{v^3} = M(T,v)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{(v-b)} = N(T,v)$$

بالتعويض في المعادلة نجد أن

$$dP = \left[-\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}\right]_T dv + \left[\frac{R}{(v-b)}\right]_v dT$$

نستخدم المعادلة السابقة في تحديد تفاضل الحجم النوعي مع درجة الحرارة عند ضغط ثابت. عند ضغط ثابت تتحول المعادلة السابقة إلى

$$0 = \left[-\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}\right]_T dv + \left[\frac{R}{(v-b)}\right]_v dT$$

بترتيب المعادلة بالشكل التالي

$$\left(\frac{dv}{dT}\right)_P = \frac{\frac{R}{(v-b)}}{-\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}} = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

2. التفاضل التام *Exact Differential*. يستخدم التفاضل التام للتابع (P) ذات العلاقة

Bassam Badran Damascus University

$$P = P(T, v)$$

والتفاضل الكلي

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dT$$

$$dP = M(T, v)\, dv + N(T, v)\, dT$$

حيث

$$M(T, v) = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2v}{v^3}$$

$$N(T, v) = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{(v-b)}$$

يكون التفاضل تام عندما يكون

$$\frac{\partial M(T, v)}{\partial T} = \frac{\partial N(T, v)}{\partial v} = -\frac{R}{(v-b)^2}$$

أو

$$\frac{\partial}{\partial T}\left[\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T\right] = \frac{\partial}{\partial v}\left[\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v\right]$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial T \partial v} = \frac{\partial^2 P}{\partial v \partial T}$$

بما أن التفاضل التام محقق وبتعويض الضغط بقيمة ثابتة نجد أن

$$0 = M(T, v)\, dv + N(T, v)\, dT$$

وبالتالي

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{-M(T, v)}{N(T, v)} = \frac{-\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v}{\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T} = \frac{\frac{R}{(v-b)}}{-\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}}$$

وهي النتيجة السابقة نفسها. يمكن حساب باقي البارامترات باستخدام علاقة التفاضل التالية

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -1$$

Bassam Badran
Damascus University

الفصل الثاني

Chapter Two

انتقال الطاقة وتحليلها

Energy Transfer & Energy Analysis

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A_c	سطح التدفق	m^2
A	سطح مقطع	m^2
E	الطاقة الكلية	J
E_{mass}	طاقة الكلية الناتجة عن تدفق كتلة عبر حدود نظام	J
E_{in}	الطاقة الكلية الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
E_{out}	الطاقة الكلية الخارجة إلى نظام عبر حدوده	J
E_{gen}	الطاقة الكلية المولدة ضمن النظام	J
E_{final}	الطاقة الكلية النهائية	J
$E_{initial}$	الطاقة الكلية الابتدائية	J
ΔE	التغيير في الطاقة الكلية خلال عملية	J
ΔE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية خلال عملية لنظام	J
dE	التغيير في الطاقة الكلية بخطوة صغيرة	J
dE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية بخطوة صغيرة لنظام	J
dE_{cv}	التغيير في الطاقة الكلية بخطوة صغيرة لحجم تحكم	J
$\dot{E}$	معدل التغيير في الطاقة الكلية	W
$\dot{E}_{gen}$	معدل تغيير الطاقة الكلية المولدة ضمن النظام	W

Bassam Badran
Damascus University

$\dot{E}_{in}$	معدل تغيير الطاقة الكلية الداخلة إلى نظام عبر حدوده	W
$\dot{E}_{out}$	معدل تغيير الطاقة الكلية الخارجة إلى نظام عبر حدوده	W
$\Delta\dot{E}$	معدل التغيير في الطاقة الكلية	W
e	الطاقة الكلية النوعية	J/g
e_{mech}	الطاقة الميكانيكية الكلية النوعية	J/g
Δe_{mech}	التغيير في الطاقة الميكانيكية النوعية	J/g
F	القوة	N
$\vec{F}$	شعاع القوة	N
F_{1-2}	معامل الشكل في معادلة ستيفان – بولتزمان للإشعاع	لابعدي
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
h	معامل انتقال الحرارة	W/m^2K
I	التيار الكهربائي	$Ampere$
KE	الطاقة الحركية	J
ke	الطاقة الحركية النوعية	J/g
ΔKE	التغيير في الطاقة الحركية	J
k	ثابت النابض	N/m
k	معامل التوصيل الحراري	$W/m\,K$

Bassam Badran Damascus University

L	مسافة انتقال الحرارة	m
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
dm	التغيير في الكتلة بكمية قليلة	kg
N	كمية الشحنة الكهربائية	$Coulomb$
n	عدد الدورات	RPM
P	الضغط	bar أو kPa
PE	الطاقة الكامنة	J
pe	الطاقة الكامنة النوعية	J/g
ΔPE	التغيير في الطاقة الكامنة	J
Q	كمية الحرارة	J
Q_{in}	كمية الحرارة الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
Q_{out}	كمية الحرارة الداخلة من نظام عبر حدوده	J
dQ	التغيير في كمية الحرارة وبشكل صغير	J
q	كمية الحرارة النوعية	J/g
$\dot{Q}$	معدل تغيير كمية الحرارة	W
$\dot{q}$	معدل تغيير كمية الحرارة النوعية	W/g
$\dot{q}$	التدفق الحراري	W/m^2

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

W	معدل تغيير كمية الحرارة الداخلة إلى نظام عبر حدوده	$\dot{Q}_{in}$
W	معدل تغيير كمية الحرارة الخارج من نظام عبر حدوده	$\dot{Q}_{out}$
Ohm	المقاومة الكهربائية	R
m	نصف قطر	r
m	المسافة	s, x
m	التغيير في المسافة	dx
m	التغيير في شعاع المسافة بخطوة صغيرة	$d\vec{s}$
$N * m$	العزم	T
K أو $°C$	درجة الحرارة	T
K أو $°C$	درجة حرارة سطح جسم	T_s
K أو $°C$	درجة حرارة غاز متحرك	T_∞
K أو $°C$	تغيير درجة الحرارة	ΔT
s	الزمن	t
s	التغيير في الزمن خلال خطوة صغيرة	dt
s	التغيير في الزمن خلال عملية ما	Δt
J	الطاقة الداخلية	U
J/g	الطاقة الداخلية النوعية	u

Bassam Badran Damascus University

ΔU	التغيير في الطاقة الداخلية	J
V	الحجم	m^3
dV	التغيير في الحجم بخطوة صغيرة	m^3
ΔV	التغيير في الحجم خلال عملية	m^3
V	السرعة	m/s
$\vec{V}$	شعاع السرعة	m/s
$d\vec{V}$	التغيير في شعاع السرعة	m/s
V_{avg}	السرعة الوسطية	m/s
V	فرق الكمون	$Volt$
$\dot{V}$	التدفق الحجمي	m^3/s
v	الحجم النوعي	m^3/kg
W	العمل الكلي	J
W_{12}	العمل خلال العملية $(2 \rightarrow 1)$ وهو يساوي العمل الكلي	J
δW	التغيير في العمل الكلي بخطوة صغيرة	J
w	العمل النوعي	J/g
$\dot{W}$	معدل تغيير العمل أو القدرة $Power$	W
$\dot{w}$	معدل تغيير العمل النوعي	J/g
W_{in}	العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	J

Bassam Badran
Damascus University

$\dot{W}_{in}$	معدل تغيير العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	W
W_{out}	العمل الخارج من نظام عبر حدوده	J
$\dot{W}_{out}$	معدل تغيير العمل الخارج من نظام عبر حدوده	W
W_{sh}	عمل محور دوران *Shaft*	J
$\dot{W}_{sh}$	معدل تغيير عمل محور دوران *Shaft*	W
W_{spring}	عمل النابض	J
W_e	العمل الكهربائي	J
$\dot{W}_e$	معدل تغيير عمل مقاومة كهربائية = الطاقة الكهربائية	W
W_b	عمل الحدود أو عمل تمدد أو انضغاط	J
W_{net}	العمل الصافي	J
W_{solid}	عمل تمدد جسم صلب	J
z	الارتفاع	m
Δz	التغيير في الارتفاع	m
ρ	الكثافة	kg/m^3
σ	معامل ستيفان – بولتزمان	W/m^2K^4
σ	معامل الإجهاد الناظمي	N/m^2

Bassam Badran
Damascus University

مقدمة الفصل.

يمكن أن نعرف الطاقة *Energy* على إنها قدرة أي نظام فيزيائي على أداء عمل ما أو إحداث تغيير ما. توجد الطاقة في الطبيعة بأشكال مختلفة فقد تكون هذه الطاقة على شكل طاقة حرارية أو طاقة ميكانيكية أو طاقة كهربائية أو طاقة كيميائية أو طاقة ذرية ويمكن أن نعد الكتلة أيضاً شكلاً من أشكال الطاقة بحسب قانون إنشتاين للطاقة. في النظام المغلق (كتلة ثابتة) تنتقل الطاقة من وإلى النظام بشكلين، الشكل الأول هو كمية حرارة *Heat* والشكل الثاني هو عمل *Work* أما في النظام المفتوح فتنتقل الطاقة من وإلى النظام بثلاثة أشكال، الشكل الأول هو كمية حرارة والشكل الثاني هو عمل والشكل الثالث هو الطاقة المرافقة لتدفق الكتلة *Mass Flow* دخولاً وخروجاً عبر سطح تحكم هذا النظام. تنتقل كمية الحرارة من وإلى أي نظام بفعل فرق درجات الحرارة بين المادة الموجودة داخل النظام ومحيطه. ينتقل العمل من وإلى النظام بواسطة قوى محركة خارجية وفي بعض الأحيان يكون هذا العمل ناتجاً عن تغيير حدود النظام كما في النظام المغلق ويسمى هذا العمل بعمل الحدود *Boundary Work*.

<u>الفائدة العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تعريف الطاقة وأشكالها.
- ✓ مناقشة فكرة الطاقة الداخلية.
- ✓ تعريف كمية الحرارة والمصطلحات المرافقة لعملية انتقال الطاقة على شكل كمية الحرارة.
- ✓ مناقشة طرق انتقال كمية الحرارة كالتوصيل والحمل والإشعاع.
- ✓ تعريف مبدأ العمل.
- ✓ التعرف على أنواع العمل بما في ذلك العمل الكهربائي والأعمال الميكانيكية.
- ✓ تحديد اتجاهات كمية الحرارة والعمل الموجبة بحسب عرف الاتجاهات.
- ✓ التعرف على القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة والمفتوحة.

Bassam Badran
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.2	أشكال الطاقة.	70
2.2	انتقال الطاقة على شكل كمية حرارة.	81
3.2	أشكال انتقال الحرارة.	83
4.2	انتقال الطاقة على شكل عمل.	89
5.2	أشكال العمل.	90
1.5.2	العمل الكهربائي.	90
2.5.2	العمل الميكانيكي.	91
1.2.5.2	عمل التمدد والانضغاط.	91
2.2.5.2	عمل محور الدوران.	96
3.2.5.2	عمل النابض.	99
4.2.5.2	عمل تمدد جسم صلب.	100
6.2	عرف الاتجاهات لانتقال الطاقة.	102
7.2	قانون انحفاظ الطاقة.	104
1.7.2	قانون انحفاظ الطاقة للأنظمة المغلقة.	108
2.7.2	قانون إنحفاظ الطاقة للأنظمة المفتوحة.	108
	ملخص الفصل.	110
	مسائل غير محلولة.	113
	نهاية الفصل.	118

Bassam Badran
Damascus University

1.2 أشكال الطاقة.

يمكن للطاقة أن توجد في الطبيعة بأشكال مختلفة فقد تكون طاقة حرارية أوطاقة ميكانيكية أوطاقة حركية أوطاقة كامنة أوطاقة كهربائية أوطاقة مغناطيسية أوطاقة كيميائية أوطاقة نووية. مجموع هذه الطاقات يساوي الطاقة الكلية *Total Energy* لأي نظام. تعطى الطاقة الكلية بالرمز (E,J) أما الطاقة الكلية النوعية *Specific Total Energy* والتي تُعرف بالطاقة الداخلية بالنسبة إلى واحدة الكتل فتعطى بالعلاقة

$$e = \frac{E}{m} \qquad \left(\frac{J}{g}\right) \tag{1-2}$$

يهتم علم الترموديناميك بتحديد التغيير في الطاقة الكلية فقط *Total Energy Change*, (ΔE) أو معدل التغيير في الطاقة الكلية *Total Rate of Net Energy Change*, $(dE/dt \ or \ \dot{E})$ لنظام ما. نقوم على استخدام النظرة الماكروية في حساب قيم التغيير في الطاقة الكلية أو معدل تغيير الطاقة الكلية حيث يتم تحديد كافة أشكال الطاقة التي تخترق حدود النظام من حرارة وعمل وكتلة والطاقة المتبادلة بين جزئيات المادة الموجودة داخل النظام. تسمى الطاقة الناتجة عن جمع كافة الطاقات المتبادلة بين النظام والوسط المحيط باسم الطاقة الداخلية *Internal Energy* ونرمز لها (U,J). الطاقة الداخلية النوعية *Specific Internal Energy* والتي تُعرف بالطاقة الداخلية بالنسبة إلى واحدة الكتل تعطى الرمز $(u,J/g)$.

عبرت النظرية الحركية الجزئية *Kinetic Molecular Theory* في القرن التاسع عشر عن أن الطاقة الداخلية هي عبارة عن الطاقة الحركية المحررة نتيجة تصادم الجزئيات الموجودة داخل النظام وتحول هذه الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية. لا يؤخذ بعين الاعتبار في حساب التغيير في الطاقة الكلية أي مرجعية *Reference* في قياس هذه الطاقة فمثلاً الطاقة الكامنة لجسم ما يسقط من ارتفاع ما تتعلق فقط بالمسافة التي يقطعها الجسم والمقاسة بين نقطة البداية ونقطة النهاية ولا يهتم بمرجعية قياس هذه

المسافة. سنكتفي بدراسة علم الترموديناميك على وصف الطاقة الحركية والكامنة فقط أما باقي أشكال الطاقة فيمكن إهمالها لإنها ليست موضوع الدراسة في هذا الكتاب.

✓ الطاقة الحركية *Kinetic Energy*. تسمى الطاقة التي يكتسبها نظام ما سواء كان مغلقاً أو مفتوحاً نتيجة حركته بالطاقة الحركية وتعطى الطاقة الحركية الرمز (KE)

$$E = KE = m\frac{V^2}{2} \qquad (J) \tag{2-2}$$

أما الطاقة الحركية النوعية *Specific Kinetic Energy* والتي تُعرف بالطاقة الحركية بالنسبة إلى واحدة الكتل فتعطى بالعلاقة

$$e = ke = \frac{V^2}{2} \qquad \left(\frac{J}{g}\right) \tag{3-2}$$

ترمز $(V, m/s)$ إلى سرعة النظام أو سرعة المادة المكونة للنظام بالنسبة إلى مرجعية معينة.

المثال التطبيقي 2–1 – الطاقة الحركية.

سيارة بوزن $(1200\ kg)$ تتحرك بسرعة ابتدائية بقيمة $(50\ km/h)$ إلى سرعة نهائية بقيمة $(100\ km/h)$. حدد 1) الطاقة الحركية الابتدائية و 2) التغيير في الطاقة الحركية.

الفرضيات: 1) السيارة نظام مغلق 2) الطريق مستقيم ولا تغيير في الارتفاعات ضمن الحركة.

التحليل: 1) الطاقة الابتدائية هي من الشكل

$$E = KE = \frac{mV^2}{2}$$

Bassam Badran
Damascus University

$$KE = \frac{1}{2} * (1200\ kg) * \left(\frac{50 * 1000}{3600}\frac{m}{s}\right)^2$$

مع العلم أن

$$\frac{m^2}{s^2} = \frac{J}{kg}$$

أي أن الطاقة الحركية هي

$$KE = 115740.74\ J = 115.74\ kJ$$

2) التغيير في الطاقة الحركية للسيارة عند انتقالها إلى السرعة النهائية هي

$$\Delta E = \Delta KE = KE_2 - KE_1 = \frac{1}{2} m\ (V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2}(1200\ kg)\left[\left(\frac{100}{3.6}\right)^2 - \left(\frac{50}{3.6}\right)^2\right]\frac{m^2}{s^2}$$

$$\Delta KE = 347.222\ kJ$$

مناقشة:

عندما يكون التغيير في الطاقة الحركية سالباً فإنه يدل على أن السرعة النهائية هي أصغر من السرعة الابتدائية وبالتالي الجسم يتباطأ. الطاقة لا يمكن أن تكون سالبة.

✓ الطاقة الكامنة *Potential Energy*. تسمى الطاقة التي يكتسبها نظام ما سواء كان مغلقاً أو مفتوحاً نتيجة الاختلاف في الارتفاع (المنسوب) في مجال الجاذبية الأرضية بالطاقة الكامنة وتعطى الطاقة الكامنة الرمز (PE)

$$E = PE = mgz \qquad (J) \qquad (4\text{-}2)$$

Bassam Badran
Damascus University

أما الطاقة الكامنة النوعية *Specific Potential Energy* والتي تُعرف بالطاقة الكامنة بالنسبة إلى واحدة الكتل فتعطى بالعلاقة

$$e = pe = gz \qquad \left(\frac{J}{g}\right) \qquad (5\text{-}2)$$

ترمز (g) إلى تسارع حقل الجاذبية الأرضية المؤثر على مركز النظام أو المادة المكونة للنظام بالنسبة إلى مرجعية معينة.

المثال التطبيقي 2–2 – سقوط جسم – الطاقة الكامنة.

جسم بوزن $(400\,kg)$ يرتفع عن سطح الأرض مسافة قدرها $(25\,m)$، حدد الطاقة الكامنة التي يملكها هذا الجسم على ذلك الارتفاع قبل سقوطه.

الفرضيات:

1) الجسم نظام مغلق.

2) تسارع الجاذبية الأرضية هو $(10\,m/s^2)$ 3) سطح الأرض هو مرجعية القياس.

التحليل: تعطى الطاقة الكامنة من الشكل

$$E = PE = mgz$$

$$E = (400\,kg)\left(10\frac{m}{s^2}\right)(25\,m)$$

$$E = PE = 100{,}000\,J = 100\,kJ$$

مناقشة:

يجب الانتباه إلى أن الطاقة الكامنة على سطح الأرض هي صفر لأن المرجعية هي سطح الأرض $(z = 0)$

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 2−3 – سقوط جسم – الطاقة الكامنة.

حدد المسافة التي تقطعها قطعة آجر بأبعاد ($2.5 * 3.5 * 6\ in^3$) قبل أن تصطدم بسطح الكرة الأرضية إذا علمت أن الطاقة الكامنة لهذه القطعة هي ($-500\ lbf * ft$) وكثافة القطعة ($120\ lbm/ft^3$).

الفرضيات:

1) قطعة الآجر نظام مغلق

2) تسارع الجاذبية الأرضية هو ($32.174\ ft/s^2$)

3) سطح الأرض هو مرجعية القياس.

التحليل: 1) التغيير في الطاقة الكامنة يعطى من الشكل

$$\Delta E = \Delta PE = mg\Delta z$$

الإشارة الموجبة للطاقة الكامنة تقول إن الكتلة ترتفع عن سطح الأرض (المرجع في قياس الطاقة الكامنة) وعندما تتحول الإشارة إلى قيمة سالبة هذا يدل على أن مبدأ القياس يبدأ من الكتلة نفسها باتجاه سطح الأرض وبالتالي فإن المسافة تنقص. تحسب الكتلة في العلاقة السابقة من

$$m = \rho * V$$

$$m = \left(\frac{120}{12^3}\ \frac{lbm}{in^3}\right)\ (2.5 * 3.5 * 6\ )in^3$$

$$m = 3.646\ lbm$$

بتطبيق معادلة التغيير في الطاقة الكامنة مع العمل أن واحدة التحويل هي

$$lbf = 32.174 \frac{lbm * ft}{s^2}$$

$$(-500\ lbf * ft) * \frac{32.174\ lbm\ \ ft/s^2}{lbf} = (3.646\ lbm)\ (32.174\ ft/s^2)\ \Delta z$$

$$\Delta z = -137.136\ ft$$

✓ الطاقة الكلية *Total Energy*. الطاقة الكلية لنظام ما سواء كان مغلقاً أو مفتوحاً تساوي مجموع الطاقة الداخلية والحركية والكامنة مع إهمال باقي الطاقات المؤثرة في النظام وتعطى الطاقة الكلية بالعلاقة

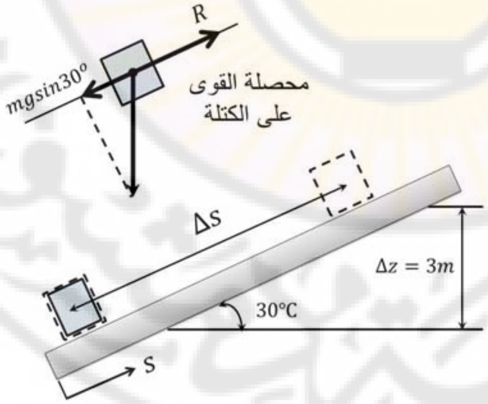
$$E = U + KE + PE = U + m\frac{V^2}{2} + mgz \quad (J) \qquad (6\text{-}2)$$

أما الطاقة الكلية النوعية فتعطى بالعلاقة

$$e = \frac{E}{m} = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad \left(\frac{J}{g}\right) \qquad (7\text{-}2)$$

المثال التطبيقي 2–4 – حركة جسم على سطح مائل.

جسم بوزن $(10\ kg)$ ينزلق بقوة (R) على سطح مائل بزاوية $(30℃)$ بارتفاع $(3m)$ كما في الشكل المرافق. إذا علمنا أن الطاقة الحركية للجسم تتناقص بمقدار $(50\ J)$ عند انزلاقه وتسارع الجاذبية الأرضية هو $(10\ m/s^2)$. احسب قيمة واتجاه القوة بالنيوتن.



الفرضيات: 1) الجسم نظام مغلق 2) تسارع الجاذبية الأرضية ثابت 3) القوة ثابتة لا تتغير وهي باتجاه الأعلى 4) لاتوجد قوى احتكاك بين الجسم وسطح التحرك 4) لا تغيير في الطاقة الداخلية للجسم.

التحليل: 1) باستخدام معادلة الطاقة الكلية نجد أن

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

الطاقة الكلية (ΔE) تساوي العمل اللازم لحركة الجسم على سطح الانزلاق وعلى طول المسافة (Δs)

$$\Delta E = W = \int_{s_1}^{s_2} F * ds = R * \Delta s$$

بالتعويض في معادلة الطاقة الكلية مع العلم أن الطاقة الداخلية للجسم الصلب لا تتغير

$$R * \Delta s = \Delta KE + mg\,\Delta z$$

$$R = \frac{\Delta KE + mg\Delta z}{\Delta s}$$

$$\Delta s = \frac{\Delta z}{sin30^o} = \frac{3m}{sin30^o}$$

$$\Delta s = 6\,m$$

$$R = \frac{(-50\,Nm) + (10\,kg)(10\,m/s^2)(3m)}{6\,m}$$

$$R = 41.66\,N$$

مناقشة:

القيمة الموجبة للقوة (R) يدل على أن فرضية اتجاه القوة صحيحة.

Bassam Badran Damascus University

لا يوجد في الأنظمة المغلقة، والتي تسمى أيضاً بالأنظمة الثابتة *Stationary Systems*، أي تغيير في الطاقة الحركية والكامنة ويكون التغيير في الطاقة الكلية (ΔE) في هذه الأنظمة يساوي التغيير في الطاقة الداخلية (ΔU) فقط أي أن

$$\Delta E = \Delta U \qquad (J)$$

سنعتمد في هذا الكتاب على أن الأنظمة المغلقة
هي أنظمة ثابتة غير متحركة إلا إذا ذكر شي يخالف هذه الفرضية.

تخترق حدود الأنظمة المفتوحة، والتي تسمى بأنظمة حجم التحكم *Control Volumes*، جريانات مستقرة ولفترات زمنية طويلة جداً مثل العنفات البخارية أو الغازية وتترافق مع هذه الجريانات طاقات مختلفة. نعبر عن التغيير في الطاقة الكلية في هذه الأنظمة بمعدل التغيير في الطاقة الكلية *Rate of Net Energy Change* من خلال إدخال التدفق الكتلي *Mass Flow Rate* (معدل تغيير الكتلة) في معادلة الطاقة الكلية والذي يعطى بالرمز $(\dot{m}, kg/s)$. يعرف التدفق الكتلي على إنه كمية الكتلة التي تعبر سطح ما خلال واحدة الزمن

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \qquad \left(\frac{kg}{sec}\right)$$

إذا تم تقسيم التدفق الكتلي على كثافة المادة المدروسة فنحصل على ما يسمى بالتدفق الحجمي *Volumetric Rate* (معدل تغيير الحجم) والذي يعطى بالرمز $(\dot{V},\ m^3/s)$.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

يُعرف التدفق الحجمي بأنه حجم السائل الذي يعبر سطح ما خلال واحدة الزمن.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \qquad \left(\frac{m^3}{sec}\right)$$

Bassam Badran
Damascus University

يمكن الربط بين التدفق الكتلي والحجمي بالعلاقة

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \rho * A_c * V_{avg} \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \qquad (8\text{-}2)$$

حيث

$(\rho, kg/m^3)$ كثافة الوسيط أو السائل

(A_c, m^2) سطح التدفق

$(V_{avg}, m/s)$ السرعة الوسطية العامودية على سطح التدفق

بتقسيم المعادلة $(2-1)$ على الزمن نحصل على

$$E = m * e$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dm}{dt} * e$$

وبالتالي يكون معدل التغيير في الطاقة الكلية لنظام مفتوح

$$\dot{E} = \dot{m} * e \quad \left(\frac{J}{s} \text{ or } W\right) \qquad (9\text{-}2)$$

وجود النقطة فوق البارامتر يدل على التغيير مع الزمن *Time Rate of change* دائماً.

كافة الأجهزة المستخدمة في التطبيقات الهندسية تعمل على نقل كمية معينة من وسيط التشغيل من مكان إلى آخر بسرعة معينة وإلى ارتفاع معين وبتدفق معين. تقسم هذه الأجهزة إلى نوعين. تسمى الأجهزة التي تحول الطاقة الميكانيكية (قوى محركة) إلى طاقة كهربائية بالأجهزة المنتجة للعمل *Work Producing Devices* فمثلاً تقوم عنفة بخارية أو غازية على استخلاص الطاقة الميكانيكية الممثلة بضغط وسيط التشغيل وتحويلها إلى طاقة كهربائية مفيدة. تسمى الأجهزة التي تستهلك طاقة كهربائية وتحولها إلى طاقة ميكانيكية (قوى محركة) مفيدة بالأجهزة المستهلكة للعمل *Work Consuming Devices* فمثلاً تقوم المضخة على تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية ونقلها

Bassam Badran Damascus University

إلى وسيط التشغيل عن طريق رفع ضغطه. يجب التذكير بأن الضغط ليس طاقة لأن واحدات الضغط هي

$$Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{N * m}{m^3} = \frac{J}{m^3}$$

أي أن الضغط هو كمية من الطاقة بالنسبة إلى واحدة الحجوم. في حال تم ضرب الضغط بالحجم

$$P * V = \frac{J}{m^3} * m^3 = J$$

نجد أن هذا الجداء يعبر عن واحدة الطاقة فالضغط يُنتج عملاً ويسمى هذا العمل بعمل التدفق *Flow Work* والذي سيدرس لاحقا بالتفصيل.

تسمى الطاقة الكلية المنتجة أو المستهلكة ضمن هذه الأجهزة بالطاقة الميكانيكية *Mechanical Energy*. تعرف الطاقة الميكانيكية على إنها الطاقة التي يمكن تحويلها إلى عمل ميكانيكي **بشكل كلي ومباشر** بواسطة جهاز ميكانيكي مثالي (لا توجد فيه ضياعات). الطاقة الحركية والكامنة هي أمثلة عن الطاقة الميكانيكية أما الطاقة الحرارية فلا يمكن عدها طاقة ميكانيكية لإنها لاتتحول بشكل كلي ومباشر إلى عمل. الطاقة الميكانيكية لجريان سائل تساوي مجموع الطاقة الحركية والكامنة والطاقة الناتجة عن الضغط (عمل التدفق) ويمكن أن نعبر عنها بالنسبة إلى واحدة الكتل على الشكل التالي

$$e_{mech} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad \left(\frac{J}{g}\right) \qquad (10\text{-}2)$$

أما معدل تغيير *Rate of Net Change* الطاقة الميكانيكية الكلية المتدفقة إلى نظام فتعطى بالشكل

$$\dot{E} = \dot{m} * e_{mech} = \dot{m} * \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (W) \qquad (11\text{-}2)$$

Bassam Badran
Damascus University

التغيير في الطاقة الميكاينكية بين نقطتين (1) و(2) يعبر عنها بالشكل

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_2 - \dot{E}_1 = \dot{m}\,(e_2 - e_1) = \dot{m} * \Delta e_{mech}$$

$$\Delta e_{mech} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \qquad \left(\frac{J}{g}\right)$$

$$\Delta \dot{E} = \dot{m} * \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right)\ (W) \qquad (12\text{-}2)$$

نرى من المعادلة السابقة بأن الطاقة الميكانيكية لسائل ما تبقى ثابتة على طول الجريان. تُعبر الطاقة الميكانيكية عن عمل ميكانيكي يقدم إلى السائل عندما تكون القيمة ($\Delta e_{mech} > 0$) وعن عمل ميكانيكي يستخلص من السائل عندما تكون القيمة ($\Delta e_{mech} < 0$).

المثال التطبيقي 2–5 – الطاقة الريحية.

تم تقييم موقع ما لبناء محطة ريحية حيث كانت سرعة الرياح في تلك المنطقة ($8.5\ m/s$). حدد الطاقة الريحية التي يمكن استجرارها من هذه المحطة 1) بالنسبة إلى واحدة الكتل و 2) بالنسبة إلى كتلة قدرها ($10\ kg$) و 3) من أجل تدفق كتلي قدره ($1154\ kg/s$).

الفرضيات: 1) سرعة الرياح ثابتة (الجريان مستقر).

التحليل: الطاقة التي يمكن استجرارها من العنفة الهوائية هي فقط طاقة حركية.

من أجل واحدة الكتل

$$e = ke = \frac{V^2}{2}$$

Bassam Badran Damascus University

$$e = \frac{\left(8.5\ \frac{m}{sec}\right)^2}{2}$$

$$e = 36.1\ \frac{J}{kg}$$

من أجل كتلة قدرها $(10\ kg)$ نجد أن الطاقة الكلية هي

$$E = m * e$$

$$E = (10\ kg) * \left(36.1 \frac{J}{kg}\right)$$

$$E = 361\ (J)$$

من أجل تدفق كتلي قدره $(1154\ \ kg/s)$ نجد أن معدل تغير الطاقة الكلية هي

$$\dot{E} = \dot{m} * e$$

$$\dot{E} = \left(1154\ \frac{kg}{sec}\right) * \left(\frac{36.1}{1000} \frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{E} = 41.7\ (kW)$$

مناقشة:

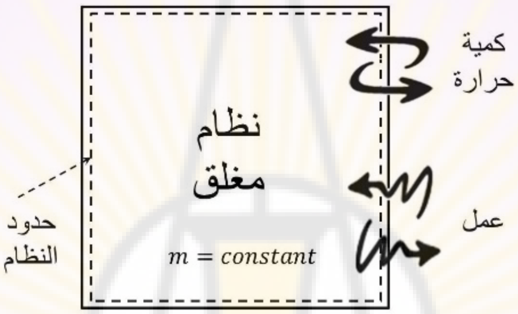
يجب الانتباه إلى أن العنفة الريحية الفعلية تحول فقط ثلث الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية.

2.2 انتقال الطاقة على شكل كمية حرارة.

يمكن أن تخترق الطاقة حدود النظام المغلق على شكلين الأول كمية حرارة *Heat Transfer* والثاني عمل *Work* كما في الشكل (2−1). عندما نضع جسماً ما في وسط درجة حرارته أكبر من درجة حرارة الجسم تبدأ كمية من الحرارة بالانتقال من الوسط إلى الجسم إلى أن يصل الجسم والوسط إلى حالة توازن حراري وتتوقف عملية انتقال الحرارة (شروط التوازن). تنتقل الحرارة دائماً من الجسم ذات درجة الحرارة الأعلى إلى

Bassam Badran
Damascus University

درجة الحرارة الأصغر ونقول أن الطاقة انتقلت بين الوسيطين على شكل حرارة *Heat*. تُعرف الحرارة على إنها شكل من أشكال الطاقة التي تنتقل بين نظامين (نظام ومحيطه) بفعل اختلاف درجات الحرارة بينهما. تسمى العملية التي لا يتم فيها انتقال كمية من الحرارة بين نظامين بالعملية الأدياباتية *Adiabatic Process*. يمكن تحقيق العملية الأدياباتية في حال كان الجسم معزولاً *Insulated* أو كان الوسيطان بنفس درجة الحرارة.



الشكل (2−1) انتقال الطاقة في نظام مغلق.

الكلمة أدياباتية جاءت من الكلمة اليونانية أدياباتس *Adiabatos* والتي تعني عدم السماح بالعبور. يعبر عن كمية الحرارة التي تنتقل في عملية ما لنظام ما بين الحالة الابتدائية والحالة النهائية بالرمز $(Q_{1\to2},\ J)$ واختصاراً يرمز لها (Q). أما كمية الحرارة النوعية فتعطى بالعلاقة

$$q = \frac{Q}{m} \qquad \left(\frac{J}{g}\right) \tag{13-2}$$

يعبر عن معدل التغيير في كمية الحرارة *Rate of Net Change of Heat Transfer* بالرمز $(\dot{Q}_{1\to2},\ W)$ واختصاراً يرمز لها $(\dot{Q})$ وتُعرف بأنها كمية الحرارة (Q, J) بالنسبة إلى واحدة الزمن.

Bassam Badran Damascus University

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$$

أما معدل التغيير في كمية الحرارة النوعية

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{m} \qquad \left(\frac{W}{g}\right) \qquad (14\text{-}2)$$

يمكن حساب كمية الحرارة الكلية (Q) من معرفة معدل التغيير في كمية الحرارة $(\dot{Q})$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}\, dt \qquad (J) \qquad (15\text{-}2)$$

3.2 أشكال انتقال الحرارة.

يتم انتقال الحرارة بين الأجسام أو عبر حدود النظام بأشكال مختلفة. يتم شرح هذه الأشكال بالتفصيل في مادة انتقال الحرارة ولكن يمكن ذكرها باختصار كما يلي:

- انتقال الحرارة بالتوصيل *Conduction Heat Transfer*.

قام العالم الفرنسي جان فوريه *Jean Fourier* في عام 1822 بوضع قانون انتقال الحرارة بالتوصيل والذي سمي قانون فوريه في التوصيل الحراري *Fourier's Conduction Law*.

يقول قانون فوريه في التوصيل الحراري إن كمية الحرارة التي تنتقل عبر مادة ما تتناسب طرداً مع مساحة السطح العامودي (A) على حركة انتقال الحرارة وطرداً مع فرق درجات الحرارة $(\Delta T = T_2 - T_1)$ وطرداً مع خواص المادة الفيزيائية $(k, W/m\,K)$ وعكساً مع سماكة المادة الناقلة للحرارة كما هو واضح في الشكل $(2-2)$. الخواص الفيزيائية للمادة هي قيمة ثابتة لا تتعلق بكمية الحرارة المنتقلة إلى الجسم المدروس وتسمى بمعامل التوصيل الحراري *Heat Conduction Coefficient* للمادة الناقلة. يعطى معدل تغيير كمية الحرارة $(\dot{Q})$ بقانون فوريه في التوصيل الحراري

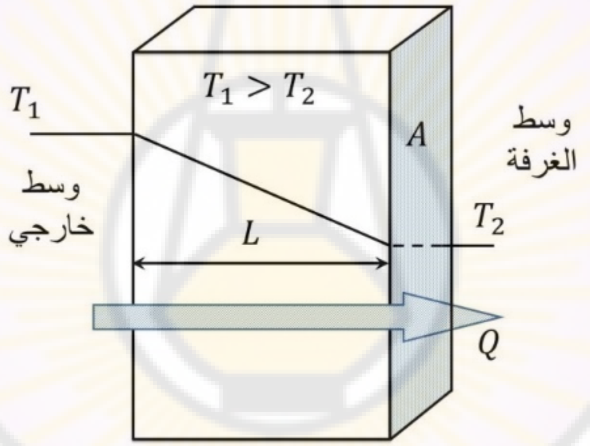
$$\dot{Q} = -k * A * \frac{\Delta T}{L} \qquad (W) \qquad (16\text{-}2)$$

تظهر الإشارة السالبة في قانون فورييه لأن فرق درجات الحرارة هو أقل من الواحد [$\Delta T < 0$]. عند تقسيم معدل تغيير كمية الحرارة على مساحة سطح الانتقال نحصل على ما يسمى بالتدفق الحراري *Heat Flux*.

$$\dot{q} = -k * \frac{\Delta T}{L} \quad \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

وحدات تحويل معامل التوصيل الحراري (k) بين الواحدات الدولية والإنكليزية هي

$$\frac{Btu}{h * ft * °F} = 1.731 \ \frac{W}{m\,K}$$



الشكل (2−2) انتقال الحرارة بالتوصيل.

<u>المثال التطبيقي 2−6 – تدفق كمية الحرارة عبر قطعة معدنية.</u>

نستخدم قطعة من الرصاص ذات معامل التوصيل الحراري $(k = 35\ W/mK)$ لفصل وسيط بدرجة حرارة (110°C) ووسيط آخر بدرجة حرارة (50°C). مساحة السطح الفاصل هو $(0.4\ m^2)$ وسماكة القطعة $(0.03\ m)$. احسب معدل تدفق كمية الحرارة عبر هذه القطعة.

الفرضيات: 1) عملية إنتقال الحرارة عبر القطعة هي عملية مستقرة 2) درجة حرارة سطوح القطعة هي نفس درجات حرارة الوسيط المحيط بالقطعة.

التحليل: معدل إنتقال الطاقة عبر السطحين تحسب من قانون فوريية للتوصيل الحراري كما يلي

$$\dot{Q} = -k * A * \frac{\Delta T}{L}$$

$$\dot{Q} = -\left(35 \frac{W}{m\,K}\right)(0.4\, m^2)\frac{(50-110)℃}{0.03}$$

يجب التذكير أن

$$\Delta T(K) = \Delta T(℃)$$

أي أن

$$\dot{Q} = 28{,}000\, W = 28\, kW$$

- <u>انتقال الحرارة بالحمل *Convection Heat Transfer*</u>.

عند جريان غاز مثل الهواء فوق مادة بدرجة حرارة حرارة عالية جداً يتم انتقال الحرارة من سطح المادة إلى الهواء. في عام 1701 قام إسحاق نيوتن *Isaac Newton* بوضع قانون انتقال الحرارة بالحمل وسمي قانون نيوتن في التبريد *Newton's Law of Cooling*.

يقول قانون نيوتن في التبريد بأن كمية الحرارة التي تنقل تتناسب طرداً مع معامل انتقال الحرارة *Heat Transfer Coefficient* $(h, W/m^2K)$ ومع فرق درجات الحرارة بين الوسيط التشغيل (T_∞) وسطح المادة (T_s) بحسب المعادلة التالية

$$\dot{Q} = h * A * (T_s - T_\infty) \quad (W) \qquad (17\text{-}2)$$

Bassam Badran
Damascus University

عند تقسيم معدل تغيير كمية الحرارة على مساحة سطح الانتقال نحصل على ما يسمى بالتدفق الحراري *Heat Flux*.

$$\dot{q} = h * (T_s - T_\infty) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right)$$

وحدة التحويل لمعامل انتقال الحرارة (h) بين الواحدات الدولية والإنكليزية هي

$$\frac{Btu}{h * ft^2 * °\mathrm{F}} = 5.678 \ \frac{W}{m^2\ K}$$

هناك نوعان من انتقال الحرارة بالحمل.

- الحمل القسري *Forced Convection* كما هو واضح في الشكل (3−2). في الحمل القسري نستخدم جهازاً لتحريك وسيط التشغيل وبشكل قسري فوق السطح المراد تبريده.
- الحمل الطبيعي *Natural Convection*. في الحمل الطبيعي يكون هناك طبقات ذات كثافات مختلفة بين السطح المراد تبريده ووسيط التشغيل ونتيجة الفروق في الكثافات في طبقات وسيط التشغيل يتحرك وسيط التشغيل وتبدأ عملية التبريد الطبيعي.

الشكل (3−2) انتقال الحرارة بالحمل.

Bassam Badran Damascus University

يظهر الجدول (2−1) مجالات قيم معامل انتقال الحرارة في التحميل الطبيعي والقسري.

الجدول (2−1) معاملات انتقال الحرارة في قانون نيوتن للتبريد.

التطبيق	$h\left(\frac{W}{m^2K}\right)$	$h\left(\frac{Btu}{h*ft^2*°F}\right)$
	التحميل الطبيعي	
غازات	5 – 25	0.35 – 4.4
سوائل	50 -1000	8.8 - 180
	التحميل القسري	
غازات	25 - 250	4.4 - 44
سوائل	50 – 20,000	8.8 - 3500

المثال التطبيقي 2−7 – كمية الحرارة المراد إزالتها من مقاومة كهربائية.

تبرد مقاومة كهربائية بواسطة هواء درجة حرارته هي (70°C) وكمية الحرارة المتدفقة عبر سطح المقاومة لكهربائية هي $(\dot{q} = 6000\ W/m^2)$ ودرجة حرارة سطح المقاومة (120°C). حدد معامل انتقال الحرارة لهذه المقاومة.

الفرضيات: 1) عملية إنتقال الحرارة من المقاومة هي عملية مستقرة 2) لا يوجد طبقة حدية على السطح المراد تبريده.

التحليل: يعبر عن الطاقة التي تنتقل من سطح المقاومة إلى الهواء بقانون نيوتن للتبريد

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty)$$

$$h = \frac{6000\ W/m^2}{(120-70)°C} \rightarrow h = 120\ \frac{W}{m^2K}$$

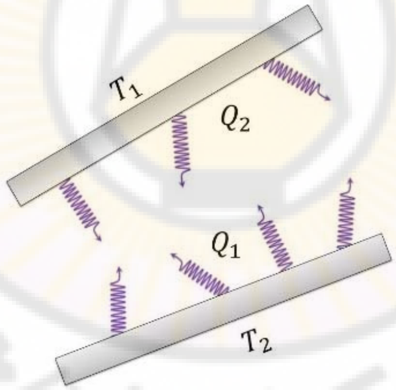
Bassam Badran
Damascus University

• <u>انتقال الحرارة بالإشعاع *Radiation Heat Transfer*</u>.

كافة الأجسام تشع حرارة (طاقة) وبشكل دائم بحسب فعل الإشعاع الإلكترومغناطيسي *Electromagnetic Radiation* وهذا الإشعاع يزداد شدةً مع ارتفاع درجة حرارة الجسم. جاء ستيفان وبولتزمان ووضعا قانون انتقال الحرارة بالإشعاع لجسمين كما في الشكل (4−2) وسمي قانون ستيفان – بولتزمان في الإشعاع. يعطى هذا القانون بالعلاقة

$$\dot{Q} = \sigma * A * F_{1-2}(T_1^4 - T_2^4) \qquad (W) \qquad (18\text{-}2)$$

يقول قانون ستيفان – بولتزمان إن انتقال الطاقة إشعاعياً يتناسب طرداً مع معامل الشكل (الرؤية) *View Factor* (F_{1-2}) والذي يعبر عن مدى مشاهدة السطح الأول للسطح الثاني وطرداً مع معامل ستيفان بولتزمان (σ) وطرداً مع درجة الحرارة السطح مرفوعة إلى الأس الرابع.



الشكل (4−2) انتقال الحرارة بالإشعاع.

معامل ستيفان هو قيمة ثابتة وتساوي

$$(\sigma = 5.67 * 10^{-8}\ W/m^2K^4)$$

Bassam Badran
Damascus University

وحدات التحويل لثابت ستيفان – بولتزمان (σ) بين الواحدات الدولية والإنكليزية هي

$$\frac{Btu}{h * ft^2 * R^4} = 33.1\ \frac{W}{m^2\ K^4}$$

4.2 انتقال الطاقة على شكل عمل.

العمل هو الطاقة الناتجة عن التفاعل الناتج بين النظام ومحيطه. يملك العمل واحدات الطاقة وهو شكل من أشكال الطاقة. يرمز للعمل الذي يقوم به وسيط تشغيل ما (أو جسم) في عملية ما بين الحالة الابتدائية والحالة النهائية بالرمز $(W_{1\to 2})$ واختصاراً (W). إذا كان لدينا جسم يتحرك على منحى *Path* معين وبتأثير قوة معينة كما في الشكل $(2-5)$ فإن العمل الذي يقوم به هذا الجسم يعطى بالشكل

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \overrightarrow{F_s} * \overrightarrow{ds} = \int_{V_1}^{V_2} m\vec{V} * \overrightarrow{dV} \qquad (J) \qquad (19\text{-}2)$$

يعطى العمل النوعي *Specific Work* بالشكل

$$w = \frac{W}{m}\ \left(\frac{J}{g}\right) \qquad (20\text{-}2)$$

يسمى العمل المبذول في واحدة الزمن بالقدرة (طاقة) *Power* ويرمز له $(\dot{W})$ ويعطى وحدات الواط (W)

$$\dot{W} = \vec{F} * \vec{V} \qquad (W) \qquad (21\text{-}2)$$

أما القدرة النوعية *Specific Power* فتعطى بالعلاقة

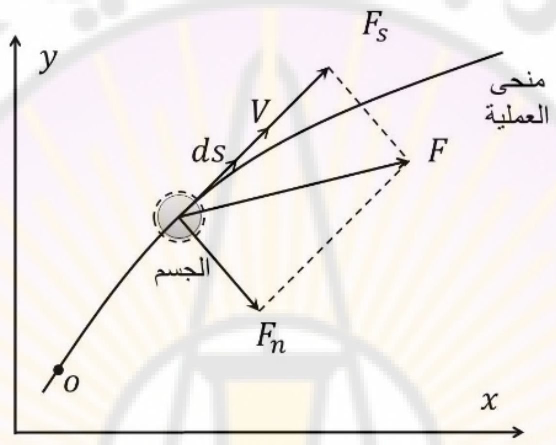
$$\dot{w} = \frac{\dot{W}}{m}\ \left(\frac{W}{g}\right) \qquad (22\text{-}2)$$

يمكن حساب العمل الكلي من معرفة القدرة

Bassam Badran
Damascus University

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W}\, dt \qquad (J) \qquad (23\text{-}2)$$

ولإجراء التكامل يجب معرفة علاقة القدرة مع الزمن.



الشكل (5−2) عمل جسم يتحرك على منحى.

5.2 أشكال العمل.

هناك أشكال مختلفة من العمل ويمكن أن تقسم إلى نوعين رئيسيين:

- ✓ عمل كهربائي ناتج عن مقاومة كهربائية.
- ✓ عمل ميكانيكي ناتج عن قوى محركة ميكانيكية.

1.5.2 العمل الكهربائي *Electrical Work*.

يمكن الحصول على العمل الكهربائي من مجموعة من الأجهزة ولكن أهمها العمل الناتج عن مقاومة كهربائية *Electrical Resistance*. ينتج عمل المقاومة الكهربائية عن مرور تيار كهربائي $(I, Ampere)$ في مقاومة كهربائية (R, Ome) خاضعة إلى فرق كمون $(V, Volt)$ لفترة زمنية معينة $(\Delta t, Second)$

$$W_e = V * N = \int_1^2 V * I * dt$$

حيث $(N, Coulomb)$ كمية الشحنة الكهربائية التي تمر عبر ناقل المقاومة. من أجل قيم ثابتة للفولط والتيار نجد أن العلاقة السابقة تتحول إلى

$$W_e = V * N = V * I * \Delta t \quad (J) \qquad (24\text{-}2)$$

أما معدل تغيير عمل المقاومة الكهربائية فيسمى بالطاقة الكهربائية *Electrical Power* وتعطى

$$\dot{W}_e = I * V = I^2 * R = R/V^2 \quad (W) \qquad (25\text{-}2)$$

2.5.2 <u>العمل الميكانيكي</u> ***Mechanical Work***.

هناك أشكال كثيرة من الأعمال الميكانيكية وكلها تتعلق بقوة تؤثر في مسافة ما (قوى محركة) فمثلا إذا أردنا نقل جسم ما من مكان إلى آخر فيجب علينا ممارسة قوة رفع عكس قوة ثقالة هذا الجسم ثم الانتقال بهذا الجسم المسافة المطلوبة أي أن العمل الميكانيكي يعطى بالعلاقة

$$W = F * s \quad (J) \qquad (26\text{-}2)$$

إذ كانت القوة غير ثابتة فيمكن الحصول على العمل من خلال التكامل

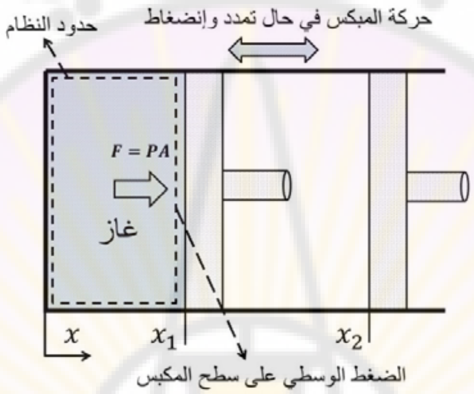
$$W = \int_{s_1}^{s_2} F * ds \quad (J) \qquad (27\text{-}2)$$

1.2.5.2 <u>عمل التمدد والانضغاط</u> ***Expansion or Compression Work***.

يظهر عمل التمدد والانضغاط وبشكل أساسي في الأنظمة المغلقة ذات الحدود المتغيرة (أسطوانة – مكبس). يبين الشكل (2–6) نظاماً مغلقاً (أسطوانة – مكبس)

Bassam Badran
Damascus University

يحتوي على غاز ذات ضغط وسطي (P) يؤثر في سطح المكبس (A). في حال التمدد *Expansion* يمارس الغاز قوة على المكبس تساوي ناتج جداء الضغط الوسطي بسطح المكبس (PA) فينتقل المكبس من النقطة (x_1) إلى النقطة (x_2).



الشكل (2−6) عمل التمدد والانضغاط.

العمل الذي يمارسه هذا الغاز على المكبس **(المحيط)** *Work Done **by** the System* خلال المسافة $(dx = x_2 - x_1)$ هو

$$\delta W = PA * dx$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} PA * dx$$

$$W = PA(x_2 - x_1) > 0$$

هذا العمل موجب لأن $(x_2 > x_1)$. في حال الانضغاط *Compression* يمارس المكبس **(المحيط)** بقوة على الغاز *Work Done **on** the System* تساوي أيضاً (PA) فينتقل المكبس من النقطة (x_2) إلى النقطة (x_1). العمل الذي يمارسه المكبس على الغاز خلال المسافة $(dx = x_1 - x_2)$ هو أيضاً

Bassam Badran
Damascus University

$$\delta W = PA * dx$$

$$W = \int_{x_2}^{x_1} PA * dx$$

$$W = PA(x_1 - x_2) < 0$$

هذا العمل سالب لأن $(x_2 > x_1)$. ناتج جداء المسافة (dx) مع السطح (A) يساوي التغيير في الحجم $(dV = A * dx)$ بالتعويض في معادلة العمل نجد أن

$$\delta W = P * dV \quad (J) \qquad (28\text{-}2)$$

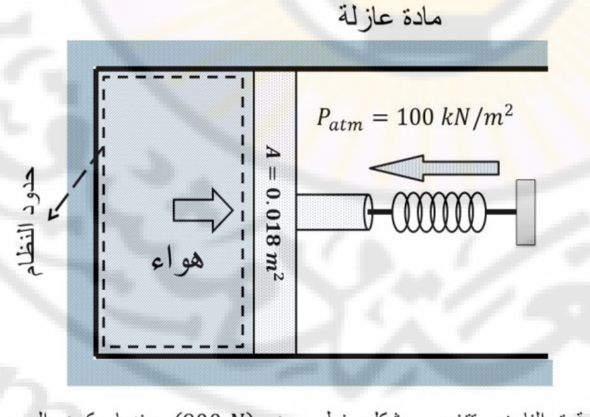
بالتكامل بين الحالة (1) و(2) نجد أن

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P * dV \quad (J) \qquad (29\text{-}2)$$

يسمى هذا العمل بعمل الحدود *Boundary Work* ويعطى الرمز (W_b).

المثال التطبيقي 2–8 – عمل رد فعل نابض.

هواء ساخن موجود في نظام مغلق (أسطوانة – مكبس) موضوع بشكل أفقياً كما في الشكل المرافق. في الحالة الابتدائية يكون حجم الهواء في الأسطوانة $(V_1 = 0.003 m^3)$ وتكون قوة النابض $(900\ N)$. نتيجة



قوة النابض تتغيير وبشكل خطي من $(900\ N)$ عندما يكون الحجم $(V_1 = 0.003\ m^3)$ إلى صفر عندما يكون الحجم $(V_2 = 0.002\ m^3)$

Bassam Badran
Damascus University

انخفاض درجة حرارة الهواء يتحرك المكبس من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية حيث يصبح حجم الهواء ($V_2 = 0.002m^3$) وقوة النابض صفراً. بفرض أن قوة النابض هي قوة خطية وإذا اعتبرنا بأن الضغط الجوي الخارجي المحيط بالنظام هو ($100\ kPa$) ومساحة المكبس هي ($0.018\ m^2$) وباعتبار أن الاحتكاك بين المكبس والأسطوانة مهمل. حدد 1) الضغط البدائي والنهائي للهواء بالكيلوباسكال و2) العمل بالكيلوجول.

الفرضيات: 1) الهواء هو نظام مغلق 2) العملية تحدث ببطء و3) لا يوجد احتكاك بين المكبس والأسطوانة 4) النابض خطي 5) لا يوجد تبادل حراري مع الوسط الخارجي.

التحليل: في الحالة الابتدائية نجد أن الضغط هو

$$P_1 = P_{atm} + \frac{F_{spring}}{A}$$

$$P_1 = 100\frac{kN}{m^2} + \frac{900/1000\ kN}{0.018\ m^2} = 150\ kPa$$

الضغط النهائي على المكبس هو الضغط الجوي لأن قوة النابض هي صفر

$$P_2 = 100\ kPa$$

عمل الحدود (أو عمل الانضغاط) هو

$$W = W_b = \int_{V_1}^{V_2} P * dV \qquad (J)$$

هنا يجب معرفة العلاقة بين الضغط والحجم من أجل إيجاد التكامل. هذه العلاقة هي

$$P = P_{atm} + F_{spring}/A$$

أي أن العمل هو

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} \left(P_{atm} + F_{spring}/A\right) * dV$$

Bassam Badran Damascus University

قوة النابض هي قوة خطية ويمكن فرضها بالشكل

$$F_{spring} = kx + b$$

$$\rightarrow F_{spring} = \frac{kV}{A} + b$$

لإيجاد الثوابت (k, b) نأخذ القيم التالية والموجودة في المسألة

$$F_{spring} = 900N \rightarrow V_1 = 0.003m^3$$

$$F_{spring} = 0\ N \rightarrow V_2 = 0.002m^3$$

من الشرط الأول نجد أن

$$900\ N = k\ V_1/A + b$$

ومن الشرط الثاني نجد أن

$$0\ N = k\ V_2/A + b$$

بحل المعادلتين نجد أن

$$k = \frac{900A}{0.001} \quad \left(\frac{N}{m}\right)$$

$$b = -\frac{900}{0.001} V_2 \quad (N)$$

بالتعويض في معادلة النابض نجد أن

$$F_{spring} = \frac{900N}{0.001m^3}(V - V_2)$$

بالتعويض في علاقة العمل نجد

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} \left(P_{atm} + \frac{900N}{0.001m^3}\left(\frac{V - V_2}{A}\right)\right) * dV$$

Bassam Badran
Damascus University

بتعويض القيم والاختصار والتكامل نجد

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} \left(100 \frac{kN}{m^2} + \frac{0.9\ kN}{0.001 m^3} \left(\frac{V - V_2}{A} \frac{m^3}{m^2} \right) \right) * dV$$

$$W_b = 50{,}000 \frac{kN}{m^3} \int_{V_1}^{V_2} V * dV$$

$$W_b = 50{,}000 \frac{kN}{m^3} (V_2^2 - V_1^2)$$

$$W_b = 50{,}000 \frac{kN}{m^3} (0.002^2 - 0.003^2)$$

$$W_b = -\,0.125 \quad kJ$$

مناقشة:

الإشارة السالبة في عمل الحدود تدل على أن العمل هو عمل انضغاط.

2.2.5.2 عمل محور دوران *Shaft work*.

إن العزم (T) المطبق على محور دوران يساوي نصف قطر (r) محور الدوران مضروباً بالقوى المماسية (F) على هذا المحور

$$T = F * r = F * \left(\frac{s}{2\pi n} \right) \qquad (30\text{-}2)$$

(n) عدد دورات محور الدوران. عمل محور دوران يعطى بالشكل

$$W_{sh} = F * s = 2\pi n * T \quad (J) \qquad (31\text{-}2)$$

الطاقة المنقولة من المحور هي عمل المحور بالنسبة إلى واحدة الزمن أي

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{W}_{sh} = 2\pi\dot{n} * T \qquad (W) \qquad (32\text{-}2)$$

المثال التطبيقي 2−9 – الطاقة المنتقلة من محور دوران سيارة.

حدد الطاقة المنتقلة عبر محور دوران سيارة عندما يكون العزم $(200N * m)$ وعدد دورات المحرك $(4000\ RPM)$.

الفرضيات. 1) المحرك نظام مغلق 2) العملية مستقرة 3) كافة الاحتكاكات مهملة.
التحليل: الطاقة المنقولة يمكن حسابها من العلاقة $(2-32)$

$$\dot{W}_{sh} = 2\pi\dot{n} * T$$

$$\dot{W}_{sh} = 2\pi * \left(\frac{4000}{60s}\right) * \left(\frac{200}{1000}kN * m\right)$$

$$\dot{W}_{sh} = 83.8\ kW = 112\ hp$$

المثال التطبيقي 2−10 – عمل محور دوران.

محرك كهربائي يستهلك تياراً كهربائياً بمقدار $(10\ A)$ وبفرق كمون $(110\ Volt)$. يولد محور الدوران الخارج من المحرك الكهربائي عزماً قدره $(10.2\ N * m)$ وبسرعة دوران $(1000\ RPM)$. من أجل عمليات مستقرة احسب 1) الطاقة الكهربائية التي يستهلكها المحرك وعمل المحرك بالكيلوواط 2) الطاقة الصافية للمحرك بالكيلوواط 3) كمية الطاقة الكهربائية وعمل المحرك بالكيلوواط خلال ساعتي تشغيل.

الفرضيات: 1) المحرك نظام مغلق 2) العملية مستقرة.
التحليل: 1) الطاقة الكهربائية التي تعطيها الشبكة هي

$$\dot{W}_e = I * V \qquad (W)$$

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{W}_e = -(10\,A)(110\,Volt)$$

مع العلم أن الواحدات الدولية للفولط هي

$$Volt = kg\frac{m^2}{A * sec^3}$$

$$\dot{W}_e = -\,1{,}100\,W = -\,1.1\,kW$$

الإشارة تدل على أن العمل يخترق حدود النظام. أما عمل محور الدوران فهو

$$\dot{W}_{sh} = 2\pi\dot{n} * T \qquad (W)$$

$$\dot{W}_{sh} = 2 * \pi * \left(1000\,RPM * \frac{1\,min}{60\,s}\right) * \left(\frac{10.2}{1000}\,kN * m\right)$$

$$\dot{W}_{sh} = 1.0676\,kW$$

2) الطاقة الصافية هي

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_e + \dot{W}_{sh}$$

$$\dot{W}_{net} = -1.1 + 1.0676 = -0.0324\,kW$$

الإشارة تدل على أن العمل الداخل إلى المحرك أكبر من عمل المحور بسبب وجود الضياعات داخل المحرك ولكن إذا فرضنا أن المحرك مثالي يجب أن يكون الطاقة القادمة من الشبكة تساوي عمل المحور.

3) بما أن العمليات مستقرة ولا علاقة لها بالزمن فإن

$$W_e = \int_{0h}^{2h} \dot{W}_e\ dt$$

Bassam Badran Damascus University

$$W_e = (-1.1\ kW) * 2h = -2.2\ kW.h$$

$$W_{sh} = \int_0^{2h} \dot{W}_{sh}\ dt$$

$$W_{sh} = (1.0676\ kW) * 2h = -2.135\ kW.h$$

3.2.5.2 عمل نابض *Spring Work*.

إذا خضع نابض إلى قوة (F) واستطال مسافة قدرها (dx) فإن العمل المختزن في النابض هو

$$\delta W_{spring} = F * dx \qquad (33\text{-}2)$$

العلاقة بين القوة واستطالة النابض هي

$$F = k * x \qquad (34\text{-}2)$$

حيث $(k, N/m)$ هو ثابت استطالة النابض و(x, m) هي استطالة النابض عند تطبيق قوة ما على النابض. بالتعويض في العلاقة (2−33) والتكامل بين النقطة (x_1) إلى النقطة (x_2) نجد أن

$$\delta W_{spring} = k * x * dx$$

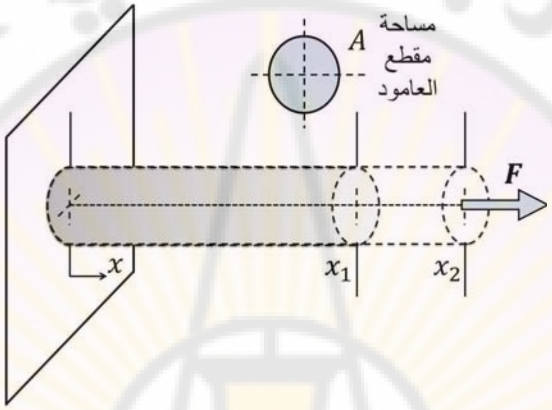
أي أن

$$W_{spring} = \frac{1}{2} k * (x_2^2 - x_1^2) \quad (J) \qquad (35\text{-}2)$$

Bassam Badran
Damascus University

4.2.5.2 عمل تمدد جسم صلب *Extension Work of Solid*.

بفرض أن لدينا محوراً معدنياً بمقطع دائري مساحته (A) يخضع إلى إجهاد شد في طرفه الحر بواسطة القوة (F) كما هو واضح في الشكل (2−7).



الشكل (2−7) تمدد جسم صلب.

قوة الشد تساوي الإجهاد الناظمي *Normal Stress* الممارس على المحور $(\sigma, N/m^2)$ مضروباً بمساحة المقطع أي أن

$$(F = \sigma * A)$$

قيمة العمل خلال مسافة صغيرة (dx) تساوي القوة في الانتقال

$$(\delta W_{solid} = -\sigma * A * dx)$$

الإشارة السالبة تؤكد أن العمل يمارس من المحيط على النظام. قيمة العمل التي تمارسه القوة على المحيط عند تمدد المحور من النقطة (x_1) إلى النقطة (x_2) هو بالمكاملة بين النقطتين (1) و(2) نجد أن عمل تمدد المحور هو

Bassam Badran Damascus University

$$W_{solid} = -\int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx \qquad (J) \qquad (36\text{-}2)$$

المثال التطبيقي 2−11 – عمل تمدد أسطوانة صلبة.

محور أسطواني بقطر ($5\ mm$) يتمدد وبشكل بطيء من الحالة الابتدائية ذات الطول ($10\ cm$). إلى الحالة النهائية ذات الطول ($10.1\ cm$). الإجهاد الناظمي الذي تولده القوة له العلاقة التالية

$$\sigma = C\,(x - x_o)/x_o$$

حيث (C) ثابت المعدن ذات قيمة ($C = 2 * 10^7 kPa$) و (x) طول العامود و (x_o) الطول الأولي. احسب العمل الذي يُمارس على المحور بالجول مع افتراض أن القطر لا يتغير.

الفرضيات: 1) العامود نظام مغلق 2) يمارس الإجهاد على نهاية العامود 3) ومساحة مقطع العامود ثابتة.

التحليل: عمل التمدد للعامود هو

$$W_{solid} = -\int_{x_1}^{x_2} \sigma * A * dx \qquad (J)$$

بتعويض قيمة الإجهاد المعطى في المعادلة نجد أن

$$W_{solid} = -\int_{x_o}^{x_1} \frac{C * A}{x_o}(x - x_o)dx$$

$$W_{solid} = -\frac{C * A}{x_o}\int_{x_o}^{x_1}(x - x_o)dx$$

بالمكاملة بالنسبة بين الطول الإبتدائي ($x_o = 10\ cm$) والطول النهائي ($x = 10.1\ cm$) نجد أن

Bassam Badran
Damascus University

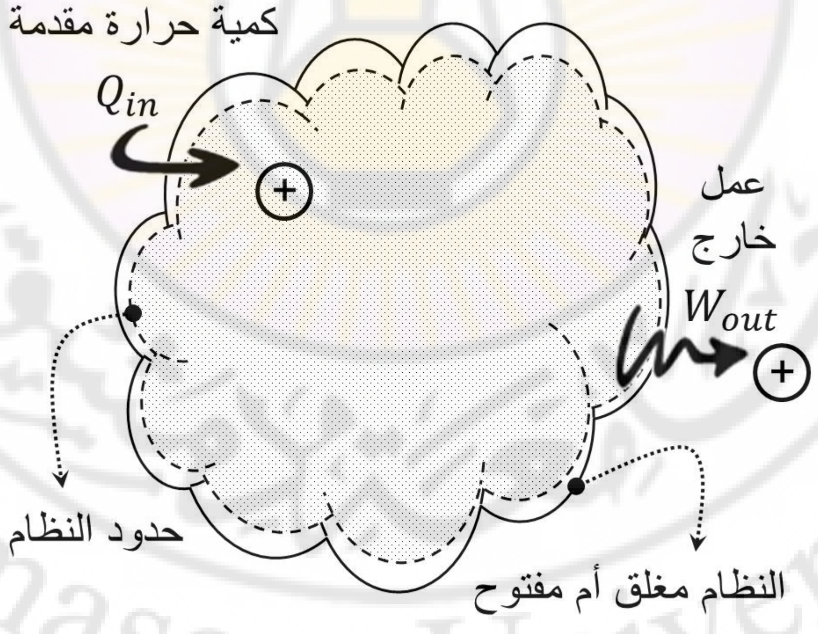
$$W_{solid} = -\frac{C\pi d^2}{4x_o}\left\{\frac{(x^2 - x_o{}^2)}{2} - x_o(x - x_o)\right\}$$

بالتعويض بالقيم

$$W_{solid} = -1.963\,J$$

6.2 عرف الاتجاهات لانتقال الطاقة.

العمل والحرارة هي كميات اتجاهية *Directional Quantities* وبالتالي يجب تحديد الإتجاة والقيمة الجبرية لهذه الكميات. عرف الاتجاهات لانتقال الطاقة *Formal Sign Convention* يقول إن **كمية الحرارة الداخلة** إلى النظام (مغلق أو مفتوح) هي قيمة **موجبة والعمل الخارج** من النظام (مغلق أو مفتوح) هو قيمة **موجبة** *Work Done **by** the System* أيضاً وعكس ذلك العرف تكون القيم سالبة كما هو في الشكل (2–8).



الشكل (2–8) عرف الاتجاهات للحرارة والعمل.

Bassam Badran Damascus University

يجب الانتباه إلى أن هاتين الكميتين المنتقلتين عبر حدود النظام خلال عملية ما تتشابهان بالعناصر التالية:

i. كمية الحرارة والعمل شكل من أشكال الطاقة.

ii. تظهر كمية الحرارة والعمل على **حدود النظام** المختار وليس داخله.

iii. تتبع كمية الحرارة والعمل حركة وسيط التشغيل فهما يتغيران من نقطة إلى آخرى بحسب الطريق المسلوك *Path Functions*.

iv. الحرارة والعمل حالات عابرة.

ملاحظة رياضية

التابع المسلكي *Path Functions*.

هو تفاضل غير كامل *Inexact Differentials* ويعطى بالرمز (δ) وبما أن الحرارة والعمل هما تابعان مسلكيان لذلك نمثل أي تغيير في كمية الحرارة أو العمل بالتفاضل (δQ) أو (δW). كمية الحرارة والعمل على طول الطريق المسلوك بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) يعطى بالشكل

$$\int_1^2 \delta W = W_{1\to2} = W_{12} \quad \left(\text{وليس } \Delta W\right)$$

التابع النقطي *Point Functions*.

هو تفاضل تام *Exact Differentials* (ملحق III في الفصل الأول) ويعطى الرمز (d) ويتعلق فقط بالحالة الابتدائية و/أو النهائية لوسيط التشغيل فمثلا التغيير البسيط في الحجم يعطى بالشكل (dV) والتغيير الكلي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) تعطى من الشكل

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V$$

Bassam Badran Damascus University

7.2 قانون انحفاظ الطاقة *Conservation of Energy*.

يقول قانون انحفاظ الطاقة إن **التغيير** *Net Change* (زيادة أو نقصان) في الطاقة الكلية **لنظام مغلق** خلال عملية ما يساوي الفرق بين الطاقة الكلية الداخلة والطاقة الكلية الخارجة من النظام مضافاً إليها الطاقة المولدة داخل النظام خلال تلك العملية.

$$\begin{pmatrix}\textit{Change in amount}\\ \textit{of enegry contained}\\ \textit{within the system}\end{pmatrix} = \left\{\begin{pmatrix}\textit{Net of energy}\\ \textit{transferred in}\\ \textit{across the system}\\ \textit{boundary}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\textit{Net of energy}\\ \textit{transferred out}\\ \textit{across the system}\\ \textit{boundary}\end{pmatrix}\right\} + \begin{pmatrix}\textit{Net of energy}\\ \textit{generated within}\\ \textit{the system}\\ \textit{boundary}\end{pmatrix}$$

أو يعبر عنها

(التغيير في الطاقة الكلية للنظام) = {(كمية الطاقة الخارجة إلى حدود النظام) − (كمية الطاقة الداخلة من حدود النظام)} + (توليد الطاقة الداخلية)

يمكن كتابتها بالعلاقة الرياضية التالية

$$(E_{in} - E_{out}) + E_{gen} = \Delta E_{system} \qquad (J) \qquad\qquad (37\text{-}2)$$

يمكن كتابة معادلة انحفاظ الطاقة بدلالة **معدل التغيير** *Rate of Net Change* أيضاً.

يقول قانون انحفاظ الطاقة إن معدل التغيير (زيادة أو نقصاناً) في الطاقة الكلية **لنظام مفتوح** خلال عملية ما يساوي الفرق بين معدل الطاقة الكلية الداخلة ومعدل الطاقة

Bassam Badran
Damascus University

الكلية الخارجة من النظام مضافاً إليها معدل الطاقة المولدة داخل النظام خلال تلك العملية ويعبر عنها بالعلاقة التالية

$$\begin{pmatrix}\textit{Net Rate of change}\\ \textit{of energy}\\ \textit{within the CV}\end{pmatrix} = \left\{\begin{pmatrix}\textit{Net rate of energy}\\ \textit{transferred in}\\ \textit{across CS}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\textit{Net rate of energy}\\ \textit{transferred out}\\ \textit{across CS}\end{pmatrix}\right\} + \begin{pmatrix}\textit{Net rate of energy}\\ \textit{generated within}\\ \textit{the CV}\end{pmatrix}$$

أو يعبر عنها

(معدل توليد الطاقة الداخلية) = {(معدل كمية الطاقة الداخلة إلى حدود النظام) − (معدل كمية الطاقة الخارجة إلى حدود النظام)} + (معدل تغيير الطاقة الكلية للنظام)

يمكن كتابتها بالعلاقة الرياضية

$$\frac{(E_{in} - E_{out}) + E_{gen}}{dt} = \frac{dE_{system}}{dt}$$

وبالتالي

$$\left(\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}\right) + \dot{E}_{gen} = \frac{dE_{cv}}{dt} \qquad (W) \qquad (38\text{-}2)$$

لنفسر كافة العناصر الموجودة ضمن معادلة انحفاظ الطاقة كل على حد كما يلي:

✓ التغيير (معدل التغيير) في الطاقة الكلية للنظام.

بما أن الطاقة هي بارامتر (خاصية) وبالتالي فهي غير تابعة للطريق الذي يسلكه النظام خلال العملية إنما تابع فقط للحالة البدائية والنهائية في عملية شبه متوازنة. التغيير في

Bassam Badran
Damascus University

الطاقة الكلية لنظام خلال عملية ما يتضمن تحديد الطاقة الكلية في بداية العملية ونهايتها. في النظام المغلق يكون التغيير في الطاقة على الشكل

$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{initial} = E_2 - E_1 \qquad (39\text{-}2)$$

وبإهمال الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية والطاقة الكيميائية والطاقة النووية، يكون التغيير في الطاقة الكلية يساوي مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية والطاقة الداخلية

$$\Delta E_{system} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (J) \qquad (40\text{-}2)$$

حيث أن

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta KE = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta PE = mg(z_2 - z_1)$$

الأنظمة المغلقة والتي تكون في أغلب الأحيان أنظمة غير متحركة *Stationary Systems* لا تملك طاقة حركية ولا طاقة كامنة وبالتالي يتحول التغيير في الطاقة الكلية في هذا النظام خلال عملية ما إلى التغيير في الطاقة الداخلية فقط.

$$\Delta E_{system} = \Delta U \quad (J)$$

في النظام المفتوح وبما أننا ندرس الحالات ذات الجريانات المستقرة ولإنهتم بالحالات العابرة فيكون معدل التغيير في الطاقة داخل النظام المفتوح.

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0 \qquad (41\text{-}2)$$

Bassam Badran Damascus University

✓ كمية الطاقة الداخلة والخارجة *Energy Transfer* عبر حدود النظام.

أشكال الطاقة التي تنتقل عبر حدود النظام هي ثلاثة، كمية حرارة *Heat Transfer* وعمل *Work* وكتلة (تدفق كتلة) *Mass Flow*.

I. كمية الحرارة *Heat Transfer* $(Q, \dot{Q})$. عندما تنتقل الحرارة **إلى** النظام (اكتساب حرارة) تزداد اهتزازات الجزئيات الموجودة داخل النظام وبالتالي الطاقة الداخلية للنظام. وعندما تنتقل الحرارة **من** النظام (خسارة حرارة) تفقد الجزئيات جزءاً من الطاقة وتنخفض حركة الجزئيات وبالتالي الطاقة الداخلية. حسب عرف الاتجاهات كمية الحرارة الداخلة موجبة وكمية الحرارة الخارجة سالبة.

II. انتقال العمل *Work Transfer* $(W, \dot{W})$. عندما يحدث تفاعل بين النظام ومحيطه ولا يؤدي هذا التفاعل إلى رفع درجة حرارة المادة الموجودة ضمن هذا النظام فيسمى هذا التفاعل بالعمل. حسب عرف الاتجاهات العمل داخل إلى نظام سالب والعمل الخارج من نظام هو موجب.

III. تدفق كتلة *Mass Flow* $(\dot{m})$. عندما تتدفق كتلة ما إلى نظام خلال عملية ما تنقل معها كمية من الطاقة تؤدي إلى تغير الطاقة الداخلية للنظام والعكس صحيح عندما تتدفق كتلة معينة خارج النظام خلال عملية ما تنقل معها كمية من الطاقة.

✓ كمية الطاقة المولدة *Generated Energy* داخل حدود النظام.

تنتج كمية الطاقة المولدة داخل النظام من التفاعلات الكيميائية التي تحدث نتيجة تغيير حالة وسيط التشغيل داخل النظام مثل احتراق مزيج وقود وهواء داخل محرك احتراق داخلي. هذه الطاقة تهمل في دراستنا الآن ولكن سندرسها بالتفصيل لاحقاً في فصل الترموديناميك الكيميائي.

Bassam Badran Damascus University

1.7.2 قانون انحفاظ الطاقة للأنظمة المغلقة.

الأنظمة المغلقة هي أنظمة غير متحركة *Stationary Systems* كما وصفت سابقاً وذات كتلة ثابتة. بتعويض أشكال الطاقة المشروحة سابقاً في المعادلة العامة لانحفاظ الطاقة

$$E = Q + W + E_{mass}$$

$$(Q + W + E_{mass})_{in} - (Q + W + E_{mass})_{out} = \Delta E_{system}$$

بإهمال الطاقة الحركية والكامنة وبما أن $(E_{mass} = const)$ تتحول معادلة قانون انخفاض الطاقة في الأنظمة المغلقة إلى

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U \quad (J) \qquad (42\text{-}2)$$

في حال أخذنا عرف الاتجاهات وطبقناه على معادلة انحفاظ الطاقة للأنظمة المغلقة نحصل على شكل من أشكال القانون الأول في الترموديناميك وهو

$$Q_{in} - W_{out} = \Delta U \quad (J)$$

أو يعطى بالشكل التالي

$$\mathrm{Q} - \mathrm{W} = \Delta U \quad (J) \qquad (43\text{-}2)$$

مع الأخذ بعين الإعتبار عرف الإتجاهات.

2.7.2 قانون انحفاظ الطاقة للأنظمة المفتوحة.

بتعويض أشكال الطاقة المشروحة سابقاً في المعادلة العامة لانحفاظ الطاقة نجد أن المعادلة تتحول إلى

$$\dot{E} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_{mass}$$

Bassam Badran Damascus University

$$\dot{E}_{mass} = \sum \dot{m} * e = \sum \dot{m}\left(u + Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)$$

$$\left(\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m} * e_{mass}\right)_{in} - \left(\left[\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m} * e_{mass}\right]\right)_{out} = dE_{sys}/dt \quad (W) \qquad (44\text{-}2)$$

بإهمال الطاقة الحركية والكامنة تتحول معادلة قانون إنحفاظ الطاقة في الأنظمة المفتوحة وذات الجريانات المستقرة إلى

$$\left(\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m} * e_{mass}\right)_{in} - \left(\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m} * e_{mass}\right)_{out} = 0 \quad (W) \qquad (45\text{-}2)$$

حيث

$$e_{mass} = (u + Pv)$$

في حال أخذنا عرف الاتجاهات وطبقناه على معادلة انحفاظ الطاقة للأنظمة المفتوحة نحصل على شكل من أشكال القانون الأول في الترموديناميك وهو

$$\left(\dot{Q}_{in} + \sum_{in} \dot{m} * e_{mass}\right) - \left(\dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} * e_{mass}\right) = 0$$

أي أن

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} + \left(\sum_{in} \dot{m} * e_{mass} - \sum_{out} \dot{m} * e_{mass}\right) = 0 \qquad (46\text{-}2)$$

Bassam Badran
Damascus University

ملخص فصل انتقال الطاقة وتحليلها.

- ✓ الطاقة الكلية في نظام ما خلال عملية ما يساوي الطاقة الداخلية والحركية والكامنة.
- ✓ يعرف التدفق الكتلي على إنه كمية الكتلة التي تتدفق عبر سطح ما خلال فترة زمنية معينة

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = \rho * A_c * V_{avg} \quad \left(\frac{kg}{s}\right)$$

- ✓ الطاقة الميكانيكية هي الطاقة التي تتحول وبشكل كامل إلى عمل ميكانيكي بواسطة جهاز ميكانيكي مثل عنفة مثالية. يمكن التعبير عنها بالنسبة إلى واحدة الكتلة

$$e_{mech} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad \left(\frac{J}{g}\right)$$

أما كمية الطاقة الميكانيكية الكلية المتدفقة إلى نظام فتعطى بالشكل

$$\dot{E} = \dot{m} * e_{mech} = \dot{m} * \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (W)$$

حيث (P/ρ) هي كمية الطاقة المتدفقة إلى النظام و $(V^2/2)$ هي الطاقة الحركية للنظام و (gz) الطاقة الكامنة للنظام بالنسبة إلى واحدة الكتل.

- ✓ تخترق الطاقة حدود النظام المغلق على شكل كمية حرارة وعمل أما النظام المفتوح على كمية حرارة وعمل وطاقة مرافقة لتدفق كتلة.
- ✓ إذا كانت الطاقة تتدفق نتيجة فرق في درجات الحرارة فهي كمية حرارة أما إذا كانت الطاقة تتدفق نتيجة قوة خارجية فهي عمل.
- ✓ أشكال انتقال الحرارة

قانون فورييه للتوصيل $\dot{Q} = -kA\frac{\Delta T}{L} \quad (W)$

Bassam Badran
Damascus University

قانون نيوتن في التبريد $\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (W)$

قانون ستيفان – بولتزمان $\dot{Q} = \sigma A F_{1-2}(T_1^4 - T_2^4) \quad (W)$

- ✓ أشكال انتقال العمل نوعان كهربائي وميكانيكي. العمل الكهربائي ناتج عن مرور تيار كهربائي في مقاومة ما

$$W_e = N * V = \int_1^2 V * I\, dt = V * I * \Delta t \quad (J)$$

أما العمل الميكانيكي فله عدة أنواع

عمل تمدد أو انضغاط $W = \int_{V_1}^{V_2} P * dV \quad (J)$

عمل محور دوران $W_{sh} = F * s = 2\pi * n * T \quad (J)$

عمل نابض $W_{spring} = \frac{1}{2} k * (x_2^2 - x_1^2) \quad (J)$

عمل تمدد جسم صلب $W_{solid} = -\int_{x_1}^{x_2} \sigma * A * dx \quad (J)$

- ✓ عرف الاتجاهات لانتقال الطاقة يقول إن كمية الحرارة الداخلة إلى النظام (مغلق أو مفتوح) هي ذات قيمة موجبة والعمل الخارج من النظام (مغلق أو مفتوح) ذات قيمة موجبة*Work Done **by** the System* أيضا وعكس ذلك العرف تكون القيم سالبة.
- ✓ قانون انحفاظ الطاقة يقول إن الفرق بين الطاقة الداخلة إلى نظام مغلق خلال عملية ما والطاقة الخارجة يساوي التغيير في الطاقة الكلية للنظام.

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$E = Q + W + E_{mass}$$

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (J)$$

Bassam Badran
Damascus University

✓ قانون انحفاظ الطاقة يقول إن الفرق بين الطاقة الداخلة إلى نظام مفتوح خلال عملية ما والطاقة الخارجة يساوي التغيير في الطاقة الكلية للنظام.

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{cv}/dt$$

$$\dot{E} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{E}_{mass}$$

$$\dot{E}_{mass} = \sum \dot{m}e = \sum \dot{m}\left(u + Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)$$

$$\left(\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m}e_{mass}\right)_{in} - \left(\dot{Q} + \dot{W} + \sum \dot{m}e_{mass}\right)_{out} = 0 \quad (W)$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل
انتقال الطاقة وتحليلها

1. احسب الطاقة الحركية الكلية (kJ) و (Btu) لجسم ذات كتلة $(15\ lbm)$ ويتحرك بسرعة وقدرها $(100\ ft/s)$.

2. حدد الطاقة الكامنة النوعية (Btu/lbm) و (kJ/kg) لجسم على ارتفاع $(100\ ft)$ من مستوى معين حيث أن تسارع الجاذبية الأرضية هو $(g = 32.1\ ft/s^2)$.

3. ينقل مصعد رجل كتلته $(150\ kg)$ إلى الطابق العاشر والذي يرتفع $(35\ m)$ عن سطح الأرض. حدد طاقة المحرك الكهربائي لنقل هذا الرجل إلى الطابق العاشر 1) بإهمال كتلة المصعد و2) باعتبار أن كتلة المصعد هي $(500\ kg)$.

4. يخرج ماء من فوهة بسرعة $(60m/s)$ وتدفق $(120kg/s)$ ويستخدم في توليد طاقة كهربائية بواسطة عنفة. احسب القدرة (الطاقة) الكامنة لهذا الماء.

5. يجرى تقييم موقعين لبناء أبراج عنفات هوائية، الموقع الأول له سرعة رياح $(7m/s)$ ولمدة $(3000\ hour/year)$ والثاني له سرعة رياح $(10m/s)$ ولمدة $(2000\ hour/year)$. حدد أي الموقعين أفضل لبناء هذه المحطة.

6. حدد الطاقة اللازمة لحمل سيارة على التسارع من الصفر إلى سرعة $(100\ km/h)$ بفرض أن وزن السيارة $(800\ kg)$ على طريق مستقيم.

7. يتحرك جسم ذو كتلة $(1000\ kg)$ بسرعة ابتدائية وقدرها $(100\ m/s)$ ويبدأ بالتباطؤ إلى سرعة $(20\ m/s)$. حدد التغيير في الطاقة الحركية بالكيلوجول.

8. سيارة تتسارع من السكون إلى $(85\ km/h)$ في $(10\ s)$. هل كمية الطاقة تكون نفسها إذا وصلت إلى السرعة نفسها خلال $(5\ s)$.

9. حدد الطاقة اللازمة لتسارع سيارة بوزن $(1300\ kg)$ من سرعة قدرها $(10\ km/h)$ إلى سرعة قدرها $(60\ km/h)$ على طريق مائل ذي ارتفاع $(40\ m)$.

Bassam Badran
Damascus University

10. غاز موجود في أسطوانة – مكبس يخضع إلى العملية ($PV^2 = constant$).
الضغط البدائي هو ($1\ bar$) والحجم البدائي ($0.1\ m^3$) والضغط النهائي هو ($9\ bar$).
حدد 1) الحجم النهائي وعمل خلال هذه العملية بالكيلوجول وحدد نوعه.

11. في تجربة معينة أخذت قيم الضغط والحجم على النحو التالي

النقطة	الضغط (bar)	الحجم (cm^3)
1	15	300
2	12	361
3	9	459
4	6	644
5	4	903
6	2	1608

- ✓ حدد قيمة العامل (n) في العلاقة ($PV^n = constant$) باعتماد القيم السابقة.
- ✓ احسب عمل الحدود باستخدام (kJ) باستخدام الطلب السابق.
- ✓ ارسم القيم على محوري الضغط والحجم واحسب المساحة تحت المنحني الناتج وقارن القيمة مع عمل الحدود.

12. في تجربة معينة أخذت قيم الضغط والحجم على النحو التالي

النقطة	الضغط (lbf/in^2)	الحجم (in^3)
1	112	13
2	131	11
3	157	9
4	197	7
5	270	5
6	424	3

- ✓ حدد قيمة العامل (n) في العلاقة ($PV^n = constant$) باعتماد القيم السابقة.

Bassam Badran
Damascus University

✓ احسب عمل الحدود باستخدام (Btu) باستخدام الطلب السابق.

✓ ارسم القيم على محوري الضغط والحجم واحسب المساحة تحت المنحني الناتج وقارن القيمة مع عمل الحدود.

13. غاز موجود في أسطوانة – مكبس يخضع إلى ثلاث عمليات.

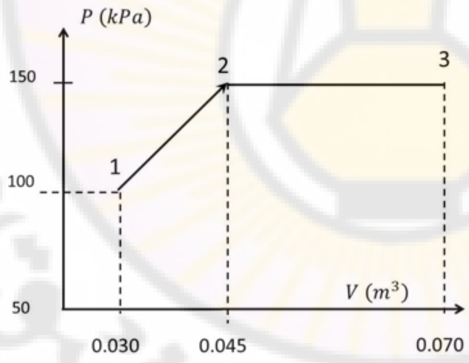
✓ العملية $(1-2)$ بحجم ثابت من الحالة (1) المحددة بالضغط $(P_1 = 1\,bar)$ وبالحجم $(V_1 = 4m^3)$ إلى الحالة (2) المحددة بالضغط $(P_2 = 2\,bar)$.

✓ يضغط الغاز في العملية $(2-3)$ على الشكل $(PV = const)$ إلى الحالة (3) بالحجم $(V_3 = 2m^3)$.

✓ العملية $(3-4)$ بضغط ثابت إلى الحالة (4) ذات الحجم $(V_4 = 1m^3)$.

مثل العمليات على مخطط $(P-V)$ واحسب العمل لكل عملية ولكافة العمليات ثم احسب المساحة المحصورة بين المنحني ومحور الحجم.

14. يسخن هواء موجود في أسطوانة – مكبس بحسب الشكل المرافق. حدد العلاقة بين الضغط والحجم خلال تلك العملية واحسب العمل الذي تقوم به هذه العملية ثم احسب المساحة المحصورة بين المنحني ومحور الحجم وقارن بين النتائج.



15. ثاني أوكسيد الكربون موجود في أسطوانة – مكبس يخضع إلى عملية تمدد من الحالة $(20\,lbf/in^2, 0.5\,ft^3)$ إلى الحالة $(5\,lbf/in^2, 2.5\,ft^3)$. العلاقة بين الضغط والحجم هي من الشكل $(P = A + BV)$ وحيث أن (A) و (B). حدد 1) قيم الثوابت و2) العمل خلال هذه العملية بواحدة $(lbf * ft)$ وبوحدة (Btu).

16. هواء موجود في أسطوانة – مكبس يخضع إلى ثلاث عمليات.

✓ العملية $(1-2)$ ضغط ثابت من الحالة (1) $(P_1 = 10\ lbf/in^2)$ وبالحجم $(V_1 = 4ft^3)$ إلى الحالة (2).

✓ يسخن الهواء في العملية $(2-3)$ إلى الحالة (3) fضغط $(P_3 = 50\ lbf/in^2)$.

✓ العملية $(3-4)$ يتمدد الهواء إلى الحالة (1) حيث العلاقة بين الضغط والحجم على الشكل $(PV = const)$.

مثل العمليات على مخطط $(P-V)$ وحدد الحجم عند الحالة (2) والعمل لكل عملية ولكافة العمليات ثم احسب المساحة المحصورة بين المنحني ومحور الحجم.

17. تزود بطارية ذات فولط $(10\ Volt)$ تياراً كهربائياً بقيمة $(0.5\ A)$ إلى مقاومة كهربائية خلال مدة $(30\ min)$. حدد قيمة المقاومة بالأوم والطاقة التي تقدمها البطارية.

18. يطبق على بكرة بقطر $(0.15\ m)$ عزم وقدره $(200\ Nm)$ لتدوير جهاز ميكانيكي. الطاقة المنتقلة بين البكرة والجهاز هي $(7\ kW)$. حدد القوة المطبقة على البكرة بالكيلونيوتن وسرعة دوران البكرة بالدورة بالدقيقة (RPM).

19. نشر في مقال أن الطاقة التي يزودها محرك سيارة $(\dot{W}, hp)$ تعطى بالعلاقة

$$\dot{W} = \frac{\tau\omega}{C}$$

حيث أن $(\tau, lbf * ft)$ العزم و (ω, RPM) بسرعة الدوران. احسب واحدات الثابت (C).

20. نابض ذو طول حر (l_o) تطبق علية قوة على نهايته الحرة بمقدار (F) تعطى بالعلاقة

$$F = k(l - l_o)$$

احسب العمل الذي يمكن أن يقدمه النابض عند تمدده من (l_1) إلى (l_2) وحدد العمل عند عندما يكون $(l_o = 3\ cm)$ و $(l_1 = 6\ cm)$ و $(l_2 = 10\ cm)$ وثابت النابض يساوي القيمة $(k = 10^4\ N/m)$.

Bassam Badran
Damascus University

21. تستخدم مروحة لتبريد دارة كهربائية موجودة في جهاز حاسب بمساحة ($70\ cm^2$) لمنعها من الاحتراق. درجة حرارة الهواء المستخدم هي ($300K$) ودرجة حرارة سطح الدارة ($340K$)، باستخدام جدول معامل انتقال الحرارة حدد أقل وأكبر كمية حرارة يمكن أن تظهر على سطح الدارة.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

Bassam Badran
Damascus University

الفصل الثالث

Chapter Three

مواصفات المادة وحيدة الطور

Properties of Pure Substances

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A_o	ثابت أفوكادو	mol
h	الإنتالبي النوعي	J/g
h_f	الإنتالبي النوعي عند حالة السائل المشبع	J/g
h_g	الإنتالبي النوعي عند حالة البخار المشبع	J/g
h_{fg}	الإنتالبي التغيير الطوري النوعي أو الحرارة الكامنة للمادة	J/g
k	عدد بولتزمان	J/K
m	الكتلة	kg
m_f	كتلة السائل في مزيج سائل وبخار	kg
m_g	كتلة البخار في مزيج سائل بخار	kg
m_{Total}	الكتلة الكلية	kg
m_{Liquid}	كتلة السائل	kg
m_{Vapor}	كتلة البخار	kg
n	عدد الذرات	$atom$
N	عدد المولات	mol
P	الضغط	kPa أو bar

Bassam Badran
Damascus University

P_{gage}	ضغط معياري	kPa أو bar
P_{sat}	ضغط الإشباع	kPa أو bar
P_{cr}	الضغط الحرج	kPa أو bar
P_r	الضغط المصغر	kPa أو bar
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$J/g\ K$
R_u	ثابت الغازات العامة	$J/g\ K$
s	الإنتروبي النوعي	$J/g\ K$
s_f	الإنتروبي النوعي عند حالة السائل المشبع	J/g
s_g	الإنتروبي النوعي عند حالة البخار المشبع	J/g
T	درجة الحرارة	K أو °C
T_{sat}	درجة الحرارة الإشباع	K أو °C
T_r	درجة الرحراة المصغرة	K أو °C
T_{cr}	درجة الحرارة الحرجة	K أو °C
u	الطاقة الداخلية النوعية أو بالنسبة إلى واحدة الكتل	J/g
u_f	الطاقة الداخلية النوعية عند حالة السائل المشبع	J/g
u_g	الطاقة الداخلية النوعية عند حالة البخار المشبع	J/g
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg

Bassam Badran Damascus University

$\bar{v}$	الحجم النوعي المولي	m^3/kg
v_r	الحجم النوعي الحرج	m^3/kg
v_f	الحجم النوعي عند حالة سائل مشبع	m^3/kg
v_g	الحجم النوعي عند حالة بخار مشبع	m^3/kg
v_{actual}	الحجم النوعي الحقيقي	m^3/kg
v_{ideal}	الحجم النوعي المثالي	m^3/kg
z	معامل الانضغاط	لا بعدي
א	كسر الجفاف	لا بعدي
μ	الكتلة المولية أو الكتلة الذرية	g/mol
ρ	كثافة المادة	kg/m^3
ρ_{cr}	الكثافة المادة الحرجة	kg/m^3

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

سنبدأ في هذا الفصل بوضع أساسات إيجاد بارامترات المادة وحيدة الطور *Pure Substance* ونناقش الخواص الفيزيائية للمواد المتغيرة الطور *Phase Change*. سنقوم على فهم المخططات المتعلقة بالمادة وحيدة الطور $(P-v-T)$. وسنتعرف على الجداول المرافقة للمادة وحيدة الطور وكيفية استخراج البارامترات منها ونناقش فرضية الغاز المثالي ونضع معادلة الحالة (معادلة الغاز المثالي) بكل أشكالها. سنتحدث أيضا عن أشكال معادلة الغاز الحقيقي وكيفية استخدام معامل الانضغاط *Compressibility Factor* الذي يُظهر العلاقة بين الغاز الحقيقي والمثالي.

تم في الفصل الأول تعريف المادة وحيدة الطور على إنها المادة التي يكون فيها التركيب الكيميائي متجانساً في كل الاتجاهات فقد تكون المادة وحيدة الطور ماء أو غاز الفريون $(134A)$ أو أي مادة متجانسة كيميائياً.

<u>الفائدة العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تقديم فكرة المادة وحيدة الطور ومناقشتها.
- ✓ مناقشة الخواص الفيزيائية للمواد ذات الأطوار المتعددة.
- ✓ توضيح مخططات $(P-v)$ و $(T-v)$ و $(P-T)$ والسطوح الموجودة على مخطط $(P-v-T)$ للمادة وحيدة الطور.
- ✓ إظهار طريقة إيجاد بارامترات المادة وحيدة الطور من الجداول.
- ✓ توضيح فرضية الغاز المثالي
- ✓ استخراج معادلة الحالة أو ما يسمى معادلة الغاز المثالي.
- ✓ استخدام معادلة الحالة في حل المسائل الهندسية والفرضيات المرافقة لها.
- ✓ تعريف معامل الانضغاط واستخدامه في مقاربة الغاز الحقيقي من الغاز المثالي.
- ✓ تحديد المعادلات المستخدمة في حساب بارامترات الغاز الحقيقي.

Bassam Badran
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

1.3	المادة وحيدة الطور.	126
2.3	أطوار المادة.	127
3.3	العمليات الطورية للمادة وحيدة الطور.	127
1.3.3	الطور السائل والسائل المشبع.	128
2.3.3	البخار المشبع والبخار المحمص.	129
3.3.3	درجة حرارة الإشباع وضغط الإشباع.	133
4.3	المخططات الموصفة للمادة وحيدة الطور.	135
1.4.3	مخطط $(T-v)$ درجة الحرارة بدلالة الحجم النوعي.	135
2.4.3	مخطط $(P-v)$ الضغط بدلالة الحجم النوعي.	138
3.4.3	مخطط $(P-T)$ الضغط بدلالة درجة الحرارة.	138
4.4.3	سطوح مخطط درجة الحرارة والحجم النوعي والضغط $(P-v-T)$.	140
5.3	جداول المادة وحيدة الطور.	143
1.5.3	وصف بارامترات الإشباع للسائل والبخار.	144
2.5.3	وصف بارامترات مزيج ماء – بخار.	152
3.5.3	وصف بارامترات البخار المحمص.	158
4.5.3	وصف بارامترات السائل المضغوط.	160
5.5.3	تحديد الحالة (المنطقة) التي توجد فيها المادة من الجداول.	161
6.3	معادلة الغاز المثالي.	167
1.6.3	قانون بويل – ماريوت للغازات المثالية.	168

Bassam Badran
Damascus University

2.6.3 قانون أمونتون للغازات المثالية. 168

3.6.3 قانون غي لوساك للغازات المثالية. 168

4.6.3 قانون أفوغادرو للغازات المثالية. 169

5.6.3 القانون المشترك للغازات المثالية. 169

6.6.3 قانون الغاز المثالي العام (قانون كلابيرون للغازات المثالية). 170

7.6.3 بارامترات الغاز المثالي. 173

7.3 معامل الانضغاط. 174

8.3 معادلة الغاز الحقيقي. 180

1.8.3 معادلة فاندرفالس للغاز الحقيقي. 181

2.8.3 معادلة بيتي – بريجمان للغاز الحقيقي. 183

3.8.3 معادلة بيندك – ويب – روبين للغاز الحقيقي. 184

ملخص الفصل. 187

مسائل غير محلولة. 190

ملحقات الفصل. 194

نهاية الفصل. 214

Bassam Badran Damascus University

1.3 المادة وحيدة الطور.

تُعرف المادة وحيدة الطور *Pure Substance* على إنها مادة ذات مكونات كيميائية ثابتة لاتتغير عند حدوث أي عملية عليها مثل الماء والنتروجين والهيليوم وماشابه ذلك من المواد. في بعض الأحيان تكون المادة وحيدة الطور مؤلفة من مجموعة من المواد الكيميائية المتجانسة *Homogeneous* مثل الهواء كما هو واضح في الجدول (3−1) ولكن يمكن إعتباره على أنه مادة وحيدة الطور لأنه يحتوي على مركبات كيميائية متجانسة لاتتغير عند حدوث أي عملية عليه.

الجدول (3−1) الغازات المكونة للهواء.

الغاز المكون للهواء	النسبة الحجمية (%)	النسبة الوزنية (%)	الكتلة المولية $\left({}^{g}/_{mol}\right)$	الصيغة الكيميائية
أوكسجين	20.95	23.2	32	$[O_2]$
نتروجين	78.09	75.47	28.02	$[N_2]$
ثاني أوكسيد الكربون	0.03	0.046	44.01	$[CO_2]$
هيدروجين	0.00005	0	2.02	$[H_2]$
أرغون	0.933	1.28	39.94	$[Ar]$
نيون	0.0018	0.0012	20.18	$[Ne]$
هيليوم	0.0005	0.00007	4.00	$[He]$
كريبتون	0.001	0.0003	83.8	$[Kr]$
إكسنون	0.000009	0.00004	131.29	$[Xe]$

Bassam Badran Damascus University

يمكن عد المادة التي تتكون من مزيج من طورين أو أكثر وبنفس التركيب الكيميائي (مثلاً الماء على شكل سائل وبخار أو الفريون على شكل سائل وبخار) مادة وحيدة الطور. لا يمكن عد الماء والزيت مادة وحيدة الطور لعدم قدرة الزيت على الاختلاط بالماء وتكوين مادة متجانسة.

2.3 أطوار المادة.

توجد المواد في الطبيعة بعدة أطوار وذلك تبعاً لدرجة حرارة المادة وضغطها فمثلا يكون النحاس صلباً ويكون الزئبق سائلاً ويكون النتروجين غازاً عند درجة حرارة معينة وضغط معين. اختلاف هذه الشروط قد يؤدي إلى تغيير الحالة لهذه المواد إلى أطوار آخرى مختلفة. تتكون المادة من ثلاثة أطوار وهي:

- الطور الصلب *Solid Phase*.
- الطور السائل *Liquid Phase*.
- الطور الغازي *Gaseous Phase*.

قد تأخذ المادة في الطور الواحد (الصلب مثلاً) أشكالاً مختلفة ومتنوعة فالكربون مثلاً يوجد بشكل غرافيت أو على شكل الماس في الطور الصلب والهيليوم له طوران سائلان والحديد له ثلاثة أطوار صلبة.

كافة الأمثلة اللاحقة في هذا الفصل تأخذ الماء مثالاً للمادة وحيدة الطور في شرح المخططات والجداول وكيفية استخراج البارامترات منها ولكن يجب أن نشير إلى أن أي مادة وحيدة الطور مثل الفريون أو النشادر أو أي مادة أخرى تتبع خطوات الدراسة نفسها التي استخدمت للماء.

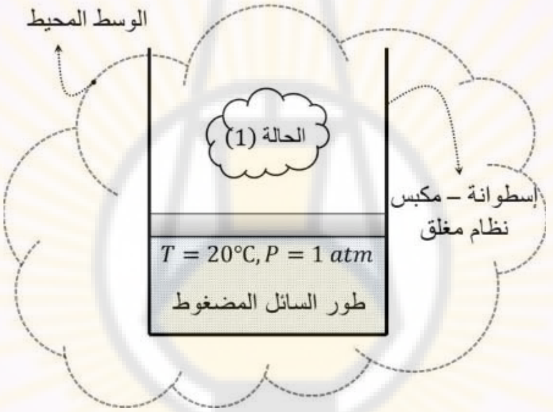
3.3 العمليات الطورية للمادة وحيدة الطور.

من أجل فهم العمليات الطورية التي تخضع لها المادة وحيدة الطور يجب التعرف على إمكانية وجود هذه الأطوار وكيفية تشكلها.

Bassam Badran
Damascus University

1.3.3 <u>الطور السائل *Compressed Liquid* والسائل المشبع *Saturated Liquid*.</u>

✓ <u>الطور السائل *Liquid Phase*</u>. لنأخذ نظام مغلق (أسطوانة – مكبس) يحتوي على مادة وحيدة الطور ولتكن مثلاً الماء أو الفريون كما في في الشكل (1−3). يكون الماء مثلاً عند درجة الحرارة (20℃) والضغط ($1\ atm$) بحالة سائلة ويكون أيضاً الفريون ($134A$) عند درجة حرارة (−35℃) والضغط ($1\ atm$) بحالة سائلة وتسمى هذه الحالة بالسائل المضغوط *Compressed Liquid* أو بالسائل ذي التبريد الدوني *Sub-cooled Liquid*. نرمز إلى هذه الحالة بالنقطة (1).

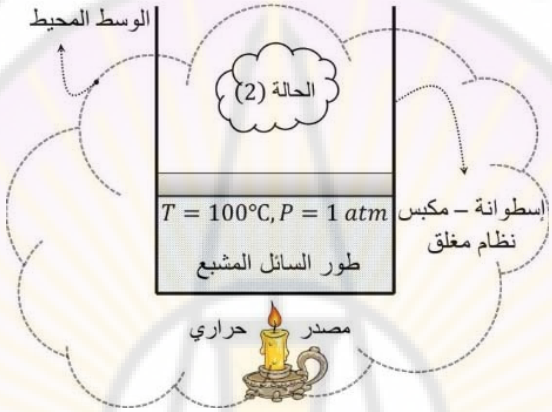


الشكل (1−3) حالة السائل المضغوط.

✓ <u>السائل المشبع *Saturated Liquid*</u>. عند البدء بإعطاء كمية من الحرارة إلى النظام عن طريق مصدر حراري ما، تبدأ درجة حرارة المادة وحيدة الطور بالارتفاع تدريجياً ويرافق هذا الارتفاع في درجة حرارة زيادة في الحجم النوعي للمادة. من أجل احتواء هذا التغيير في الحجم النوعي يسمح للمكبس بالتحرك إلى الأعلى وبشكل طفيف <u>ولإبقاء الضغط داخل الأسطوانة ثابتاً</u> نقوم على إضافة بعض الكرات الحديدية على سطح المكبس. مع الاستمرار في إعطاء الحرارة تزداد درجة حرارة المادة إلى أن تصل إلى درجة حرارة الغليان *Boiling* كما في الشكل (2−3). وفي حال كان الماء هو المادة

Bassam Badran Damascus University

وحيدة الطور فتكون درجة حرارة الغليان $(100°C)$ أما إذا كان الفريون $(134A)$ هو المادة وحيدة الطور فتكون درجة حرارة الغليان $(26.6°C)$ مع بقاء الضغط $(1\ atm)$ ثابتاً. تبقى المادة وحيدة الطور عند هذه النقطة على شكل سائل وتسمى هذه الحالة بالسائل المشبع *Saturated Liquid* ويرمز لها بالنقطة (2).



الشكل (2–3) حالة السائل المشبع (غليان).

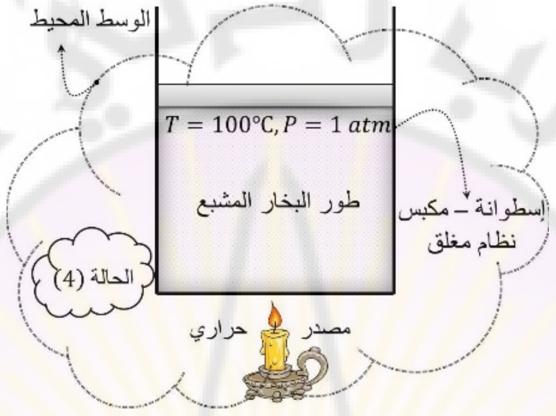
2.3.3 <u>البخار المشبع *Saturated Vapor* والبخار المحمص *Superheated Vapor*.</u>

✓ <u>البخار المشبع *Saturated Vapor*</u>. مع استمرار عملية إعطاء الحرارة إلى السائل المشبع مع إبقاء الضغط ثابتاً $(1\ atm)$، يبدأ السائل المشبع بالغليان ويظهر طور آخر وهو طور البخار. مع استمرار عملية إضافة الحرارة إلى النظام (أسطوانة – مكبس) يتحول السائل **<u>كاملاً</u>** إلى بخار. تسمى هذه الحالة بالبخار المشبع. نرمز إلى هذه الحالة بالنقطة (4) كما في الشكل (3–3).

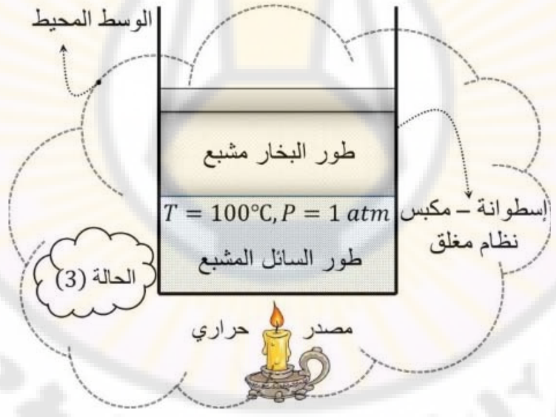
✓ <u>مزيج سائل مشبع – بخار *Saturated Liquid – Vapor Mixture*</u>. بين النقطة (2) والنقطة (4) يتشكل مزيج (خليط متجانس) من السائل المشبع والبخار المشبع <u>بضغط ودرجة حرارة ثابتة</u> والذي يسمى بمزيج سائل – بخار مشبع حيث يوجد السائل

Bassam Badran
Damascus University

والبخار بحالة توازن كما هو واضح في الشكل (3–4). نرمز إلى هذه الحالة بالنقطة (3).



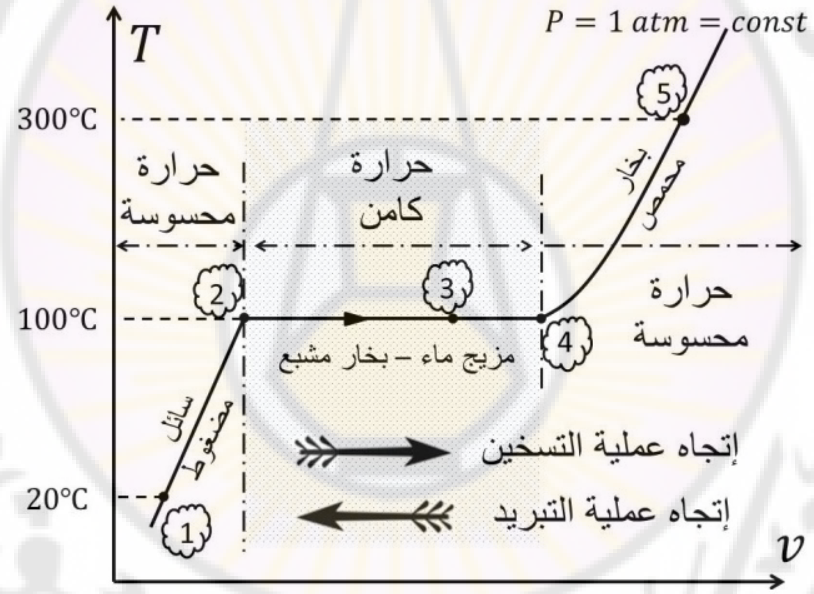
الشكل (3–3) حالة البخار المشبع.



الشكل (3–4) حالة مزيج ماء – بخار مشبع.

تسمى عملية تحول السائل المشبع كاملاً إلى بخار مشبع بالتحول الطوري *Phase Change* حيث تستقر درجة الحرارة والضغط للمادة في هذه الحالة عند قيمة ثابتة. يسمى الضغط في هذه الحالة بضغط الإشباع (P_{sat}) *Saturated Pressure,* وتسمى درجة الحرارة في هذه الحالة بدرجة حرارة الإشباع (T_{sat}) *Saturated Temperature,*.

عند النقطة (3) فقط والتي هي في مكان ما من عملية التحول الطوري بين النقطة (2) والنقطة (4)، تكون كمية السائل المشبع إلى كمية البخار المشبع ثابتة وغير متغيرة. عند **إضافة** كمية معينة من الحرارة إلى النظام تتحرك النقطة (3) على خط مستقيم بين النقطة (2) والنقطة (4) وبإتجاه النقطة (4) وتبدأ كمية البخار المشبع بالتزايد إلى أن يتحول السائل المشبع كاملاً إلى بخار مشبع والممثل بالنقطة (4). تسمى عملية **إعطاء الحرارة** للنظام عند النقطة (3) بعملية تسخين *Heating Process* أو بعملية تبخير *Evaporating Process*



الشكل (3–5) العمليات على مخطط $(T - v)$.

عند **طرح (إزالة)** كمية معينة من الحرارة من النظام تتحرك النقطة (3) على خط مستقيم بين النقطة (2) والنقطة (4) وبإتجاه النقطة (2) وتبدأ كمية السائل المشبع بالتزايد إلى أن يتحول البخار المشبع كاملاً إلى سائل مشبع والممثل بالنقطة (2). تسمى عملية طرح

Bassam Badran
Damascus University

الحرارة من النظام عند النقطة (3) بعملية تبريد *Cooling Process* أو بعملية تكثيف *Condensating Process* كما هو واضح في الشكل (3−5).

✓ البخار المحمص *Superheated Vapor*. الاستمرار في إعطاء الحرارة بعد الوصول إلى حالة البخار المشبع أي النقطة (4)، تبدأ درجة الحرارة والحجم النوعي بالارتفاع إلى أن تصل إلى النقطة (5) كما في الشكل (3−6) وتسمى هذه الحالة بالبخار المحمص *Superheated Vapor*.

الشكل (3−6) حالة البخار المحمص.

✓ كافة الحالات السابقة. يمكن تمثيل كافة النقاط والعمليات الطورية السابقة من عملية تحول السائل المضغوط إلى البخار المحمص وبضغط ثابت على مخطط $(T - v)$ كما في الشكل (3−5).

النقطة (1) حالة السائل المضغوط.

العملية $(1 \rightarrow 2)$ هي عملية تسخين محسوس *Sensible Heat* حيث ترتفع درجة حرارة المادة وحيدة الطور إلى درجة حرارة الغليان ويتحول السائل المضغوط إلى سائل مشبع.

النقطة (2) حالة السائل المشبع.

العملية $(4 \rightarrow 2)$ هي عملية تسخين كامن *Evaporation Latent Heat* حيث تتحول المادة وحيدة الطور من سائل مشبع إلى بخار مشبع.

النقطة (3) حالة مزيج سائل – بخار.

العملية $(2 \rightarrow 4)$ هي عملية تبريد كامن *Condensation Latent Heat* حيث تتحول المادة وحيدة الطور من بخار مشبع إلى سائل مشبع.

النقطة (4) حالة بخار مشبع.

العملية $(5 \rightarrow 4)$ هي عملية تسخين محسوس *Sensible Heat* أيضاً حيث يتحول البخار المشبع إلى بخار محمص.

النقطة (5) حالة بخار محمص.

العملية $(5 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1)$ هي عملية تسخين بضغط ثابت للمادة وحيدة الطور في هذه الحالة الضغط هو ضغط جوي $(1\ atm)$.

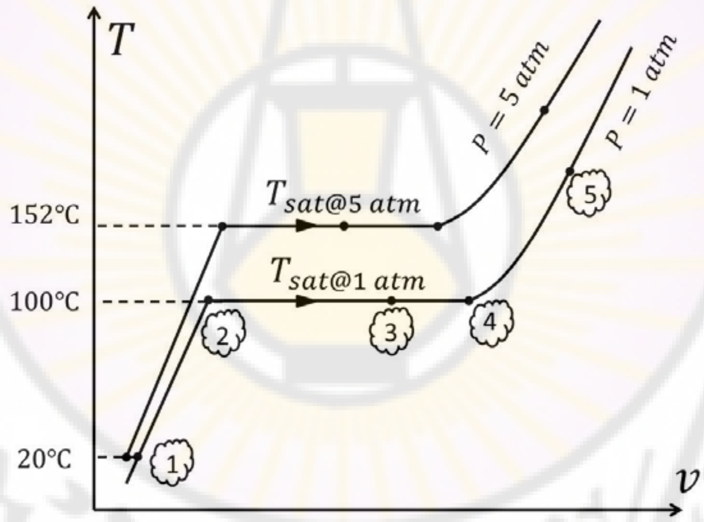
العملية $(1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5)$ هي عملية تبريد للمادة بضغط ثابت وحيدة الطور في هذه الحالة الضغط هو ضغط جوي $(1\ atm)$.

3.3.3 درجة حرارة الإشباع *Saturation Temperature* وضغط الإشباع *Saturation Pressure*.

تعرف درجة حرارة الإشباع بأنها درجة الحرارة التي تبدأ فيها المادة وحيدة الطور بالغليان وتعتمد على الضغط المطبق عليها فالماء مثلاً يبدأ بالغليان عند درجة حرارة $(100°C)$ عند ضغط $(1\ atm)$ وعند رفع هذا الضغط إلى $(500\ kPa = 5\ atm)$ يبدأ الماء بالغليان عند درجة حرارة $(151.8°C)$ كما هو واضح في الشكل (3–7). يبدأ الفريون $(134A)$ بالغليان عند درجة حرارة $(-26.6°C)$ عند ضغط $(1\ atm)$ وعند رفع هذا الضغط إلى $(500\ kPa = 5\ atm)$ يبدأ الفريون بالغليان عند درجة حرارة $(16.147°C)$. تسمى درجة الحرارة التي تبدأ فيها المادة بالغليان عند ضغط معين بدرجة حرارة الإشباع *Saturation Temperature* وتعطى الرمز (T_{sat}) ويسمى الضغط الذي تبدأ عنده المادة بالغليان عند درجة حرارة معينة بضغط الإشباع *Saturation Pressure*

Bassam Badran Damascus University

ويعطى الرمز (P_{sat}). تسمى كمية الحرارة الممتصة (عملية تسخين) خلال عملية التحول الطوري من سائل مشبع (2) إلى بخار مشبع (4) بالحرارة الكامنة للتبخر *Latent Heat of Vaporization* وتسمى كمية الحرارة المطروحة (عملية تكثيف) خلال عملية التحول الطوري من بخار مشبع (4) إلى سائل مشبع (2) بالحرارة الكامنة للتكاثف *Latent Heat of Condensation*. يظهر مخطط ($T-v$) أن كمية الحرارة الممتصة و/أو المطروحة لمادة وحيدة الطور متساوية فهي تساوي للماء في كلتا الحالتين ($2256.5\ kJ/kg$) عند ضغط ($1\ atm$) أما للفريون ($134A$) فتساوي في كلتا الحالتين ($215.06\ kJ/kg$) عند ضغط ($1\ atm$).

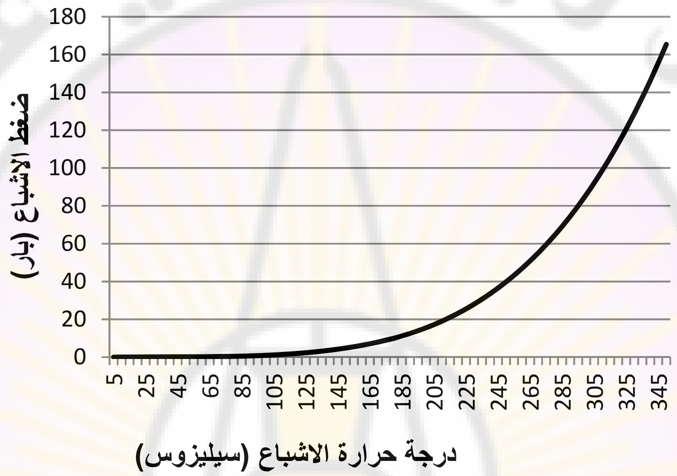


الشكل (3−7) حرارة الإشباع عند ضغوط مختلفة.

تسمى كمية الحرارة الممتصة في عملية تحول الماء من حالة صلبة (جليد) إلى حالة سائلة بالحرارة الكامنة للانصهار *Latent Heat of Fusion* وهي تساوي للماء ($333.7\ kJ/kg$). يبين الشكل (3−8) العلاقة المباشرة بين ضغط الإشباع ودرجة حرارة

Bassam Badran
Damascus University

الإشباع في عملية التغيير الطوري. عند رسم هذه العلاقة على محوري ضغط الإشباع ودرجة حرارة الإشباع نجد أن ضغط الإشباع يزداد مع ازدياد درجة حرارة الإشباع. يسمى هذا المنحني بمنحني الإشباع للسائل و البخار *Liquid – Vapor Saturation Curve*.



الشكل (8−3) العلاقة بين ضغط ودرجة حرارة الإشباع.

4.3 المخططات الموصفة للمادة وحيدة الطور.

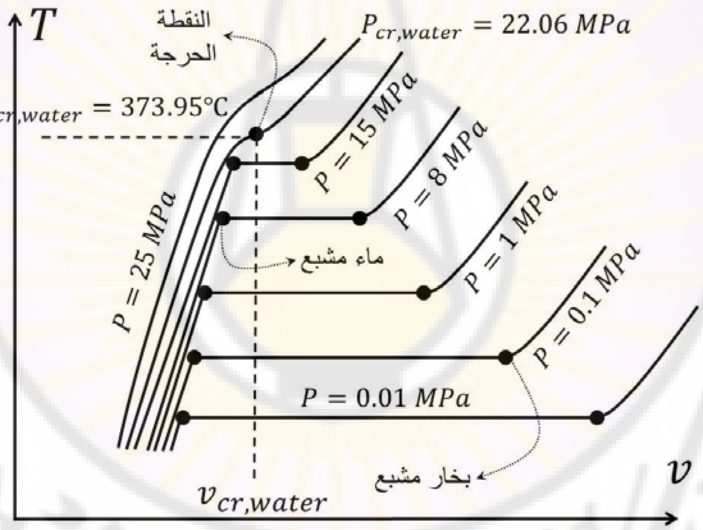
سوف نقوم بوضع مجموعة من المخططات التي تصف حالة المادة وحيدة الطور في كافة أشكالها كمخطط $(T-v)$ و $(P-v)$ و $(P-T)$.

1.4.3 مخطط درجة الحرارة والحجم النوعي $(T-v)$.

عملية التغيير الطوري لمادة وحيدة الطور عند ضغط ثابت $(1\,atm)$ شرحت بالتفصيل سابقاً ورسمت على مخطط $(T-v)$ كما في الشكل (6−3). إذا قمنا بتكرار هذه العملية لمجموعة من الضغوط المختلفة ورسمها على المحاور نفسها نحصل على المخطط العام لدرجة الحرارة والحجم النوعي للمادة وحيدة الطور. لنأخذ **الماء** كمادة

Bassam Badran Damascus University

وحيدة الطور ونقوم بشرح كيفية إيجاد هذا المخطط. نجد أن الماء عند ضغط ثابت $(1\ bar = 0.1\ MPa)$ يبدأ بالغليان عند درجة حرارة $(100°C)$ وتكون كمية الحرارة الكامنة الموافقة لهذا الضغط $(2257\ kJ/kg)$. كمية الحرارة الكامنة هي الخط المستقيم الذي يصل بين حالة الماء المشبع والممثلة بالنقطة (2) وبخار الماء المشبع الممثل بالنقطة (4) على مخطط $(T-v)$ كما هو واضح في الشكل (3−6). عند رفع الضغط إلى $(10\ bar = 1\ MPa)$ فإن الماء يبدأ بالغليان عند درجة حرارة $(180°C)$ وتكون كمية الحرارة الكامنة الموافقة لهذا الضغط $(2015\ kJ/kg)$ أي <u>أقل</u> من حالة الضغط السابق كما هو واضح في الشكل (3−9).



الشكل (3−9) مخطط $(T-v)$ لمختلف الضغوط.

نلاحظ إنه عند ارتفاع الضغط تنقص كمية الحرارة الكامنة بسبب أن الحجم النوعي للماء المشبع يزداد والحجم النوعي للبخار المشبع ينقص. مع زيادة الضغط تقل قيمة كمية الحرارة الكامنة (التحول الطوري) حتى تصل هذه القيمة إلى الصفر عند الضغط $(220.6\ bar)$ ودرجة الحرارة $(373.95\ °C)$. تسمى هذه النقطة التي يتحول فيها الماء

Bassam Badran
Damascus University

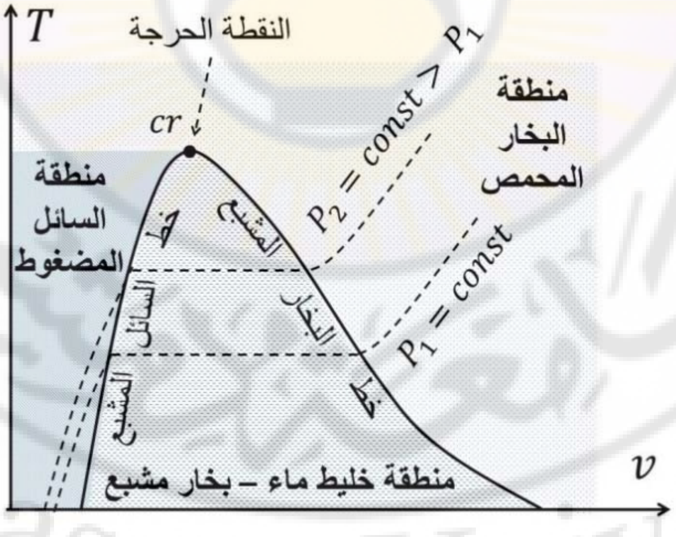
المشبع إلى بخار مشبع وبشكل مباشر من دون الدخول في عملية طورية بالنقطة الحرجة *Critical Point*, (cr). بارامترات النقطة الحرجة لغاز الفريون $(134A)$ هي الضغط $(40.6\ bar)$ ودرجة حرارة $(100.9°C)$. يرمز إلى بارامترات النقطة الحرجة للمادة وحيدة الطور بدرجة الحرارة الحرجة (T_{cr}) والضغط الحرج (P_{cr}) والحجم النوعي (v_{cr}). تكون هذه القيم بالنسبة إلى الماء

$$T_{cr,H_2O} = 373.95\ °C$$

$$P_{cr,H_2O} = 22.064\ MPa$$

$$v_{cr,H_2O} = 0.00306\ m^3/kg$$

عند وصل النقاط المكونة للبخار المشبع في المخطط $(T - v)$ والموضحة في الشكل (3–9)، نحصل على منحني البخار المشبع *Saturated Vapor Line* وعند وصل النقاط المكونة للسائل المشبع والموضحة في الشكل (3–9) نحصل على منحني السائل المشبع *Saturated Liquid Line* يتقاطع هذان المنحنيان عند النقطة الحرجة مشكلين قبة *Dome* تحتوي بداخلها عمليات التحول الطوري لمجموعة من الضغوط المختلفة.



الشكل (3–10) مناطق أطوار الماء على مخطط $(T - v)$.

Bassam Badran
Damascus University

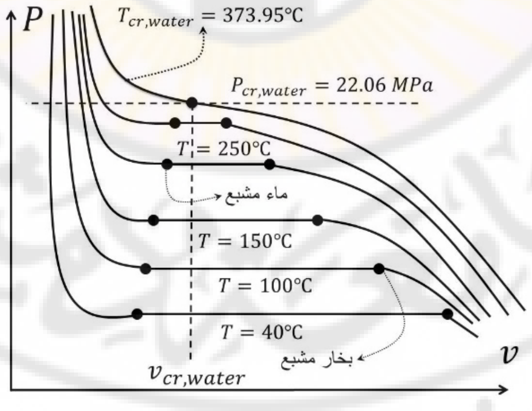
يبين الشكل (3−10) مناطق أطوار الماء كمادة وحيدة الطور والتي هي

- ✓ المنطقة بين منحني السائل المشبع والبخار المشبع والنقطة الحرجة تسمى بمنطقة مزيج سائل – بخار مشبع *Saturated Liquid-Vapor Mixture Region*.
- ✓ المنطقة التي توجد على يسار منحني السائل المشبع وتحت درجة الحرارة الحرجة تسمى بمنطقة السائل المضغوط *Compressed Liquid Region*.
- ✓ المنطقة الموجودة على يمين منحني البخار المشبع وفوق درجة الحرارة الحرجة تسمى بمنطقة البخار المحمص *Superheated Vapor Region*.

كافة المواد وحيدة الطور مثل وسائط التبريد (فريونات أو أمونيا) أو الغازات (الآزوت وغاز ثاني أوكسيد الكربون) يمكن تمثيلها كما مثلنا سابقاً الماء كمادة وحيدة الطور وتبقى المناطق كما هي.

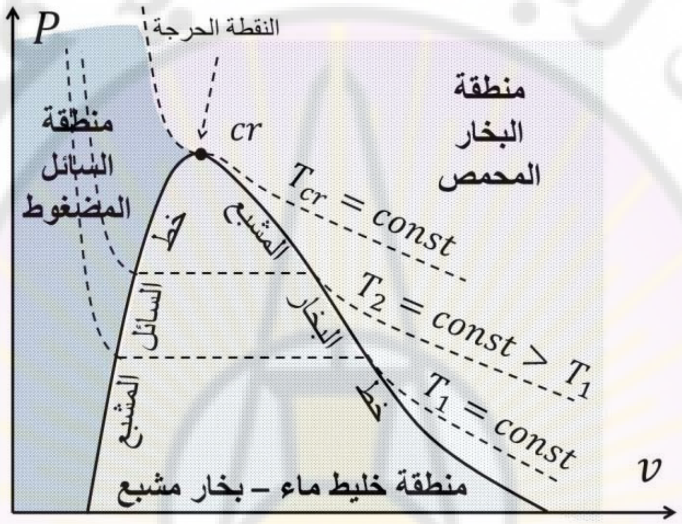
2.4.3 مخطط الضغط والحجم النوعي $(P - v)$.

يشبه مخطط $(P - v)$ مخطط $(T - v)$ بالشكل ولكن خطوط درجة الحرارة تتجه من الأعلى إلى الأسفل بعكس خطوط الضغط التي تتجه من الأسفل إلى الأعلى في مخطط $(T - v)$ كما هو واضح في الشكل (3−11).



الشكل (3−11) مخطط $(P - v)$ لمختلف درجات الحرارة.

تبقى المناطق كما هي ولكن منطقة السائل المضغوط تمد على يسار خط درجة الحرارة الحرجة والنقطة الحرجة وخط السائل المشبع أما منطقة البخار المحمص على يمين خط درجة الحرارة الحرجة وخط البخار المشبع كما هو واضح في الشكل (12−3).



الشكل (12−3) مناطق أطوار الماء على مخطط ($P - v$).

3.4.3 مخطط الضغط ودرجة الحرارة ($P - T$).

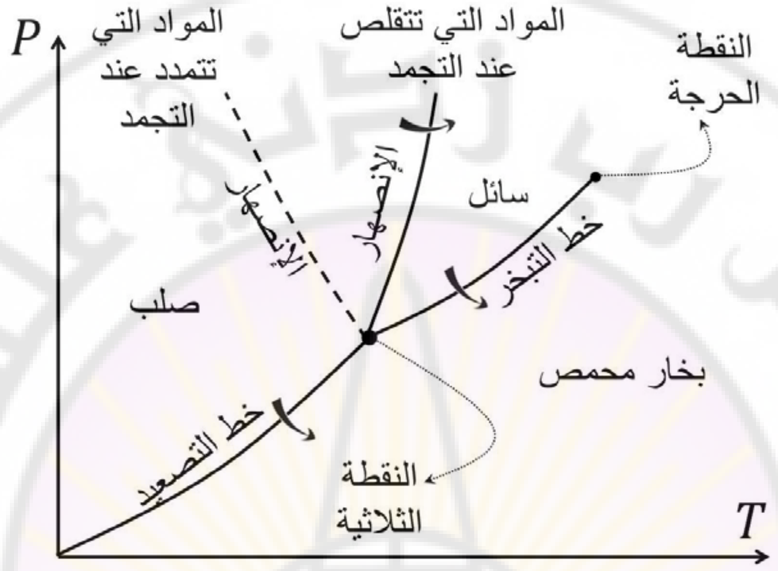
يبين الشكل (13−3) العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة ويسمى هذا المخطط بمخطط الأطوار *Phase Diagram*.

الخطوط على هذا المخطط تحدد الأطوار

- ✓ خط التصعيد *Sublimation Line* يفصل بين الطور البخار والصلب.
- ✓ خط التبخر *Vaporization Line* يفصل بين طور السائل والبخار.
- ✓ خط الانصهار *Melting (Fusion) line* يفصل بين الطور الصلب والسائل.

نلاحظ أن هناك خطين للانصهار أحدهما للمواد التي تتقلص عند التجمد والآخر للمواد التي تتمدد عند التجمد.

Bassam Badran
Damascus University



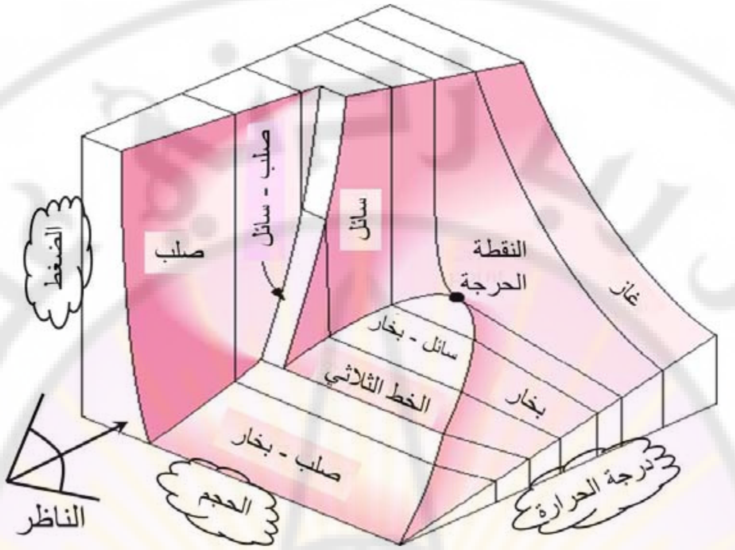
الشكل (3−13) مناطق الأطوار (صلب – بخار – سائل) على مخطط ($P-T$).

الخطوط الثلاثة تتقاطع عند النقطة الثلاثية *Triple Point* حيث توجد الأطوار الثلاثة في حالة توازن. ينتهي خط التبخر بالنقطة الحرجة لإنه لا يوجد فصل واضح بين البخار والسائل بعد هذه النقطة. منطقة مزيج سائل – بخار غير ظاهرة لإنها تتمثل بخط التبخر كاملاً.

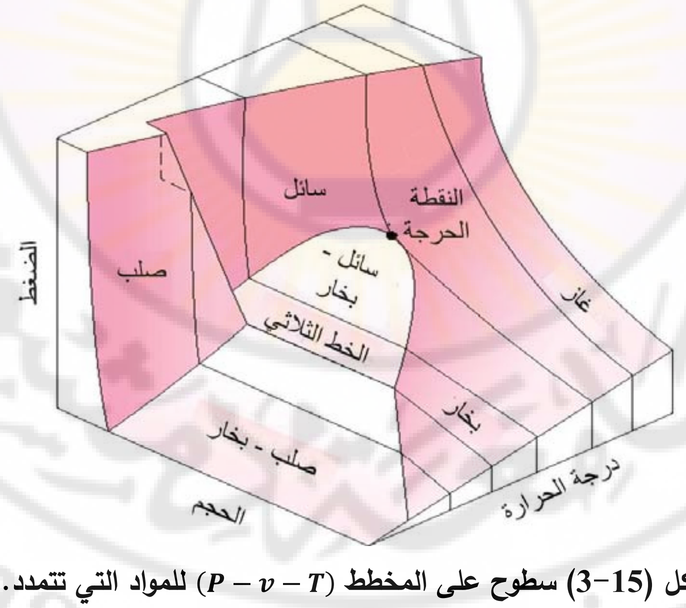
4.4.3 سطوح مخطط ($P-v-T$).

تُعرف حالة المادة البسيطة وغير القابلة للانضغاط بواسطة بارامترين مستقلين وعامين وبالتالي فإن أي بارامترين يرسمان سطحاً في الفراغ. بجمع هذه السطوح نحصل على مخطط ($P-v-T$). يوضح الشكل (3−14) والشكل (3−15) السطوح التي تتشكل من درجة الحرارة والحجم النوعي والضغط. هنا يجب أن نذكر أن أغلب المواد **تتقلص** عند التجمد وبينما بعض المواد مثل الماء **تتمدد** عند التجمد.

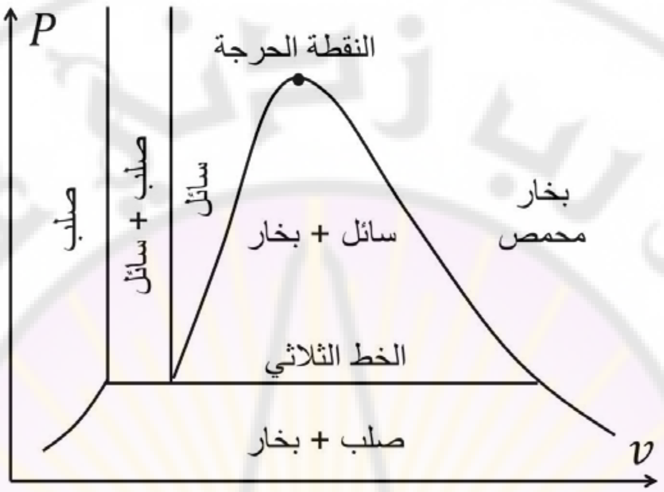
Bassam Badran
Damascus University



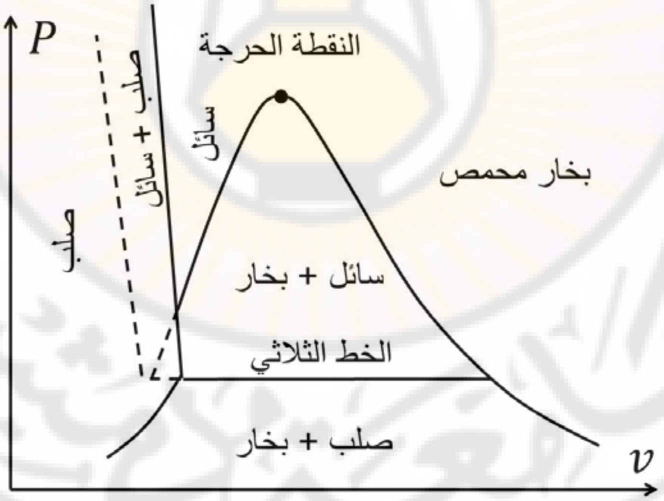
الشكل (14-3) سطوح على المخطط ($P - v - T$) للمواد التي تتقلص.



الشكل (15-3) سطوح على المخطط ($P - v - T$) للمواد التي تتمدد.



الشكل (3–16) مواد وحيدة الطور تتقلص عند التجمد.



الشكل (3–17) مواد وحيدة الطور تتمدد عند التجمد.

يبين الشكل (3−14) المواد التي تتقلص عند التجمد والشكل (3−15) المواد التي تتمدد عند التجمد. يمكن إيجاد المخطط $(P-v)$ والموضح في الشكل (3−12) إما من الشكل (3−14) أو من الشكل (3−15) عند النظر من الجانب الأيمن من محور درجة الحرارة وإسقاط الخطوط على مستوى $(P-v)$ وينتج عنه الشكل (3−16) والشكل (3−17).

الخط الثلاثي *Triple line* يعبر عن حالة التوازن بين الأطوار الصلبة والسائلة والغازية. يظهر هذا الخط على شكل نقطة على مخطط $(P-T)$ فيسمى بالنقطة الثلاثية *Triple point*. النقطة الثلاثية للماء هي $(273.15\ K)$ و $(0.61\ kPa)$.

5.3 الجداول للمادة وحيدة الطور.

العلاقة بين البارامترات (الخواص) الترموديناميكية معقدة ولا يمكن التعبير عنها بواسطة علاقة بسيطة. الربط بين هذه البارامترات يحتاج إلى جهد كبير ويمكن الاطلاع على هذه المعادلات الناظمة لهذه البارامترات من الجمعية الدولية المواصفات الماء والبخار (*IAPWS-IF97*) وكافة تعديلاته من موقع الجمعية. المعادلات التي تعتمدها الجمعية موجودة وملحقة في نهاية هذا الفصل.

تعطى هذه البارامترات على شكل جداول *Tables* لتسهيل عملية البحث والدراسة. سنقوم بوصف بارامترات السائل المضغوط والسائل المشبع ومزيج سائل − بخار والبخار المشبع والبخار المحمص بحسب المناطق المذكورة سابقاً. سوف نقوم باختيار الرموز التي تستخدمها الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار في تحديد هذه البارامترات. الرمز العام لأي بارامتر هو (y). عند وصف حالة السائل المشبع يعطى البارامتر الشكل (y_f) والرمز المنخفض *Subscript* (f) المرافق للبارامتر يعني الحالة السائلة *Fluid*. عند وصف حالة البخار المشبع يعطى البارامتر الشكل (y_g) والرمز المنخفض *Subscript* (g) المرافق للبارامتر يعني الحالة البخارية *Gas*.

Bassam Badran Damascus University

تستخدم الواحدات الدولية في تقييم هذه البارامترات. يجب أن نذكر هنا أن المراجع الروسية تقوم بوصف حالة السائل المشبع بالشكل (y') وتقوم بوصف حالة البخار المشبع بالشكل (y'').

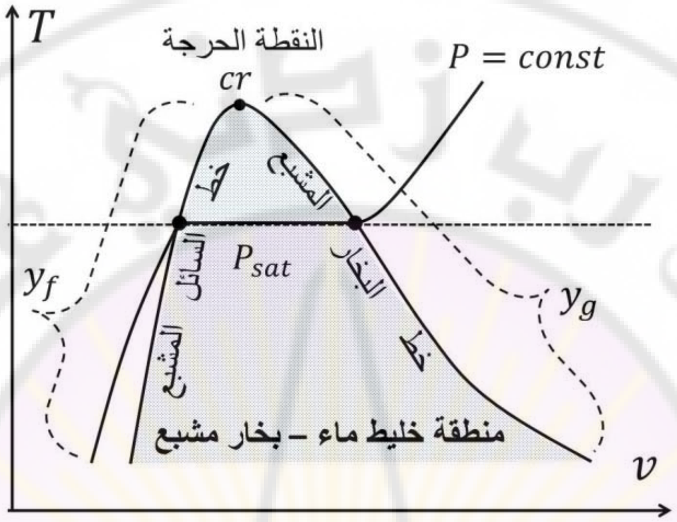
سوف نستبق الأحداث هنا ونقول إن البارامترات الموجودة في هذه الجداول هي درجة الحرارة ($T, ℃$) والضغط (P, kPa) والحجم النوعي ($v,\ m^3/kg$) والطاقة الداخلية ($u, kJ/kg$) الإنتالبي ($h, kJ/kg$) والإنتروبي ($s, kJ/kg\,K$) ويمكن إضافة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت ($c_P, kJ/kg\,K$) والحرارة النوعية عند حجم ثابت ($c_v, kJ/kg\,K$) وسرعة الصوت ($C, m/s$) ضمن هذه الجداول.

1.5.3 وصف بارامترات الإشباع للسائل والبخار.

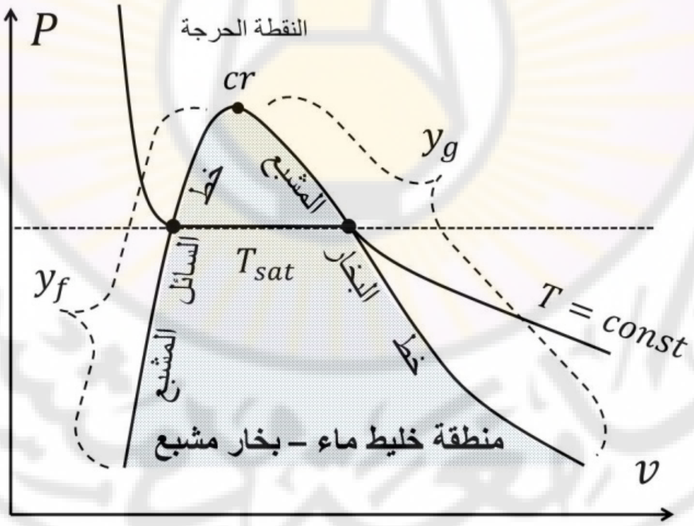
هناك جدولان يعبران عن حالة الإشباع. الأول يعطي كافة البارامترات بدلالة ضغط ويسمى جدول الإشباع بدلالة الضغط *Properties of saturated water – Temperature Table* والثاني يعطي كافة البارامترات بدلالة درجة حرارة ويسمى جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة *Properties of saturated water –Pressure Table*. عند ضغط إشباع معين (P_{sat}) كما في الشكل (3−18) أو درجة حرارة إشباع معينة كما في الشكل (3−19) تؤخذ بارامترات الحالة السائلة المشبعة من منحني السائل المشبع (y_f) وبارامترات الحالة البخارية المشبعة من منحني البخار المشبع (y_g).

يبين الجدول (3−2) مثالاً عن جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة **للماء**. نلاحظ من الجدول بأن درجة الحرارة تتدرج بخطوات متساوية ويحسب ضغط الإشباع بدلالة درجة الحرارة. أيضا نلاحظ وجود القيمة (h_{fg}) والتي تسمى إنتالبي التبخر أو التكاثف وهي تساوي كمية الحرارة الكامنة للمادة أو الفرق بين قيمة إنتالبي السائل المشبع وقيمة إنتالبي البخار المشبع. القيم داخل الجدول غير دقيقة ويجب إعتماد الجداول النظامية في إيجاد قيم البارامترات.

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (3–18) بارامترات حالة الإشباع بدلالة الضغط.



الشكل (3–19) بارامترات حالة الإشباع بدلالة درجة الحرارة.

الجدول (2−3) جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة للماء.

	الضغط الإشباع	الحجم النوعي		الطاقة الداخلية		الإنتالبي			الإنتروبي	
(°C)	(kPa)	(m^3/kg)		(kJ/kg)		(kJ/kg)			$(kJ/kg\ k)$	
T	P	$v_f * 10^{-3}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
10	1.228	1.000	106.4	42	2389	42	2478	2520	0.1	8.9
15	1.705	1.001	77.93	63	2396	63	2466	2529	0.25	8.7
20	2.339	1.002	57.79	84	2403	84	2454	2538	0.27	8.6

الجدول (3−3) جدول الإشباع بدلالة الضغط للماء.

	درجة الحرارة الإشباع	الحجم النوعي		الطاقة الداخلية		الإنتالبي			الإنتروبي	
(kPa)	(°C)	(m^3/kg)		(kJ/kg)		(kJ/kg)			$(kJ/kg\ k)$	
P	T	$v_f * 10^{-3}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
4	28.96									
6	36.16									
8	41.15									

يبين الجدول (3−3) أيضاً مثالاً عن جدول الإشباع بدلالة الضغط **للماء**. نلاحظ من الجدول بأن الضغط يتدرج بخطوات متساوية وتحسب درجة الحرارة (درجة حرارة الإشباع) بدلالة الضغط. أيضا نلاحظ أن قيمة (h_{fg}) هي نفسها بالمقارنة مع جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة.

Bassam Badran
Damascus University

يمكن مشاهدة الجداول نفسها للكثير من المواد وحيدة الطور فمثلاً توجد هذه الجداول لغاز الفريون ($134A$) المستعمل كوسيط تبريد كما في الجدول (3–4) ولغاز ثاني أوكسيد الكربون.

الجدول (3–4) جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة للفريون ($134A$).

درجة الحرارة	درجة الحرارة الإشباع	الحجم النوعي		الطاقة الداخلية		الإنتالبي			الإنتروبي	
(°C)	(kPa)	(m^3/kg)		(kJ/kg)		(kJ/kg)			$(kJ/kg\ k)$	
T	P	$v_f * 10^{-3}$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
-12	185.4									
-8	217.1									
-4	252.7									
0	292.8									
4	337.7									

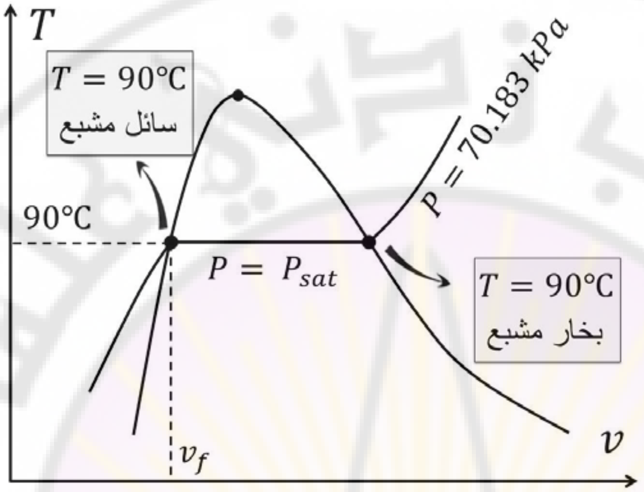
<u>المثال التطبيقي 3–1 – الضغط في خزان يحتوي سائلاً مشبعاً.</u>

خزان يحتوي على ($50\ kg$) من ماء على شكل سائل مشبع بدرجة حرارة (90°C) احسب ضغط الخزان وحجمه.

الفرضيات: 1) الخزان ذو جدران صلبة ويحتوي ماء مشبعاً.

التحليل: كون السائل مشبعاً أي أن بارامترات الحالة تأخذ من خط السائل المشبع في مخطط ($P-v$) أو في مخطط ($T-v$).

Bassam Badran Damascus University



استخدام الجداول أكثر سهولة من المخططات لأن المخططات بحاجة إلى تقريب لإيجاد القيمة. بما أن درجة الحرارة هي التي أعطيت في المسألة فنأخذ جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة. عند درجة الحرارة (90°C) نأخذ الضغط المرفق لها ويكون ضغط الإشباع والذي يساوي ضغط الخزان في الوقت نفسه

$$P = P_{sat@90℃} = 70.183\ kPa$$

لحساب الحجم نأخذ الحجم النوعي عند درجة الحرارة نفسها (الحجم النوعي على خط السائل المشبع) ومن الجدول نفسه

$$v = v_{f@90℃} = 0.001036\ \ m^3/kg$$

بالتالي فإن حجم الخزان الكلي يكون

$$V = m * v$$

بالتعويض نجد

$$V = (50\ kg) * (0.001036\ m^3/kg)$$

$$V = 0.0518\ m^3$$

ملاحظات:

- الفرضيات ضرورية لفهم المسألة وتحليلها.
- يجب أن نعرف تماماً أين هي النقطة على المخطط أولاً وكيفية استخراجها من الجداول.
- يجب وضع الواحدات في المعادلة والتحويل إن وجد قبل إجراء العمليات الحسابية.

المثال التطبيقي 3−2 – درجة حرارة بخار مشبع في أسطوانة.

يحتوي نظام أسطوانة – مكبس على ($2\ m^3$) من ماء على شكل بخار مشبع عند ضغط ($50\ kPa$). حدد درجة حرارة وكتلة البخار ضمن الأسطوانة.

الفرضيات: 1) نظام أسطوانة – مكبس ذات جدران متحركة وتحتوي بخاراً مشبعاً.

التحليل: كون البخار مشبعاً أي أن بارامترات الحالة تأخذ من خط البخار المشبع في مخطط ($P-v$) أو في مخطط ($T-v$). استخدام الجداول هو أكثر سهولة من المخططات وبما أن الضغط هو القيمة التي أعطيت في المسألة فنأخذ جداول الإشباع بدلالة الضغط.

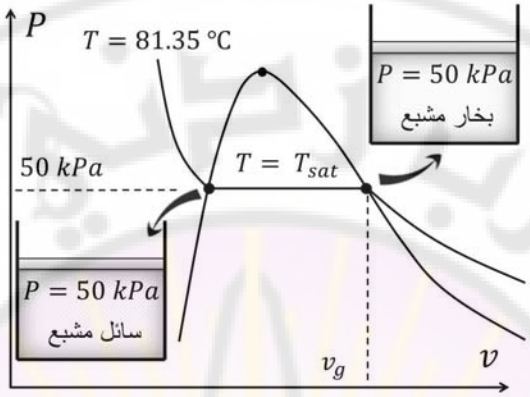
عند ضغط ($50\ kPa$) نأخذ درجة الحرارة الموافقة له وتكون درجة حرارة الإشباع هي درجة حرارة الخزان في الوقت نفسه

$$T = T_{sat@50\ kPa} = 81.35\ ℃$$

لحساب الكتلة نأخذ الحجم النوعي عند نفس الضغط (الحجم النوعي على خط البخار المشبع) ومن الجدول نفسه

$$v = v_{g@50\ kPa} = 3.239\ \frac{m^3}{kg}$$

Bassam Badran
Damascus University



بالتالي فإن كتلة الماء في الخزان الكلي تكون

$$m = \frac{V}{v}$$

$$m = \frac{2\ m^3}{3.239\ \frac{m^3}{kg}}$$

$$m = 0.6175\ kg$$

<u>المثال التطبيقي 3-3 – التغيير في الحجم خلال عملية التغيير الطوري والطاقة المرافقة.</u>

توجد كتلة من الماء على شكل سائل مشبع ضمن نظام أسطوانة – مكبس قدرها ($200\ g$). تنتقل كمية من الحرارة إلى النظام فتتبخر هذه الكمية وبشكل كامل إلى بخار مشبع عند الضغط ($100\ kPa$). حدد 1) التغيير في الحجم بفرض أن المكبس قابل للتحرك و2) كمية الحرارة اللازمة لهذه العملية.

الفرضيات: 1) نظام أسطوانة – مكبس ذات جدران متحركة وتحتوي سائلاً مشبعاً.

التحليل: هنا توجد لدينا حالتان الأولى سائل مشبع عند بداية التسخين أي أن بارامترات الحالة هي على خط السائل المشبع والثانية بخار مشبع عند نهاية التسخين أي أن

Bassam Badran
Damascus University

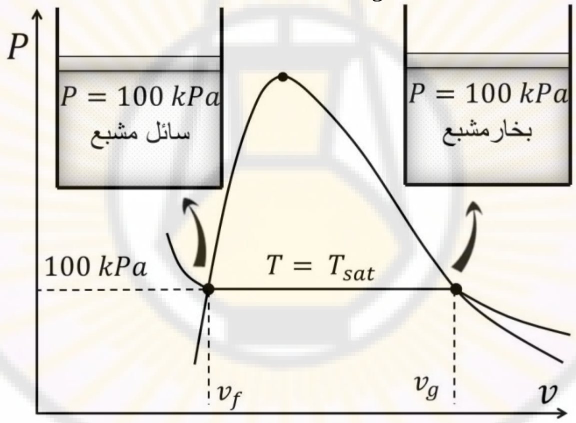
بارامترات الحالة هي على خط البخار المشبع. الجداول أكثر سهولة من المخططات. نبدأ بأخذ جدول الإشباع بدلالة الضغط لأن الضغط هو الذي أعطي في المسألة.

1. يحسب التغيير في الحجم بالنسبة إلى واحدة الكتل (التغيير في الحجم النوعي) من الفرق بين الحجم النوعي للسائل المشبع والحجم النوعي للبخار المشبع.

$$\Delta v = v_{fg} = \left(v_g - v_f\right)_{@\,100\,kPa}$$

$$\Delta v = 1.6941 - 0.001043$$

$$\Delta v = 1.6931\ \frac{m^3}{kg}$$



بالتالي فإن التغيير في الحجم يكون

$$\Delta V = m * v_{fg}$$

$$\Delta V = (0.2\,kg)(1.6931\,m^3/kg\,) = 0.3386\,m^3$$

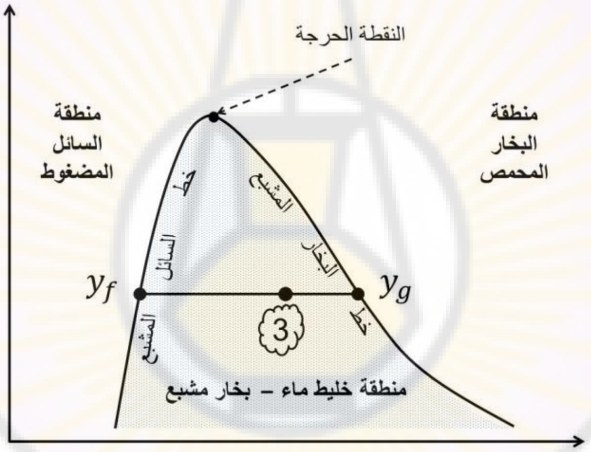
2. كمية الحرارة المضافة إلى النظام من كمية حرارة التبخر الموجودة في الجدول (h_{fg})

$$Q = m * h_{fg}$$

$$Q = (0.2\ kg)(2257.5\ kJ/kg) = 451.5\ kJ$$

2.5.3 وصف بارامترات مزيج ماء – بخار.

خلال عملية التبخر تكون المادة مكونة من مزيج من سائل و بخار والتي تمثل بالنقطة (3) كما هو واضح في الشكل (20–3).



الشكل (20–3) منطقة مزيج ماء – بخار.

من أجل معرفة بارامترات الحالة في هذه المنطقة والموجودة تحت القبة على مخططات $(P - v)$ أو $(T - v)$ يجب تحديد بارامتر إضافي وهو كتلة (كمية) البخار أو السائل بالنسبة إلى كتلة (كمية) المزيج. هذا البارامتر يعطى باسم "كسر الجفاف" *Quality* ويرمز له (ℵ). يُعرف كسر الجفاف بنسبة كتلة البخار الموجود في المزيج إلى كتلة المزيج بالكامل ويعطى بالعلاقة التالية

Bassam Badran
Damascus University

$$\aleph = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} \qquad (1\text{-}3)$$

$$m_{total} = m_{liquid} + m_{vapor} = m_f + m_g \qquad (2\text{-}3)$$

كسر الجفاف لاوجود له في منطقة البخار المحمص والسائل المضغوط. تكون قيمة هذا الكسر على خط السائل المشبع مساوية للصفر $(\aleph = 0)$ حيث لا توجد كتلة للبخار في المزيج والتي تتوافق مع بداية الغليان وتكون مساوية للواحد $(\aleph = 1)$ على خط البخار المشبع حيث أن كتلة البخار في المزيج تساوي كتلة المزيج بالكامل. قيمة كسر الجفاف في منطقة مزيج ماء – بخار يتراوح بين الصفر والواحد $(0 < \aleph < 1)$. يمكن استخدام هذا البارامتر مع بارامتر آخر في تحديد باقي بارامترات المادة في منطقة مزيج ماء – بخار.

بفرض أن لدينا خزاناً بحدود ثابتة يحتوي على بخار مشبع وسائل مشبع (مزيج)، يكون الحجم الكلي للمزيج (V) مساوياً للحجم الذي يشغله البخار (V_g) مضافاً إليه الحجم الذي يشغل السائل (V_f) أي

$$V = V_f + V_g$$

$$m_{total} * v = (mv)_f + (mv)_g$$

بالتقسيم على الكتلة وبأخذ تعريف قيمة كسر الجفاف نجد أن

$$v = (1 - \aleph)v_f + \aleph v_g$$

أو يمكن كتابتها على الشكل التالي

$$v = v_f + \aleph(v_g - v_f) = v_f + \aleph * v_{fg} \quad (m^3/kg) \qquad (3\text{-}3)$$

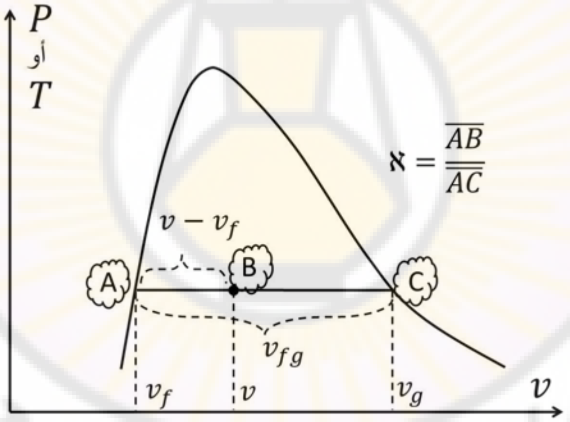
يمكن حساب كسر الجفاف من العلاقة

Bassam Badran Damascus University

$$ℵ = \frac{(v - v_f)}{(v_g - v_f)} \qquad (4\text{-}3)$$

نعبر عن قيمة كسر الجفاف بالمسافة الأفقية بين نقطة على خط البخار المشبع ونقطة أفقية مقابلة على خط السائل المشبع في كل من مخطط $(P - v)$ و $(T - v)$ كما في الشكل (21–3).

الحالة (A) هي حالة سائل مشبع والحالة (C) هي حالة بخار مشبع والحالة (B) هي حالة مزيج. عندما تتحرك النقطة (A) (إضافة حرارة) على الخط المستقيم باتجاه النقطة (C) تبدأ كمية السائل بالتحول إلى بخار وكلما اتجهنا أكثر إلى النقطة (C) ازدادت كمية البخار ونقصت كمية السائل حتى نصل إلى حالة بخارية كاملة.



الشكل (21–3) كسر الجفاف.

عندما تتحرك النقطة (C) (طرح حرارة) على الخط المستقيم باتجاه النقطة (A) تبدأ كمية البخار بالتحول إلى سائل وكلما اتجهنا أكثر إلى النقطة (A) ازدادت كمية السائل ونقصت كمية البخار حتى نصل إلى حالة سائلة كاملة. تعطى باقي البارامترات بدلالة كسر الجفاف على الشكل التالي

$$u = u_f + \aleph(u_g - u_f) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (5\text{-}3)$$

$$h = h_f + \aleph(h_g - h_f) = h_f + \aleph * h_{fg} \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (6\text{-}3)$$

$$s = s_f + \aleph(s_g - s_f) \qquad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right) \qquad (7\text{-}3)$$

المثال التطبيقي 3-4 – درجة الحرارة والضغط لمزيج مشبع.

يحتوي خزان على $(10\ kg)$ من الماء وبدرجة حرارة $(90\ °C)$. إذا كانت كتلة السائل في الخزان $(8\ kg)$ والباقي بخار. حدد الضغط الخزان وحجمه.

الفرضيات: 1) خزان ذو جدران ثابتة 2) درجة الحرارة ثابتة ولا يوجد تبادل حراري مع الوسط الخارجي.

التحليل: هنا توجد حالة مزيج من ماء وبخار. وبما أن درجة الحرارة ثابتة فالبخار والسائل في حالة توازن ويجب أن يكون مشبعاً أي لا توجد عملية تبخر للماء أو تكثيف للبخار. الضغط في الخزان هو ضغط الإشباع لأن المزيج في حالة توازن وبما أن الحرارة في الخزان هي $(90\ °C)$ نأخذ من جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة

$$P = P_{sat@90°C} = 70.183\ \ kPa$$

الحجم النوعي على خطوط الإشباع وعند درجة الحرارة $(90\ °C)$

$$v_{f@90°C} = 0.001036 \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

$$v_{g@90°C} = 2.3593 \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

الحجم يساوي

$$V = V_f + V_g = (mv)_f + (mv)_g$$

$$V = (8\ kg)\left(0.001036\frac{m^3}{kg}\right) + (2\ kg)\left(2.3593\frac{m^3}{kg}\right)$$

$$V = 4.73\ m^3$$

طريقة ثانية هي حساب كسر الجفاف على الشكل

$$\aleph = \frac{m_g}{m_{total}} = \frac{2\ kg}{10\ kg} = 0.2$$

$$v = v_f + \aleph(v_g - v_f)$$

$$v = 0.001036 + 0.2 * (2.3593 - 0.001036) = 0.473 \quad \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

$$V = m * v = (10\ kg)(0.473\ m^3/kg) = 4.73\ m^3$$

المثال التطبيقي 3–5 – درجة الحرارة والضغط لمزيج مشبع.

يحتوي خزان حجمه $(80\ L)$ على $(4\ kg)$ من وسيط التبريد $(134A)$ عند ضغط $(160\ kPa)$. حدد 1) درجة حرارة و2) كسر الجفاف و3) إنتالبي الوسيط وحجم بخار الغاز في الخزان.

الفرضيات: 1) خزان ذو جدران ثابتة 2) درجة الحرارة ثابتة ولا يوجد تبادل حراري مع الوسط الخارجي.

التحليل: هنا يجب تحديد حالة الوسيط. من خلال حساب الحجم النوعي للخزان بالكامل نجد

$$v = \frac{V}{m}$$

$$v = \frac{0.080\ m^3}{4\ kg} = 0.02\ \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

عند ضغط الخزان $(160\ kPa)$ ومن جدول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن الحجم النوعي للسائل المشبع والبخار المشبع هما

$$v_{f@100\ kPa} = 0.0007437\ \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

$$v_{g@100\ kPa} = 0.12348\ \left(\frac{m^3}{kg}\right)$$

وبما أن الحجم الكلي هو بين القيم المشبعة أي

$$v_{f@100\ kPa} = 0.0007437\ < v = 0.02\ < \ v_{g@100\ kPa} = 0.12348$$

فالمادة في الخزان هي مزيج مشبع من السائل والبخار. درجة حرارة الخزان هي درجة حرارة الإشباع وبما أن الضغط في الخزان هو $(160\ kPa)$ نأخذ من جدول الإشباع بدلالة الضغط لوسيط التبريد $(134a)$

$$T = T_{sat@100\ kPa} = -15.60\ ℃$$

يحدد كسر الجفاف من المعادلة

$$\aleph = \frac{(v - v_f)}{(v_g - v_f)}$$

$$\aleph = \frac{0.02 - 0.0007437}{0.12348 - 0.0007437}$$

$$\aleph = 0.157$$

أي أن هناك نسبة (15.7%) كتلة بخار و (84.3%) كتلة سائل. إنتالبي المادة في الحالة في حال وجود مزيج

$$h = h_f + \aleph(h_g - h_f) = h_f + \aleph * h_{fg} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

نأخذ قيم الإشباع أيضا من الجداول عند ضغط $(160\ kPa)$ فنجد أن

$$h = h_f + \aleph(h_g - h_f)$$

$$h = 31.21 + 0.157 * 209.9$$

$$h = 64.2 \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

تحسب كتلة البخار من كسر الجفاف بالشكل

$$m_g = \aleph * m_{total}$$

$$m_g = 0.157 * 4\ kg$$

$$m_g = 0.628\ kg$$

حجم البخار (الغاز) ضمن الأسطوانة هو

$$V_g = m_g * v_g$$

$$V_g = (0.628\ kg)\left(0.12348\ \left(\frac{m^3}{kg}\right)\right)$$

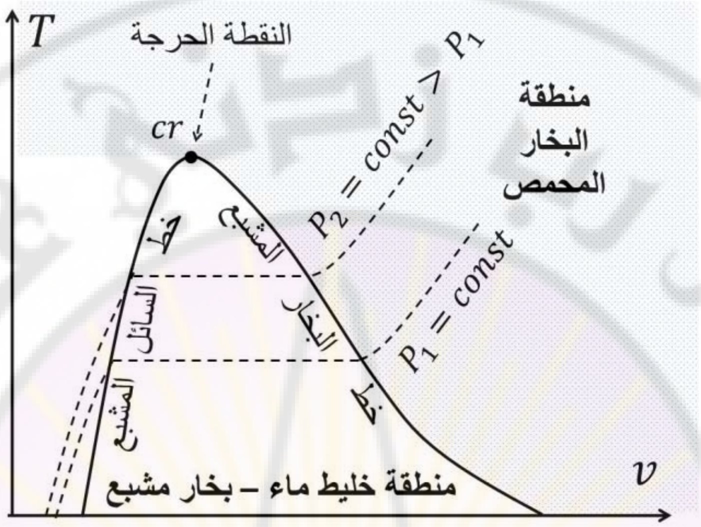
$$V_g = 0.0775\ m^3 = 77.5\ L$$

بقية الخزان ($77.5\ L$) هو سائل.

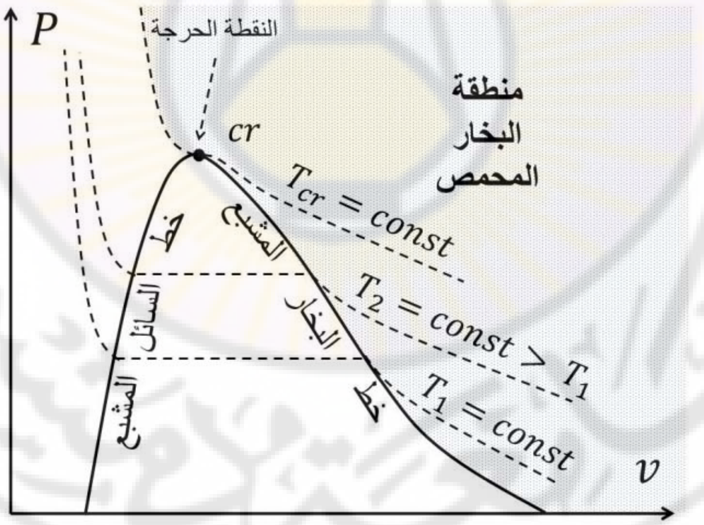
3.5.3 وصف بارامترات البخار المحمص.

توجد منطقة البخار المحمص *Superheated Vapor* فوق درجة الحرارة الحرجة وعلى يمين خط البخار المشبع ($\aleph = 1$) في مخطط ($T - v$) كما في الشكل (3−22) وعلى يمين درجة الحرارة الحرجة في مخطط ($P - v$) كما في الشكل (3−23). هنا الضغط ودرجة الحرارة بارامتران منفصلان لأن المادة هي مكون واحد فقط. تبدأ الجداول المتعلقة بحالة البخار المحمص بضغط معين تعطى معه درجة حرارة الإشباع وتعطى باقي بارامترات فوق درجة حرارة الإشباع بشكل مجدول مثل الحجم النوعي والطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي. يبين الجدول (3−5) مثالاً عن بارامترات الماء في منطقة البخار المحمص.

Bassam Badran Damascus University



الشكل (3–22) منطقة البخار المحمص على مخطط $(T - v)$.

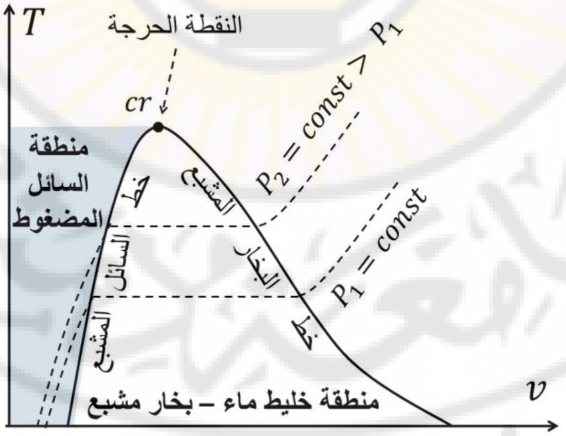


الشكل (3–23) منطقة البخار المحمص على مخطط $(P - v)$.

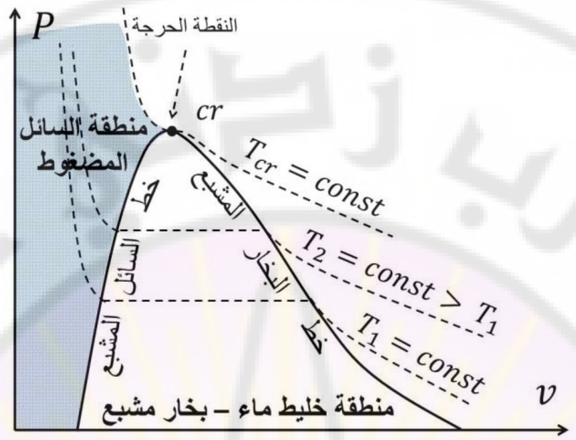
الجدول (3−5) بارامترات منطقة البخار المحمص.

درجة الحرارة	$P = 0.1\ MPa$ ($T_{sat} = 99.63$℃)			
T (℃)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s ($kJ/kg\ k$)
(Sat)	1.694	2506.1	2675.5	7.3594
100	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
	$P = 0.5\ MPa$ ($T_{sat} = 151.86$℃)			
T (℃)	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s ($kJ/kg\ k$)
(Sat)	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592

4.5.3 وصف بارامترات السائل المضغوط.



الشكل (3−24) منطقة السائل المضغوط على مخطط ($T - v$).



الشكل (3−25) منطقة السائل المضغوط على مخطط $(P-v)$.

توجد منطقة السائل المضغوط *Sub-cooled Liquid* على يسار خط السائل المشبع $(\aleph = 0)$ وتحت درجة الحرارة الحرجة في مخطط $(T-v)$ كما في الشكل (3−24) وعلى يسار خط درجة الحرارة الحرجة في مخطط $(P-v)$ كما في الشكل (3−25). هنا أيضاً الضغط ودرجة الحرارة بارامتران منفصلان لأن المادة كما في البخار المحمص هي مكون واحد فقط. الجداول في حالة السائل المضغوط تشبه حالة البخار المحمص تماماً. في بعض المراجع توضع بارامترات السائل المضغوط والبخار المحمص سوياً ضمن جداول واحدة وتفصل بينهما بخط للتمييز بين المنطقتين.

5.5.3 تحديد المنطقة التي توجد بها الحالة من الجداول.

هنا سنقوم على معالجة عدة حالات وسنقوم على تحديد مطان تواجد الحالة من خلال تلك البارامترات.

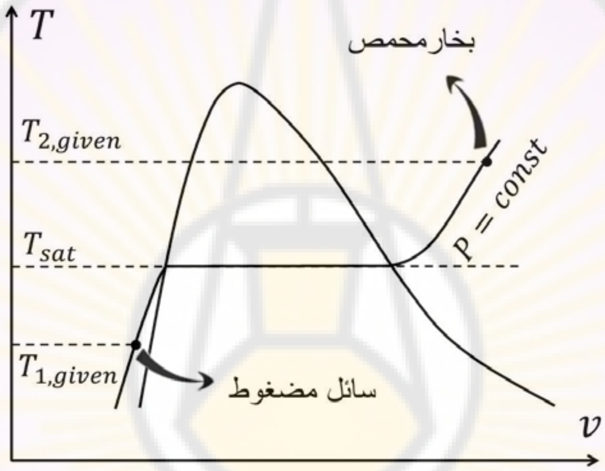
- درجة الحرارة والضغط معلومان: عندما تكون درجة الحرارة والضغط معلومين في مسألة ما ونريد أن نحدد حالة المادة الموجودة في ذلك النظام نأخذ إحدى الطرق التالية.

Bassam Badran
Damascus University

نقوم بتثبيت الضغط كما في الشكل (3−26) ونختار درجة حرارة الإشباع الموافقة للضغط المعلوم والمثبت من جداول الإشباع بدلالة الضغط فإذا كانت درجة الحرارة المعطاة في المسألة (T_{given})

$T_{given} > T_{sat@P\ from\ tables}$ فالحالة بخار محمص

$T_{given} < T_{sat@P\ from\ tables}$ فالحالة سائل مضغوط



الشكل (3−26) تحديد الحالة بدلالة الضغط معلوم من مخطط $(T - v)$.

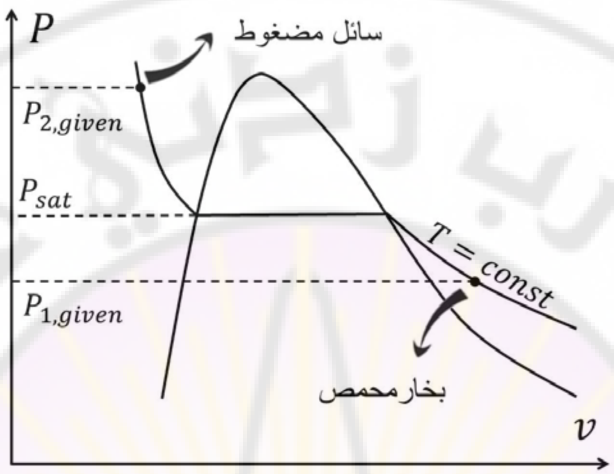
أو نقوم بتثبيت درجة الحرارة كما في الشكل (3−27) ونختار ضغط الإشباع الموافق لدرجة الحرارة المعلومة والمثبتة من جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة فإذا كان الضغط المعطى في المسألة (P_{given})

$P_{given} < P_{sat@T\ from\ tables}$ فالحالة بخار محمص

$P_{given} > P_{sat@T\ from\ tables}$ فالحالة سائل مضغوط

في هذه الحالة لا يمكن معرفة إذا كانت الحالة مزيجاً.

Bassam Badran Damascus University



الشكل (27−3) تحديد الحالة بدلالة درجة حرارة معلومة من مخطط $(P - v)$.

- <u>**درجة الحرارة وأي بارامتر آخر**</u>: عندما تكون لدينا درجة الحرارة وبارامتر آخر مثل الطاقة الداخلية أو الحجم النوعي أو الإنتالبي أو الإنتروبي في مسألة ما معلومين ونريد أن نحدد حالة المادة نقوم بأخذ بارامترات الحالة من جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة ولنأخذ على سبيل المثال الطاقة الداخلية

$u_{given} < u_{f@T\ from\ tables}$ فالحالة سائل مضغوط

$u_{given} = u_{f@T\ from\ tables}$ فالحالة سائل مشبع

$u_{f@T\ from\ tables} < u_{given} < u_{g@T\ from\ tables}$ فالحالة مزيج

$u_{given} = u_{g@T\ from\ tables}$ فالحالة بخار مشبع

$u_{given} > u_{g@T\ from\ tables}$ فالحالة بخار محمص

عندما تكون الحالة سائل مضغوط أو بخار محمص نقوم بالبحث من جداول السائل المضغوط أو البخار المحمص عن قيمة الطاقة الداخلية عند درجة الحرارة المعطاة. تنطبق المعالجة نفسها على بارامتر الإنتالبي أو الإنتروبي.

Bassam Badran Damascus University

- الضغط وأي بارامتر آخر: هنا نتبع طريق درجة الحرارة نفسها وأي بارامتر آخر ولكن نأخذ القيم من جدول الإشباع بدلالة الضغط.

- كسر الجفاف وأي بارامتر: في هذه الحالة نبحث في جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة أو الضغط عن قيمة قريبة إلى البارامتر المعطى ونقوم بمجموعة من عمليات التقريب من أجل الحصول على قيمة البارامتر المعطى.

المثال التطبيقي 3−6 – تحديد البارامترات.

حدد البارامترات الباقية في الجدول التالي.

$T\ (°C)$	$P\ (kPa)$	$u\ (kJ/kg)$	$\aleph$	الحالة
	200		0.6	
125		1600		
	1000	2950		
75	500			
	850		0	

الفرضيات: 1) الوسيط هو ماء.

التحليل: قبل البدأ في أخذ القيم من الجداول يجب تحديد الحالة ومنها نقوم باختيار الجدول المناسب لتحديد باقي البارامترات.

النقطة الأولى: $\aleph = 0.6$, $(P = 200\ kPa)$.

بما إنه يوجد لدينا كسر جفاف $(\aleph = 0.6)$ أي أن كتلة بخار الماء هي 60% وكتلة الماء 40%. الحالة هي مزيج ماء – بخار. من الضغط المعلوم $(P = 200\ kPa)$ وبدلالة جدول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن

$$T = T_{sat@200\,kPa} = 120.21\ ℃$$

ومن الجدول نفسه نأخذ قيم الطاقة الداخلية على خط البخار المشبع والسائل المشبع

$$u = u_f + ℵ\,(u_g - u_f)$$

$$u = 504.5 + 0.6\,(2024.6 - 504.5) = 1719.26 \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

<u>النقطة الثانية.</u> $T = 125℃ \quad u = 1600\ (kJ/kg)$.

هنا درجة الحرارة معلومة ومن جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة نجد قيم الطاقة الداخلية على خط البخار المشبع والسائل المشبع فنجد أن

$$u_f = 524.83\ \left(\frac{kJ}{kg}\right), \quad u_g = 2534.3\ \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

نقارن بين هذه القيم المأخوذة من الجدول مع القيم المعطاة فنجد أن

$$u_{f@125℃} = 524.83 < u_{given} = 1600 < u_{g@125℃} = 2534.3$$

فالحالة هي مزيج ماء – بخار. هنا الضغط هو ضغط الإشباع أيضا من الجدول نفسه

$$P = P_{sat@125℃} = 232.23\ kPa$$

وبالتالي نحنا هنا بحاجة إلى كسر الجفاف ويحسب من العلاقة

$$ℵ = \frac{(u - u_f)}{(u_g - u_f)} = 0.535$$

<u>النقطة الثالثة.</u> $P = 1000\ kPa \quad u = 2950\ (kJ/kg)$.

هنا الحالة تشبه الحالة السابقة ولكن يجب أخذ جدول الإشباع بدلالة الضغط نجد قيم الطاقة الداخلية على خط البخار المشبع والسائل المشبع فنجد أن

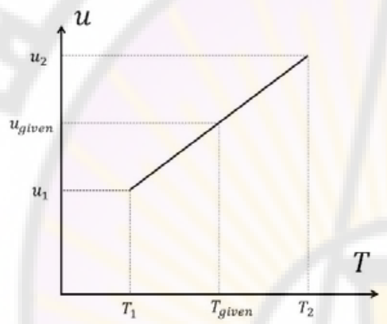
Bassam Badran
Damascus University

$$u_f = 761.39 \left(\frac{kJ}{kg}\right), \quad u_g = 2582.8 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

نقارن بين هذه القيم المأخوذة من الجدول مع القيم المعطاة فنجد أن

$$u_{given} = 2950 > u_{g@125℃} = 2582.8$$

فالحالة هي بخار محمص. نقوم بالبحث في جدول البخار المحمص عند الضغط $(P = 1000\ kPa)$ وفي عامود الطاقة الداخلية على قيمة قريبة من القيمة المعطاة. في أغلب الأحيان لا نقع في الجدول على قيم مساوية للطاقة الداخلية المعطاة في المسألة فنقوم بالتقريب الخطي بين قيم قريبة من القيمة المعطاة لإيجاد باقي البارامترات. هنا يجب تحديد درجة الحرارة فيكون التقريب على درجة الحرارة كما يلي



$$u_1 = 2875.2\ , T_1 = 350$$

$$u_{given} = 2950, T = ????$$

$$u_2 = 2957.3, T_2 = 400$$

وبالتالي نجد أن

$$\frac{u_2 - u_1}{u - u_1} = \frac{T_2 - T_1}{T - T_1}$$

$$\frac{2957.3 - 2875.2}{2950 - 2875.2} = \frac{400 - 350}{T - 350}$$

معادلة واحدة بمجهول واحد فنجد أن

$$T = 395.554℃$$

لا يوجد كسر الجفاف في هذه منطقة لأن البخار المحمص.

Bassam Badran Damascus University

النقطة الرابعة. $T = 75°C \quad P = 500\ kPa$.

في هذه الحالة الضغط ودرجة الحرارة معطيان. يمكن هنا تثبيت إحدى البارامترات والبحث في جدول الإشباع لذلك البارامتر عن بارامتر الإشباع. إذا ثبتنا الضغط وأخذنا درجة حرارة الإشباع عند الضغط من جدول الإشباع بدلالة الضغط نجد

$$T_{given} = 75 < T_{sat} = 151.86$$

أي أن الحالة سائل مضغوط. إذا ثبتنا درجة الحرارة وأخذنا ضغط الإشباع من جدول الإشباع بدلالة درجة الحرارة نجد أن

$$P_{given} = 500 > P_{sat} = 38.58$$

أي ان الحالة سائل مضغوط كما وجدنا في التحليل السابق.

من جداول السائل المضغوط نجد أن $u = 313.833\ (kJ/kg)$ و لا يوجد كسر الجفاف في منطقة السائل المضغوط.

النقطة الخامسة. $\aleph = 0 \quad P = 850\ kPa$.

كون كسر الجفاف يساوي الصفر أي أننا عند خط السائل المشبع ومن جداول الإشباع بدلالة الضغط كون الضغط هو المعطى نجد أن

$$T = T_{sat} = 172.94°C$$

$$u = u_{f@850\ kPa} = 731.00\ kJ/kg$$

6.3 قوانين الغازات المثالية ***Ideal Gas Equations***.

يعرف الغاز المثالي بأنه غاز وهمي لاوجود له حيث تكون جزيئاته نقاطاً مادية لا حجم لها ولاتؤثر بينها أي قوى تماسك. هناك مجموعة من القوانين سنقوم على التحدث عنها هنا لكي نصف حالة الغاز المثالي.

Bassam Badran Damascus University

1.6.3 قانون بويل – ماريوت ***Boyle – Mariotte's Law*** للغازات المثالية.

نشر روبرت بويل عام 1662 اكتشافه التجريبي والخاص بسلوك الغازات حيث قال "عند درجة حرارة ثابتة يتناسب حجم الغاز عكساً مع الضغط". في الفترة نفسها أي في عام 1676 قام ماريوت بنشر – وبشكل مستقل – إكتشاف بويل التجريبي والخاص بسلوك الغازات حيث قال "ضغط كمية معينة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة يتناسب عكساً مع الحجم". يعطى قانون بويل – ماريوت بالعلاقة التالية

$$P \ \alpha \ \frac{1}{V}$$

وبالتالي

$$(PV)_T = const \qquad (7\text{-}3)$$

2.6.3 قانون أمونتون ***Amontons' Law*** للغازات المثالية.

قام غوبليم أمونتون في عام 1700 و 1702 باكتشاف العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة عندما كان يقوم بإختراع ميزان حراري للهواء *Air thermometer*. يقول قانون أمونتون أن "ضغط كتلة معينة من الغاز المثالي عند حجم ثابت يتناسب طرداً مع درجة الحرارة".

$$P \ \alpha \ T$$

وبالتالي

$$\left(\frac{P}{T}\right)_V = const \qquad (8\text{-}3)$$

3.6.3 قانون غي لوساك ***Gay-Lussac's law*** للغازات المثالية.

تم نشر هذا القانون من قبل العالم الفرنسي جوزيف لويس غي لوساك في عام 1802 ولكن يعود هذا الاكتشاف إلى جاك تشارلز في عام 1780 الذي لم يقم بنشر

بحثه. يقول قانون غي لوساك أن "حجم كتلة معينة من الغاز المثالي عند ضغط ثابت يتناسب طرداً مع درجة الحرارة".

$$V \ \alpha \ T$$

وبالتالي

$$\left(\frac{V}{T}\right)_P = const \qquad (9\text{-}3)$$

4.6.3 قانون أفوكادرو *Avogadro's law* للغازات المثالية.

قام أميندو أفوغادرو في عام 1811 بإكتشاف العلاقة بين الحجم وعدد مولات الغاز المثالي. يقول قانون أفوغادرو أن "حجم الغاز المثالي عند ضغط ثابت ودرجة حرارة ثابتة يتناسب طرداً مع عدد مولات (كتلة) الغاز".

$$V \ \alpha \ N$$

وبالتالي

$$\left(\frac{V}{N}\right)_{P,T} = const \qquad (10\text{-}3)$$

5.6.3 القانون المشترك *Combined Gas Law* للغازات المثالية.

بجمع القوانين السابقة الثلاثة، بويل – ماريوت وغي لوساك وأمونتون، نجد أن "الضغط مضروباً بالحجم بثبات الكتلة يتناسب طرداً مع درجة الحرارة لغاز مثالي".

$$P * V \ \ \alpha \ \ T$$

وبالتالي

$$\left(\frac{PV}{T}\right)_m = const \qquad (11\text{-}3)$$

Bassam Badran
Damascus University

6.6.3 معادلة الغاز المثالي *Ideal Gas Equation* (معادلة كلابيرون *Clapeyron Equation*).

قام العالم الفيزيائي إميل كلابيرون بوضع معادلة الغاز المثالي في عام 1834 من القوانين السابقة. تدعى هذه المعادلة أيضاً بمعادلة الحالة *Equation of State*. تقوم هذه المعادلة العامة على ربط بارامترات الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي وكتلة الغاز المثالي كما يلي

$$PV = nkT = NR_uT = mRT = (N\mu)RT \qquad (12\text{-}3)$$

$$P = \rho RT, \qquad Pv = RT$$

حيث أن

P الضغط المطلق (Pa)

V الحجم (m^3)

T درجة حرارة المطلقة الغاز (K)

n عدد الذرات *Atoms*

k عدد بولتزمان ويساوي $(1.38064 * 10^{-23} J/atoms * K)$

N عدد المولات (mol)

A_o ثابت أفوكادو *Avogadro Constant* ويساوي $(6.022141 * 10^{23} atom/mol)$.

R_u ثابت الغازات العام (*Universal Gas Constant*) ويساوي

$$R_u = A_o * k$$

$$8.314 \ J/mol\ K$$

$$0.08314 \ bar\ m^3/kmol\ K$$

$$1.98 \ btu/lbmol\ R$$

$$10.72 \ psia\ ft^3/lbmol\ R$$

μ الكتلة المولية للغاز (*molar mass*) ذات الوحدة g/mol فالكتلة المولية للنتروجين (N_2) مثلاً تساوي الوزن الذري للنتروجين $= 2 * 14)$

Bassam Badran Damascus University

($28\ kg/kmol$ أي أن كتلة مول واحد من النتروجين تساوي 28 كغ.

m كتلة الغاز kg وتساوي

(kg) $\quad m = N\ (kmol) * \mu\ (kg/kmol)$

R ثابت الغاز ويساوي

$(J/kg\ K)$ $\quad R = R_u/\mu = N * R_u/m$

ρ كثافة الغاز (kg/m^3) وهي مقلوب الحجم النوعي $\rho = 1/v$

<u>المثال التطبيقي 3−7 – غاز مثالي في نظام مغلق.</u>

وجد أن قيمة ضغط الهواء الموجود في عجلة سيارة عند قياسه هي $(210\ kPa)$ وعند درجة حرارة $(25°C)$. نقيس الضغط داخل العجلة بعد أن تتحرك السيارة في رحلة فتكون قيمته $(220\ kPa)$. بفرض أن حجم عجلة بقي ثابتاً والضغط الجوي المحيط بالعجلة هو $(95\ kPa)$ احسب درجة حرارة الهواء داخل العجلة بعد الرحلة.

الفرضيات: 1) الهواء داخل العجلة مثالي 2) الحجم ثابت أي أن العملية إيزوخورية (ثبات الحجم).

التحليل: الضغط على العجلة هو $(95\ kPa)$ فالضغط المطلق قبل وبعد الرحلة هو

$$P_1 = P_{gage,1} + P_{atm} = 210 + 95$$

$$P_1 = 305\ kPa$$

$$P_2 = P_{gage,2} + P_{atm} = 220 + 95$$

$$P_2 = 315\ kPa$$

بتطبيق علاقة الغاز المثالي على الحالة الأول والثانية ومساواتهما حيث الحجم ثابت نجد أن

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

$$\rightarrow T_2 = \frac{P_2 * T_1}{P_1}$$

Bassam Badran Damascus University

$$T_2 = \frac{315}{305} * (25 + 273)$$

$$T_2 = 307.8\ K = 34.8\ ℃$$

مناقشة:

أي أن درجة الحرارة زادت بمقدار 10 درجات (6.9%) خلال الرحلة. هذا يظهر ضرورة قياس ضغط العجلة قبل وبعد رحلة معينة.

المثال التطبيقي 3–8 – ضغط الغاز المثالي.

ماهو الضغط الذي يمارسه ($20.16\ g$) من غاز الهيدروجين بأسطوانة حجمها ($7.5\ L$) وبدرجة حرارة ($20\ C$).

الفرضيات: الغاز مثالي.

التحليل: الوزن الذري للهيدروجين هو (1.00794) من جدول العناصر الكيميائية *Periodic Table* وهو يعبر عن واحد مول (مركب أو عنصر) فقط. وبما أن صيغة الهيدروجين H_2 وبالتالي فالكتلة المولية هي $2.016\ kg/kmol$. عدد المولات لغاز الهيدروجين في الأسطوانة يحسب

$$N = mass\ (M)/Molar\ mass\ (\mu)$$

أي أن

$$N = \frac{\frac{20.16}{2}\ g}{1.008 \frac{g}{mol}}$$

$$N = 10\ mol$$

ودرجة الحرارة ($T = 20 + 273 = 293K$) بالتعويض في معادلة الغاز المثالي نجد أن

$$PV = NR_uT$$

Bassam Badran Damascus University

$$\frac{P\ (kPa)}{1000} * 7.5(m^3) = 10\ (mol) * 8.3145\ \left(\frac{J}{mol\ K}\right) * 293\ K$$

$$P = 3248\ kPa = 3.248\ MPa = 32.48\ bar$$

السؤال هنا هل يمكن اعتبار بخار الماء غازاً مثالياً؟ نتيجة التجارب تبين بأن بخار الماء تحت ضغط ($10\ kPa$) ودرجات حرارة مرتفعة (بخار محمص) يمكن اعتباره غازاً مثالياً. يمكن اعتبار بخار الماء المحتوى في الهواء الرطب *Humid Air* والمستخدم في أجهزة التكييف على إنه غاز مثالي وتكون الأخطاء بحدود (0.1 %). هذه الفرضية لا يمكن تطبيقها عند ضغوط أعلى من ($10\ kPa$).

7.6.3 بارامترات الغاز المثالي.

يتم تحديد باقي بارامترات الغاز المثالي من طاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت وحجم ثابت وضغط مرجعي وحجم مرجعي من جداول خاصة متعلقة بنوع الغاز فمثلاً يعتبر الهواء الجاف غازاً مثالياً وتؤخذ بارامتراته من جداول الهواء الجاف كما هو في الجدول (6−3).

الجدول (6−3) بارامترات الهواء الجاف.

درجة الحرارة	الإنتالبي	الضغط النسبي	الطاقة الداخلية	الحجم النسبي	الإنتروبي
(K)	(kJ/kg)	لا وحدة	(kJ/kg)	لا وحدة	$(kJ/kg\ k)$
T	h	P_r	u	v_r	s^o
200					
210					
220					

Bassam Badran Damascus University

كافة الغازات لها جداول خاصة بها تؤخذ منها كافة البارامترات. نلاحظ من الجدول $(3-6)$ وجود الضغط النسبي *Relative Pressure,*(P_r) والحجم النوعي النسبي *Relative Volume* (v_r) والتي ستعرف لاحقاً وبالتفصيل في فصل الإنتروبي.

7.3 معامل الانضغاط *Compressibility Factor*.

من أجل مقارنة الغاز الحقيقي إلى الغاز المثالي واستخدام معادلة الحالة في تحديد بارامترات الغاز الحقيقي نقوم باستخدام معامل تصحيح معين يسمى معامل الانضغاط *Compressibility Factor* والذي يعطى بالعلاقة التالية

$$Z = \frac{v_{actual}}{v_{ideal}}$$

أو

$$Z = \frac{V_{actual}}{V_{ideal}} \qquad (13\text{-}3)$$

يعرف معامل الانضغاط (Z) بأنه النسبة بين حجم الغاز الحقيقي إلى حجم الغاز المثالي. تصبح معادلة الحالة للغاز الحقيقي باستخدام معامل الانضغاط على الشكل

$$P * V = Z * (m * R * T) \qquad (14\text{-}3)$$

إن قيمة هذا المعامل في الغازات المثالية تساوي الواحد $(Z = 1)$ أما في الغازات الحقيقية فيمكن أن يكون هذا المعامل أكبر أو أصغر من الواحد كما هو واضح في الشكل $(3-28)$. نلاحظ من الشكل $(3-28)$ التباين بين الغاز المثالي والغاز الحقيقي عند

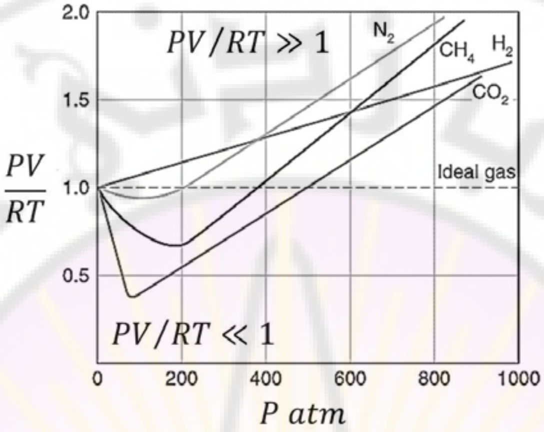
1) ضغوط عالية ودرجات حرارة منخفضة.

$$\frac{P * V}{m * R * T} \gg 1$$

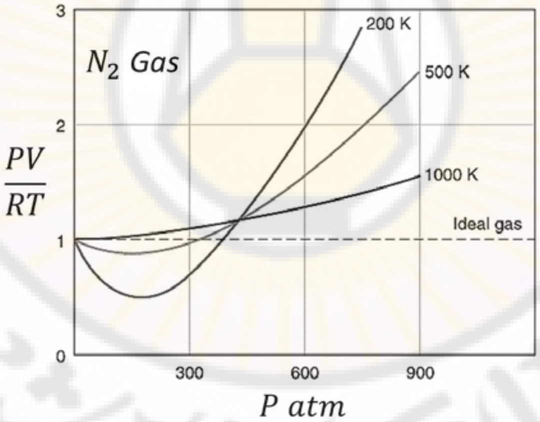
2) درجات حرارة مرتفعة وضغوط منخفضة.

$$\frac{P * V}{m * R * T} \ll 1$$

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (28–3) التباين بين الغازات الحقيقي والمثالية بدلالة الضغط.

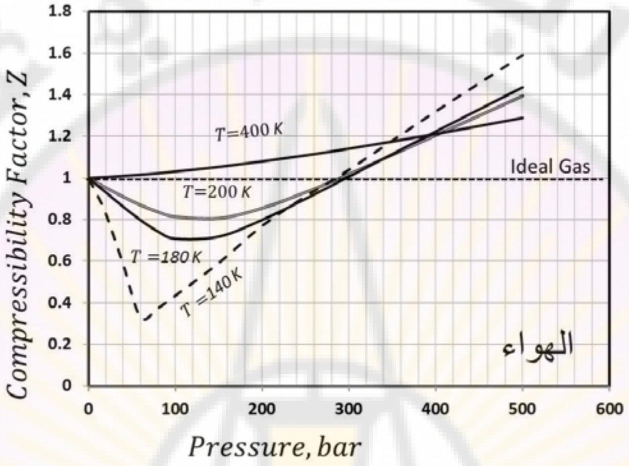


الشكل (29–3) التباين بين الغازات الحقيقية والمثالية عند درجات حرارة مختلفة.

يبين الشكل (29–3) التباين بين الغاز المثالي والحقيقي باختلاف درجات الحرارة لغاز النتروجين فكلما اقتربت درجة حرارة هذا الغاز المدروس من درجة الحرارة الحرجة

Bassam Badran
Damascus University

$(T_{cr,N_2} = -147°C = 126\ K)$ زاد التباين. يبين أيضاً الشكل (3−30) **معامل الانضغاط للهواء** على أساس غاز حقيقي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة.



الشكل (3−30) معامل الانضغاط للهواء

بدلالة الضغط ودرجة الحرارة.

من أجل إيجاد صيغة عامة بين الغازات الحقيقية يمكن اعتمادها في إيجاد معامل الانضغاط نقوم باختيار بارامترات لابعدية تسمى بالبارامترات المصغرة *Reduced Parameters* لكافة الغازات. هذه البارامترات المصغرة هي نسبة درجة الحرارة أو الضغط بالنسبة إلى درجة الحرارة أو الضغط الحرج للغاز نفسه. تعطى هذه البارامترات المصغرة بالعلاقة

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}} \quad , \quad T_r = \frac{T}{T_{cr}} \qquad (15\text{-}3)$$

حيث (T, P) درجة حرارة وضغط غاز معين و (T_{cr}, P_{cr}) درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج لنفس الغاز.

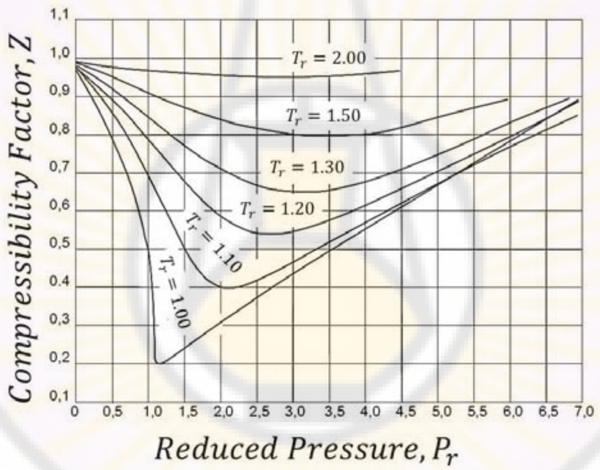
Bassam Badran Damascus University

نسمي (P_r) بالضغط المصغر *Reduced Pressure* و (T_r) بدرجة الحرارة المصغرة *Reduced Temperature*. يمكن أيضاً أن نصف الحجم النوعي المصغر بالعلاقة التالية

$$v_r = \frac{v_{actual}}{R * T_{cr}/P_{cr}} \qquad (16\text{-}3)$$

حيث (v_{actual}) هو حجم الغاز الحقيقي ضمن النظام.

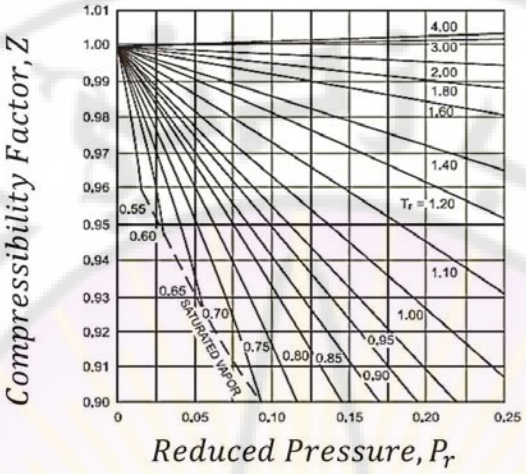
تعطى قيم الضغط المصغر ودرجة الحرارة المصغرة في مخططات تسمى بالمخططات العامة للانضغاط *Generalised Compressibility Chart* كما في الشكل (3−31).



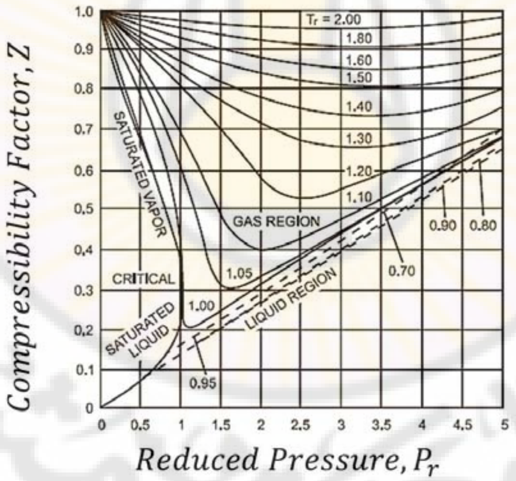
الشكل (3−31) معامل الانضغاط بدلالة الضغط المصغر ودرجة الحرارة المصغرة.

الشكل (3−32) يعطي العلاقة بين الضغط المصغر لنسب منخفضة بين (0 − 0.25) ومعامل الانضغاط ولدرجات حرارة مصغرة تتراوح بين (4 − 0.55).

يعطي الشكل (3−33) العلاقة بين الضغط المصغر لنسب مرتفعة بين (0 − 5) ومعامل الانضغاط ولدرجات حرارة مصغرة تتراوح بين (2 − 0.7).



الشكل (3–32) معامل الانضغاط لنسب ضغط مصغرة صغيرة.



الشكل (3–33) معامل الانضغاط لنسب ضغط مصغرة كبيرة.

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 3-9 – استخدام المخططات العامة في حساب الضغط.

حدد الحجم النوعي لوسيط التبريد $(134A)$ عند ضغط $(1\ MPa)$ و درجة حرارة $(50°C)$ باستخدام 1) معادلة الغاز المثالي و 2) باستخدام المخططات العامة للانضغاط.

الفرضيات: 1) الوسيط مثالي في الحالة الأولى و غير مثالي في الحالة الثانية.

التحليل: من جداول وسيط التبريد $(134A)$ نجد أن

$$R = 0.0815\ \ kPa\, m^3/kg\, K$$

$$P_{cr} = 4.059\ MPa$$

$$T_{cr} = 374.2\ K$$

بتطبيق علاقة الغاز المثالي نجد أن

$$v_{ideal} = \frac{RT}{P}$$

$$v_{ideal} = \frac{(0.0815\ \ kPa\, m^3/kg\, K)(323\ K)}{1000\ kPa}$$

$$v_{ideal} = 0.026325\ \ m^3/kg$$

أما الضغط المصغر ودرجة الحرارة المصغرة فتحسب من العلاقة

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}}$$

$$P_r = \frac{1\ MPa}{4.059\ MPa} = 0.246$$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

$$T_r = \frac{323}{374.2} = 0.863$$

عند استخدام المخططات العامة للانضغاط نجد أن

$$z = 0.84$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$v_{actual} = \frac{zRT}{P}$$

$$v_{actual} = \frac{0.84 * (0.0815\ kPa\ m^3/kg\ K)(323\ K)}{1000\ kPa}$$

$$v_{actual} = 0.022113\ m^3/kg$$

نلاحظ أن الحجم النوعي المثالي أكبر من الحجم النوعي الحقيقي وهذا منطقي.

مناقشة:

بعض المخططات تعطي قيم الحجم النوعي المصغر (v_r) بدلالة الضغط المصغر ومعامل الانضغاط ومنه يمكن حساب الحجم النوعي الحقيقي من العلاقة

$$v_r = \frac{v_{actual}}{RT_{cr}/P_{cr}}$$

$$v_{actual} = v_r * (RT_{cr}/P_{cr})$$

8.3 قوانين الغازات الحقيقية *Real Gas Equations*.

هناك مجموعة من المعادلات التي تصف حالة الغاز الحقيقي وسوف نتحدث فقط عن ثلاث منها

- ✓ معادلة فاندرفالس *Van der Waals* لإنها الأقدم وتعطي قيماً غير دقيقة.
- ✓ معادلة بيتي – بريجمان *Beattie-Bridgeman* لإنها الأكثر شهرة وتعطي قيماً دقيقة.
- ✓ معادلة بنيكدت – ويب – روبين *Benedict – Webb – Rubin* الأخيرة والأكثر دقة.

Bassam Badran
Damascus University

1.8.3 معادلة فاندرفالس *Van der Waals*.

إقترح فاندرفالس معادلة الغاز الحقيقي في عام 1873 على الشكل التالي

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \qquad (17\text{-}3)$$

إضافة العنصر (a/v^2) إلى ضغط الغاز ليعبر عن قوى الترابط بين جزيئات الغاز أما طرح الثابت (b) من الحجم النوعي ليعبر عن الحجم الذي تملؤه الجزيئات ضمن الحيز المدروس. في غرفة ما وعند درجة حرارة وضغط معينة تملأ الجزيئات حوالي 1 من 1000 من حجم الغرفة وتزداد هذه النسبة مع ارتفاع الضغط. لتحديد هذه الثوابت قام فاندرفالس بالنظر إلى النقطة الحرجة وخصوصاً خط درجة الحرارة المار منها فوجد أن هناك نقطة انعطاف في تلك النقطة وبالتالي المشتق الأول والثاني للضغط بالنسبة إلى الحجم النوعي معدوم

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T=T_{cr}=const} = 0\ ,\quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T=T_{cr}=const} = 0$$

باشتقاق معادلة فاندرفالس للمرة الأول والثانية والتخلص من الحجم النوعي الحرج نجد أن الثوابت تأخذ الشكل

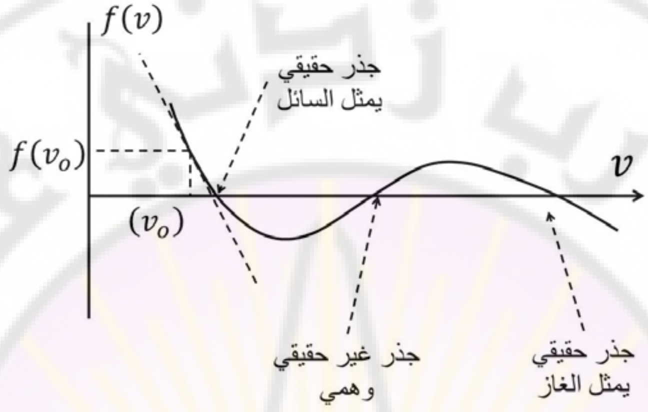
$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}},\quad b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}} \qquad (18\text{-}3)$$

يمكن من خلال تحليل معادلة فاندرفالس $(3-17)$ أن نحصل على الشكل التابع التالي

$$v = f(P,T) = Pv^3 - (Pb + RT)v^2 + av - ab = 0$$

هذا التابع هو معادلة بدرجة ثالثة للحجم النوعي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة. من أجل تحليل هذه المعادلة نقوم بتثبيت درجة الحرارة ونبدأ بتعويض قيم مختلفة للضغط فنحصل على ثلاثة أنواع من الحلول.

Bassam Badran
Damascus University

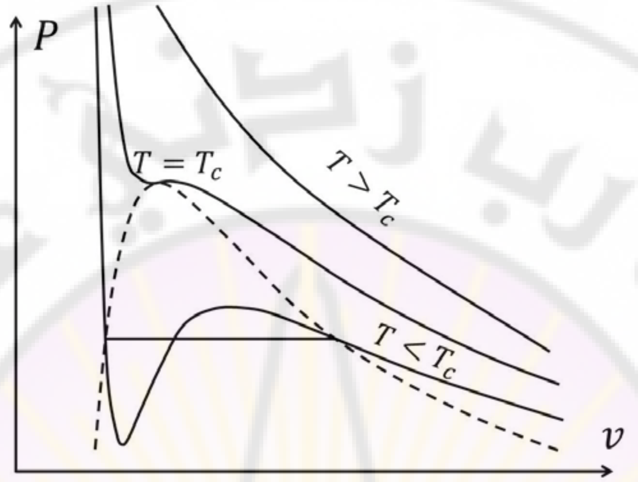


الشكل (34−3) جذور معادلة فاندرفالس
لقيمة معينة للضغط بثبات درجة الحرارة.

<u>الحل الأول</u> هو ثلاثة جذور حقيقية مختلفة كما في الشكل (34−3).

- الجذر الحقيقي الأول يكون بقيمة صغيرة للحجم النوعي ويمثل حالة السائل المشبع (v_f).
- الجذر الحقيقي الثاني يكون بقيمة كبيرة للحجم النوعي ويمثل حالة البخار المشبع (v_g).
- الجذر الحقيقي الثالث يكون بقيمة متوسطة لا يمكن إيجاده تجريبياً كما الجذور الحقيقية السابقة.

<u>الحل الثاني</u> هو ثلاثة جذور حقيقية متطابقة. مع ارتفاع قيم الضغط ودرجة الحرارة نحصل من المعادلة على جذور حقيقية متساوية للحجم النوعي. تمثل هذه الجذور المتساوية النقطة الحرجة على مخطط $(P-v)$.



الشكل (35−3) وصل الجذور الحقيقية للحصول على مخطط $(P - v)$.

<u>الحل الثالث</u> هو جذر حقيقي وجذران وهميان. الجذر الحقيقي يمثل حالة البخار المحمص فوق النقطة الحرجة أما الجذران الوهميان فلا معنى لهما.

بوصل الجذور الحقيقية الصغيرة والنقطة الحرجة نحصل على منحني السائل المشبع وعند وصل جذور الحقيقية الكبيرة مع النقطة الحرجة نحصل على منحني البخار المشبع كما في الشكل (35−3).

2.8.3 معادلة بيتي – بريجمان *Beattie-Bridgeman*.

طُرحت معادلة بيتي – بريجمان في عام 1928 للغاز الحقيقي حيث اصبح عدد الثوابت الموجود في هذه المعادلة خمسة. هذه المعادلة هي الأكثر شهرة وتعطي قيماً دقيقة بالمقارنة مع معادلة فاندرفالس. معادلة بيتي – يريجمان تأخذ الشكل

$$P = \frac{R_u\,T}{\bar{v}^2}\left(1 - \frac{c}{\bar{v} * T^3}\right)(\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \qquad (19\text{-}3)$$

Bassam Badran Damascus University

حيث

$$A = A_0\left(1 - \frac{a}{\bar{v}}\right)$$

$$B = B_0\left(1 - \frac{b}{\bar{v}}\right)$$

العنصر $(\bar{v}, m^3/kmol)$ هو الحجم النوعي المولي أما باقي الثوابت فتؤخذ من الجداول وبحسب نوع الغاز المدروس. تعطي هذه المعادلة قيماً منطقية لحدود $(0.8 * \rho_{cr})$ للغاز المستعمل.

3.8.3 معادلة بيندك – ويب – روبين ***Benedict – Webb – Rubin***.

تم عرض معادلة بيندك – ويب – روبين في عام 1940 بحيث أصبح عدد الثوابت الموجودة في هذ المعادلة ثمانية. هذه المعادلة هي الأكثر دقة بالمقارنة مع باقي المعادلات. شكل معادلة بيندك – ويب – روبين تأخذ الشكل

$$P = \left(\frac{R_u\,T}{\bar{v}}\right) + \left[\left(-A_0 + B_0 R_u\,T - \frac{C_0}{T^2}\right)\frac{1}{\bar{v}^2}\right] + \left(\frac{bR_u\,T - a}{\bar{v}^3}\right) + \left(\frac{\alpha * a}{\bar{v}^6}\right) + \left[\frac{c}{\bar{v}^3 T^2}\left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right)e^{-\frac{\gamma}{\bar{v}^2}}\right] \qquad (20\text{-}3)$$

حيث أن $(\bar{v},\ m^3/kmol)$ هو الحجم النوعي المولي باقي الثوابت تؤخذ من الجداول وبحسب الغاز المدروس. تعطي هذه المعادلة قيماً منطقية لحدود $(2.5\rho_{cr})$ للغاز المستعمل.

المثال التطبيقي 3–10 – استخدام معادلة الغاز الحقيقي بمختلف أشكالها.

احسب ضغط غاز النتروجين عند درجة حرارة $(175\ K)$ وحجم نوعي $(0.00375\ m^3/kg)$ بواسطة معادلة 1) الغاز المثالي 2) فاندرفالس 3) بيتي –

Bassam Badran
Damascus University

بريجمان و4) بيندك – ويب – روبين مع الضغط المقاس في التجارب والذي قيمته ($10000\ kPa$).

الفرضيات: 1) ثابت النتروجين هو $R = 0.2968\ kPa\, m^3/kg\ K$.

التحليل: باستخدام معادلة الغاز المثالي نجد أن

$$P = \frac{RT}{v}$$

$$P = \frac{(0.2968\ kPa\, m^3/kg\ K) * (175\ K)}{0.00375\ m^3/kg}$$

$$P = 13851\ kPa$$

بتطبيق علاقة فاندرفالس أخذ الثوابت التالية

$$a = 0.175\ m^6\ kPa/kg^2$$

$$b = 0.00138\ m^3/kg$$

نجد أن

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}$$

$$P = 9471\ kPa$$

الخطأ هنا حوالي 38% بالمقارنة مع الضغط المقاس ($10000\ kPa$). بتطبيق علاقة بيتي – بريجمان أخذ الثوابت التالية

$$A = 102.29$$

$$B = 0.05378$$

$$c = 4.2 * 10^4$$

$$\bar{v} = \mu v = (28.013\ kg/kmol) * (0.00375\ m^3/kg\ )$$

$$\bar{v} = 0.10505\ \frac{m^3}{kmol}$$

Bassam Badran
Damascus University

بالتعويض نجد أن

$$P = \frac{R_u\,T}{\bar{v}^2}\left(1 - \frac{c}{\bar{v}T^3}\right)(\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

$$P = 10110\ kPa$$

الخطأ هنا حوالي 5.3% بالمقارنة مع الضغط المقاس ($10000\ kPa$). عند تطبيق علاقة بنيدك – ويب – روبين مع أخذ الثوابت التالية

$a = 2.54$	$A_0 = 106.73$
$b = 0.002328$	$B_0 = 0.04074$
$c = 7.379 * 10^4$	$C_0 = 8.164 * 10^5$
$\alpha = 1.272 * 10^{-4}$	$\gamma = 0.0053$

نجد أن قيمة الضغط في هذه الحالة

$$P = \frac{R_u\,T}{\bar{v}} + \left(-A_0 + B_0 R_u\,T - \frac{C_0}{T^2}\right)\frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{bR_u\,T - a}{\bar{v}^3} + \frac{\alpha * a}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2}\left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right)e^{-\frac{\gamma}{\bar{v}^2}}$$

$$P = 10009\ kPa$$

الخطأ هنا هو 0.09% بالمقارنة مع الضغط المقاس ($10000\ kPa$).

Bassam Badran
Damascus University

ملخص فصل مواصفات المادة وحيدة الطور

- البارامترات

هناك سبع بارامترات لوسيط التشغيل ذات وحدات دولية وهي

اسم البارامتر	رمز البارامتر لواحدة الكتل	رمز البارامتر	اسم البارامتر عالمياً
الضغط		$P\ (bar)$	*Pressure*
درجة الحرارة		$T\ (°C)$	*Temperature*
الحجم النوعي	$v\ (m^3/kg)$		*Specific Volume*
الطاقة الداخلي	$u\ (kJ/kg)$	$U\ \ (kJ)$	*Internal Energy*
الإنتالبي	$h\ (kJ/kg)$	$H\ (kJ)$	*Enthalpy*
الإنتروبي	$s\ (kJ/[kg * K])$	$S\ (kJ/[K])$	*Entropy*
كسر الجفاف		$\aleph$	*Quality*

العلاقة بين الطاقة الداخلية والإنتالبي لواحد الكتل تعطى (قانون الترموديناميك الأول) من الشكل

$$h = u + Pv$$

العلاقة بين الحجم النوعي والكثافة هي

$$\rho * v = 1$$

هناك بارامتر آخر يسمى الحرارة الكامنة ويرمز له (h_{fg}) وحداته كالإنتالبي.

- تحديد الحالة وسيط التشغيل

Bassam Badran Damascus University

لتحديد حالة وسيط التشغيل نحتاج إلى بارامترين من البارامترات السبعة السابقة.

عندما يكون هذان البارامتران هما درجة الحرارة والضغط (P,T) فنحدد حالة وسيط التشغيل من الجداول أو مخططات كالتالي

عندما تكون	$P > P_{sat@T}$	فالحالة سائلة
عندما تكون	$P < P_{sat@T}$	فالحالة بخار محمص

أو

عندما تكون	$T < T_{sat@P}$	فالحالة سائلة
عندما تكون	$T > T_{sat@P}$	فالحالة بخار محمص

عندما يكون هذان البارامتران هما درجة الحرارة وأحد البارامترات الآخرى (ليس الضغط) مثلا الإنتالبي (T,h) أو الإنتالبي والضغط (P,h) فنحدد حالة وسيط التشغيل من الجداول أو مخططات كالتالي

عندما تكون	$h < h_f$	فالحالة سائلة
عندما تكون	$h > h_g$	فالحالة بخار محمص
عندما تكون	$h_f < h < h_g$	فالحالة مزيج بخار و سائل

- معادلة الغاز المثالي

$$PV = nkT = NR_uT = mRT = N\mu RT$$

$$P = \rho RT, \qquad Pv = RT$$

- معامل الانضغاط.

يستخدم معامل الانضغاط لتحويل معادلة الحالة للغاز المثالي إلى معادلة للغاز الحقيقي

$$Pv = ZRT$$

حيث أن معامل الانضغاط هو ثابت تابع للضغط المصغر ودرجة الحرارة المصغرة

$$Z = f(P_r, T_r)$$

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}}, \qquad T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

$$v_r = \frac{v_{actual}}{RT_{cr}/P_{cr}}$$

$$Z = \frac{v_{actual}}{v_{ideal}}$$

- معادلة الغاز الحقيقي.

هناك مجموعة من المعادلات التي تعطينا شكل حالة الغاز الحقيقي وهي

معادلة فاندرفالس *Van der Waals*.

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}}, \quad b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}}$$

معادلة بيتي – بريجمان *Beattie-Bridgeman*.

$$P = \frac{R_u\,T}{\bar{v}^2}\left(1 - \frac{c}{\bar{v}T^3}\right)(\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2}$$

معادلة بيندك – ويب – روبين *Benedict – Webb – Rubin*

$$P = \frac{R_u\,T}{\bar{v}} + \left(-A_0 + B_0R_u\,T - \frac{C_0}{T^2}\right)\frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{bR_u\,T - a}{\bar{v}^3} + \frac{\alpha * a}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3T^2}\left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2}\right)e^{-\frac{\gamma}{\bar{v}^2}}$$

Bassam Badran Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

مواصفات المادة وحيدة الطور

1. أكمل الجدول التالي للماء كوسيط التشغيل.

$T, ^\circ C$	P, kPa	$v, m^3/kg$	حالة الوسيط
50		7.72	
	400		بخار مشبع
250	500		
110	350		

2. أكمل الجدول التالي للماء كوسيط التشغيل.

$T, ^\circ F$	$P, psia$	$u, Btu/lbm$	حالة الوسيط
300		782	
	40		ماء مشبع
500	120		
400	400		

3. يحتوي نظام أسطوانة – مكبس على $(0.85\ kg)$ من وسيط التشغيل $(134A)$ عند درجة حرارة $(-10^\circ C)$. المكبس حر الحركة وله وزن $(12\ kg)$ وقطر $(25\ cm)$. الضغط الخارجي الممارس على النظام يساوي $(88\ kPa)$. تنتقل الحرارة إلى النظام إلى أن ترتفع درجة حرارة وسيط التشغيل إلى $(15^\circ C)$. احسب 1) الضغط النهائي لوسيط التشغيل 2) التغيير في حجم الأسطوانة 3) التغيير في الطاقة الداخلية و4) التغيير في إنتالبي وسيط التشغيل.

Bassam Badran
Damascus University

4. يتدفق وسيط التشغيل $(134A)$ ذو الحجم النوعي $(0.4618 ft^3/lbm)$ ضمن أنبوب وبضغط $(120\ psia)$. حدد درجة حرارة الوسيط ضمن الأنبوب.

5. يحتوي خزان بحجم $(150\ L)$ على $(1\ kg)$ من الماء وبضغط $(2\ MPa)$. يبرد الخزان حتى درجة الحرارة $(40°C)$. حدد درجة الحرارة الابتدائية والنهائية للماء.

6. يحتوي خزان بحجم $(1.348\ m^3)$ على $(10\ kg)$ من غاز الفريون $(134A)$ وبدرجة حرارة $(-40°C)$. يسخن الخزان حتى يصل الضغط إلى $(200\ kPa)$. حدد درجة الحرارة النهائية والضغط الابتدائي.

7. أكمل الجدول التالي لغاز الفريون $(134A)$ كوسيط تشغيل.

$T, °C$	P, kPa	$v, m^3/kg$	حالة الوسيط
-12	320		
30		0.0065	
	550		بخار مشبع
60	600		

8. أكمل الجدول التالي لغاز الفريون $(134A)$ كوسيط تشغيل.

$T, °F$	$P, psia$	$h, Btu/lbm$	حالة الوسيط	א
	80	78		
15				0.6
10	70			
110				1
	180	129.46		

Bassam Badran
Damascus University

9. خزان يحتوي على غرفتين منفصلتين بفاصل قابل للإزالة. الغرفة الأولى مفرغة تماماً وبحجم $(1.5 ft^3)$ والثانية تحتوي على $(2\ lbm)$ من الماء بضغط $(500\ psia)$ وبحجم $(1.5 ft^3)$. نقوم بإزالة الفاصل بين الغرفتين ويتم تزويد الخزان بكمية من الحرارة حتى يصل الماء إلى درجة حرارة وقدرها وبحجم (300°F). حدد الضغط النهائي للماء والطاقة الداخلية بواحدة وبحجم (Btu).

10. يحتوي نظام أسطوانة – مكبس على بخار بالشروط التالية $[300°C, 1 MPa]$ وبكتلة $(0.8\ kg)$ يبرد البخار إلى أن تتكاثف نصف كتلته إلى ماء. مثل العملية على مخطط $(T - v)$ وحدد درجة الحرارة النهائية والتغيير في حجم الأسطوانة.

11. خزانان موصولان ببعضهما بواسطة صمام. الخزان الأول بحجم $(1\ m^3)$ ويحتوي على هواء بالشروط التالية $[250°C, 500\ kPa]$، الخزان الثاني يحتوي $(5\ kg)$ من هواء بالشروط التالية $[35°C, 200\ kPa]$. يفتح الصمام ويسمح للهواء بالوصول إلى حالة توازن في الخزانين مع الوسط المحيط ذات درجة الحرارة (20°C). حدد حجم الخزان الثاني والضغط النهائي في الخزانين.

12. يحتوي خزان مرن على $(2.3 lbmol)$ من الهواء بالشروط $[65°F, 32\ psia]$. ماهو حجم الخزان. إذا قمنا بمضاعفة الحجم مع بقاء الضغط ثابتاً ماهي درجة الحرارة النهائية.

13. حدد الحجم النوعي لبخار الماء ذي الشروط التالية $[350°C, 15\ MPa]$ باستخدام 1) قانون الغاز المثالي (معادلة الحالة) 2) باستخدام معادلة الغاز الحقيقي باستخدام معامل الانضغاط 3) باستخدام الجداول وحدد الخطأ في كل طريقة.

14. حدد الحجم النوعي لغاز الفريون $(134A)$ ذي الشروط التالية $[70°C, 0.9\ MPa]$ باستخدام 1) قانون الغاز المثالي (معادلة الحالة) 2) باستخدام معادلة الغاز الحقيقي باستخدام معامل الانضغاط 3) باستخدام الجداول وحدد الخطأ في كل طريقة.

Bassam Badran
Damascus University

15. يسخن خزان صلب يحتوي على مادة الإيتان من $[80\ psia, 100°F]$ إلى $(540°F)$. حدد الضغط النهائي باستخدام معامل الانضغاط.

16. ماهي نسبة الخطأ المرتكب باعتبار غاز ثاني أوكسيد الكربون بالشروط التالية $[25°C, 2\ MPa]$ غازاً مثالياً.

17. نظام أسطوانة – مكبس يحتوي على $(100\ g)$ من غاز أول أوكسيد الكربون. الشروط الابتدائية للغاز هي $[1000\ kPa, 200°C]$. يسخن النظام إلى درجة الحرارة $(500°C)$. حدد الحجم النهائي للغاز باعتباره 1) غاز مثالي و2) غاز يخضع لمعادلة بيندك – ويب – روبين.

Bassam Badran
Damascus University

ملحق عن فصل مواصفات المادة وحيدة الطور

المعادلات الناظمة للماء والبخار بحسب الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار – الصيغة الصناعية لعام 1997

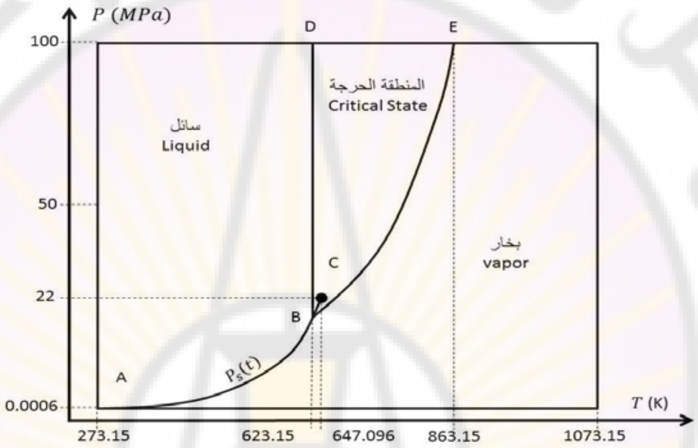
يتألف مخطط الماء والبخار، بدلالة الضغط ودرجة الحرارة، من ثلاث مناطق كما هو مبين في الشكل المرفق. المنطقة الأولى هى منطقة الطور السائل. تقع هذه المنطقة على يسار الخط (ABD). المنطقة الثانية هي منطقة الطور الحرج ويحدها الخط (DBE). المنطقة الثالثة هي منطقة الطور البخاري وتقع على يمين الخط (ABE). المحور الشاقولي يبين الضغط بالميغاباسكال والمحور الأفقي يبين درجات الحرارة بالدرجة كالفن. قيم الضغوط المبينة في الشكل تتراوح بين ($0.0006\ MPa$) و ($100\ MPa$) أما قيم درجات الحرارة المبينة فتتراوح بين ($273.15\ K = 0°C$) و ($1073.15\ K = 800°C$). الخط ABD ينقسم إلى قسمين. القسم الأول هو الخط AB والذي يفصل بين الطور السائل والطور البخاري ويحدد بين ($273.15\ K$) و ($623.15\ K = 350°C$) أما القسم الثاني فهو الخط BD والذي يفصل بين الطور السائل والطور الحرج وتثبت عنده درجة الحرارة على ($623.15\ K$). الخط ABE أيضا ينقسم إلى قسمين. القسم الأول هو AB نفسه أما القسم الثاني فهو الخط BE والذي يفصل بين الطور الحرج والطور البخاري. يحدد هذا الخط بين ($623.15\ K$) و ($1073.15\ K$). تعرف النقطة C في علوم الترموديناميك على أنها النقطة الحرجة *Critical Point* وتعطى بارامتراتها على الشكل التالي

$$T_{cr} = 647.096\ K\ (374\ °C)$$

$$P_{cr} = 22.064\ MPa$$

$$\rho_{cr} = 322\ \ kg/m^3$$

يستخدم الطور السائل والبخاري معادلات جيبس للطاقة *Gibbs Energy* في تحديد بارامترات الماء والبخار أما الطور الحرج فيستخدم معادلات هلمهولتس للطاقة الحرة *Helmholtz Energy* في الحصول على بارامترات الماء والبخار.



مخطط درجة الحرارة والضغط للماء

منطقة الطور السائل

سنستخدم المعادلات الرياضية المقترحة من قبل الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار في حساب وتقييم بارامترات السائل من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت.

معادلات بارامترات الوسيط في الطور السائل.

معادلة جيبس للطاقة ($\boldsymbol{G}$) في الطور السائل تعطى بدلالة الضغط ودرجة الحرارة على الشكل التالي

$$G(P,T) = R * T * \gamma(\pi,\tau) \qquad \text{(A)}$$

حيث

$$\gamma(\pi,\tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i * a_{I_i} * b_{J_i}$$

$$a_{I_i} = (7.1 - \pi)^{I_i}$$

$$b_{J_i} = (\tau - 1.222)^{J_i}$$

$$\pi = P/P^*$$

$$\tau = T^*/T$$

حيث

R ثابت الغاز ويساوي ($0.461\ 526\ kJ/kg\ K$)

n_i معامل للطور السائل ويعطى في الجدول (1) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.

I_i معامل قوة في الطور السائل وتعطى في الجدول (1) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.

J_i معامل قوة في الطور السائل وتعطى في الجدول (1) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.

P^* ضغط مرجعي ($16.53\ MPa$)

T^* درجة حرارة مرجعية ($1386\ K$)

الجدول (1) – قيم الثوابت في المعادلة (A)

في منطقة السائل بحسب موديل IAPWS-IF97

i	I_i	J_i	n_i
1	0	-2	0.146 329 712 131 67
2	0	-1	-0.845 481 871 691 14
3	0	0	$-0.375\ 636\ 036\ 720\ 40*10^1$
4	0	1	$0.338\ 551\ 691\ 683\ 85*10^1$

Bassam Badran Damascus University

5	0	2	-0.957 919 633 878 72
6	0	3	0.157 720 385 132 28
7	0	4	-0.166 164 171 995 01*10^{-1}
8	0	5	0.812 146 299 835 68*10^{-3}
9	1	-9	0.283 190 801 238 04*10^{-3}
10	1	-7	-0.607 063 015 658 74*10^{-3}
11	1	-1	-0.189 900 682 184 19*10^{-1}
12	1	0	-0.325 297 487 705 05*10^{-1}
13	1	1	-0.218 417 171 754 14*10^{-1}
14	1	3	-0.528 383 579 699 30*10^{-4}
15	2	-3	-0.471 843 210 732 67*10^{-3}
16	2	0	-0.300 017 807 930 26*10^{-3}
17	2	1	0.476 613 939 069 87*10^{-4}
18	2	3	-0.441 418 453 308 46 *10^{-5}
19	2	17	-0.726 949 962 975 94*10^{-15}
20	3	-4	-0.316 796 448 450 54*10^{-4}
21	3	0	-0.282 707 979 853 12*10^{-5}
22	3	6	-0.852 051 281 201 03*10^{-9}
23	4	-5	-0.224 252 819 080 00*10^{-5}
24	4	-2	-0.651 712 228 956 01*10^{-6}
25	4	10	-0.143 417 299 379 24*10^{-12}
26	5	-8	-0.405 169 968 601 17*10^{-6}
27	8	-11	-0.127 343 017 416 41*10^{-8}
28	8	-6	-0.174 248 712 306 34*10^{-9}

Bassam Badran
Damascus University

29	21	-29	-0.687 621 312 955 31*10^{-18}
30	23	-31	0.144 783 078 285 21*10^{-19}
31	29	-38	0.263 357 816 627 95*10^{-22}
32	30	-39	-0.119 476 226 400 71*10^{-22}
33	31	-40	0.182 280 945 814 04*10^{-23}
34	32	-41	-0.935 370 872 924 58*10^{-25}
18	2	3	-0.441 418 453 308 46 *10^{-5}
19	2	17	-0.726 949 962 975 94*10^{-15}
20	3	-4	-0.316 796 448 450 54*10^{-4}
21	3	0	-0.282 707 979 853 12*10^{-5}
22	3	6	-0.852 051 281 201 03*10^{-9}
23	4	-5	-0.224 252 819 080 00*10^{-5}
24	4	-2	-0.651 712 228 956 01*10^{-6}
25	4	10	-0.143 417 299 379 24*10^{-12}
26	5	-8	-0.405 169 968 601 17*10^{-6}
27	8	-11	-0.127 343 017 416 41*10^{-8}
28	8	-6	-0.174 248 712 306 34*10^{-9}
29	21	-29	-0.687 621 312 955 31*10^{-18}
30	23	-31	0.144 783 078 285 21*10^{-19}
31	29	-38	0.263 357 816 627 95*10^{-22}
32	30	-39	-0.119 476 226 400 71*10^{-22}
33	31	-40	0.182 280 945 814 04*10^{-23}
34	32	-41	-0.935 370 872 924 58*10^{-25}

Bassam Badran
Damascus University

تعطى قيم البارامترات بحسب المعادلات التالية.

الحجم النوعي

$$v = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau = \left(\sum_{i=1}^{34} -n_i * I_i * a_{(I_i-1)} * b_{J_i}\right)$$

الطاقة الداخلية

$$u = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P - P\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$$

$$= R * T * \left\{\tau\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi - \pi\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right)_\tau\right\}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi = \left(\sum_{i=1}^{34} n_i * J_i * a_{(I_i)} * b_{(J_i-1)}\right)$$

الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = R * T * \tau\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi = \left(\sum_{i=1}^{34} n_i * J_i * a_{I_i} * b_{(J_i-1)}\right)$$

الإنتروبي

$$s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_\pi - \gamma\right]$$

الحرارة النوعية عند ضغط ثابت

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P = -R * \tau^2 * \left(\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \tau^2}\right)_\pi$$

Bassam Badran Damascus University

$$\left(\frac{\partial^2\gamma}{\partial\tau^2}\right) = \left(\sum_{i=1}^{34} n_i * J_i * (J_i - 1) * a_{I_i} * b_{(J_i-2)}\right)$$

<u>حدود الحساب في الطور السائل.</u>

يعطي الموديل *IAPWS-IF97* حدود الحساب في منطقة السائل كما يلي

على الخط AB

$$0°\text{C}\ (273.15\ \text{K}) < T < 350°\text{C}\ (623.15\ K)$$

$$0 < P < P_s(t)$$

على الخط BD

$$T = 350°\text{C}\ (623.15\ K)$$

$$P_s(t) < P < 100\ MPa$$

<u>منطقة الطور البخاري</u>

سنستخدم المعادلات الرياضية المقترحة من قبل الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار في حساب وتقييم بارامترات البخار من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت.

<u>بارامترات الوسيط في الطور البخاري.</u>

معادلة جيبس للطاقة $(\boldsymbol{G})$ في الطور البخاري تنقسم إلى جزاين، جزء مثالي وجزء حقيقي على الشكل التالي

$$G(\rho, T) = R * T * \left[\gamma^{id}(\pi, \tau) + \gamma^{r}(\pi, \tau)\right] \qquad \text{(B)}$$

الجزء المثالي يعطى من العلاقة

Bassam Badran
Damascus University

$$\gamma^{id}(\pi,\tau) = \ln\pi + \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * \tau^{J_i^{id}} \qquad \text{(B-I)}$$

$$\pi = P/P^*$$
$$\tau = T^*/T$$

حيث

n_i^{id} معامل الطور البخاري للجزء المثالي ويعطى في الجدول (2).

J_i^{id} معامل قوة في الطور البخاري للجزء المثالي ويعطى في الجدول (2).

T^* درجة حرارة مرجعية (540 K)

P^* ضغط مرجعي (1 MPa)

الجدول (2) – قيم الثوابت في المعادلة (B-I)

قوى الجزء المثالي في المعادلة (B).

i	J_i^{id}	n_i^{id}
1	0	-0.969 276 865 002 17 10^1
2	1	0.100 866 559 680 18*10^2
3	-5	-0.560 879 112 830 20*10^{-2}
4	-4	0.714 527 380 814 55*10^{-1}
5	-3	-0.407 104 982 239 28
6	-2	0.142 408 191 714 44*10^1
7	-1	-0.438 395 113 194 50*10^1
8	2	-0.284 086 324 607 72
9	3	0.212 684 637 533 07*10^{-1}

الجزء الحقيقي يعطى من العلاقة

Bassam Badran Damascus University
Damascus University

$$\gamma^r(\pi,\tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i^r * \pi^{I_i^r} * c^{\,J_i^r} \qquad \text{(B-R)}$$

حيث

$$c^{\,J_i^r} = (\tau - 0.5)^{J_i^r}$$

$$\pi = P/P^*$$

$$\tau = T^*/T$$

حيث أن

n_i^r معامل الطور البخاري للجزء الحقيقي ويعطى في الجدول (3).

I_i^r معامل قوة في الطور البخاري للجزء الحقيقي ويعطى في الجدول (3).

J_i^r معامل قوة في الطور البخاري للجزء الحقيقي ويعطى في الجدول (3).

P^* ضغط مرجعي (1 MPa)

T^* درجة حرارة مرجعي (540 K)

تعطى قيم البارامترات بحسب المعادلات التالية.

<u>الحجم النوعي</u>

$$v = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$$

$$v = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi} + \frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau$$

Bassam Badran Damascus University

$$v = \frac{\pi * R * T}{P} * \left(\frac{1}{\pi} + \sum_{i=1}^{43} n_i^r * I_i^r * \pi^{(I_i^r - 1)} * c^{J_i^r}\right)$$

الجدول (3) – قيم الثوابت في المعادلة (B-I)

قوى الجزء الحقيقي في المعادلة (B).

i	I_i^r	J_i^r	n_i^r
1	1	0	-0.177 317 424 732 13 $*10^{-2}$
2	1	1	-0.178 348 622 923 58$*10^{-1}$
3	1	2	-0.459 960 136 963 65$*10^{-1}$
4	1	3	-0.575 812 590 834 32$*10^{-1}$
5	1	6	-0.503 252 787 279 30$*10^{-1}$
6	2	1	-0.330 326 416 702 03$*10^{-4}$
7	2	2	-0.189 489 875 163 15$*10^{-3}$
8	2	4	-0.393 927 772 433 55$*10^{-2}$
9	2	7	-0.437 972 956 505 73$*10^{-1}$
10	2	36	-0.266 745 479 140 87$*10^{-4}$
11	3	0	0.204 817 376 923 09$*10^{-7}$
12	3	1	0.438 706 672 844 35$*10^{-6}$
13	3	3	-0.322 776 772 385 70$*10^{-4}$
14	3	6	-0.150 339 245 421 48$*10^{-2}$
15	3	35	-0.406 682 535 626 49$*10^{-1}$
16	4	1	-0.788 473 095 593 67$*10^{-9}$
17	4	2	0.127 907 178 522 85$*10^{-7}$

Bassam Badran
Damascus University

18	**4**	**3**	$0.482\ 253\ 727\ 185\ 07*\mathbf{10^{-6}}$
19	**5**	**7**	$0.229\ 220\ 763\ 376\ 61*\mathbf{10^{-5}}$
20	**6**	**3**	$-0.167\ 147\ 664\ 510\ 61*\mathbf{10^{-10}}$
21	**6**	**16**	$-0.211\ 714\ 723\ 213\ 55*\mathbf{10^{-2}}$
22	**6**	**35**	$-0.238\ 957\ 419\ 341\ 04*\mathbf{10^{2}}$
23	**7**	**0**	$-0.590\ 595\ 643\ 242\ 70*\mathbf{10^{-17}}$
24	**7**	**11**	$-0.126\ 218\ 088\ 991\ 01*\mathbf{10^{-5}}$
25	**7**	**25**	$-0.389\ 468\ 424\ 357\ 39*\mathbf{10^{-1}}$
26	**8**	**8**	$0.112\ 562\ 113\ 604\ 59*\mathbf{10^{-10}}$
27	**8**	**36**	$-0.823\ 113\ 408\ 979\ 98*\mathbf{10^{1}}$
28	**9**	**13**	$0.198\ 097\ 128\ 020\ 88*\mathbf{10^{-7}}$
29	**10**	**4**	$0.104\ 069\ 652\ 101\ 74*\mathbf{10^{-18}}$
30	**10**	**10**	$-0.102\ 347\ 470\ 959\ 29*\mathbf{10^{-12}}$
31	**10**	**14**	$-0.100\ 181\ 793\ 795\ 11*\mathbf{10^{-8}}$
32	**16**	**29**	$-0.808\ 829\ 086\ 469\ 85*\mathbf{10^{-10}}$
33	**16**	**50**	0.106 930 318 794 09
34	**18**	**57**	-0.336 622 505 741 71
35	**20**	**20**	$0.891\ 858\ 453\ 554\ 21*\mathbf{10^{-24}}$
36	**20**	**35**	$0.306\ 293\ 168\ 762\ 32*\mathbf{10^{-12}}$
37	**20**	**48**	$-0.420\ 024\ 676\ 982\ 08*\mathbf{10^{-5}}$
38	**21**	**21**	$-0.590\ 560\ 296\ 856\ 39*\mathbf{10^{-25}}$
39	**22**	**53**	$0.378\ 269\ 476\ 134\ 57*\mathbf{10^{-5}}$
40	**23**	**39**	$-0.127\ 686\ 089\ 346\ 81*\mathbf{10^{-14}}$
41	**24**	**26**	$0.730\ 876\ 105\ 950\ 61*\mathbf{10^{-28}}$

Bassam Badran
Damascus University

42	**24**	**40**	0.554 147 153 507 78*10^{-16}
43	**24**	**58**	-0.943 697 072 412 10*10^{-6}
23	**7**	**0**	-0.590 595 643 242 70*10^{-17}
24	**7**	**11**	-0.126 218 088 991 01*10^{-5}
25	**7**	**25**	-0.389 468 424 357 39*10^{-1}
26	**8**	**8**	0.112 562 113 604 59*10^{-10}
27	**8**	**36**	-0.823 113 408 979 98*10^{1}
28	**9**	**13**	0.198 097 128 020 88*10^{-7}
29	**10**	**4**	0.104 069 652 101 74*10^{-18}
30	**10**	**10**	-0.102 347 470 959 29*10^{-12}
31	**10**	**14**	-0.100 181 793 795 11*10^{-8}
32	**16**	**29**	-0.808 829 086 469 85*10^{-10}
33	**16**	**50**	0.106 930 318 794 09
34	**18**	**57**	-0.336 622 505 741 71
35	**20**	**20**	0.891 858 453 554 21*10^{-24}

الطاقة الداخلية

$$u = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P - P\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T$$

$$u = R * T * \left\{\tau\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \tau}\right)_\pi - \pi\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi} + \frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \pi}\right)_\tau\right\}$$

الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P$$

Bassam Badran
Damascus University

$$h = R * T * \tau \left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \tau} \right)_{\pi}$$

<u>الإنتروبي</u>

$$s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right)_{\pi} - \gamma\right]$$

$$s = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau} + \frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \tau}\right) - \left(\gamma^{id} + \gamma^{r}\right)\right]$$

<u>الحرارة النوعية عند ضغط ثابت</u>

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P$$

$$c_P = -R * \tau^2 * \left(\frac{\partial^2 \gamma^{id}}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 \gamma^{r}}{\partial \tau^2}\right)_{\pi}$$

حيث أن

$$\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \tau}\right)_{\pi} = \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * J_i^{id} * \tau^{\,J_i^{id}-1}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \gamma^{id}}{\partial \tau^2}\right)_{\pi} = \sum_{i=1}^{9} n_i^{id} * J_i^{id} * \left(J_i^{id} - 1\right) * \tau^{\,J_i^{id}-2}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \tau}\right)_{\pi} = \sum_{i=1}^{43} n_i^{r} * \pi^{I_i^r} * J_i^{r} * c^{\,J_i^{r}-1}$$

$$\left(\frac{\partial^2 \gamma^{r}}{\partial \tau^2}\right)_{\pi} = \sum_{i=1}^{43} n_i^{r} * \pi^{I_i^r} * J_i^{r} * (J_i^{r} - 1) * c^{\,J_i^{r}-2}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^{id}}{\partial \pi}\right)_{\tau} = \frac{1}{\pi}$$

$$\left(\frac{\partial \gamma^{r}}{\partial \pi}\right)_{\tau} = \sum_{i=1}^{43} n_i^{r} * \pi^{I_i^r - 1} * I_i^{r} * c^{\,J_i^{r}}$$

Bassam Badran
Damascus University

حدود الحساب في الطور البخاري.

موديل *IAPWS-IF97* يعطي حدود الحساب في منطقة البخار كما في الشكل كما يلي:

على الخط AB

$$0°C\ (273.15\ K) < T < 350°C\ (623.15\ K)$$

$$0 < P < P_s(t)$$

على الخط BE

$$350°C\ (623.15\ K) < T < 590°C\ (863.15\ K)$$

$$0 < P \le P\ (T)$$

مابعد الخط من E عامودي على محور درجة الحرارة وعند $(863.15\ K)$

$$590.35°C\ (863.15\ K) < T < 800°C\ (1073.15\ K)$$

$$0 < P \le 100\ MPa$$

منطقة الطور الحرج

سنستخدم المعادلات الرياضية المقترحة من قبل الجمعية الدولية لمواصفات الماء والبخار في حساب وتقييم بارامترات الطور الحرج من حجم نوعي وطاقة داخلية وإنتالبي وإنتروبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت.

معادلات الطور الحرج.

تحدد بارامترات الحالة الحرجة من معادلة هلمهولتس للطاقة (f) في الطور الحرج بدلالة كثافة ودرجة الحرارة وتعطى من الشكل

$$f(\rho, T) = R * T * \emptyset(\delta, \tau) \qquad \text{(C)}$$

حيث

$$\tau = T_c/T = T^*/T$$

Bassam Badran Damascus University

$$\emptyset(\delta,\tau) = n_1 * ln\,\delta + \sum_{i=2}^{40} n_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i}$$

$$\delta = \rho/\rho^* = \rho/\rho_c$$

n_i	معامل الطور الحرج ويعطى في الجدول (4) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.
I_i	معامل قوة في الطور الحرج ويعطى في الجدول (4) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.
J_i	معامل قوة في الطور الحرج ويعطى في الجدول (4) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.
ρ_c	الكثافة الحرجة ($322\ kg/m^3$)
T_c	درجة حرارة الحرجة (647.096 K)

تعطى قيم البارامترات بحسب المعادلات التالية.

الضغط

$$P = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right)_T$$

$$P = \rho * R * T * \delta * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \delta}\right)_\tau$$

$$P = \rho * R * T * \left(n_1 + \delta \sum_{i=2}^{40} n_i * I_i * \delta^{I_i - 1} * \tau^{J_i}\right)$$

الإنتالبي

$$h = G - T\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho + \rho\left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right)_T$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$h = R * T * \left\{ \tau \left(\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \right)_{\delta} + \delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \right)_{\tau} \right\}$$

$$h = R * T * \left\{ \tau \left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1} \right) + \left(n_1 + \delta \sum_{i=2}^{40} n_i * I_i * \delta^{I_i - 1} * \tau^{J_i} \right) \right\}$$

الجدول (4) – قيم الثوابت في المعادلة (C) في منطقة الطور.

i	I_i	J_i	n_i
1	**---**	**---**	0.106 580 700 285 13*10^1
2	**0**	**0**	-0.157 328 452 902 39*10^2
3	**0**	**1**	0.209 443 969 743 07*10^2
4	**0**	**2**	-0.768 677 078 787 16*10^1
5	**0**	**7**	0.261 859 477 879 54*10^1
6	**0**	**10**	-0.280 807 811 486 20*10^1
7	**0**	**12**	0.120 533 696 965 17*10^1
8	**0**	**23**	-0.845 668 128 125 02*10^{-2}
9	**1**	**2**	-0.126 543 154 777 14*10^1
10	**1**	**6**	-0.115 244 078 066 81*10^1
11	**1**	**15**	0.885 210 439 843 18
12	**1**	**17**	-0.642 077 651 816 07
13	**2**	**0**	0.384 934 601 866 71
14	**2**	**2**	-0.852 147 088 242 06
15	**3**	**6**	0.489 722 815 418 77*10^1
16	**2**	**7**	-0.305 026 172 569 65*10^1

Bassam Badran
Damascus University

17	**2**	**22**	0.394 205 368 791 54*$\mathbf{10^{-1}}$
18	**2**	**26**	0.125 584 084 243 08
19	**3**	**0**	-0.279 993 296 987 10
20	**3**	**2**	0.138 997 995 694 60*$\mathbf{10^{1}}$
21	**3**	**4**	-0.201 899 150 235 70*$\mathbf{10^{1}}$
22	**3**	**16**	-0.821 476 371 739 63*$\mathbf{10^{-2}}$
23	**3**	**26**	-0.475 960 357 349 23
24	**4**	**0**	0.439 840 744 735 00*$\mathbf{10^{-1}}$
25	**4**	**2**	-0.444 764 354 287 39
26	**4**	**4**	0.905 720 707 197 33
27	**4**	**26**	0.705 224 500 879 67
28	**5**	**1**	0.107 705 126 263 32
29	**5**	**3**	-0.329 136 232 589 54
30	**5**	**26**	-0.508 710 620 411 58
31	**6**	**0**	-0.221 754 008 730 96*$\mathbf{10^{-1}}$
32	**6**	**2**	0.942 607 516 650 92*$\mathbf{10^{-1}}$
33	**6**	**26**	0.164 362 784 479 61
34	**7**	**2**	-0.135 033 722 413 48*$\mathbf{10^{-1}}$
35	**8**	**26**	-0.148 343 453 524 72*$\mathbf{10^{-1}}$
36	**9**	**2**	0.579 229 536 280 84*$\mathbf{10^{-3}}$
37	**9**	**26**	0.323 089 047 037 11*$\mathbf{10^{-2}}$
38	**10**	**0**	0.809 648 029 962 15*$\mathbf{10^{-4}}$
39	**10**	**1**	-0.165 576 797 950 37*$\mathbf{10^{-3}}$
40	**11**	**26**	-0.449 238 990 618 15*$\mathbf{10^{-4}}$

Bassam Badran
Damascus University

الإنتروبي

$$s = -\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho = R * \left[\tau * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \tau}\right)_\delta - \emptyset\right]$$

$$s = R * \left[\tau * \left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1}\right) - \left(n_1 * ln\,\delta + \sum_{i=2}^{40} n_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i}\right)\right]$$

الطاقة الداخلية

$$u = f - T\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_\rho$$

$$u = R * T * \tau * \left(\frac{\partial \emptyset}{\partial \tau}\right)_\delta$$

$$u = R * T * \tau * \sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 1}$$

الحرارة النوعية عند حجم ثابت

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_\rho$$

$$c_v = -R * \tau^2 * \left(\frac{\partial^2 \emptyset}{\partial \tau^2}\right)_\delta$$

$$c_v = -R * \tau^2 * \left(\sum_{i=2}^{40} n_i * J_i * (J_i - 1) * \delta^{I_i} * \tau^{J_i - 2}\right)$$

حدود الحساب في الطور الحرج.

موديل *IAPWS-IF97* يعطي حدود الحساب في الطور الحرج كما في الشكل كما يلي

$$350℃\ (623.15\ K) < T < T(P)$$

$$P\ (T) < P \leq 100 MPa$$

Bassam Badran
Damascus University

معادلات الخط AB

يمكن إيجاد معادلة ضغط الإشباع ودرجة حرارة الإشباع من معادلة الخط ABC من الشكل التالي

$$(\beta^2 * \vartheta^2) + (n_1\beta^2 * \vartheta) + (n_2\beta^2) + (n_3\beta * \vartheta^2) * (n_4\beta * \vartheta) + (n_5\beta) + (n_6\vartheta^2) + (n_7\vartheta) + n_8 = 0 \qquad (D)$$

حيث

$$\beta = (P_s/P^*)^{0.25}$$

$$\vartheta = T_s/T^* + \frac{n_9}{[(T_s/T^*) - n_{10}]}$$

حيث

n معامل الخط AB ويعطى في الجدول (5) بحسب موديل *IAPWS-IF97*.

P^* ضغط الإشباع (1 MPa)

T^* درجة حرارة الإشباع (1 K)

الجدول (5) – قيم(n) للخط ABC في المعادلة (D)

ومعادلة ضغط الإشباع (E) ومعادلة درجة حرارة الإشباع (F).

i	n_i
1	0.116 705 214 527 67*10^4
2	-0.724 213 167 032 06*10^6
3	-0.170 738 469 400 92*10^2
4	0.120 208 247 024 70*10^5
5	-0.323 255 503 223 33*10^7
6	0.149 151 086 135 30*10^2
7	-0.482 326 573 615 91*10^4

Bassam Badran
Damascus University

8	0.405 113 405 420 57*10^6
9	-0.238 555 575 678 49
10	0.650 175 348 447 98*10^3

معادلة ضغط الإشباع.

$$\frac{P_s}{P^*} = \left\{\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}}\right\}^4 \qquad \text{(E)}$$

حيث

$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2$$

$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5$$

$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8$$

حدود معادلة ضغط الإشباع.

موديل *IAPWS-IF97* يعطي حدود الحساب في معادلة ضغط الإشباع كما يلي

$$0°\text{C}\ (273.15\ K) < T < 373.946°\text{C}\ (647.096\ K)$$

معادلة درجة حرارة الإشباع.

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D}{2} - \frac{[(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{0.5}}{2} \qquad \text{(F)}$$

حيث

$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{0.5}}$$

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8$$

Bassam Badran
Damascus University

حدود معادلة درجة حرارة الإشباع.

موديل *IAPWS-IF97* يعطي حدود الحساب في معادلة درجة رحراة الإشباع كما يلي

$$611.213\ Pa \leq P \leq 22.064\ MPa$$

Bassam Badran
Damascus University

Bassam Badran
Damascus University

الفصل الرابع

Chapter four

القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة

Closed System First Law of Thermodynamics

Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	سطح مقطع	m^2
dA	التغيير في مقطع السطح	m^2
C	الاستطاعة الحرارية	J/K
c	الاستطاعة الحرارية لواحدة الكتل أو الحرارة النوعية	$J/kg\ K$
c_v	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$J/kg\ K$
c_p	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$J/kg\ K$
c_{vo}	الحرارة النوعية عند حجم ثابت للغاز المثالي	$J/kg\ K$
c_{p0}	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للغاز المثالي	$J/kg\ K$
c_n	الحرارة النوعية في العملية البوليتروبية	$J/kg\ K$
$\overline{c_v}$	الحرارة النوعية عند حجم ثابت بالنسبة إلى واحد مول	$J/kmol\ K$
$\overline{c_P}$	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بالنسبة إلى واحد مول	$J/kmol\ K$
c_{avg}	الحرارة النوعية الوسطية	$J/kg\ K$
E	الطاقة الكلية	J
E_{in}	الطاقة الكلية الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
E_{out}	الطاقة الكلية الخارجة إلى نظام عبر حدوده	J

Bassam Badran Damascus University

ΔE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية في النظام في عملية ما	J
dE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية في النظام في خطوة صعيرة	J
e	الطاقة الكلية النوعية	J/kg
e_{in}	الطاقة الكلية النوعية الداخلة إلى النظام	J/kg
e_{out}	الطاقة الكلية النوعية الخارجة من النظام	J/kg
Δe_{system}	التغيير في الطاقة الكلية النوعية في النظام في خطوة صعيرة	J/kg
F	القوة	N
g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
H	الإنتالبي	J
dH	التغيير في الإنتالبي على مسافة صغيرة في عملية	J
ΔH	التغيير في الإنتالبي في عملية ما	J
∂H	تفاضل التابع	J/kg
h	الإنتالبي النوعية	J/kg
∂h	تفاضل التابع	J/kg
dh	التغيير في الإنتالبي على مسافة صغيرة في عملية	J/kg
Δh	التغيير في الإنتالبي في عملية ما	J/kg
KE	الطاقة الحركية	J

Bassam Badran
Damascus University

ke	الطاقة الحركية النوعية	J/kg
ΔKE	التغيير في الطاقة الحركية في عملية ما	J
Δke	التغيير في الطاقة الحركية النوعية	J
k	المعامل الأدياباتي	----
m	الكتلة	kg
n	المعامل البوليتروبي	----
P	الضغط	bar أو kPa
ΔP	التغيير في الضغط	bar أو kPa
PE	الطاقة الكامنة	J
pe	الطاقة الكامنة النوعية	J/kg
ΔPE	التغيير في الطاقة الكامنة في عملية ما	J
Δpe	التغيير في الطاقة الكامنة النوعية	J
Q	كمية الحرارة	J
ΔQ	التغيير في كمية الحرارة في عملية ما	J
δQ	التغيير في كمية الحرارة في خطوة صغيرة	J
Q_{in}	كمية الحرارة الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
Q_{out}	كمية الحرارة الداخلة من نظام عبر حدوده	J
q	كمية الحرارة النوعية	J/kg

Bassam Badran
Damascus University

Δq	التغيير في كمية الحرارة النوعية	J/kg
δq	التغيير في كمية الحرارة النوعية في خطوة صغيرة	J/kg
R	ثابت الغاز	$J/kg\ K$
R_u	ثابت الغاز العام	$J/kmol\ K$
s, x	المسافة	m
T	درجة الحرارة	K أو $℃$
∂T	تفاضل درجة الحرارة	K أو $℃$
dT	تغيير درجة الحرارة في مسافة صغيرة	K أو $℃$
ΔT	تغيير درجة الحرارة في عملية ما	K أو $℃$
T_{avg}	درجة الحرارة الوسطية	K أو $℃$
U	الطاقة الداخلية	J
ΔU	التغيير في الطاقة الداخلية في عملية ما	J
dU	التغيير في الطاقة الداخلية في مسافة صغيرة	J
∂U	تفاضل الطاقة الداخلية بالنسبة إلى مجموعة متحولات	J
u	الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
∂u	تفاضل الطاقة الداخلية النوعية	J/kg
V	الحجم	m^3
dV	التغيير في الحجم	m^3

Bassam Badran
Damascus University

v	الحجم النوعي	m^3/kg
dv	التغيير في الحجم النوعي	m^3/kg
W	العمل الكلي	J
∂W	التغير في العمل الكلي على مسافة صغيرة	J
ΔW	التغير في العمل الكلي في عملية ما	J
W_b	عمل الحدود	J
W_{other}	الأعمال الآخرى	J
W_{in}	العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	J
W_{out}	العمل الخارج من نظام عبر حدوده	J
w	العمل النوعي	J/kg
ρ	الكثافة	kg/m^3

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

في الفصول الماضية تحدثنا عن أشكال الطاقة وعمليات انتقال الطاقة وشرحنا مبدأ انحفاظ الطاقة *Conservation of Energy Principle* أو التوازن الطاقي *Energy Balance*. أيضا تحدثنا في الفصول الماضية عن طريقة تحديد البارامترات الترموديناميكية لمادة وحيدة الطور بكافة أشكالها وأطوارها وكيفية تحديد الحالة للمادة. في هذا الفصل سنقوم بتطبيق قانون التوازن الطاقي على نظام لا يتم فيه تبادل كتلة عبر حدوده ولا يتم أي تغيير للكتلة ضمن حدوده (الكتلة تبقى ثابتة ضمن حدود النظام). تسمى هذه الأنظمة التي تتصف بهذه الشروط بالأنظمة المغلقة *Closed* Systems. سنبدأ بالتحدث عن الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة *Fixed Boundary Closed System* ثم عن الأنظمة المغلقة ذات الحدود المتغيرة *Moving Boundary Closed System*. سنوجد معادلة التوازن الطاقي لنظام مغلق ذي مكون أحادي الطور (غاز مثالي). سنناقش العمل الناتج عن تغيير حدود النظام والذي يعطى بالشكل ($P\ dV$) حيث نشاهد هذا النوع من العمل في الأجهزة الترددية *Reciprocating Devices* مثل محركات الاحتراق والضواغط. سنتعرف على مفهوم الاستطاعة الحرارية *Heat Capacity* والاستطاعة الحرارية النوعية *Specific Heat Capacity* والتي يطلق عليها اختصاراً الحرارة النوعية *Specific Heats* وسنتعرف على الطاقة الداخلية والإنتالبي للغازات المثالية بدلالة الحرارة النوعية.

الفائدة العلمية من الفصل:

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ فهم فكرة العمل الناتج عن تغيير حدود النظام المغلق.
- ✓ وضع صيغة القانون الأول في الترموديناميك العام باستخدام مفهوم عرف الاتجاهات الذي تم شرحه سابقاً.
- ✓ وضع صيغة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة.

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ تعريف الحرارة النوعية ووضع صيغها عند ضغط ثابت وحجم ثابت.
- ✓ ربط الحرارة النوعية مع التغييرات في الطاقة الداخلية والإنتالبي للغاز المثالي والسوائل والأجسام الصلبة.
- ✓ دراسة العمليات العكوسة وحساب قيم العمل وكمية الحرارة لها.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

الصفحة

1.4 القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المغلقة. 225

1.1.4 نظام مغلق بحدود ثابتة – حجم ثابت (عملية إيزوخورية). 228

2.1.4 نظام مغلق بحدود متغيرة. 228

1.2.1.4 الإنتالبي – المحتوى الطاقي. 229

2.2.1.4 ضغط النظام ثابت ولاعلاقة له بالحجم (عملية إيزوبارية). 229

3.2.1.4 العلاقة بين الضغط والحجم تمثل بعلاقة الغاز المثالي. 230

4.2.1.4 علاقة الضغط والحجم تمثل بعلاقة بوليتروبية. 231

2.4 الحرارة النوعية في القانون الأول في الترموديناميك. 242

3.4 الحرارة النوعية عند حجم ثابت للغاز المثالي. 245

1.3.4 حالات حساب الحرارة النوعية عند حجم ثابت. 246

2.3.4 الحرارة النوعية عند حجم ثابت بدلالة ثابت الغاز. 248

4.4 الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للغاز مثالي. 248

1.4.4 حالات حساب الحرارة النوعية عند حجم ثابت 249

2.4.4 الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بدلالة ثابت الغاز. 249

5.4 العلاقة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت وضغط ثابت لغاز مثالي. 250

6.4 الحرارة النوعية للمواد الصلبة والسائلة. 259

7.4 العمليات في الأنظمة المغلقة. 265

Bassam Badran Damascus University

1.7.4	العملية بحجم ثابت (الإيزوخورية)	265
2.7.4	العملية بضغط ثابت (الإيزوبارية).	269
3.7.4	العملية بدرجة حرارة ثابتة (الإيزوثرمية).	274
4.7.4	العملية الأدياباتية (الإيزونتروبية).	278
5.7.4	العملية البوليتروبية.	283
6.7.4	العملية الدورية.	288
	ملخص الفصل.	296
	مسائل غير محلولة.	300
	نهاية الفصل.	302

Bassam Badran
Damascus University

1.4 القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المغلقة.

تعطى معادلة التوازن الطاقي لنظام مغلق ذي كتلة ثابتة عندما يخضع هذا النظام لعملية ما بالمعادلة

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \qquad (kJ) \qquad (1\text{-}4)$$

يمكن التعبير عن هذه العلاقة بالنسبة إلى واحدة الكتل بالشكل

$$e_{in} - e_{out} = \Delta e_{system} \qquad (kJ/kg) \qquad (2\text{-}4)$$

الشكل التفاضلي لهذا القانون هو

$$\delta E_{in} - \delta E_{out} = dE_{system} \qquad (kJ) \qquad (3\text{-}4)$$

أشكال الطاقة (E)، التي تحدثنا عنها سابقاً، هي كمية الحرارة والعمل فقط حيث لاوجود للطاقة الناتجة عن تدفق الكتلة هنا. أما التغيير في الطاقة (ΔE_{system}) فهو الطاقة الداخلية والطاقة الحركية والطاقة الكامنة مع إهمال باقي أشكال الطاقة الآخرى. بتعويض أشكال الطاقة ضمن معادلة التوازن الطاقي نحصل على

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \qquad (kJ) \qquad (4\text{-}4)$$

هذا الشكل بدلالة واحدة الكتل يكون

$$(q + w)_{in} - (q + w)_{out} = \Delta u + \Delta ke + \Delta pe \qquad (kJ/kg) \qquad (5\text{-}4)$$

بالأخذ بعرف الاتجاهات والذي يقول إن كمية الحرارة التي تدخل إلى النظام عبر الحدود هي موجبة والعمل الخارج من حدود النظام هو موجب فيكون شكل المعادلة

$$Q_{in} - W_{out} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \qquad (kJ) \qquad (6\text{-}4)$$

Bassam Badran Damascus University

$$q_{in} - w_{out} = \Delta u + \Delta ke + \Delta pe \quad (kJ/kg) \qquad (7\text{-}4)$$

عند طرح الرموز السفلية في العلاقة السابقة وإهمال الطاقة الحركية والكامنة للنظام نحصل على **الشكل الأول للقانون الأول في الترموديناميك**

$$Q - W = \Delta U \quad (kJ) \qquad (8\text{-}4)$$

$$q - w = \Delta u \quad (kJ/kg) \qquad (9\text{-}4)$$

لا يمكن أن نبرهن على صحة القانون الأول في الترموديناميك رياضياً لأن كافة العمليات التي توجد في الطبيعة تخضع وتحقق هذا القانون.

القانون الأول في الترموديناميك يعد قانوناً كمياً *Quantitative Law* لإنه يقوم على التحقق من أن الطاقة في أي نظام هي متوازنة. يقسم العمل في القانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المغلقة إلى قسمين.

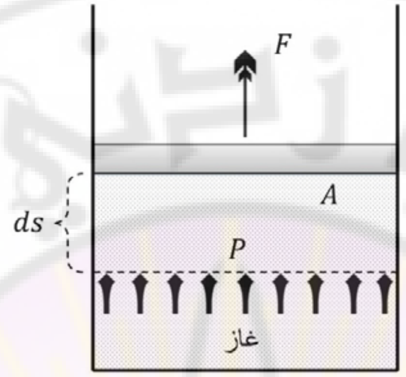
القسم الأول هو عبارة عن أعمال خارجية تخترق الحدود وتسمى بأعمال آخرى (W_{other}) والقسم الثاني هو عبارة عن أعمال ناتجة عن تغيير في حدود النظام وتسمى بعمل الحدود *Moving Boundary Work* أو *Boundary Work* ويعطى الرمز (W_b) وبالتالي يمكن أن نكتب العمل في القانون الأول في الترموديناميك بالشكل

$$W = W_{out} = W_{other} + W_b \quad (kJ) \qquad (10\text{-}4)$$

لنفترض أن غازاً ما محصوراً في جهاز أسطوانة – مكبس ذات ضغط ابتدائي (P, kPa) وحجم (V, m^3) ومساحة مقطع المكبس هي (A, m^2) كما في الشكل $(1-4)$. إذا سمحنا للمكبس بالتحرك لمسافة صغيرة (ds, m) بطريقة شبه ستاتيكية أو شبه متوازنة فيكون شكل عمل الحدود

$$\delta W_b = F\,ds = PA\,ds = P\,dV \quad (kJ)$$

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (1−4) عمل الحدود في نظام أسطوانة – مكبس.

نلاحظ من العلاقة بأن التغيير في الحجم قد يكون موجباً لأي عملية تمدد أو سالباً لأي عملية انضغاط. بمكاملة عمل الحدود في المعادلة السابقة على طول عملية ما بين حالة أولى وحالة ثانية نجد أن

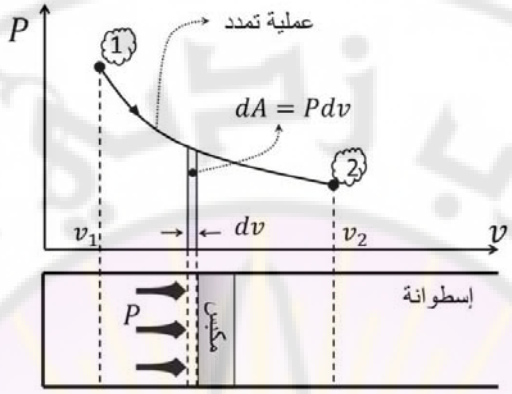
$$W_b = \int_1^2 P\, dV \qquad (kJ) \qquad (11\text{-}4)$$

يمكن تمثيل عملية التمدد أو الانضغاط للغاز ضمن أسطوانة – مكبس على مخطط $(P - v)$ كما في الشكل (2−4). المساحة التفاضلية (dA) الموجودة في المخطط تساوي $(P\, dv)$ لأن التغيير في الحجم (dv) صغير جداً ويمكن عد الضغط ضمن هذه الشريحة ثابتاً. بتقسيم هذه العملية إلى مجموعة من المساحات التفاضلية وجمعها نحصل على عمل الحدود أي أن المساحة المحصورة بين الحالتين ومنحني العملية $(1 \to 2)$ ومحور الحجم تمثل عمل الحدود

$$Area = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 P\, dv$$

معرفة العلاقة بين الضغط والحجم $[P = f(V)]$ يؤدي إلى حساب قيمة عمل الحدود. سنتحدث الآن عن العمليات التي يمكن من خلالها حساب عمل الحدود.

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (2−4) عمل تمدد للحدود على مخطط $(P - v)$.

1.1.4 نظام مغلق بحدود ثابتة – حجم ثابت (عملية إيزوخورية).

النظام المغلق ذو الحجم الثابت (سطوحه أو حدوده ثابتة) مثل خزان الوقود يكون فيه التغيير في الحجم يساوي الصفر $(dV = 0)$. تسمى العملية التي يكون فيها الحجم ثابتاً بالعملية الإيزوخورية *Isochoric Process*. عمل الحدود في هذه العملية يكون صفراً

$$W_b = \int_1^2 P\, dV = 0 \qquad (kJ) \qquad (12\text{-}4)$$

وبالتالي يصبح القانون الأول في الترموديناميك على الشكل

$$Q - W_{other} = \Delta U \qquad (kJ)$$

2.1.4 نظام مغلق بحدود متغيرة.

القانون الأول في الترموديناميك في هذا النظام يمكن أن يحدد بمجموعة من الحالات المهمة والتي يجب أن تناقش كلاً على حدى. يجب في البداية تعريف المحتوى الطاقي أو بارامتر الإنتالبي.

Bassam Badran Damascus University

1.2.1.4 الإنتالبي *Enthalpy* – المحتوى الحراري.

قام العالم موليير *Mollier* في تعريف المحتوى الحراري *Heat Content* لمادة وأطلق على هذا التعريف في عام 1930 اسم الإنتالبي وأعطاه العلاقة

$$H = U + PV \quad (kJ) \qquad (13\text{-}4)$$

الكلمة إنتالبي هي كلمة كلمة يونانية *Enthalpien* تعني الحرارة. العلاقة السابقة تقول إن الإنتالبي يساوي الطاقة الداخلية (U, kJ) لنظام مغلق مضافاً إليها 1) عمل الحدود في الأنظمة المغلقة$(PdV, kPa * m^3)$ أو 2) عمل التدفق في الأنظمة المفتوحة والذي سيشرح لاحقاً. الإنتالبي النوعي (بالنسبة إلى واحدة الكتل) يعطى بالعلاقة

$$h = u + Pv \quad (kJ/kg) \qquad (14\text{-}4)$$

2.2.1.4 ضغط النظام ثابت ولاعلاقة له بالحجم (عملية إيزوبارية).

عندما يتحرك النظام المغلق (سطوح أو حدود متغيرة) بخطوات صغيرة جداً نتيجة إضافة حرارة أو طرح حرارة يتغير حجمه وضغطه مثل نظام أسطوانة – مكبس. يمكن الحفاظ على الضغط ثابتاً ضمن نظام أسطوانة – مكبس بإضافة أوزان حديدية معينة على سطح المكبس من الخارج للحفاظ على الضغط ضمن الأسطوانة. تسمى العملية التي يكون فيها الضغط ثابتاً بالعملية الإيزوبارية *Isobaric Process*. يمكن آخراج الضغط خارج حدود التكامل في علاقة عمل الحدود فنحصل على

$$W_b = \int_1^2 P\, dV = P \int_1^2 dV$$

بالمكاملة

$$W_b = P(V_2 - V_1) = m\, P(v_2 - v_1) \quad (kJ)$$

$$w_b = P(v_2 - v_1) \quad (kJ/kg) \qquad (13\text{-}4)$$

Bassam Badran Damascus University

بجمع علاقة عمل الحدود من المعادلة (4−13) مع الطاقة الداخلية

$$Q - W_{other} = \Delta U + W_b$$

$$Q - W_{other} = \Delta U + P(V_2 - V_1)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$Q - W_{other} = (U_2 - U_1) + (P_2V_2 - P_1V_1)$$

لأن الضغط ثابت. باستخدام مفهوم الإنتالبي في المعادلة السابقة نجد أن الشكل الأخر للقانون الأول في الترموديناميك في الأنظمة المغلقة بحدود متغيرة وضغط ثابت هو

$$Q - W_{other} = \Delta H \qquad (14\text{-}4)$$

3.2.1.4 العلاقة بين الضغط والحجم تمثل بعلاقة الغاز المثالي.

في نظام مغلق (سطوحة متغيرة) ومن معادلة الغاز المثالي $(PV = mRT)$ نجد أن علاقة الضغط بالحجم هي على الشكل التالي

$$P = \frac{mRT}{V}$$

بتعويض الضغط في معادلة عمل الحدود نجد أن

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = \int_1^2 \frac{mRT}{V}\,dV \qquad (kJ)$$

من أجل إجراء التكامل السابق يجب إما إيجاد العلاقة بين الحجم ودرجة الحرارة وإما أن نقوم على تثبيت درجة الحرارة. تسمى العملية التي تكون فيها درجة الحرارة ثابتة بالعملية الإيزوثرمية *Isothermal Process*. بأخذ عملية إيزوثرمية نجد أن العلاقة تتحول إلى

$$W_b = mRT\int_1^2 \frac{1}{V}\,dV$$

بالمكاملة

Bassam Badran
Damascus University

$$W_b = mRT * ln\frac{V_2}{V_1} \quad (kJ) \qquad (15\text{-}4)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$W_b = PV * ln\frac{V_2}{V_1} \quad (kJ) \qquad (16\text{-}4)$$

4.2.1.4 العلاقة بين الضغط والحجم تمثل بعلاقة بوليتروبية.

الكلمة بوليتروبية تعني بأن العملية متعددة المراحل *Polytropic Process*. يعبر عن العلاقة البوليتروبية بالشكل

$$P * V^n = const \qquad (17\text{-}4)$$

حيث أن (n) هو العامل البوليتروبي. يمكن حساب عمل الحدود من هذه العملية كما يلي

$$P = \frac{const}{V^n} = const * V^{(-n)}$$

$$W_b = \int_1^2 const * V^{-n}\, dV$$

$$W_b = const * \frac{V^{-n+1}}{1-n}\bigg|_1^2$$

$$W_b = \frac{const}{1-n}(V_2^{1-n} - V_1^{1-n})$$

بالتعويض

$$W_b = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \quad (kJ) \qquad (18\text{-}4)$$

بفرض أن الوسيط هو غاز مثالي $(PV = mRT)$ فيمكن أن تتحول هذه العلاقة إلى

$$W_b = mR * \frac{(T_2 - T_1)}{1-n} \quad n \neq 1 \quad (kJ) \qquad (19\text{-}4)$$

Bassam Badran Damascus University

يجب الأخذ بعين الاعتبار بأنه عندما تكون $(n = 1)$ يجب أن يؤخذ عمل الحدود في العملية الإيزوثرمية كما في المعادلة (15–4) أو (16–4).

المثال التطبيقي 4–1 – تسخين غاز بشكل كهربائي وبضغط ثابت.

نظام أسطوانة – مكبس تحتوي على $(10\ kg)$ من بخار الماء بضغط $(60\ kPa)$ ودرجة حرارة (320°C). تنتقل الحرارة إلى البخار لترتفع درجة حرارته إلى (400°C) تحت ضغط ثابت. إذا كان المكبس غير متصل بمحور دوران (يتحرك بحرية) وكتلة البخار داخل النظام ثابتة. احسب العمل الذي يقوم به البخار خلال هذه العملية وكمية الحرارة المعطاة له.

الفرضيات: 1) خزان ذو حدود متحركة 2) الضغط ثابت.

التحليل: لحساب العمل نقوم باستخدام علاقة عمل الحدود

$$W_b = \int_1^2 P\,dV = m * P \int_1^2 dv = m * P * (v_2 - v_1) \qquad (kJ)$$

من جداول الإشباع بدلالة الضغط أو بدلالة درجة الحرارة نجد أن البخار عند ضغط $(60\ kPa)$ و درجة الحرارة (320°C) هو بخار محمص. من جداول البخار المحمص وعند ضغط $(60\ kPa)$ نجد أن

$$v_{1@320℃} = 4.556\ m^3/kg$$

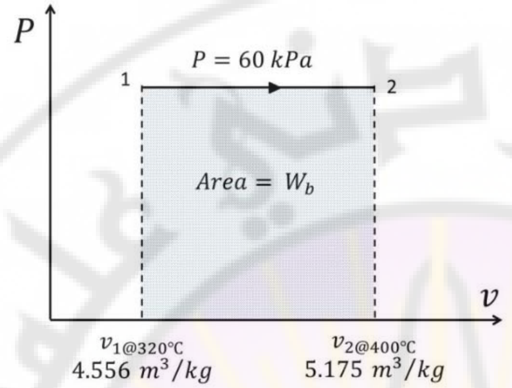
$$v_{2@400℃} = 5.175\ m^3/kg$$

بالتعويض ضمن معادلة عمل الحدود نجد أن

$$W_b = (10\ kg) * (60\ kN/m^2) * (5.175 - 4.556)\ m^3/kg$$

$$W_b = 371.4\ kJ$$

Bassam Badran Damascus University



الإشارة الموجبة في قيمة عمل الحدود تدل على أن العمل يمارسه البخار على الوسط الخارجي من خلال المكبس *Work Done by the system*.

يمكن حساب هذه القيمة من مخطط $(P-v)$ حيث أن مساحة المستطيل المؤلف من خط الضغط $(60\,kPa)$ الثابت والحجم النوعي بين الحالتين الحالة الأولى والثانية $(v_1\,,v_2)$ هي

$$A = P*(v_2 - v_1)$$

تحسب كمية الحرارة التي يمتصها النظام المغلق من قانون انحفاظ الطاقة أو من القانون الأول في الترموديناميك بإهمال الطاقة الحركية والطاقة الكامنة بالشكل التالي

$$(Q+W)_{in} - (Q+W)_{out} = \Delta U \qquad (kJ)$$

كمية الحرارة تدخل النظام المغلق بحسب النص وأما العمل فهو فقط عمل الحدود الذي يمارس على الوسط الخارجي لأن الحجم النوعي يزداد ولاتوجد أعمال آخرى أي أن

$$(Q+0)_{in} - (0+W_b)_{out} = \Delta U$$

$$Q_{in} - W_{b,out} = m(u_2 - u_1)$$

من جداول البخار المحمص عند درجات الحرارة المذكورة نجد أن

$$u_2 = 2968.7 \quad kJ/kg$$

$$u_1 = 2842.4 \quad kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن

$$Q - 371.4\,kJ = 10kg*(2968.7 - 2842.4)kJ/kg$$

Bassam Badran Damascus University

$$Q - 371.4 = 10 * (2968.7 - 2842.4)$$

$$Q = 1634.4\ kJ$$

من القانون الأول في الترموديناميك مع الأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات

$$Q_{in} - W_{out} = m(u_2 - u_1)$$

العمل هنا هو عمل حدود يمارس على الوسط الخارجي وهو موجب بحسب العرف ولا توجد أعمال آخرى أما كمية الحرارة فهي داخلة إلى النظام وهي موجبة بحسب العرف كما في نص المسألة أي

$$Q_{in} - W_{out} = m(u_2 - u_1)$$

$$Q - W_b = m(u_2 - u_1)$$

$$Q = 1634.4\ kJ$$

مناقشة:

- يمكن اعتبار البخار المحمص غازاً مثالياً في أغلب الأحيان ويمكن أن نبرهن على هذا باستخدام معادلة معامل الانضغاط.
- يمكن إستخدام العلاقة

$$Q = \Delta H$$

في حساب كمية الحرارة.

<u>المثال التطبيقي 4-2 – انضغاط إيزوثرمي لغاز مثالي.</u>

نظام أسطوانة – مكبس بحجم ($0.4\ m^3$) تحتوي على هواء بضغط ($100\ kPa$) ودرجة حرارة (80°C). ينضغط الهواء إلى حجم ($0.1\ m^3$) بحيث تبقى درجة الحرارة ثابتة. احسب العمل الذي تم في هذه العملية.

الفرضيات: 1) خزان ذو حدود متحركة 2) درجة الحرارة ثابتة 3) الهواء غاز مثالي 4) الأعمال الأخرى مهملة.

Bassam Badran Damascus University

التحليل: لحساب العمل في هذه العملية نقوم باستخدام علاقة عمل الحدود لغاز مثالي لأن الأعمال الأخرى مهملة

$$W_b = \int_1^2 P\, dV = m\, R\, T\, ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (kJ)$$

يمكن تعويض

$$mRT = P_1V_1 = P_2V_2$$

وبالتالي

$$W_b = \int_1^2 P\, dV = P_1V_1\, ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (kJ)$$

إذا كانت الضغوط هي المعطاة في النص فيمكن أن نستبدل $V_2/V_1 = P_1/P_2$ لأن العملية إيزوثرمية.

$$W_b = \int_1^2 P\, dV = P_1V_1\, ln\frac{P_1}{P_2} \qquad (kJ)$$

بتعويض الحجوم في المعادلة السابقة

$$W_b = (100\, kN/m^2) * (0.4m^3) * ln\frac{0.1}{0.4}$$

$$W_b = -55.5\ \ kJ$$

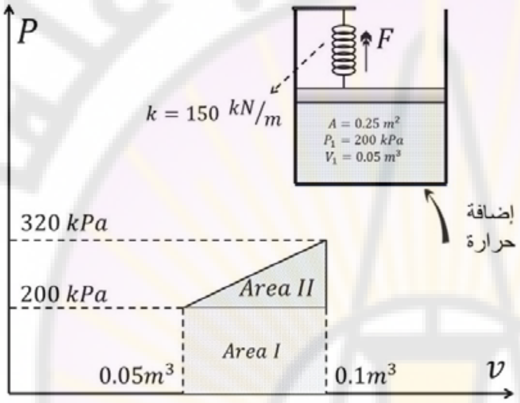
الإشارة السالبة تدل على أن العمل هو عمل انضغاط ويتوافق مع عرف الاتجاهات الذي تحدثنا عنه سابقاً.

المثال التطبيقي 4-3 – تمدد الغاز ضد نابض.

نظام أسطوانة – مكبس بحجم $(0.05\ m^3)$ يحتوي على غاز بضغط $(200\ kPa)$. يتم وصل المكبس بنابض خطي ثابت نابضه $(150\ kN/m)$ من دون أن يمارس المكبس أي قوة على النابض (يبقى النابض من دون قوة تمدد أو انضغاط). تتم إضافة حرارة إلى النظام ويبدأ النابض بالانضغاط حتى يصل حجم الأسطوانة إلى ضعف حجمها الأولي.

Bassam Badran
Damascus University

إذا كانت مساحة مقطع المكبس ($0.25\,m^2$). احسب 1) الضغط النهائي داخل الأسطوانة و2) العمل الذي يقوم به الغاز و3) وجزء العمل الذي يُمارس على النابض عند حركة المكبس.



الفرضيات: 1) خزان ذو حدود متحركة 2) النابض خطي 3) الغاز مثالي 4) إهمال وزن المكبس والضغط الجوي الخارجي الذي يمارس على المكبس.

التحليل:

1) لحساب الضغط النهائي يجب تحديد القوة التي يضغط بها النابض على المكبس كما هو واضح في الشكل.

الضغط الذي يمارسه المكبس على النابض هو

$$P = \frac{F}{A}\ \ kPa$$

القوة المؤثرة على النابض الخطي هي

$$F = k\,x\ \ kN$$

هنا النابض حر قبل بدأ حركة المكبس. الاستطالة في النابض تساوي المسافة التي يتحركها المكبس نتيجة انتقال الحرارة إلى الغاز

$$x = \frac{\Delta V}{A} = \frac{V_2 - V_1}{A} = \frac{2V_1 - V_1}{A}$$

$$x = \frac{(0.1 - 0.05)m^3}{0.25\,m^2} = 0.2\,m$$

بالتعويض نجد أن

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$F = k\,x = (150\ kN/m)(0.2m) = 30\ kN$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{30\ kN}{0.25\ m^2} = 120\ kPa$$

أي أن الضغط النهائي هو

$$P_2 = 200 + 120 = 320\ kPa$$

2) يمكن حساب العمل من خلال رسم مخطط العملية على مخطط $(P - v)$. المساحة المحصورة بين خط الضغط ومحور الحجم النوعي هي مساحة شبه المنحرف كما في الشكل ويحسب عمل الحدود بجمع القاعدتين (الضغوط) مضروباً بالارتفاع (الفرق بين قيم الحجم النوعي) مقسماً على 2 وبالتالي

$$W = area = \frac{(200 + 320)\ kN/m^2}{2}(0.1 - 0.05)m^3 = 13\ kJ$$

يمكن استخدام العلاقة عمل الحدود ولكن يجب إيجاد العلاقة بين الضغط والحجم. العلاقة كما هو واضح من الشكل خطية (مستقيم) لأن النابض خطي وبالتالي فعل النابض من فعل المكبس. معادلة هذا المستقيم هي

$$P = m * V + c$$

ميل هذا الخط هو

$$m = \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} = \frac{(320 - 200)kPa}{(0.1 - 0.05)m^3} = 2400\ kPa/m^3$$

نقطة تقاطع المستقيم مع محور الضغوط

$$P_1 = (2400\ kPa/m^3) * V_1 + c$$

$$c = 200\ kPa - 2400\frac{kPa}{m^3} * 0.05m^3 = 80\ kPa$$

بالتعويض نجد أن

Bassam Badran Damascus University

$$P\ (kPa) = 2400\ V(m^3) + 80$$

بالتعويض في معادلة عمل الحدود وبالمكاملة بين الحالة الأولى والثانية نجد أن

$$W_b = 1200(V_2^2 - V_1^2) + 80(V_2 - V_1)\}_{V_1=0.05}^{V_2=0.1} \quad (kJ)$$

$$W_b = 1200\{(0.1)^2 - (0.05)^2\} + 80(0.1 - 0.05) = 13\ kJ$$

3) عمل النابض كما ذكر سابقاً هو من الشكل

$$W_{spring} = \frac{1}{2}\ k\ (x_2^2 - x_1^2) = 0.5 * (150\ \ kN/m) * [(0.2\ m)^2 -\ 0^2] = 3\ kJ$$

نلاحظ بأن عمل النابض هو المثلث في المنطقة II أي أن

$$W_{spring} = \frac{1}{2}\ (320 - 200)\ kN/m^3 * 0.05\ m^3\ = 3\ kJ$$

المثال التطبيقي 4–4 – تسخين غاز بضغط ثابت.

لدينا نظام أسطوانة – مكبس تحتوي على ($25\ g$) من بخار الماء المشبع بضغط ثابت ($300\ kPa$). وضعت مقاومة كهربائية ضمن الأسطوانة ومرر بها تيار كهربائي بقيمة ($0.2\ A$) لمدة خمس دقائق وفرق كمون ($120\ volt$). احسب الحرارة النهائية للبخار في حال خسرت الأسطوانة كمية من الحرارة إلى الوسط الخارجي بقيمة ($3.7\ kJ$).

الفرضيات: 1) خزان ذو حدود متحركة 2) الطاقة الداخلية والكامنة مهملة 3) لا يوجد ضياع في الحرارة في المقاومة 4) لا توجد أعمال خارجية 5) الضغط ثابت في الأسطوانة.

التحليل: لحساب درجة الحرارة النهائية للبخار نقوم بوضع قانون انحفاظ الطاقة

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (kJ)$$

بأخذ عرف الاتجاهات وبإهمال الطاقة الحركية والكامنة نجد أن

$$(Q)_{in} - (W_{other} + W_b)_{out} = \Delta U$$

Bassam Badran
Damascus University

الأعمال الآخرى هي المقاومة

$$(Q)_{in} - W_{e,in} = \Delta U + W_b$$

وبأخذ عمل الحدود كما تم تعريفه مع العلم بأن الضغط ثابت

$$(Q)_{in} - W_{e,in} = \Delta U + P\Delta V$$

وبأخذ تعريف الإنتالبي نجد أن

$$(Q)_{in} - W_{e,in} = \Delta H$$

بالحصول على عمل المقاومة هو عمل سالب بحسب عرف الاتجاهات فنجد أن

$$W_{e,in} = -V * I * \Delta t$$

$$W_{e,in} = -120V * 0.2A * 300s * \frac{1\ kJ/s}{1000\ VA}$$

$$W_{e,in} = -7.2\ kJ$$

الحالة الأولى هي بخار مشبع عند ضغط $(P_1 = 300\ kPa)$ ومن جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد

$$h_1 = h_{g@300\ kPa} = 2724.9\ \ kJ/kg$$

بالتعويض في القانون الأول في الترموديناميك نجد أن

$$(Q)_{in} - W_{e,in} = m\ (h_2 - h_1)$$

$$-3.7\ kJ - (-7.2\ kJ) = \frac{25}{1000} kg * (h_2 - 2724.9\ \ kJ/kg)$$

$$h_2 = 2864.9 \quad kJ/kg$$

الحالة الثانية هي حالة بخار محمص لأن كمية الحرارة التي تطرح إلى الوسط الخارجي $(3.7\ kJ)$ أقل من الطاقة (عمل المقاومة) التي تدخل النظام فالبخار يجب أن يتحول إلى بخار محمص. لكي نجد درجة الحرارة النهائية نذهب إلى جداول البخار المحمص عند

Bassam Badran
Damascus University

الضغط ($300\ kPa$) ونبحث عن قيمة الإنتالبي في الحالة الثانية فنجد أن الحرارة المرافقة لهذه القيمة تتراوح بين 199℃ و 200℃ وبالتقريب الخطي نجد أن درجة الحرارة هي

$$T_2 = 199.62℃$$

المثال التطبيقي 4–5 – تمدد غير محدود للماء.

يقسم خزان صلب إلى قسمين متساويين بواسطة فاصل. يحتوي أحد الأطراف على ($5\ kg$) من الماء وبدرجة حرارة (25℃) وضغط ($200\ kPa$). الطرف الآخر من الخزان مفرغ تماماً. نقوم بإزالة الفاصل ويسمح للماء بالحركة على كامل الخزان. يسمح للوسيط داخل الخزان بأن يتبادل الحرارة مع الوسط الخارجي لتصل إلى درجة حرارته إلى درجة الحرارة الابتدائية. حدد 1) حجم الخزان و2) الضغط النهائي و3) انتقال الحرارة في هذه العملية.

الفرضيات: 1) خزان ذو حدود ثابتة 2) الطاقة الداخلية والكامنة مهملة 3) لا أعمال موجودة 4) **سنفرض** أن الماء يمتص حرارة عند إزالة الفاصل.

التحليل:

1) لحساب حجم الخزان نأخذ بارامترات الماء عند درجة الحرارة (25℃) والضغط ($200\ kPa$). من جداول الماء المضغوط لأن الحالة هي ماء فنجد أن

$$v_1 = v_f = 0.0010029\ m^3/kg$$

$$V = m * v_1 = 5kg * 0.0010029\ m^3/kg = 0.005\ m^3$$

الحجم الكلي هي

$$V = 2 * 0.005 = 0.01\ m^3$$

2) لحساب الضغط النهائي

Bassam Badran Damascus University

$$v_2 = \frac{V}{m} = \frac{0.01\, m^3}{5\, kg} = 0.002\ \frac{m^3}{kg}$$

نتيجة وجود الفراغ فإن جزءاً من الماء سوف يتحول إلى بخار نتيجة انخفاض الضغط فوق سطح الماء الموجود داخل كامل الخزان وبالنتيجة تنتقل كمية من الحرارة إلى الماء لتمثيل عملية التبخر.

درجة الحرارة النهائية للخزان هي (25℃) والخزان يحتوي على مزيج بخار + ماء $v_f <$ $v < v_g$ لأن الماء والبخار مشبعان في هذه الحالة

$$v_f = 0.001003 \frac{m^3}{kg}\ ,\ \ v_g = 43.34\ \frac{m^3}{kg}$$

من جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة نجد أن الضغط هو ضغط الإشباع

$$P_2 = P_{sat} = 3.1698\, kPa$$

3) بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك مع اعتبار أن الطاقة الحركية والكامنة مهملة

$$(Q)_{in} = \Delta U \quad (kJ)$$

يجب معرف الطاقة الداخلية للحالة الأولى والثانية.

$$u_1 = u_f = 104.83\ kJ/kg$$

اما الحالة الثانية

$$\aleph = \frac{v_2 - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0.002 - 0.001}{43.34 - 0.001} = 2.3 * 10^{-5}$$

$$u_2 = u_f + \aleph(u_g - u_f) = 104.88\ \ kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن

$$(Q)_{in} = m\,(u_2 - u_1)$$

$$(Q)_{in} = 0.25\, kJ$$

Bassam Badran Damascus University

كون إشارة الحرارة موجبة يعني أن فرضية انتقال الحرارة إلى الماء من الوسط الخارجي صحيحة.

2.4 <u>الحرارة النوعية ***Specific Heat*** في القانون الأول في الترموديناميك.</u>

نحن نعلم من التجارب بأن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مادة ما تختلف باختلاف المادة فمثلاً نحن نحتاج إلى ($4.5\ kJ$) لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من الحديد من درجة حرارة ($20°C$) إلى ($30°C$) وأيضاً نعلم بأننا بحاجة إلى تسع مرات هذا العدد أي ($41.8\ kJ$) لرفع درجة حرارة واحد كيلوغرام من الماء درجة واحدة.

هنا يجب علينا إيجاد <u>بارامتر خاص</u> يساعدنا على قياس ومقارنة قدرة المواد على امتصاص كمية معينة من الحرارة. يسمى هذا البارامتر الذي يقيس قدرة المادة على امتصاص كمية معينة من الحرارة بالاستطاعة الحرارية *Heat Capacity* ويعطى الرمز ($C, J/K$). في أغلب الأحيان تتم عملية القياس بالنسبة إلى واحدة الكتل فيأخذ هذا البارامتر اسم الاستطاعة الحرارية النوعية *Specific Heat Capacity* أو الحرارة النوعية *Specific Heat* اختصاراً ويعطى الرمز ($c, J/g\ K$). **<u>تعرف الحرارة النوعية على إنها الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتل من مادة ما درجة مئوية واحدة.</u>** في الترموديناميك نهتم فقط بنوعين من الحرارة النوعية.

- الأولى هي الحرارة النوعية عند حجم ثابت *Specific Heat at Constant Volume* وتعطى الرمز (c_v). تعرف الحرارة النوعية عند حجم ثابت بأنها الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتل من مادة ما درجة مئوية واحدة عندما يكون الحجم ثابتاً. يمكن استخراج علاقة الحرارة النوعية عند حجم ثابت من القانون الأول في الترموديناميك على الشكل التالي

$$\delta Q = dU + \delta W = dU + PdV$$

Bassam Badran Damascus University

العمل هنا هو عمل حدود (W_b) ويساوي الصفر لأن التغيير في الحجم الكلي هو صفر ($dV = 0$) وبالتالي تتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك إلى الشكل

$$\delta Q = dU$$

بما أن الطاقة الداخلية هي تابع لدرجة الحرارة والحجم $U(T, v)$ وبالتالي فالتفاضل هو

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v dT$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T dv = 0$$

بالتعويض نجد

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v dT$$

بالتعويض في القانون الأول في الترموديناميك نجد

$$\delta Q = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v dT$$

وبالتالي نعطي تعريف الحرارة النوعية عند حجم ثابت بالعلاقة

$$c_v = \frac{1}{m}\left(\frac{\delta Q}{\partial T}\right)_v$$

$$c_v = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$$

أو بالشكل

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad (kJ/kg\ K) \qquad (20\text{-}4)$$

- الثانية هي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت *Specific Heat at Constant Pressure* وتعطى الرمز (c_P). تعرف الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بأنها الطاقة

Bassam Badran
Damascus University

اللازمة لرفع درجة حرارة واحدة الكتل من مادة ما درجة مئوية واحدة عند ضغط ثابت.

أما الحرارة النوعية عند ضغط ثابت من القانون الأول في الترموديناميك

$$\delta Q = dU + \delta W$$

$$\delta Q = dU + PdV$$

$$\delta Q = dU + d(PV)$$

هنا العمل هو عمل حدود بضغط ثابت في أنظمة مغلقة أو عمل تدفق السائل دخولاً وخروجاً من سطح التحكم $(W_{flow} = PV)$. باستخدام تعريف الإنتالبي

$$H = U + PV$$

يتحول القانون الأول في الترموديناميك

$$\delta Q = dH$$

الإنتالبي هو تابع لدرجة الحرارة والضغط $H(T,P)$ وبالتالي فالتفاضل هو

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT$$

ولكن

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP = 0$$

بالتعويض نجد أن

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT$$

بالتعويض في القانون الأول في الترموديناميك نجد

$$\delta Q = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT$$

وبالتالي نعطي تعريف الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بالعلاقة

Bassam Badran
Damascus University

$$c_P = \frac{1}{m}\left(\frac{\delta Q}{\partial T}\right)_P$$

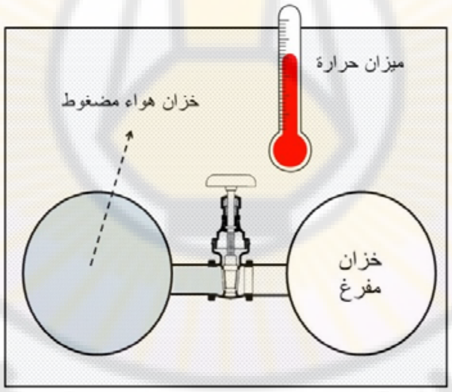
$$c_P = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$$

أو بالشكل

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P (kJ/kg\ K) \qquad (21\text{-}4)$$

3.4 الحرارة النوعية عند حجم ثابت للغاز المثالي.

قام العالم جيمس جول *Joule* في غمر خزانين متصلين بأنبوب وصمام في حوض ماء معزول حرارياً ويحتوي على ميزان حرارة لمعرفة التغييرات التي تطرأ على درجة حرارة الخزان كما هو واضح في الشكل (3−4).



الشكل (3−4) تجربة جول.

الخزان الأول مفرغ تماماً والثاني يحتوي على هواء بضغط عال. قام العالم جول بفتح الصمام الواصل بين الحوضين كلياً عندما أصبح هناك توازن حراري بين الحوض والخزانين وسمح للهواء بالتحرك في الاتجاهين. وجد جول أن درجة حرارة الماء في

Bassam Badran
Damascus University

الحوض لم تتغير. استنتج أن الطاقة الداخلية للهواء لم تتغير بالرغم من أن كلاً من الحجم والضغط قد تغيرا ولم يتم أي عمل في هذا النظام.
بالتالي استنتج أن الطاقة الداخلية هي تابع لدرجة الحرارة وليست تابعاً للضغط والحجم النوعي. وأعطى العلاقة

$$\left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_T = 0$$

تبين لاحقاً بأن الغازات التي تختلف عن الغاز المثالي (غازات حقيقية) تكون فيها الطاقة الداخلية ليست فقط تابعاً لدرجة الحرارة.

تم تعريف الطاقة الداخلية بالنسبة إلى الغاز المثالي على إنها تابع فقط إلى درجة الحرارة وبالتالي تتحول معادلة الحرارة النوعية عند حجم ثابت الموجودة في العلاقة (4–20) من تفاضل جزئي إلى تفاضل تام

$$c_v = \left.\frac{du}{dT}\right|_{v=const} = \left.\frac{dq}{dT}\right|_{v=const} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (22\text{-}4)$$

بمكاملة العلاقة (4–22) نحصل على التغيير في الطاقة الداخلية

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) * dT \qquad (kJ/kg) \qquad (23\text{-}4)$$

1.3.4 حالات حساب الحرارة النوعية عند حجم ثابت.

الحرارة النوعية في المعادلة (4–23) هي تابع لدرجة حرارة الغاز المثالي ويمكن حسابها بمعرف العلاقة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت ودرجة الحرارة.

- الحالة الأولى. عندما تكون الحرارة النوعية عند حجم ثابت ثابتة وغير تابعة لدرجة الحرارة فتتحول علاقة الطاقة الداخلية في المعادلة (4–23) إلى الشكل

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \qquad (kJ/kg)$$

Bassam Badran
Damascus University

أي يمكن أن نقول إن التغيير في الطاقة الداخلية في العملية الإيزوثرمية هو معدوم

$$\Delta u = 0 \qquad (kJ/kg)$$

- الحالة الثانية. عندما تكون الحرارة النوعية عند حجم ثابت متغيرة وتكون تابعة لدرجة حرارة الغاز المثالي. هنا توجد عدة طرق لحساب قيمتها.
-

i. درجة حرارة وسطية.

نختار قيم الحرارة النوعية لنظام ما يقوم بعملية ما بين الحالة (1) والحالة (2) عند درجة حرارة وسطية (T_{ave}) تعطى بالشكل

$$T_{ave} = \frac{T_2 + T_1}{2}$$

تؤخذ قيم الحرارة النوعية عند حجم ثابت من الجداول عند هذه الحرارة الوسطية ويحسب التغيير في الطاقة الداخلية.

ii. العلاقة بين الحرارة النوعية والحرارة خطية.

في هذه الحالة تكون الحرارة النوعية عند حجم ثابت من الشكل

$$c_v(T) = a + bT$$

هنا نكامل بين الحالة الأولى والثانية ونجد التغيير في الطاقة الداخلية.

iii. العلاقة بين الحرارة النوعية والحرارة لاخطية.

تكون الحرارة النوعية من الشكل

$$c_v(T) = f(T)$$

هنا يتم، كما في الحالة الخطية، وضع التابع ضمن التكامل وحساب التغيير في الطاقة الداخلية.

Bassam Badran
Damascus University

2.3.4 الحرارة النوعية عند حجم ثابت بدلالة ثابت الغاز.

يمكن أن نعبر عن الحرارة النوعية بدلالة ثابت الغاز المثالي باستخدام النظرية الحركية. الشرط الأساسي في ذلك أن يكون الغاز أحدي الذرة *Monatomic Gases* مثل الهيليوم أو الأرغون. يمكن أن نعبر عن الطاقة الداخلية لهذا الغاز المثالي بدلالة النظرية الحركية بالشكل

$$U = \frac{3}{2} mRT = \frac{3}{2} NR_u T \quad (kJ)$$

بالنسبة إلى واحدة الكتل من الغاز نجد

$$u = \frac{3}{2} RT \quad (kJ/kg)$$

بمفاضلة الطاقة الداخلية بالنسبة إلى درجة الحرارة للغاز المثالي والتقسيم على التغيير في درجة الحرارة واستخدام المعادلة (22−4) نجد أن

$$du = \frac{3}{2} R * dT$$

$$\frac{du}{dT} = \frac{3}{2} R$$

نعرف الحرارة النوعية عند حجم ثابت بدلالة ثابت الغاز المثالي

$$c_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v = \frac{3}{2} R \quad (kJ/kg\ K) \qquad (24\text{-}4)$$

4.4 الحرارة النوعية عند ضغط ثابت للغاز مثالي.

تم تعريف الإنتالبي بالنسبة إلى الغاز المثالي بأنه تابع فقط إلى درجة حرارة الغاز وبالتالي تتحول معادلة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت الموجودة في (21−4) من تفاضل جزئي إلى تفاضل تام

Bassam Badran
Damascus University

$$c_P = \left.\frac{dh}{dT}\right|_{P=const} = \left.\frac{dq}{dT}\right|_{P=const} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (25\text{-}4)$$

بمكاملة العلاقة (25−4) نحصل على التغيير في الإنتالبي

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_P(T) * dT \qquad (kJ/kg) \qquad (26\text{-}4)$$

1.4.4 **حالات حساب الحرارة النوعية عند ضغط ثابت.**

الحرارة النوعية عند ضغط ثابت في المعادلة (26−4) هي تابع لدرجة حرارة الغاز المثالي ويمكن حسابها بمعرف العلاقة بين الحرارة النوعية عند ضغط ثابت ودرجة الحرارة كما شاهدنا في حالات الحرارة النوعية عند حجم ثابت السابقة.

2.4.4 **الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بدلالة ثابت الغاز.**

يمكن أيضاً أن نعبر عن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بدلالة ثابت الغاز المثالي من القانون الأول في الترموديناميك. علاقة القانون الأول في الترموديناميك بضغط ثابت باعتبار أن كافة الأعمال الخارجية مهملة هي

$$\Delta q|_{P=const} = \Delta u + \Delta(Pv) \qquad (kJ/kg)$$

بحسب تعريف في علاقة موليير لتعريف الإنتالبي

$$\Delta q|_{P=const} = \Delta h \qquad (kJ/kg)$$

بتعويض الطاقة الداخلية من النظرية الحركية وجداء الضغط بالحجم بالنسبة إلى غاز مثالي بدلالة درجة الحرارة نجد

$$\Delta q|_{P=const} = \frac{3}{2} R\Delta T + R\Delta T$$

وبالتقسيم على تغيير درجة الحرارة تتحول المعادلة إلى

Bassam Badran
Damascus University

$$c_P = \left(\frac{dh}{dT}\right)_P = \frac{5}{2}R \quad (kJ/kg\ K) \qquad (27\text{-}4)$$

5.4 العلاقة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت وضغط ثابت لغاز مثالي.

بمقارنة العلاقة $(4-24)$ والعلاقة $(4-27)$ نجد أن العلاقة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت وضغط ثابت لغاز مثالي تعطى بالشكل

$$c_P = c_v + R \quad (kJ/kg\ K) \qquad (28\text{-}4)$$

أما بالنسبة إلى واحد كيلومول فهي

$$\bar{c}_P = \bar{c}_v + R_u \quad (kJ/kmol\ K)$$

تسمى المعادلة $(4-28)$ بعلاقة ماير *Mayer's Relation*. نلاحظ أيضاً من العلاقة السابقة بأن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت **أكبر** من الحرارة النوعية عند حجم ثابت بقيمة ثابت الغاز.

نسمي النسبة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت والحرارة النوعية عند ضغط ثابت بنسبة الحرارة النوعية *Specific heat Ratio, k* أو بالمعامل الأدياباتي وتعطى بالشكل

$$k = \frac{c_P}{c_v} \qquad (29\text{-}4)$$

يمكن تحديد المعالمل الأدياباتي للغازات أحادية الذرة كما يلي

$$k = \frac{5R}{3R} = 1.6667$$

اما الغازات الثنائية الذرة *Diatomic Gases*، بما في ذلك الهواء، فتساوي 1.4 عند درجة حرارة الغرفة. يمكن اعتبار كل الغازات الحقيقية غازات مثالية عندما تكون ضغوطها المنخفضة وبالتالي تكون الحرارة النوعية متعلقة فقط بدرجة حرارة الغاز. الحرارة النوعية للغازات الحقيقية عند الضغوط المنخفضة تسمى بالحرارة النوعية للغاز المثالي *-Ideal*

أو الحرارة النوعية عند الضغط الصفري *Gas Specific Heats* *Zero-Pressure Specific Heats* وتعطى الرمز (c_{Po}) و (c_{vo}) وتعطى ضمن جداول خاصة.

المثال التطبيقي 4–6 – تقييم التغيير في الطاقة الداخلية لغاز مثالي.

يسخن الهواء ذو درجة الحرارة $(300K)$ والضغط $(200\ kPa)$ بضغط ثابت إلى $(600K)$. حدد التغيير في الطاقة الداخلية للهواء بالنسبة إلى واحدة الكتل باستخدام 1) جداول الهواء 2) باستخدام العلاقة $(\bar{c}_P(T) = a + bT + cT^2 + dT^3)$ مع العلم بأن الثوابت هي $(a = 28.11)$ و $(b = 0.001967)$ و $(c = 0.4802 * 10^{-5})$ و $(d = -1.966 * 10^{-9})$ 3) بأخذ وسطي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت.

الفرضيات:1) الهواء غاز مثالي لأن درجة الحرارة عالية والضغط منخفض بالنسبة إلى درجة الحرارة الحرجة.

التحليل: 1) لحساب التغيير في الطاقة الداخلية من الجداول عند درجات الحرارة المذكورة

$$u_1 = u_{@300K} = 214.07\ kJ/kg$$

$$u_2 = u_{@600K} = 434.78\ kJ/kg$$

أي أن التغيير في الطاقة الداخلية

$$\Delta u = u_2 - u_1$$

$$\Delta u = 434.78 - 214.07$$

$$\Delta u = 220.71\ kJ/kg$$

2) التغيير في الطاقة الداخلية بدلالة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت هي

$$\Delta\bar{u} = \int_1^2 \bar{c}_v\,(T)dT$$

ولكن العلاقة بين الحرارة النوعية عند حجم ثابت وضغط ثابت هي

Bassam Badran Damascus University

$$\bar{c}_P = \bar{c}_v + R_u$$

بما أن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت هي المعطاة فنجد أن

$$\bar{c}_P(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

$$\Delta\bar{u} = \int_1^2 [(a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3]dT$$

نتيجة التكامل نجد أن

$$\Delta\bar{u} = 6447 \ kJ/kmol$$

بما أن الوزن المولي للهواء هو $(28.97 \ kg/kmol)$

$$\Delta u = \frac{\Delta\bar{u}}{\mu_{air}} = \frac{6447 \ kJ/kmol}{28.97 \, kg/kmol}$$

$$\Delta u = 222.5 \ \ kJ/kg$$

نجد أن قيمة الطاقة الداخلية أعلى من القيمة السابقة المأخوذة من الجداول بمقدار (0.8 %).

3) التغيير في الطاقة الداخلية بأخذ القيم الوسطية للحرارة النوعية نجد أن

$$T_{avg} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{600 + 300}{2}$$

$$T_{avg} = 450 \, K$$

$$c_{v,avg} = c_{@450K} = 0.733 \ kJ/kg \ K$$

الطاقة الداخلية.

$$\Delta u = c_{v,avg}(T_2 - T_1)$$

$$\Delta u = (0.733 \ kJ/kg \ K) * (600 - 300)K$$

$$\Delta u = 220 \ kJ/kg$$

Bassam Badran
Damascus University

نجد أن قيمة الطاقة الداخلية أعلى من القيمة السابقة المأخوذة من الجداول بمقدار (0.4 %).

المثال التطبيقي 4–7 – تسخين غاز بفعل التحريك (الخلط).

خزان معزول يحتوي على ($1.5\ lbm$) من الهيليوم بدرجة حرارة ($80°F$) وضغط ($50\ psia$). نقوم بتشغيل خلاط داخل الخزان باستطاعة ($0.02\ hp$) لمدة ($30\ min$). حدد 1) درجة الحرارة النهائية و2) الضغط النهائي للهيليوم.

الفرضيات:1) الهيليوم غاز مثالي لأن درجة الحرارة مرتفعة بالمقارنة مع الدرجة الحرجة للغاز ($-451°F$) 2) يمكن اعتبار أن الحرارة النوعية ثابتة 3) يمكن اعتبار الطاقة الحركية والكامنة مهملة 4) النظام معزول وبالتالي لا يوجد انتقال للحرارة إلى الوسط الخارجي.

التحليل: 1) بما أن الخزان ذات حدود ثابتة فلا عمل للحدود والعمل الوحيدة هو عمل الخلاط، بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$(Q+W)_{in} - (Q+W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

بإهمال الطاقة الحركية والطامنة وبما أن الطاقة الوحيدة التي تعبر الحدود هي طاقة محور الدوران فتتحول معادلة الطاقة إلى

$$W_{shaft,in} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$W_{shaft,in} = m\, c_{v,avg}(T_2 - T_1)$$

يمكن أيضاً إيجاد هذه العلاقة من القانون الأول في الترموديناميك مع الأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات كما يلي

$$Q - W = \Delta U$$

Bassam Badran Damascus University

$$0 - (-W_{saft,in}) = \Delta U$$

$$W_{shaft,in} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$W_{shaft,in} = m\, c_{v,avg}(T_2 - T_1)$$

ولكن عمل الخلاط يعطى بالشكل

$$W_{shaft,in} = \dot{W}_{shaft} * \Delta t$$

$$W_{shaft,in} = (0.02\ hp)(0.5\ h)\left(\frac{2545\ Btu/h}{1\ hp}\right)$$

$$W_{shaft,in} = 25.45\ Btu$$

بالتعويض في القانون الأول في الترموديناميك نجد أن درجة الحرارة النهائية هي

$$25.45\ Btu = (1.5\ lbm)(0.753\ \ Btu/lbm\ ^\circ\mathrm{F})(T_2 - 80^\circ\mathrm{F})$$

$$T_2 = 102.5^\circ\mathrm{F}$$

يجب أن ترتفع درجة الحرارة في الخزان لأن الخزان معزول وبالتالي لا يوجد تبادل حراري مع الوسط المحيط والطاقة الحركية والممثلة بعمل الخلاط تتحول إلى طاقة حرارية بحسب قانون انحفاظ الطاقة.

2) الضغط النهائي لهذا الغاز المثالي هو

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

الحجم ثابت (خزان مغلق) وبالتالي يحسب الضغط النهائي

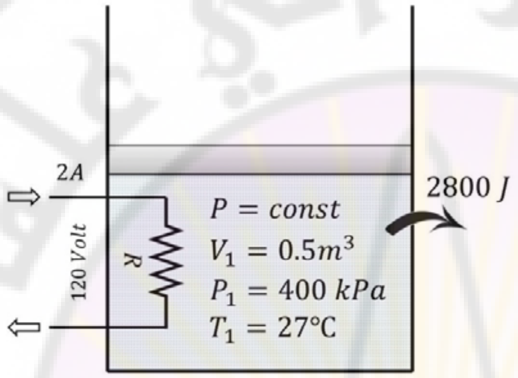
$$\frac{50\ psia}{(80 + 460)R} = \frac{P_2}{(102.5 + 460)R}$$

$$P_2 = 52.1\ psia$$

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 4–8 – تسخين غاز بفعل مقاومة كهربائية.

يحتوي نظام أسطوانة – مكبس على $(0.5m^3)$ من النتروجين بدرجة حرارة $(27°C)$ وضغط $(400\ kPa)$. نقوم بتشغيل مقاومة كهربائية داخل الأسطوانة فيمر تيار كهربائي بقيمة $(2A)$ لمدة $(5\ min)$ وبفولط $(120V)$. يتمدد الغاز بضغط ثابت ويخسر كمية من الحرارة إلى الوسط الخارجي بمقدار $(2800\ J)$. حدد درجة الحرارة النهائية للغاز.



الفرضيات: 1) النتروجين غاز مثالي لأن درجة الحرارة مرتفعة وضغطه منخفض بالمقارنة مع الدرجة الحرجة للغاز $(-147°C)$ والضغط الحرج $(3.39\ MPa)$ 2) يمكن اعتبار أن الحرارة النوعية ثابتة عند درجة حرارة الغرفة 3) يمكن اعتبار الطاقة الحركية والكامنة مهملة 4) النظام يعمل بضغط ثابت.

التحليل: 1) نظام أسطوانة – مكبس بما أن الخزان ذو حدود ثابتة فلا عمل للحدود والعمل الوحيدة هو عمل الخلاط، بتطبيق قانون انحفاظ الطاقة

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$(Q+W)_{in} - (Q+W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

تتحول معادلة الطاقة إلى

$$W_{e,in} - \left(Q_{out} + W_{b,out}\right) = \Delta U$$

$$W_{e,in} - Q_{out} = \Delta H = m(h_2 - h_1)$$

$$W_{e,in} - Q_{out} = mc_p(T_2 - T_1)$$

أيضاً يمكن تطبيق القانون الأول في الترموديناميك بالأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات كما يلي

$$Q - W = \Delta U$$

$$(-Q_{out}) - (-W_e + W_b) = \Delta U$$

$$-Q_{out} + W_e = \Delta H = m(h_2 - h_1)$$

$$-Q_{out} + W_e = mc_p(T_2 - T_1)$$

العمل المقدم من المقاومة هو

$$W_{e,in} = VI\Delta t = (120V)(2A)(5 * 60\ s)\frac{kJ/s}{1000VA}$$

$$W_{e,in} = 72\ kJ$$

كتلة الغاز تحسب من علاقة الغاز المثالي

$$m = \frac{P_1V_1}{RT_1} = \frac{(400\ kPa)(0.5m^3)}{(0.297\ \ kPa\, m^3/kg\ K)(300K)}$$

$$m = 2.245\ kg$$

بالتعويض في معادلة الطاقة نجد أن

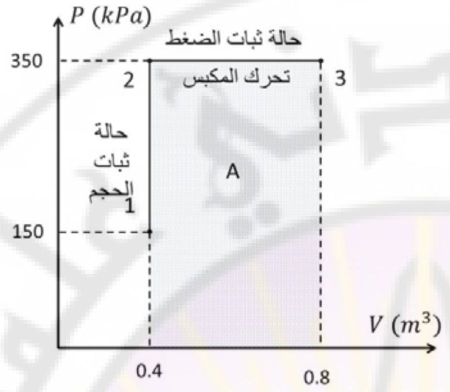
$$72\ kJ - 2.8\ kJ = (2.245\ kg)(1.039\ \ kJ/kg\ K)(T_2 - 300K)$$

$$T_2 = 329.7\ K = 56.7\ ℃$$

المثال التطبيقي 4–9 – تسخين غاز بضغط ثابت.

يحتوي نظام أسطوانة – مكبس بحجم ($400L$) على الهواء بدرجة حرارة (27℃) وضغط ($150\ kPa$). نقوم بتسخين الهواء فيصبح حجم الهواء مضاعفاً. المكبس هنا هو قوة معارضة لذلك يجب العلم بأننا بحاجة إلى ضغط وقدرة ($350\ kPa$) لكي يبدأ المكبس

Bassam Badran Damascus University



بالتحرك ويتمدد الهواء. حدد 1) درجة الحرارة النهائية للهواء و2) عمل الهواء و3) كمية الحرارة المضافة من المحيط.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي لأن درجة الحرارة مرتفعة وضغطه منخفض بالمقارنة مع القيم الحرجة 2) الحجم يبقى ثابتاً حتى يتحرك المكبس ويبقى الضغط ثابتاً بعد ذلك 3) يمكن اعتبار الطاقة الحركية والكامنة مهملة 4) لا توجد مقاومات أو أعمال خارجية

التحليل: 1) درجة الحرارة النهائية في النظام

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_3V_3}{T_3}$$

$$\frac{(150\ kPa)V_1}{300K} = \frac{(350\ kPa)(2V_1)}{T_3}$$

$$T_3 = 1400K$$

2) هنا يجب الانتباه إلى أننا يجب أن نصل إلى الضغط $(350\ kPa)$ قبل أن يتمدد الهواء أي أن العملية تتألف من عملية بحجم ثابت ثم عملية تمدد بضغط ثابت كما هو واضح في الشكل المرفق مع المسألة. يمكن إيجاد العمل بالتكامل ولكن في هذه الحالة حساب المساحة يكون أفضل

$$W_{1\to3} = W_{1\to2} + W_{2\to3}$$

ولكن عمل الحدود في العملية $(1 \to 2)$ هو صفر

Bassam Badran
Damascus University

$$W_{1\to2} = 0$$

وبالتالي

$$W_{1\to3} = W_{2\to3} = A = P_2 * (V_3 - V_2)$$

$$W_{1\to3} = 350\ kPa * (0.4m^3)$$

$$W_{1\to3} = 140\ kJ$$

3) لكي نحسب الحرارة المنتقلة من الوسط الخارجي نأخذ قانون انحفاظ الطاقة

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

تتحول معادلة الطاقة إلى

$$Q_{in} - W_{b,out} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

أيضاً يمكن تطبيق القانون الأول في الترموديناميك بالأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات كما يلي

$$Q - W = \Delta U$$

$$Q_{in} - (W_b)_{out} = \Delta U$$

$$Q_{in} - W_{b,out} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

يمكن إيجاد الكتلة من علاقة الغاز المثالي

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{(150\ kPa)(0.4m^3)}{(0.287\ \ kPa\ m^3/kg\ K)(300K)}$$

$$m = 0.697kg$$

التغيير في الطاقة الداخلية تحسب من الجداول من درجات الحرارة لأننا فرضنا أن الحرارة النوعية متغيرة

$$u_1 = u_{@300K} = 214.07\ kJ/kg$$

$$u_3 = u_{@1400K} = 1113.52\ kJ/kg$$

يمكن أيضاً أن نفرض أن الحرارة النوعية عند حجم ثابت ثابتة ويمكن حسابها بإحدى الطرق التي سبق ذكرها ويتحول التغيير في الطاقة الداخلية من الشكل

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = m * c_v(T_3 - T_1)$$

بالتعويض بالمعادلة الطاقة نجد أن

$$Q_{in} - 140\ kJ = \ 0.697kg\ (1113.52 - 214.07)\ kJ/kg$$

$$Q_{in} = 767\ kJ$$

6.4 الحرارة النوعية للمواد الصلبة والسائلة.

المواد التي يكون فيها الحجم النوعي أو الكثافة ثابتة $(v = const)$ تدعى بالمواد غير القابلة للانضغاط *Incompressible Substance*. من تعريف الحرارة النوعية عند حجم ثابت هي

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

وبثبات الحجم النوعي تتحول العلاقة إلى

$$c_v = \frac{du}{dT}$$

اما الحرارة النوعية عند ضغط ثابت فهي بحسب التعريف

$$c_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P$$

Bassam Badran Damascus University

بتعويض علاقة موليير في العلاقة السابقة

$$c_P = \left(\frac{\partial(u + Pv)}{\partial T}\right)_P$$

بما أن الحجم النوعي ثابت وكذلك الضغط، فتتحول العلاقة إلى

$$c_P = \frac{du}{dT} = c_v$$

أي أن الحرارة النوعية للمواد غير القابلة للإنضغاط هي ثابتة خلال أي عملية

$$c_P = c_v = c \qquad (30\text{-}4)$$

الطاقة الداخلية للمواد الصلبة والسائلة. يمكن التعبير عن التغيير في الطاقة الداخلية بالشكل التفاضلي التالي

$$du = c(T)dT$$

أما التغيير في الطاقة الداخلية بين حالتين فيكون

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T)dT \qquad (kJ/kg)$$

عندما يكون التغيير في درجات الحرارة صغيراً، يمكن أن نأخذ الحرارة النوعية الوسطية

$$\Delta u = c_{avg}\,(T_2 - T_1) \qquad (kJ/kg) \qquad (31\text{-}4)$$

إنتالبي المواد الصلبة والسائلة. يعبر عن التغيير في الإنتالبي مع ثبات الحجم كالتالي

$$dh = du + vdP + Pdv$$

$$dh = du + vdP$$

بمكاملة العلاقة لعملية ما بين الحالة (1) والحالة (2) نحصل على

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P \cong c_{avg}\Delta T + v\Delta P \quad (kJ/kg) \qquad (32\text{-}4)$$

Bassam Badran
Damascus University

المواد الصلبة. من أجل المواد الصلبة يمكن إهمال التغيير في الضغط أي العنصر $(v\Delta P)$ في العلاقة (32−4) وبالتالي تتحول العلاقة إلى

$$(\Delta h)_{solids} = \Delta u \cong c_{avg}\Delta T \quad (kJ/kg) \qquad (33\text{-}4)$$

المواد السائلة. من أجل المواد السائلة توجد لدينا حالتان

- العمليات ذات ضغط ثابت مثل عمليات التسخين تتحول المعادلة (32−4) إلى

$$(\Delta h)_{Liquid,P} = \Delta u \cong c_{avg}\Delta T \quad (kJ/kg) \qquad (34\text{-}4)$$

- العمليات ذات حرارة ثابتة مثل عمليات الضخ تتحول المعادلة (32−4) إلى

$$(\Delta h)_{Liquid,T} = v\Delta P \quad (kJ/kg) \qquad (35\text{-}4)$$

العلاقة بين الحالة الأولى (1) والحالة الثانية (2) تكون

$$h_2 - h_1 = v * (P_2 - P_1) \quad (kJ/kg) \qquad (36\text{-}4)$$

في حالة المضخات فإن الحالة (1) تكون حالة ماء مشبع *Saturated Liquid* أما الحالة (2) فتكون حالة ماء مضغوط *Compressed Liquid* وبالتالي يمكن حساب إنتالبي الحالة الثانية كما يلي

$$h_{2@P,T} = h_{1@f} + v_{1@f}(P_2 - P_{1,sat@T})$$

المثال التطبيقي 4−10 – إنتالبي السائل المضغوط.

حدد إنتالبي الماء عند درجة حرارة (100°C) وضغط $(15\ MPa)$ باستخدام 1) جداول الماء المضغوط 2) بتقريبه على أساس ماء مشبع و3) باستخدام التقريب في المعادلة (36−4).

الفرضيات: 1) الماء غير قابل للانضغاط.

Bassam Badran
Damascus University

التحليل: 1) عند درجة الحرارة $(100℃)$ يكون ضغط الماء عند الإشباع هو $(101.42\ kPa)$ وبما أن ضغط الماء أكبر من ضغط الإشباع فالماء يكون مضغوطاً وبالتالي

$$P = 15\ MPa; T = 100℃$$

$$h = 430.39\ \ kJ/kg$$

2) بتقريب السائل المضغوط على أساس ماء مشبع $(100℃)$

$$h \cong h_{f@100℃} = 419.17\ \ kJ/kg$$

الخطأ هنا هو 2.6 بالمئة.

3) تتحول المعادلة (36–4) في حال المضخات إلى

$$h_{@P,T} = h_{f@T} + v_{f@T}(P - P_{sat@T})$$

$$h_{@P,T} = 419.17\ \ kJ/kg + \left(0.001\frac{m^3}{kg}\right)[15000 - 101.42]kPa$$

$$h_{@P,T} = 434.07\ kJ/kg$$

وبالتالي فإن هذا التقريب يقلل من الخطأ من 2.6 بالمئة إلى 1 بالمئة.

<u>المثال التطبيقي 4–11 – تبريد كتلة من الحديد في الماء.</u>

نغمر كتلة $(50\ kg)$ من الحديد بدرجة حرارة $(80℃)$ في حوض ماء معزول بحجم $(0.5m^3)$ وبدرجة حرارة $(25℃)$. حدد درجة حرارة التوازن الحراري للنظام بعد الاستقرار.

الفرضيات: 1) الماء والحديد مواد غير قابلة للانضغاط 2) تؤخذ قيم الحرارة النوعية عند درجة حرارة الغرفة 3) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 4) لا أعمال خارجية ولا حرارة متبادلة مع الوسط 5) النظام (ماء + حديد) معزول.

التحليل: بتطبيق قانون التوازن الطاقي على النظام نجد أن

Bassam Badran
Damascus University

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

تتحول معادلة الطاقة إلى

$$0 = \Delta U_{sys} = \Delta U_{iron} + \Delta U_{water}$$

$$[mc\ (T_2 - T_1)]_{iron} + [mc\ (T_2 - T_1)]_{water} = 0$$

يمكن إيجاد كتلة الماء من شروطه بالعلاقة

$$m_{water} = \frac{V}{v}$$

$$m_{water} = \frac{0.5\ m^3}{0.001\ \ m^3/kg}$$

$$m_{water} = 500\ kg$$

نوجد قيم الحرارة النوعية للماء والحديد من الجداول على الشكل التالي

$$c_{iron} = 0.45\ \ kJ/kg\ K$$

$$c_{water} = 4.18\ kJ/kg\ K$$

بالتطبيق في قانون التوازن الطاقي نجد أن

$$(50\ kg)(0.45\ \ kJ/kg\ K)(T_2 - 80°\text{C}) + (500\ kg)(4.18\ \ kJ/kg\ K)(T_2 - 25°\text{C}) = 0$$

$$T_2 = 25.6\ °\text{C}$$

السبب من أن درجة حرارة التوازن أقرب إلى درجة حرارة الماء لأن كتلة الماء أكبر بعشر مرات من كتلة الحديد.

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 4–12 – تسخين عامود من الألومينيوم في فرن.

يعالج عامود الألومينيوم ($\rho = 2700\,kg/m^3\,, c_P = 0.973\,kJ/kg\,K$) بقطر ($5\,cm$) حرارياً من درجة الحرارة (20°C) إلى وسطي درجة حرارة (400°C) بحسبه ضمن فرن بسرعة ($8\,m/min$). حدد معدل انتقال الحرارة إلى العامود من الفرن.

الفرضيات: 1) المواصفات الفزيائية للعامود ثابتة 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة.

التحليل: بتطبيق قانون التوازن الطاقي على النظام نجد أن

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

$$(Q+W)_{in} - (Q+W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

$$Q_{in} = \Delta U_{rod} = m(u_2 - u_1) = mc(T_2 - T_1)$$

يمكن إيجاد كتلة الألومينيوم من شروطه بالعلاقة

$$m_{al} = \frac{V}{v} = \rho V = \rho\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) * L$$

الطول ضمن الفرن هو 8 متر كل دقيقة أي 8 متر

$$m_{al} = (2700\,kg/m^3)\frac{\pi(0.05m)^2}{4} * (8m)$$

$$m_{al} = 42.41\,kg$$

بالتطبيق في معادلة التوازن الطاقي نجد أن

$$Q_{in} = mc(T_2 - T_1)$$

$$Q_{in} = (42.41\,kg)(0.973\,kJ/kg\,K)(400-20)°C$$

$$Q_{in} = 15680\,kJ$$

Bassam Badran Damascus University

هذه الحرارة اللازمة لتسخين 8 متر من طول العامود، لذلك معدل انتقال الحرارة بالدقيقة هي

$$\dot{Q}_{in} = \frac{Q_{in}}{\Delta t} = \frac{15680\ kJ}{60\ s}$$

$$\dot{Q}_{in} = 261\ \ kJ/s = 261\ kW$$

7.4 العمليات في الأنظمة المغلقة.

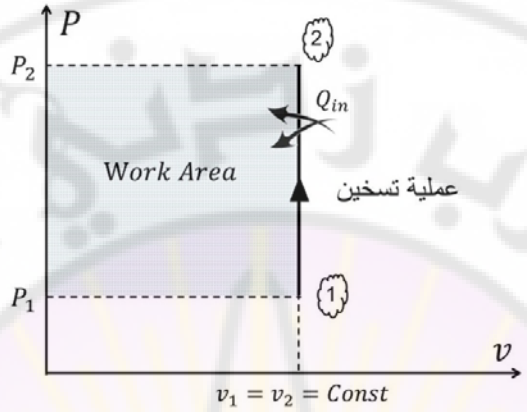
سنتعرف هنا على كافة العمليات التي يتم استعمالها في الترموديناميك **لغاز مثالي فقط** في نظام مغلق وسنعطي علاقة كمية الحرارة وعمل الحدود فقط مهملين أي أعمال أخرى لهذه العمليات. تم استخدام العمليات العكوسة والتي ستشرح بالتفصيل في القانون الثاني في الترموديناميك للتعبير عن عدم وجود أي ضياع ضمن هذه العمليات.

1.7.4 العملية بحجم ثابت (العملية الإيزوخورية *Isochoric Process*).

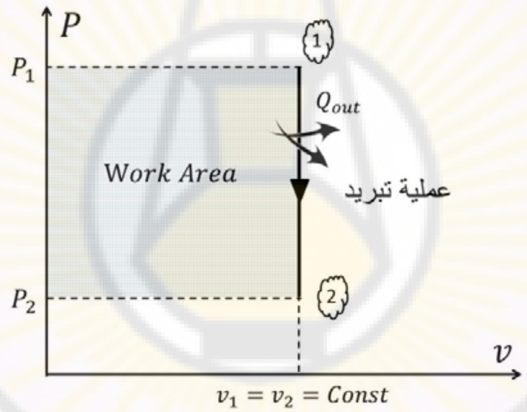
تطبق العملية الإيزوخورية (حجم ثابت) في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الصلبة الثابتة. يبين الشكل (4−4) عملية تسخين إيزوخورية امتصاص حرارة (تسخين) من الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P-v)$ ويبين الشكل (5−4) عملية تبريد إيزوخورية عند طرح حرارة (تبريد) إلى الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P-v)$. المساحة المحصورة بين العملية الإيزوخورية ومحور الضغط تساوي عمل العملية الإيزوخورية. يجب الانتباه بأن هذا العمل ليس عمل حدود لأن عمل الحدود بالتعريف هو صفر. التغييرات التي تحصل في هذه الأنظمة المغلقة تتعلق فقط بدرجة حرارة وضغط وسيط التشغيل. يعطى عمل الحدود مع إهمال باقي الأعمال الآخرى من العلاقة

$$W = W_b = \int_1^2 P\,dV = 0 \qquad (37\text{-}4)$$

Bassam Badran Damascus University



الشكل (4-4) عملية تسخين إيزوخورية على مخطط $(P-v)$.



الشكل (4-5) عملية تبريد إيزوخورية على مخطط $(P-v)$.

من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية نجد أن كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة العامة.

$$Q = \Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (kJ) \qquad (38\text{-}4)$$

حالات خاصة.

Bassam Badran
Damascus University

يحسب التغيير في الطاقة الداخلية بعدة طرائق وبحسب الشروط المطبقة كما يلي:

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية من تفاضل علاقة موليير السابقة

$$dH = dU + PdV + VdP$$

بالمكاملة على عملية إيزوخورية (تسخينة أو تبريدية) نجد أن

$$\Delta U = \Delta H + V\Delta P$$

$$\Delta U = m[(h_2 - h_1) + V(P_2 - P_1)]$$

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية من جداول الغاز بحسب درجات الحرارة في الحالة الأولى والثانية وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta U = m(u_{2@T_2} - u_{1@T_1}) \quad (kJ)$$

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية بفرض أن الحرارة النوعية متغيرة (غير ثابتة) وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\, dT \quad (kJ)$$

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta U = m\, c_v(T_2 - T_1) \quad (kJ) \qquad (39\text{-}4)$$

خلاصة العملية الإيزوخورية للغاز المثالي مع حرارة نوعية ثابتة

Q, kJ	$W = W_b, kJ$	$\Delta U, kJ$
ΔU	**0**	$m\, c_v(T_2 - T_1)$

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 4-13 – عملية إيزوخورية.

يخضع خزان صلب يحتوي على ($10\,kg$) هواء ذي درجة حرارة ($600\,K$) إلى عملية تبادل حراري مع الوسط الخارجي فتنخفض درجة حرارة الهواء إلى ($300\,K$). حدد كمية الحرارة المتبادلة مع المحيط بفرض أن الحرارة النوعية للهواء هي ثابتة.

الفرضيات: 1) الهواء غاز مثالي بحرارة نوعية ثابتة 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) الخزان صلب والحجم ثابت.

التحليل: لا يوجد عمل حدود في النظام لأن الخزان صلب أي

$$W = W_b = 0$$

أما كمية الحرارة فهي تحسب من القانون الأول في الترموديناميك

$$Q = \Delta U = m\, c_v (T_2 - T_1) \quad (kJ)$$

بالنسبة إلى قيم الحرارة النوعية يمكن أخذ بإحدى الطرق التالية

1. أخذ قيمة الحرارة النوعية عند شروط الغرفة (ثابتة).

$$Q = (10\,kg)(0.718\,kJ/kg\,K)(600-300)K$$

ملاحظة: يرجى الانتباه إلى أن أخذ درجات الحرارة بالكالفن أو بالدرجة سيليزيوس يعطي النتيجة نفسها لأننا نقوم بأخذ الفرق في الدرجات

$$Q = 2154 \quad kJ$$

2. أخذ قيم الحرارة النوعية الموافقة لدرجات حرارة الهواء وإيجاد المتوسط.

$$T = 300\,K \qquad c_v = 0.718\ kJ/kg\,K$$

$$T = 600\,K \qquad c_v = 0.764\ kJ/kg\,K$$

$$Q = (10\,kg)\left(\frac{0.764+0.718}{2}\,kJ/kg\,K\right)(600-300)K$$

$$Q = 2223 \quad kJ$$

Bassam Badran
Damascus University

3. أخذ وسطي درجات الحرارة وإيجاد قيمة الحرارة النوعية عند ذاك الوسطي (متغيرة وسطية).

$$T_{avg} = \frac{600 + 300}{2}$$

$$T_{avg} = 450\ K$$

$$Q = (10\ kg)(0.733\ kJ/kg\ K)(600 - 300)K$$

$$Q = 2199 \quad kJ$$

مناقشة:

نلاحظ أن القيمة في الفرضية الثانية أعلى من شروط الغرفة 3% أما القيمة في الفرضية الثالثة فهي أقل بمقدار 2% وهذا الخطأ يمكن إهماله في الحسابات الهندسية.

يمكن حساب الحرارة أيضاً من قانون انحفاظ الطاقة

$$(Q + W)_{in} - (Q + W)_{out} = \Delta U + KE + PE$$

بإهمال الطاقة الحركية والكامنة وكافة الأعمال بما في ذلك عمل الحدود وباستخدام فرضية الغاز المثالي نجد أن

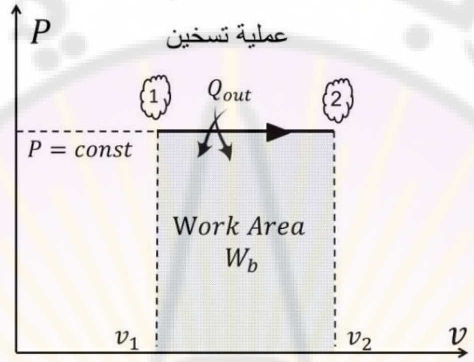
$$Q = \Delta U = m\, c_v (T_2 - T_1) \quad (kJ)$$

2.7.4 العملية بضغط ثابت (العملية الإيزوبارية *Isobaric Process*).

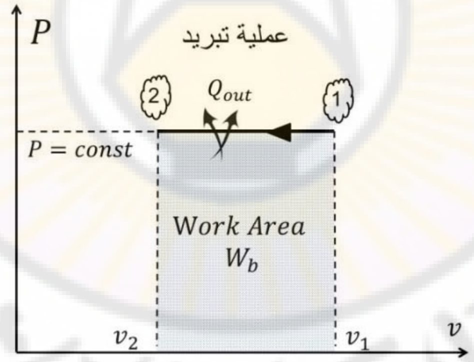
تطبق العملية الإيزوبارية (ضغط ثابت) في الأنظمة المغلقة ذات الحدود المتغيرة (إسطونة – مكبس). يبين الشكل (4–6) عملية تسخين إيزوبارية امتصاص حرارة (تسخين) من الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P - v)$. ويبين الشكل (4–7) عملية تبريد إيزوبارية عند طرح حرارة (تبريد) إلى الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P - v)$. المساحة المحصورة بين العملية الإيزوبارية ومحور الحجم النوعي تساوي عمل العملية

Bassam Badran
Damascus University

الإيزوبارية. التغييرات التي تحصل في هذه الأنظمة المغلقة تتعلق فقط بدرجة حرارة وسيط التشغيل وحجمه.



الشكل (6−4) عملية تسخين إيزوبارية على مخطط $(P - v)$.



الشكل (7−4) عملية تبريد إيزوبارية على مخطط $(P - v)$.

يعطى عمل الحدود مع إهمال باقي الأعمال الآخرى من العلاقة

$$W = W_b = \int_1^2 P\, dV = P(V_2 - V_1)$$

Bassam Badran Damascus University

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$W = P(V_2 - V_1) = mR(T_2 - T_1) \quad (40\text{-}4)$$

من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية نجد أن كمية الحرارة للأنظمة المغلقة ذات حدود متغيرة (إسطونة – مكبس) العامة هي

$$Q = W + \Delta U = m(u_2 - u_1) + m\,P\,(v_2 - v_1)$$

أو يمكن كتابتها بالشكل

$$Q = \Delta H = m(h_2 - h_1) \quad (41\text{-}4)$$

حالات خاصة.

يحسب التغيير في الإنتالبي بعدة طرائق وبحسب الشروط المطبقة

❖ يحسب التغيير في الإنتالبي من جداول الغاز بحسب درجات الحرارة في الحالة الأولى والثانية وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta H = m\left(h_{2@T_2} - h_{1@T_1}\right) \quad (kJ)$$

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية بفرض أن الحرارة النوعية متغيرة (غير ثابتة) وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta H = m \int_{T_1}^{T_2} c_P(T)\, dT \quad (kJ)$$

❖ يحسب التغيير في الطاقة الداخلية بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة وبالتالي تعطى كمية الحرارة في الأنظمة المغلقة ذات الحدود الثابتة والتي تحتوي غازاً مثالياً بالشكل

$$Q = \Delta H = m\, c_P(T_2 - T_1) \quad (42\text{-}4)$$

Bassam Badran
Damascus University

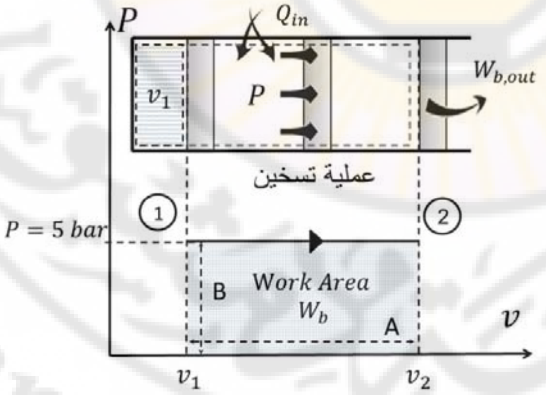
خلاصة العملية الإيزوبارية للغاز المثالي مع حرارة نوعية ثابتة

Q, kJ	$W = W_b, kJ$	$\Delta U, kJ$
$m\, c_v\, (T_2 - T_1)$	$P(V_2 - V_1)$	$Q - W_b$
$m\, c_P\, (T_2 - T_1)$	**0**	Q

المثال التطبيقي 4–14 – عملية إيزوبارية.

يخضع نظام أسطوانة – مكبس يحتوي على $(0.25\, kg)$ هواء بحجم نوعي $(0.2\, m^3/kg)$ إلى عملية تحت ضغط ثابت قدره $(5\, bar)$ باعتبار أن العمل المتبادل بين النظام والوسط هو $(15\, kJ)$. حدد 1) الحجم النهائي للنظام و2) كمية الحرارة المتبادلة و3) التغيير في الطاقة الداخلية بفرض أن الحرارة النوعية للهواء تؤخذ عند درجة حرارة الغرفة.

الفرضيات: 1) بفرض ان عمل الحدود الذي يقوم به نظام أسطوانة – مكبس هو عمل موجب 2) الأعمال الآخرى مهملة 3) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 4) العملية تتم بضغط ثابت 5) الهواء غاز مثالي 5) الحرارة النوعية للهواء ثابتة وهي $(c_P = 1\, kJ/kgK)$.



التحليل: 1) في العملية الإيزوبارية (ضغط ثابت) يكون العمل

$$W = P(V_2 - V_1) = mP(v_2 - v_1)$$

$$15\ kJ = (0.25\ kg)(500\ kPa)(v_2 - 0.2)(m^3/kg)$$

$$v_2 = 0.32\, m^3/kg$$

نلاحظ أيضاً بأن قيمة العمل هي مساحة المستطيل بين العملية (B) ومحور الحجم النوعي (A)

$$w = A * B$$

$$15\ kJ/0.25\, kg = 500\ kPa * \ (v_2 - 0.2)(m^3/kg)$$

$$v_2 = 0.32\, m^3/kg$$

الحجم النهائي هو

$$V_2 = mv_2 = (0.25\ kg)(0.32\ \ m^3/kg) = 0.08\, m^3$$

بما أن الحجم النوعي النهائي هو أكبر من الحجم النوعي الابتدائي فإن فرضية أن العمل موجب محققة أي أن النظام يقوم بعمل.

2) تحسب كمية الحرارة من العلاقة

$$Q = \Delta H = m\, c_P(T_2 - T_1)$$

درجة حرارة الهواء الابتدائية تحسب من معادلة الحالة

$$T_1 = \frac{Pv_1}{R} = \frac{(500\ kPa)(0.2\, m^3/kg)}{0.2869\ kJ/kgK} = 348.55\ K$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \rightarrow T_2 = \frac{v_2}{v_1} * T_1$$

$$\rightarrow T_2 = \left(\frac{0.32\ \ m^3/kg}{0.2\ \ m^3/kg}\right) * 348.55\ K = 557.68\ K$$

$$Q = (0.25\ kg)(1\ kJ/kgK)(557.68\ K - 348.55\ K)$$

$$Q = 52.3 \quad (kJ)$$

Bassam Badran Damascus University

3) يمكن حساب التغيير في الطاقة الداخلية في القانون الأول في الترموديناميك كما يلي

$$Q - W_b = \Delta U$$

$$\Delta U = 52.3 - 15 = 37.3\ kJ$$

أو من علاقة الطاقة الداخلية للغاز المثالي فنجد أن

$$\Delta U = m\, c_v * (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = m * \ (c_P + R) * (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = (0.25\ kg) * (1 - 0.282) \frac{kJ}{kgK} * (557.68\ K - 348.55\ K)$$

$$\Delta U = 37.5\ \ kJ$$

مناقشة:

يعود الخلاف بين القيم إلى كيفية اختيار الحرارة النوعية للهواء. هذا الفرق يمكن إهماله في التطبيقات الهندسية أيضاً.

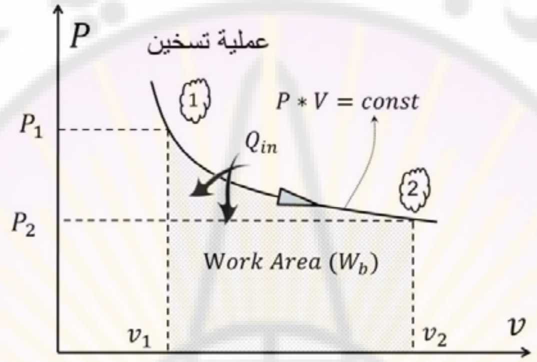
3.7.4 العملية بدرجة حرارة ثابتة (العملية الإيزوثرمية *Isothermal Process*).

تطبق العملية الإيزوثرمية (درجة حرارة ثابتة) في كافة الأنظمة المغلقة (حدود ثابتة أو حدود متحركة). العلاقة بين الضغط والحجم هي قطع زائد متساوي الساقين تقعره إلى الأعلى. يبين الشكل (4-8) عملية تسخين إيزوثرمية امتصاص حرارة (تسخين) من الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P - v)$. ويبين الشكل (4-9) عملية تبريد إيزوثرمية عند طرح حرارة (تبريد) إلى الوسط الخارجي بين الحالة الابتدائية (1) والنهائية (2) على مخطط $(P - v)$. المساحة المحصورة بين العملية الإيزوثرمية ومحور الحجم النوعي تساوي عمل العملية

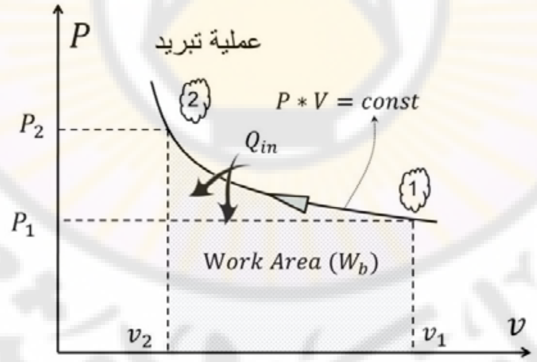
Bassam Badran
Damascus University

الإيزوثرمية. التغييرات التي تحصل في هذه الأنظمة المغلقة تتعلق فقط بدرجة حرارة وسيط التشغيل وحجمه. معادلة الغاز المثالي تعطى بالعلاقة

$$PV = mRT$$



الشكل (8–4) عملية تسخين إيزوثرمية على مخطط $(P-v)$.



الشكل (9–4) عملية تبريد إيزوثرمية على مخطط $(P-v)$.

العملية بثبات درجة الحرارة

Bassam Badran Damascus University

$$PV = const, \qquad P = \frac{const}{V}$$

ويعطى عمل الحدود مع إهمال باقي الأعمال الآخرى

$$W = W_b = \int_1^2 P\, dV$$

$$W = W_b = \int_1^2 \frac{const}{V}\, dV$$

ولأن العملية إيزوثرمية فدرجة الحرارة ثابتة. بالمكاملة بين الحالة (1) والحالة (2) في علاقة عمل الحدود السابقة وبتعويض الثابت الموجود في النتيجة بثابت معادلة الغاز المثالي في العملية الإيزوثرمية نجد أن

$$W_b = const * ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

أو تكتب بالشكل

$$W_b = mRT * ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT * ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = mRT\ \ ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \qquad (43\text{-}4)$$

التغيير في الطاقة الداخلية للغاز المثالي هو صفر لأن درجة الحرارة ثابتة

$$\Delta U = m * \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\, dT = 0$$

من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية نجد أن كمية الحرارة لهذه الأنظمة المغلقة في العملية الإيزوثرمية

$$Q = W_b \qquad (44\text{-}4)$$

كمية الحرارة للأنظمة المغلقة للغاز المثالي في العملية الإيزوثرمية هي

Bassam Badran Damascus University

$$Q = W = mRT \ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT \ ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \qquad (kJ) \qquad (45\text{-}4)$$

خلاصة العملية الإيزوثرمية للغاز المثالي مع حرارة نوعية ثابتة

$\Delta U, kJ$	$W = W_b \, , kJ$	Q, kJ
0	$mRT \ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	W_b

المثال التطبيقي 4–15 – عملية إيزوثرمية.

ينتقل ($0.5 \, kg$) هواء في أسطوانة – مكبس من الحالة (1) ذات البارامترات ($5 \, bar$) وحجم ($0.1 \, m^3$) بعملية إيزوثرمية إلى الحالة (2) ذات الضغط ($1 \, bar$) احسب 1) الحجم النهائي و2) درجة حرارة الهواء و3) العمل في هذه العملية و4) كمية الحرارة.

الفرضيات: 1) عمل الحدود هو عمل تمدد لأن الضغط يتناقص 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) لا توجد أعمال آخرى 4) الهواء غاز مثالي.

التحليل: 1) الحجم النهائي هو

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} \rightarrow V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}$$

$$V_2 = \frac{5 \ bar * 0.1 m^3}{1 \ bar}$$

$$V_2 = 0.5 \ m^3$$

2) درجة الحرارة تحسب من معادلة الحالة

$$P * V = mR * T$$

$$\rightarrow T = \frac{P_1 V_1}{mR} = \frac{(500\ kPa)(0.1 m^3)}{(0.5\ kg)(0.2869\ kJ/kgK)}$$

$$T = 348.55\ K = 75.4\ ℃$$

3) في العملية الإيزوثرمية (درجة حرارة ثابت) يكون العمل

$$W_b = mRT\ \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT\ \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = mRT\ \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (kJ)$$

أو يمكن كتابتها باستخدام معادلة الغاز المثالي بالشكل

$$W_b = P_1 V_1\ \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (kJ)$$

$$W_b = (500\ kPa)(0.1\ m^3) \ln \frac{500\ kPa}{100\ kPa}$$

$$W_b = 80.47\ \ kJ$$

عمل حدود هو عمل تمدد كما هو مفروض وهذا منطقي كون الضغط ينخفض من $(5\ bar)$ إلى $(1\ bar)$.

4) كمية الحرارة في هذه العملية

$$Q = W = \ 80.47 \qquad (kJ)$$

4.7.4 <u>العملية الأدياباتية (العملية الإيزونتروبية *Isentropic Process*).</u>

العملية الأدياباتية هي عملية تكون فيها كمية الحرارة المتبادلة بين النظام والوسط الخارجي مهملة أي يكون النظام معزولاً عن الوسط الخارجي. تسمى العملية **<u>الأدياباتية العكوسة</u>** بالعملية الإيزونتروبية *Isentropic Process*. العملية العكوسة تعني أن الطاقة المتبددة يمكن إستردادها بخطوة عكسية (سيتم شرح هذه العمليات في درس الإنتروبي). **العملية الأدياباتية يمكن أن تتم في إسطوانة – مكبس معزولة بشكل مثالي زلما كان العزل المثالي لا يتحقق في الطبيعة فإننا نجري هذه العملية بحركة سريعة**

Bassam Badran
Damascus University

للمكبس كي لا يتمكن الغاز من تبادل الحرارة مع الوسط الخارجي فهي عملية لاعكوسة.

لإيجاد العلاقة بين الضغط والحجم في العملية الأدياباتية (الإيزونتروبية) لاستخدامها في علاقة عمل الحدود نبدأ من القانون الأول في الترموديناميك مع فرض أن الغاز مثالي

$$\delta Q - \delta W = dU$$

كمية الحرارة مهملة والأعمال هي فقط عمل الحدود نجد

$$(-\delta W = -\delta W_b = -PdV) = mc_v dT$$

$$-PdV = mc_v dT$$

من مفاضلة معادلة الحالة للغاز المثالي

$$d(P * V) = d(m * R * T)$$

$$VdP + PdV = R\,dT \rightarrow PdV = mRdT - VdP$$

بالتعويض نجد

$$-mc_v dT = mRdT - VdP$$

$$m(R + c_v)dT = VdP$$

ولكن $(c_P = c_v + R)$ فتتحول المعالدلة إلى

$$VdP = mc_P dT$$

بتقسيم العلاقة (VdP) على علاقة $(-PdV)$ نجد أن

$$\frac{VdP}{-PdV} = \frac{mc_P dT}{mc_v dT} = \frac{c_P}{c_v} = k$$

(k) هو العامل الأدياباتي أو نسبة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت بالتعويض نجد أن

Bassam Badran
Damascus University

$$VdP + k\,PdV = 0$$

بالتقسيم على $(P * V)$ نجد أن

$$\frac{dP}{P} + k\frac{dV}{V} = 0$$

وبإيجاد التكامل غير المحدود للعلاقة السابقة نجد أن

$$ln\,P + k\,ln\,V = constant$$

باستخدام خواص اللوغاريتمات نحصل على معادلة الحالة الأدياباتية والتي تمثل بالعلاقة

$$P * V^{k} = constant \qquad (46\text{-}4)$$

العامل الأدياباتي في المعادلة السابقة يأخذ القيم التالية

بالنسبة إلى الغازات الأحادية الذرة $k = 1.667$

بالنسبة إلى الغازات الثنائية الذرة $k = 1.4$

بالنسبة إلى الغازات الثلاثية والمتعددة الذرات $k = 1.29$

ترسم العلاقة الأدياباتية مثل العلاقة الإيزوترمية أي قطع زائد تقعره إلى الأعلى ولكن غير متساوي الساقين. يمكن كتابة المعادلة السابقة (46-4) بين حالتين كما يلي

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k}$$

بتطبيق قانون الحالة للغاز المثالي تصبح العلاقات المكافئة للعلاقة السابقة من الشكل

$$T * V^{k-1} = constant \qquad (47\text{-}4)$$

أو يمكن كتابتها بين حالتين كما يلي

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}$$

$$P^{1-k} * T^{k} = constant \qquad (48\text{-}4)$$

Bassam Badran Damascus University

أو يمكن كتابتها بين حالتين كما يلي

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/(1-k)}$$

يعطى عمل الحدود مع إهمال باقي الأعمال الآخرى بالشكل

$$W = W_b = \int_1^2 P\, dV = \int_1^2 \frac{constant}{V^k}\, dV$$

$$W_b = \frac{constant}{1-k}\left(V_2^{1-k} - V_1^{1-k}\right)$$

بتعويض $\left(P * V^k = constant\right)$ في المعادلة نجد أن

$$W_b = \frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1) \qquad (kJ) \qquad (49\text{-}4)$$

باستخدام معادلة الحالة نجد

$$W_b = \frac{m * R}{1-k}(T_2 - T_1) \qquad (kJ) \qquad (50\text{-}4)$$

كمية الحرارة لهذه الأنظمة المغلقة في العملية الأدياباتية

$$Q = 0$$

التغيير في الطاقة الداخلية فهو

$$-W_b = \Delta U$$

خلاصة العملية الإيزونتروبية

$\Delta U, kJ$	W, kJ	Q, kJ
$(-W_b)$	$W_b = \frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1)$	**0**

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 4–16 – عملية أدياباتية (إيزونتروبية).

يتم رفع ضغط غاز النيون في جملة مغلقة (أسطوانة – مكبس) بشكل أدياباتي عكوس (إيزونتروبي) من الحالة (1) ذات البارامترات ($100\ kPa$) ودرجة حرارة ($20°C$) والحجم ($0.24 m^3$) إلى الحالة (2) ذات الضغط ($400\ kPa$) إذا علمنا أن ثابت العملية الأدياباتية هو ($k_{neon} = 1.667$) وثابت الغاز هو ($R_{neon} = 0.412\ kJ/kgk$) احسب 1) الحجم النهائي و2) درجة الحرارة النهائية و3) العمل في هذه العملية و4) كمية الحرارة.

الفرضيات: 1) عمل الحدود هو عمل انضغاط أي سالب 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) لا توجد أعمال آخرى 4) النيون غاز مثالي.

التحليل: 1) الحجم النهائي هو

$$P * V^k = constant$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/k} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\rightarrow V_2 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/k} * V_1$$

$$V_2 = \left(\frac{100}{400}\right)^{1/1.667} * (0.24 m^3)$$

$$V_2 = 0.1045\ m^3$$

أي أن الحجم النهائي أقل من الحجم البدائي والعملية انضغاط

2) درجة الحرارة تحسب من المعادلة

$$P^{1-k} * T^k = constant$$

Bassam Badran Damascus University

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-k} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k}$$

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-k/k}$$

$$T_2 = (293.15\ \mathrm{K}) * \left(\frac{100}{400}\right)^{(-0.667/1.667)}$$

$$T_2 = 510.4\ K$$

3) في العملية الإيزونتروبية (أدياباتية عكوسة) يكون العمل

$$W_b = \frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1) \qquad (kJ)$$

$$W_b = \frac{1}{-0.667}[(400\ kPa * 0.1045\ m^3) - (100\ kPa * 0.24 m^3)]$$

$$W_b = -26.7\ kJ$$

الإشارة السالبة تدل على أن العمل هو عمل يمارسه المكبس على الغاز وبالتالي هو عمل انضغاط كما هو مفروض.

4) كمية الحرارة في العملية الأدياباتية هي

$$Q = 0\ \ (kJ)$$

5.7.4 العملية البوليتروبية (العملية المتعددة المراحل *Polytropic Process*).

تتوزع الحرارة الخارجية والتي تضاف إلى النظام بين الطاقة الداخلية وعمل الحدود. تعطى في هذه العملية تكون النسبة بين الطاقة الداخلية (مع ثبات الحرارة النوعية) وكمية الحرارة الرمز (ζ) (زيتا) بحسب العلاقة التالية

Bassam Badran Damascus University

$$\zeta = \frac{\Delta U}{Q} = \frac{W_b + Q}{Q} = 1 + \frac{W_b}{Q}$$

- $(\zeta = 1)$ في العملية الإيزوخورية حيث عمل الحدود يساوي الصفر لنظام مغلق حدوده ثابتة.
- $(\zeta = 1/k)$ في العملية الإيزوبارية حيث $(\Delta U = mc_v dT)$ و $(Q = mc_P dT)$ لنظام مغلق ذي حدود متحركة.
- $(\zeta = 0)$ في العملية الإيزوثرمية لأن $(\Delta U = 0)$.
- $(\zeta = \infty)$ في العملية أدياباتية $(Q = 0)$
- $(\zeta = c_v/c_n)$ في العملية البوليتروبية حيث يكون $(\Delta U = mc_v dT)$ و $(Q = mc_n dT)$. هنا (c_n) هي الحرارة النوعية في العملية البوليتروبية ولها واحدات السعة الحرارية النوعية. يمكن أن نكتب زيتا من الشكل

$$c_n = \frac{c_v}{\xi}$$

من القانون الأول في الترموديناميك نجد أن

$$c_n * dT = c_v * dT + P * dv$$

$$\frac{c_v - c_n}{R} * d(Pv) + P * dv = 0$$

$$\frac{c_v - c_n}{R} * \{P * dv + v * dP\} + P * dv = 0$$

$$\frac{c_v - c_n}{R} * v * dP + \frac{c_v - c_n + R}{R} P * dv = 0$$

بالتقسيم على

$$\frac{c_v - c_n}{R}(v * P)$$

نحصل على

$$\frac{dP}{P} + \left(\frac{c_P - c_n}{c_v - c_n}\right)\frac{dv}{v} = 0$$

نسمي النسبة

Bassam Badran Damascus University

$$\frac{c_P - c_n}{c_v - c_n}$$

هو الثابت البوليتروبي (n) وبالتعويض نجد

$$\frac{dP}{P} + \left(\frac{c_P - c_n}{c_v - c_n}\right)\frac{dv}{v} = 0$$

بمكاملة المعادلة السابقة نجد العلاقة العامة للعملية البوليتروبية هي

$$P * V^n = constant \qquad (51\text{-}4)$$

باستخدام معادلة الحالة للغاز المثالي نجد أن المعادلة البوليتروبية تصبح

$$T * V^{n-1} = Constant \qquad (52\text{-}4)$$

$$P^{1-n} * T^n = Constant \qquad (53\text{-}4)$$

إن العملية البوليتروبية هي العملية الشاملة والعمليات الترموديناميكية المدروسة سابقاً هي حالة خاصة من هذه العملية.

§ تتحول العملية البوليتروبية إلى عملية إيزوخورية عندما تكون قيمة ($n = \infty$) وتصبح ($c_n = c_v$) أو ($\zeta = 1$).

§ تتحول العملية البوليتروبية إلى عملية إيزوبارية عندما تكون قيمة ($n = 0$) وتصبح ($c_n = c_P$) أو ($\zeta = 1/k$)

§ تتحول العملية البوليتروبية إلى عملية إيزوثرمية عندما تكون قيمة ($n = 1$) وتصبح ($c_n = \infty$) تكون ($\zeta = c_v/c_n = 0$).

§ تتحول العملية البوليتروبية إلى عملية أدياباتية عندما تكون قيمة($n = k$) وتصبح ($c_n = 0$) أو ($\zeta = c_v/c_n = \infty$).

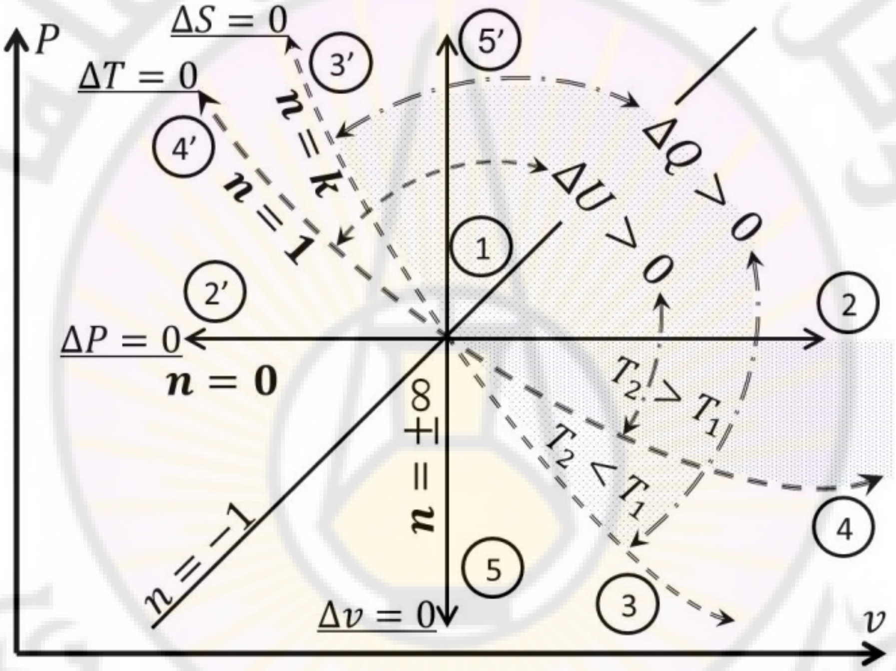
حيث زيتا بدلالة الثابت البوليتروبي والأدياباتي يساوي

$$n = \frac{c_P - c_n}{c_v - c_n}$$

Bassam Badran Damascus University

$$n = \frac{c_P - \frac{c_v}{\xi}}{c_v - \frac{c_v}{\xi}}$$

$$\xi = \frac{n-1}{n-k}$$



الشكل (4−10) العمليات الترموديناميكة وعلاقتها مع العملية البوليتروبية على مخطط $(P-v)$

يبين الشكل (4−10) العلاقات الترموديناميكة العامة وعلاقتها مع العملية البوليتروبية على مخطط $(P-v)$.

- الخط $(2-1-2')$ يمثل العملية الإيزوبارية.
- الخط $(4-1-4')$ يمثل العملية الإيزوثرمية.

Bassam Badran Damascus University

§ الخط $(3-1-3')$ يمثل العملية الأدياباتية.

§ الخط $(5-1-5')$ يمثل العملية الإيزوخورية.

نلاحظ من الشكل (4–10) بأن المنطقة على **يمين** خط العملية الإيزوخورية تكون فيها الطاقة الداخلية موجبة كما هو مهشر وعلى يسارها تكون سالبةً وعلى **يمين** العملية الأدياباتية تكون كمية الحرارة موجبة وعلى يسارها سالبة. يعطى عمل الحدود في العملية البوليتروبية مع إهمال باقي الأعمال الآخرى من العلاقة

$$W = W_b = \int_1^2 P\,dV = \int_1^2 \frac{constant}{V^n}\,dV$$

$$W_b = \frac{constant}{1-k}\left(V_2^{1-n} - V_1^{1-n}\right)$$

بتعويض $(P * V^n = Constant)$ في المعادلة نجد أن

$$W_b = \frac{1}{1-n}(P_2V_2 - P_1V_1) \qquad (kJ) \qquad (54\text{-}4)$$

بتعويض معادلة الحالة فيها نجد

$$W = \frac{mR}{1-k}(T_2 - T_1) \qquad (kJ) \qquad (55\text{-}4)$$

خلاصة العملية البوليتروبية للغاز المثالي مع حرارة نوعية ثابتة

$\Delta U, kJ$	W, kJ	Q, kJ
$m(u_2 - u_1)$	$W_b = \frac{1}{1-n}(P_2V_2 - P_1V_1)$	$\Delta U + W_b$

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 4−17 – عملية بوليتروبية.

يتم رفع ضغط $(1\ kg)$ هواء في جملة مغلقة أسطوانة – مكبس بشكل بوليتوربي من الحالة (1) ذات البارامترات $(100\ kPa)$ ودرجة حرارة $(22°C)$ إلى الحالة (2) ذات الضغط $(200\ kPa)$ إذا علمنا أن ثابت العملية البوليتروبية هو $(n_{air} = 1.3)$. احسب 1) العمل و2) كمية الحرارة المتبادلة مع الوسط.

الفرضيات: 1) عمل الحدود هو عمل انضغاط أي سالب 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) لا توجد أعمال آخرى 4) الهواء غاز مثالي.

التحليل:

1) لحساب العمل يجب معرفة درجة الحرارة النهائية من العلاقة

$$P^{1-n} * T^n = constant$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-n} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^n$$

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1-n/n}$$

$$T_2 = (295.15\ \text{K}) * \left(\frac{100}{200}\right)^{(-0.3/1.3)}$$

$$T_2 = 346.2\ K$$

في العملية البوليتروبية يكون العمل

$$W = \frac{mR}{1-n}(T_2 - T_1) \qquad (kJ)$$

$$W = \frac{(1\ kg) * (0.2869\ kJ/kgK)}{-0.3}[346.2\ K - 295.15\ K]$$

$$W = -48.82\ \ kJ$$

Bassam Badran Damascus University

الإشارة السالبة تدل على أن العمل هو عمل يمارسه المكبس على الغاز وبالتالي هو عمل انضغاط كما هو مفروض.

2) لحساب كمية الحرارة يجب معرفة الطاقة الداخلية أولاً. باعتبار أن الهواء غاز مثالي والحرارة النوعية عند شروط الغرفة نجد أن

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta U = (1\ kg) * (0.718\ kJ/kgK)(346.2\ K - 295.15\ K)$$

$$\Delta U = 36.65\ kJ$$

كمية الحرارة في العملية الأدياباتية هي

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = -48.82\ \ kJ + 36.65\ kJ = -12.17\ kJ$$

أيضاً هنا كمية الحرارة هي سالبة أي أن كمية الحرارة تطرح إلى الخارج مع عملية الانضغاط البوليتروبية.

6.7.4 العملية الدورية.

في بعض الأحيان يكون لدينا مجموعة من العمليات الترموديناميكة التي تشكل دورة ترموديناميكية ما. الدورة الترموديناميكية تعني أننا ننطلق من حالة ابتدائية ما ونعود إليها في نهاية الدورة. القانون الأول في الترموديناميك للدورة الترموديناميكية في الأنظمة المغلقة يتحول إلى

$$Q - W = 0\ ,\quad Q = W \qquad (56\text{-}4)$$

أي أن كمية الحرارة الصافية (مطروحة أو مكتسبة) تساوي العمل الصافي (المبذول أو الذي يقدم) ضمن الدورة. عند دراسة تلك الدورات يجب تفصيل كافة العمليات وحساب

Bassam Badran
Damascus University

كافة البارامترات المتعلقة بأي عملية مولفة لها. يمكن كتابة العلاقة السابقة في العملية الدورية على الشكل

$$\sum_{i=1}^{n} Q = \sum_{i=1}^{n} W$$

تقول العلاقة السابقة أن مجموع كميات الحرارة تساوي مجموع الأعمال ضمن الدورة.

خلاصة العملية الدورية للغاز المثالي مع حرارة نوعية ثابتة

$\Delta U, kJ$	W, kJ	Q, kJ
$\sum \Delta \boldsymbol{U} = \mathbf{0}\ (\boldsymbol{U_2} = \boldsymbol{U_1})$	$W_b = Q$	$W_b = Q$

خلاصة العمليات السابقة لغاز مثالي وبحرارة نوعية ثابتة فقط.

Process	$\Delta U\ (kJ)$	$W = W_b\ (kJ)$	$Q\ (kJ)$
Isochoric	$m\, c_v(T_2 - T_1)$	$\mathbf{0}$	ΔU
Isobaric	$Q - W_b$	$P(V_2 - V_1)$	$m\, c_v(T_2 - T_1)$
	Q	$\mathbf{0}$	$m\, c_P(T_2 - T_1)$
Isothermal	$\mathbf{0}$	$mRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	W_b
Adiabatic	$(-W_b)$	$\frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1)$	$\mathbf{0}$
Polytropic	$m(u_2 - u_1)$	$\frac{1}{1-n}(P_2V_2 - P_1V_1)$	$\Delta U + W_b$
Cyclic	$\mathbf{0}$	$W = Q$	$W = Q$

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 4−18 – دورة ترموديناميكية.

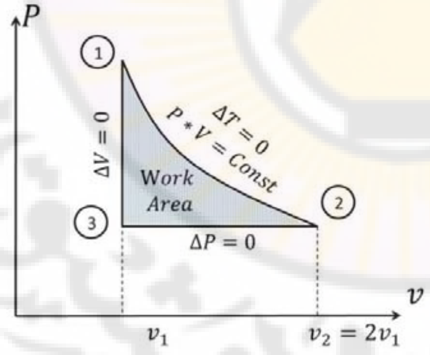
يخضع $(1\,kg)$من غاز الأرغون إلى مجموعة من العمليات الترموديناميكة التي تشكل دورة في نظام أسطوانة – مكبس. الحالة الابتدائية لها البارامترات التالية $(1.4\,MPa)$ وحجم نوعي $(0.06\,m^3/kg)$.

العملية $(1 \rightarrow 2)$ يتمدد الغاز بدرجة حرارة ثابتة بحيث يزداد حجمه إلى الضعف.

العملية $(2 \rightarrow 3)$ يبرد الغاز تحت ضغط ثابت حتى يعود إلى حجمه الأولي.

العملية $(3 \rightarrow 1)$ نضغط الغاز إلى ضغطه الأولي بحجم ثابت.

بفرض أن ثابت غاز الأرغون $(R_{Ar} = 208.11\,J/kgk)$ الحرارة النوعية عند ضغط ثابت $(c_{P,Ar} = 0.52\,kJ/kgK)$ والحرارة النوعية عند حجم ثابت $(c_{v,Ar} = 0.312\,kJ/kgK)$ ارسم الدورة على مخطط $(P - v)$ احسب 1) التغييرات في الطاقة الداخلية لكل عملية وللدورة بالكامل 2) العمل لكل عملية وللدورة و3) كمية الحرارة المتبادلة مع الوسط لكل عملية وللدورة.



الفرضيات: 1) دورة ترموديناميكية 2) تهمل الطاقة الحركية والكامنة في كل عملية والدورة 3) لا توجد أعمال آخرى 4) الأرغون غاز مثالي وكتلته ثابتة.

التحليل: 1) يبن الشكل الدورة الترموديناميكية بعملياتها.

لنجد بارامترات الدورة قبل البدء بحساب الكميات الطاقة الداخلية وكمية الحرارة والعمل في كل العمليات. بارامترات النقطة (1) تحسب من معادلة الحالة لغاز الأرغون. بارامتر درجة حرارة النقطة (1) يعطى من العلاقة

$$T_1 = \frac{P_1 v_1}{R} = \frac{(1400\ kPa) * (0.06\ m^3/kg)}{(0.20811\ kJ/kgk)} = 403.63\ K$$

بارامترات النقطة (2) كالتالي

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} \rightarrow P_2 = P_1 * \frac{V_1}{V_2} = P_1 * \frac{V_1}{2V_1} = \frac{P_1}{2}$$

$$P_2 = 700\ kPa$$

بارامترات النقطة (3) كالتالي

$$T_3 = \frac{P_2 v_3}{R} = \frac{(700\ kPa) * (0.06\ m^3/kg)}{(0.20811\ kJ/kgk)}$$

$$T_3 = 201.83\ K$$

(P)	(v)	(T)	البارامتر
$1400\ kPa$	$0.06\ m^3/kg$	$403.63\ K$	النقطة (1)
$700\ kPa$	$0.12\ m^3/kg$	$403.63\ K$	النقطة (2)
$700\ kPa$	$0.06\ m^3/kg$	$201.83\ K$	النقطة (3)

العملية $(1 \rightarrow 2)$ هي عملية إيزوثرمية ومنها الطاقة الداخلية هي صفر أي

$$\Delta U_{1\rightarrow 2} = 0$$

كمية العمل وكمية الحرارة من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك لهذه العملية متساوية أي

$$Q_{1\rightarrow 2} = W_{1\rightarrow 2}$$

عمل الحدود يعطى من العلاقة

Bassam Badran Damascus University

$$Q_{1\to2} = W_{1\to2} = P_1V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \ (kJ)$$

$$Q_{1\to2} = W_{1\to2} = (1\,kg)(1400\,kPa)(0.06\ m^3/kg)\ \ln\frac{2V_1}{V_1}$$

$$Q_{1\to2} = W_{1\to2} = 58.2\ kJ$$

- العملية (3 → 2) هي عملية إيزوبارية. التغيير في الطاقة الداخلية مع فرض الغاز مثالي والحرارة النوعية ثابتة

$$\Delta U_{2\to3} = mc_{v,Ar}(T_3 - T_2)$$

$$\Delta U_{2\to3} = (1\,kg)(0.312\,kJ/kgK)(201.83K - 403.63K)$$

$$\Delta U_{2\to3} = -62.96\ kJ$$

في العملية الإيزوبارية عمل الحدود هو

$$W_{2\to3} = P_2(V_3 - V_2)$$

$$W_{2\to3} = P_2(V_1 - 2V_1)$$

$$W_{2\to3} = (700\,kPa)(0.06\ m^3/kg)(1-2)$$

$$W_{2\to3} = -42\,kJ$$

كمية الحرارة في العملية (3 → 2) من العلاقة

$$Q_{2\to3} = mc_P(T_3 - T_2)$$

$$Q_{2\to3} = (1\,kg)(0.52\,kJ/kgK)$$

$$(201.83K - 403.63K)$$

$$Q_{2\to3} = -104.94\,kJ$$

تحسب من القانون الأول في الترموديناميك

Bassam Badran
Damascus University

$$Q_{2\rightarrow3} = W_{2\rightarrow3} + \Delta U_{2\rightarrow3}$$

$$Q_{2\rightarrow3} = -42 - 62.96$$

$$Q_{2\rightarrow3} = -\ 104.96\ kJ$$

- العملية ($3 \rightarrow 1$) هي عملية إيزوخورية. التغيير في الطاقة الداخلية مع فرض الغاز مثالي والحرارة النوعية ثابتة

$$\Delta U_{3\rightarrow1} = mc_v(T_1 - T_3)$$

$$\Delta U_{3\rightarrow1} = (1\ kg) * (0.312\ kJ/kgK)(403.63K - 201.83K)$$

$$\Delta U_{3\rightarrow1} = 62.96\ kJ$$

العمل في هذه العملية هو صفر أي

$$W_{3\rightarrow1} = 0$$

كمية الحرارة في هذه العملية هي

$$Q_{3\rightarrow1} = \Delta U_{3\rightarrow1} = \ 62.96\ kJ$$

التغيير في الطاقة الداخلية

$$\Delta U = \Delta U_{1\rightarrow2} + \Delta U_{2\rightarrow3} + \Delta U_{3\rightarrow1}$$

$$\Delta U = 0\ kJ$$

بتطبيق العلاقة للعملية الدورية

$$\sum_{i=1}^{n} Q = \sum_{i=1}^{n} W$$

كمية الحرارة في الدورة

Bassam Badran
Damascus University

$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q = Q_{1\to2} + Q_{2\to3} + Q_{3\to1}$$

$$Q = 58.2 + (-104.96) + 62.96$$

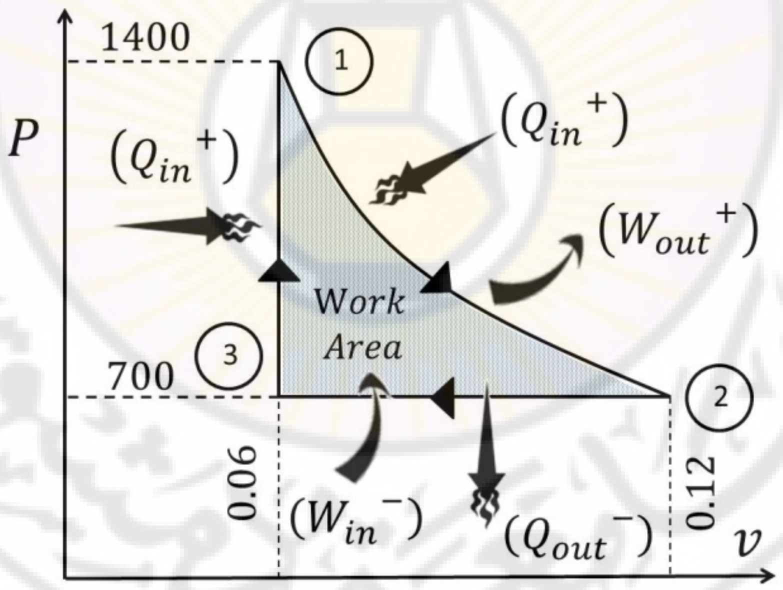
$$Q = 16.2\ kJ$$

العمل في الدورة

$$W = \sum_{i=1}^{n} W = W_{1\to2} + W_{2\to3} + W_{3\to1}$$

$$W = 58.2 + (-42) + 0$$

$$W = 16.2\ kJ$$



الخلاصة هي

Bassam Badran Damascus University

	W	Q	ΔU	القانون الأول $(Q - W = \Delta U)$
$(1 \rightarrow 2)$	$58.2\ kJ$	$58.2\ kJ$	$0\ kJ$	محقق
$(2 \rightarrow 3)$	$-42\ kJ$	$-104.96\ k$	$-62.96\ kJ$	محقق
$(3 \rightarrow 1)$	$0\ kJ$	$62.96\ kJ$	$62.96\ kJ$	محقق
مجموع العمليات (الدورة)	$16.2\ kJ$	$16.2\ kJ$	$0\ kJ$	محقق

مناقشة:

كل عملية في الدورة تحقق القانون الأول في الترموديناميك والدورة نفسها تحقق القانون الأول. نجد أن كمية الحرارة والعمل موجبان في الدورة أي أن الدورة تأخذ حرارة وتقدم عملاً أما التغيير في الطاقة الداخلية فهو غير موجود أي لا تخزين للطاقة ضمن الدورة. كمية الحرارة تعطى إلى الدورة من العملية $(1 \rightarrow 3)$ و $(2 \rightarrow 1)$ ومطروحة في العملية $(3 \rightarrow 2)$ والعمل يقدم في العملية $(2 \rightarrow 1)$ ويبذل في العملية $(3 \rightarrow 2)$.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

ملخص فصل القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة

- من أجل الأنظمة المغلقة تكون معادلة انحفاظ الطاقة

$$(Q+W)_{in}-(Q+W)_{out}=\Delta U+\Delta KE+\Delta PE \quad (kJ)$$

بأخذ عرف الاتجاهات فتسمى معادلة انحفاظ الطاقة بالقانون الأول في الترموديناميك ويأخذ الشكل

$$Q-W=\Delta U \quad (kJ)$$

- العمل في المعادلات السابقة هو

$$W=W_{out}=W_{other}+W_b \quad (kJ)$$

عمل الحدود يحسب من العلاقة

$$W_b=\int_1^2 P\,dV \quad (kJ)$$

- نظام مغلق بحجم ثابت

$$W_b=0$$

- نظام مغلق بحدود متغيرة

عملية إيزوبارية (ضغط ثابت) $W_b=P(V_2-V_1) \quad (kJ)$

الإنتالبي بحسب موليير يحسب من العلاقة

$$H=U+PV \quad (kJ)$$

ويتحول القانون الأول في الترموديناميك باستخدام علاقة موليير إلى الشكل

$$Q-W_{other}=\Delta H \quad (kJ)$$

Bassam Badran
Damascus University

عملية إيزوثرمية لغاز مثالي
$$W_b = mRT\int_1^2 \frac{1}{V}\,dV = mRT * \ln\frac{V_2}{V_1} \quad (kJ)$$

عملية بوليتروبية
(متعدد المراحل)
$P * V^n = const$
$$W_b = \int_1^2 const * V^{-n}\,dV$$
$$= \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \quad (kJ)$$

عملية بوليتروبية بغاز مثالي
$$W_b = mR\frac{T_2 - T_1}{1-n} \quad (kJ)$$

- الحرارة النوعية عند حجم ثابت لغاز مثالي

$$c_v = \left.\frac{du}{dT}\right|_{v=const} = \left.\frac{dq}{dT}\right|_{v=const} \quad (kJ/kg\ K)$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) * dT \quad (kJ/kg)$$

$$c_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v = \frac{3}{2}R \quad (kJ/kg\ K)$$

- الحرارة النوعية عند حجم ضغط لغاز مثالي

$$c_P = \left.\frac{dh}{dT}\right|_{P=const} = \left.\frac{dq}{dT}\right|_{P=const} \quad (kJ/kg\ K)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_P(T) * dT \quad (kJ/kg)$$

$$c_P = \left(\frac{dh}{dT}\right)_P = \frac{5}{2}R \quad (kJ/kg\ K)$$

$$c_P = c_v + R \quad (kJ/kg\ K)$$

Bassam Badran
Damascus University

$$k = \frac{c_P}{c_v}$$

الحرارة النوعية للمواد الصلبة والسائلة

$$c_p = c_v = c$$

- العمليات ضمن الأنظمة المغلقة

عملية إيزوخورية

$$W = W_b = 0 \qquad Q = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

عملية إيزوبارية

$$W = W_b = P(V_2 - V_1) \qquad Q = \Delta H = m(h_2 - h_1)$$

عملية إيزوثرمية

$$W = W_b = mRT \ \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \qquad Q = W$$

عملية أدياباتية

$$W = W_b = \frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1) \qquad Q = 0$$

عملية بوليتروبية

$$W = \frac{1}{1-n}(P_2V_2 - P_1V_1) \quad (kJ) \qquad Q - W = \Delta U$$

عملية دورية

$$Q = W$$

Bassam Badran
Damascus University

خلاصة العمليات لغاز مثالي وبحرارة نوعية ثابتة فقط.

Process	$\Delta U\ (kJ)$	$W = W_b\ (kJ)$	$Q\ (kJ)$
Isochoric	$m\,c_v(T_2 - T_1)$	$\mathbf{0}$	ΔU
Isobaric	$Q - W_b$	$P(V_2 - V_1)$	$m\,c_v(T_2 - T_1)$
	Q	$\mathbf{0}$	$m\,c_P(T_2 - T_1)$
Isothermal	$\mathbf{0}$	$mRT\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	W_b
Adiabatic	$(-W_b)$	$\frac{1}{1-k}(P_2V_2 - P_1V_1)$	$\mathbf{0}$
Polytropic	$m(u_2 - u_1)$	$\frac{1}{1-n}(P_2V_2 - P_1V_1)$	$\Delta U + W_b$
Cyclic	$\mathbf{0}$	$W = Q$	$W = Q$

Bassam Badran Damascus University
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل
القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة

1. تحتوي أسطوانة – مكبس على غاز النتروجين بحجم إبتدائي ($0.07m^3$) بضغط ($130\ kPa$) ودرجة حرارة ($120℃$). يتمدد الغاز وبشكل بوليتروبي إلى الحالة النهائية بضغط ($100\ kPa$) ودرجة حرارة ($100℃$) حدد عمل الحدود نتيجة هذا التغيير.

2. تحتوي أسطوانة – مكبس على بخار الماء بكتلة قدرها ($0.3\ kg$) بضغط ($1000\ kPa$) ودرجة حرارة ($400℃$). نتيجة طرح حرارة إلى الوسطة الخارجي يتحرك المكبس ويتوقف عن الحركة بواسطة نتوء عندما يصل الحجم إلى 60% من الحجم الأولي. حدد العمل الذي يقوم به المكبس عند تبريد البخار إلى 1) ضغط ($1000\ kPa$) ودرجة حرارة ($250℃$) 2) عند ضغط ($1000\ kPa$) وحالة التوقف 3) حدد درجة الحرارة الموافقة للحالة 2.

3. ينضغط غاز من حجمه الإبتدائي ($0.42m^3$) إلى حجم نهائي قدره ($0.12m^3$) ويتغير الضغط تبعاً للعلاقة ($P = aV + b$) حيث أن الثوابت هي ($a = -1200\ kPa/m^3$ و $b = 600\ kPa$). حدد عمل الحدود نتيجة هذا التغيير من خلال 1) رسم العلاقة على مخطط ($P - v$) وحساب المساحة من المخطط و2) بالمكاملة.

4. يحتوي خزان صلب على غاز الفريون ($134A$) بضغط ($P = 160\ kPa$) وكسر جفاف ($\aleph = 40\%$). تعطى الحرارة إلى هذا الخزان فيزداد الضغط إلى ($P = 700\ kPa$). حدد 1) كمية الغاز في الخزان 2) كمية الحرارة المضافة وارسم العملية على مخطط ($P - v$).

5. ينقسم خزان صلب إلى قسمين متساويين بواسطة فاصل متحرك. يحتوي القسم الأول على سائل مضغوط بكتلة قدرها ($2.5\ kg$) وبضغط ($600\ kPa$) ودرجة حرارة ($60℃$). القسم الثاني مفرغ تماماً. نقوم بتحريك الفاصل وبشكل كامل ويتمدد الماء ليملأ

Bassam Badran
Damascus University

الخزان بالكامل. حدد درجة الحرارة النهائية للماء وحجم الخزان بفرض أن الضغط النهائي ($10\ kPa$).

6. تحتوي أسطوانة – مكبس على ($5\ L$) من ماء مشبع بضغط ($175\ kPa$). يخلط الماء بواسطة خلاط كهربائي ويعطي عمل وقدره ($400\ kJ$) ويعطى عمل إضافي بواسطة مقاومة كهربائية يمر فيها تيار قدره ($8A$) خلال ($45\ min$). بفرض أن نصف الماء الموجود تبخر خلال عملية إيزوبارية، حدد فرق الكمون على طرفي المقاومة.

7. هل كمية الحرارة اللازمة لتسخين الهواء من ($295K$) إلى ($305K$) هي نفسها لتسخينه من ($345K$) إلى ($355K$) بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة في كلتا الحالتين.

8. كتلة هواء ثابتة تسخن من ($50°C$) إلى ($80°C$) 1) بحجم ثابت و2) بضغط ثابت. أي من حالتي الطاقة أكبر ولماذا.

9. حدد التغيير في الإنتالبي لغاز النتروجين بالنسبة إلى واحدة الكتل عند تسخينه من ($600K$) إلى ($1000K$) باستخدام 1) حرارة نوعية متغيرة و2) حرارة نوعية متوسطة و3) حرارة نوعية عند درجة حرارة الغرفة ($25°C$).

10. تسخن غرفة بأبعاد ($4 * 5 * 7\ m^3$) بواسطة مشع حراري بخاري يشع إلى الغرفة كمية من الحرارة وقدرها ($10000\ kJ/h$) وتقوم مروحة باستطاعة ($100W$) بتحريك الهواء ضمن الغرفة لضمان توزع حراري منتظم. بفرض أن الحرارة الضائعة من الغرفة تقدر ($5000\ kJ/h$) ودرجة حرارة الغرفة الابتدائية هي ($10°C$) حدد المدة الزمنية اللازمة لرفع درجة حرارة الهواء إلى ($20°C$) بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة.

11. تصنع كرات من النحاس في معمل صناعي للمعادن. مواصفات الكرة النحاسية المنتجة هي قطر ($5cm$) وكثافة ($8522\ kg/m^3$) وحرارة نوعية ($0.385\ kJ/kg°C$). تدخل الكرة النحاسية بدرجة حرارة ($120°C$) إلى حوض ذات درجة حرارة ($50°C$) لتبرد لمدة قدرها ($2min$) وبتدفق ($100\ ball/min$). إذا كانت درجة حرارة الكرة بعد مرورها من الحوض ($74°C$) حدد كمية الحرارة التي يجب أن تزال من الحوض لإبقائه على درجة حرارته.

Bassam Badran
Damascus University

12. يتمدد $(2\ kg)$ من الهواء بعملية بوليتروبية ذات عامل بوليتروبية $(n = 1.1)$ من البارامترات البدائية $(10\ bar, 300°C)$ بحيث يزداد حجمه خمس مرات. أوجد البارامترات النهائية لجسم التشغيل بعد عملية التمدد و2) كمية الحرارة وعمل التمدد وتغير الطاقة الداخلية خلال العملية.

13. يقوم وسيط تشغيل مثالي بعملية بوليتروبية ذات الشكل $(Pv^n = const)$ بين النقطة الأولى $[300kPa, 0.05m^3/kg]$ والنقطة الثانية $[100kPa, 0.15\ m^3/kg]$ ضمن أسطوانة – مكبس حدد 1) العامل البوليتروبي للعملية 2) العمل التي يقوم به الوسيط في هذه العملية و3) كمية واتجاه الحرارة المتبادلة مع الوسط الخارجي.

14. دورة حرارية مغلقة تتألف من الإجراءات التالية. العملية $(1 \to 2)$ هي عملية إيزوخوري حيث بارامترات النقطة (1) هي $(2.5\ MPa, 860°C)$ ودرجة الحرارة في النقطة (2) هي $(90°C)$. العملية $(2 \to 3)$ هي عملية أدياباتية. العملية $(3 \to 1)$ هي عملية إيزوبارية. باعتبار أن الحرارة النوعية تابعة لدرجة الحرارة وبشكل غير خطي وجسم التشغيل يسلك سلوك الهواء حدد 1) الضغط في النقطة (2) و2) احسب كمية الحرارة النوعية في العملية $(3 \to 1)$.

15. إملأ الجدول التالي لنظام مغلق ذي حدود متغيرة يعمل على دورة بغاز مثالي وبفرض أن العمل هو فقط عمل حدود والدورة قابلة للتحقيق.

العملية	نوع العملية	Q	W	ΔU
$(1-2)$	إيزوخورية			10
$(2-3)$	إيزوثرمية	-15		
$(3-4)$	إيزوبارية		5	-3
$(4-1)$	أدياباتية			

16. يخضع غاز مثالي ضمن نظام أسطوانة – مكبس على مجموعة من العمليات. العملية $(1 \to 2)$ بالشكل $(PV = const)$ من $[P_1 = 1\ bar, V_1 = 1.6\ m^3]$ إلى الحالة الثانية $[V_2 = 0.2\ m^3]$ مع العلم بأن $(\Delta U_{1\to2} = 0)$. العملية $(2 \to 3)$ إيزوبارية إلى

$(V_1 = V_3)$. العملية $(1 \rightarrow 3)$ إيزوخورية و$(\Delta U_{3\rightarrow 1} = -3549\ kJ)$. حدد العمل وكمية الحرارة في العملية $(3 \rightarrow 2)$.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الفصل الخامس

Chapter five

القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة

Opened System First Law of Thermodynamics

Bassam Badran
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	سطح مقطع	m^2
dA	التغيير في مقطع السطح	m^2
A_c	سطح مقطع التدفق	m^2
dA_c	التغيير في سطح مقطع التدفق	m^2
c	سرعة الضوء في معادلة أنشتاين	m/s
E	الطاقة الكلية	J
E_{in}	الطاقة الكلية الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
E_{out}	الطاقة الكلية الخارجة إلى نظام عبر حدوده	J
$\dot{E}_{in}$	معدل تغيير الطاقة الداخلية إلى النظام عبر حدوده	W
$\dot{E}_{out}$	معدل تغيير الطاقة الخارجة من النظام عبر حدوده	W
ΔE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية في النظام في عملية ما	J
dE_{system}	التغيير في الطاقة الكلية في النظام في خطوة صعيرة	J
dE_{cv}	التغيير في الطاقة الكلية في النظام المفتوح بخطوة صعيرة	J
e	الطاقة الكلية النوعية	J/kg
F	القوة	N

Bassam Badran
Damascus University

g	تسارع الجاذبية الأرضية	m/s^2
h	الإنتالبي النوعي	J/kg
Δh	التغيير في الإنتالبي النوعي في عملية ما	J/kg
ke	الطاقة الحركية النوعية	J/kg
ΔKE	التغيير في الطاقة الحركية في عملية ما	J
Δke	التغيير في الطاقة الحركية النوعية	J
L	المسافة المقطوعة	m
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/s
$\dot{m}_{in}$	التدفق الكتلي دخولا في النظام	kg/s
$\dot{m}_{out}$	التدفق الكتلي خروجا في النظام	kg/s
m_{in}	الكتلة التي تدخل في النظام	kg
m_{out}	الكتلة التي تخرج من النظام	kg
Δm_{cv}	التغيير في الكتلة داخل حدود النظام	kg
m_{final}	الكتلة النهائية	kg
$m_{initial}$	الكتلة الابتدائية	kg
n	شعاع العامود على السطح	----
P	الضغط	kPa أو bar

Bassam Badran Damascus University

∂P	تفاضل الضغط	kPa أو bar
pe	الطاقة الكامنة النوعية	J/kg
ΔPE	التغيير في الطاقة الكامنة في عملية ما	J
Δpe	التغيير في الطاقة الكامنة النوعية	J
Q	كمية الحرارة	J
ΔQ	التغيير في كمية الحرارة في عملية ما	J
Q_{in}	كمية الحرارة الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
Q_{out}	كمية الحرارة الداخلة من نظام عبر حدوده	J
$\dot{Q}_{in}$	معدل تغيير الحرارة التي تدخل النظام	J/s
$\dot{Q}_{out}$	معدل تغيير الحرارة التي تخرج النظام	J/s
T	درجة الحرارة	K أو $℃$
∂T	تفاضل درجة الحرارة	K أو $℃$
t	الزمن	s
dt	التغيير في الزمن	s
Δt	التغيير في الزمن بين حالة أولى وثانية	s
u	الطاقة الداخلية بالنسبة إلى واحدة الكتل	J/kg
V	الحجم	m^3
$\dot{V}$	التدفق الحجمي	m^3/s

Bassam Badran
Damascus University

V	السرعة	m/s
V_n	السرعة العامودية على سطح ما	m/s
V_{avg}	السرعة الوسطية	m/s
ΔV	التغيير في السرعة	m/s
v	الحجم النوعي	m^3/kg
W	العمل الكلي	J
W_{flow}	عمل التدفق	J
$\dot{W}_{other}$	معدل تغيير الأعمال الآخرى	W
W_{in}	العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	J
W_{out}	العمل الخارج من نظام عبر حدوده	J
$\dot{W}_{in}$	معدل تغيير العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	W
$\dot{W}_{out}$	معدل تغيير العمل الخارج من نظام عبر حدوده	W
$\dot{W}_{shaft}$	معدل تغيير عمل محور الدوران	W
z	الارتفاع بالنسبة إلى مرجعية معينة	m
Δz	تغيير الارتفاع بالنسبة إلى مرجعية معينة	m
ρ	الكثافة	kg/m^3
θ	مجموع الطاقات بالنسبة إلى واحدة الكتل	J/kg

Bassam Badran Damascus University

مقدمة الفصل.

في هذا الفصل سنتحدث عن الأنظمة المفتوحة *Opened Systems* بشكل مفصل باستخدام قانون انحفاظ الطاقة (التوازن الطاقي) وسنستخرج القانون الأول في الترموديناميك لهذه الأنظمة. تسمى الأنظمة المفتوحة بالحجوم المتحكم بها *Control Volume* لإنها تحدد بحجم معين في الفراغ يراد دراسته ويرمز لهذه الأنظمة بالرمز (CV). السطح الذي يحيط بهذا الحجم يسمى بسطح التحكم *Control Surface* ويرمز له (CS). تختلف هذه الأنظمة عن الأنظمة المغلقة بأن تدفقاً كتلياً (حجمياً) يخترق سطح التحكم وبالتالي فالكتلة داخل النظام المفتوح ثابتة ولكنها متجددة. سنتعرف في هذه الأنظمة على علاقة عمل التدفق *Flow Work* الذي يبين الطاقة التي تترافق وتدفق الكتلة دخولاً وخروجاً من النظام. وسندرس أيضا قانون انحفاظ الكتلة *Conservation of Mass* في الأنظمة المفتوحة والذي يعطينا التوازن الكتلي ضمن هذه الأنظمة. سندرس لاحقاً الأنظمة المفتوحة المستقرة *Steady State Processes* لبعض الأجهزة الميكانيكية مثل الأبواق *Diffusers* والنفاثات *Nozzles* والضواغط والعنفات (التوربينات) وأجهزة الحنق *Throttling Devices* وغرف الخلط *Mixing Chamber* والمبادلات الحرارية *Heat Exchangers*. وسنتحدث أخيراً عن الأنظمة غير المستقرة *Unsteady flow Processes* مثل شحن خزانات أو إسطوانات وتفريغها.

<u>الفائدة العلمية من الفصل.</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ وضع معادلة انحفاظ الكتلة للأنظمة المفتوحة.
- ✓ تطبيق معادلة انحفاظ الكتلة في أجهزة مختلفة مستقرة وغير مستقرة.
- ✓ إيجاد قانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة وتطبيقه.
- ✓ التعرف على الطاقة المحمولة إلى داخل الأنظمة المفتوحة والمخترقة لسطح التحكم والتي تساوي مجموع الطاقة الداخلية والحركية والكامنة وطاقة الكتلة (عمل تدفق كتلة).

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ التعرف على طرق حل مسائل التوازن الطاقي لأجهزة ميكانيكية معروفة.
- ✓ تطبيق قانون انحفاظ الطاقة على الأنظمة المفتوحة غير المستقرة وخصوصاً عمليات شحن الخزانات وتفريغها.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

الصفحة

1.5	قانون انحفاظ المادة (الكتلة).	311
2.5	عمل تدفق الكتلة وطاقة جريان سائل.	317
3.5	التحليل الطاقي للأنظمة المستقرة.	321
4.5	أجهزة الجريانات المستقرة الهندسية.	323
1.4.5	الأبواق والنواشر.	324
2.4.5	العنفات والضواغط.	329
3.4.5	صمام الخنق.	334
4.4.5	غرف المزج.	337
5.4.5	المبادلات الحرارية.	340
6.4.5	التدفق في الأنابيب ومجاري الهواء.	343
5.5	التحليل الطاقي للعمليات غير المستقرة.	346
	ملخص الفصل	351
	مسائل غير محلولة	354
	نهاية الفصل	356

Bassam Badran
Damascus University

1.5 قانون انحفاظ المادة (الكتلة) *Conservation of Mass*.

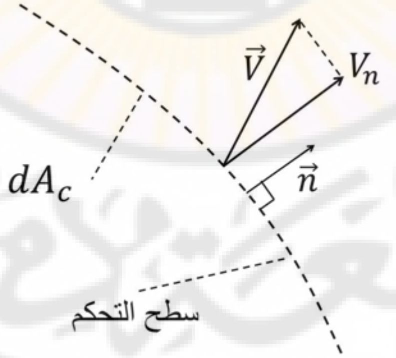
قانون انحفاظ الكتلة هو من أهم القوانين الموجودة في الطبيعة وهو يشبه قانون انحفاظ الطاقة. يقول قانون انحفاظ الكتلة بأن الكتلة لا تولد ولا تفنى إنما تتحول من شكل إلى آخر. عبر العالم إنشتاين بأن الكتلة هي طاقة عندما تتحرك بسرعة الضوء

$$E = m * c^2 \qquad (1\text{-}5)$$

حيث أن سرعة الضوء تساوي $(c = 3 * 10^8\, m/s)$. تسمى كمية المادة (الكتلة) التي تخترق سطح ما خلال فترة زمنية معينة بالتدفق الكتلي *Mass Flow Rate* ويعطى التدفق الرمز $(\dot{m}, kg/s)$. إذا تم تقسيم التدفق الكتلي على الكثافة نحصل على التدفق الحجمي *Volume Flow rate* ويعطى التدفق الحجمي بالرمز $(\dot{V},\, m^3/s)$. تستعمل النقطة فوق البارامتر لنعبر عن معدل تغيير هذا البارامتر مع الزمن *Time Rate of Change*. تعطى معادلة معدل التغيير في تدفق كتلة سائل $(\delta\dot{m})$ عبر سطح ما (dA_c) بالعلاقة

$$\delta\dot{m} = \rho * V_n * dA_c \qquad (2\text{-}5)$$

حيث (ρ) هي كثافة السائل و (V_n) هي السرعة الناظمية على السطح أو مسقط سرعة تدفق السائل على ناظم السطح $(\vec{n})$ كما هو واضح في الشكل $(1-5)$.



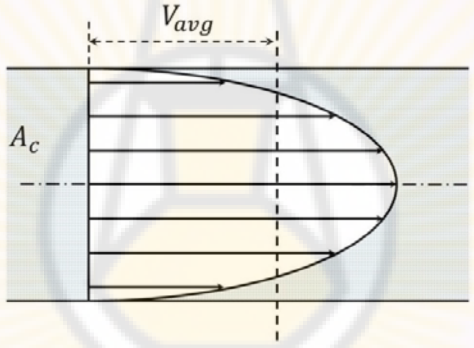
الشكل (5−1) التدفق الكتلي.

Bassam Badran Damascus University

تبين المعادلة (2–5) بأن التدفق الكتلي هو تابع متعلق بالمسار الذي تسلكه الكتلة. بمكاملة (2–5) نحصل على التدفق الكتلي عبر أنبوب أو مجرى هوائي *Duct*

$$\dot{m} = \int \delta \dot{m} = \int \rho * V_n * dA_c \quad (kg/s) \qquad (3\text{-}5)$$

من أجل الحصول على قيمة التدفق الكتلي يجب علينا معرفة علاقة السرعة الناظمية والكثافة مع مساحة السطح. هذه العلاقة في بعض الأحيان قد تكون معقدة وصعبة الحل لذلك نقوم في الدراسات الهندسية بتثبيت الكثافة (وسيط التشغيل غير قابل للانضغاط) ونأخذ السرعة الوسطية للجريان (V_{avg}).



الشكل (2–5) بروفيل السرعة في أنبوب.

يبين الشكل (2–5) بروفيل السرعة في أنبوب ما ذات مقطع (A_c). نلاحظ بأن السرعة تتزايد باتجاه مركز الأنبوب وبشكل قطع مكافئ. قيمة السرعة الوسطية تؤخذ من علاقة تساوي مساحة القطع المكافئ مع مساحة المستطيل المكون من مقطع الأنبوب والسرعة الوسطية

$$V_{avg} * A_c = \int V_n \; dA_c$$

وبالتالي فالسرعة الوسطية تعطى من العلاقة

Bassam Badran
Damascus University

$$V_{avg} = \frac{1}{A_c} \int V_n \; dA_c \;\; (kg/s) \qquad (4\text{-}5)$$

المساحة (A_c) هي المساحة العامودية في اتجاه الجريان وبالتالي فإن التدفق الكتلي والحجمي يعطى بالعلاقة

$$\dot{m} = \rho * V_{avg} * \; A_c \;\; (kg/s)$$

(5-5)

$$\dot{V} = V_{avg} * \; A_c \;\; (m^3/s)$$

يقول قانون انحفاظ المادة (الكتلة) *Conservation of Mass Principle* لنظام مفتوح بأن

"كمية الكتلة المنتقلة من وإلى نظام مفتوح (حجم التحكم) ما خلال فترة زمنية معينة (Δt) يساوي التغيير الصافي في كمية الكتلة داخل حجم التحكم خلال الزمن نفسه"

The net mass transfer to or from a control volume during a time interval (Δt) is equal to the net change (increase or decrease) in the total mass within the control volume during the same time (Δt)

تعطى علاقة قانون انحفاظ الكتلة في الأنظمة المفتوحة بالعلاقة

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{cv} \;\; (kg)$$

حيث $(\Delta m_{cv} = m_{final} - m_{initial})$ هو التغيير في الكتلة داخل حجم التحكم خلال عملية ما. يمكن التعبير أيضاً عن قانون انحفاظ الكتلة على شكل معدل تغيير الكتلة في النظام المفتوح بالشكل

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \;\; (kg/s) \qquad (6\text{-}5)$$

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 5−1 – ماء يجري من أنبوب حديقة.

يراد تعبئة خزان بسعة ($10\ gal$) موجود في حديقة من خلال أنبوب موصول في نهأيته بوق. القطر الداخلي للأنبوب هو ($2\ cm$) ويتناقص إلى ($0.8\ cm$) عند المخرج. إذا كان زمن ملء الخزان ($50\ s$) احسب

1) التدفق الكتلي والحجمي في الأنبوب و

2) السرعة الوسطية للماء عند مخرج الأنبوب.

الفرضيات: 1) الأنبوب مصمت ولا يوجد أي تسرب فية 2) الماء غير قابل للانضغاط 3) الجريان داخل الأنبوب مستقر.

التحليل: 1) لحساب التدفق الكتلي والحجمي نستخدم العلاقة

$$\dot{V} = \frac{V}{\Delta t}$$

$$\dot{V} = \frac{10\ gal}{50\ s} * \left(\frac{3.7854\ L}{1\ gal}\right)$$

$$\dot{V} = 0.757\ \left(\frac{L}{s}\right)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

$$\dot{m} = (1000\ kg/m^3) * \left(\frac{0.757}{1000}\frac{L}{s}\right)$$

$$\dot{m} = 0.757 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

2) السرعة الوسطية تحسب من التدفق الحجمي والكتلي أي

$$\dot{V} = V_{avg} *\ A_{exit}$$

$$V_{avg,exit} = \frac{\dot{V}}{A_{exit}} = \frac{\dot{V}}{\pi * r_e^2}$$

Bassam Badran Damascus University

$$V_{avg,exit} = \frac{0.757\ L/s}{\pi * (0.004\ m)^2}\frac{1m^3}{1000L}$$

$$V_{avg,exit} = 15.1\ \frac{m}{s}$$

سرعة الماء في الأنبوب

$$V_{avg,pipe} = \frac{\dot{V}}{A_{pipe}} = \frac{\dot{V}}{\pi * r_{pipe}^2}$$

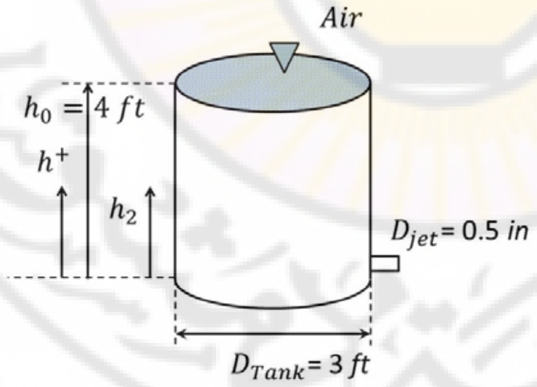
$$V_{avg,pipe} = \frac{0.757\ L/s}{\pi * (0.01\ m)^2}\frac{1m^3}{1000L}$$

$$V_{avg,pipe} = 2.4\ \frac{m}{s}$$

نلاحظ بأن البوق الموجود في نهاية الأنبوب رفع من سرعة الماء بمقدار 6 مرات.

<u>المثال التطبيقي 5–2 – إفراغ ماء من خزان مفتوح إلى الهواء.</u>

خزان أسطواني بارتفاع $(4\ ft)$ وقطر القاعدة $(3\ ft)$ مفتوح من الأعلى. يتم تفريغ الماء من هذا الخزان من فتحة في أسفله بقطر $(0.5\ in)$ وبسرعة وسطية للتفريغ مقدارها $(V = \sqrt{2gh})$ حيث (h) ارتفاع الماء في الخزان و (g) تسارع الجاذبية الأرضية. حدد زمن تفريغ الخزان ليصل إلى الماء إلى ارتفاع $(2\ ft)$ من قاعدة الخزان.



الفرضيات: 1) الخزان مصمت ولا يوجد أي تسرب فيه 2) الماء غير قابل للانضغاط 3) الجريان داخل الأنبوب مستقر 4) تسارع الجاذبية الأرضية هو $32.2\ ft/s^2$.

التحليل: سطح التحكم لحجم التحكم هو سطح الخزان الداخلي. هذا الحجم يتناقص مع تفريغ الخزان وبالتالي فالسطح يتغير مع تغير ارتفاع الماء في الخزان. بتطبيق قانون انحفاظ الكتلة نجد أن

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (kg/s)$$

لا يوجد تدفق دخول أما تدفق الخروج فهو

$$\dot{m}_{out} = (\rho VA)_{out}$$

$$\dot{m}_{out} = \rho * \sqrt{2gh} * A_{jet}$$

$$\dot{m}_{out} = \rho * \sqrt{2gh} * \frac{\pi D_{jet}^2}{4}$$

كتلة حجم التحكم هي

$$m_{cv} = \rho V$$

$$m_{cv} = \rho * A_{tank} * h$$

$$m_{cv} = \rho * \frac{\pi D_{tank}^2}{4} * h$$

بالتعويض نجد أن

$$-\rho * \sqrt{2gh} * \frac{\pi D_{jet}^2}{4} = \frac{d}{dt}\left(\rho * \frac{\pi D_{tank}^2}{4} * h\right)$$

$$-\rho * \sqrt{2gh} * \frac{\pi D_{jet}^2}{4} = \rho * \frac{\pi D_{tank}^2}{4} * \frac{dh}{dt}$$

$$dt = -\frac{D_{tank}^2}{D_{jet}^2} * \frac{dh}{\sqrt{2gh}}$$

Bassam Badran
Damascus University

بالتكامل بين $(h_1 = h_0 = 4\,ft)$ والزمن صفر و $(h_2 = 2\,ft)$ والزمن (t).

$$t = -\frac{D_{tank}^2}{D_{jet}^2\sqrt{2g}}\int_{h_1=h_0}^{h_2}\frac{dh}{\sqrt{h}}$$

$$t = \frac{\sqrt{h_0} - \sqrt{h_2}}{\sqrt{g/2}}\left(\frac{D_{tank}^2}{D_{jet}^2}\right)$$

$$t = \frac{\sqrt{4ft} - \sqrt{2ft}}{\sqrt{32.2ft/2s^2}}\left(\frac{3 * 12\,in}{0.5\,in}\right)^2$$

$$t = 757\,s = 12.6\,min$$

زمن تفريغ الخزان هو 12.6 دقيقة

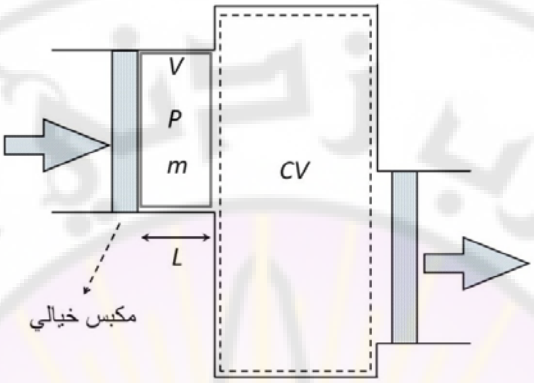
2.5 عمل تدفق الكتلة ***Flow Work*** وطاقة جريان سائل.

تحتاج الكتلة التي تتدفق إلى داخل و/أو خارج النظام المفتوح إلى عمل (طاقة) لدفعها دخولاً و/أو خروجاً منه. تسمى هذه الطاقة الضرورية بعمل التدفق *Flow work* أو طاقة التدفق *Flow Energy*. لحساب عمل التدفق هذا نفترض أن لدينا عنصراً ما بحجم (V) كما في الشكل (3−5) تُدفع إليه كتلة ما بواسطة مكبس تخيلي. القوة التي تمارس على هذا العنصر هي

$$F = PA$$

حيث أن (P) هو الضغط و(A) مساحة مقطع العنصر. العمل الناتج عن هذه القوة عند انتقالها مسافة (L) يسمى عمل التدفق ويعطى بالعلاقة

$$W_{flow} = F * L = PAL = PV \qquad (kJ) \qquad (7\text{-}5)$$



الشكل (3−5) عمل التدفق.

عمل التدفق النوعي

$$w_{flow} = Pv \qquad (kJ/kg) \qquad (8\text{-}5)$$

الطاقة الكلية النوعية لمادة قابلة للانضغاط في نظام مفتوح هي

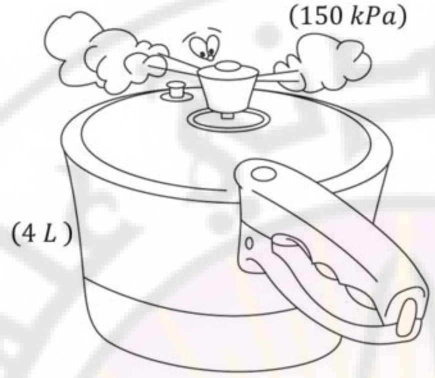
$$\theta = e + Pv = Pv + (u + ke + pe)$$

بالأخذ بتعريف الإنتالبي لموليير نجد أن الطاقة الكلية النوعية في الأنظمة المفتوحة هي

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \qquad (kJ/kg) \qquad (9\text{-}5)$$

المثال التطبيقي 5−3 – الطاقة المنتقلة بالكتلة.

يخرج بخار الماء من ضباخ *pressure cooker* بحجم $(4\,L)$ وبضغط $(150\,kPa)$ ولوحظ بأن حجم السائل ضمن الضباخ انخفضت $(0.6\,L)$ في $(40\,min)$ بعد الوصول إلى حالة الاستقرار. مساحة مقطع خروج البخار $(8\,mm^2)$. حدد 1) تدفق البخار وسرعته و2) الطاقة الكلية وطاقة التدفق للبخار بالنسبة إلى واحدة الكتل و3) كمية الطاقة المغادرة مع البخار من الضباخ.



الفرضيات: 1) التدفق مستقر والفترة الأولى للوصول إلى الاستقرار مهملة 2) البخار والماء مشبعان في كل الأوقات 3) يمكن إهمال الطاقة الحركية والكامنة.

التحليل: 1) بارامترات البخار عند الضغط ($150\ kPa$) تعطى من الجداول بالشكل

$$v_f = 0.001053\, m^3/kg$$

$$v_g = 1.1594\, m^3/kg$$

$$u_g = 2519.2\, kJ/kg$$

$$h_g = 2693.1\, kJ/kg$$

يمكن حساب التدفق للبخار من الفتحة بالشكل

$$m = \frac{\Delta V_{liquid}}{v_f}$$

$$m = \frac{0.6\ L}{0.001053\, m^3/kg} * \frac{1m^3}{1000L}$$

$$m = 0.570\ kg$$

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t}$$

$$\dot{m} = \frac{0.570\ kg}{40 * 60\ s}$$

Bassam Badran Damascus University

$$\dot{m} = 2.37 * 10^{-4} \quad kg/s$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho_g * A_c}$$

$$V = \frac{\dot{m} * v_g}{A_c}$$

$$V = \frac{(2.37 * 10^{-4} \ kg/s)(1.1594\, m^3/kg)}{8 * 10^{-6} \ \ m^2}$$

$$V = 34.3 \ m/s$$

2) الطاقة الكلية وطاقة التدفق تحسب من

$$e_{flow} = Pv = h - u$$

$$e_{flow} = 2693.1 - 2519.2$$

$$e_{flow} = 173.9 \ \ kJ/kg$$

$$\theta = h + ke + pe \cong h_g = 2693.1 \ \ kJ/kg$$

يرجى الانتباه إلى أن الطاقة الحركية في هذه الحالة $(ke = V^2/2 = 0.588\, kJ/kg)$ صغيرة جدا بالمقارنة مع الإنتالبي.

3) كمية الطاقة المغادرة مع البخار من الضباخ تحسب من جداء التدفق مع الطاقة الكلية الخارجة من الضباخ.

$$\dot{E}_{mass} = \dot{m}\theta$$

$$\dot{E}_{mass} = \left(2.37 * 10^{-4} \frac{kg}{s}\right)\left(2693.1 \ \frac{kJ}{kg}\right)$$

$$\dot{E}_{mass} = 0.638 \frac{kJ}{s} = 0.638 \ kW$$

Bassam Badran Damascus University

3.5 التحليل الطاقي للأنظمة المستقرة *Steady Flow System*.

تكتب معادلة التوازن الطاقي العامة لأي نظام على الشكل

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

التغيير في الطاقة خلال فترة زمنية معينة (dt)

$$\frac{E_{in}}{dt} - \frac{E_{out}}{dt} = \frac{dE_{system}}{dt}$$

وتتحول معادلة قانون انحفاظ الطاقة أو التوازن الطاقي للأنظمة المفتوحة إلى الشكل

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{cv}}{dt} \qquad (kW) \qquad (10\text{-}5)$$

الكثير من الأجهزة الهندسية مثل العنفات والضواغط والناشرات تعمل بفترات طويلة تحت الشروط نفسها بعد أن تزول فترة الإقلاع (الشروط العابرة *Transient*) وتسمى بالأجهزة ذات الجريانات المستقرة *Steady State Devices* أما العمليات التي تتم في هذه الأجهزة فتسمى بالعمليات المستقرة *Steady Flow Process*. خلال العمليات المستقرة لا يتغير أي بارامتر داخل النظام المفتوح مع الزمن وتبقى هذه البارامترات ثابتة مع الزمن أي لا يمكن أن يكون هناك أي تغيير في الكتلة داخل النظام المفتوح أي أن قيمة الكتلة الكلية ثابتة $(m_{cv} = const)$ وبالتالي فالتغيير في كتلة النظام المفتوح في العمليات المستقرة معدومة $(dm_{cv}/dt = 0)$. هذا يقضي بأن كمية المادة الداخلة إلى النظام يجب أن تساوي إلى كمية الكتلة الخارجة منه ويمكن كتابة معادلة انحفاظ الكتلة $(5-6)$ لهذه الأنظمة على الشكل

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

بفرض أن سطح التحكم يحتوي على مجموعة من المداخل ومجموعة من المخارج فتصبح المعادلة على الشكل

Bassam Badran
Damascus University

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (kg/s) \qquad (11\text{-}5)$$

أيضا لا يمكن أن يكون هناك أي تغيير في الطاقة الكلية داخل النظام المفتوح أي أن قيمة الطاقة الكلية ثابتة $(E_{cv} = const)$ وبالتالي فالتغيير في طاقة النظام المفتوح في العمليات المستقرة معدومة $(dE_{cv}/dt = 0)$. هذا يقضي بأن كمية الطاقة الكلية الداخلة إلى النظام يجب أن تساوي كمية الطاقة الكلية الخارجة منه ويمكن كتابة معادلة انحفاظ الطاقة (5−10) لهذه الأنظمة على الشكل

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \qquad (kW) \qquad (12\text{-}5)$$

أشكال الطاقة في الأنظمة المفتوحة هي العمل وكمية الحرارة وعمل التدفق. بوضع هذه الطاقات داخل المعادلة (5−12) نجد أن

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}) + \sum_{in} \dot{m}\,\theta = (\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}) + \sum_{out} \dot{m}\,\theta \qquad (13\text{-}5)$$

من المعادلة (5−9) الطاقة الداخلية في النظام المفتوح مضافاً إليها عمل تدفق الكتلة هي

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \qquad (kJ/kg)$$

العمل هنا أصبح فقط الأعمال الآخرى المضافة إلى النظام لإنه تم إضافة عمل التدفق إلى الطاقة الداخلية للنظام. بتعويض الطاقة الداخلية في النظام إلى المعادلة (5−13) نجد أن المعادلة انحفاظ الطاقة للأنظمة المفتوحة المستقرة هي

Bassam Badran
Damascus University

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = (\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW) \qquad (14\text{-}5)$$

بتطبيق عرف الاتجاهات نحصل على القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة المستقرة

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) - \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW) \qquad (15\text{-}5)$$

وبإهمال الطاقة الحركية والكامنة يمكن الحصول على الشكل المبسط للقانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة المستقرة

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \sum_{out} \dot{m}\,(h) + \sum_{in} \dot{m}\,(h) \quad (kW) \qquad (16\text{-}5)$$

إذا فرضنا بأن هذا النظام المفتوح والمستقر يحتوي على مدخل واحد ومخرج واحد فإن التدفق يكون ثابتاً. بتعويض الفرضية السابقة في المعادلة $(5-16)$ نحصل على الشكل

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \dot{m} * (h_{out} - h_{in}) \qquad (kW) \qquad (17\text{-}5)$$

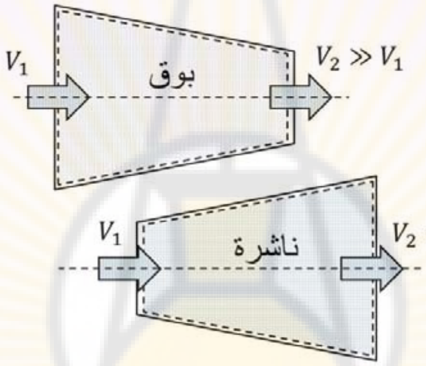
4.5 أجهزة الجريانات المستقرة الهندسية.

هناك مجموعة من الأجهزة الهندسية التي تعمل باستقرار وديمومة مثل الغنفات الغازية والبخارية التي تولد الطاقة الكهربائية. في هذا القسم سوف نقوم بسرد بعض من هذه الأجهزة وسنضع المعادلات الرياضية الخاصة بها.

Bassam Badran
Damascus University

1.4.5 الأبواق Nozzles والنواشر Diffusers.

تستخدم الأبواق والنواشر في المحركات النفاثة والصواريخ والمركبات الفضائية. البوق هو عبارة عن جهاز يسرع السائل على حساب الضغط (تحويل الضغط الستاتيكي إلى ضغط ميكانيكي وبالتالي زيادة السرعة) وتتناقص فية مساحة المقطع باتجاه الجريان بعكس الناشرة التي تخفض حركة السائل على حساب الضغط وتتزايد فيه مساحة المقطع باتجاه الجريان.



الشكل (4–5) بوق وناشرة

يبين الشكل (4–5) شكل الناشرة والبوق. كمية الحرارة المتبادلة بين البوق أو الناشرة والمحيط هي صغيرة جداً لأن السائل لا يبقى فترة طويلة داخل البوق أو الناشرة بسبب سرعته العالية. لا يوجد أيضاً أعمال آخرى في البوق أو الناشرة ويمكن إهمال الطاقة الكامنة. الطاقة الوحيدة التي يمكن أن نأخذها بعين الاعتبار هي الطاقة الحركية. هنا أيضاً التدفق ثابت على طول القناة. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد أعمال آخرى ($\dot{W}_{other} = 0$).

ii. لا يوجد تبادل حراري بين القناة والوسط الخارجي أي أن الجريان أدياباتي ($\dot{Q}_{in} = 0$).

iii. لا يوجد طاقة كامنة ($\Delta z = 0$).

iv. التدفق ثابت ($\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m}$)

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

$$\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} = 0 \quad (kW) \qquad (18\text{-}5)$$

تشير المعادلة السابقة بأن هناك تناسباً عكسياً بين الطاقة الحركية (طاقة ميكانيكية) والطاقة الحرارية للأبواق والنواشر. الزيادة في الطاقة الحركية ($\Delta V^2 = V_2^2 - V_1^2 > 0$) وبالتالي السرعة في الأبواق (تناقص المقطع أي زيادة في السرعة عند تدفق ثابت) يؤدي إلى تناقص في الإنتالبي ($\Delta h = h_2 - h_1 < 0$) والعكس صحيح. هنا يجب التذكير بأن الكثافة ثابتة لاتتغير.

<u>المثال التطبيقي 5–4 – تباطؤ الهواء في ناشرة.</u>

يدخل هواء إلى ناشرة محرك نفاث بدرجة حرارة ($10°C$) وبضغط ($80\ kPa$) وبسرعة ($200\ m/s$) وبشكل مستقر. مساحة الدخول هي ($0.4\ m^2$). يخرج الهواء من الناشرة بسرع مهملة بالمقارنة مع سرع الدخول. حدد 1) التدفق الكتلي للهواء و2) درجة حرارة خروج الهواء من الناشرة.

الفرضيات: 1) التدفق مستقر ولا تغيير في الكتلة داخل الناشرة 2) الهواء غاز مثالي 3) يمكن إهمال الطاقة الكامنة 4) لاتبادل للطاقة بين الناشرة والمحيط 5) الطاقة الحركية عند المخرج مهملة 6) لا عمل.

التحليل: 1) بتطبيق قانون انحفاظ الكتلة نجد أن تدفق الدخول يساوي تدفق الخروج

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1 = \dot{m}$$

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \frac{V_1 A_1}{v_1}$$

الحجم النوعي يعطى من معادلة الغاز المثالي

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

$$v_1 = \frac{0.287\ kJ/kg\ K * 283\ K}{80\ kPa}$$

$$v_1 = 1.015\ m^3/kg$$

بالتعويض نجد أن

$$\dot{m} = \frac{(200\ m/s)(0.4m^2)}{1.015\ m^3/kg}$$

$$\dot{m} = 78.8\ kg/s$$

هذا التدفق ثابت على طول الناشرة.

2) في شروط الاستقرار وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

التغير في الطاقة داخل حجم التحكم في العمليات المستقرة معدوم وتتحول المعادلة إلى

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

أو من الشكل

$$\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2}\right) = \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2}\right)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

$$h_1 = h_{@283\ k} = 283.14\ kJ/kg$$

$$h_2 = 283.14\ \frac{kJ}{kg} - \frac{0 - \left(200 \frac{m}{s}\right)^2}{2}$$

Bassam Badran Damascus University

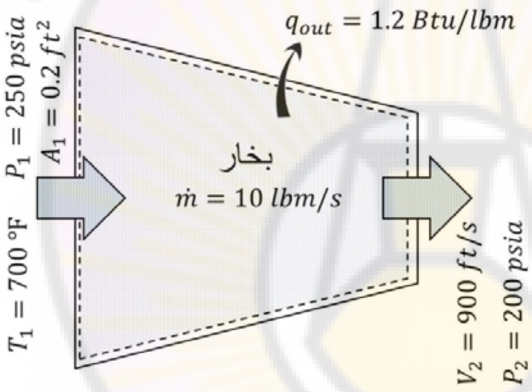
$$h_2 = 303.14\ \frac{kJ}{kg}$$

من جداول الهواء وبالبحث عن قيمة قريبة من قيمة الإنتالبي النهائي نجد أن

$$T_2 = 303\ K$$

مناقشة: نرى أن درجة حرارة الهواء ترتفع بمعدل 20 درجة مئوية عندما تنخفض سرعة الهواء خروجاً من الناشرة وهو سبب تحول الطاقة الحركية إلى طاقة داخلية.

المثال التطبيقي 5–5 – تسارع البخار في بوق.



يدخل بخار وبشكل مستقر إلى بوق بدرجة حرارة (700°F) وبضغط $(250\ psia)$. مساحة مقطع الدخول هي $(0.2 ft^2)$. تدفق البخار $(10\ lbm/s)$. يخرج البخار من البوق بضغط $(200\ psia)$ وسرعة $(900\ ft/s)$. كمية الحرارة المتبادلة بين البوق والمحيط $(1.2\ Btu/lbm)$. حدد 1) سرعة دخول البخار و2) درجة حرارة خروج البخار.

الفرضيات: 1) التدفق مستقر ولا تغيير في الكتلة داخل الناشرة 2) يمكن إهمال الطاقة الكامنة 3) لا عمل.

التحليل: 1) بتطبيق قانون انحفاظ الكتلة نجد أن تدفق الدخول يساوي تدفق الخروج

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1 = \dot{m}$$

من بارامترات البخار عند الدخول ومن جداول البخار والماء نجد أن

$$v_1 = 2.6883\, ft^3/lbm\,;\; h_1 = 1371.4\, Btu/lbm$$

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \frac{V_1 A_1}{v_1}$$

بالتعويض نجد أن

$$10\ \text{lbm/s} = \frac{V_1 (0.2 ft^2)}{2.6883\, ft^3/lbm}$$

$$V_1 = 134.4\, ft/s$$

2) في شروط الاستقرار وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

التغيير داخل حجم التحكم في العمليات المستقرة معدوم وتتحول المعادلة إلى

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

أو من الشكل

$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2}\right) = \dot{Q}_{out} + \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2}\right)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} - \dot{q}_{out}$$

$$h_2 = (1371.4 - 1.2)\frac{Btu}{lbm} - \left(\frac{(900\ \ ft/s)^2 - (134.4\, ft/s)^2}{2}\right) * \frac{1\, Btu/lbm}{25.037\, ft^2/s^2}$$

$$h_2 = 1354.4\, Btu/lbm$$

من جداول البخار ومن الضغط $(200\, psia)$ والإنتالبي المحسوب سابقاً نجد أن

$$T_2 = 662\ {}^\circ\text{F}$$

مناقشة:

Bassam Badran Damascus University

نرى أن درجة حرارة البخار انخفضت إلى 38 درجة فهرنهايت في البوق وتحول جزء من الطاقة الداخلية إلى طاقة الحركية.

2.4.5 العنفات ***Turbines*** والضواغط ***Compressors***.

تستخدم العنفات في المحطات البخارية والغازية والهيدومائية في توليد الطاقة الكهربائية (إنتاج عمل *Power Output*). عندما يمر وسيط التشغيل ضمن ريش العنفة تبدأ العنفة بالدوران وتحول الطاقة الحركية إلى عمل مفيد (طاقة كهربائية). تعمل الضواغط و المضخات و المراوح على رفع ضغط وسيط التشغيل نتيجة تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية (إعطاء عمل *Power Input*) تعطى إلى وسيط التشغيل. تهمل كمية الحرارة المتبادلة بين العنفات أو الضواغط والوسط المحيط بسبب عزلها عن الوسط الخارجي كما وتهمل الطاقة الكامنة في هذه الأجهزة. في أغلب الأحيان تهمل الطاقة الحركية أيضاً لأنها صغيرة بالنسبة إلى التغيير في الإنتالبي بين الدخول والخروج. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد تبادل حراري بين القناة والوسط الخارجي أي ان الجريان أدياباتي $(\dot{Q}_{in} = 0)$.

ii. لا توجد طاقة كامنة $(\Delta z = 0)$.

iii. التدفق ثابت $(\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m})$

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

$$\dot{W}_{shaft} = -\dot{m} * \left(\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2}\right) \quad (kW) \qquad (19\text{-}5)$$

- في حالة التوربين أو العنفة ومع إهمال التغيير في الطاقة الحركية $(\Delta V = 0)$ يكون التغيير في الطاقة الحرارية أصغر من الصفر $(\Delta h = h_2 - h_1 < 0)$ فيكون عمل

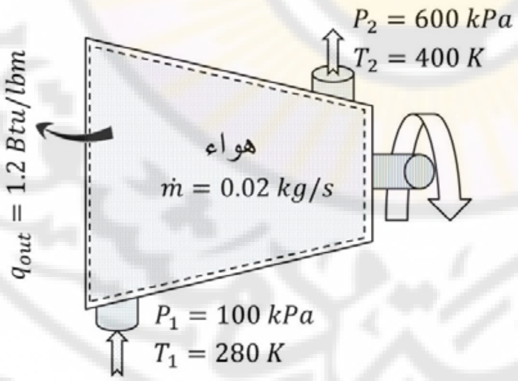
محور الدوران أكبر من الصفر ($\dot{W}_{shaft} > 0$) أي أن العنفة **تعطي** عملاً إلى الوسط. يتحول هذا العمل في النهاية إلى طاقة كهربائية.

- في حالة الضاغط ومع إهمال التغيير في الطاقة الحركية ($\Delta V = 0$) يكون التغيير في الطاقة الحرارية ($\Delta h = h_2 - h_1 > 0$) لإنه يتم في الضاغط رفع ضغط وسيط التشغيل فيكون عمل المحور ($\dot{W}_{shaft} > 0$) أي أن الضاغط **يحتاج** عملاً من الوسط لرفع الضغط. تتحول الطاقة الكهربائية (محرك كهربائي) المقدمة إلى الضاغط إلى طاقة ميكانيكية (ضغط).

يجب الانتباه إلى أن التغير في الطاقة الحركية لا يعني أن السرعة مهملة ولكن يعني أن الفرق بين الحالة النهائية والبدائية مهملة.

المثال التطبيقي 5–6 – ضغط هواء في ضاغط.

ينضغط هواء في ضاغط بدرجة حرارة ($280K$) وبضغط ($100kPa$) إلى ضغط ($600kPa$) ودرجة حرارة ($400K$). تدفق الهواء في الضاغط هو ($0.02\ kg/s$). كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي هي ($16\ kJ/kg$). بفرض أن الطاقة الحركية والكامنة مهملة حدد الطاقة المصروفة على الضاغط لتحقيق الضغط النهائي.



الفرضيات: 1) التدفق مستقر ولا تغيير في الكتلة داخل العنفة 2) الهواء غاز مثالي 3) يمكن إهمال الطاقة الكامنة والحركية.

التحليل: بتطبيق قانون انحفاظ الكتلة نجد أن تدفق الدخول يساوي تدفق الخروج

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1 = \dot{m}$$

في شروط الاستقرار وبتطبيق قانون انحفاظ

الطاقة نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

التغيير داخل حجم التحكم في العمليات المستقرة معدوم وتتحول المعادلة إلى

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

أو من الشكل

$$\dot{W}_{in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}\, q_{out} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

إنتالبي الهواء عند درجات حرارة الدخول والخروج

$$h_1 = h_{@280\,K} = 280.13\ kJ/kg$$

$$h_2 = h_{@400\,K} = 400.98\ kJ/kg$$

بالتعويض في معادلة التوازن الطاقي

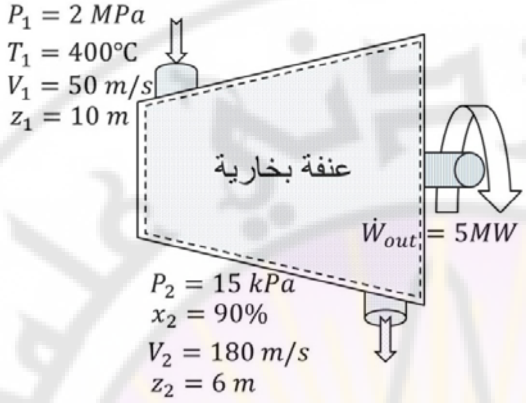
$$\dot{W}_{in} = \left(0.02\frac{kg}{s}\right)(16\ kJ/kg) + \left(0.02\frac{kg}{s}\right)(400.98 - 280.13\ kJ/kg)$$

$$\dot{W}_{in} = 0.32 + 2.417 = 2.737\ kW$$

<u>المثال التطبيقي 5-7 – توليد الطاقة من عنفة بخارية.</u>

الطاقة المستخرجة من عنفة بخارية أدياباتية هي $(5MW)$ وشروط الدخول والخروج معطاة بالشكل المرافق. 1) قارن بين طاقة الإنتالبي والحركية والكامنة و2) حدد العمل النوعي للبخار المار من العنفة و3) حدد تدفق البخار ضمن العنفة.

Bassam Badran
Damascus University



الفرضيات: 1) التدفق مستقر ولا تغيير في الكتلة داخل العنفة 2) العنفة أدياباتية أي لا يوجد تبادل حرارة مع الوسط الخارجي.

التحليل: 1) من دخول الشروط والتي هي

$$P_1 = 2\ MPa, T_1 = 400°C$$

$$h_1 = 3248.4\ kJ/kg$$

البخار الخارج من العنفة هو مزيج بخار+ماء لأن كسر الجفاف هو 90% وبالتالي من جداول الإشباع بدلالة الضغط نأخذ

$$h_f = 225.94\ kJ/kg$$

$$h_g = 2372.3\ kJ/kg$$

$$h_2 = h_f + \aleph(h_g - h_f) = h_f + \aleph h_{fg}$$

$$h_2 = [225.94 + 0.9(2372.3)]$$

$$h_2 = 2361.01\ kJ/kg$$

وبالتالي

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 2361.01 - 3248.4$$

$$\Delta h = -887.39\ kJ/kg$$

$$\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta ke = \frac{(180\, m/s)^2 - (50\, m/s)^2}{2} * \frac{1\, kJ/kg}{1000 m^2/s^2}$$

$$\Delta ke = 14.95\, kJ/kg$$

$$\Delta pe = g(z_2 - z_1)$$

$$\Delta pe = (9.81\, m/s^2)(6 - 10)m * \frac{1kJ/kg}{1000 m^2/s^2}$$

$$\Delta pe = -0.04\, kJ/kg$$

2) في شروط الاستقرار وبتطبيق قانون انحفاظ الطاقة نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

التغيير داخل حجم التحكم في العمليات المستقرة معدوم وتتحول المعادلة إلى

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) = \dot{W}_{out} + \dot{m}\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right)$$

بالتعويض في معادلة التوازن الطاقي

$$w_{out} = -\left\{(h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right\}$$

$$w_{out} = -(\Delta h + \Delta ke + \Delta pe)$$

$$w_{out} = +887.39 - 14.95 + 0.04$$

$$w_{out} = 872.48\, kJ/kg$$

3) التدفق هو

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{out}}{w_{out}}$$

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{m} = \frac{5000\ kJ/s}{872.48\ kJ/kg} = 5.73\ kg/s$$

3.4.5 صمام الخنق *Throttling Valves*.

صمامات الخنق هي أجهزة محددة للجريان *Flow Restricting Devices* وتسبب انخفاضاً في ضغط السائل المار فيها ويترافق مع انخفاض الضغط انخفاض كبير في درجة الحرارة لذلك يستعمل هذا النوع من الصمامات في أجهزة التبريد والتكييف. الصمامات العيارية *Adjustable Valves* والأنابيب الشعرية *Capillary Tubes* و صمامات النفوذية *Porous Plugs* هي أمثلة عن صمامات الخنق. ظاهرة انخفاض درجة الحرارة (وفي بعض الأحيان ارتفاع درجة الحرارة) في صمامات الحنق تسمى بمعامل جول – طومسون *Joule-Thomson Coefficient* والذي يعطى بالعلاقة

$$\mu_{JT} = \frac{\partial T}{\partial P} \qquad (20\text{-}5)$$

صمامات الخنق هي بالعادة صغيرة ويمكن اعتبار أن تبادل الحرارة مع الوسط الخارجي مهمل أي أن هذه الأجهزة أدياباتية أيضاً يمكن أن نعد أن العمل مهمل والطاقة الحركية والكامنة مهملة. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد أعمال آخرى $(\dot{W}_{other} = 0)$.

ii. لا يوجد تبادل حراري بين القناة والوسط الخارجي أي ان الجريان أدياباتي $(\dot{Q}_{in} = 0)$.

iii. لا يوجد طاقة كامنة $(\Delta z = 0)$.

iv. لا يوجد طاقة حركية $(\Delta V = 0)$

v. التدفق ثابت $(\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m})$

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

Bassam Badran Damascus University

$$\Delta h = 0 \quad (kW)$$

اي أن

$$h_1 \cong h_2 = constant \qquad (21\text{-}5)$$

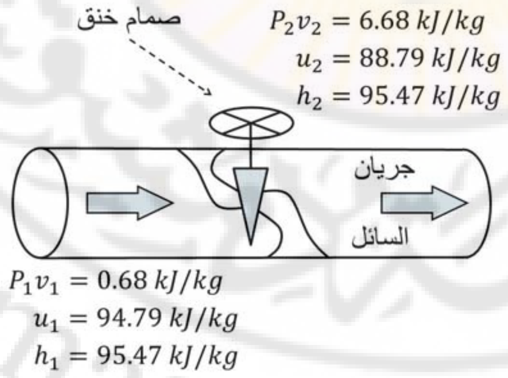
من العلاقة (21−5) نجد أن الإنتالبي (المحتوى الطاقي) ثابت بين الدخول والخروج من أجهزة الخنق. يمكن أن نعد هذه الأجهزة أيزوإنتالبية *Isenthalpic Devices*. بأخذ تعريف الإنتالبي الذي يساوي في الأنظمة المفتوحة الطاقة الداخلية مضافاً إليها عمل التدفق نرى أن

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

نلاحظ بأن زيادة عمل التدفق $(P_2 v_2 > P_1 v_1)$ في صمام الخنق سيكون على حساب نقصان الطاقة الداخلية وبالتالي انخفاض درجة حرارة السائل المار بصمام الحنق وعند انخفاض عمل التدفق سيكون على حساب زيادة في الطاقة الداخلية وبالتالي ارتفاع في درجة حرارة السائل الماء بالصمام.

<u>المثال التطبيقي 5−8 – تمدد غاز $(134A)$ في البراد.</u>

يدخل وسيط التبريد $(134A)$ إلى أنبوب شعري في براد على شكل سائل مشبع بضغط $(0.8\ MPa)$ ويخنق إلى ضغط $(0.12\ MPa)$. حدد 1) كسر الجفاف للوسيط بعد خروجه من الأنبوب و2) درجة الحرارة النهائية والتغيير في درجة الحرارة خلال هذه العملية.



الفرضيات: 1) لا يوجد تبادل حراري بين الأنبوب والوسط الخارجي 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: 1) من جداول الإشباع بدلالة الضغط وسائل مشبع نجد بارامترات دخول وسيط التشغيل إلى الأنبوب الشعري

$$P_1 = 0.8\ MPa,\quad \text{سائل مشبع}$$

$$T_1 = T_{sat@0.8\ MPa} = 31.31℃$$

$$h_1 = h_{f@0.8\ MPa} = 95.47\ \frac{kJ}{kg}$$

حالة الخروج وسيط التشغيل في الأنبوب الشعري

$$P_2 = 0.12\ MPa,\ \ h_1 = h_2$$

$$T_{sat} = -22.32℃$$

$$h_{f@0.12\ MPa} = 22.49\ \ kJ/kg$$

$$h_{g@0.12\ MPa} = 236.97\ \ kJ/kg$$

الملاحظ بأن الإنتالبي $\left(h_{f@0.12\ MPa} < h_2 < h_{g@0.12\ MPa}\right)$ أي أن الوسيط الخارج من الأنبوب الشعري هو مزيج بين سائل وبخار. يمكن تحديد كسر الجفاف من العلاقة

$$h_2 = h_f + \aleph\left(h_g - h_f\right) = h_f + \aleph h_{fg}$$

$$\aleph_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_g - h_f}$$

$$\aleph_2 = \frac{95.47 - 22.49}{236.97 - 22.49}$$

$$\aleph_2 = 0.34 = 34\%$$

Bassam Badran
Damascus University

2) ضغط المزيج هو $(0.12\ MPa)$ ودرجة حرارة الإشباع لهذا الضغط هي $(-22.32℃)$ وبالتالي فإن الفرق في درجات الحرارة

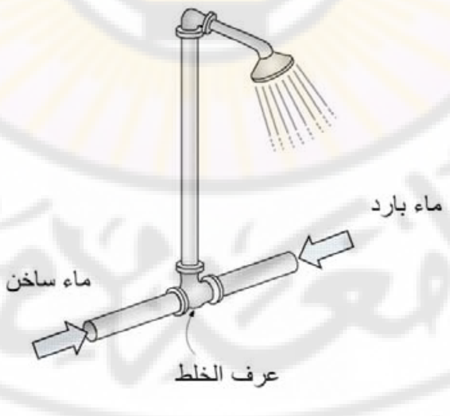
$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta T = -22.32 - 31.31 = -53.63℃$$

مناقشة: نلاحظ بأن درجة حرارة وسيط التشغيل انخفضت إلى $(-53.63℃)$ خلال عملية الحنق و34% من السائل تحول إلى بخار خلال هذه العملية أيضاً لتخفيض درجة الحرارة المذكورة سابقاً.

4.4.5 غرف المزج *Mixing Chambers*.

نقوم في غرف المزج على خلط وسيطين بدرجات حرارة مختلفة أو بشروط مختلفة للحصول على خليط بمواصفات معينة. غرف المزج هي عبارة عن أكواع مثل الكوع (T) كما في الشكل (5-5) أو غرف مزج مفتوحة كبيرة *Open Feedwater Chambers* في المحطات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية.



الشكل (5-5) غرف المزج.

قانون انحفاظ الكتلة والطاقة في عرف المزج يقول إن مجموع الكتل أو الطاقة الداخلة إلى الغرفة يساوي الكتلة أو الطاقة الخارجة من الغرفة. يمكن إهمال الطاقة المتبادلة بين الغرفة والوسط الخارجي ولا يوجد عمل والطاقة الحركية والكامنة مهملة. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد أعمال آخرى $(\dot{W}_{other} = 0)$.

ii. لا يوجد تبادل حراري نتيجة حركة السائل أي أن الجريان أدياباتي $(\dot{Q}_{in} = 0)$.

iii. لا توجد طاقة كامنة $(\Delta z = 0)$.

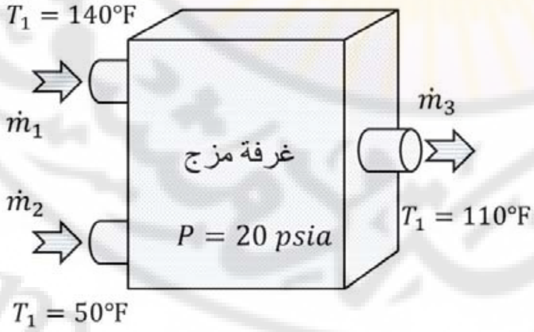
iv. لا توجد طاقة حركية $(\Delta V = 0)$ عندما يكون مقطع الخروج يساوي مجموع مقطعي الدخول.

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

$$\dot{m}_{out} * \Delta h_{out} - \sum \dot{m}_{in} * \Delta h_{in} = 0 \quad (kW) \qquad (22\text{-}5)$$

هنا لدينا مجموع من نقاط الدخول إلى النظام ومخرج واحد.

<u>المثال التطبيقي 5–9 – خلط ماء بارد وماء ساخن عند الاستحمام.</u>



يدخل ماء ساخن بدرجة حرارة (140 °F) ويختلط مع ماء بارد بدرجة حرارة (50°F) إذا كانت درجة حرارة الماء الخلط المطلوبة هي (110°F) حدد نسبة تدفق الماء الساخن إلى البارد باعتبار أن كمية الحرارة الضائعة من غرفة الخلط مهملة والخلط يتم عند ضغط $(20\ psia)$.

Bassam Badran
Damascus University

الفرضيات: 1) الجريان مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) ولا يوجد تبادل حراري وعمل.

التحليل: 1) من قانون انحفاظ الكتلة مع فرض أن الجريان مستقر

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{system}/dt$$

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

من قانون انخفاض الطاقة (التوازن الطاقي) نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\rightarrow \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

قانون انحفاظ الكتلة وبالتعويض في قانون انحفاظ الطاقة

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

بالتقسيم على $(\dot{m}_2)$ نجد

$$y h_1 + h_2 = (y + 1) h_3$$

حيث $(y = \dot{m}_1/\dot{m}_2)$ هي النسبة المطلوبة درجة حرارة الإشباع عند الضغط $(20\ psia)$ ومن جداول الإشباع بدلالة الضغط هي $(227.92°\mathrm{F})$ وبما أن درجة حرارة الماء بكافة نقاطه أقل من درجة حرارة الإشباع فيكون الماء بحالة مضغوطه *Compressed liquid* ومن جداول الإشباع نجد أن

$$h_1 = h_{f@140°\mathrm{F}} = 107.99\ Btu/lbm$$

$$h_2 = h_{f@50°\mathrm{F}} = 18.07\ Btu/lbm$$

$$h_3 = h_{f@110°\mathrm{F}} = 78.02\ Btu/lbm$$

Bassam Badran
Damascus University

بالتعويض نجد

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3}$$

$$y = \frac{78.02 - 18.07}{107.99 - 78.02}$$

$$y = 2$$

أي أن كمية الماء الساخنة يجب أن تكون ضعفي كمية الماء البارد لكي يخرج الماء بدرجة حرارة (110°F).

5.4.5 المبادلات الحرارية ***Heat Exchangers***.

المبادلات الحرارية هي أجهزة تقوم على مبادلة الحرارة بين وسيطين مختلفين من دون مزج بعكس ماذكر عن عرف المزج. أبسط شكل من أشكال المبادلات الحرارية هو أنبوب مزدوج *Double tube* أو يسمى خلية وأنبوب *Shell and tube*. يتألف هذا المبادل من مجموعة من الأنابيب الداخلية تسمى *Tube* وأنبوب ذو قطر كبير يحيط بهذه المجموعة من الأنابيب ويسمى الخلية *Shell*. السائل الأول يجري في الأنابيب الداخلية والسائل الآخر يحيط بالأنابيب الحاملة للسائل الأول. تنتقل الحرارة من السائل الساخن إلى السائل البارد عبر جدران الأنابيب من دون مزج. في المبادلات الحرارية تدفق الوسيط الأول والثاني ثابت ولا يوجد تبادل حراري مع الوسط الخارجي ولا يوجد عمل في هذا النظام أيضا يمكن إهمال الطاقة الحركية والكامنة في هذه الأجهزة. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد أعمال آخرى ($\dot{W}_{other} = 0$).

ii. لا توجد طاقة كامنة ($\Delta z = 0$).

iii. لا توجد طاقة حركية ($\Delta V = 0$)

Bassam Badran
Damascus University

iv. التدفق ثابت $(\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m})$

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta h \quad (kW) \qquad (23\text{-}5)$$

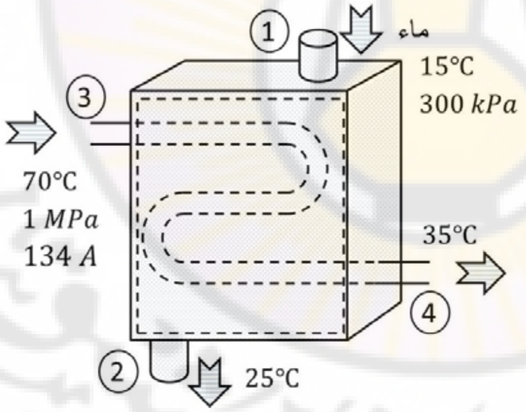
يتم التبادل الحراري بين الوسطين (من دون مزج) هو

$$\dot{Q}_{cold} = -\dot{Q}_{hot}$$

$$\dot{m}_{cold} * \Delta h_{cold} = -\dot{m}_{hot} * \Delta h_{hot}$$

المثال التطبيقي 5–10 – تبريد الوسيط 134A بواسطة مبادل المائي.

يدخل وسيط $(134A)$ بدرجة حرارة $(70°C)$ وبضغط $(1\ MPa)$ وتدفق $(6\ kg/min)$ إلى مكثف (مبادل حراري) ويخرج بدرجة حرارة $(35°C)$ ليبرد بواسطة ماء بدرجة حرارة $(15°C)$ وبضغط $(300\ kPa)$ ويخرج بدرجة حرارة $(25°C)$. بإهمال انخفاض الضغط في الأنابيب حدد 1) تدفق الماء المطلوب و2) كمية الحرارة المتبادلة بين الوسيطين.



الفرضيات: 1) الجريان مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) ولا يوجد تبادل حراري وعمل.

التحليل: 1) من قانون انحفاظ الكتلة مع فرض أن الجريان مستقر

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{system}/dt$$

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_w$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_R$$

من قانون انخفاض الطاقة (التوازن الطاقي) نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4$$

$$\dot{m}_w (h_1 - h_2) = \dot{m}_w (h_4 - h_3)$$

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_w (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_2)}$$

نريد أن نحدد إنتالبي الدخول والخروج لكل من الماء والوسيط ($134A$).

الماء عند ضغط ($300\ kPa$) تكون درجة حرارة إشباعه (133.52℃) ومن جداول الإشباع بدلالة الضغط وهي أكبر من درجات حرارة دخول وخروج الماء وبالتالي فإن الماء هو مضغوط.

$$h_1 = h_{f@15℃} = 62.982\ kJ/kg$$

$$h_2 = h_{f@25℃} = 104.83\ kJ/kg$$

الوسيط (134A) وعند الضغط ($1\ MPa$) يدخل محمص ويخرج سائلاً مضغوطاً.

$$P_3 = 1\ MPa\ , \qquad T_3 = 70℃$$

$$h_3 = 303.85\ kJ/kg$$

$$P_4 = 1\ MPa\ , \qquad T_4 = 35℃$$

$$h_4 = h_{f@35℃} = 100.87\ kJ/kg$$

بالتعويض نجد أن

$$\dot{m}_w = \frac{(6\ kg/min)(100.87 - 303.85)}{(62.982\ \ - 104.83)}$$

$$\dot{m}_w = 29.1\ kg/min$$

2) كمية الحرارة الخارجة من الوسيط *134A* تساوي كمية الحرارة الممتصة من الماء وبالتالي يكفي أن ندرس إحدى الوسائط فإذا أخذنا طرف الماء نجد من قانون انحفاظ الطاقة

$$\dot{m}_w h_1 + \dot{Q}_{w,in} = \dot{m}_w h_2$$

$$\dot{Q}_{w,in} = \dot{m}_w (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{w,in} = (29.1\ kg/min)(104.83\ \ - 62.982)\ kJ/kg$$

$$\dot{Q}_{w,in} = 1218\ kJ/min$$

6.4.5 التدفق في الأنابيب *Pipe flow* ومجاري الهواء *Duct flow*.

يحقق نقل السوائل أو الغازات عبر الأنابيب أو المجاري في التطبيقات الهندسية شروط الاستقرار مهملين الحالات العابرة *Start up* وحالات التوقف *Shut down*. تشكل سطوح الأنابيب أو المجاري حدود حجم التحكم أو سطح التحكم. بأخذ الفرضيات التالية

i. لا يوجد أعمال آخرى ($\dot{W}_{other} = 0$).

ii. لا يوجد أيضا تبادل حراري نتيجة حركة السائل ($\dot{Q}_{in} = 0$) أي أن الجريان أدياباتي.

iii. لا يوجد تغيير في الطاقة الداخلية وبالتالي العملية إيزوثرمية في حال الوسيط مثالي.

Bassam Badran
Damascus University

فتتحول معادلة القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة للجريانات المستقرة إلى الشكل

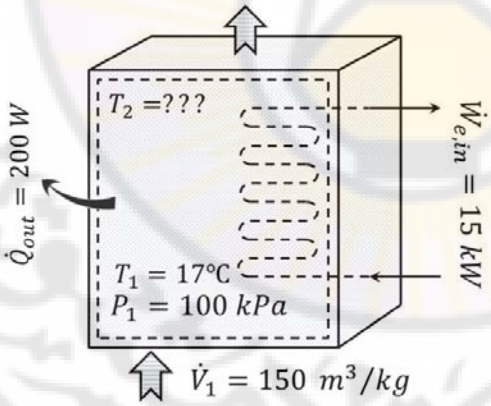
$$\sum_{in} \dot{m}\left(Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW) \qquad (24\text{-}5)$$

في حال كان التدفق ثابتاً أي أن $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m}$ تتحول المعادلة إلى معادلة برنولي *Bernoulli's Equation*

$$\left(Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)_{in} = \left(Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right)_{out}$$

المثال التطبيقي 5−11 – تسخين هواء منزل بواسطة مقاومة كهربائية.

يتألف نظام التسخين الكهربائي المستخدم في معظم المنازل من مقاومة كهربائية و مجرى هوائي بسيط. يسخن الهواء ذو درجة الحرارة (17°C) والضغط ($100\ kPa$) والتدفق الحجمي ($150\ m^3/min$) ضمن المجرى بواسطة مقاومة كهربائية ذات استطاعة ($15\ kW$). إذا كانت كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي هي ($200\ W$) حدد درجة حرارة خروج الهواء.



الفرضيات: 1) الجريان مستقر 2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة 3) الهواء غاز مثالي 4) حرارة نوعية ثابتة وتؤخذ قيمها عند درجة حرارة الغرفة.

Bassam Badran Damascus University

التحليل:

1) من قانون انحفاظ الكتلة مع فرض أن الجريان مستقر

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{system}/dt$$

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

من قانون انخفاض الطاقة (التوازن الطاقي) نجد أن

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt \rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{W}_{e,in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2$$

$$\dot{W}_{e,in} - \dot{Q}_{out} = \dot{m}\, c_p(T_2 - T_1)$$

بما أن الهواء غاز مثالي نحسب الحجم النوعي من معادلة الحالة للغاز المثالي

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

$$v_1 = \frac{(0.287\ kJ/kgK)(290K)}{100\ kPa}$$

$$v_1 = 0.832\ m^3/kg$$

تدفق الهواء في المجرى هو

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_1} = \frac{(150\ \ m^3/min)}{0.832\ m^3/kg} = 180.3\ kg/min = 3\ kg/s$$

بالتعويض نجد أن

$$15\frac{kJ}{s} - 0.2\frac{kJ}{s} = \left(3\frac{kg}{s}\right)\left(1.005\frac{kJ}{kgK}\right)(T_2 - 17)$$

$$T_2 = 21.9\ ℃$$

Bassam Badran Damascus University

يجب الانتباه إلى أن المعادلات السابقة هي معادلات تم اشتقاقها باستخدام شروط معينة وخاصة بالجهاز المدروس. في حال كانت هذه الشروط مختلفة نعود ونستخدم معادلة انحفاظ الطاقة العامة

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = (\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \qquad (kW)$$

أو القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة ذات الجريانات المستقرة.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) - \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

5.5 التحليل الطاقي للعمليات غير المستقرة.

في العمليات المستقرة (غير تابعة للزمن) لا نهتم بالتغييرات التي تحصل داخل حدود النظام (مفتوح أو مغلق) وهذا يسهل العمليات الحسابية في هذه الأنظمة. العمليات التي يوجد فيها تغيير مع الزمن تسمى بالعمليات غير المستقرة *Unsteady Flow* أو العمليات العابرة *Transient Flow*. من العمليات العابرة أو غير المستقرة هي عمليات شحن خزانات صلبة من خطوط توريد كما في الشكل (6−5) أو تفريغ سائل من أسطوانات مضغوطة. بعكس العمليات المستقرة، تبدأ وتنتهي العمليات غير المستقرة خلال فترة زمنية معينة (Δt) ولا تمدد فترات طويلة غير منتهية. حدود النظام في العمليات غير المستقرة متغيرة وغير ثابتة وقد تتزايد الكتلة أو قد تنقص بحسب العملية. قانون انحفاظ الكتلة في هذه الأنظمة هو

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} = \left(m_{final} - m_{initial}\right)_{cv} \qquad (20\text{-}5)$$

Bassam Badran
Damascus University

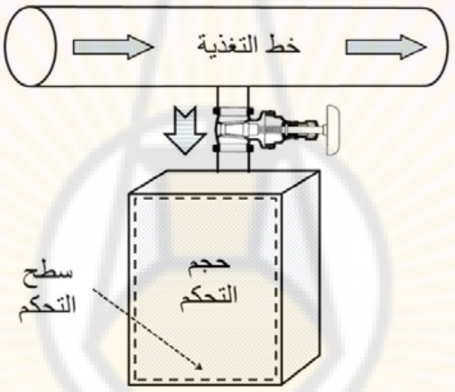
اما قانون انحفاظ الطاقة

$$\left(Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m\,\theta\right) - \left(Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system} \qquad (21\text{-}5)$$

حيث أن

$(\theta = h + ke + pe)$ هي طاقة الجريان لسائل بالنسبة إلى واحدة الكتل.

$(e = u + ke + pe)$ هي طاقة لعدم جريان سائل بالنسبة إلى واحدة الكتل.



الشكل (6–5) العمليات غير المستقرة.

بأخذ عرف الاتجاهات نجد أن

$$(Q_{in} - W_{out}) + \left(\sum_{in} m\,\theta - \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

<u>المثال التطبيقي 5–12 – شحن خزان صلب بالبخار.</u>

يوصل خزان صلب معزول ومفرغ بصمام على خط تغذية بخار ذات ضغط $(1\,MPa)$ ودرجة حرارة $(300°C)$. يسمح بالبخار بالتدفق داخل الخزان بعد فتح الصمام حتى يبلغ

Bassam Badran Damascus University

الضغط داخل الخزان $(1\ MPa)$ ويغلق الصمام. حدد درجة حرارة البخار النهائية في الخزان.

الفرضيات: 1) مواصفات البخار الذي يتدفق إلى الخزان ثابتة لاتتغير مع ارتفاع الضغط ضمنه 2) الطاقة الحركية والكامنة للبخارمهملة 3) لا يوجد تبادل حرارة أو عمل مع الوسط الخارجي.

التحليل: من قانون انحفاظ الكتلة

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system}$$

لا توجد كتلة خارجة والكتلة الابتدائية صفر أي

$$m_{in} = m_2 - m_1 = m_2$$

من قانون انحفاظ الطاقة (التوازن الطاقي) نجد

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

$$\left(Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m\,\theta\right) - \left(Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

وبما أن الطاقة الحركية أو الكامنة مهملة فإن $(e = u)$ وبما إنه لا يوجد عمل وطاقة حرارية متبادلة مع الوسط وبما أن الطاقة الابتدائية تساوي الصفر فإن معادلة الطاقة تصبح

$$m_i h_i = m_2 u_2$$

$$h_i = u_2$$

من شروط البخار في خط التغذية ذات الضغط $(1\ MPa)$ ودرجة الحرارة $(300°C)$ ومن جداول البخار نجد أن

Bassam Badran
Damascus University

$$h_i = 3051.6\ kJ/kg$$

وبما أن الطاقة الداخلية تساوي الإنتالبي فمن الضغط داخل الخزان ($1\ MPa$) ومن الطاقة الداخلية ($3051.6\ kJ/kg$) وجداول البخار المحمص نجد أن

$$T_2 = 456.1\ ℃$$

مناقشة: لقد ازدادت درجة حرارة البخار في الخزان بمقدار ($156.1\ ℃$) وهذه النتيجة قد تكون مفاجئة في البداية ولكن إذا نظرنا وجدنا أن جزءاً من الطاقة المتدفقة المحتواة في إنتالبي البخار قد تحولت إلى طاقة محسوسة وهذا أدى إلى ارتفاع الحرارة داخل الخزان.

المثال التطبيقي 5−13 – تفريغ هواء مضغوط ذات درجة حرارة ثابتة.

يوصل خزان صلب معزول ومفرغ يحتوي على هواء ساخن ذي ضغط ($600\ kPa$) ودرجة حرارة ($400\ K$)بصمام. يسمح للهواء بالتدفق خارج الخزان بعد فتح الصمام حتى يبلغ الضغط داخل الخزان ($200\ kPa$) ويبقى الهواء بدرجة الحرارة نفسها بسبب مقاومة كهربائية موجودة داخل الخزان. حدد الطاقة الكهربائية المزودة للهواء خلال هذه العملية.

الفرضيات: 1) مواصفات الهواء الذي يتدفق خارج الخزان ثابتة لاتتغير مع انخفاض ضغطه 2) الطاقة الحركية والكامنة للهواء مهملة 3) الهواء غاز مثالي مع حرارة نوعية متغييرة 3) لا يوجد تبادل حرارة مع الوسط الخارجي.

التحليل: من قانون انحفاظ الكتلة

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system}$$

لا يوجد كتلة خارجة والكتلة الابتدائية صفر أي

$$m_{out} = m_1 - m_2$$

من قانون انخفاض الطاقة (التوازن الطاقي) نجد

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Bassam Badran Damascus University

$$\left(Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m\,\theta\right) - \left(Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

وبما أن الطاقة الحركية أو الكامنة مهملة ولا توجد طاقة حرارية متبادلة مع الوسط فإن معادلة الطاقة تصبح

$$W_{e,in} - m_e h_e = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$m_1 = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{(600\ kPa)(8m^3)}{(0.287\ kJ/kgK)(400K)} = 41.81\ \ kg$$

$$m_2 = \frac{P_2 V_2}{R T_2} = \frac{(200\ kPa)(8m^3)}{(0.287\ kJ/kgK)(400K)} = 13.94\ \ kg$$

$$m_{out} = 41.81\ \ - 13.94 = 27.87\ kg$$

الطاقة الداخلية والإنتالبي يؤخذان من جداول الهواء عند درجة حرارة $(400K)$ وبالتعويض

$$W_{e,in} = m_e h_e + m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$W_{e,in} = (27.87\ kg)\left(400.98\frac{kJ}{kg}\right) + (13.94\ \ kg)\left(286.16\frac{kJ}{kg}\right) - (41.81\ \ kg)\left(286.16\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$W_{e,in} = 3200\ kJ = 0.889\ kWh$$

حيث $(1\ kWh = 2600\ kJ)$

Bassam Badran Damascus University

ملخص فصل القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة

- المعادلات العامة للأنظمة المفتوحة.

معادلة انخفاض الكتلة

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (kg/s)$$

معادلة انحفاظ الطاقة

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{cv}/dt \qquad (kW)$$

- عمل التدفق *Flow work*

$$w_{flow} = Pv \qquad (kJ/kg)$$

تتحول الطاقة الموجودة داخل النظام إلى

$$\theta = e + Pv = Pv + (u + ke + pe)$$

- المعادلات العامة للأنظمة المفتوحة في الجريانات المستقرة *Steady flow System*.

معادلة انحفاظ الكتلة

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (kg/s)$$

معادلة انحفاظ الطاقة

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \qquad (kW)$$

بتعويض أشكال الطاقة في المعادلة السابقة

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}) + \sum_{in} \dot{m}\,\theta = (\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}) + \sum_{out} \dot{m}\,\theta$$

العمل هنا هو فقط أعمال آخرى

Bassam Badran Damascus University

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in}\right) + \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out}\right) + \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

- القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة في الجريانات المستقرة. بأخذ عرف الاتجاهات تصبح معادلة انحفاظ الطاقة

$$\dot{Q}_{in} - \dot{W}_{out} = \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) - \sum_{in} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

- أجهزة الجريانات المستقرة
  - ✓ الأبواق *Nozzles* والنواشر *Diffusers*.

$$\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} = 0 \quad (kW)$$

  - ✓ العنفات *Turbines* والضواغط *Compressors*.

$$\dot{W}_{shaft} = -\dot{m} * \left(\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2}\right) \quad (kW)$$

  - ✓ صمام الخنق *Throttling Valves*.

$$h_1 \cong h_2 = constant$$

  - ✓ غرف المزج *Mixing Chambers*.

$$\dot{m}_{out} * \Delta h_{out} - \sum \dot{m}_{in} * \Delta h_{in} = 0 \quad (kW)$$

  - ✓ المبادلات الحرارية *Heat Exchangers*.

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta h \quad (kW)$$

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{Q}_{cold} = -\dot{Q}_{hot}$$

✓ التدفق في الأنابيب *Pipe flow* ومجاري الهواء *Duct flow*.

$$\sum_{in} \dot{m}\left(Pv + \frac{V^2}{2} + gz\right) = \sum_{out} \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) \quad (kW)$$

- التحليل الطاقي للعمليات غير المستقرة *Unsteady Flow*.

المعادلات العامة في الأنظمة المفتوحة ذات الجريانات غير المستقرة

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} = \left(m_{final} - m_{initial}\right)_{cv}$$

$$\left(Q_{in} + W_{in} + \sum_{in} m\,\theta\right) - \left(Q_{out} + W_{out} + \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

معادلة القانون الأول في الترموديناميك

$$(Q_{in} - W_{out}) + \left(\sum_{in} m\,\theta - \sum_{out} m\,\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{system}$$

Bassam Badran
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المفتوحة

1. يدخل هواء إلى بوق بشكل مستقر وبكثافة ($2.21\ kg/m^3$) وسرعة ($40\ m/s$) ويخرج بكثافة ($0.762\ kg/m^3$) وسرعة ($180\ m/s$). إذا كانت مساحة مقطع الدخول هي ($90\ cm^2$) حدد 1) تدفق الهواء ضمن البوق 2) مساحة الخروج.

2. مجفف شعر هو عبارة عن مجرى هوائي بقطر ثابت ومقاومة كهربائية. تقوم المروحة ضمن المجفف على سحب الهواء عبر المقاومة فيسخن. إذا كانت كثافة الهواء الذي يدخل إلى المجفف هي ($1.2\ kg/m^3$) والكثافة عند الخروج هي ($1.05\ kg/m^3$) حدد نسبة زيادة السرعة خلال عبوره المجفف.

3. يصمم مكان للمدخنين على أن يحتوي خمسة عشر شخصاً. كمية الهواء النقي الدنيا لكل شخص في الغرفة هي ($30L/s$) بحسب جمعية التكييف الأمريكية. حدد التدفق الأصغري للهواء النقي لكي يتم تزويده إلى الغرفة وقطر المجرى الهوائي له مع العلم أن سرعة الهواء في المجرى لاتتعدى ($8m/s$).

4. يدخل هواء في أنبوب بقطر ($28\ cm$) وبشكل مستقر بضغط ($200\ kPa$) ودرجة حرارة ($20°C$) وسرعة ($5m/s$). يسخن الهواء ضمن الأنبوب ويخرج بضغط ($180\ kPa$) ودرجة حرارة ($40°C$). حدد 1) التدفق الحجمي للهواء 2) التدفق الكتلي و3) سرعة الهواء عند الخروج.

5. يدخل فريون ($134A$) إلى ضاغط دارة تبريد على شكل بخار مشبع بضغط ($140\ kPa$) ويخرج على شكل بخار محمص بضغط ($800\ kPa$) ودرجة حرارة ($60°C$) وتدفق ($0.06\ kg/s$). حدد معدل انتقال الطاقة من وإلى الضاغط بفرض أن الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

6. يدخل هواء إلى بوق أدياباتي وبشكل مستقر بضغط ($300\ kPa$) ودرجة حرارة ($200°C$) وتدفق ($3\ m/s$) ويخرج بضغط ($100\ kPa$) وسرعة ($180m/s$). مساحة

Bassam Badran Damascus University

مقطع الدخول هي ($80\ cm^2$) حدد 1) التدفق الكتلي 2) درجة حرارة الخروج 3) مساحة مقطع الخروج.

7. يدخل بخار وبشكل مستقر إلى عنفة أدياباتية. بارامترات الدخول هي ضغط ($10\ MPa$) ودرجة حرارة (450°C) وسرعة ($80\ m/s$) ويخرج بضغط ($10\ kPa$) كسر جفاف 92% وسرعة ($50\ m/s$). إذا كان تدفق البخار ($12\ kg/s$) حدد 1) التغيير في الطاقة الحركية 2) استطاعة العنفة و3) مساحة مقطع الدخول إلى العنفة.

8. يخنق الفريون ($134A$) من سائل مشبع بضغط ($700\ kPa$) إلى ضغط ($160\ kPa$). حدد الهبوط في درجة الحرارة خلال هذه العملية والحجم النوعي النهائي للفريون بعد الخنق.

9. يدخل ماء ساخن بدرجة حرارة (80°C) إلى غرفة مزج بتدفق ($0.5\ kg/s$) حيث يمزج مع ماء بارد بدرجة حرارة (20°C). إذا كانت درجة حرارة الماء الخارج هي (42°C) حدد التدفق للماء البارد بفرض أن الضغوط متساوية.

Bassam Badran
Damascus University

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الفصل السادس

Chapter Six

القانون الثاني في الترموديناميك

Second Law of Thermodynamics

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
COP	معامل الأداء	لابعدي
COP_R	معامل الأداء لمبرد	لابعدي
COP_{HP}	معامل الأداء لمضخة حرارية	لابعدي
P	الضغط	kPa أو bar
Q	كمية الحرارة	J
Q_{in}	كمية الحرارة الداخلة إلى نظام عبر حدوده	J
Q_{out}	كمية الحرارة الداخلة من نظام عبر حدوده	J
Q_H	كمية الحرارة الخارجة من المصدر الحراري	J
Q_L	كمية الحرارة الداخلة إلى المصرف الحراري	J
T	درجة الحرارة	K أو $°C$
T_H	درجة حرارة المصدر الحراري	K أو $°C$
T_L	درجة الحرارة المصرف الحراري	K أو $°C$
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
W	العمل الكلي	J
$W_{net,in}$	العمل الصافي الداخل إلى نظام	J

Bassam Badran
Damascus University

$W_{net,out}$	العمل الصافي الخارج من نظام	J
W_{in}	العمل الداخل إلى نظام عبر حدوده	J
W_{out}	العمل الخارج من نظام عبر حدوده	J
η_{th}	المردود الحراري	لابعدي
$\eta_{th,rev}$	المردود الحراري العكوس	لابعدي

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

في هذا الفصل سوف نتحدث عن القانون الثاني في الترموديناميك والذي يقول بأن كافة العمليات تتم في اتجاه معين وأن الطاقة لها صفتان الأولى نوعية *Quality* والثانية كمية *Quantity*. لا يمكن أن تتم أي عملية إلا بتحقق القانون الأول والثاني في الترموديناميك. في بداية هذا الفصل سوف نتحدث عن الخزانات الحرارية *Thermal Energy Reservoirs* والعمليات العكوسة وغير العكوسة ومبدأ عمل المحركات الحرارية *Heat Engines* والمحركات التبريدية بنوعيها المبردات *Refrigerators* والمضخات الحرارية *Heat Pumps*. سوف نطرح مجموعة مختلفة من التعاريف التي توضح قواعد التعامل في القانون الثاني في الترموديناميك ونتعرف على المحركات غير القابلة للتطبيق *Perpetual-Motion Machines (PPM)* من النوع الأول والنوع الثاني. وسنتعرف على دروة كارنو *Carnot Cycle* المثالية ومبدأ عملها وننتهي إلى التعرف على محركي كارنو الحراري والتبريدي المثاليين.

الفائدة العلمية من الفصل

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ التعرف على القانون الثاني والعمليات التي تحقق القانون الأول والثاني في الترموديناميك.
- ✓ مناقشة فكرة الخزانات الحرارية والعمليات العكوسة وغير العكوسة والمحركات الحرارية والتبريدية بنوعيها.
- ✓ طرح مقولة كلاسيوس *Clausius* وكالفن – بلانك *Kelvin-Planck* في القانون الثاني.
- ✓ مناقشة المحركات غير القابلة للتطبيق.
- ✓ تطبيق القانون الثاني في الترموديناميك للدورات والأجهزة التي تقوم بدروات.

- ✓ استخدام القانون الثاني في الترموديناميك في وضع معادلة تدريجية درجة الحرارة الترموديناميكية.
- ✓ وصف دروة كارنو المثالية.
- ✓ التعرف على مبدأ عمل دورة كارنو وتطبيقه على المحرك الحراري والتبريدي.
- ✓ وضع مفاهيم قوانين المراديد *Thermal Efficiencies* للمحركات الحرارية ومعاملات الأداء *Coefficients of Performance* للمحركات التبريدية.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

الصفحة

1.6	مفهوم القانون الثاني في الترموديناميك.	363
2.6	الخزانات الحرارية.	364
3.6	المحركات الحرارية.	364
4.6	المحركات التبريدية.	370
5.6	المحركات الأبدية.	377
6.6	العمليات العكوسة وغير العكوسة.	378
7.6	دورة كارنو المثالية.	379
8.6	مبادئ كارنو.	386
9.6	تدريجية درجة الحرارة الترموديناميكية.	387
10.6	دورة كارنو للمحركات الحرارية المثالية.	388
11.6	دورة كارنو للمحركات التبريدية المثالية.	389
12.6	الشكل الرياضي للقانون الثاني في الترموديناميك.	390
	ملخص الفصل.	391
	مسائل غير محلولة.	393
	نهاية الفصل.	394

Bassam Badran
Damascus University

1.6 مفهوم القانون الثاني في الترموديناميك.

وجدنا سابقاً بأن القانون الأول في الترموديناميك يقول إن الطاقة هي قيمة محفوظة ولا يمكن أن تخلق ولاتدمر وإنما تتحول من شكل إلى آخر ولا يمكن لأي عملية أن تخالف القانون الأول ولكن تحقيق القانون الأول في الترموديناميك لا يجعل هذه العملية قابلة للتطبيق فمثلا كمية الحرارة التي يخسرها كأس من الماء الساخن الموجود على طاولة في غرفة تساوي كمية الحرارة التي يكسبها الوسط المحيط بالكأس وذلك بحسب القانون الأول في الترموديناميك ولكن السؤال يكمن في جعل هذه العملية تتم بالطريق الآخر أي هل يمكن جعل درجة الحرارة المرتفعة للكأس الموجود على طاولة في غرفة ترتفع أكثر نتيجة نقل كمية معينة من حرارة الوسط المحيط إلى الكأس. كل ما نعرفه بأن هذه العملية لاتتم ولكنها **لاتخالف** القانون الأول في الترموديناميك. هذا يدل على أن العملية عملية انتقال الحرارة تتم فقط في اتجاه واحد ولا يمكن أن تتم في الطريق الآخر (غير قابلة للعكس). يقوم القانون الثاني في الترموديناميك بحل هذه الفكرة من خلال طرح مبدأ العمليات العكوسة والعمليات غير العكوسة والفرق بينهما من خلال طرح خاصية (بارامتر) إضافية تسمى خاصية الإنتروبي *Entropy*. يقوم القانون الثاني في الترموديناميك بـ:

- ✓ تحديد اتجاه الحركة خلال أي عملية.
- ✓ تحديد شروط التوازن.
- ✓ تحديد أفضل أداء نظري للدورات بما في ذلك المحركات التي تعمل على دورات.

لا يمكن لأي عملية أن تتم إلا بتحقق القانونين الأول والثاني معاً ولا يقتصر القانون الثاني على تحديد اتجاه العملية فقط بل يتعداها إلى تحديد نوعية *Quality* (نوعية الطاقة المنتقلة في العملية) وكمية *Quantity* الطاقة المنتقلة. يوضح القانون الثاني في الترموديناميك أيضاً الحدود النظرية في أداء الأنظمة الهندسية مثل المحركات الحرارية والتبريدية.

Bassam Badran
Damascus University

2.6 الخزانات الحرارية.

لتطوير مفهوم القانون الثاني في الترموديناميك يجب افتراض جسم كبير جداً ذي سعة كبيرة لتخزين الطاقة الحرارية *Thermal Energy Capacity* (جداء الكتلة بالسعة الحرارية) وقادر على تزويد أو امتصاص كمية معينة من الطاقة من دون حدوث أي تغيير في درجة حرارته. تدعى هذه الأجسام بالخزانات الحرارية *Thermal Energy Reservoir* أو اختصاراً بالخزان *Reservoir*. البحر أو الإنهار أو البحيرات أو الهواء المحيط بالكرة الأرضية عبارة عن خزانات حرارية كبيرة لاتتغير درجة حرارتها عند إضافة كمية معينة من الحرارة أو امتصاصها. الخزان الذي يزود الطاقة أو يقدمها على شكل حرارة يدعى بالمنبع الحراري *Heat Source* والخزان الذي يقوم بامتصاص الطاقة على شكل حرارة يدعى بالمصرف الحراري *Heat Sink* كما هو واضح في الشكل (1−6).

الشكل (1−6) الخزان الحراري.

3.6 المحركات الحرارية.

كما ذكرنا سابقاً يمكن للعمل أن يتحول إلى طاقة ولكن تحويل الطاقة إلى عمل أمر صعب فمثلاً تحريك خلاط ضمن خزان يحتوي على ماء يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته وانتقالها إلى الوسط المحيط بفعل التبادل الحراري ولكن انتقال الحرارة من الوسط

Bassam Badran
Damascus University

المحيط إلى الخزان نفسه لا يعني تشغيل الخلاط. تسمى الأجهزة التي تحول الطاقة إلى عمل مفيد ضمن المحركات الحرارية *Heat Engines*.

الشكل (2−6) المحرك الحراري.

تختلف المحركات الحرارية بعضها عن بعض ولكن تتشارك بالخواص التالية:

1. تُزود المحركات الحرارية بكمية من الحرارة (Q_{in}) من منبع حراري ذات درجة حرارة مرتفعة كما في الشكل (2−6) وقد يكون هذا المنبع طاقة شمسية أو مفاعلاً نووياً أو حراقاً كبيراً.
2. يتحول جزء من هذه الحرارة إلى عمل مفيد $(W_{net,out})$. العمل المفيد هو مجموع الأعمال الناتجة في الدورة الترموديناميكية مطروح منه مجموعة الأعمال المقدمة

$$W_{net,out} = W_{out} - W_{in} \qquad (kJ) \qquad (1\text{-}6)$$

3. تُطرح باقي كمية الحرارة (Q_{out}) بعد خروجها من المحرك الحراري على شكل حرارة ضائعة *Waste Heat* إلى مصرف حراري بدرجة حرارة منخفضة.
4. تعمل المحركات الحرارية على شكل دروة ترموديناميكية.

تستخدم المحركات الحرارية أو أي أجهزة دورية وسيط تشغيل *Working Fluid* معين (ماء، غاز) لنقل الحرارة وطرحها ضمن الدورة الترموديناميكية. أفضل مثال عن المحركات الحرارية هو المحطات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية *Steam Power Plants*. يعطى القانون الأول في الترموديناميك للدورة الترموديناميكية في المحركات الحرارية على الشكل

$$(Q_{in} + W_{in}) - (Q_{out} + W_{out}) = 0$$

$$W_{in} - W_{out} = Q_{in} - Q_{out}$$

حيث أن التغيير في الطاقة الداخلية معدوم. باستخدام المعادلة (1−6) يتحول القانون الأول في الترموديناميك في دورات المحركات الحرارية إلى

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} \qquad (2\text{-}6)$$

كمية الحرارة المطروحة إلى المصرف الحراري (Q_{out}) لا يمكن أن تكون معدومة وبالتالي فإن العمل المفيد الناتج من محرك حراري يكون أقل من كمية الحرارة المقدمة من المنبع الحراري. تسمى نسبة العمل المراد الحصول عليه *Desired Work Output* من المحرك الحراري إلى كمية الحرارة المقدمة *Required Heat Input* فيه بالمردود الحراري *Thermal Efficiency* ويعطى الرمز (η_{th}).

$$\text{المردود الحراري} = \frac{\text{العمل المرغوب}}{\text{الحرارة المقدمة}} \qquad (3\text{-}6)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \qquad (4\text{-}6)$$

لتعميم علاقة المردود الحراري على كافة المحركات نعرف (Q_H) بكمية الحرارة التي تنقل **إلى** المحرك من المنبع الحراري بدرجة حرارة مرتفعة (T_H) و (Q_L) بكمية الحرارة التي تنقل **من** المحرك إلى المصرف الحراري بدرجة حرارة منخفضة (T_L) وبالتالي

Bassam Badran
Damascus University

$$W_{net,out} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{Q_H}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \qquad (5\text{-}6)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة أن المردود الحراري دائما أقل من الواحد لأن النسبة $(Q_L/Q_H < 1)$. بضرب العلاقة $(6-2)$ بالتدفق الكتلي للمحرك الحراري نحصل على

$$\dot{m} * W_{net,out} = \dot{m} * (Q_{in} - Q_{out})$$

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

يعبر المردود الحراري عن مدى قدرة المحرك الحراري على تحويل الطاقة الحرارية إلى عمل مفيد. أغلب الأجهزة التي تنتج عملاً مفيداً يكون مردودها منخفضاً فمثلاً محرك الاحتراق الداخلي يحول 25% من الطاقة المخزونة في الوقود إلى عمل ميكانيكي ويرتفع هذا المردود إلى 40% في محركات الديزل وإلى 60% في محطات توليد الطاقة المشتركة.

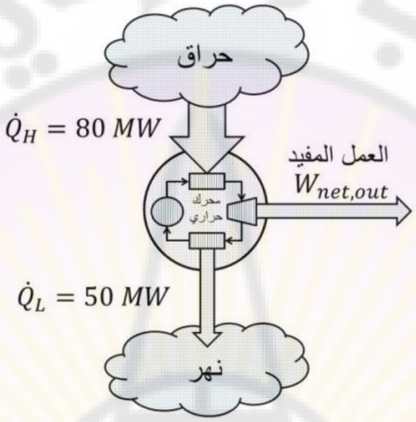
المثال التطبيقي 6–1 – الطاقة الصافية المتوفرة في محرك حراري.

تبلغ كمية الحرارة المنتقلة من حراق كبير إلى محرك حراري $(80\ MW)$ وإذا كانت كمية الحرارة المطروحة إلى النهر هي بقيمة $(50\ MW)$. حدد الطاقة الصافية التي يمكن أخذها من المحرك الحراري و مردود المحرك.

Bassam Badran
Damascus University

الفرضيات: الحرارة المفقودة من الأنابيب ومن العناصر المكونة إلى المحرك الحراري مهملة.

التحليل: من الشكل المرافق نجد أن كميات الحرارة هي



$$\dot{Q}_H = 80\ MW \quad , \quad \dot{Q}_L = 50\ MW$$

الطاقة الصافية وبحسب القانون الأول في الترموديناميك لدورة ترموديناميكية نجد أن

$$\dot{W} = \dot{Q}$$

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

$$\dot{W}_{net,out} = (80 - 50) = 30\ MW$$

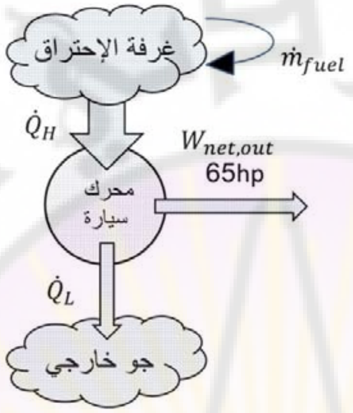
مردود المحرك الحراري يكون

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H}$$

$$\eta_{th} = \frac{30}{80} = 0.375 \text{ أو } 37.5\%$$

أي أن 37.5 بالمئة من الطاقة المقدمة من الحراق تتحول إلى عمل مفيد أما كمية الحرارة المطروحة إلى النهر فهي بمقدار 62.5 بالمئة ولا يمكن الاستفادة منها.

المثال التطبيقي 6–2 – كمية استهلاك الوقود في السيارة.



تبلغ الطاقة التي يعطيها محرك سيارة بمقدار $(65\ hp)$ وبمردود قدره 24 بالمئة. حدد كمية استهلاك الوقود في السيارة إذا كانت القيمة الحرارية له $(19000\ Btu/lbm)$ (19000 وحدة حرارية إنكليزية مقابل واحد باوند من الوقود المحرق).

الفرضيات: العمل المفيد للمحرك ثابت.

التحليل: المردود الذي يقدمه المحرك هو 24%، باستخدام علاقة المردود نجد أن

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\eta_{th}}$$

$$\dot{Q}_H = \frac{65\ hp}{0.24}\left(\frac{2545\ Btu/lbm}{1\ hp}\right)$$

$$\dot{Q}_H = 689270\ Btu/h$$

كمية الوقود المستهلكة

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{689270\ Btu/h}{19000\ Btu/lbm}$$

$$\dot{m}_{fuel} = 36.3\ lbm/h$$

مناقشة:

نلاحظ أننا إذا رفعنا من مردود المحرك إلى الضعف يقل استهلاك الوقود إلى النصف.

من أجل إكمال دورة المحرك الحراري يجب أن يكون هناك مصرف حراري في الدورة وبالتالي لا يوجد محرك حراري يقوم على تحويل الطاقة المقدمة بالكامل إلى عمل مفيد.

مقولة كالفن وبلانك *Kelvin-Planck Statement* في القانون الثاني في الترموديناميك.

قام كالفن– بلانك بطرح المقولة التالية

"من المستحيل لأي جهاز يعمل على دورة ترموديناميكية أن يحول كامل الطاقة المقدمة له إلى عمل مفيد"

"It is impossible for any device that operates on a cycle to receive heat from a single reservoir and produce a net amount of work"

من هذه المقولة نجد أن المردود المحرك الحراري لا يمكن أن يحقق 100%.

4.6 المحركات التبريدية.

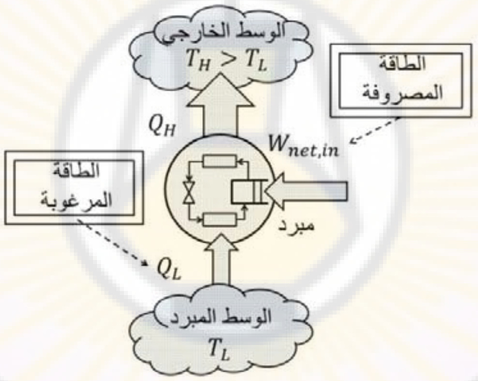
في المحرك الحراري تنتقل الحرارة من المصدر العالي إلى المصدر المنخفض ويتم انتقال الحرارة من المصدر المنخفض إلى المصدر العالي في أجهزة تسمى بالمحركات التبريدية. هناك نوعان من المرحكات التبريدية الأول هو مبردات *Refrigerators* والثاني مضخات حرارية *Heat Pumps*. وسيط التشغيل في هذه الأجهزة يسمى سائل التبريد *Refrigerant*. المردود في هذه المحركات التبريدية يسمى معامل الأداء *Coefficient of Performance* ويعطى الرمز (COP). بالنسبة إلى المبردات يكون

Bassam Badran
Damascus University

على الشكل (COP_R) أما المضخات الحرارية فيكون على الشكل (COP_{HP}). يعرف معامل الأداء على الشكل التالي

$$\text{معامل الأداء} = \frac{\text{الطاقة المرغوبة}}{\text{الطاقة المصروفة}}$$

يبين الشكل (3−6) مخطط محرك تبريدي يعمل على أساس مبرد حيث الوسط المبرد (الغرفة مثلاً التي نريد تبريدها) ذو درجة حرارة (T_L) والطاقة (Q_L) هي الطاقة المرغوبة. الطاقة المصروفة $(W_{net,in})$ هي الطاقة اللازمة لنقل الحرارة من الوسط المبرد وطرحه في الوسط الخارجي ذي درجة الحرارة (T_H). الطاقة المطروحة إلى الوسط الخارجي هي (Q_H).



الشكل (3−6) محرك تبريدي يعمل على أساس مبرد.

تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على المبرد نجد أن

$$(Q_{in} + W_{in}) - (Q_{out} + W_{out}) = 0$$

$$(Q_L + W_{net,in}) - (Q_H) = 0$$

Bassam Badran Damascus University

$$W_{net,in} = Q_H - Q_L \qquad (6\text{-}6)$$

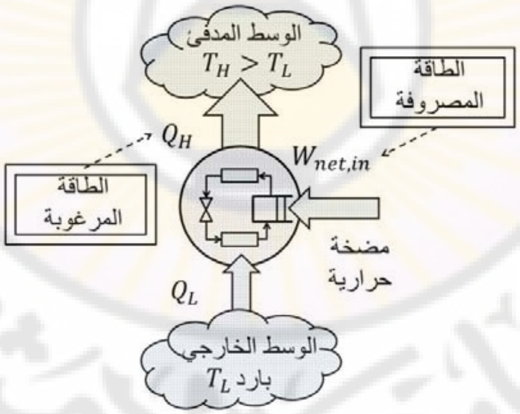
$$Q_H = W_{net,in} + Q_L$$

نلاحظ أن الطاقة المطروحة إلى الوسط الخارجي (Q_H) تساوي إلى الطاقة المرغوبة (Q_L) مضافاً إليها العمل المصروف على الضاغط $(W_{net,in})$. أما معامل الأداء وبحسب التعريف فيكون

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{(Q_H/Q_L) - 1} \qquad (7\text{-}6)$$

نلاحظ بأن معامل الأداء هو أكبر من الواحد دائماً.



الشكل (4–6) محرك تبريدي يعمل على أساس مضخة حرارية.

يبين الشكل (4–6) مخطط محرك تبريدي يعمل على أساس مضخة حرارية حيث الوسط المدفأ (الغرفة مثلاً التي نريد تدفئتها) ذو درجة حرارة (T_H) والطاقة (Q_H) هي الطاقة

المرغوبة. الطاقة المصروفة $(W_{net,in})$ هي الطاقة اللازمة لنقل الحرارة من الوسط الخارجي (البارد) وطرحه في الوسط المدفأ ذي درجة الحرارة (T_H). الطاقة الممتصة من الوسط الخارجي هي (Q_L). بحسب تعريف معامل الأداء يكون

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}}$$

أي أن

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - (Q_L/Q_H)} \qquad (8\text{-}6)$$

بالمقارنة بين معامل الأداء للمبرد معادلة (6−7) ومعامل الأداء للمضخة الحرارية معادلة (6−8) يمكن أن نستنتج المعادلة التالية

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \qquad (9\text{-}6)$$

نلاحظ من العلاقة (6−9) أن أسوء أداء للمضخة الحرارية يساوي الواحد عندما يكون معامل الأداء للمبرد يساوي الصفر $(COP_R = 0)$

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = 1$$

$$Q_H = W_{net,in}$$

أي أن العمل (الطاقة الكهربائية) المصروفة على الضاغط $(W_{net,in})$ يتحول بالكامل إلى كمية الحرارة (Q_H) التي تضاف إلى الغرفة في المضخة الحرارية. هذا يدل على أن المضخة الحرارية في هذه الحالة قد تحولت إلى مايشبه المقاومة الكهربائية التي تستخدم لتدفئة الغرفة.

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 6–3 – الحرارة المطروحة من المبرد (براد).

درجة حرارة براد كما هو موجود في الشكل (4°C) وكمية الحرارة المسحوبة من البراد هي ($360\ kJ/min$). إذا كانت الطاقة المصروفة في الضاغط هي ($2\ kW$) حدد 1) معامل الأداء في البراد و2) كمية الحرارة المطروحة إلى المحيط (المطبخ).

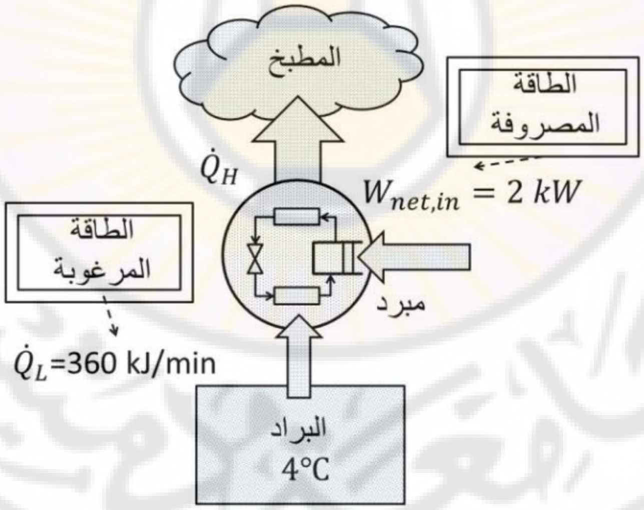
الفرضيات: العملية مستقرة.

التحليل: 1) معامل أداء البراد هو

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}}$$

$$COP_R = \frac{360\ kJ/min}{2\ kW}\left(\frac{1\ kW}{60\ kJ/min}\right)$$

$$COP_R = 3$$



أي أن 3 كيلوجول من الحرارة تسحب من البراد لكل واحد كيلوجول من العمل الكهربائي المصروف في الضاغط.

2) كمية الحرارة المطروحة إلى المحيط (المطبخ) تحسب من القانون الأول في الترموديناميك

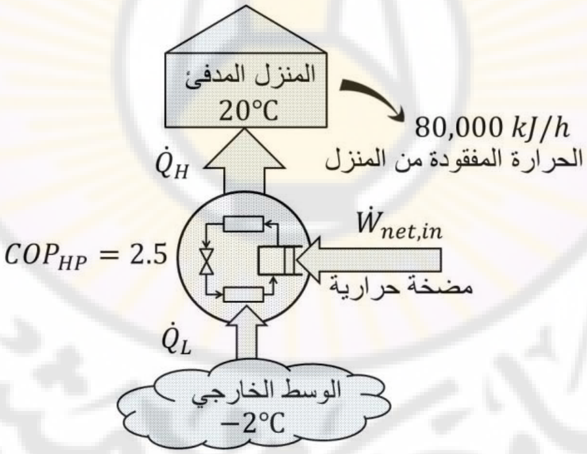
$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

$$\dot{Q}_H = 360 + 2 * 60$$

$$\dot{Q}_H = 480\ kJ/min$$

المثال التطبيقي 6-4 – تدفئة منزل بواسطة مضخة حرارية.

تستخدم مضخة حرارية لتدفئة منزل عند درجة حرارة (20°C). تقدر كمية الحرارة الضائعة إلى الوسط الحارجي ($80000\ kJ/h$) عندما تكون درجة حرارة الوسط (−2°C). إذا كان معامل الأداء للمضخة (2.5) حدد 1) الطاقة التي تستهلكها المضخة و2) كمية الحرارة الممتصة من الوسط الخارجي.



الفرضيات: العملية مستقرة.

التحليل: 1) من معادلة معامل أداء للمضخة نجد أن

$$\dot{W}_{net,in} = \frac{\dot{Q}_H}{COP_{HP}}$$

Bassam Badran Damascus University

$$\dot{W}_{net,in} = \frac{80000\ kJ/h}{2.5}$$

$$\dot{W}_{net,in} = 32000\frac{kJ}{h} = 8.9kW$$

2) كمية الحرارة الممتصة من الخارج هي

$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L$$

$$\dot{Q}_L = 80000 + 32000$$

$$\dot{Q}_L = 48000\ kJ/h$$

الكمية $(48000\ kJ/h)$ هي قيمة ممتصة من الجو البارد خارج المنزل وبالتالي فإننا نستهلك فقط $32000\ kJ/h$ من الطاقة لتدفئة المنزل.

<u>**مقولة كلاسيوس *Clausius Statement* في القانون الثاني في الترمودیناميك**</u>. قام كلاسيوس بطرح المقولة التالية

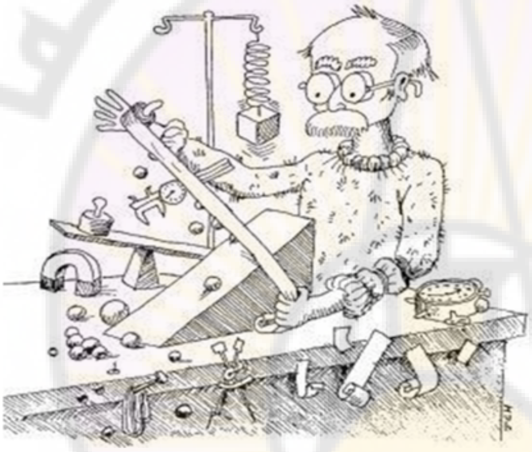
"من المستحيل إنشاء أي جهاز يعمل على دورة ترموديناميكية ولا ينتج أي مفعول سوى نقل الحرارة من المصدر المنخفض إلى المصدر العالي"

"It is impossible to construct a device that operates in a cycle and produce no effect other than the transfer of heat from lower temperature body to a higher temperature body."

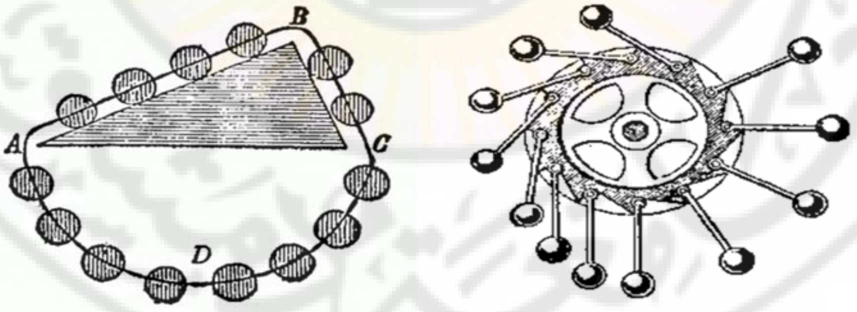
Bassam Badran
Damascus University

كلاسيوس لا يقول أن الجهاز الذي يعمل على دورة والذي ينقل كمية من الحرارة من مصدر منخفض إلى مصدر عال صعب التنفيذ ولكنه يقول يجب أن نقوم بصرف عمل ما من أجل حدوث هذه العملية. أي جهاز أو محرك لا يتفق مع مقولة كالفن – بلانك أو كلاسيوس فلا يمكن إنشاؤه.

5.6 المحركات الأبدية.



أي جهاز أو محرك يخالف القانون الأول و الثاني في الترموديناميك يسمى بالجهاز الأبدي أو الدائم *Perpetual Motion Machine* (*PPM*). كل المحاولات في خلق هذا المحرك باءت بالفشل ولكن المحاولات بقيت مستمرة إلى يومنا هذا كما في الشكل (5–6). يرجى تصفح الوصلة "متحف الأجهزة غير القابلة للتطبيق[1]" والتعرف على الأجهزة التي لا تعمل.



الشكل (5–6) الأجهزة الأبدية بنوعيها.

[1] http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/unwork.htm

Bassam Badran
Damascus University

- الجهاز الذي يخالف القانون الأول في الترموديناميك يسمى بالمحرك الأبدي من النوع الأول *Perpetual Motion Machine of the First Kind* أو اختصاراً ($PPM1$).
- الجهاز الذي يخالف القانون الثاني في الترموديناميك يسمى بالمحرك الأبدي من النوع الثاني *Perpetual Motion Machine of the Second* Kind أو اختصاراً ($PPM2$).

6.6 <u>العمليات العكوسة وغير العكوسة.</u>

لقد تحدثنا سابقاً بأن المحرك الحراري لا يمكن أن يعطي مردوداً 100% لذلك لكي نفسر السبب يجب أن نقوم بوصف عملية مثالية تسمى بالعملية العكوسة *Reversible Process*. توصف العملية العكوسة على إنها

"أي عملية يمكن أن تُعكس حركتها أو تسترجع حالتها من دون خسارة أي طاقة فيها أو في الوسط الذي تتم فيه"

"A process that can be reserved without leaving any trace on the surroundings."

أي أن كمية الحرارة الصافية والعمل الصافي المتبادل بين الوسط والعملية في العملية العكوسة يجب أن يكون مساوياً للصفر. هذا يعني أن العملية العكوسة تتم فقط عند حالة التوازن. العمليات التي لا يمكن وصفها بالعكوسة تسمى بالعمليات غير العكوسة *Irreversible Processes*. العمليات العكوسة غير موجودة في الطبيعة لأن كافة العمليات الموجودة في الطبيعة هي عمليات حقيقية. تمثل العمليات الفعلية الحقيقة بعمليات عكوسة للتمكن من دراستها وإيجاد مردودها الأعظمي. هناك الكثير من العوامل التي تجعل العمليات غير عكوسة مثل الاحتكاك والانضغاط والتمدد السريع.

Bassam Badran
Damascus University

تكون العملية عكوسة داخلياً *Internally Reversible Process* عندما لاتوجد ضياعات (عمليات غير عكوسة) داخلية ضمن حدود النظام المدروس خلال تنفيذ عملية ما فمثلاً دوران قلب عنفة المضخة الداخلية يؤدي إلى توليد قوى إحتكاك مع غلاف المضخة ومع السائل الموجود بداخلها. يمكن إعتبار هذه العملية عكوسة داخلياً عند إهمال هذه القوى.

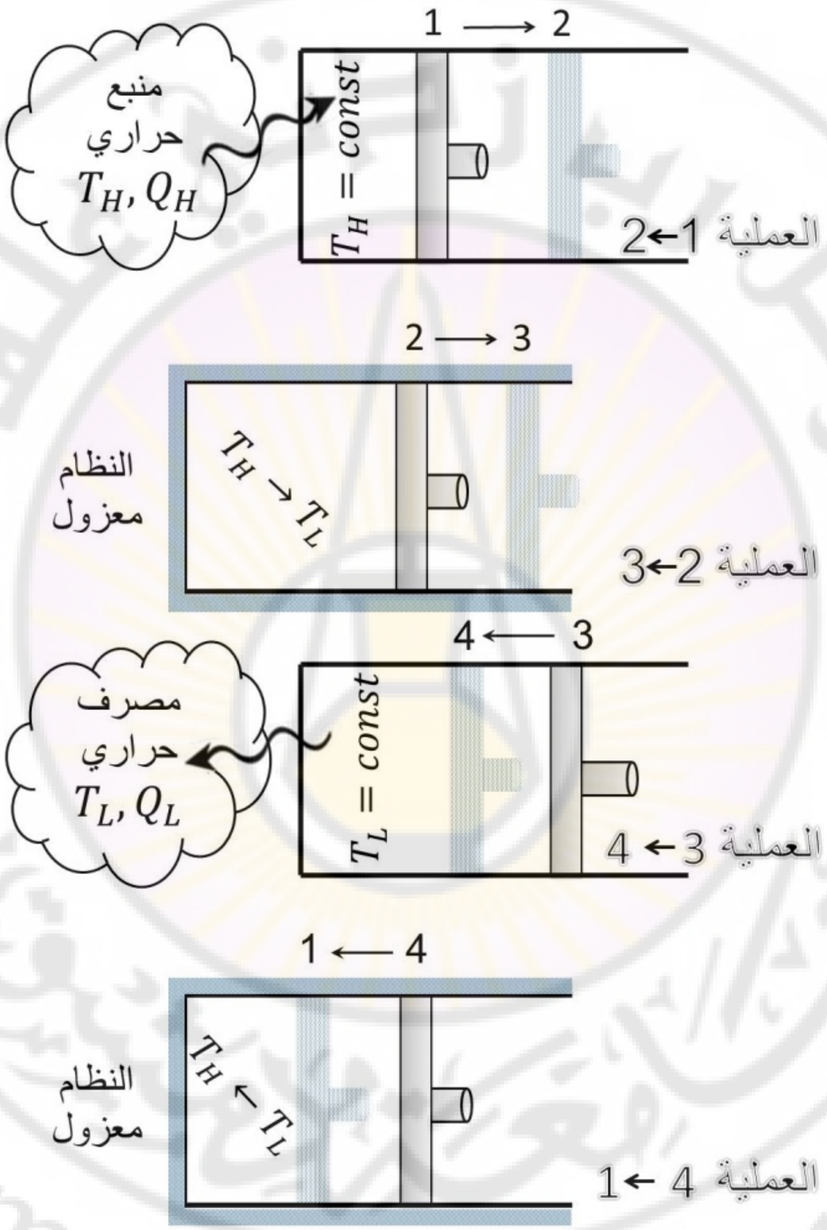
تكون العملية عكوسة خارجياً *Externally Reversible Process* عندما لا توجد ضياعات بين النظام والوسط المحيط خلال تنفيذ عملية ما فمثلاً إنتقال الحرارة عبر جدار معين نتيجة إختلاف درجات الحرارة بين النظام والوسط الخارجي يؤدي إلى خسارة لجزء من هذه الطاقة عبر مادة الجدار. يمكن إعتبار هذه العملية عكوسة خارجياً عند إهمال الضياعات في كمية الحرارة المنتقلة.

يمكن تحقيق العملية العكوسة داخلياً و/أو خارجياً لنظام ما بأخذ مجموعة من الخطوات الصغيرة جداً أو شبه ستاتيكية أو شبه متوازنة والسماح للنظام بتحقيق التوزان الحراري في كل خطوة من الخطوات وصولاً إلى الحالة النهائية. كمية الحرارة المتبادلة بين الخزان والنظام هي عكوسة خارجياً عندما تكون درجة حرارة الخزان مساوية لدرجة حرارة حدود النظام. تكون العملية عكوسة كلياً *Totally Reversible Process* أو اختصاراً *Reversible* عندما لا يوجد ضياعات داخلية وخارجية.

7.6 دورة كارنو المثالية.

طرح المهندس الفرنسي فرانس كارنو في عام 1824 **دورة مثالية عكوسة كلياً** سميت بدورة كارنو المباشرة *Carnot Cycle*. يسمى المحرك الذي يعمل على هذه الدورة بمحرك كارنو الحراري *Carnot Heat Engine*. يتألف محرك كارنو الحراري المثالي من أربع عمليات، عمليتان إيزوثرميان ووعمليتان أدياباتيان وتنفذ على نظام مغلق أو مفتوح.

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (6–6) محرك كارنو المثالي ذات أربع عمليات.

- العملية $(1 \rightarrow 2)$ هي عملية تمدد إيزوثرمية *Reversible Isothermal Expansion*. تتم هذه العملية بدرجة حرارة ثابتة وهي درجة حرارة المنبع الحراري (T_H). في الحالة الابتدائية (1) تكون درجة حرارة الغاز الموجودة في الأسطوانة (T_H) والمكبس قريب من المنبع الحراري الذي درجة حرارته أيضاً (T_H) كما في الشكل (6−6). يسمح للغاز بالتمدد ببطء لتحقيق شروط التوازن الحراري مقدماً عملاً إلى الوسط الخارجي وتبدأ درجة حرارة الغاز بالانخفاض. انخفاض درجة الحرارة الغاز وبكمية قليلة (dT) يسمح بانتقال كمية من الحرارة من المنبع إلى الغاز مسبباً عودة درجة حرارة الغاز إلى حالتها الأولية (T_H) وبالتالي تبقى درجة حرارة الغاز ثابتة. تعد عملية حركة المكبس البطيئة وعودة الغاز إلى درجة حرارته الأولية بعملية انتقال حرارة عكوسة. تستمر هذه العملية إلى أن يصل المكبس إلى الحالة (2). كمية الحرارة الكلية المكتسبة خلال هذه العملية هي (Q_H). بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية مع فرض أن وسيط التشغيل هو غاز مثالي نجد أن

$$Q - W = \Delta U$$

الطاقة الداخلية هي صفر أي $(\Delta U_{1\rightarrow 2} = 0)$

$$Q_{1\rightarrow 2} = Q_H = W_{1\rightarrow 2}$$

في هذه العملية الإيزوثرمية عمل الحدود يساوي بالنسبة إلى واحد الكتل

$$q_H = w_{1\rightarrow 2} = R * T_H \ln\frac{V_2}{V_1} \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (10\text{-}6)$$

- العملية $(2 \rightarrow 3)$ هي عملية تمدد أدياباتية *Reversible Adiabatic Expansion*. تنخفض درجة حرارة الغاز من $(T_H = T_2)$ إلى $(T_L = T_3)$ في هذه العملية. عند الحالة (2) الخزان الذي كان على اتصال بالنظام المغلق (أسطوانة – مكبس) يزول ويستبدل النظام بنظام معزول (مادة عازلة حول النظام المغلق) ويصبح النظام المغلق أدياباتياً. يستمر الغاز بالتمدد حتى تنخفض درجة حرارة الغاز من (T_H)

إلى (T_L) أي الحالة (3). العملية تكون أدياباتية عكوسة عند إهمال الاحتكاك بين المكبس والأسطوانة. بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية مع فرض أن الوسيط هو غاز مثالي نجد أن

$$Q - W = \Delta U$$

كمية الحرارة في هذه العملية هي صفر $(Q_{2\to3} = 0)$ أي

$$\Delta U_{2\to3} = -W_{2\to3}$$

$$\Delta U_{2\to3} = c_v * (T_3 - T_2) = c_v * (T_L - T_H) = -W_{2\to3} \qquad (11\text{-}6)$$

في العملية الأدياباتية $(T * V^{k-1} = const)$ يكون

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_L}{T_H} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{k-1} \qquad (12\text{-}6)$$

- العملية $(4 \rightarrow 3)$ هي عملية انضغاط إيزوثرمية *Reversible Isothermal Compression*. تتم هذه العملية بدرجة حرارة ثابتة وهي درجة حرارة المصرف الحراري (T_L). في الحالة (3) تتم إزالة العازل حول النظام المغلق ويستبدل بمصرف حراري بدرجة حرارة ثابتة (T_L). ينضغط المبكس أيضاً بسرعة بطيئة بواسطة قوى خارجية ليتحرك إلى داخل الأسطوانة. عندما تبدأ درجة حرارة الغاز بالارتفاع وبشكل بسيط (dT) يقوم المصرف الحراري *Heat Sink* بتخفيض درجة الحرارة إلى الحالة الأولية وهي (T_L). تعد عملية حركة المكبس البطيئة باتجاه الداخل وعودة الغاز إلى درجة حرارته بعملية انتقال حرارة عكوسة. تستمر هذه العملية إلى أن نصل إلى الحالة (4). كمية الحرارة الكلية المطروحة خلال هذه العملية هي (Q_L). بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية مع فرض أن الوسيط هو غاز مثالي نجد أن

$$Q - W = \Delta U$$

الطاقة الداخلية هي صفر أي $(\Delta U_{3\to4} = 0)$

Bassam Badran Damascus University

$$Q_{3\to4} = Q_L = W_{3\to4}$$

في هذه العملية الإيزوثرمية عمل الحدود يساوي بالنسبة إلى واحد الكتل

$$Q_L = W_{3\to4} = R * T_L \, ln\frac{V_4}{V_3} \qquad (13\text{-}6)$$

- العملية $(1 \to 4)$ هي عملية انضغاط أدياباتية *Reversible Adiabatic Compression*. ترتفع درجة حرارة الغاز من (T_L) إلى (T_H) في هذه العملية. عند الحالة (4) الخزان الذي كان على اتصال بالنظام المغلق (أسطوانة – مكبس) يزول ويستبدل النظام بنظام معزول (مادة عازلة حول النظام المغلق) ويصبح النظام المغلق أدياباتياً. يستمر الغاز بالإنضغاط حتى ترتفع درجة حرارة الغاز من (T_L) إلى (T_H) أي الحالة (1). العملية تكون أدياباتية عكوسة عند إهمال الاحتكاك بين المكبس والإسطونة. بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية مع فرض أن الوسيط هو غاز مثالي نجد أن

$$Q - W = \Delta U$$

كمية الحرارة في هذه العملية هي صفر $(Q_{4\to1} = 0)$ أي

$$\Delta U_{4\to1} = -W_{4\to1}$$

$$\Delta U_{4\to1} = c_v * (T_1 - T_4) = c_v * (T_H - T_L) = -W_{4\to1} \qquad (14\text{-}6)$$

في العملية الأدياباتية $(T * V^{k-1} = const)$يكون

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_L}{T_H} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{k-1} \qquad (15\text{-}6)$$

من العلاقة $(6-12)$ و$(6-13)$ نجد أن

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \qquad (16\text{-}6)$$

بحسب تعريف المردود في

$$\eta_{th,rev} = \frac{W_{net,out}}{Q_H}$$

$$\eta_{th,rev} = \frac{W_{1\to2} + W_{2\to3} + W_{3\to4} + W_{4\to1}}{Q_H}$$

بتعويض عمل الحدود من المعادلات السابقة نجد أن

$$W_{net,out} = W_{1\to2} + W_{2\to3} + W_{3\to4} + W_{4\to1}$$

$$W_{net,out} = R * T_H\, ln\frac{V_2}{V_1} - c_v * (T_L - T_H) + R * T_L\, ln\frac{V_4}{V_3} - c_v * (T_H - T_L)$$

$$W_{net,out} = R * T_H\, ln\frac{V_2}{V_1} + R * T_L\, ln\frac{V_4}{V_3}$$

ولكن بحسب $(6-16)$ نجد أن

$$ln\frac{V_2}{V_1} = ln\frac{V_3}{V_4} = -\,ln\frac{V_4}{V_3}$$

أي أن العمل الكلي هو

$$W_{net,out} = R * (T_H - T_L)\, ln\frac{V_2}{V_1}$$

بالتعويض في المردود نجد أن

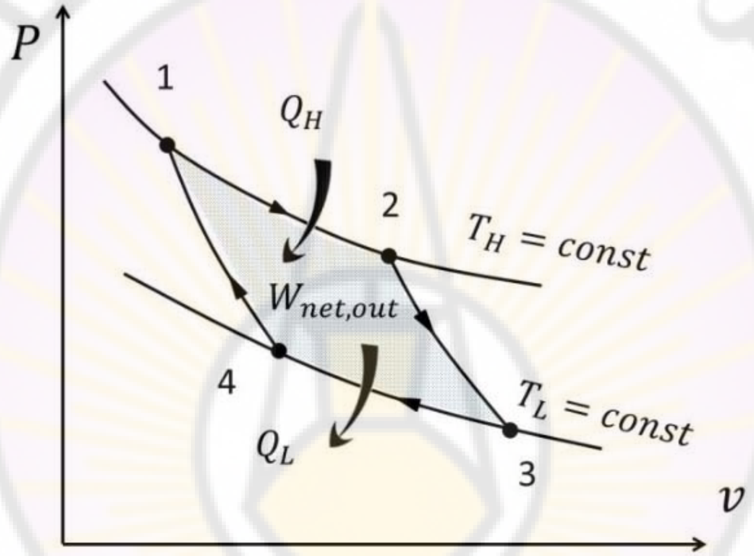
$$\eta_{th,rev} = \frac{R * (T_H - T_L)\, ln\frac{V_2}{V_1}}{R * T_H\, ln\frac{V_2}{V_1}}$$

$$\eta_{th,rev} = \frac{(T_H - T_L)}{T_H}$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad (17\text{-}6)$$

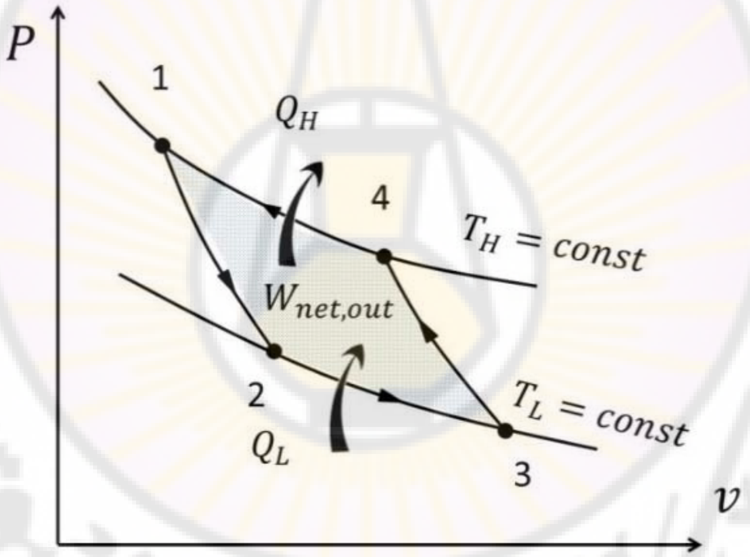
تُظهر المعادلة السابقة المردود الأعظمي لدورة كارنو العكوسة ولا يمكن الحصول على محرك حراري يعطي مردوداً أكبر من مردود محرك كارنو الحراري المثالي.



الشكل $(7\text{–}6)$ محرك كارنو الحراري على مخطط $(P - v)$.

يظهر الشكل $(7\text{–}6)$ مخطط محرك كارنو الحراري على مخطط $(P - v)$. نلاحظ أن اتجاه الدورة يتم مع عقارب الساعة ويجب أيضاً التذكير بأن المساحة المحصورة بين العملية $(1 \to 2 \to 3)$ ومحور (v) تمثل عمل التمدد في الدورة و المساحة المحصورة بين العملية $(3 \to 4 \to 1)$ ومحور (v) تمثل عمل الانضغاط في الدورة.المساحة المحصورة في العملية $(1 \to 2 \to 3 \to 4 \to 1)$ هي العمل الصافي الذي يقدمه محرك كارنو الحراري وهو العمل الأعظمي الذي يمكن أن تقدمه أي دورة حرارية.

دورة كارنو العكسية *Reverse Carnot Cycle* هي دروة كارنو المباشرة نفسها ولكن العمليات تكون باتجاه معاكس. تسمى الدورة التي تعمل على هذه الدورة العكسية بمحرك (دورة) كارنو التبريدية *Carnot Refrigeration Cycle*. هنا يتم امتصاص كمية من الحرارة عند درجة حرارة منخفضة ونطرح كمية من الحرارة عند درجة حرارة مرتفعة كما هو واضح بالشكل (6−8). نلاحظ أن اتجاه الدورة يتم بعكس عقارب الساعة. العمل الصافي في دورة كارنو التبريدية هو العمل الأعظمي الذي يمكن أن نقدمة لأي محرك (دورة) تبريدي.



الشكل (6−8) دورة كارنو التبريدية على مخطط $(P - v)$.

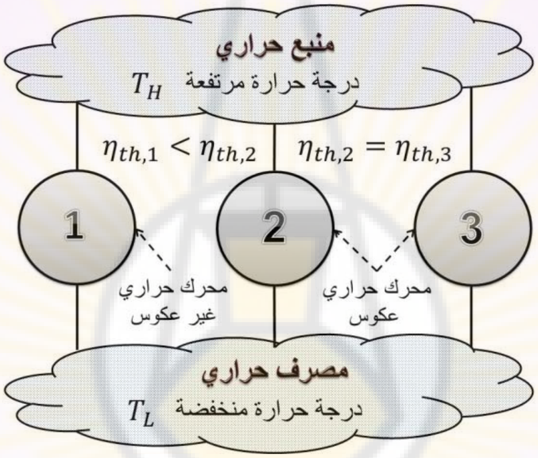
8.6 <u>مبادئ كارنو.</u>

القانون الثاني في الترموديناميك يضع حدوداً وقيوداً على العمليات التي تتم في الدورات الحرارية والتبريدية بحسب مقولة كالفن – بلاك ومقولة كلاسيوس. يمكن استنتاج

Bassam Badran Damascus University

مجموعة من المبادئ من القانون الثاني في الترموديناميك تسمى مبادئ كارنو العامة *Carnot Principles* وهي

- ✓ يكون مردود المحرك الحراري غير العكوس أقل من المحرك الحراري العكوس عندما تعمل هذه المحركات بين منبع ومصرف حراري واحد كما في الشكل (6–9).
- ✓ تكون المراديد الحرارية للمحركات الحرارية التي تعمل بين نفس المنبع والمصرف متساوية كما في الشكل (6–9).



الشكل (6–9) مبادئ كارنو للمحركات

9.6 تدريجية درجة الحرارة الترموديناميكية.

عند استخدام تدريجة حرارية لقياس درجة حرارة وتكون هذه التدريجة **مستقلة** عن خواص الوسائط التشغيلية المستخدمة في الدورة فإن هذه التدريجة تسمى بتدريجة درجة الحرارة الترموديناميكية *Thermodynamic Temperature Scale*. أعطى اللورد كالفن شكلاً لهذه التدريجة

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$\left(\frac{Q_L}{Q_H}\right)_{rev} = \frac{T_L}{T_H} \qquad (18\text{-}6)$$

تسمى هذه التدريجة بتدريجة كالفن *Kelvin Scale*. درجة الحرارة المستخدمة في هذه التدريجة هي درجة الحرارة المطلقة *Absolute Temperature* لإنها لاتتعلق بخواص المواد وهذا ما أثبتته النظرية الحركية. يجب التذكير أن تدريجة درجة الحرارة الترموديناميكية في نظام الواحدات الإنكليزي هي تدريجة رانكين *Rankine Scale*.

10.6 دورة كارنو للمحركات الحرارية المثالية.

يكون المردود في المحركات الحرارية

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \qquad (19\text{-}6)$$

أما مردود محرك كارنو الحراري العكوس فهو

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad (20\text{-}6)$$

يمكن مقارنة مردود أي محرك حراري مع مردود كارنو للمحركات الحرارية على الشكل التالي

	$<$	$\eta_{th,rev}$	محرك حراري غير عكوس
η_{th}	$=$	$\eta_{th,rev}$	محرك حراري عكوس
	$>$	$\eta_{th,rev}$	محرك غير قابل للتنفيذ

Bassam Badran
Damascus University

11.6 دورة كارنو للمحركات التبريدية المثالية.

معامل الأداء في المحركات التبريدية هو

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \qquad (21\text{-}6)$$

$$COP_R = \frac{1}{(Q_H/Q_L) - 1}$$

معامل الأداء في محركات المضخة الحرارية هو

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \qquad (22\text{-}6)$$

$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - (Q_L/Q_H)}$$

معامل الأداء في محرك كارنو التبريدي العكوس فهو

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{(T_H/T_L) - 1} \qquad (23\text{-}6)$$

معامل الأداء في محرك كارنو للمضخة الحرارية العكوسة فهو

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - (T_L/T_H)} \qquad (24\text{-}6)$$

يمكن مقارنة معامل الأداء لمحرك تبريدي أو لمضخة حرارية مع معامل الأداء لمحرك كارنو التبريدي العكوس أو لمضخة حرارية عكوسة على الشكل التالي

	$<$	$COP_{R,rev}$	محرك تبريدي غير عكوس
COP_R	$=$	$COP_{R,rev}$	محرك تبريدي عكوس
	$>$	$COP_{R,rev}$	محرك غير قابل للتنفيذ

Bassam Badran
Damascus University

12.6 الشكل الرياضي للقانون الثاني في الترموديناميك.

في القرن التاسع عشر وبداية القرن العشرون ظهرت معادلتان رياضيتان للقانون الثاني في الترموديناميك وهما:

- مبدأ تزايد الإنتروبي في الأنظمة الميكروية المعزولة ويعطى بالعلاقة

$$(dS)_{iso} \geq 0 \qquad (25\text{-}6)$$

- مبدأ تناقص طاقة جبس الحرة في الأنظمة الميكروية الإيزوبارية والإيزوثرمية ويعطى بالعلاقة

$$(dG)_{T,P} \leq 0 \qquad (26\text{-}6)$$

سيتم شرح العلاقة (6−25) في الفصل السابع و العلاقة (6−26) في الفصل الثامن بالتفصيل.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

ملخص فصل القانون الثاني في الترموديناميك

- مردود المحرك الحراري

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

- مردود دورة كارنو المباشرة

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

- **مقولة كالفن وبلانك *Kelvin-Planck Statement* في القانون الثاني في الترموديناميك**. قام كالفن– بلانك بطرح المقولة التالية

"من المستحيل لأي جهاز يعمل على دورة ترموديناميكية أن يحول كامل الطاقة المقدمة له إلى عمل مفيد"

- مردود المحرك التبريدي (مبرد)

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{(Q_H/Q_L) - 1}$$

- مردود دورة كارنو العكسية (مبرد)

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{(T_H/T_L) - 1}$$

- مردود المحرك التبريدي (مضخة حرارية)

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W_{in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - (Q_L/Q_H)}$$

- مردود دورة كارنو العكسية (مبرد)

$$COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - (T_L/T_H)}$$

Bassam Badran Damascus University

- **مقولة كلاسيوس *Clausius Statement* في القانون الثاني في الترموديناميك.**

قام كلاسيوس بطرح المقولة التالية

"من المستحيل إنشاء أي جهاز يعمل على دورة ترموديناميكية ولا ينتج أي مفعول سوى نقل الحرارة من المصدر المنخفض إلى المصدر العالي"

- العلاقة بين المبرد والمضخة الحرارية

$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

- تدريجية درجة الحرارة الترموديناميكية

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L}$$

- الشكل الرياضي للقانون الثاني في الترموديناميك

مبدأ تزايد الإنتروبي

$$(dS)_{iso} \geq 0$$

مبدأ تناقص طاقة جبس الحرة

$$(dG)_{T,P} \leq 0$$

Bassam Badran Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

القانون الثاني في الترموديناميك

1. يدعي شخص ما أنه يستطيع أن يرفع درجة حرارة كمية صغيرة من الماء إلى $(150℃)$ بواسطة استخدام بخار بضغط عال ودرجة حرارة $(120℃)$ من دون وجود محرك حراري أو تبريدي. هل هذا منطقي فسر ذلك ولماذا؟

2. محطة توليد كهرباء بخاري تعطي استطاعة قدرها $(600MW)$ ومردودها 40% وتبرد بواسطة نهر مجاور. حدد كمية الحرارة المطروحة إلى النهر وهل كمية الحرارة الفعلية هي أصغر أو أكبر من القيمة المحسوبة ولماذا.

3. يعطي محرك سيارة طاقة قدرها $(110hp)$ بمردود 28%. حدد كمية الوقود المستهلك إذا كان المحتوى الحراري للوقود هو $(19000\ Btu/lbm)$.

4. يقوم مبرد منزلي بمعامل أداء قدره 1.2 بإزالة كمية من الحرارة من غرفة البراد بمعدل $(60\ kJ/min)$. حدد 1) الطاقة الكهربائية المستهلكة في الضاغط و2) كمية الحرارة الممتصة من الغرفة.

5. يقوم مكيف منزلي بإزالة كمية حرارة وقدرها $(750\ kJ/min)$ بشكل مستقر في منزل ويستهلك طاقة كهربائية بمعدل $(6kW)$. حدد 1) معامل الأداء للمكيف و2) كمية الحرارة المطروحة إلى الوسط الخارجي.

6. تقوم مضخة حرارية بمعامل أداء 2.5 على تزويد منزل بطاقة قدرها $(60000Btu/h)$ حدد 1) كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة في الضاغط و2) كمية الحرارة الممتصة من الوسط الخارجي.

7. يعمل محرك كارنو الحراري بين مصدر حراري بدرجة حرارة $(1000K)$ ومصرف حراري بدرجة حرارة $(300K)$. بفرض كمية الحرارة التي تعطى إلى المحرك من المصدر الحراري هي $(800\ kJ/min)$ حدد 1) مردود المحرك و2) العمل الذي يعطيه المحرك.

Bassam Badran
Damascus University

8. يزود محرك كارنو الحراري بكمية من الحرارة وقدرها $(650\ kJ)$ ويطرح كمية من الحرارة إلى مصرف مناسب قدرها $(250\ kJ)$ بدرجة حرارة $(24℃)$. حدد 1) حرارة المصدر و2) المردود الحراري للمحرك.

9. يقوم براد بإزالة كمية من الحرارة قدرها $(300\ kJ/min)$ من الثلاجة للمحافظة على درجة حرارة مقدارها $(-8℃)$. إذا كانت درجة حرارة الهواء المحيط بالبراد $(25℃)$، حدد الطاقة الصغرى التي يحتاجها البراد للعمل.

10. يعمل مكيف منزلي بدروة كارنو العكوسة على إزالة كمية من الحرارة من منزل بمقدار $(750\ kJ/min)$ للمحافظة على درجة حرارة $(24℃)$. إذا كانت درجة حرارة المحيط $(35℃)$، حدد الطاقة التي يحتاجها المكيف.

11. تستعمل مضخة حرارية في المحافظة على درجة حرارة منزل عند $(22℃)$ باستجرار هذه الحرارة من الوسط الخارجي ذي درجة الحرارة $(2℃)$. يخسر المنزل طاقة إلى الوسط الخارجي بمعدل $(110\ MJ/h)$. بفرض أن المضخة تستهلك $(5\ kW)$ من الطاقة الكهربائية للقيام بهذا العمل. هل هذه المضخة قادرة على أداء العمل المطلوب منها.

الفصل السابع

Chapter Seven

الإنتروبي (مقياس العشوائية)

Entropy (Measure of Disorder)

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	الطاقة الحرة لهلمهولتس	J
c	الحرارة النوعية للأجسام الصلبة والسائلة	$kJ/kg\ K$
c_v	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$kJ/kg\ K$
c_p	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$kJ/kg\ K$
$c_{v,avg}$	الحرارة النوعية الوسطية عند حجم ثابت	$kJ/kg\ K$
$c_{p,avg}$	الحرارة النوعية الوسطية عند ضغط ثابت	$kJ/kg\ K$
$\bar{c}_{v,avg}$	الحرارة النوعية المولية الوسطية عند حجم ثابت	$kJ/kmol\ K$
$\bar{c}_{p,avg}$	الحرارة النوعية المولية الوسطية عند ضغط ثابت	J
G	الطاقة الحرة لجبس	J
H	الإنتالبي	kJ/kg
h	الإنتالبي النوعي	$kJ/kmol\ K$
h_s	الإنتالبي في العملية الإيزونتروبية	kJ/kg

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

h_a	الإنتالبي في العملية الحقيقية	kJ/kg
k	المعامل الأدياباتي	لا بعدي
ke	الطاقة الحركية النوعية	kJ/kg
m	الكتلة	kg
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	kg/sec
n	المعامل الإيزونتروبي	لا بعدي
P	الضغط	kPa أو bar
P_r	الضغط النسبي	لا بعدي
pe	الطاقة الكامنة النوعية	kJ/kg
Q	كمية الحرارة	J
Q_H	كمية الحرارة من المصدر الحراري	J
Q_L	كمية الحرارة إلى المصرف الحراري	J
q	كمية الحرارة النوعية	kJ/kg
δQ	كمية الحرارة بخطوة صغيرة	J
$\delta Q_{int,rev}$	كمية الحرارة بخطوة صغيرة بعملية معكوسة داخلياً	J

Bassam Badran Damascus University

ΔQ	التغيير في كمية الحرارة	J
ΔQ_i	التغيير في كمية الحرارة في مراحل متعددة	J
$\dot{Q}$	معدل التغيير في كمية الحرارة	W
$\dot{Q}_k$	معدل التغيير في كمية الحرارة بخطوات	W
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$kJ/kg\ K$
R_u	ثابت الغاز العام	$kJ/kmol\ K$
S	الإنتروبي	J/K
s	الإنتروبي النوعي	$kJ/kg\ K$
S_{in}	دخول الإنتروبي إلى النظام	J/K
$\dot{S}_{in}$	معدل دخول الإنتروبي إلى النظام	W/K
S_{out}	خروج الإنتروبي من النظام	J/K
$\dot{S}_{out}$	معدل خروج الإنتروبي من النظام	W/K
S_{heat}	إنتروبي كمية الحرارة	J/K
S_{work}	إنتروبي العمل	J/K
S_{mass}	إنتروبي الكتلة	J/K

Bassam Badran
Damascus University

S_{gen}	توليد الإنتروبي	J/K
$\dot{S}_{gen}$	معدل تغيير توليد الإنتروبي	W/K
$\bar{s}$	الإنتروبي بالنسبة إلى واحد مول	$kJ/kmol\ K$
S^o	الإنتروبي المرجعي عند حرارة نوعية متغييرة	J/K
$\bar{s}^o$	الإنتروبي المولي المرجعي عند حرارة نوعية متغييرة	$kJ/kmol\ K$
dS	التغيير في الإنتروبي بخطوة صغيرة	J/K
ΔS	التغيير في الإنتروبي بين حالتين	J/K
$\Delta S_{isolated}$	التغيير في الإنتروبي بين حالتين لنظام معزول	J/K
ΔS_{surr}	التغيير في الإنتروبي بين حالتين للمحيط	J/K
ΔS_{system}	التغيير في الإنتروبي لنظام ما	$J/\ K$
ΔS_{total}	التغيير في الإنتروبي الكلي	J/K
ΔS_i	التغيير في الإنتروبي بعدة مراحل	$kJ/kg\ K$
T	درجة الحرارة	K أو $°C$
T_H	درجة الحرارة المصدر الحراري	K أو $°C$
T_L	درجة الحرارة المصرف الحراري	K أو $°C$

Bassam Badran
Damascus University

T_o	درجة الحرارة الثابتة	K أو °C
T_k	درجة الحرارة في مراحل من كمية الحرارة	K أو °C
T_i	درجة الحرارة في عدة مراحل	K أو °C
U	الطاقة الداخلية	J
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
v_r	الحجم النسبي	لا بعدي
V	السرعة	m/s
V_s	السرعة الإيزونتروبية	m/s
V_a	السرعة الحقيقية	m/s
W	العمل	J
W_b	عمل الحدود	J
W_a	العمل الحقيقي	J
W_s	العمل الإيزونتروبي	J
$\delta W_{tech,rev,out}$	العمل التقني العكوس	J

Bassam Badran Damascus University

$\delta W_{int,rev,b}$	عمل الحدود في عملية عكوسة داخلياً بخطوة صغيرة	J
$\dot{w}$	معدل تغيير العمل	W
η_T	المردود الإيزونتروبي للعنفة	لا بعدي
η_C	المردود الإيزونتروبي للضاغط أو المضخة	لا بعدي
η_N	المردود الإيزونتروبي للأبواق	لا بعدي

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

لقد تعرفنا في الفصل السابق على القانون الثاني في الترموديناميك وقمنا بتطبيقه على عدة دورات عامة وأجهزة هندسية تعمل دورياً. يقوم القانون الثاني في الترموديناميك على تعريف خاصية (بارامتر) جديدة تسمى الإنتروبي *Entropy*. الإنتروبي هو تعبير رياضي يربط بين كمية الحرارة المنتقلة من مصدر حراري ما ودرجة حرارته. لا يمكن فهم المعنى الفيزيائي لهذه الخاصية من دون الخوض في المفهوم الميكروي للمادة.

سوف نتحدث في هذا الفصل عن علاقة عدم التساوي لكلاسيوس *Clausius Inequality* التي تفسر ظهور هذه الخاصية في العمليات الدورية. وسنعرف مبدأ تزايد الإنتروبي بصيغة القانون الثاني في الترموديناميك. وسنقوم بحساب التغيير في الإنتروبي في الغازات المثالية والعمليات الدورية وغير الدورية ونشرح تلك العمليات على مخططات $(T-s)$ و $(h-s)$. وسنقوم أخيراً بحساب المراديد الإيزونتروبية في الأجهزة الميكانيكية مثل العنفات والضواغط والأقنية.

الفائدة العلمية من الفصل

إن الأهداف من هذا الفصل هي:

- ✓ تطبيق القانون الثاني في الترموديناميك على العمليات العامة.
- ✓ تعريف الإنتروبي كحالة ترموديناميكية يمكن حسابها من خلال القانون الثاني في الترموديناميك.
- ✓ استنتاج مبدأ تزايد الإنتروبي.
- ✓ تحديد التغيير في الإنتروبي للمواد وحيدة الطور والمواد غير القابلة للانضغاط والغازات المثالية خلال عملية ما.
- ✓ التحدث عن العمليات الإيزونتروبية *Isentropic Processes* وعلاقاتها.
- ✓ اشتقاق معادلة العمل التقني (العمل المستقر العكوس).

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ تحديد المراديد الإيزونتروبية *Isentropic Efficiencies* في الأجهزة الميكانيكية.
- ✓ تطبيق التوزان في الإنتروبي *Entropy Balance* في أنظمة مختلفة.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.7	مفهوم الإنتروبي.	406
2.7	مبدأ تزايد الإنتروبي.	408
3.7	العلاقة بين درجة الحرارة والتغيير في الإنتروبي.	414
4.7	مخطط $(T-s)$ ومخطط مولبير $(h-s)$.	417
5.7	التغيير في الإنتروبي في المواد وحيدة الطور.	420
6.7	التغيير في الإنتروبي في الغازات المثالية.	429
7.7	التغيير في الإنتروبي في المواد الصلبة والسائلة.	435
8.7	التغيير في الإنتروبي في الأنظمة المغلقة.	438
1.8.7	العملية الإيزوخورية.	438
9.7	التغيير في الإنتروبي في الأنظمة المفتوحة.	440
1.9.7	العملية الإيزوبارية.	440
2.9.7	العملية الإيزوثرمية.	442
3.9.7	العملية البوليتروبية.	442
10.7	المراديد الإيزونتروبية في الأجهزة ذات الجريانات المستقرة.	
1.10.7	المردود الإيزونتروبي للعنفات.	
2.10.7	المردود الإيزونتروبي للضواغط والمضخات.	
3.10.7	المردود الإيزونتروبي للأبواق والنواشر.	
11.7	التوازن في الإنتروبي.	
1.11.7	توازن الإنتروبي في الأنظمة المغلقة.	
2.11.7	توازن الإنتروبي في الأنظمة المفتوحة.	
	ملخص الفصل.	

Bassam Badran
Damascus University

مسائل غير محلولة.

نهاية الفصل.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

1.7 مفهوم الإنتروبي.

قال كارنو عندما كان يقوم بإجراء إختبارات على محركه البخاري *Steam Engine* إن المحرك يجب أن يطرح كمية معينة من الحرارة إلى الوسط الخارجي (مصرف حراري) من أجل أن يقوم هذا المحرك البخاري بإنتاج عمل صاف ولكن لم يذكر مقدار كمية الحرارة التي يجب أن تُطرح لهذا السبب إلى الوسط الخارجي.

جاء رودولف كلاسيوس في عام 1850 مؤكداً لنظرية كارنو عندما إستخدم قانون انحفاظ الطاقة وقال إن كمية الحرارة تتدفق من الوسط ذي درجة الحرارة العالية إلى الوسط ذي درجة الحرارة المنخفضة ولاحظ كلاسيوس أيضاً أن نسبة كالفن $(Q_H/Q_L = T_H/T_L)$ في المحركات العكوسة غير محققة لإنه عندما تتدفق كمية معينة **وثابتة** من الحرارة مثلاً $(10kJ)$ من منبع حراري ذي درجة حرارة $(350K)$ إلى مصرف حراري بدرجة حرارة $(300K)$ ومن دون وجود محرك حراري يكون

$$\frac{Q_H}{T_H} \neq \frac{Q_L}{T_L}$$

لأن

$$\frac{10}{350} < \frac{10}{300}$$

$$\frac{Q_H}{T_H} < \frac{Q_L}{T_L}$$

أي أن نسبة كمية الحرارة إلى درجة الحرارة تزداد مع **الاتجاه الطبيعي لحركة كمية الحرارة** في عملية عكوسة وبالتالي

$$\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} \leq 0$$

Bassam Badran
Damascus University

إذا فرضنا أن عملية انتقال الحرارة تمت بين منبع حراري ذي درجة حرارة (T_1) ومصرف حراري ذي درجة حرارة (T_2) وبخطوات صغيرة جداً بحيث تكون درجة الحرارة خلال هذه الخطوات ثابتة وغير متغيرة فيمكن أن تكتب العلاقة السابقة بالشكل

$$\sum\left(\frac{\Delta Q_i}{T_i}\right) \leq 0$$

هنا يجب الأخذ بعين الاعتبار عرف الاتجاهات في قيم كمية الحرارة حتى تكون العلاقة السابقة محققة. الآن إذا افترضنا أن العملية السابقة هي دورة ترموديناميكية فيتحول المجموع إلى تكامل وتصبح العلاقة

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \qquad (1\text{-}7)$$

العلاقة $(7-1)$ هي علاقة عدم المساواة لكلاسيوس *Clausius Inequality*. تنطبق هذه العلاقة على الدورات العكوسة وغير العكوسة. ففي العمليات العكوسة داخلياً تكون

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int,rev} = 0 \qquad (2\text{-}7)$$

وفي العمليات غير العكوسة تكون

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \qquad (3\text{-}7)$$

وجد كلاسيوس في عام 1865 أن نسبة كمية الحرارة إلى درجة الحرارة تتعلق فقط بالحالة التي يوجد فيها وسيط التشغيل وليس بالمسار الذي يتبعه ذاك الوسيط على الرغم من أن كمية الحرارة هي تابع للمسار. قام كلاسيوس بنشر هذه الخاصية في ورقة بحث وأطلق على هذه النسبة باسم الإنتروبي *Entropy* وأعطاها الرمز $(S, kJ/K)$ وإنهى الورقة كما يلي

- ✓ الطاقة في الكون ثابتة (القانون الأول في الترموديناميك).
- ✓ الإنتروبي في الكون يتزايد باستمرار (القانون الثاني في الترودیناميك).

Bassam Badran Damascus University

الإنتروبي هي كلمة يونانية تعني التحولات *Transformation*. التغيير في الإنتروبي في خطوة صغيرة بشكل عكوس داخلياً هو

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int,rev}$$

حيث $(\delta Q, kJ)$ هي كمية الحرارة المنتقلة و (T, K) درجة حرارة مصدر كمية الحرارة. التغيير في الإنتروبي دائماً عملية عكوسة داخلياً ما بين الحالة الابتدائية والحالة النهائية هو

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int,rev} \qquad (4\text{-}7)$$

من أجل معرفة التغيير في الإنتروبي يجب أن نجد العلاقة بين كمية الحرارة (δQ) ودرجة حرارة المصدر الحراري (T). عندما تكون درجة حرارة المصدر ثابتة (خزان حراري) تتحول العلاقة السابقة $(4-7)$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \left(\frac{Q}{T}\right) \qquad (kJ/K) \qquad (5\text{-}7)$$

أي أن التغيير في الإنتروبي في عملية إيزوثرمية تساوي كمية الحرارة المقدمة خلال هذه العملية مقسوماً على درجة الحرارة الإيزوثرمية.

2.7 مبدأ تزايد الإنتروبي *The Increase of Entropy Principle*.

بفرض إنه توجد لدينا دورة تتألف من عمليتين مختلفتين. العملية الأولى هي $(A = 1 \rightarrow 2)$ ونعدها عملية عشوائية (عكوسة أو غير عكوسة) والعملية الثانية هي $(B = 2 \rightarrow 1)$ ونعدها عملية عكوسة داخلياً كما في الشكل $(1-7)$. تقول علاقة عدم التساوي لكلاسيوس $(1-7)$ إن كمية الحرارة الكلية في الدورة مقسمة على درجة الحرارة تكون أصغر أو تساوي الصفر

Bassam Badran Damascus University

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int,rev} \leq 0$$

من العلاقة (7−4) يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + (S_1 - S_2) \leq 0$$

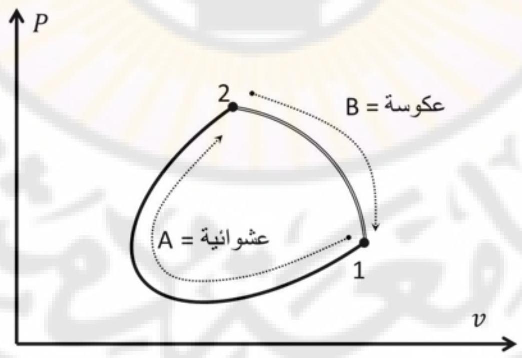
أي أن التغيير في الإنتروبي *Entropy Change* بين حالتين هو

$$(S_2 - S_1) \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \qquad (6\text{-}7)$$

أو يمكن كتابتها على الشكل

$$dS \geq \left(\frac{\delta Q}{T}\right) \qquad (kJ/K)$$

إشارة **التساوي** في العلاقة (7−6) تعبر عن العمليات العكوسة داخلياً وإشارة **الأكبر** تعبر عن العمليات غير العكوسة.



الشكل (7−1) مبدأ تزايد الإنتروبي.

Bassam Badran Damascus University

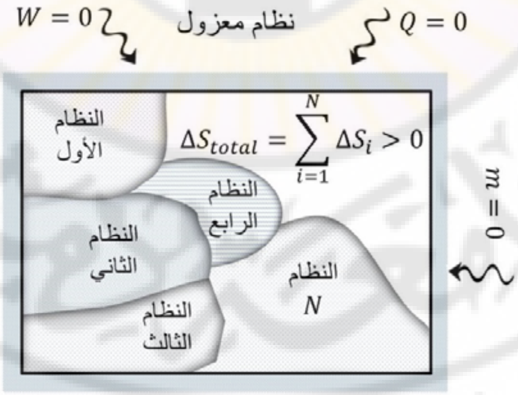
يمكن تحويل علاقة المتراجحة في العلاقة (7−6) إلى علاقة تساوي بإضافة بارامتر آخر يسمى بارامتر توليد الإنتروبي *Entropy Generation* ويعطى الرمز (S_{gen}) والذي يعبر عن الفعل غير العكوس خلال العملية.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right) + S_{gen} \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right) \qquad (7\text{-}7)$$

التوليد في الإنتروبي هو دائما **موجب** في العمليات غير العكوسة و صفر في العمليات العكوسة. من أجل **نظام مغلق معزول** تتحول المعادلة السابقة (7−7) إلى

$$\Delta S_{isolated} \geq 0 \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right) \qquad (8\text{-}7)$$

هذه المعادلة تقول إن التغيير في الإنتروبي هو دائما في **تزايد** في العمليات غير العكوسة وتساوي الصفر في العمليات العكوسة ولا ينقص أبداً. العلاقة (7−8) هي الصيغة الرياضية الأولى **للقانون الثاني في الترموديناميك وتعرف باسم مبدأ تزايد الإنتروبي** ***Increase of Entropy Principle***. نجد أيضاً إنه في غياب انتقال الحرارة إلى النظام فإن تزايد الإنتروبي يعود فقط إلى العمليات غير العكوسة (الضياعات) في حركة النظام. يمكن أن يكون النظام المعزول مؤلفاً من:



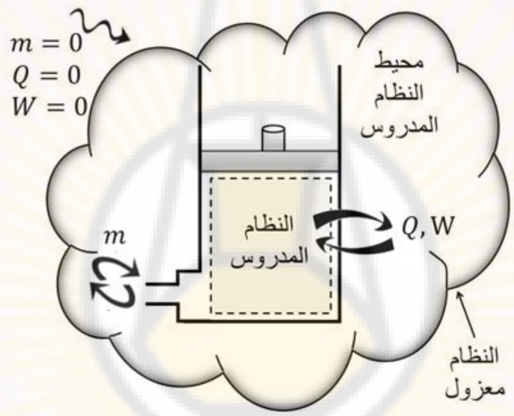
الشكل (7−2) نظام معزول مؤلف من أنظمة مختلفة.

Bassam Badran Damascus University

✓ مجموعة من الأنظمة كما في الشكل (7−2) وتكون علاقة الإنتروبي لهذا النظام المعزول هي

$$\Delta S_{total} = \sum_{N=1}^{i} \Delta S_i \geq 0$$

نجد من العلاقة السابقة أن التغيير في الإنتروبي يساوي مجموع التغييرات في الأنظمة المؤلفة للنظام. نلاحظ أن التغيير في الإنتروبي قد يكون **سالباً** لبعض الأنظمة و**موجباً** لبعضها ولكن التغيير **الكلي** في الإنتروبي هو دائماً أكبر أو يساوي الصفر.



الشكل (7−3) نظام معزول يحتوي على نظام أسطوانة – مكبس ومحيط.

✓ النظام المراد دراسته ومحيطه كما في الشكل (7−3) وتكون علاقة الإنتروبي لهذا النظام المعزول هي

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{surr} \geq 0$$

وعندما تكون كمية الحرارة المتبادلة بين النظام المدروس ومحيطه مهملة أي أن التغيير في الإنتروبي الناتج عن انتقال كمية الحرارة عبر حدود النظام مهملة، يكون التغيير في الإنتروبي الكلي مساوياً فقط إلى توليد الإنتروبي الناتج عن الضياعات.

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta S = S_2 - S_1 = S_{gen}$$

وتتحول علاقة التغيير في الإنتروبي إلى

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{surr} = S_{gen} \geq 0$$

يمكن أن نلخص ماسبق كما يلي

- العمليات تحدث في اتجاه واحد فقط *Only in one direction* وليس في كل الاتجاهات وهي في اتجاه تزايد الإنتروبي (توليد الإنتروبي).
- الإنتروبي هو بارامتر غير محفوظ أي لا يوجد قانون لانحفاظ الإنتروبي. يكون الإنتروبي ثابتاً في العمليات العكوسة $(S_2 = S_1)$ فقط ويزداد في العمليات الحقيقية $(S_2 - S_1 \geq 0)$.
- تنقص قدرة الأجهزة على الأداء بسبب وجود العمليات غير العكوسة (ما يسمى الضياعات) وتوليد الإنتروبي هو مقياس لهذه الضياعات.

المثال التطبيقي 7-1 – توليد الإنتروبي خلال عمليات انتقال الحرارة.

يقوم مصدر حراري بدرجة $(800K)$ بخسارة كمية معينة من الحرارة بمقدار $(2000\ kJ)$ إلى مصرف حراري بدرجة حرارة 1) $(500K)$ في العملية الأولى و2) $(750K)$ في العملية الثانية. حدد أياً من العمليات السابقة الأكثر ضياعاً.

الفرضيات: تنتقل كمية الحرارة بين المصدر والمصرف بشكل عكوس داخلياً أي لا يوجد ضياعات ناتجة عن قوى احتكاك أوقوى آخرى وبالتالي فإن التغيير في الإنتروبي ناتج عن انتقال الحرارة فقط.

التحليل: بالنسبة إلى الحالة الأولى عندما تكون درجة حرارة المصرف $(500K)$ يكون التغيير في الإنتروبي هو

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta S_{source} = \frac{Q_{source}}{T_{source}}$$

$$\Delta S_{source} = \frac{-2000\ kJ}{800\ K}$$

$$\Delta S_{source} = -2.5\ kJ/K$$

إشارة السالب في المعادلة السابقة تدل على أن كمية الحرارة تخرج من المصدر الحراري وبحسب عرف الاتجاهات تكون سالبة والتغيير في الإنتروبي يكون سالباً.

$$\Delta S_{sink} = \frac{Q_{sink}}{T_{sink}}$$

$$\Delta S_{sink} = \frac{+2000\ kJ}{500\ K}$$

$$\Delta S_{sink} = +4.0\ kJ/K$$

بفرض أن النظام المؤلف من مصدر ومصرف هو نظام معزول نجد أن

$$S_{gen,1} = \Delta S_{total} = \Delta S_{source} + \Delta S_{sink}$$

$$S_{gen,1} = -2.5 + 4.0 = 1.5\ kJ/K$$

خلال هذه العملية المعكوسة داخلياً نجد أن توليد الإنتروبي هو $(1.5\ kJ/K)$.

بالنسبة إلى الحالة الثانية عندما تكون درجة حرارة المصرف $(750K)$ يكون التغيير في الإنتروبي هو

$$\Delta S_{source} = \frac{Q_{source}}{T_{source}}$$

$$\Delta S_{source} = \frac{-2000\ kJ}{800\ K} = -2.5\ kJ/K$$

$$\Delta S_{sink} = \frac{Q_{sink}}{T_{sink}}$$

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta S_{sink} = \frac{+2000\ kJ}{750\ K} = +2.7\ kJ/K$$

بفرض أن النظام المؤلف من مصدر ومصرف هو نظام معزول نجد أن

$$S_{gen,2} = \Delta S_{total} = \Delta S_{source} + \Delta S_{sink}$$

$$S_{gen,2} = -2.5 + 2.7 = 0.2\ kJ/K$$

خلال هذه العملية المعكوسة داخلياً نجد أن توليد الإنتروبي هو ($0.2\ kJ/K$). في العملية الثانية توليد الإنتروبي أقل وبالتالي العملية الأولى ($S_{gen,1} > S_{gen,2}$) هي بضياعات أكبر.

3.7 العلاقة بين درجة الحرارة والتغير في الإنتروبي.

تسمى العلاقة بين درجة الحرارة والتغيير في الإنتروبي بعلاقة (Tds).

- ✓ العلاقة (Tds) في العملية العكوسة داخلياً.

عندما تكون cالعملية عكوسة داخلياً فإن الشكل التفاضلي لمعادلة القانون الأول في الترموديناميك هي

$$\delta Q_{int,rev} - \delta W_{int,rev,b} = dU \qquad (9\text{-}7)$$

يمكن تعويض كمية الحرارة بتعريف الإنتروبي والعمل بعمل الحدود في نظام مغلق أو عمل تدفق في نظام مفتوح أي

$$TdS = dU + PdV \qquad (10\text{-}7)$$

بالنسبة إلى واحدة الكتل نجد أن المعادلة تتحول

$$Tds = du + Pdv$$

Bassam Badran Damascus University

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T} \qquad (11\text{-}7)$$

العلاقة السابقة تسمى بعلاقة (Tds). باستخدام مفهوم الإنتالبي

$$dH = dU + d(PV)$$

$$dH = dU + PdV + VdP$$

تتحول المعادلة $(7-10)$

$$TdS = dH - VdP \qquad (12\text{-}7)$$

بالنسبة إلى واحدة الكتل تتحول المعادلة إلى

$$Tds = dh - vdP$$

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T} \qquad (13\text{-}7)$$

✓ <u>العلاقة (Tds) في العملية الحقيقية أو غير العكوسة.</u>

عندما تكون العملية حقيقية تتحول معادلة (Tds) إلى الشكل

$$dU + PdV - T * dS < 0 \quad (kJ) \qquad (14\text{-}7)$$

العلاقة $(7-14)$ هي علاقة مهمة في معرفة ما إذا كانت العملية التي تحدث هي عملية تلقائية *Spontaneous Process* أم لا. الحالات التي يمكن مشاهدتها من هذه المعادلة هي

i. عندما يكون النظام معزولاً أي $(Q = W = 0)$ تتحول المعادلة إلى

$$dS > 0 \quad (kJ) \qquad (15\text{-}7)$$

أي ان النظام المعزول يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في الإنتروبي أكبر من الصفر وهذا كان تعريف القانون الثاني في الترموديناميك.

Bassam Badran Damascus University

ii. عندما تكون العملية أيزخورية $(V = const)$ وإيزونتروبية $(S = const)$ فتتحول المعادلة إلى

$$dU < 0 \qquad (kJ) \qquad (16\text{-}7)$$

أي أن النظام يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في الطاقة الداخلية في الحالة النهائية أصغر من الحالة الابتدائية. نشاهد هذه الظاهرة في الميكانيك الهندسي عندما تتحرك عربة من فوق سفح جبل إلى أسفله حيث تكون الطاقة الداخلية والممثلة بالطاقة الكامنة في الحالة الثانية أقل منها في الحالة الأولى. من الصعب في الترموديناميك أن نقوم بتثبيت الإنتروبي لأن ذلك يدل على أن كافة العمليات مثالية ولا يوجد توليد في الإنتروبي.

iii. عندما تكون العملية إيزوبارية $(P = const)$ وإيزونتروبية $(S = const)$ تتحول المعادلة إلى

$$dU + d(PV) - T * dS < 0$$

$$dH < 0 \qquad (kJ) \qquad (17\text{-}7)$$

أي أن النظام يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في الإنتالبي في الحالة النهائية أصغر من الحالة الابتدائية. هذه الحالة تطابق الحالة السابقة من حيث صعوبة التطبيق.

iv. عندما تكون العملية أيزخورية $(V = const)$ وإيزوثرمية $(T = T_{sur} = const)$ بدرجة حرارة المحيط تتحول المعادلة إلى

$$d(U - TS) < 0 \qquad (kJ)$$

هنا نعرف حالة جديدة أو بارامتراً جديداً يسمى بالطاقة الحرة لهلمهولتس *Helmholtz Free Energy* ويعطى الرمز (A) وتتحول المعادلة إلى

Bassam Badran
Damascus University

$$d(A) < 0 \qquad (kJ) \qquad\qquad (18\text{-}7)$$

أي أن النظام يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في قيمة هلمهولتس أصغر من الصفر.

v. عندما تكون العملية إيزوبارية $(P = P_{ext} = const)$ بقيمة الضغط الخارجي وإيزوثرمية $(T = T_{sur} = const)$ بدرجة حرارة المحيط تتحول المعادلة إلى

$$d(H - TS) < 0 \qquad (kJ)$$

هنا نعرف حالة جديدة أو بارامتراً جديداً يسمى بالطاقة الحرة لجبس *Gibbs Free Energy* ويعطى الرمز (G) وتتحول المعادلة إلى

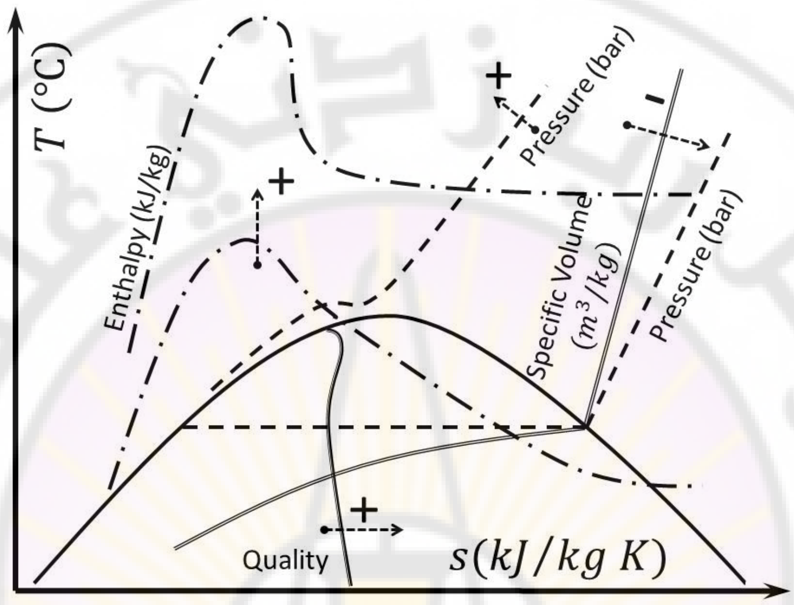
$$d(G) < 0 \qquad (kJ) \qquad\qquad (19\text{-}7)$$

أي أن النظام يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في قيمة جبس أصغر من الصفر. هذا التابع هو مهم جداً وسنتعرف على فوائده عندما ندرس العلاقات الترموديناميكية والترموديناميك الكيميائي لاحقاً.

4.7 مخطط $(T - s)$ ومخطط موليير $(h - s)$.

يمكن من خلال مخططات $(T - s)$ و $(h - s)$ إيجاد قيم الإنتروبي بتحديد الحالة على هذه المخططات. الشكل (7−4) يعطي تغيير البارامترات بدلالة درجة الحرارة والإنتروبي ويسمى مخطط $(T - s)$. يمكن الإستفادة من مخطط $(T - s)$ في معرفة التغييرات في الإنتروبي بدلالة درجة الحرارة خلال عملية ما وبالتالي الضياعات التي تحصل في تلك العملية. يجب الانتباه إلى أن مخطط $(T - s)$ يعطي كمية الحرارة المقدمة أو المطروحة في عملية ما من خلال حساب المساحة المحصورة بين تلك العملية ومحور الإنتروبي.

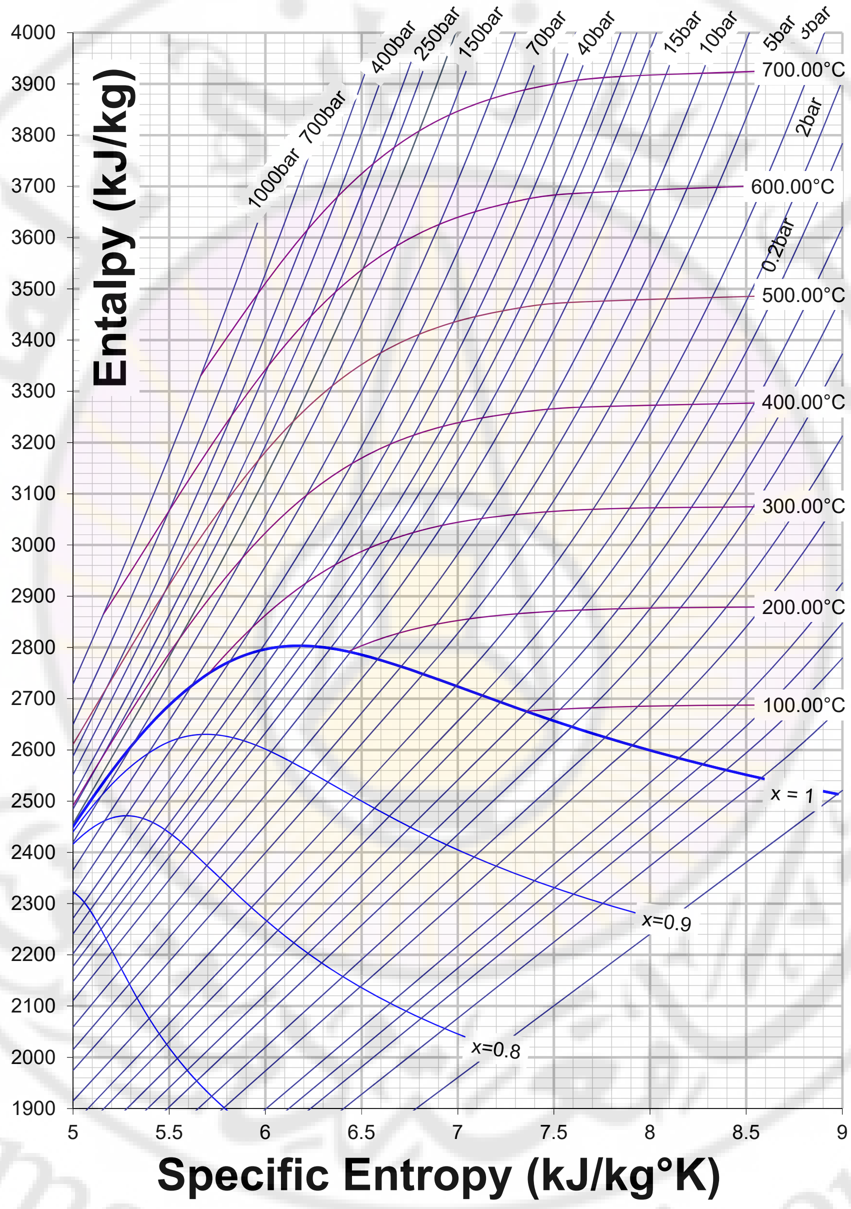
Bassam Badran
Damascus University



الشكل (4–7) مخطط $(T - s)$.

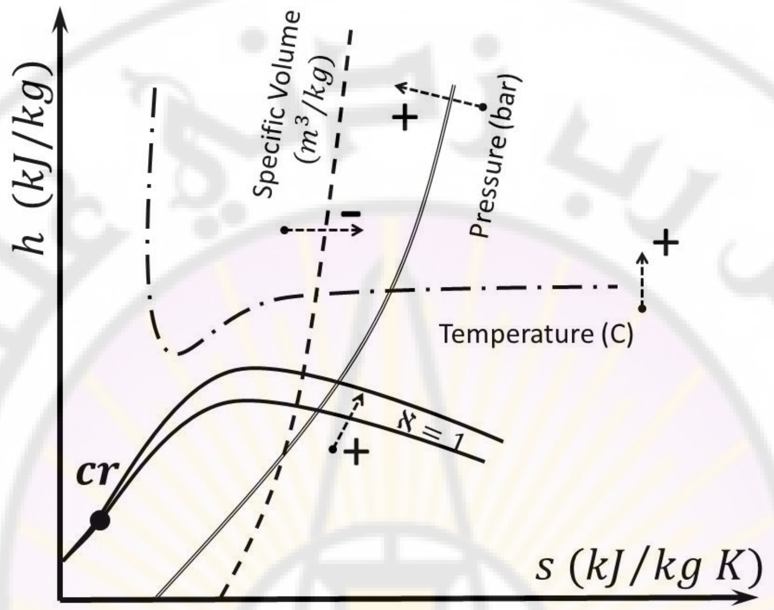
الشكل (5–7) بشكله الحقيقي بحسب بارمترات *IAPWS-IF97* والتمثيلي يعطي تغيير البارامترات بدلالة الإنتالبي (المحتوى الحراري) والإنتروبي ويسمى مخطط $(h - s)$ أو مخطط موليير *Mollier Diagram* نسبة إلى العالم الألماني الذي وضعه في عام 1904.

مخطط موليير يربط بين القانون الأول في الترموديناميك (بارامتر الإنتالبي) والقانون الثاني في الترموديناميك (بارامتر الإنتروبي) حيث يمكن معرفة الطاقة المطلوبة (او المصروفة) في عملية ما وكمية الضياعات الموافقة لهذه العملية.



الشكل (5−7) مخطط موليير $(h-s)$ بحسب بارامترات *IAPWS-IF97*.

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (5−7) مخطط موليير $(h - s)$ العام.

5.7 <u>التغير في الإنتروبي في المواد وحيدة الطور</u>.

الإنتروبي كما وصف سابقاً هو خاصة أو بارامتر يمكن إيجاده بمعرفة حالة المادة. ومن أجل جدولة قيم الإنتروبي لكل حالة يجب إعتماد مرجعية معينة في حساب قيم الإنتروبي. هذه المرجعية هي قيمة الإنتروبي لوسيط التشغيل عندما تساوي الصفر. هنا يجب الذكر بأن **<u>القانون الثالث في الترموديناميك</u>** يقول أن

الإنتروبي لمادة متجانسة كرستالية يساوي الصفر عندما تكون تلك المادة بدرجة حرارة الصفر المطلق.

The Entropy of a perfect crystal, at absolute zero Kelvin is exactly equal to zero.

Bassam Badran Damascus University

يعطى إنتروبي الماء المشبع في جداول بخار الماء عند درجة حرارة (0.01℃) القيمة صفر وتكون القيمة الموجعية في قياس قيم إنتروبي الماء أيضا يعطى إنتروبي السائل المشبع لغاز الفريون ($134A$) عند درجة حرارة (−40℃) القيمة صفر وتكون القيمة الموجعية في قياس قيم إنتروبي غاز الفريون ($134A$). قيم الإنتروبي تحت هذه المرجعيات تكون سالبة.

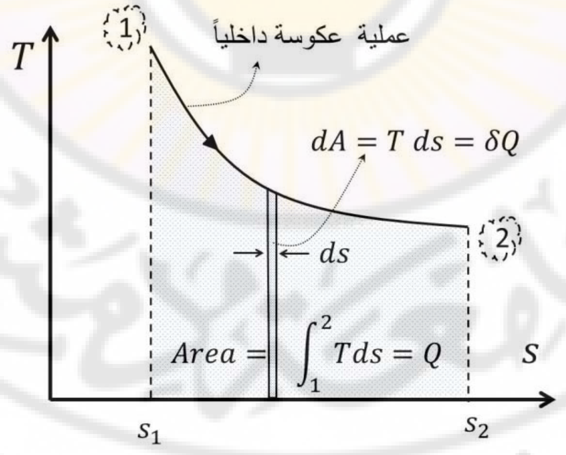
يعطى التغيير في الإنتروبي لخطوة صغيرة ولنظام مغلق يقوم بعملية عكوسة داخلياً وذات كتلة (m, kg) بالعلاقة

$$\delta Q_{int,rev} = T\, dS \quad (kJ) \tag{20-7}$$

بمكاملة علاقة الإنتروبي لهذه العملية العكوسة تكون كمية الحرارة هي

$$Q_{int,rev} = \int_1^2 T dS \qquad (kJ) \tag{21-7}$$

أي أن كمية الحرارة في عملية عكوسة داخلياً تساوي المساحة المحصورة بين منحني العملية ومحور الإنتروبي على مخطط $(T - s)$ كما هو واضح في الشكل (6−7).



الشكل (6−7) المساحة المحصورة تحت منحني عملية ما ومحور الإنتروبي.

Bassam Badran
Damascus University

عندما تكون العملية إيزوثرمية (درجة الحرارة ثابتة) نجد أن العلاقة (7−21) إلى

$$Q_{int,rev} = T\,\Delta S = m * T * \Delta s = m * T * (s_2 - s_1) \quad (kJ) \qquad (22\text{-}7)$$

وتكون كمية الحرارة النوعية

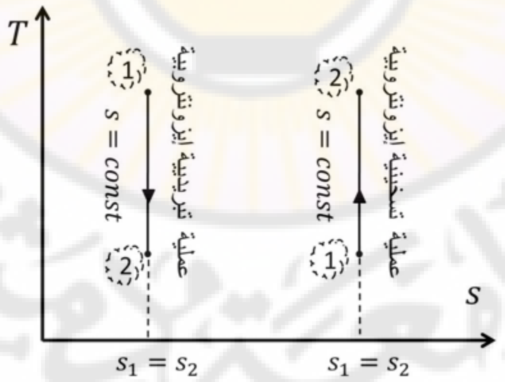
$$q_{int,rev} = T * \Delta s = T * (s_2 - s_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (23\text{-}7)$$

تعرف العملية الإيزونتروبية على إنها عملية أدياباتية وعكوسة داخلياً يبقى فيها بارامتر الإنتروبي ثابتاً

$$\Delta s = 0$$

$$s_2 = s_1 \qquad (kJ/kg\,K) \qquad (24\text{-}7)$$

إن العملية الإيزونتروبية (الأدياباتية العكوسة) تمثل بخط عامودي على محور الإنتروبي كما في الشكل (7−7).



الشكل (7−7) العملية الإيزونتروبية (ادياباتية عكوسة) على مخطط ($T - s$).

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 7–2 – التغيير في الإنتروبي لمادة ضمن خزان.

خزان صلب يحتوي على $(5\,kg)$ من غاز الفريون *134A* بدرجة حرارة أولية $(20°C)$ وضغط $(140\,kPa)$. يبرد الوسيط وهو يخلط حتى يهبط ضغطه إلى $(100\,kPa)$. حدد تغيير الإنتروبي خلال هذه العملية.

الفرضيات: الخزان صلب وبالتالي النظام مغلق بحجم ثابت و $(v_1 = v_2)$.

التحليل: لتحديد التغيير في الإنتروبي يجب أن نعرف قيم الإنتروبي في كلتا الحالتين.

الحالة الأولى ذات البارامترات $(20°C)$ و$(140\,kPa)$ ومن جداول الإشباع بدلالة درجة الحرارة نجد أنه عند $(20°C)$ لغاز الفريون $(134A)$ يكون ضغط الإشباع

$$P_{sat@T=20°C} = 571.6\,kPa > P = 140\,kPa$$

أي أن الحالة هي بخار محمص. من جداول البخار المحمص نجد أن

$$s_1 = 1.0624\,kJ/kgK$$

$$v_1 = v_2 = 0.16544\,m^3/kg$$

في الحالة الثانية يكون الضغط $(100\,kPa)$ ومن جداول الإشباع بدلالة الضغط نجد أن

$$v_2 = 0.16544\frac{m^3}{kg}$$

أي

$$v_f = 0.0007259 < v_2 = 0.16544\,m^3/kg < v_g = 0.19254$$

أي أن غاز الفريون تحول إلى مزيج سائل – بخار ويجب تحديد كسر الجفاف من أجل حساب قيمة الإنتروبي في هذه الحالة

$$\aleph = \frac{v_2 - v_f}{v_g - v_f}$$

$$\aleph = \frac{0.16544 - 0.0007259}{0.19254 - 0.0007259}$$

Bassam Badran Damascus University

$$\aleph = 0.859$$

$$s_2 = s_f + \aleph * (s_v - s_f)$$

$$s_2 = 0.07188\ kJ/kgK + 0.859 * (0.87995) kJ/kgK$$

$$s_2 = 0.8278\ kJ/kgK$$

التغيير في الإنتروبي

$$\Delta S = m * \Delta s = m(s_2 - s_1)$$

$$\Delta S = 5kg * (0.8278 - 1.0624) kJ/kg\ K$$

$$\Delta S = -1.173\ kJ/K$$

مناقشة.

انتقل وسيط التشغيل من بخار محمص إلى مزيج سائل بخار أي إنه خسر كمية من الحرارة وبالتالي العملية هي عملية تبريدية.

كمية الحرارة في هذه العملية التبريدية تخرج من النظام وهي سالبة وهذا مايؤكده التغيير في الإنتروبي. لا يمكن أن نحسب كمية الحرارة من العلاقة

$$Q = T * \Delta S$$

لأن درجة الحرارة غير ثابتة. يمكن تحديد كمية الحرارة باستخدام مخطط $(T - s)$ من خلال تحديد الحالة الأولى ذات البارامترات $(20°C)$ و$(140\ kPa)$ والهبوط إلى الحالة الثانية الموصفة بالضغط $(100\ kPa)$على منحني ثبات الحجم النوعي $(v_1 = v_2)$ ورسم العملية بين الحالتين وحساب مساحة المنطقة المحصورة بين منحني العملية الإيزوخورية ومحور الإنتروبي على المخطط. تحسب أيضاً كمية الحرارة من القانون الأول في الترموديناميك بالشكل

$$Q = \Delta U = m\ (u_2 - u_1) kJ$$

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 7–3 – التغيير في الإنتروبي لمادة بضغط ثابت.

أسطوانة – مكبس تحتوي على $(3\ lbm)$ من ماء بشكل سائل مضغوط وبضغط $(20\ psia)$ وبدرجة حرارة أولية $(70°F)$. يسخن الماء تحت ضغط ثابت مع إضافة $(3450\ Btu)$ من الحرارة. حدد تغيير الإنتروبي خلال هذه العملية.

الفرضيات: النظام ذو حدود متغيرة و $(P_1 = P_2)$.

التحليل: لتحديد التغيير في الإنتروبي يجب حساب قيم الإنتروبي في كل حالة.

في الحالة الأولى يكون الماء بشكل سائل مضغوط ذي ضغط $(20\ psia)$ و درجة حرارة $(70°F)$ ومن جداول الماء نجد أن

$$s_1 = s_{f@70°F} = 0.07459\ Btu/lbm\ R$$

$$h_1 = h_{f@70°F} = 38.155\ Btu/lbm$$

يحدد إنتالبي الحالة الثانية من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على النظام فنجد أن

$$Q_{in} - W_b = \Delta U$$

$$Q_{in} = \Delta H$$

$$Q_{in} = m(h_2 - h_1)$$

بتعويض الحالة الأولى في القانون الأول نجد أن

$$3450\ Btu = (3\ lbm)(h_2 - 38.08)$$

$$h_2 = 1188.1\ Btu/lbm$$

من جداول الإشباع بدلالة الضغط وعند ضغط ثابت $(20\ psia)$ نجد أن الحالة الثانية نجد أن الماء تحول إلى بخار محمص وأصبحت القيم للحالة الثانية

$$s_2 = 1.7761\ Btu/lbm\ R$$

Bassam Badran Damascus University

$$T_2 = 291.15\ °\text{F} = 750.82\ R$$

بالتعويض في علاقة التغيير في الإنتروبي نجد أن

$$\Delta S = m * \Delta s = m(s_2 - s_1)$$

$$\Delta S = 3\ lbm * (1.7761 - 0.07459)\frac{Btu}{lbm}R$$

$$\Delta S = 5.105 Btu/lbm\ R$$

مناقشة:

الإشارة الموجبة هي دلالة على أن العملية يزداد فيها الإنتروبي لأن الحرارة تضاف إلى النظام المدروس.

<u>المثال التطبيقي 7–4 – التغير في الإنتروبي لمادة ضمن ضغط ثابت.</u>

يدخل بخار ماء على عنفة أدياباتية بضغط ($5\ MPa$) ودرجة حرارة ($450°C$) ويخرج بضغط ($1.4\ MPa$). حدد قيمة العمل الناتج عن العنفة بالنسبة إلى واحدة الكتل (العمل النوعي) باعتبار أن العملية عكوسة.

الفرضيات: 1) يتمدد البخار ضمن العنفة بشكل أدياباتي عكوس و2) الطاقة الحركية والكامنة مهملة و3) الجريانات مستقرة.

التحليل: لتحديد العمل المقدم من قبل العنفة نقوم بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على النظام

$$\left(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}e\right) - \left(\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}e\right) = dE_{cv}/dt$$

حيث

$$e = h + ke + pe$$

وقانون انحفاظ الكتلة

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = dm_{cv}/dt$$

من أجل نظام مستقر ومدخل واحد ومخرج واحد وطاقة حركية وكامنة مهملة تتحول المعادلات السابقة إلى

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$-\dot{W}_{out} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{w}_{out} = (h_1 - h_2)$$

في الحالة الأولى ذات الضغط $(5\ MPa)$ و درجة الحرارة (450°C) يكون الوسيط بخاراً محمصاً ونجد

$$s_1 = 6.8210\ kJ/kg\ K$$

$$h_1 = 3317.2\ kJ/kg$$

في الحالة الثانية ذات الضغط $(1.4\ MPa)$ وعملية إيزونتروبية (أدياباتية عكوسة) نجد أن الوسيط يبقى على شكل بخار محمص وبدرجة حرارة وقدرها (266.65 °C). من جداول البخار المحمص وعند الضغط $(1.4\ MPa)$ نجد

$$h_2 = 2966.2\ kJ/kg$$

بالتعويض في القانون الأول نجد العمل المقدم من العنفة بالنسبة إلى واحدة الكتل (العمل النوعي)

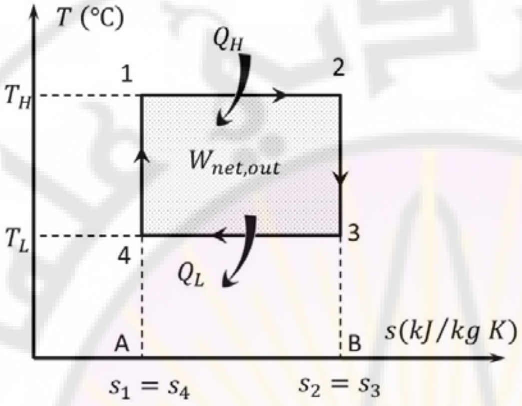
$$\dot{w}_{out} = (h_1 - h_2)$$

$$\dot{w}_{out} = (3317.2 - 2966.2)\frac{kJ}{kg} = 405\ kJ/kg$$

$$\dot{w}_{out} = 405\frac{kJ}{kg}$$

Bassam Badran Damascus University

المثال التطبيقي 7–5 –دورة كارنو على مخطط $(T-s)$.



أظهر دورة كارنو على مخطط $(T-s)$ وحدد كمية الحرارة المقدمة والمطروحة والعمل على هذا المخطط.

الفرضيات: دورة كارنو مباشرة وعكوسة داخلياً.

التحليل: تتألف دورة كارنو من عمليتين إيزوثرميتين وعمليتين أدياباتيتين يمكن رسمها على شكل مستطيل في مخطط $(T-s)$ كما في الشكل المرفق. المساحة المحصورة $(A43BA)$ تساوي كمية الحرارة المطروحة (Q_L) إلى الوسط الخارجي. المساحة المحصورة $(A12BA)$ هي كمية الحرارة المقدمة (Q_H) إلى الدورة من الوسط الخارجي. بتطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه الدورة نجد أن

$$W_{net,out} = Q_H - Q_L$$

وبالتالي الفرق بين كمية الحرارة المقدمة والمطروحة تساوي العمل الصافي بحسب القانون الأول أي أن المساحات لكمية الحرارة المقدمة والمطروحة تساوي مساحة العمل الصافي المقدم في الدورة. المساحة المحصورة (12341) هي العمل المقدم من الدورة إلى الوسط الخارجي.

6.7 التغيير في الإنتروبي في الغازات المثالية.

في الغازات المثالية يمكن ان نعبر عن الطاقة الداخلية بدلالة الحرارة النوعية عند حجم ثابت. باستخدام علاقة (Tds)

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T}$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R\frac{dv}{v} \qquad (25\text{-}7)$$

بمكاملة العلاقة السابقة نجد أن التغيير في الإنتروبي للغازات المثالية هو

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v(T)\frac{dT}{T} + R\,ln\frac{v_2}{v_1} \quad (kJ/kg\,K) \qquad (26\text{-}7)$$

في الغازات المثالية أيضاً يمكن أن نعبر عن الأنتالبي بدلالة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت. باستخدام علاقة (Tds)

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T}$$

$$ds = c_P \frac{dT}{T} - R\frac{dP}{P} \qquad (27\text{-}7)$$

بمكاملة العلاقة السابقة نجد أن التغيير في الإنتروبي للغازات المثالية تعطى أيضاً بالشكل

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c_P(T)\frac{dT}{T} - R\,ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kg\,K) \qquad (28\text{-}7)$$

- **الحرارة النوعية ثابتة.**

عندما تكون الحرارة النوعية ثابتة تتحول معادلات التغيير في الإنتروبي التاليتين (7–26) (7–28) بالنسبة إلى واحدة الكتل إلى

Bassam Badran Damascus University

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{v,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} + R\, ln\frac{v_2}{v_1} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (29\text{-}7)$$

باستخدام علاقة ماير في الحرارات النوعية

$$c_{v,avg} = c_{P,avg} - R$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \left(c_{P,avg} - R\right) ln\frac{T_2}{T_1} + R\, ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{P,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} - R\left(ln\frac{T_2}{T_1} - ln\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{P,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} - R\, ln\left(\frac{T_2}{T_1} * \frac{v_1}{v_2}\right)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{P,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} - R\, ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (30\text{-}7)$$

تتحول المعادلات بالنسبة إلى واحدة المولات إلى

$$\Delta s = \bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{c}_{v,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} + R_u\, ln\frac{v_2}{v_1} \quad (kJ/kmol\ K) \qquad (31\text{-}7)$$

$$\Delta s = \bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{c}_{P,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} - R_u\, ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kmol\ K) \qquad (32\text{-}7)$$

في العمليات الإيزونتروبية للغازات المثالية يكون التغيير في الإنتروبي مساوياً للصفر أي يمكن أن نطبق العلاقات السابقة مع وضع التغيير في الإنتروبي مساوياً للصفر فتتحول المعادلة (7–29) إلى

$$0 = c_{v,avg}\, ln\frac{T_2}{T_1} + R\, ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$ln\frac{T_2}{T_1} = \frac{R}{c_{v,avg}}\, ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$ln\frac{T_2}{T_1} = ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\frac{R}{c_{v,avg}}}$$

وللغاز المثالي نجد أن

$$\frac{R}{c_{v,avg}} = \frac{c_{P,avg} - c_{v,avg}}{c_{v,avg}} = k - 1$$

حيث (k) هو العامل الأدياباتي أو نسبة الحرارة النوعية عند ضغط ثابت إلى الحرارة النوعية عند حجم ثابت، بالتعويض نجد أن

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} \qquad (33\text{-}7)$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{k-1/k} \qquad (34\text{-}7)$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k} \qquad (35\text{-}7)$$

وهذا ماوجدناه سابقاً في العملية الأدياباتية العكوسة.

- **الحرارة النوعية متغيرة.**

عندما تكون الحرارة النوعية متغير مع درجة الحرارة فيمكن حساب التغيير في الإنتروبي بتعويض تابع الحرارة النوعية بدلالة درجة الحرارة وإجراء عملية التكامل. لتسهيل الحساب عند تغيير الحرارة النوعية بدلالة درجة الحرارة نقوم بحساب قيمة التكامل بين قيم مرجعية ثابتة وقيم آخرى ونضع قيمة التكامل ضمن جداول تستخدم لاحقاً. تأخذ

القيم المرجعية للإنتروبي عند درجة حرارة الصفر المطلق *Absolute Zero* لإنها تساوي الصفر. هذه القيم المجدولة تحسب من العلاقة

$$s^o = \int_0^T c_P(T)\frac{dT}{T} \qquad (36\text{-}7)$$

وبالتالي التكامل بين حاليتن يكون

$$\int_{T_1}^{T_2} c_P(T)\frac{dT}{T} = \int_{T_1}^{o} c_P(T)\frac{dT}{T} + \int_0^{T_2} c_P(T)\frac{dT}{T} = s_2^o - s_1^o$$

بالتعويض في المعادلة (7−28) فتتحول إلى

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (s_2^o - s_1^o) - R\, ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (37\text{-}7)$$

بالنسبة إلى واحدة المول

$$\Delta s = \bar{s}_2 - \bar{s}_1 = (\bar{s}_2^o - \bar{s}_1^o) - R_u\, ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kmol\ K) \qquad (38\text{-}7)$$

في العمليات الإيزونتروبية للغازات المثالية يكون التغيير في الإنتروبي مساوياً للصفر أي يمكن أن نطبق العلاقات السابقة مع وضع التغيير في الإنتروبي مساوياً للصفر.

$$s_2^o = s_1^o + R\, ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (39\text{-}7)$$

في العمليات الإيزونتروبية يكون حساب الضغط النهائي (P_2) بحاجة إلى مجموعة من الحسابات لمعرفته لذلك يمكن أن نقوم بجدولة قيم لبارامتر يسهل علينا الحساب. هذا البارامتر هو الضغط النسبي *Relative Pressure* ويعطى الرمز (P_r) وهو

$$P_r = e^{\left(\frac{s^o}{R}\right)}$$

نلاحظ أن الضغط النسبي تابع فقط لدرجة الحرارة لأن الإنتروبي تابع لدرجة الحرارة. من العلاقة (7−39) يمكن حساب نسبة الضغوط على الشكل

$$\frac{P_2}{P_1} = e^{\left(\frac{s_2^o - s_1^o}{R}\right)}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{\left(\frac{s_2^o}{R}\right)}}{e^{\left(\frac{s_1^o}{R}\right)}}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \qquad (40\text{-}7)$$

في بعض الأحيان نكون بحاجة إلى نسب حجوم وليس نسب ضغوط. نعرف نسب الحجم النسبي *Relative Volume* والذي يرمز له (v_r) بالعلاقة

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)_{s=const} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \qquad (41\text{-}7)$$

المثال التطبيقي 7−6 – التغيير في الإنتروبي للغاز المثالي.

ينضغط الهواء من الحالة ذات درجة الحرارة (17°C) والضغط ($100\ kPa$) إلى الحالة النهائية ذات درجة الحرارة (57°C) والضغط ($600\ kPa$). حدد التغيير في الإنتروبي للهواء عند 1) استخدام جداول الهواء و2) وباستخدام القيمة الوسطية للحرارة النوعية.

التحليل: 1) من جداول الهواء نأخذ قيم الإنتروبي المرجعي عند درجات الحرارة العملية

$$s_2^o = 1.79783\ kJ/kg\ K$$

$$s_1^o = 1.66802\ kJ/kg\ K$$

بالتعويض في المعادلة

Bassam Badran Damascus University

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (s_2^o - s_1^o) - R\, ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (1.79783 - 1.66802) \frac{kJ}{kg\ K} - 0.287 \frac{kJ}{kg\ K} ln \frac{600}{100}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = -0.3844 \frac{kJ}{kg\ K}$$

2) بأخذ معادلة الحرارة النوعية الوسطية عند ضغط ثابت في المعادلة

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{P,avg}\, ln \frac{T_2}{T_1} - R\, ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \left(1.006 \frac{kJ}{kg\ K}\right) ln \frac{330}{290} - 0.287 \frac{kJ}{kg\ K} ln \frac{600}{100}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = -0.3842 \frac{kJ}{kg\ K}$$

مناقشة.

نلاحظ بأن القيم تقريباً متساوية لأن التغيير في درجة الحرارة ضمن العملية هو صغير.

المثال التطبيقي 7–7 – الضغط الإيزونتروبي للهواء في محرك احتراق.

ينضغط الهواء في محرك احتراق من الحالة ذات درجة الحرارة (22°C) والضغط ($95\ kPa$) بعملية أدياباتية عكوسة وإذا كانت نسبة الانضغاط ($v_1/v_2 = 8$) حدد درجة الحرارة النهائية للهواء عند خروجه من العملية.

الفرضيات. الهواء غاز مثالي.

التحليل: من أجل نظام مغلق ومن الحالة الأولى يكون

$$v_{r1@295K} = 647.9$$

وبالتالي فإن الحجم النهائي هو

Bassam Badran
Damascus University

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)_{s=const} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$$

$$v_{r2} = v_{r1} * \left(\frac{v_2}{v_1}\right)_{s=const}$$

$$v_{r2} = 647.9 * \frac{1}{8}$$

$$v_{r2} = 80.99$$

من الجداول نجد أن قيمة الحرارة النهائية هي

$$T_2 = 662.7\ K$$

مناقشة.

كان من الممكن حل هذه المسألة من العلاقة

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=const} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$$

بمعرفة المعامل الأدياباتي.

7.7 التغيير في الإنتروبي في المواد الصلبة والسائلة.

في المواد الصلبة والسائلة يكون التغيير في الحجم مهملاً أي $(dv = 0)$.

باستخدام علاقة (Tds)

$$ds = \frac{du}{T} + \frac{Pdv}{T}$$

نجد أن

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{c * dT}{T} \qquad (42\text{-}7)$$

Bassam Badran
Damascus University

بمكاملة العلاقة السابقة نجد أن التغيير في الإنتروبي للمواد الصلبة والسائلة هو

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T)\frac{dT}{T} \cong c_{avg} * ln\frac{T_2}{T_1} \quad (kJ/kg\ K) \qquad (43\text{-}7)$$

نلاحظ أن التغيير في الإنتروبي للمواد غير القابلة للانضغاط يتعلق فقط بدرجة الحرارة. هنا يجب الذكر بأن الحرارة النوعية غير متعلقة بدرجة الحرارة أيضاً. التغيير في الإنتروبي في المواد الصلبة والسائلة يساوي التغيير في الإنتروبي للغاز المثالي في الأنظمة المغلقة أي

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m * c_{avg}\ ln\frac{T_2}{T_1} \qquad (kJ/K)$$

في العملية الإيزونتروبية

$$s_2 - s_1 = c_{avg} * ln\frac{T_2}{T_1} = 0$$

$$T_2 = T_1$$

أي أن العملية الإيزونتروبية للمواد الصلبة السائلة تتحول إلى عملية إيزوثرمية في نهاية المطاف.

المثال التطبيقي 7–8 – تأثير الكثافة في إنتروبي السائل.

يستخدم الميتان في عمليات التبريد المنخفض بدرجة حرارة $(-82°C = 191K)$ بالحالة السائلة. حدد التغيير في الإنتروبي لسائل الميتان عندما يقوم بعملية من $(110K)$ وبضغط $(1\ MPa)$ إلى $(120K)$ وبضغط $(5\ MPa)$ 1) باستخدام الجداول و2) بتقريب سائل الميتان على أساس سائل غير قابل للانضغاط وحدد الخطأ في الطريقتين.

التحليل: من الحالة الأولى نجد أن

Bassam Badran Damascus University

$$s_1 = 4.875\ kJ/kg\ K$$

$$c_{P_1} = 6.8210\ kJ/kg\ K$$

ومن الحالة الثانية نجد أن

$$s_2 = 5.145\ kJ/kg\ K$$

$$c_{P_2} = 3.486\ kJ/kg\ K$$

وبالتالي نجد أن

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 5.145 - 4.875$$

$$\Delta s = 0.27\ kJ/kg\ K$$

2) بفرض أن السائل غير قابل للانضغاط نجد أن

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{avg} * ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$c_{avg} = \frac{c_{P_1} + c_{P_2}}{2} = \frac{3.471 + 3.486}{2}$$

$$c_{avg} = 3.4785\ kJ/kgK$$

$$\Delta s = \left(\frac{3.4785kJ}{kgK}\right) ln\frac{120}{110}$$

$$\Delta s = 0.303\ kJ/kgK$$

3) الخطأ في الحساب يكون

$$error = \frac{|\Delta s_{actual} - \Delta s_{ideal}|}{\Delta s_{actual}}$$

$$error = \frac{|0.27 - 0.303|}{0.27}$$

$$error = 0.122\ or 12.2\%$$

Bassam Badran
Damascus University

مناقشة.

التغيير في الكثافة هي حوالي 3 بالمئة ($425.8 \rightarrow 415.2\ kg/m^3$) وهذا التغيير غير كبير مما يسوغ اعتبار أن سائل الميتان هو سائل غير قابل للانضغاط في هذه العملية.

8.7 التغيير في الإنتروبي في الأنظمة المغلقة.

قمنا في الفصل الرابع بالتعرف على العمليات الترموديناميكية للغاز المثالي في الأنظمة المغلقة على مخطط $(P-v)$ والآن سنتعرف على تلك العمليات الترموديناميكية للغاز المثالي في الأنظمة المغلقة على مخطط $(T-s)$ ومخطط $(h-s)$.

1.8.7 العملية الإيزوخورية.

التغييرات التي تحصل في هذه الأنظمة المغلقة تتعلق فقط بدرجة حرارة وسيط التشغيل وضغطه. يعطى عمل الحدود مع إهمال باقي الأعمال الآخرى وكمية الحرارة على الشكل

$$\delta W = \delta W_b = P\ dV = 0$$

$$\delta Q = T\ ds$$

من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية نجد

$$\delta Q - \delta W_b = dU$$

$$T\ dS = m * \int_{T_1}^{T_2} c_v(T)\ dT$$

$$dS = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v(T)\ dT}{T}$$

بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة تتحول العلاقة السابقة إلى

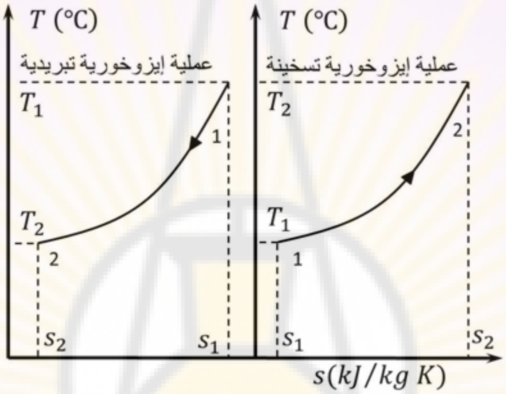
$$\Delta S = S_2 - S_1 = m * c_v\ ln \frac{T_2}{T_1} \qquad (kJ/K) \qquad (44\text{-}7)$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

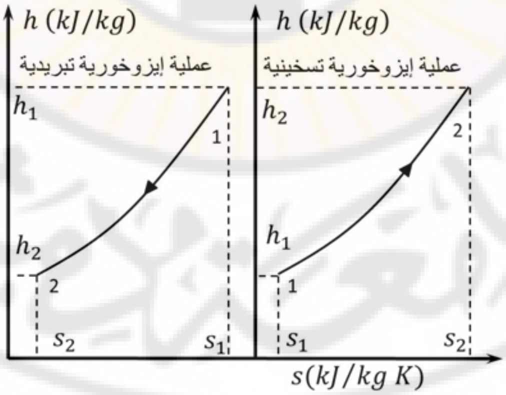
بتطبيق قانون الغاز المثالي يمكن أن تكتب العلاقة (14–7) بالشكل

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m * c_v \ln\frac{P_2}{P_1} \qquad (kJ/K) \qquad (45\text{-}7)$$

يبين الشكل (8–7) منحني العملية الإيزوخورية على مخطط $(T - s)$ أما الشكل (9–7) فيبين منحني العملية الإيزوخورية على مخطط $(h - s)$



الشكل (8–7) عملية إيزوخورية على مخطط $(T - s)$.



الشكل (9–7) عملية إيزوخورية على مخطط $(h - s)$.

9.7 التغيير في الإنتروبي في الأنظمة المفتوحة.

قمنا في الفصل الرابع بالتعرف على العمليات الترموديناميكية للغاز المثالي في الأنظمة المغلقة على مخطط $(P - v)$ والآن سنتعرف على تلك العمليات الترموديناميكية للغاز المثالي في الأنظمة المغلقة على مخطط $(T - s)$ ومخطط $(h - s)$.

1.9.7 العملية الإيزوبارية.

من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك على هذه العملية في الأنظمة المفتوحة نجد أن

$$\delta Q - \delta W_b = dU$$

$$T\,dS = dU + P\,dV$$

$$T\,dS = dU + d(PV) = dH = m * \int_{T_1}^{T_2} c_P(T)\,dT$$

$$dS = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_P(T)\,dT}{T}$$

بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة تتحول العلاقة السابقة إلى

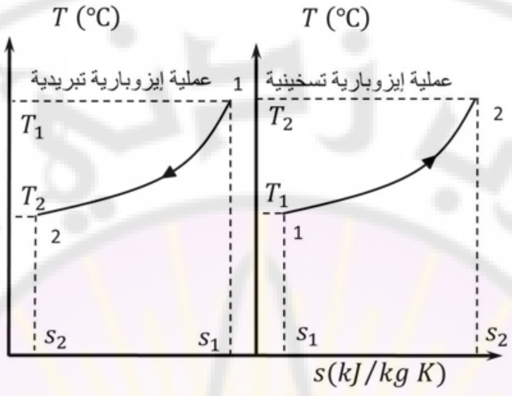
$$\Delta S = S_2 - S_1 = mc_P\,ln\frac{T_2}{T_1} \qquad (kJ/K) \qquad (46\text{-}7)$$

بتطبيق قانون الغاز المثالي يمكن أن تكتب العلاقة (7−55) بالشكل

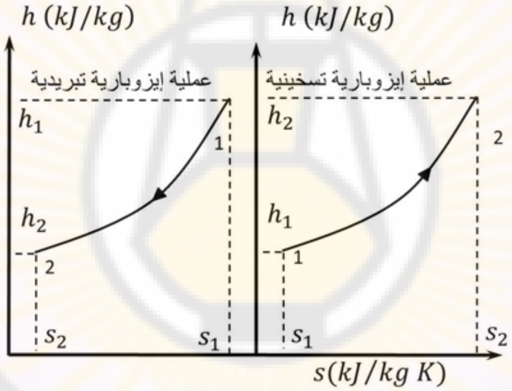
$$\Delta S = S_2 - S_1 = mc_P\,ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (kJ/K) \qquad (47\text{-}7)$$

يبين الشكل (7−10) منحنى العملية الإيزوبارية على مخطط $(T - s)$.

Bassam Badran
Damascus University



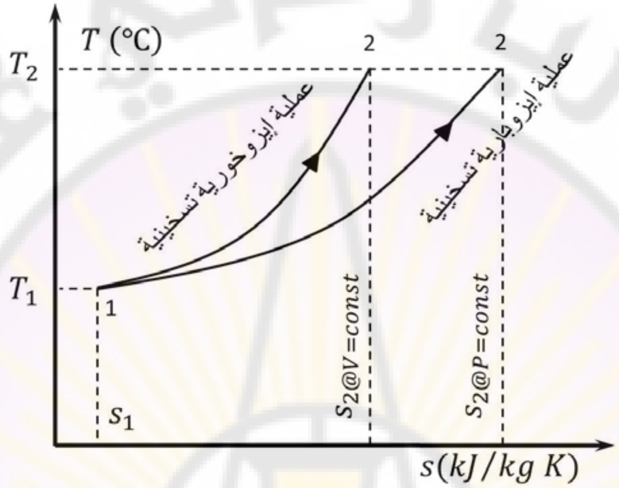
الشكل (7–10) عملية إيزوبارية على مخطط $(T - s)$.



الشكل (7–11) عملية إيزوبارية على مخطط $(h - s)$.

أما الشكل (7–11) فيبين منحني العملية الإيزوبارية على مخطط $(h - s)$. نلاحظ بأن العملية الإيزوبارية على مخطط $(h - s)$ أكثر صعوداً من مخطط $(T - s)$. نلاحظ أيضاً أن منحني العملية الإيزوبارية أقل تقعراً نحو الأعلى (أكثر صعوداً) من منحني العملية الإيزوخورية كما هو واضح من الشكل (7–12) والسبب في ذلك أن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت هي أكبر من الحرارة النوعية عند حجم ثابت وبالتالي يكون

$$\Delta S_{P=const} > \Delta S_{V=const}$$



الشكل (7−12) مقارنة بين العملية الإيزوخورية والإيزوبارية على مخطط $(T - s)$.

2.9.7 العملية الإيزوثرمية.

في العملية الإيزوثرمية يكون التغيير في الطاقة الداخلية يساوياً الصفر أي

$$\delta Q - \delta W_b = 0$$

$$T\,dS = P\,dV$$

$$dS = \frac{P}{T}\,dV = mR\frac{dV}{V}$$

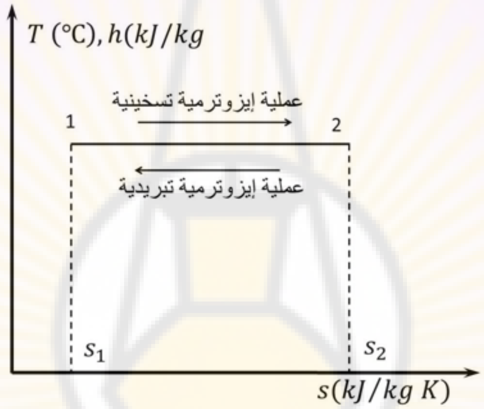
$$\Delta S = S_2 - S_1 = mR\,ln\frac{V_2}{V_1} \qquad (kJ/K) \qquad (48\text{-}7)$$

يمكن أن تكتب العلاقة (7−48) بالشكل

$$\Delta S = S_2 - S_1 = mR\,ln\frac{P_1}{P_2} \qquad (kJ/K) \qquad (49\text{-}7)$$

يبين الشكل (7−13) منحني العملية الأيزثرمية على مخطط $(T-s)$ والمخطط $(h-s)$. تحسب كمية الحرارة في هذه العملية بالعلاقة

$$Q = T(S_2 - S_1) = m * T * R\,ln\frac{P_1}{P_2} \qquad (kJ) \qquad (50\text{-}7)$$

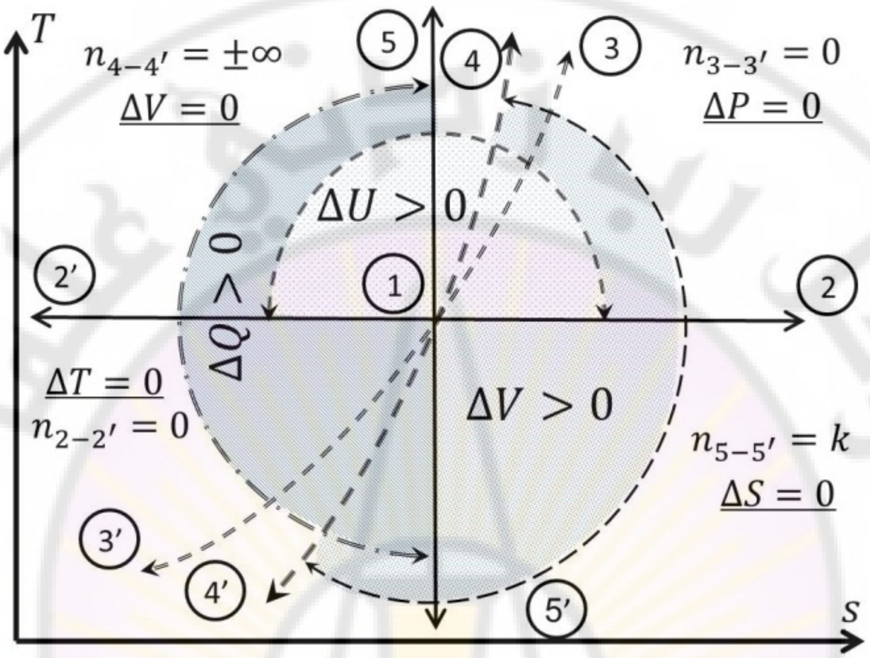


الشكل (7-13) عملية إيزوثرمية على مخطط $(T-s)$ و $(h-s)$.

3.9.7 العملية البوليتروبية.

يبين الشكل (7−14) العمليات الترموديناميكة العامة وعلاقتها مع العملية البوليتروبية على مخطط $(T-s)$. العمليات الترموديناميكية على هذا المخطط هي:

- ✓ الخط $(2-1-2')$ يمثل العملية الإيزوثرمية.
- ✓ الخط $(3-1-3')$ يمثل العملية الإيزوبارية.
- ✓ الخط $(4-1-4')$ يمثل العملية الإيزوخورية.
- ✓ الخط $(5-1-5')$ يمثل العملية الإيزونتروبية.



الشكل (7−14) عملية بوليتروبية على مخطط $(T-s)$.

نلاحظ من الشكل (7−14) بأن المنطقة على **يمين** خط العملية الإيزوخورية والموضحة بالشكل $(4-1-4')$ يكون فيها التغيير في الحجم (الحجم النوعي) موجباً أي $(\Delta v > 0)$ كما هو مهشر وعلى يسارها تكون سالبة $(\Delta v < 0)$. المنطقة على **يسار** خط العملية الأدياباتية $(5-1-5')$ يكون فيها التغيير في كمية الحرارة موجباً أي $(\Delta Q > 0)$ وعلى يمينها تكون سالبة $(\Delta Q < 0)$. المنطقة التي توجد **فوق** العملية الإيزوثرمية والموضخة بالشكل$(2-1-2')$ يكون فيها التغيير في الطاقة الداخلية موجباً أي $(\Delta U > 0)$ وفي أسفلها تكون سالبة $(\Delta U < 0)$. يبين الشكل أيضاً المعامل البوليتروبي لكل عملية فمثلاً $(n_{3-3'})$ تمثل قيمة المعامل البوليتروبي للعملية الإيزوبارية المستخدم في علاقة العملية البوليتروبية.

Bassam Badran
Damascus University

10.7 المراديد الإيزونتروبية في الأجهزة ذات الجريانات المستقرة.

في العمليات الهندسية يوجد ضياعات ضمن الأجهزة دوماً ومن الضروري إيجاد بارامتر يعطينا قيمة هذا الضياع. هذا البارامتر هو المردود الإيزونتروبي *Isentropic Efficiency* ويسمى أيضا بالمردود الأدياباتي *Adiabatic Efficiency* نسبة إلى العملية التي تتم المقارنة بها.

1.10.7 المردود الإيزونتروبي للعنفات.

عندما تكون بارامترات دخول البخار وخروجه من العنفة ثابتة وتكون العنفة تعمل بشكل مستقر، فيمكن أن نعرف المردود الإيزونتروبي للعنفة بأنه العمل الفعلي *Actual Work* المقدم من العنفة إلى الوسط الخارجي منسوباً إلى العمل المثالي الذي يمكن أن نستجره من العنفة في حال كانت العنفة تقوم بعملية إيزونتروبية بشروط الدخول والخروج نفسها للبخار كما في الشكل (7−16) أي أن

$$\eta_T = \frac{\text{العمل الفعلي}}{\text{العمل الإيزونتروبي}} = \frac{w_a}{w_s} \qquad (55\text{-}7)$$

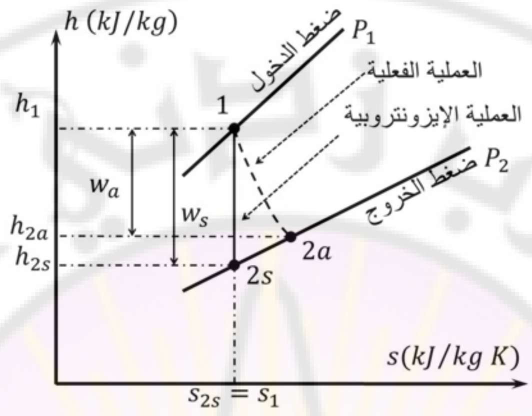
وبما أن الطاقة الحركية والكامنة للبخار خلال العنفة صغيرة جداً بالمقارنة مع تغيير الإنتالبي نجد أن المردود الإيزونتروبي للعنفة يكون

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \qquad (56\text{-}7)$$

يعتمد المردود الإيزونتروبي للعنفة على تصميم العنفة وعناصرها فعندما تكون العنفات كبيرة وذات تصميم ممتاز يصل مردودها إلى 90% وعندما تكون صغيرة قد يصل مردودها إلى 70%. يجب الذكر هنا أن

$$w_s > w_a$$

Bassam Badran Damascus University



الشكل (7–16) المردود الإيزونتروبي للعنفة.

المثال التطبيقي 7–10 – المردود الإيزونتروبي لعنفة بخارية.

يدخل بخار بشكل أدياباتي إلى عنفة بخارية بشكل مستقر بضغط $(3\ MPa)$ ودرجة حرارة (400°C) ويخرج منها بضغط $(50\ kPa)$ ودرجة حرارة (100°C). إذا كانت العمل المقدم من العنفة هو $(2\ MW)$ حدد 1) العمل الإيزونتروبي للعنفة 2) وتدفق البخار ضمن العنفة.

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) نهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) العملية إيزونتروبية.

التحليل: 1) في الحالة الأولى ذات الضغط $(3\ MPa)$ ودرجة الحرارة (400°C) تكون البارامترات هي

$$h_1 = 3231.7\ kJ/kg$$

$$s_1 = 6.9235\ kJ/kgK$$

في الحالة الثانية الحقيقية ذات الضغط $(50\ kPa)$ ودرجة الحرارة (100°C) تكون البارامترات هي

$$h_{2a} = 2682.4\ kJ/kg$$

من جداول الإشباع بدلالة الضغط وعند $(50\ kPa)$ نجد أن الحالة الثانية هي على شكل مزيج لأن قيمة الإنتروبي هي بين الحالة المشبعة والسائلة

$$s_f = 1.0912\ kJ/kgK$$

$$s_g = 7.5931\ kJ/kgK$$

$$s_f < s_{2s} = s_1 < s_g$$

هنا يجب حساب كسر الجفاف

$$\aleph_{2s} = \frac{s_{2s} - s_f}{s_g - s_f}$$

$$\aleph_{2s} = \frac{6.9235 - 1.0912}{7.5931 - 1.0912}$$

$$\aleph_{2s} = 0.897$$

وبالتالي فإن الإنتالبي في الحالة المثالية

$$h_{2s} = h_f + \aleph_{2s} * h_{fg}$$

$$h_{2s} = 340.54\ kJ/kg + 0.897 * 2304.7 kJ/kg$$

$$h_{2s} = 2407.9 \quad kJ/kg$$

بالتعويض في علاقة المردود نجد أن

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} = \frac{3231.7 - 2682.4}{3231.7 - 2407.9}$$

$$\eta_T \cong 0.667 = 66.7\%$$

2) التدفق في العنفة يحسب من القانون الأول في الترموديناميك. يجب أن نأخذ هنا في حساب التدفق العمل الحقيقي في العنفة وليس العمل الإيزونتروبي

Bassam Badran
Damascus University

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}h_1 = \dot{W}_{a,out} + \dot{m}h_{2a}$$

$$\dot{W}_{a,out} = \dot{m}(h_1 - h_{2a})$$

$$\dot{m} = \frac{(h_1 - h_{2a})}{\dot{W}_{a,out}}$$

$$\dot{m} = \frac{(3231.7 - 2682.4)\ kJ/kg}{2000\ kJ/s}$$

$$\dot{m} = 0.275\ kg/s$$

2.10.7 المردود الإيزونتروبي للضواغط وللمضخات.

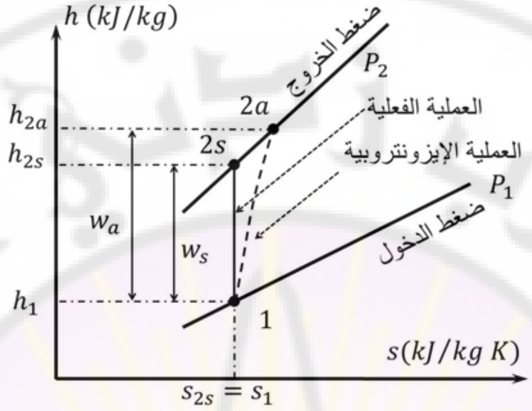
يعرف المردود الإيزونتروبي لضاغط أو مضخة بأنه نسبة العمل المطلوب لرفع ضغط وسيط تشغيل ما من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية عندما يعمل الضاغط بحالة إيزونتروبية إلى العمل الحقيقي المطلوب صرفه لتنفيذ العملية نفسها وبالشروط الابتدائية والنهائية نفسها كما في الشكل (7–17). تعطى علاقة المردود الإيزونتروبي لضاغط أو لمضخة على الشكل التالي

$$\eta_c = \frac{\text{العمل الإيزونتروبي}}{\text{العمل الفعلي}} = \frac{w_s}{w_a} \qquad (57\text{-}7)$$

وبما أن الطاقة الحركية والكامنة لوسيط التشغيل خلال الضاغط صغيرة جداً بالمقارنة مع تغيير الإنتالبي نجد أن المردود الإيزونتروبي لضاغط أو مضخة يكون

$$\eta_c \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \qquad (58\text{-}7)$$

Bassam Badran Damascus University



الشكل (7−17) المردود الإيزونتروبي لضاغط.

يعتمد المردود الإيزونتروبي لضاغط على تصميم الضاغط وعناصره فقد يصل المردود بين 80 إلى 90% عندما تكون الضواغط كبيرة وذات تصميم ممتاز. عندما يكون الماء هو وسيط التشغيل فيمكن أن نعبر عن المردود الإيزونتروبي للمضخة بـ:

$$\eta_c \cong \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2a} - h_1} \qquad (59\text{-}7)$$

يجب الذكر هنا أيضا أن

$$w_a > w_s$$

<u>المثال التطبيقي 7−11 – تأثير المردود الإيزونتروبي على عمل الضاغط.</u>

يدخل هواء إلى ضاغط أدياباتي بشكل مستقر بضغط $(100\ kPa)$ ودرجة حرارة $(12°C)$ ويخرج منه بضغط $(800\ kPa)$ وتدفق قدره $(0.2\ kg/s)$. إذا كان مردود الضاغط الإيزونتروبي هو 80% حدد 1) درجة حرارة خروج الهواء و2) الطاقة اللازمة لصرفها على الضاغط لتحقيق الشروط المذكورة.

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) نهمل الطاقة الحركية والكامنة 3) العملية إيزونتروبية 4) الهواء غاز مثالي.

التحليل:

1) في الحالة الأولى ذات الضغط $(100\ kPa)$ ودرجة الحرارة $(12°C = 285\ K)$ تكون البارامترات هي

$$h_1 = 285.14\ kJ/kg$$

$$P_{r1} = 1.1584$$

توجد لدينا نسبة الضغوط لذلك

$$P_{r2} = P_{r1} * \frac{P_2}{P_1}$$

$$P_{r2} = 1.1584 * \frac{800}{100}$$

$$P_{r2} = 9.2672$$

من الضاغط النسبي يمكن أن نجد إنتالبي في الحالة الإيزونتروبية هو

$$h_{2s} = 517.05\ kJ/kg$$

بالتعويض في المردود الإيزونتروبي للضاغط نجد أن

$$\eta_c \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_c = \frac{517.05 - 285.14}{h_{2a} - 285.14}$$

$$\eta_c = 0.8$$

$$h_{2a} = 575.03\ kJ/kg$$

Bassam Badran Damascus University

توجد درجة حرارة الحالة الثانية الحقيقية من جداول الهواء

$$T_{2a} = 569.5\ K$$

2) نحسب الطاقة من القانون الأول في الترموديناميك

$$\dot{m}h_1 + \dot{W}_{a,in} = \dot{m}h_{2a}$$

$$\dot{W}_{a,in} = \dot{m}(h_{2a} - h_1)$$

$$\dot{W}_{a,in} = \dot{m}(h_{2a} - h_1)$$

$$\dot{W}_{a,in} = (0.2\ kg/s) * (575.03 - 285.14) kJ/kg$$

$$\dot{W}_{a,in} = 58\ kW$$

مناقشة:

نجد أن العمل المثالي (الإيزونتروبي) هو

$$\dot{W}_{s,in} = \dot{m}(h_{2s} - h_1)$$

$$\dot{W}_{s,in} = (0.2\ kg/s) * (517.05 - 285.14)$$

$$\dot{W}_{s,in} = 46.382\ \ kW$$

أي أن

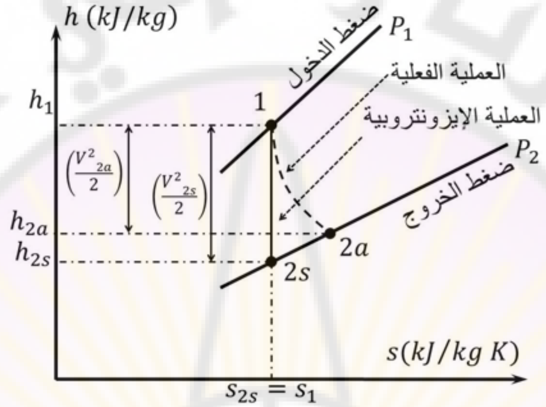
$$\dot{W}_{a,in} = 58\ kW > \dot{W}_{s,in} = 46.382\ \ kW$$

3.10.7 <u>المردود الإيزونتروبي للأبواق والنواشر</u>.

الأقنية سواء أكانت أبواقاً أم نواشراً فهي أجهزة أدياباتية تتسارع أو تتباطأ فيها وسائط التشغيل. يمكن أن نمثل كافة العمليات ضمن الأقنية بالعمليات الإيزونتروبية من دون وجود ضياع. يعرف المردود الإيزونتروبي للأبواق بأنه النسبة بين الطاقة الحركية الحقيقية لوسيط التشغيل على مخرج القناة إلى الطاقة الحركية المثالية في العملية

Bassam Badran Damascus University

الإيزونتروبية عند المخرج. أيضا لشروط دخول وسيط التشغيل نفسها كما في الشكل (7−18).



الشكل (7−18) المردود الإيزونتروبي لبوق.

بالنسبة لبوق

$$\eta_N = \frac{\text{الطاقة الحركية الحقيقية عند الخروج}}{\text{الطاقة الحركية الإيزونتروبية عند الخروج}} = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2} \qquad (60\text{-}7)$$

وبما أن العمل معدوم في الأبواق فيمكن أن نكتب أن

$$h_1 = h_{2a} + \frac{V_{2a}^2}{2}$$

أما المردود الإيزونتروبي فهو

$$\eta_N \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \qquad (61\text{-}7)$$

يصل مردود البوق إلى 95% في أغلب الأحيان.

المثال التطبيقي 7-12 – سرعة خروج الهواء من بوق.

يدخل هواء إلى بوق أدياباتي بشكل مستقر بضغط $(200\ kPa)$ ودرجة حرارة $(950\ K)$ وبسرعة منخفضة ويخرج من البوق بضغط $(80\ kPa)$. إذا كان مردود البوق 92% حدد 1) سرعة خروج الهواء الأعظمية و2) درجة حرارة الخروج و3) السرعة الحقيقية لخروج الهواء بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة.

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) نهمل الطاقة الكامنة 3) العملية إيزونتروبية 4) الهواء غاز مثالي.

التحليل: 1) درجة الحرارة الأعظمية تتحقق في العملية الإيزونتروبية ضمن البوق وبالتالي

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_{2s}}{P_1}\right)^{k-1/k}$$

بالتعويض بضغوط الدخول والخروج وباعتبار أن $(k = 1.354)$

$$T_{2s} = T_1 * \left(\frac{P_{2s}}{P_1}\right)^{k-\frac{1}{k}}$$

$$T_{2s} = (950K)\left(\frac{80}{200}\right)^{\frac{0.354}{1.354}}$$

$$T_{2s} = 748\ K$$

السرعة الأعظمية تحسب من القانون الأول في الترموديناميك كما يلي

$$e_{in} = e_{out}$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_{2s} + \frac{V_{2s}^2}{2}$$

$$V_{2s} = \sqrt{2(h_1 - h_{2s})}$$

$$V_{2s} = \sqrt{2c_{p,avg}(T_1 - T_{2s})}$$

$$V_{2s} = \sqrt{2\left(1.099 * 1000\frac{J}{kgK}\right)(950 - 748)K}$$

$$V_{2s} = 666\ m/s$$

2) درجة حرارة الخروج من البوق هي

$$\eta_N \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

$$\eta_N \cong= \frac{T_1 - T_{2a}}{T_1 - T_{2s}}$$

$$0.92 = \frac{950 - T_{2a}}{950 - 748}$$

$$T_{2a} = 764\ K$$

3) السرعة الحقيقية عند الخروج هي

$$\eta_N = \frac{V_{2a}^2}{V_{2s}^2}$$

$$V_{2a} = \sqrt{\eta_N * V_{2s}^2}$$

$$V_{2a} = \sqrt{0.92 * \left(\frac{666m}{s}\right)^2}$$

$$V_{2a} = 639\ m/s$$

Bassam Badran
Damascus University

11.7 التوزان في الإنتروبي *Entropy Balance*.

يعبر الإنتروبي عن العشوائية *Molecular Disorder* في النظام أو عدم الانتظام في النظام *Randomness of a System* ويعبر القانون الثاني في الترموديناميك عن زيادة الإنتروبي وبشكل دائم ضمن نظام معزول (الكون) وبالتالي فإن التغيير في الإنتروبي لنظام خلال عملية ما يساوي

التغيير في الإنتروبي الكلي في النظام	=	الإنتروبي المقدم إلى النظام	−	الإنتروبي الخارج من النظام	+	الإنتروبي المتولد في النظام
Change of Total Entropy of the System	=	*Total Entropy Entering*	−	*Total Entropy Leaving*	+	*Total Entropy Generated*

يسمى التعريف السابق بتوزان الإنتروبي وليس قانون انحفاظ الإنتروبي ويطبق على أي نظام يخضع لعملية ما. لنتعرف على عناصر هذا التوازن

- التغيير في الإنتروبي ضمن النظام (ΔS_{system}). بما أن الإنتروبي هو بارامتر فهو لا يعتمد على الطريق المسلوك إنما فقط على الحالة الابتدائية والنهائية أي

$$\Delta S_{system} = S_{final} - S_{initial} = S_2 - S_1$$

$$\Delta S_{system} = \sum \frac{\Delta Q}{T}$$

- ميكانيزم دخول وخروج الإنتروبي إلى النظام ($S_{in} - S_{out}$). ينتقل الإنتروبي إلى النظام عبر حالتين الأولى كمية حرارة والثانية تدفق كتلة (عمل) ويمكن حسابهما كما يلي:

Bassam Badran
Damascus University

انتقال الإنتروبي بواسطة كمية من الحرارة *Heat Transfer*. انتقال الحرارة إلى النظام يزيد من العشوائية ضمن النظام وانتقال الحرارة خارج النظام يقلل من العشوائية. تعطى علاقة انتقال الحرارة من النظام عند درجة حرارة ثابتة للمصدر بالشكل

$$S_{heat} = \frac{Q}{T} \quad (kJ/K) \qquad (62\text{-}7)$$

عندما تكون درجة الحرارة غير ثابتة تكون العلاقة من الشكل

$$S_{heat} = \int_1^2 \frac{Q}{T} = \sum \frac{Q_k}{T_k} \qquad (kJ/K) \qquad (63\text{-}7)$$

يمكن تحويل التكامل إلى مجموعة من الخطوات الصغيرة التي تكون فيها درجة الحرارة (T_k) ضمن هذه الخطوة ثابتة وكمية الحرارة (Q_k) صغيرة وثابتة.

انتقال الإنتروبي بواسطة العمل *Work Transfer*. العمل لا يولد إنتروبياً بحسب تعريفه لذلك

$$S_{work} = 0 \qquad (kJ/K) \qquad (64\text{-}7)$$

انتقال الإنتروبي بواسطة تدفق كتلة *Mass Flow*. عند دخول أو خروج كتلة ما إلى نظام، يزداد أو ينقص الإنتروبي لأن كمية المادة إزدادت أو نقصت. في الأنظمة المغلقة وبسبب أن الكتلة ثابتة فلا يوجد تغيير ناتج عن الكتلة في الإنتروبي.

$$S_{mass} = m * s \qquad (kJ/K) \qquad (65\text{-}7)$$

- توليد الإنتروبي ضمن النظام (S_{gen}). يتم توليد الإنتروبي ضمن النظام عن طريق الضياعات فالاحتكاك أو الخلط أو التفاعل الكيميائي يسبب ارتفاع إنتروبي

Bassam Badran
Damascus University

النظام. في العمليات العكوسة يكون التوليد مساوياً للصفر ويهمل. يمكن أن نكتب التعريف بالعلاقة

$$(S_{in} - S_{out}) + S_{gen} = \Delta S_{system} \quad (kJ/K) \qquad (66\text{-}7)$$

أما معدل التغيير في الإنتروبي لنظام فيعطى بالشكل

$$(\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out}) + \dot{S}_{gen} = dS_{system}/dt \quad (kW/K) \qquad (67\text{-}7)$$

1.11.7 توازن الإنتروبي في الأنظمة المغلقة.

في نظام مغلق ذي كتلة ثابتة وبعملية شبه متوازنة أو شبه ستاتيكية يمكن أن نكتب العلاقة بالشكل

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{system} = S_2 - S_1 \quad (kJ/K) \qquad (68\text{-}7)$$

هنا تم فرض أن كمية الحرارة تدخل إلى النظام فقط وبالتالي هي موجبة. عندما تكون العملية أدياباتية يكون

$$S_{gen} = \Delta S_{adiabatic\ system} = S_2 - S_1 \quad (kJ/K) \qquad (69\text{-}7)$$

يمكن فرض أن النظام ومحيطه هو جملة معزولة أي

$$S_{gen} = \sum \Delta S = \Delta S_{system} + \Delta S_{surr} \quad (kJ/K) \qquad (70\text{-}7)$$

2.11.7 توازن الإنتروبي للأنظمة المفتوحة.

في النظام المفتوح حيث ان الكتلة تتغير ويخضع النظام إلى عملية شبه متوازنة أو شبه ستاتيكية يمكن أن نكتب العلاقة بالشكل

Bassam Badran
Damascus University

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \left(\sum m_{in} * s_{in} - \sum m_{out} * s_{out}\right) + S_{gen} = \Delta S_{cv} = (S_2 - S_1)_{cv} \quad (kJ/K) \qquad (71\text{-}7)$$

أما معادلة التغير في الإنتروبي فتكون

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \left(\sum \dot{m}_{in} * s_{in} - \sum \dot{m}_{out} * s_{out}\right) + \dot{S}_{gen} = dS_{cv}/dt \quad (kW/K) \qquad (72\text{-}7)$$

في العمليات المستقرة ($dS_{cv}/dt = 0$) تتحول المعادلة إلى

$$\dot{S}_{gen} = \left(\sum \dot{m}_{out} * s_{out} - \sum \dot{m}_{in} * s_{in}\right) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (kW/K) \qquad (73\text{-}7)$$

عند وجود مدخل واحد ومخرج واحد تكون المعادلة

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_{out} - s_{in}) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (kW/K) \qquad (74\text{-}7)$$

وعندما تكون العملية أدياباتية نجد ان المعادلة تتحول إلى

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_{out} - s_{in}) \quad (kW/K) \qquad (75\text{-}7)$$

<u>المثال التطبيقي 7–13 – تأثير المردود الإيزونتروبي على عمل الضاغط.</u>

يدخل بخار ماء إلى جهاز خنق بشكل مستقر بضغط ($7\ MPa$) ودرجة حرارة ($450\ K$) ويخرج بضغط ($3\ MPa$). حدد الإنتروبي النوعي المتولد خلال هذه العملية.

Bassam Badran
Damascus University

الفرضيات. 1) جريان مستقر 2) كمية الحرارة المنتقلة إلى الخانق مهملة 3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل: كما وجدنا من القانون الأول في الترموديناميك أن

$$h_2 = h_1$$

لكي نحسب الإنتروبي المتولد نأخذ العلاقة العامة وباستخدام مدخل واحد ومخرج واحد وكمية الحرارة مهملة فتكون على الشكل

$$S_{gen} = (s_{out} - s_{in}) \quad \left(\frac{kJ}{kg\ K}\right)$$

يجب أن نحسب الإنتروبي في كل حالة. في الحالة الأولى يكون الضغط $(7\ MPa)$ ودرجة حرارة $(450\ K)$ وتكون البارامترات على الشكل

$$h_{in} = 3288.3\ kJ/kg$$

$$s_{in} = 6.6353\ kJ/kgK$$

من الحالة الثانية يكون الضغط $(3\ MPa)$ والإنتالبي ثابت فنجد أن

$$s_{out} = 7.0046\ kJ/kgK$$

بالتعويض في المعادلة السابقة نجد أن التوليد في الإنتروبي هو

$$S_{gen} = 7.0046 - 6.6353 = 0.3693\frac{kJ}{kgK}$$

المثال التطبيقي 7–14 – الإنتروبي المتولد عند إضافة قطعة ساخنة في حوض.

كتلة من الحديد بوزن $(50\ kg)$ وبدرجة حرارة $(500\ K)$ تسقط في حوض كبير من الماء بدرجة حرارة $(285\ K)$. بفرض أن درجة حرارة التوازن هي درجة حرارة الماء والحرارة

Bassam Badran Damascus University

النوعية للحديد هي $(0.45\ kJ/kgK)$. حدد 1) التغيير في الإنتروبي في قطعة الحديد و2) التغيير في الإنتروبي في الماء و3) الإنتروبي المتولد خلال هذه العملية.

الفرضيات. الماء والحديد مواد غير قابلة للانضغاط و2) الحرارة النوعية ثابتة لكل من الماء والحديد و3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل. 1) التغيير في الإنتروبي في الحديد يكون من خلال تطبيق المعادلة

$$\Delta S_{iron} = m * (s_2 - s_1)$$

من معادلة التغيير في الإنتروبي للمواد الصلبة مع ثبات الحرارة النوعية، يكون التغيير في الإنتروبي

$$\Delta S_{iron} = m\, c_{avg} ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta S_{iron} = 50kg * 0.45\ kJ/kgK * ln\frac{285}{500}$$

$$\Delta S_{iron} = -12.65\ kJ/K$$

2) لحساب التغيير في الإنتروبي للماء يجب حساب كمية الحرارة المطروحة من الحديد إلى الماء من القانون الأول في الترموديناميك

$$-Q_{out,iron} = \Delta U = m * c_{avg} * (T_2 - T_1)$$

$$Q_{out} = 50kg * 0.45\frac{kJ}{kgK} * (500 - 285)K$$

$$Q_{out,iron} = 4838\ kJ$$

باستخدام التوازن الطاقي نجد أن

$$|Q_{out,iron}| = 4838\ kJ = |Q_{in,water}|$$

Bassam Badran
Damascus University

وبما أن كمية الحرارة تدخل إلى الماء فإن معادلة التغيير في الإنتروبي للماء تكون

$$\Delta S_{water} = \frac{+Q_{lake}}{T_{lake}} = \frac{4838\ kJ}{285\ K} = 16.97\ kJ/K$$

3) الإنتروبي المتولد في النظام بالكامل (نظام معزول) هو

$$S_{gen} = \sum \Delta S = \Delta S_{system} + \Delta S_{surroundings} \quad (kJ/K)$$

$$S_{gen} = 16.97 - 12.65 = \mathbf{4.32\ kJ/K}$$

يمكن أن نطبق قانون توازن الإنتروبي على الحديد فقط وبدرجة حرارة التوزان فنجد أن

$$-\frac{Q_{out,iron}}{T_b} + S_{gen,iron} = \Delta S_{system,iron}$$

$$S_{gen,iron} = \Delta S_{system,iron} + \frac{Q_{out,iron}}{T_b}$$

$$S_{gen,iron} = -12.65 + \frac{4838}{285} = 4.325\ kJ/K$$

أو نطبق قانون توازن الإنتروبي على الماء فقط وبدرجة حرارة التوازن فنجد أن

$$+\frac{Q_{in}}{T_b} + S_{gen,water} = \Delta S_{system,iron}$$

$$S_{gen,water} = \Delta S_{system,iron} - \frac{Q_{in}}{T_b}$$

$$S_{gen,water} = 16.97 - \frac{4838}{285} = 0$$

القيمة هنا صفر لأن درجة حرارة الماء هي نفسها درجة حرارة التوازن. التوليد الإجمالي هو

$$S_{gen,system} = S_{gen,iron} + S_{gen,water}$$

$$S_{gen,water} = 4.325 + 0 = \mathbf{4.325\ kJ/K}$$

Bassam Badran Damascus University

<u>المثال التطبيقي 7–15 – توليد الإنتروبي عند إضافة قطعة ساخنة في حوض – بصيغة آخرى.</u>

كتلة من الحديد بوزن $(50\,kg)$ وبدرجة حرارة $(500\,K)$ تسقط في حوض كبير من الماء ذات كتلة $(100\,Kg)$ وبدرجة حرارة $(285\,K)$. بفرض الحرارة النوعية للحديد هي $(0.45\,kJ/kgK)$ وللماء $(4.18\,kJ/kgK)$. حدد 1) التغيير في الإنتروبي في قطعة الحديد و2) التغيير في الإنتروبي في الماء و3) الإنتروبي المتولد خلال هذه العملية.

الفرضيات. 1) الماء والحديد مواد غير قابلة للانضغاط و2) الحرارة النوعية ثابتة لكل من الماء والحديد و3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل. في البداية يجب معرفة حرارة التوازن التي يصل إليها النظام المؤلف من الحديد والماء. من القانون الأول في الترموديناميك فنجد أن

$$\Delta U_{system} = 0$$

$$m_{water} * c_{water} * (T_f - T_{1,water}) + m_{iron} * c_{iron} * (T_f - T_{1,iron}) = 0$$

$$T_f = \frac{m_{water} * c_{water} * T_{1,water} + m_{iron} * c_{iron} * T_{1,iron}}{m_{water} * c_{water} + m_{iron} * c_{iron}}$$

$$T_f = \frac{100kg * 4.18\frac{kJ}{kgK} * 285K + 50\,kg * 0.45\frac{kJ}{kgK} * 500K}{100\,kg * 4.18\frac{kJ}{kgK} + 50\,kg * 0.45\frac{kJ}{kgK}}$$

$$T_f = 295.981\,K$$

التغيير في الإنتروبي الموجود في الحديد يكون من خلال تطبيق المعادلة

$$\Delta S_{iron} = m * (s_2 - s_1)$$

التغيير في الإنتروبي للمواد الصلبة مع ثبات الحرارة النوعية هو

Bassam Badran Damascus University

$$\Delta S_{iron} = m\, c_{avg} ln\frac{T_f}{T_1}$$

$$\Delta S_{iron} = 50kg * 0.45\ kJ/kgK * ln\frac{295.981}{500}$$

$$\Delta S_{iron} = -11.797\ kJ/K$$

2) التغير في الإنتروبي للماء

$$\Delta S_{water} = m\, c_{avg} ln\frac{T_f}{T_1}$$

$$\Delta S_{water} = 100kg * 4.18\frac{kJ}{kgK} * ln\frac{295.981}{285}$$

$$\Delta S_{water} = 15.803\ kJ/kgK$$

يجب حساب كمية الحرارة المطروحة من الحديد إلى الماء. من القانون الأول في الترموديناميك نجد

$$-Q_{out,iron} = \Delta U = m * c_{avg} * \left(T_f - T_1\right)$$

$$Q_{out} = 50kg * 0.45\frac{kJ}{kgK} * (500 - 296)K$$

$$Q_{out,iron} = 4590kJ$$

باستخدام التوازن الطاقي نجد أن

$$\left|Q_{out,iron}\right| = 4590\ kJ = \left|Q_{in,water}\right|$$

3) الإنتروبي المتولد في النظام بالكامل (نظام معزول) هو

$$S_{gen} = \sum \Delta S = \Delta S_{system} + \Delta S_{surroundings} \quad (kJ/K)$$

Bassam Badran Damascus University

$$S_{gen} = 15.803 - 11.787 = \mathbf{4.016}\ \boldsymbol{kJ/K}$$

يمكن أن نطبق قانون توازن الإنتروبي على الحديد فقط وبدرجة حرارة التوزان فنجد أن

$$-\frac{Q_{out,iron}}{T_b} + S_{gen,iron} = \Delta S_{system,iron}$$

$$S_{gen,iron} = \Delta S_{system,iron} + \frac{Q_{out,iron}}{T_b}$$

$$S_{gen,iron} = -11.787 + \frac{4590}{295.981} = 3.72\ kJ/K$$

أو نطبق قانون توازن الإنتروبي على الماء فقط وبدرجة حرارة التوازن فنجد أن

$$+\frac{Q_{in}}{T_b} + S_{gen,water} = \Delta S_{system,water}$$

$$S_{gen,water} = \Delta S_{system,water} - \frac{Q_{in}}{T_b}$$

$$S_{gen,water} = 15.803 - \frac{4590}{295.981} = 0.29\ kJ/K$$

القيمة الإجمالية لتوليد الإنتروبي هي

$$S_{gen,system} = S_{gen,water} + S_{gen,iron}$$

$$S_{gen,system} = 3.72 + 0.29 = \mathbf{4.01}\ \boldsymbol{kJ/K}$$

المثال التطبيقي 7−16 – توليد الإنتروبي عند الخلط.

يدخل ماء بضغط $(20\ psia)$ وبدرجة حرارة (50°F) إلى غرفة مزج مفتوحة بتدفق $(300\ lbm/min)$ ويمزج بشكل مستقر مع بخار بضغط $(20\ psia)$ وبدرجة حرارة (240°F). يخرج الخليط من حجرة المزج بضغط $(20\ psia)$ وبدرجة حرارة (130°F).

Bassam Badran
Damascus University

خلال عملية المزج تطرح كمية من الحرارة إلى الوسط الخارجي (هواء) ذات درجة حرارة (70°F) وبتدفق ($180\ Btu/min$). حدد معدل توليد الإنتروبي خلال هذه العملية.

الفرضيات. عملية المزج مستقرة و2) لا يوجد عمل و3) الطاقة الحركية والكامنة مهملة.

التحليل. نلاحظ من نص المسألة أن التدفق الثاني غير معروف. نقوم على حساب التدفق من قانون انحفاظ الكتلة والقانون الأول في الترموديناميك

$$\dot{Q}_{out} + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

يجب أن نحدد الإنتالبي في كل مرحلة. الحالة الأولى ذات الضغط ($20\ psia$) وبدرجة حرارة (50°F) يكون

$$h_1 = h_{f@50°F} = 18.07\ Btu/lbm$$

$$s_1 = s_{f@50°F} = 0.03609\ \frac{Btu}{lbm\ R}$$

الحالة الثانية ذات الضغط ($20\ psia$) وبدرجة حرارة (240°F) يكون

$$h_2 = 1162.3\ Btu/lbm$$

$$s_2 = 1.7406\ \frac{Btu}{lbm\ R}$$

الحالة الثالثة ذات الضغط ($20\ psia$) وبدرجة حرارة (130°F) يكون

$$h_3 = h_{f@130°F} = 97.99\ Btu/lbm$$

$$s_3 = s_{f@130°F} = 0.18174\ \frac{Btu}{lbm\ R}$$

بالتعويض في علاقة التوازن

Bassam Badran
Damascus University

$$180\frac{Btu}{lbm} = 300 * 18.07 + \dot{m}_2 * 1162.3 - (300 + \dot{m}_2)97.99$$

$$\dot{m}_2 = 22.7\ lbm/min$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_1 = 322.7\ lbm/min$$

توليد الإنتروبي لجريان مستقر هو

$$\dot{m}_1 * s_1 + \dot{m}_2 * s_2 - \dot{m}_3 * s_3 - \frac{\dot{Q}_{out}}{T_b} + \dot{S}_{gen} = 0$$

$$T_b = 70 + 460 = 530\ R$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_3 * s_3 + \frac{\dot{Q}_{out}}{T_b} - \dot{m}_1 * s_1 - \dot{m}_2 * s_2$$

$$\dot{S}_{gen} = 8.65\ Btu/\min R$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

ملخص فصل الإنتروبي (مقياس العشوائية)

- علاقة عدم المساواة لكلاسيوس *Clausius Inequality*.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \le 0$$

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{int,rev} = 0$$

- مبدأ تزايد الإنتروبي *The Increase of Entropy Principle*

$$dS \ge \left(\frac{\delta Q}{T}\right) \qquad (kJ/K)$$

في عملية ما بين الحالة الأولى والثانية

$$\Delta S = S_2 - S_1 \ge \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right) + S_{gen} \qquad (kJ/K)$$

- الإنتروبي لنظام معزول *(Universe)*

$$\Delta S_{isolated} \ge 0 \qquad (kJ/K)$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{surr} \ge 0$$

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{system} + \Delta S_{surr} = S_{gen} \ge 0$$

- العلاقة بين درجة الحرارة والتغيير في الإنتروبي

علاقة عكوسة داخلياً

$$Tds = dh - vdP$$

حقيقية

$$dU + PdV - T * dS < 0 \qquad (kJ)$$

Bassam Badran
Damascus University

- التغيير في الإنتروبي في المواد الصلبة والسائلة.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T)\frac{dT}{T} \cong c_{avg} * \ln\frac{T_2}{T_1} \quad (kJ/kg\ K)$$

- التغيير في الإنتروبي في الغاز المثالي.

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v(T)\frac{dT}{T} + R\ln\frac{v_2}{v_1} \quad (kJ/kg\ K)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 c_P(T)\frac{dT}{T} - R\ln\frac{P_2}{P_1} \quad (kJ/kg\ K)$$

الحرارة النوعية ثابتة

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{v,avg}\ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{v_2}{v_1} \quad \left(\frac{kJ}{kg}K\right)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_{P,avg}\ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{P_2}{P_1} \quad \left(\frac{kJ}{kg}K\right)$$

الحرارة النوعية متغيرة

$$\Delta s = s_2 - s_1 = (s_2^o - s_1^o) - R\ln\frac{P_2}{P_1} \quad \left(\frac{kJ}{kg}K\right)$$

- الضغط النسبي *Relative Pressure* ويعطى الرمز (P_r)

$$P_r = e^{\left(\frac{s^o}{R}\right)}$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{s=const} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}}$$

- الحجم النسبي *Relative Volume* ويرمز له (v_r)

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)_{s=const} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$$

- العمل التقني العكوس في الجريانات المستقرة

$$w_{rev,out} = -\int_1^2 v\,dP \qquad (kJ/kg)$$

- المراديد الإيزونتروبية في الأجهزة ذات الجريانات المستقرة.

التوربين

$$\eta_T \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

الضاغط أو المضخة

$$\eta_c \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

الأقنية

$$\eta_N \cong \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}}$$

- التوزان في الإنتروبي *Entropy Balance*.

$$(S_{in} - S_{out}) + S_{gen} = \Delta S_{system} \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right)$$

$$(\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out}) + \dot{S}_{gen} = \frac{dS_{system}}{dt} \qquad \left(\frac{kW}{K}\right)$$

في النظام المغلق

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{system} = S_2 - S_1 \qquad \left(\frac{kJ}{K}\right)$$

في النظام المفتوح

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \left(\sum \dot{m}_{in} * s_{in} - \sum \dot{m}_{out} * s_{out}\right) + \dot{S}_{gen} = dS_{cv}/dt \quad (kW/K)$$

Bassam Badran
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

الإنتروبي (مقياس العشوائية)

1. يقوم خلاط على خلط غاز مثالي بدرجة حرارة (40°C) ضمن خزان صلب بعمل قدره ($200\ kJ$). لوحظ بأن الغاز بقي على درجة حرارته خلال هذه العملية بفرض أن درجة حرارة المحيط هي (30°C) حدد التغيير في الإنتروبي للغاز المثالي.

2. يقوم ضاغط هوائي بضغط هواء بشكل إيزوثرمي باستطاعة قدرها ($12\ kW$). الحالة الابتدائية للهواء هي (25°C) ودرجة حرارة المحيط هي (10°C) حدد معدل التغيير في الإنتروبي للهواء.

3. يتم خلال عملية إضافة الحرارة في دروة كارنو إيزوثرمياً تقديم كمية من الحرارة قدرها ($900\ kJ$) بدرجة حرارة (400°C). حدد 1) التغيير في الإنتروبي لوسيط التشغيل 2) التغيير في الإنتروبي للمصدر الحراري و3) التغيير الكلي للإنتروبي.

4. يوجد لدينا في مشع منزلي بحجم ($20L$) بخار محمص بضغط ($200\ kPa$) ودرجة حرارة (150°C). نقوم بإغلاق صمامات الدخول والخروج فتنخفض درجة حرارة المشع إلى (40°C) بعد فترة من الزمن نتيجة التبادل الحراري مع الغرفة. حدد التغيير في الإنتروبي للبخار خلال هذه العملية.

5. يحتوي خزان صلب معزول على ($2\ kg$) من مزيج ماء – بخار بضغط ($100\ kPa$). في الحالة الأولى يكون هناك ثلاثة أرباع الكتلة على شكل سائل. نقوم بتشغيل مقاومة كهربائية لفترة كافية لتحويل الماء بالكامل إلى بخار. حدد التغيير في الإنتروبي للبخار في خلال هذه العملية.

6. تحتوي أسطوانة – مكبس على ($0.5m^3$) من غاز الفريون ($134A$) المشبع بضغط ($0.8\ MPa$). يسمح للغاز بالتمدد وبشكل حر ومعكوس حتى ينخفض الضغط إلى ($0.4\ MPa$). حدد 1) درجة الحرارة النهائية للغاز و2) العمل الذي قام به الغاز.

Bassam Badran
Damascus University

7. يدخل غاز الفريون $(134A)$ إلى ضاغط أدياباتي على شكل بخار مشبع بضغط $(160\ kPa)$ وبتدفق قدره $(2m^3/min)$ ويرتفع ضغطه إلى $(900\ kPa)$. حدد العمل الأصغري الذي يجب أن يقدم إلى الضاغط.

8. تحتوي أسطوانة مكبس على $(5\ kg)$ من البخار عند درجة حرارة $(100°C)$ وبكسر جفاف 50%. العمليات التي يقوم بها البخار هي

$(1 \rightarrow 2)$ عملية انتقال حرارة عكوسة إلى البخار وبدرجة حرارة ثابتة حتى يحول إلى بخار مشبع.

$(2 \rightarrow 3)$ يتمدد بخار بشكل أدياباتي عكوس حتى يصل إلى ضغط قدره $(15\ kPa)$.

ارسم العملية على مخطط $(T \rightarrow s)$ وحدد 1) كمية الحرارة المضافة في العملية الأولى و2) العمل الذي يقدمه البخار في العملية الثانية.

9. يدخل بخار وبشكل مستقر إلى عنفة بخارية بضغط $(6000\ kPa)$ ودرجة حرارة $(500°C)$. يتمدد البخار ضمن العنفة معطياً عملاً حتى يصل ضغطه إلى $(1000\ kPa)$. عندما يصل البخار إلى ضغط $(1000\ kPa)$ نقوم باستنزاف 10% من البخار للاستعمال في أغراض آخرى والباقي أي 90% يستمر في التمدد إلى ضغط $(10\ kPa)$. عملية التمدد هي عملية أدياباتية عكوسة. ارسم العملية على مخطط $(T \rightarrow s)$ وحدد عمل العنفة بفرض أن المردود الإيزونتروبي للعنفة هو 85%.

10. كتلة من النحاس قدرها $(50\ kg)$ وبدرجة حرارة $(80°C)$ تسقط في حوض مائي بحجم $(120L)$ ودرجة حرارة $(25°C)$ للتبريد. حدد درجة الحرارة النهائية للنحاس والتغيير الكلي للإنتروبي.

11. ينضغط غاز الأوكسجين بواسطة أسطوانة – مكبس من الحالة الأولى بكثافة $(0.8\ kg/m^3)$ ودرجة حرارة $(25°C)$ إلى الحالة النهائية الأولى بكثافة $(0.1\ kg/m^3)$ ودرجة حرارة $(287°C)$ حدد التغيير في الإنتروبي للغاز بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة.

Bassam Badran
Damascus University

12. يحتوي خزان صلب بحجم $(1.5m^3)$ على غاز ثاني أوكسيد الكربون بكتلة قدرها $(2.7\ kg)$ بضغط $(100\ kPa)$. يقوم خلاط بإضافة طاقة إلى النظام فترفع الضغط إلى $(150\ kPa)$. حدد التغيير في الإنتروبي بفرض أن الحرارة النوعية ثابتة.

13. يدخل الماء المشبع إلى مضخة في محطة توليد بخارية بضغط $(20\ kPa)$ وبتدفق $(45\ kg/s)$ ويخرج منها بضغط $(6\ MPa)$. بإهمال الطاقة الحركية والكامنة وبفرض أن العملية عكوسة حدد الطاقة اللازمة للمضخة.

14. يدخل بخار محمص إلى عنفة بخارية أديباتية وبشكل مستقر بضغط $(7\ MPa)$ ودرجة حرارة $(500°C)$ وسرعة $(45\ m/s)$ ويخرج بضغط $(100\ kPa)$ وسرعة $(75\ m/s)$. إذا كانت استطاعة العنفة هي $(5\ MW)$ ومردودها الإيزونتروبي هو 77% حدد 1) تدفق البخار في العنفة 2) درجة حرارة خروج البخار و3) معدل توليد الإنتروبي خلال هذه العملية.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الفصل الثامن
Chapter Eight

الترموديناميك الكيميائي
Thermochemistry

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	طاقة هلمهولتس الحرة	J
dA	التغيير في طاقة هلمهولتس الحرة	J
c_s	الحرارة النوعية لمحلول الكالوريمتري	$J/g\ K$
C_{comb}	الحرارة النوعية للمواد المحترقة	J/K
G	طاقة جبس الحرة	J
ΔG^o_{rxn}	التغيير في طاقة جبس في التفاعل	J
$\Delta G^o_{f,Products}$	التغيير في طاقة جبس في للنواتج	J/mol
$\Delta G^o_{f,reactants}$	التغيير في طاقة جبس في للمواد المتفاعلة	J/mol
dG	التغيير في طاقة جبس الحرة	J
$(dG)_{T,P}$	التغيير في طاقة جبس الحرة لدرجة حرارة وضغط ثابت	J
H	الإنتالبي	J
ΔH^o_{rxn}	التغيير في إنتالبي حرارة التفاعل	J

Bassam Badran
Damascus University

$\Delta H^o_{f,Products}$	التغيير في إنتالبي التشكيل العياري للنواتج	J/mol
$\Delta H^o_{f,reactants}$	التغيير في إنتالبي التشكيل العياري للمواد المتفاعلة	J/mol
ΔH_{vap}	التغيير في إنتالبي حرارة التبخر	J/mol
ΔH_{fus}	التغيير في إنتالبي حرارة الانصهار	J/mol
h	الإنتالبي النوعي	J/g
Δh	التغيير في الإنتالبي النوعي في عملية ما	J/g
Δh^o_{rxn}	إنتالبي حرارة التفاعل بالنسبة إلى واحدة المول	J/mol
Δh_{comb}	إنتالبي حرارة المواد المحترقة بالنسبة إلى واحدة المول	J/mol
k_c	ثابت توازن التفاعل بدلالة التركيز	لابعدي
k_P	ثابت توازن التفاعل بدلالة الضغوط الجزئية	لابعدي
M	مولارتي	mol/L
m	الكتلة	kg
N_P	عدد مولات المواد الناتجة	mol
N_r	عدد مولات المواد المتفاعلة	mol

Bassam Badran Damascus University

P	الضغط	bar أو kPa
Q	كمية الحرارة	J
δQ	كمية الحرارة خلال خطوة صغيرة	J
Q_{rxn}	كمية الحرارة التفاعل	J
Q_{comb}	كمية الحرارة المواد المتحرقة	J
$Q_{calorimeter}$	كمية الحرارة الكالوريمتري	J
q	كمية الحرارة النوعية	J/g
q_{rxn}	كمية الحرارة التفاعل النوعية	J/g
q_V	كمية حرارة التفاعل النوعية لحجم ثابت	J/g
q_P	كمية حرارة التفاعل النوعية لضغط ثابت	J/g
R_u	ثابت الغازات العامة	J/gK
ΔS^o_{rxn}	التغيير في الطاقة الداخلية	J
$\Delta S^o_{f,Products}$	التغيير في الإنتروبي للمواد الناتجة	$J/mol\ K$
$\Delta S^o_{f,reactants}$	التغيير في الإنتروبي للمواد المتفاعلة	$J/mol\ K$
ΔS	التغيير في الإنتروبي	J/K
S_i	الإنتروبي الإبتدائي	J/K

Bassam Badran Damascus University

S_f	الإنتروبي النهائي	J/K
ΔS_{vap}	التغيير في إنتروبي حرارة التبخر	J/mol
ΔS_{fus}	التغيير في إنتروبي حرارة الانصهار	J/mol
T	درجة الحرارة	K أو ℃
ΔT	التغيير في درجة الحرارة	K أو ℃
ΔU	التغيير في الطاقة الداخلية	J
ΔU_{rxn}	التغيير في الطاقة الداخلية للتفاعل	J
U_i	الطاقة الداخلية الابتدائية	J
U_f	الطاقة الداخلية النهائية	J
V	الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg
W	العمل	J
δW	العمل خلال خطوة صغيرة	J

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

مقدمة الفصل.

الترموديناميك الكيميائي هو فرع من فروع الترموديناميك ويهتم بكمية الحرارة الناتجة أو اللازمة لإجراء أي تفاعل كيميائي *Chemical Reaction*. سنقوم في هذا البحث بحساب كمية الحرارة الناتجة عن أي تفاعل كيميائي وفهم الطرق المستخدمة في قياس تلك الحرارة. وسنحدد العلاقة بين حرارة التفاعل *Heat of Reaction* والتغيير في الطاقة الداخلية والإنتالبي وكيفية حساب هذه الكميات بدلالة حرارة التفاعل. كما سنتعرف على الطاقات الحرة مثل طاقة هلمهولتس وجبس في تحديد حركة التفاعل.

الفوائد العلمية من الفصل.

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ التعرف على ثابت توازن التفاعل.
- ✓ تحديد الطاقة اللازمة لعملية التفاعل الكيميائي وهل هي طاقة ممتصة أم مطروحة.
- ✓ دراسة أنواع الكالوريمتري بضغط ثابت وحجم ثابت.
- ✓ تحديد إنتالبي التشكيل العياري أو تحديده من الجداول.
- ✓ تحديد إنتالبي التفاعل العياري.
- ✓ التعرف على قانون هس في حساب التغيير في الإنتالبي العياري.
- ✓ التعرف على القانون الثالث في الترموديناميك.
- ✓ حساب إنتروبي التفاعل العياري.
- ✓ حساب طاقة جبس التي تحدد إمكانية حدوث التفاعل.

Bassam Badran
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.8	ثابت توازن التفاعل.	484
2.8	حرارة التفاعل.	488
1.2.8	التغييرات في الطاقة الداخلية والإنتالبي في التفاعلات الكيميائية.	494
2.2.8	التغييرات في الطاقة الداخلية والإنتالبي في التحولات الطورية.	496
3.8	الكالوريمتري.	498
1.3.8	الكالوريمتري بضغط ثابت (كالوريمتري فنجان القهوة).	499
2.3.8	الكالوريمتري بحجم ثابت (كالوريمتري المتفجر).	501
4.8	التغيير في إنتالبي التشكيل العياري.	503
5.8	التغيير في إنتالبي التفاعل العياري.	505
6.8	قانون هس في حساب التغيير في إنتالبي التفاعل العياري.	507
7.8	التغيير في إنتروبي التفاعل العياري.	509
8.8	القانون الثالث في الترموديناميك.	510
9.8	الطاقة الحرة.	512
1.9.8	طاقة جبس الحرة.	512
2.9.8	حساب الطاقة الحرة لجبس في التفاعل العياري.	514
3.9.8	ثابت توازن التفاعل بدلالة طاقة جبس لخليط من الغازات المثالية.	520
	ملخص الفصل.	522
	مسائل غير محلولة.	525
	نهاية االفصل.	526

Bassam Badran Damascus University

1.8 ثابت توازن التفاعل Equilibrium Constant.

يمكن التعبير عن التفاعل الكيميائي العام بين عنصرين متفاعلين (A, B) والذي ينتج عنه مواد آخرى (C, D) بالشكل التالي

$$xA + yB \rightarrow zC + wD$$

$$Reactants \rightarrow Products$$

يسمى الطرف اليساري في المعادلة السابقة والمؤلف من المواد (A, B) بالمواد المتفاعلة *Reactants* ويسمى الطرف اليميني من المعادلة نفسها والمؤلف من المواد (C, D) بالمواد الناتجة *Products*. القيم (x, y, z, w) هي عدد مولات التوازن في التفاعل الكيميائي.

نقول إن التفاعل السابق في حالة توازن ديناميكي *Dynamic Equilibrium* (عدم وجود حركة في التفاعل يميناً أو يساراً) عندما تتحقق المعادلة التالية

$$k_c = \frac{[C]^z * [D]^w}{[A]^x * [B]^y} \qquad (1-8)$$

الثابت (k_c) في المعادلة $(1-8)$ هو ثابت توازن التفاعل *Equilibrium Constant* بالنسبة إلى تركيز المواد *Concentration* ويرمز له بالرمز (c) أي أن تركيز المواد الموجودة في التفاعل هو ثابت ولا يتغير في التفاعل. ثابت توازن التفاعل هو تابع لدرجة حرارة التفاعل الكيميائي فتغيير درجة الحرارة قد يؤدي إلى اختلاف التركيز. الأقواس المربعة $[-]$ تعبر عن تركيز المادة بالمول باليتر (mol/L). تسمى وحدة المول باليتر باسم المولارتي *Molarity* وتعطى الرمز (M). تعرف المولارتي بأنها عدد المولات المنحلة في واحد لتير من المحلول.

$$M = Molarity = \frac{Moles\ of\ solute}{Volume\ of\ solution\ in\ liters}$$

Bassam Badran Damascus University

يجب التفريق بين المولارتي والمولالتي *Molality* فالمولالتي هي عدد المولات المنحلة في واحد كيلوغرام من المحلول.

$$Molality = \frac{Moles\ of\ solute}{Mass\ of\ solvent\ in\ kilograms}$$

عند حساب ثابت توازن التفاعل لا يمكن إضافة

- ✓ تركيز المواد الصلبة.
- ✓ تركيز المحاليل الصافية.

يستعمل ثابت التوازن في معرفة

1. اتجاه حركة التفاعل. إذا كان الثابت أكبر من الواحد $(k_c > 1)$ فالتفاعل يكون في الاتجاه النواتج أما إذا كان الثابت أصغر من الواحد $(k_c < 1)$ فالتفاعل يكون في اتجاه المواد المتفاعلة وإذا كان يساوي الواحد $(k_c = 1)$ فالتفاعل يكون متوازناً.

2. قوة التفاعل. قيمة ثابت توزان التفاعل تدل على صعوبة حدوث التفاعل أو سهولته. فإذا كان هذا الثابت ذات قيمة كبيرة جداً فيمكن أن نقول إن التفاعل يحدث بسرعة كبيرة لأن المواد المتفاعلة غير مستقرة ويجب أن تتحلل فمثلاً ثابت توازن التفاعل $(2O_3 \leftrightarrow 3O_2)$ هو (10^{55}) أي أن التفاعل يحدث بسرعة وتتفكك ذرة الأوزون إلى الأوكسجين بشكل تلقائي. إذا كان الثابت بقيم صغيرة جداً فيمكن القول إن التفاعل هو مستقر ومن الصعب أن يحدث من دون مساعدة فمثلاً ثابت توازن التفاعل $(2HF \leftrightarrow H_2 + F_2)$ هو (10^{-13}) أي ن التفاعل مستقر ومن الصعب حدوثه من دون مساعدة. إذا كان الثابت بقيم معتدلة فيمكن أن نقول إن التفاعل قد يحدث في كلا الاتجاهين وخلال فترة معينة من الزمن فمثلاً ثابت توازن التفاعل $(N_2 + 3H_2 \leftrightarrow NH_3)$ هو (10) أي أن التفاعل قد يحدث إما في اتجاه تفكك غاز النشادر أو في تشكله.

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 8–1 – كتابة ثابت توازن التفاعل.

اكتب ثابت التوازن لكل من المعادلات التالية

$$(N_2)_g + 3(H_2)_g \leftrightarrow 2\,(NH_3)_g$$

$$k_c = \frac{[NH_3]^2}{[N_2]^1 * [H_2]^3}$$

$$(CaCO_2)_s \leftrightarrow (CaO)_s + (CO_2)_g$$

$$k_c = [CO_2]^1$$

$$(2FeCl_3)_{aq} + (SnCl_2)_{aq} \leftrightarrow (2FeCl_2)_{aq} + (SnCl_4)_{aq}$$

$$k_c = \frac{[FeCl_2]^2 * [SnCl_4]^1}{[FeCl_3]^2 * [SnCl_2]^1}$$

$$(Cu)_s + (2\,Ag)_{aq} \leftrightarrow (Cu)_{aq} + (2\,Ag)_s$$

$$k_c = \frac{[Cu]^1}{[Ag]^2}$$

$$(CH_3COOH)_{aq} + (H_2O)_l \leftrightarrow (H_3O)_{aq} + (CH_3COO)_{aq}$$

$$k_c = \frac{[H_3O]^1 * [CH_3COO]^1}{[CH_3COOH]^1}$$

$$(CO_2)_g + (NaOH)_{aq} \leftrightarrow (NaHCO_3)_{aq}$$

$$k_c = \frac{[NaHCO_3]^1}{[CO_2]^1 * [NaOH]^1}$$

تبخر الماء

$$(H_2O)_l \leftrightarrow (H_2O)_g$$

Bassam Badran
Damascus University

$$k_c = [H_2O]^1$$

المثال التطبيقي 8−2 – حساب ثابت توازن التفاعل.

حدد ثابت التوازن للتفاعل

$$(CO_2)_g + (H_2)_g \leftrightarrow (CO)_g + (H_2O)_g$$

الذي يحتوي على $(0.1908\ mol)$ من غاز (CO_2) و $(0.0908\ mol)$ من غاز (H_2) و$(0.0092\ mol)$ من غاز (CO) و$(0.0092\ mol)$ من بخار الماء في محلول $(2\ L)$.

الفرضيات: درجة الحرارة ثابتة ضمن المحلول.

التحليل: معادلة التفاعل هي

ثابت التوازن يعطى من المعادلة

$$k_c = \frac{[C]^z * [D]^w}{[A]^x * [B]^y}$$

$$k_c = \frac{[CO]^1 * [H_2O]^1}{[CO_2]^1 * [H_2]^1}$$

هنا يجب إيجاد المولارتي لكل عنصر

$$[CO] = \frac{0.0092\ mol}{2\ L} = 0.0046\ \frac{mol}{L}$$

$$[H_2O] = 0.0046\ \frac{mol}{L}$$

$$[CO_2] = 0.0954\ \frac{mol}{L}$$

$$[H_2] = 0.0454\frac{mol}{L}$$

Bassam Badran Damascus University

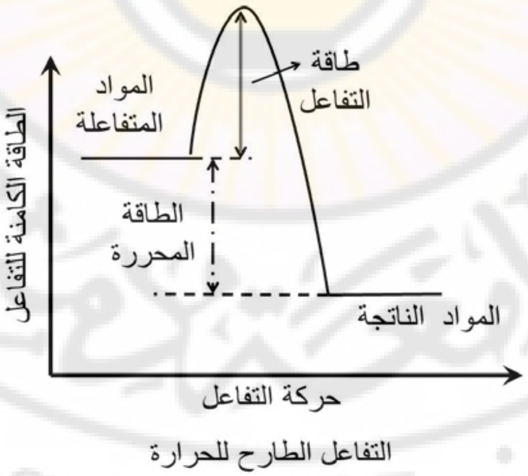
بالتعويض نجد أن

$$k_c = \frac{0.0046 * 0.0046}{0.0954 * 0.0454} = 0.0049\ or\ 4.9 * 10^{-3}$$

أي أن التفاعل يحدث في اتجاه المواد المتفاعلة لأن $(k_c < 1)$ أما قيمة الثابت فتدل على أن التفاعل غير سريع وغير مستقر.

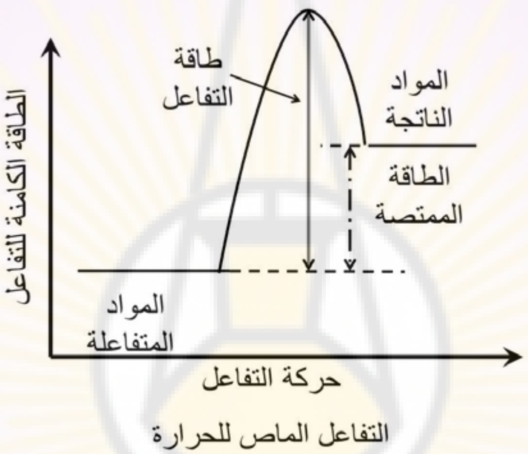
2.8 حرارة التفاعل *Heat of Reaction*.

يمكن أن نعرف الطاقة الكيميائية *Chemical Energy* على إنها قوى الترابط بين ذرات المادة على المستوى الميكروي والتي تنتج عن الروابط الكيميائية *Chemical Bonds* بين الذرات وقوى التجاذب الذري بين العناصر ذاتها. في حال تفكك هذه الروابط أو تشكلها خلال أي عملية تفاعل كيميائي فإن هذه الطاقة تظهر على شكل طاقة حرارية تسمى بحرارة التفاعل *Heat of Reaction* ويرمز لها (Q_{rxn}).



الشكل (8–1) الطاقة المحررة في التفاعل الطارح للحرارة.

يسمى التفاعل الكيميائي الذي **يحرر** كمية معينة من الحرارة عند خلط المواد المتفاعلة بالتفاعل الطارح للطاقة *Exothermic Reaction* إلى الوسط المحيط به كما في الشكل (8−1) أما التفاعل الكيميائي الذي **يمتص** كمية معينة من الحرارة من الوسط المحيط نتيجة خلط المواد المتفاعلة فيسمى بالتفاعل الماص للطاقة *Endothermic Reaction* في الشكل (8−2).



الشكل (8−2) الطاقة الممتصة في التفاعل الماص للحرارة.

تعرف طاقة التفاعل *Activation Energy* في كلا الشكلين على إنها أقل طاقة ممكنة يحتاجها التفاعل لكي يبدأ وتعطى الرمز (E_a). فمثلاً تفاعل غاز أول أوكسيد الكربون (CO) مع أوكسيد النتروجين(NO_2) يعطي ثاني أوكسيد الكربون (CO_2) و أول أوكسيد النتروجين (NO) حسب المعادلة التالية

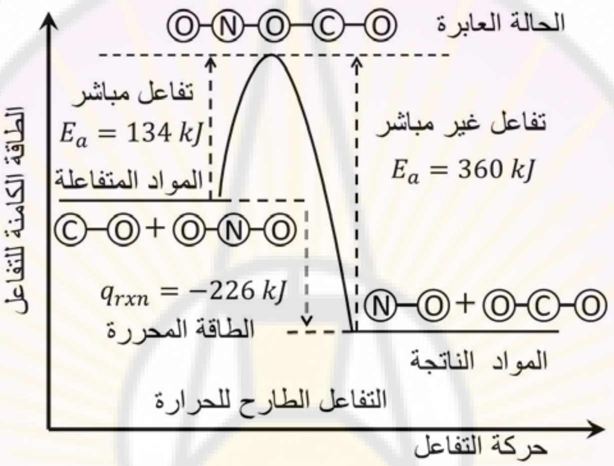
$$CO + NO_2 \rightarrow CO_2 + NO$$

نلاحظ من الشكل (8−3) بأن تفاعل أول أوكسيد الكربون مع أوكسيد النتروجين يكون تفاعلاً مباشراً باتجاه **الحالة العابرة الافتراضية** ويعطي طاقة مقدارها ($134\ kJ$) أما

Bassam Badran Damascus University

تفاعل أول أوكسيد النتروجين مع ثاني أوكسيد الكربون فيكون تفاعلاً غير مباشر أو يسمى عكوساً ويعطي طاقة قدرها $(360\ kJ)$. تكون الطاقة المحررة والمطروحة من هذا التفاعل هي

$$Q_{rxn} = 134 - 360 = -226\ kJ$$

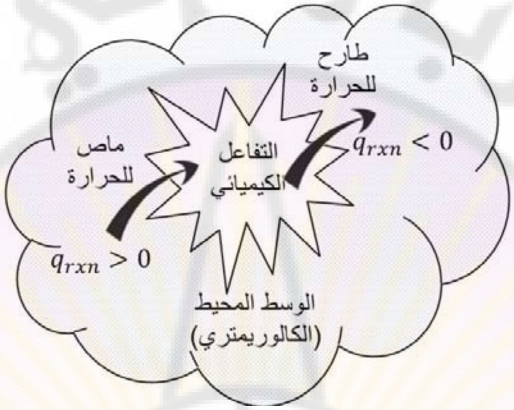


الشكل (3–8) تفاعل أوك أوكسيد الكربون مع أوكسيد النتروجين

إذا أخذنا التفاعل من دون المحيط على إنه نظام مغلق فإن كمية الطاقة الممثلة بكمية الحرارة (Q_{rxn}) تكون خارجة من النظام وتكون إشارتها سالبة بحسب عرف الاتجاهات. أي أن النظام (التفاعل الكيميائي) يطرح مقداراً معيناً من الطاقة إلى الوسط المحيط. يقوم التفاعل الكيميائي الطارح للحرارة $(Q_{rxn} < 0)$ كما في الشكل (4–8) برفع درجة حرارة الوسط المحيط في حال كان المحيط نظاماً مغلقاً معزولاً (تنخفض درجة حرارة التفاعل) أو يقوم فقط بطرح كمية الطاقة الناتجة عن التفاعل إلى الوسط المحيط في حال كان المحيط غير معزول. يقوم التفاعل الكيميائي الماص للطاقة $(Q_{rxn} > 0)$ بتخفيض درجة حرارة الوسط المحيط به في حال كان هذا المحيط مغلقاً معزولاً (ترتفع درجة حرارة

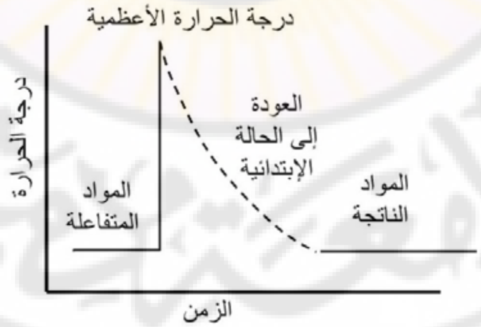
Bassam Badran Damascus University

التفاعل) أو يقوم فقط بامتصاص كمية الطاقة اللازمة للتفاعل من الوسط المحيط في حال كان المحيط غير معزول.



الشكل (8−4) حرارة التفاعل.

يبين الشكل (8−5) درجة حرارة التفاعل الكيميائي الماص للحرارة حيث ترتفع درجة حرارة التفاعل إلى درجة حرارة أعظمية ثم تنخفض لتعود إلى درجة الحرارة الابتدائية مع مرور الزمن.



الشكل (8−5) درجة حرارة التفاعل الماص للطاقة من وسط محيط معزول.

Bassam Badran
Damascus University

يبين أيضاً الشكل (8−6) درجة حرارة التفاعل الكيميائي الطارح للحرارة حيث تنخفض درجة حرارة التفاعل إلى درجة حرارة أصغرية ثم ترتفع لتعود إلى درجة الحرارة الابتدائية مع مرور الزمن. فمثلاً التفاعل الكيميائي لأوكسيد الكالسيوم $[(CaO)_s]$ الصلب مع الماء $[(H_2O)_l]$ السائل بدرجة حرارة الغرفة والذي يعطى بالشكل التالي

$$(CaO)_s + (H_2O)_l \rightarrow [Ca(OH)_2]_s$$

يؤدي إلى تشكل هيدرات الكالسيوم الصلبة $[Ca(OH)_2]_s$ ويؤدي أيضاً إلى ارتفاع درجة حرارة التفاعل من درجة حرارة الغرفة إلى (40.5°C) أي أن التفاعل الكيميائي السابق هو تفاعل ماص للطاقة

الشكل (8−6) درجة حرارة التفاعل الطارح للطاقة إلى وسط محيط معزول.

أما تفاعل هيدوكسيد الباريوم $[(Ba(OH)_2 - 8H_2O)_s]$ الصلب مع كلور النشادر $[(NH_4Cl)_s]$ الصلب بدرجة حرارة الغرفة والذي يعطى بالشكل التالي

$$(Ba(OH)_2 - 8H_2O)_s + (NH_4Cl)_s \rightarrow (BaCl_2 - 2H_2O)_s + (2NH_3)_{aq} + 8(H_2O)_l$$

Bassam Badran Damascus University

يؤدي إلى تشكل هيدرات كلورات الكالسيوم $[(BaCl_2 - 2H_2O)_s]$ الصلبة ومحلول النشادر $[(2NH_3)_{aq}]$ والماء وتنخفض درجة حرارة التفاعل من درجة حرارة الغرفة إلى $(5.8°C)$ أي أن التفاعل الكيميائي السابق هو تفاعل طارح للحرارة.

إذا فرضنا أن المواد المتفاعلة في تفاعل كيميائي ما هي الحالة الابتدائية للتفاعل والطاقة الداخلية لهذه الحالة هي (U_i) والمواد الناتجة عن هذا التفاعل هي الحالة النهائية للتفاعل والطاقة الداخلية لهذه الحالة هي (U_f)

$$Reactants \quad \rightarrow \quad Products$$

$$(\textbf{I}nital\ State) \quad (\textbf{F}inal\ State)$$

$$U_i \qquad U_f$$

فإن التغيير في الطاقة الداخلية لأي تفاعل كيميائي يعطى بالشكل

$$\Delta U = U_f - U_i$$

يمكن حساب كمية الحرارة الناتجة أو اللازمة لأي تفاعل كيميائي باستخدام القانون الأول في الترموديناميك لنظام ما بإهمال أي أعمال آخرى وبحسب عرف الاتجاهات كما يلي

$$q_{rxn} + w = \Delta u \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (2\text{–}8)$$

(w) هو عمل الحدود في نظام مغلق (w_b) أو عمل تدفق في نظام مفتوح (w_f) و(q_{rxn}) كمية الحرارة الناتجة أو اللازمة في التفاعل الكيميائي. فإذا تم التفاعل في حجم ثابت $(V = const)$ فيكون العمل في المعادلة (2–8) صفراً وتتحول المعادلة إلى

$$\Delta u_{rxn} = (u_f - u_i) = q_{rxn} = q_V \qquad (3\text{–}8)$$

وإذا تم التفاعل في حجم متغير (أسطوانة – مكبس) وضغط ثابت $(P = const)$ فيكون العمل في المعادلة (2–8) هو عمل حدود وتتحول المعادلة إلى

$$\Delta h_{rxn} = (h_f - h_i) = q_{rxn} = q_P \qquad (4\text{–}8)$$

Bassam Badran
Damascus University

يمكن معرفة نوع التفاعل من خلال معرفة قيمة الطاقة الداخلية للتفاعل أو إنتالبي التفاعل كما يلي

في حال كانت $\Delta h_{rxn} = (h_f - h_i) = q_{rxn} > 0$ $h_f > h_i$	أي أن الحالة النهائية **أكبر** من الحالة الابتدائية وبالتالي فإن التفاعل ماص للحرارة *Endothermic Reaction*
في حال كانت $\Delta h_{rxn} = (h_f - h_i) = q_{rxn} < 0$ $h_f < h_i$	أي أن الحالة الابتدائية **أكبر** من الحالة النهائية وبالتالي فإن التفاعل طارح للحرارة *Exothermic Reaction*

1.2.8 التغييرات في الطاقة الداخلية والإنتالبي في التفاعلات الكيميائية.

يمكن الربط بين الطاقة الداخلية والإنتالبي في التفاعلات الكيميائية باستخدام علاقة موليير التي تُعرف الإنتالبي بالعلاقة

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \qquad (5\text{-}8)$$

المثال التطبيقي 8-3 – أهمية عمل الحدود.

قدر أهمية عمل الحدود في التفاعل التالي

$$2(CO)_g + (O_2)_g \rightarrow 2(CO_2)_g$$

Bassam Badran
Damascus University

بفرض أن الضغط ثابت ودرجة حرارة التفاعل ثابتة $(298K)$ وحرارة التفاعل الكيميائي السابق هي $(\Delta H = -566.0\ kJ)$.

التحليل: بما أن التغيير في الإنتالبي هو أصغر من الصفر أي أن الحالة الابتدائية للتفاعل أكبر من الحالة النهائية ويجب أن يكون التغيير في الحجم أقل من الصفر. تكتب علاقة عمل الحدود كما يلي

$$P\Delta V = P\left(V_f - V_i\right)$$

بفرض أن الغاز مثالي في التفاعل الكيميائي

$$PV = NR_uT$$

$$\Delta(PV) = \Delta(NR_uT)$$

بما أن ضغط التفاعل ودرجو حرارته ثابتة فنجد بالتعويض أن

$$P\Delta V = R_u * T * \left(N_f - N_i\right)$$

$$P\Delta V = (0.0083145\ kJ/mol\ K) * (298K) * \left[(2-(2+1))mol\right]$$

$$P\Delta V = -2.5\ kJ$$

تحسب الطاقة الداخلية من العلاقة

$$\Delta U = \Delta H - P\Delta V$$

$$\Delta U = (-566\ kJ) - (-2.5\ kJ) = -563.5\ kJ$$

مناقشة.

نلاحظ بأن عمل الحدود صغير جداً وقيم الطاقة الداخلية والإنتالبي تقريباً متساوية (الفرق هو 0.5 بالمئة)

$$\Delta U_{rxn} = -563.5\ kJ \approx \Delta H_{rxn} = -566\ kJ$$

Bassam Badran Damascus University

مناقشة

حرارة التفاعل هي نفسها سواء بحجم ثابت أو ضغط ثابت.

2.2.8 التغييرات في الطاقة الداخلية والإنتالبي في التحولات الطورية.

عندما يكون الماء على اتصال مباشر مع الهواء، يبدأ الماء بالتبخر إلى الهواء عندما تكون درجة حرارة الماء أكبر من درجة حرارة بخار الماء الموجود في الهواء والعكس صحيح أي يبدأ البخار الموجود في الهواء بالتكاثف إلى الماء عندما تكون درجة حرارة بخار الماء الموجود في الهواء أكبر من درجة حرارة الماء. يترافق مع عملية تبخر الماء باتجاه الهواء إصدار كمية معينة من الحرارة تسمى بإنتالبي التبخر *Enthalpy of Vaporization* ويترافق مع عملية التكاثف إصدار كمية من الحرارة باتجاه الماء تسمى بإنتالبي التكاثف *Enthalpy of Condensation*. إنتالبي التبخر يساوي بالقيمة إنتالبي التكاثف ويمكن إيجاد هذه القيم من الجداول الترموديناميكية المعروفة. أما عندما يتحول الماء من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة فنسمي كمية الحرارة الناتجة عن هذا التحول بإنتالبي الانصهار *Enthalpy of Fusion*. يمكن تمثيل تحول الماء من الحالة السائلة إلى البخارية بالمعادلة التالية

$$(H_2O)_l \rightarrow (H_2O)_g$$

حيث يتم تحرير كمية من الحرارة وقدرها $(\Delta H = 44\ kJ/mol)$ عند درجة حرارة $(298K = 25°C)$ ويمكن تمثيل تحول الماء من الحالة الصلبة إلى السائلة بالمعادلة التالية

$$(H_2O)_s \rightarrow (H_2O)_l$$

ويحرر حرارة قدرها $(\Delta H = 6.01\ kJ/mol)$ عند درجة حرارة $(273K = 0°C)$.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

المثال التطبيقي 8-4 – إنتالبي حرارة الانصهار.

حدد قيمة إنتالبي التحول لكمية ($50\ g$) من الماء من حالة سائل بدرجة حرارة (10°C) إلى بخار بدرجة حرارة (25°C) بالكامل.

الفرضيات: عمليات التحول تتم تحت ضغط ثابت.

التحليل: العملية مؤلفة من مرحلتين الأولى رفع درجة حرارة الماء ($10°C = 283K$) إلى ($25°C = 298K$) في حالة سائل مشبع والثانية تحويل الماء المشبع إلى بخارمشبع وكلتا العمليتين تتم بضغط ثابت. تعطى كمية الحرارة في عملية تسخين الماء وبشكل محسوس إلى سائل مشبع

$$\Delta H_{heating} = m * c * \Delta T$$

$$\Delta T(K) = \Delta T(°C)$$

$$\Delta H_{heating} = 50g * 4.18 \frac{J}{gK} * 15K$$

$$\Delta H_{heating} = 3140\ J = 3.14\ kJ$$

تعطى كمية الحرارة في عملية تحول الماء المشبع إلى بخار مشبع وبشكل كامن بالعلاقة

$$\Delta H_{vaporization} = N * \Delta \bar{H}_{latent}$$

$$\Delta H_{vaporization} = \frac{m}{\mu} * \Delta \bar{H}_{latent}$$

$$\Delta H_{vaporization} = \frac{50g}{18.02\ g/mol} * 44\ kJ/mol$$

$$\Delta H_{vaporization} = 122\ kJ$$

كمية الحرارة اللازمة لهذا التحول تساوي

Bassam Badran
Damascus University

$$\Delta H = \Delta H_{heating} + \Delta H_{vaporization}$$

$$\Delta H = 3.14 + 122$$

$$\Delta H = 125\ kJ = q_{rxn}$$

مناقشة.

قيمة الإنتالبي موجبة دلالة على أن العملية ماصة للحرارة (تبخر) وهذا مانعرفه من عمليات التحول في الترموديناميك.

3.8 الكالومتري *Calorimetry*.

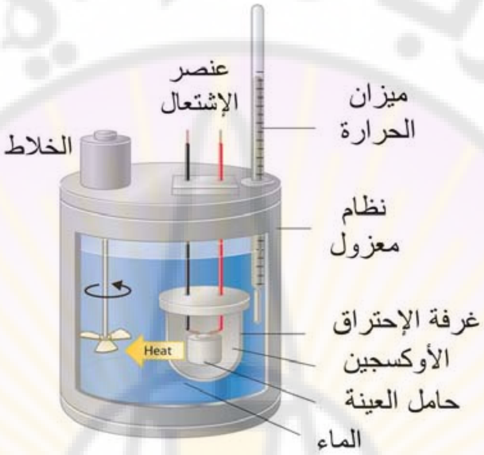
يتم قياس كمية الحرارة الناتجة عن أي تفاعل كيميائي بوسطة جهاز يسمى الكالوريمتري *Calorimetry* وهناك نوعان من الكالوريمتري:

- كالوريمتري بضغط ثابت *Constant Pressure Calorimetry* ويسمى كالوريمتري فنجان القهوة *Coffee –Cup Calorimetry* كما في الشكل (8–7).

الشكل (8–7) الكالوريمتري بضغط ثابت (فنجان القهوة).

Bassam Badran Damascus University

➢ كالوريمتري بحجم ثابت *Constant Volume Calorimetry* ويسمى الكالوريمتري المتفجر *Bomb Calorimetry* كما في الشكل (8–8).



الشكل (8–8) الكالوريمتري بحجم ثابت (المتفجر).

1.3.8 <u>الكالوريمتري بضغط ثابت (كالوريمتري فنجان القهوة).</u>

يستخدم هذا النوع من الأجهزة في قياس التغيير في إنتالبي التفاعل العياري (ΔH_{rxn}) وبشكل مباشر. كمية المادة المتفاعلة ضمن هذا النوع من الأجهزة صغيرة جداً ويمكن لهذه الأجهزة قياس فروقات في درجة الحرارة قد تصل إلى واحد بالمليون من الدرجة (10^{-6} °C). يعتمد القياس على المعادلة التالية

$$\Delta H_{rxn} = Q_{rxn} = -Q_{calorimeter} = -m * c_s * \Delta T \qquad (6\text{–}8)$$

حيث أن (ΔH_{rxn} ,J) إنتالبي التفاعل و(Q_{rxn} ,J) كمية الحرارة الناتجة عن التفاعل واللازمة لإتمام التفاعل و($Q_{calorimeter}$,J) كمية الحرارة <u>الممتصة أو المطروحة</u> من جهاز الكالوريمتري و(m, g) الكتلة الكلية الموجودة في جهاز الكالوريمتري و(c_s ,J/gK) الحرارة النوعية للمحلول *Solution* الموجود في الكلوريمتري و(ΔT) فرق درجات الحرارة

بين درجة الحرارة النهائية والابتدائية للمحلول. قيمة كمية الحرارة التي يظهرها الكالوريمتري هي عكس إشارة قيمة كمية حرارة التفاعل كما في المعادلة السابقة. فإذا كان التفاعل ماصاً للحرارة أي $(\Delta H_{rxn} > 0)$ فتكون كمية الحرارة موجبة بحسب عرف الاتجاهات بالنسبة إلى التفاعل وتكون كمية الحرارة التي يقيسها الكالوريمتري بعكس إشارة التفاعل أي سالبة بحسب عرف الاتجاه بالنسبة إلى الكالوريمتري والعكس صحيح بالنسبة إلى التفاعل الطارح للحرارة $(\Delta H_{rxn} < 0)$.

المثال التطبيقي 8-5 – كالوريمتري بضغط ثابت.

عندما يذاب $(5.03\ g)$ من هيدروكسيد البوتاسيوم مع $(100\ mL)$ من الماء المقطر في كالوريمتري فنجان القهوة (ضغط ثابت) فتزداد درجة حرارة الوسط من $(23°C)$ إلى $(34.7°C)$. إذا فرضنا أن كثافة الماء هي $(0.9969\ g/cm^3)$ احسب إنتالبي المحلول بالكيلوجول بالنسبة إلى واحد مول مع فرض أن كمية الحرارة الممتصة في جهاز الكالوريمتري مهملة وكمية الماء الموجودة داخل الكالوريمتري كبيرة والحرارة النوعية للمحلول هي الحرارة النوعية نفسها للماء المقطر.

التحليل: لحساب إنتالبي المحلول بالكيلوجول بالنسبة إلى واحد مول يجب معرفة كمية الحرارة الناتجة عن التفاعل كما في المعادلة (8-6)

$$\Delta H_{rxn} = Q_{rxn} = -Q_{calorimeter} = -m * c_s * \Delta T$$

التفاعل هو

$$(2KOH)_s + (2H_2O)_l \rightarrow 2KOOH + (2H_2)_g$$

كمية المحلول هي

$$m = m_{H_2O} + m_{KOH}$$

$$m = (100\ mL * 0.9969\ g/cm^3) + 5.03g$$

Bassam Badran Damascus University

$$m = 104.72\ g$$

بالتعويض نجد أن

$$Q_{calorimeter} = 104.73\ g * 4.184\ J/gK * (34.7 - 23)$$

$$Q_{calorimeter} = 5130J = 5.13\ kJ$$

كمية الحرارة في الكالوريمتري موجبة أي أن الكالوريمتري يستقبل الحرارة من التفاعل أي أن إنتالبي التفاعل هو

$$\Delta H_{rxn} = -Q_{calorimeter} = -5.13\ kJ$$

درجة حرارة المحلول في الكالوريمتري ارتفعت لأن كمية الحرارة التي نتجت عن التفاعل تم طرحها إلى المحلول أي أن التفاعل هو طارح للحرارة. بما أن الكتلة المولية (KOH) هي $(56.11\ g/mol)$ فإنتالبي المحلول بالنسبة إلى واحد مول هي

$$\Delta \overline{H}_{sol} = \frac{-5.13\ kJ}{5.03\ g} * 56.11 \frac{g}{mol} = -57.2 \frac{kJ}{mol}$$

2.3.8 الكالوريمتري بحجم ثابت (كالوريمتري المتفجر).

في كالوريمتري الحجم الثابت يوضع التفاعل ضمن حاوية (عبوة) فولاذية صغيرة مغلقة تماماً تحتوي على الأوكسجين وتوضع هذه العبوة داخل حاوية فولاذية أكبر تحتوي على الماء وتعطى العينة شرارة ويتم التفاعل. لا يمكن استخدام هذا النوع من الأجهزة عندما يكون أحد مكونات التفاعل هو غاز مثل عملية احتراق الوقود. كمية الحرارة المطروحة تقدر بتغيير الطاقة الداخلية للنظام حيث أن الحجم ثابت. بما أن الفرق بين التغيير في الطاقة الداخلية والإنتالبي مهمل فيمكن أن نكتب العلاقة (6-8) على الشكل

$$\Delta H_{comb} < Q_{comb} = -Q_{calorimeter} = -C_{comb} * \Delta T \qquad (7-8)$$

Bassam Badran Damascus University

حيث أن (ΔH_{comb} ,J) إنتالبي الاحتراق و(Q_{comb} ,J) كمية الحرارة الناتجة (اللازمة) لإتمام الاحتراق و($Q_{calorimeter}$,J/g) كمية الحرارة الممتصة (المطروحة) من جهاز الكالوريمتري و(C_{comb} ,J/K) الحرارة النوعية للاحتراق *Combustion* و(ΔT) فرق درجات الحرارة بين الحرارة النهائية والابتدائية. يتم معايرة الكالوريمتري المتفجر بواسطة استخدام مادة أسيد البنزويك ($Benzoic\ Acid\ C_6H_5CO_2H$) كمادة متفجرة حيث أن كمية الحرارة الناتجة عن احتراق هذه المادة هي ($\Delta H_{comb} = -26.38\ kJ/g$).

المثال التطبيقي 8–6 – كالوريمتري بحجم ثابت.

يحترق ($0.579\ g$) من أسيد البنزويك في جهاز الكالوريمتري المتفجر ويسبب في زيادة درجة الحرارة بمقدار (2.08°C). تفرغ المتفجرة من المادة وتوضع فيها ($1.732\ g$) من مادة الغليكوز مع إضافة الإكسجين إلى الحاوية. احتراق الغليكوز ينتج زيادة في درجة الحرارة بمقدار (3.64°C). احسب إنتالبي احتراق الغليكوز.

التحليل: لحساب إنتالبي الغليكوز يجب معرفة كمية الحرارة الناتجة عن احتراق أسيد البنزويك لمعرفة الحرارة النوعية للجهاز كما في المعادلة (8–7). كمية الحرارة الناتجة عن إحتراق أسيد البنزويك بضغط ثابت وبحسب القانون الأول في الترموديناميك هي

$$Q_{comb,B} = m * \Delta H_{comb,B}$$

$$Q_{comb,B} = 0.579\ g * (-2638\ J/g)$$

$$Q_{comb,B} = -15.3\ kJ$$

وبالتالي نجد أن الحرارة النوعية لجهاز الكالوريمتري من العلاقة (8–7)

$$Q_{comb,B} = -C_{comb} * \Delta T = -Q_{calorimeter}$$

$$Q_{calorimeter} = 15.3\ kJ$$

Bassam Badran
Damascus University

التفاعل هو تفاعل طارح للحرارة إلى الجهاز لأن كمية الحرارة للجهاو موجبة.

$$-C_{comb} = \frac{Q_{comb}}{\Delta T}$$

$$-C_{comb} = \frac{-15.3\ kJ}{2.08\ K}$$

$$C_{comb} = 7.34\ kJ/K$$

حرارة الاحتراق لمادة الغليكوز

$$Q_{comb,glu} = -C_{comb} * \Delta T$$

$$Q_{comb,glu} = -7.34\ kJ/K * 3.64K$$

$$Q_{comb,glu} = -26.7\ kJ$$

بما أن الكتلة المولية للغليكوز هي $(180.16\ g/mol)$ فإنتالبي الاحتراق بالنسبة إلى واحد مول هي

$$\Delta\bar{h}_{comb} = \frac{-26.7\ kJ}{1.732\ g} * 180.16\frac{g}{mol}$$

$$\Delta\bar{h}_{comb} = -2780\frac{kJ}{mol} = -2.78\frac{kJ}{kmol}$$

4.8 التغيير في إنتالبي التشكيل العياري

Standard Enthalpies of Formation.

إن التغيير في إنتالبي التشكيل العياري لأي عنصر هو التغير في الإنتالبي الذي يطرأ على العنصر عند تشكله من مول واحد من مكوناته الأساسية *Reference Form* ويعطى الرمز $(\Delta H_f^o, kJ/mol)$. المكون الأساسي للعنصر هو حالة العنصر المستقرة عند ضغط نظامي $(1\ bar)$ ودرجة حرارة $(298\ K)$ فمثلاً المكون الأساسي لعنصر الهيدروجين هو الشكل الغازي للعنصر $(H_2)_g$ ويوجد بشكل مستقر في الطبيعة

Bassam Badran
Damascus University

عند الشروط السابقة وأما المكون الأساسي لعنصر الصوديوم فهو الشكل الصلب $(Na)_s$ يوجد بشكل مستقر في الطبيعة عند الشروط السابقة. إن قيمة إنتالبي التشكيل العياري لعنصر مستقر في الطبيعة هو دائما **صفر**. توضع قيم إنتالبي التشكيل العيارية عند ضغط $(1\ bar)$ ودرجة حرارة $(298\ K = 25°C)$ ضمن جداول *JANAF* الترموديناميكية الخاصة بإنتالبي التشكيل العياري. يبين الجدول $(8-1)$ بعض الأمثلة عن إنتالبي التشكل العياري ضمن الشروط السابقة. الرمز العلوي (o) يدل على درجة الحرارة العيارية $(298\ K = 25°C)$ والرمز السفلي (f) يدل على كلمة التشكل *Formation*.

الجدول (8–1) إنتالبي التشكيل العياري لمجموعة من العناصر.

$(\Delta H_f^o, kJ/mol)$	العنصر	$(\Delta H_f^o, kJ/mol)$	العنصر
-285.8	$(H_2O)_l$	-110.5	$(CO)_g$
-241.8	$(H_2O)_g$	-393.5	$(CO_2)_g$
-46.11	$(NH_3)_g$	-74.81	$(CH_4)_g$
33.18	$(NO_2)_g$	226.7	$(C_2H_2)_g$

أمثلة عن التغيير في إنتالبي التشكيل العياري لمجموعة من العناصر بحسب المعادلات التالية

$$C\ (s) + \frac{1}{2} O_2\ (g) \rightarrow CO\ (g)$$

$$C\ (s) + O_2\ (g) \rightarrow CO_2\ (g)$$

Bassam Badran
Damascus University

$$H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) \rightarrow H_2O\,(l)$$

$$C\,(s) + 2\,H_2\,(g) + \frac{1}{2}\,O_2\,(g) \rightarrow CH_3OH\,(l)$$

5.8 التغيير في إنتالبي التفاعل العياري *Standard Enthalpies of Reaction*.

لمعرفة التغيير في الإنتالبي في تفاعل كيميائي ما، يجب تحديد الحالة الابتدائية (المواد المتفاعلة) والحالة النهائية (المواد الناتجة) لمواد هذا التفاعل وبدقة. يمكن تحديد حالة عيارية *Standard* لكل من المواد المتفاعلة والمواد الناتجة بحيث تكون هذه الحالة العيارية نقطة انطلاق في قياس التغيير في الإنتالبي لتفاعل كيميائي ما. يسمى التغيير في إنتالبي في هذه الحالة بإنتالبي التفاعل العياري *Standard Enthalpy of Reaction* ويعطى الرمز $(\Delta H^o_{rxn}, kJ/mol)$. يعرف إنتالبي التفاعل العياري على إنه التغيير في الإنتالبي الذي يحدث في نظام عندما يتحول واحد مول من المادة في تفاعل كيميائي تحت شروط عيارية. الشروط العيارية *Standard Conditions for Temperature and Pressure (STP)* هي الضغط النظامي الثابت $(1\,bar = 10^5 Pa)$ ودرجة الحرارة النظامية الثابتة $(25°C = 298\,K)$ بحسب الاتحاد الدولي للكيمياء التطبيقية وكيمياء المواد الصافية *The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*.

يُعبر عن التغيير في إنتالبي التفاعل العياري عن كمية الحرارة الناتجة أو اللازمة لإجراء التفاعل الكيميائي ويعطى بالشكل التالي

$$\Delta H^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta H^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta H^o_{f,reactants} \qquad (8\text{-}8)$$

حيث أن (N_P) عدد مولات المواد الناتجة و(N_r) عدد مولات المواد المتفاعلة.

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 8–7 – إنتالبي الاحتراق.

حدد حرارة الاحتراق للغاز $(C_2H_6)_g$ باستخدام التغيير في إنتالبي التفاعل العياري بسحب التفاعل التالي

$$(C_2H_6)_g + \frac{7}{2}(O_2)_g \rightarrow 2(CO_2)_g + 3(H_2O)_l$$

التحليل: لنتعرف على المواد الموجودة في التفاعل. المواد المتفاعلة (*Reactants*) هي

$$1 * (C_2H_6)_g + \frac{7}{2} * (O_2)_g$$

أما المواد الناتجة (*Products*) فهي

$$2 * (CO_2)_g + 3 * (H_2O)_l$$

من قانون التغيير في إنتالبي التفاعل العياري نجد أن

$$\Delta H^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta H^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta H^o_{f,reactants}$$

$$\Delta H^o_{rxn} = \left[2mol * \Delta H^o_f(CO_2)_g + 3mol * \Delta H^o_f(H_2O)_l\right] - \left[1mol * \Delta H^o_f(C_2H_6)_g + 3.5mol * \Delta H^o_f(O_2)_g\right]$$

من الجداول نحصل على قيم إنتالبي التشكيل العيارية بالشروط النظامية

$$\Delta H^o_f(CO_2)_g = -393.5\frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H^o_f(H_2O)_l = -285.8\frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H^o_f(C_2H_6)_g = -84.7\frac{kJ}{mol}$$

$$\Delta H^o_f(O_2)_g = 0\ \frac{kJ}{mol}\ (reference\ form)$$

بالتعويض نجد أن

$$\Delta H^o_{rxn} = \left[2mol * -393.5\frac{kJ}{mol} + 3mol * -285.8\, kJ/mol\right] - \left[1mol * -84.7\frac{kJ}{mol} + 3.5mol * 0\frac{kJ}{mol}\right]$$

$$\Delta H^o_{rxn} = -1559.7\, kJ$$

مناقشة:

قيمة التغيير في إنتالبي التفاعل هي سالبة أي أن التفاعل طارح للحرارة ويحتاج ($1559.7\, kJ$) لإتمام هذا التفاعل.

6.8 قانون هس *Hess's Law* في حساب التغيير في إنتالبي التفاعل العياري.

يقول قانون هس إن التغيير الكلي في إنتالبي التفاعل العياري لتفاعل كيميائي ما يساوي مجموع التغييرات الجزئية في إنتالبي التفاعل العياري لكل مرحلة من المراحل المؤلفة لهذا التفاعل حتى ولو كانت هذه المراحل افتراضية لا وجود لها.

المثال التطبيقي 8-8 – إنتالبي الاحتراق.

حدد حرارة الاحتراق للتفاعل الكيميائي الموضح في المعادلة التالية

$$3C(graphite) + 4\,(H_2)_g \rightarrow (C_3H_8)_g$$

بفرض أن إنتالبي التشكيل لكل عنصر هي

$$(C_3H_8)_g = -2219.9\, kJ/mol$$

$$C(graphite) = -393.5\, kJ/mol$$

$$(H_2)_g = -285.8\, kJ/mol$$

Bassam Badran
Damascus University

التحليل: لنستخدم قانون هس في حساب حرارة الاحتراق للغاز المذكور. المعادلات التالي هي معادلات (مراحل) حقيقية وتتم مباشرة وغير افتراضية

$$(C_3H_8)_g + 5(O_2)_g \rightarrow 3(CO_2)_g + 4(H_2O)_l \qquad \Delta H^o_{rxn} = -2219.9\ kJ$$

$$C(graphite) + (O_2)_g \rightarrow (CO_2)_g \qquad \Delta H^o_{rxn} = -393.5\ kJ$$

$$(H_2)_g + 0.5(O_2)_g \rightarrow (H_2O)_l \qquad \Delta H^o_{rxn} = -285.8\ kJ$$

نبحث الآن عن التفاعل المباشر الافتراضي للغاز $(C_3H_8)_g$ وهو المعادلة الأولى ولكن معكوسة وهي افتراضية لأن تفاعل غاز ثاني أوكسيد الكربون مع الماء لا يعطي الغاز المذكور.

$$3(CO_2)_g + 4(H_2O)_l \rightarrow (C_3H_8)_g + 5(O_2)_g \qquad \Delta H^o_{rxn} = 2219.9\ kJ$$

تحولت قيمة الإنتالبي العياري إلى قيمة موجبة لعكس اتجاه التفاعل. تتم إضافة المعادلات السابقة وجمعها بشكل صحيح كما يلي

$\cancel{3(CO_2)_g} + \cancel{4(H_2O)_l} \rightarrow (C_3H_8)_g + \cancel{5(O_2)_g}$	$2219.9\ kJ$
$3C(graphite) + \cancel{3(O_2)_g} \rightarrow \cancel{3(CO_2)_g}$	$3 * -393.5\ kJ$
$4(H_2)_g + \cancel{2(O_2)_g} \rightarrow \cancel{4(H_2O)_l}$	$4 * -285.8\ kJ$
بالجمع نحصل على	
$3C(graphite) + 4\,(H_2)_g \rightarrow (C_3H_8)_g$	$-104\ kJ$

التفاعل الكيميائي هو تفاعل ماص للحرارة بقيمة ($\Delta H^o_{rxn} = 104\ kJ$). باستخدام معادلة التغيير في إنتالبي التفاعل العياري

$$\Delta H^o_{rxn} = \sum N_P\, \Delta H^o_{f,Products} - \sum N_r\, \Delta H^o_{f,reactants}$$

$$\Delta H^o_{rxn} = [3mol * \Delta H^o_f(C)_s + 4mol * \Delta H^o_f(H_2)_g] - [1mol * \Delta H^o_f(C_3H_8)_g]$$

$$(C_3H_8)_g = -2219.9\ kJ/mol$$

Bassam Badran Damascus University

$$\Delta H^{o}_{rxn} = \left[3mol * -393.5\frac{kJ}{mol} + 4mol * -285.8\, kJ/mol\right] - \left[1mol * -2219.9\frac{kJ}{mol}\right]$$

$$\Delta H^{o}_{rxn} = -104\ kJ$$

أي أن إنتالبي المواد المتفاعلة هو أكبر من إنتالبي المواد الناتجة أي أن الطاقة تنخفض وبالتالي التفاعل ماص للحرارة (الحالة النهائية أقل من الحالة الابتدائية).

7.8 القانون الثالث في الترموديناميك

The Third Law of Thermodynamics.

يقوم القانون الثالث في الترموديناميك على تحديد مرجعية الصفر المطلق في قياس الإنتروبي (مقياس العشوائية). يقول القانون الثالث في الترموديناميك:

قيمة إنتروبي الكريستال الذري المتراص تماما هي الصفر عندما تكون درجة حرارة الكريستال تساوي الصفر المطلق ($0\ K$)

The Entropy of a Perfect Crystal is Zero When the Temperature of the Crystal is Equal to Absolute Zero

العلاقة الرياضية للقانون الثالث في الترموديناميك وبحسب نظرية الحرارة لنرنس *Nernst Heat Theorem* هي

$$\lim_{T\to 0(K)} \Delta S = 0$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

8.8 التغيير في إنتروبي التفاعل العياري *Standard Entropy of Reaction*.

يمكن التعبير عن التغيير في الإنتروبي في نظام ما بالعلاقة

$$\Delta S = S_f - S_i$$

وبما أن الحالة الابتدائية هي المواد المفاعلة والحالة النهائية هي المواد الناتجة فيمكن أن نكتب

$$\Delta S^o_{rxn} = \sum N_P\, \Delta S^o_{f,Products} - \sum N_r\, \Delta S^o_{f,reactants} \qquad (9\text{–}8)$$

الفرق بين إنتالبي التفاعل العياري وإنتروبي التفاعل العياري هو أن قيم إنتالبي التفاعل العياري هي قيم نسبية لأن المرجعية في قياس إنتالبي التشكيل العياري لكل من المواد المتفاعلة والنواتج هي قيم مختارة لاتعتمد على صفر مطلق في قياس الإنتالبي بعكس الإنتروبي حيث توجد مرجعية ثابتة وهي الصفر المطلق في قياس الإنتروبي كما يعرفها القانون الثالث في الترموديناميك. يمكن من خلال التغيير في إنتروبي التفاعل العياري معرفة اتجاه التفاعل لأن التفاعل الكيميائي عندما يحدث في نظام معزول *Isolated System* يتحرك في اتجاه زيادة العشوائية *Increase of disorder* في النظام أي أن

$\Delta S^o_{rxn} > 1.0$	موجب	التفاعل أكثر عشوائية في اتجاه النواتج ويتحرك باتجاهها
$\Delta S^o_{rxn} = 0.0$	صفر	التفاعل في وضع توازن
$\Delta S^o_{rxn} < 1.0$	سالب	التفاعل أكثر عشوائية في اتجاه المواد المتفاعلة ويتحرك باتجاهها

Bassam Badran
Damascus University

المثال التطبيقي 8−9 – إنتروبي تفاعل العياري لقيم موجبة.

حدد إنتروبي التفاعل الكيميائي الموضح في المعادلة التالية

$$(N_2)_g + (O_2)_g \leftrightarrow 2(NO)_g$$

التحليل: نستخدم الجداول في معرف إنتروبي مكونات التفاعل

$$(NO)_g = 210.76\, J/mol\ K$$

$$(N_2)_g = 191.61\, J/mol\ K$$

$$(O_2)_g = 205.14\, J/mol\ K$$

باستخدام معادلة إنتروبي التفاعل الكيميائي العياري نجد أن

$$\Delta S^o_{rxn} = \sum N_P\, \Delta S^o_{f,Products} - \sum N_r\, \Delta S^o_{f,reactants}$$

$$\Delta S^o_{rxn} = \left(2\ mol\ NO * 210.76 \frac{J}{mol\ K}\right) - \left(1\ mol\ N_2 * 191.61 \frac{J}{mol\ K} + 1\ mol\ O_2 * 205.14 \frac{J}{mol\ K}\right)$$

$$\Delta S^o_{rxn} = 421.52 - 396.75$$

$$\Delta S^o_{rxn} = 24.77 \frac{J}{K}$$

إنتروبي التفاعل العياري هو صغير ولكنه موجب لأن نواتج التفاعل هي أكثر عشوائية من المواد المتفاعلة.

المثال التطبيقي 8−10 – إنتروبي تفاعل العياري لقيم سالبة.

حدد إنتروبي التفاعل الكيميائي الموضح في المعادلة التالية

$$2(NO_2)_g \leftrightarrow (N_2O_4)_g$$

Bassam Badran Damascus University

التحليل: نستخدم الجداول في معرف إنتروبي مكونات التفاعل

$$(NO_2)_g = 240.06\ J/molK$$

$$(N_2O_4)_g = 304.29\ J/molK$$

باستخدام معادلة إنتروبي التفاعل الكيميائي العياري نجد أن

$$\Delta S^o_{rxn} = \sum N_P\, \Delta S^o_f(products) - \sum N_r\, \Delta S^o_f(reactants)$$

$$\Delta S^o_{rxn} = \left(1\ mol\ (N_2O_4)_g * 304.29\ \frac{J}{mol\ K}\right) - \left(2\ mol\ (NO_2)_g * 240.06\ \frac{J}{mol\ K}\right)$$

$$\Delta S^o_{rxn} = -175.83\ \frac{J}{K}$$

قيمة إنتروبي التفاعل العياري هي قيمة سالبة لإنه يتم إشتراك ذرتين من المواد المتفاعلة لتكوين ذرة كبيرة من النواتج وبالتالي أقل عشوائية.

9.8 الطاقة الحرة Free Energy.

تسعى كافة الأنظمة المتفاعلة عند الشروط النظامية إلى التقليل من الطاقة الحرة والتي توصف أحياناً بالطاقة المتاحة وتحويلها إلى عمل مفيد. يمكن تحديد هذه الطاقة باستخدام معادلة الطاقة الحرة لهلمهولتس أو معادلة الطاقة الحر لجبس.

1.9.8 طاقة جبس الحرة Gibbs Free Energy.

في فصل الإنتروبي تعرفنا على علاقة $(T * ds)$ والتي تعطى بالشكل

$$dU + PdV - T * dS \le 0 \qquad (kJ) \qquad (10\text{–}8)$$

العلاقة (8−10) هي علاقة مهمة في معرفة ما إذا كانت أي عملية حقيقية تحدث بشكل تلقائي *Spontaneous Process* أم لا وتحقق القانون الثاني في الترموديناميك. شاهدنا الكثير من الحالات ضمن هذه المعادلة وبشروط مختلفة.

أهم حالة هي عندما تكون العملية إيزوبارية $(P = P_{ext} = const)$ بضغط خارجي معين وإيزوثرمية $(T = T_{sur} = const)$ بدرجة حرارة تساوي درجة حرارة المحيط فتتحول المعادلة إلى

$$d(H - TS) \leq 0 \qquad (kJ) \qquad (11-8)$$

وهي بالتعريف طاقة جبس الحرة *Gibbs Free Energy* والتي تعطى الرمز (G) وتتحول المعادلة إلى

$$d(G) \leq 0 \qquad (kJ) \qquad (12-8)$$

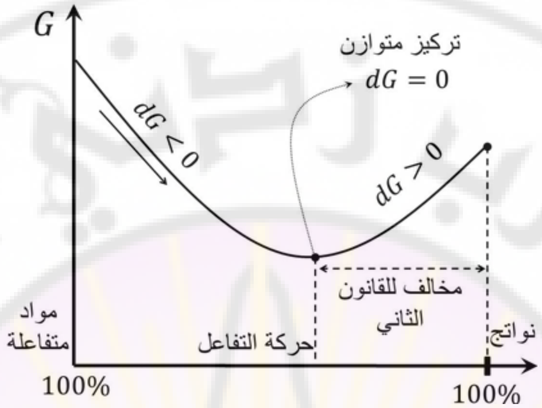
أو تكتب بالشكل

$$d(G) = G_2 - G_1 \leq 0 \qquad (kJ)$$

أي أن النظام يتحرك في اتجاه إتمام العملية عندما يكون التغيير في قيمة جبس أصغر من الصفر. العلاقة (8−12) هي أيضاً الصيغة الرياضية الثانية للقانون الثاني في الترموديناميك.

في التفاعلات الكيميائية أو في التحول الطوري نستخدم علاقة طاقة جبس لمعرفة حركة التفاعل. يبين الشكل (8−9) أن التفاعل الكيميائي عند درجة حرارة معينة وضغط معين يتحرك في اتجاه تناقص تابع جبس إلى أن يصل إلى أصغر قيمة وهي الصفر. أصغر قيمة لتابع جبس هي عندما يصل التفاعل الكيميائي إلى حالة التوازن الكيميائي بين كافة مكوناته عندما تكون المعادلة (8−12) محققة للصفر أي

$$(dG)_{T,P} = 0 \qquad (13-8)$$



الشكل (8−9) علاقة جبس مع حركة التفاعل.

2.9.8 <u>حساب الطاقة الحرة لجبس في التفاعل العياري.</u>

يمكن أن نقول إن أهم فكرة في الترموديناميك الكيميائي هي الطاقة الحرة لجبس (G) التي تحدد إذا كان هناك أي إمكانية لوجود تبدل أو تحول من أي مادة موجودة ضمن أي نظام. تعبر طاقة جبس الحرة عن إمكانية حدوث أو عدم حدوث أي تفاعل ترموديناميكي أو تحول ضمن النظام. تحسب طاقة جبس عند ضغط ($1\ atm$) ثابت ودرجة حرارة ($25°C = 298.15\ K$) ثابتة. تعطى قيم طاقة جبس في التشكيل العياري *Gibbs free Energy of Formation* ضمن جداول ترموديناميكية وبالرمز G_f^o. أما التغيير في طاقة جبس في التفاعل العياري بالشكل

$$\Delta G_{rxn}^o = \sum N_P * \Delta G_{f,Products}^o - \sum N_r * \Delta G_{f,reactant}^o \qquad (14-8)$$

يمكن الحصول على قيم طاقة جبس الحرة (ΔG_f^o) عند درجة الحرارة النظامية ($25°C = 298.15\ K$) والضغط النظامي ($1\ atm$) من جداول ترموديناميكية خاصة. في الجدول (8−2) بعض القيم للطاقة الحرة لجبس والإنتالبي (حرارة التفاعل) والإنتروبي عند الشروط المرجعية نفسها من ضغط ودرجة حرارة لبعض المركبات. يجب التذكير أن

Bassam Badran
Damascus University

الطاقة الحرة لجبس لمادة مستقرة حرة غير مركبة هي صفر. نلاحظ من الجدول أن الطاقة الحرة لجبس لعنصر الأوكسجين والهيدروجين المستقر هي صفر.

الجدول (8-2) الطاقة الحرة لجبس لبعض المواد.

المركب	$\Delta H_f^o\ (kJ/mol)$	$\Delta S_f^o\ (J/molK)$	$\Delta G_f^o (kJ/mol)$
$\boldsymbol{CH_4(g)}$	**-74.81**	**186.26**	**-50.72**
$CaCl_2(s)$	-795.8	104.6	-748.1
$\boldsymbol{H_2(g)}$	**0**	**130.68**	**0**
$H\ (g)$	217.97	114.7	203.25
$\boldsymbol{H_2O\ (l)}$	**-285.83**	**69.91**	**-237.13**
$H_2O\ (g)$	-241.82	188.83	-228.57
$\boldsymbol{O_2\ (g)}$	**0**	**205.14**	**0**
$O_2\ (l)$	-11.7	110.9	16.4
$\boldsymbol{CO\ (g)}$	**-100.5**	**197.9**	**-137.2**

يمكن أيضاً أن نحسب التغيير في طاقة جبس في التفاعل العياري من العلاقة التالية

$$\Delta G_{rxn}^o = \Delta H_{rxn}^o - T * \Delta S_{rxn}^o \qquad (15-8)$$

القيمة (ΔH_{rxn}^o) التغيير في إنتالبي التفاعل العياري و (ΔS_{rxn}^o) التغيير في إنتروبي التفاعل العياري و(T) درجة حرارة التفاعل بالكالفن. عندما يكون الإنتروبي (الذي يعبر

Bassam Badran
Damascus University

عن العشوائية في النظام أو الضياعات في النظام) في العلاقة (14−8) أكبر من الإنتالبي حرارة التشكل (المحتوى الطاقي) فيكون $1 > \Delta G^o_{rxn}$ والتفاعل مباشر من دون أي مساعدة والعكس صحيح.

من المعادلة (15−8) نجد أن نقطة التجمد والذوبان يمكن حسابها لأن طاقة جبس عند هذه العمليات تساوي الصفر أي نقطة الغليان هي

$$Normal\ BP = \frac{\Delta H^o_{vap}}{\Delta S^o_{vap}} \qquad (16-8)$$

ونقطة التجمد تحسب من العلاقة

$$Normal\ FP = \frac{\Delta H^o_{fus}}{\Delta S^o_{fus}} \qquad (17-8)$$

يعبر الجدول (3−8) عن احتمالات حدوث التفاعل وبشكل تلقائي وذلك بحسب تغيير إشارة كل من الإنتروبي والإنتالبي لأن قيم درجة الحرارة دائما موجبة.

الجدول (3−8) تحديد شروط تلقائية حدوث التفاعل.

	$-\Delta H^o_{rxn}$ (Exothermic) طارح للحرارة	$+\Delta H^o_{rxn}$ (Endothermic) ماص للحرارة
$+\Delta S^o_{rxn}$ عشوائي	$\Delta G^o_{rxn} = (-) - (+)$ يحدث تلقائياً دائما	$\Delta G^o_{rxn} = (+) - (+)$ يحدث تلقائياً عند حرارة عالية. لأيحدث تلقائياً عند حرارة منخفضة
$-\Delta S^o_{rxn}$ منظم	$\Delta G^o_{rxn} = (-) - (-)$ يحدث تلقائياً عند حرارة منخفضة لا يحدث تلقائياً عند حرارة عالية	$\Delta G^o_{rxn} = (+) - (-)$ لا يحدث تلقائياً أبداً إلا بمساعدة خارجية

يعكس الجدول (3-8) حدوث وعدم حدوث وماهي درجات الحرارة المرافق لذلك.

المثال التطبيقي 8-11 – طاقة جبس لتفاعل كيميائي.

حدد درجة الحرارة التي يكون فيها هذا التفاعل تلقائياً وفي الاتجاه اليميني.

$$(CO)_g + (S)_s + 2(O_2)_g \rightarrow (COSO_4)_s$$

التحليل: نأخذ حالة التوازن للمعادلة السابقة وهي عندما طاقة جبس تساوي الصفر ونحسب درجة حرارة التفاعل عند حالة التوازن. عند قيم أقل من درجة الحرارة المحسوبة يكون التفاعل تلقائياً وأكبر منها تفاعل غير تلقائي. من الجداول الترموديناميكية نجد حرارة التشكل لكل العناصر

$$\Delta H^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta H^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta H^o_{f,reactants}$$

$$\Delta H^o_{rxn} = -888.3\ kJ/mol$$

$$\Delta S^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta S^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta S^o_{f,reactants}$$

$$\Delta S^o_{rxn} = -118.3\ kJ/K$$

بالتطبيق نجد أن

$$\Delta G^o_{rxn} = \Delta H^o_{rxn} - T\,\Delta S^o_{rxn}$$

$$0 = -888.3 + T * 118.3$$

$$T = 7.508\ K$$

Bassam Badran
Damascus University

أقل من هذه الدرجة يكون تلقائياً وأعلى من هذه الدرجة يكون غير تلقائي. يمكن أن نجد النتيجة نفسها من استخدام المعادلة

$$\Delta G^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta G^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta G^o_{f,reactant}$$

المثال التطبيقي 8−12 – الطاقة اللازمة لتفكك الماء.

إستخراج الطاقة الحرة لجبس في تحليل الماء كهربائياً كما في الشكل. يتم تحليل الماء وفق المعادلة التالية

$$H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$$

عند تزويد الطاقة الكهربائية من البطارية فإن كل مول ماء يتحلل إلى مول الهيدروجين ونصف مول من الأوكسجين. باستخدام القانون الأول في الترموديناميك وعند ضغط جوي نظامي ودرجة حرارة ثابتة $(25°C = 298\ K)$ نجد من علاقة الطاقة الحرة أن

$$\Delta G^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta G^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta G^o_{f,reactant}$$

$$\Delta G^o_{rxn} = [(0) + 0.5 * (0)] - (-273.13) = +273.13\ kJ$$

التفاعل يحدث تلقائياً في الاتجاه اليساري ومن دون مساعدة ولكن نحن بحاجة إلى مساعدة في حركته بالاتجاه اليميني. ليتم تفكيك الماء إلى عناصره فإننا بحاجة إلى الطاقة اللازمة لهذا التفكيك هي.$(+273.13\ kJ)$ وهي الطاقة التي توفرها البطارية كما هو واضح بالشكل. باستخدام العلاقة العامة للطاقة الحرة لجبس فهي

$$\Delta G^o_{rxn} = \Delta H^o_{rxn} - T * \Delta S^o_{rxn}$$

من الجداول المتوفرة لدينا نجد كلاً من الإنتالبي للمنتجات وللمتفاعلات مع العلم بأن درجة الحرارة هي الدرجة المرجعية

المركب	$H_2O\ (l)$	$H_2(g)$	$0.5\ O_2(g)$	التغيير في الطاقة
إنتالبي kJ	-285.83	0	0	$\Delta H = 285.83kJ$
إنتروبي (J/K)	69.91	130.68	(0.5*205.14)	$T\Delta S = 48.7kJ$

بالتعويض في معادلة جبس للطاقة الحرة

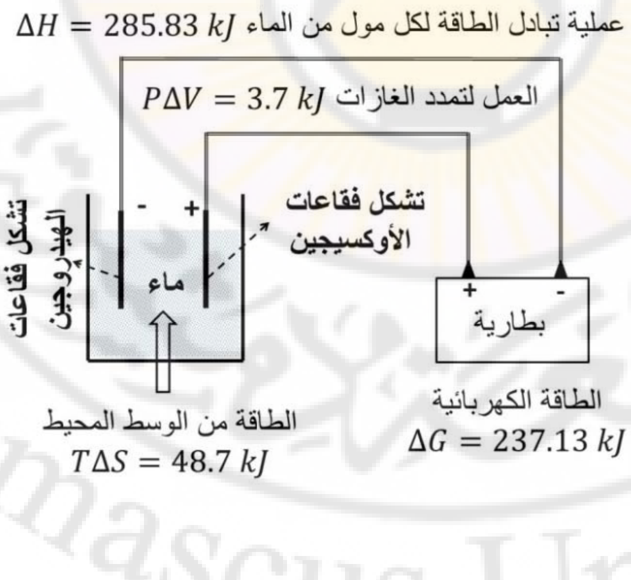
$$\Delta G^o_{rxn} = 285.83 - 48.7 = 237.13\ kJ$$

مناقشة. العملية يجب أن توفر الطاقة اللازمة لتفكيك الماء والطاقة اللازمة لتمديد الغاز المنتج على الأقطاب. إن العمل المبذول في هذا النظام هو

$$W = P\Delta V = 3715\ J = 3.715\ kJ$$

أما الطاقة الداخلية في النظام فيمكن أن تحسب كما يلي

$$\Delta U = \Delta H - P\Delta V = 285.83 - 3.72 = 282.1\ kJ$$



التغيير في الطاقة الداخلية يجب أن يساوي الطاقة اللازمة لتمدد الغازات في الماء لذلك التغيير في الإنتالبي يعبر عن الطاقة الضرورية لتفعيل التحليل الكهربائي. يجب الانتباه إلى أن الطاقة

Bassam Badran
Damascus University

لتحليل الماء هي ليست كل الطاقة السابقة لإن الإنتروبي يساعد في عملية التحليل فالطاقة الضرورية لتحليل الماء هي طاقة جبس

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 285.83 - 48.7 = 237.13\ kJ$$

نلاحظ أن الطاقة الحرة لجبس في كلتا العلاقتين متساوية.

3.9.8 ثابت توازن التفاعل بدلالة طاقة جبس لخليط من الغازات المثالية.

يمكن كتابة علاقة الثابت بدلالة طاقة جبس في التفاعل العياري بالشكل

$$k_P = e^{\left(-\Delta G^o_{rxn}/_{R_u * T}\right)} \qquad (18-8)$$

تعطى قيم الثابت في جداول ترموديناميكية خاصة. يمكن أيضاً أن نعطي هذا الثابت بدلالة الضغوط الجزئية لمكونات التفاعل بالشكل

$$xA + yB \rightarrow zC + wD$$

$$k_P = \frac{[P_c]^z * [P_D]^w}{[P_A]^x * [P_B]^y} \qquad (19-8)$$

المثال التطبيقي 8–13 – ثابت التوازن لعملية تفكك.

استخدام طاقة جبس في التفاعل العياري في تحدي ثابت التوزان لعملية التفكك التالية

$$N_2 \rightarrow 2N$$

عند درجة حرارة (25°C).

الفرضيات: الغازات هي مثالية.

Bassam Badran
Damascus University

التحليل: يحسب ثابت التوازن بدلالة طاقة جبس بالعلاقة

$$k_P = e^{\left(-\Delta G^o_{rxn}/_{R_u * T}\right)}$$

طاقة جبس في التفاعل العياري تعطى

$$\Delta G^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta G^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta G^o_{f,reactant}$$

$$\Delta G^o_{rxn} = (2\, mol\, N * 455.514\, kJ/mol) - (1\, mol\, N_2 * 0\, kJ/mol)$$

$$\Delta G^o_{rxn} = 911.020\, kJ/kmol$$

بالتعويض نجد أن

$$k_P = e^{\left(-\Delta G^o_{rxn}/_{R_u * T}\right)}$$

$$ln(k_P) = \frac{-\Delta G^o_{rxn}}{R_u * T}$$

$$ln(k_P) = \frac{-911.020\, kJ/kmol}{(8.314\, kJ/kmol) * 298.15K}$$

$$ln(k_P) = -367.5$$

$$k_P = 2 * 10^{-160}$$

تتطابق القيمة المحسوبة للثابت بالقيمة الموجودة في الجداول. قيمة الثابت تقريباً صفر وهذا يشير إلى أن هذا التفاعل لا يمكن أن يحدث عند هذه عند الشروط المطروحة كما شاهدنا في بداية الدرس شرحاً عن ثابت التوازن بدلالة تركيز المواد.

Bassam Badran
Damascus University

Bassam Badran
Damascus University

<u>ملخص فصل الترموديناميك الكيميائي</u>

- ثابت توازن التفاعل

$$xA + yB \rightarrow zC + wD$$

$$Reactants \rightarrow Products$$

$$k_c = \frac{[C]^z * [D]^w}{[A]^x * [B]^y}$$

الأقواس المربعة [−] تعبر عن تركيز المادة بالمول بالليتر (mol/L)

- التفاعل الكيميائي الذي **<u>يحرر</u>** كمية معينة من الحرارة عند خلط المواد المتفاعلة يسمى بالتفاعل الطارح للطاقة *Exothermic Reaction* أما التفاعل الكيميائي الذي **<u>يمتص</u>** كمية معينة من الحرارة نتيجة خلط المواد المتفاعلة فيسمى بالتفاعل الماص للطاقة *Endothermic Reaction*

في نظام مغلق بحجم ثابت

$$\Delta U_{rxn} = q_{rxn} = q_V$$

في نظام مفتوح بضغط ثابت

$$\Delta H_{rxn} = q_{rxn} = q_P$$

في حال كانت $\Delta H_{rxn} = q_{rxn} > 0$	التفاعل ماص للحرارة *Endothermic Reaction*
في حال كانت $\Delta H_{rxn} = q_{rxn} < 0$	التفاعل طارح للحرارة *Exothermic Reaction*

- الكالوريمتري بضغط ثابت (كالوريمتري فنجان القهوة)

$$\Delta H_{rxn} = q_{rxn} = -q_{calorimeter} = -m * c_s * \Delta T$$

- الكالوريمتري بحجم ثابت (كالوريمتري المتفجر)

$$\Delta H_{comb} < q_{comb} = -q_{calorimeter} = -c_{comb} * \Delta T$$

- التغيير في إنتالبي التفاعل العياري

$$\Delta H^o_{rxn} = \sum N_P \, \Delta H^o_{f,Products} - \sum N_r \, \Delta H^o_{f,reactants}$$

- القانون الثالث في الترموديناميك

يقول إن قيمة إنتروبي الكريستال الذري المتراص تماماً هي الصفر عندما تكون درجة حرارة هذه الكريستال تساوي الصفر المطلق $(0\,K)$

- التغيير في إنتروبي التفاعل العياري

$$\Delta S^o_{rxn} = \sum N_P \, \Delta S^o_{f,Products} - \sum N_r \, \Delta S^o_{f,reactants}$$

$\Delta S^o_{rxn} > 1.0$	موجب	التفاعل أكثر عشوائية في اتجاه النواتج ويتحرك باتجاهها
$\Delta S^o_{rxn} = 0.0$	صفر	التفاعل في وضع توازن
$\Delta S^o_{rxn} < 1.0$	سالب	التفاعل أكثر عشوائية في اتجاه المواد المتفاعلة ويتحرك باتجاهها

- التغيير في طاقة جبس في التفاعل العياري

$$\Delta G^o_{rxn} = \sum N_P * \Delta G^o_{f,Products} - \sum N_r * \Delta G^o_{f,reactant}$$

أو من العلاقة

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$\Delta G^o_{rxn} = \Delta H^o_{rxn} - T * \Delta S^o_{rxn}$$

	$-\Delta H^o_{rxn}$ $(Exothermic)$ طارح للحرارة	$+\Delta H^o_{rxn}$ $(Endothermic)$ ماص للحرارة
$+\Delta S^o_{rxn}$ عشوائي	$\Delta G^o_{rxn} = (-) - (+)$ يحدث تلقائياً دائما	$\Delta G^o_{rxn} = (+) - (+)$ يحدث تلقائياً عند حرارة عالية. لا يحدث تلقائياً عند حرارة منخفضة
$-\Delta S^o_{rxn}$ منظم	$\Delta G^o_{rxn} = (-) - (-)$ يحدث تلقائياً عند حرارة منخفضة لا يحدث تلقائياً عند حرارة عالية	$\Delta G^o_{rxn} = (+) - (-)$ لا يحدث تلقائياً أبداً إلا بمساعدة خارجية

- ثابت توازن التفاعل بدلالة طاقة جبس لخليط من الغازات المثالية

$$k_P = e^{\left(-\Delta G^o_{rxn}/_{R_u * T}\right)}$$

$$k_P = \frac{[P_C]^z * [P_D]^w}{[P_A]^x * [P_B]^y}$$

Bassam Badran
Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل
الترموديناميك الكيميائي

1. حدد حرارة التفاعل للمعادلة التالية

$$(N_2)_g + (O_2)_g \leftrightarrow (2NO)_g$$

2. حدد حرارة التفاعل للمعادلة التالية

$$(B_2H_9)_g + (12O_2)_g \leftrightarrow (5B_2H_3)_g + (9H_2O)_g$$

3. إستخدم قانون هس في معرفة إنتالبي التفاعل التالي

$$(N_2)_g + (O_2)_g \leftrightarrow (2NO)_g$$

4. حدد حرارة التفاعل وإنتروبي التفاعل وطاقة جبس في التفاعل وحركة التفاعل التالي

$$(2C_2H_2)_g + (5O_2)_g \leftrightarrow (4CO_2)_g + (2H_2O)_g$$

5. اكتب معادلة ثابت توازن التفاعل

$$(2SO_2)_g + (O_2)_g \leftrightarrow (3SO_3)_g$$

$$(N_2O)_g + (0.5\ O_2)_g \leftrightarrow (2NO)_g$$

$$(Cu)_s + (2Ag)_{aq} \leftrightarrow (Cu)_{aq} + (2Ag)_s$$

$$(CaCO_3)_g \leftrightarrow (CaCO)_s + (CO_2)_g$$

$$(2NaHCO_3)_s \leftrightarrow (Na_2CO_3)_s + (CO_2)_g + (H_2O)_g$$

6. احسب ثابت توازن التفاعل للتفاعل

$$(2SO_2)_g + (O_2)_g \leftrightarrow (3SO_3)_g$$

باعتبار أن $[(SO_2)_g = 0.2\ M]$ و $[(O_2)_g = 0.5\ M]$ و $[(SO_3)_g = 0.5\ M]$.

7. حدد حرارة التفاعل والإنتروبي وطاقة جبس للمسألة (5).

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الفصل التاسع

Chapter Nine

العلاقات بين البارامترات الترموديناميكة

Thermodynamics Property Relations

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

الرموز والمصطلحات العلمية.

الرمز	المصطلح العلمي	الوحدة
A	بارامتر هلمهولتس للطاقة الحرة	J
a	بارامتر هلمهولتس للطاقة الحرة النوعي	J/kg
c_v	الحرارة النوعية عند حجم ثابت	$J/kg\ K$
c_P	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$J/kg\ K$
c_{Po}	الحرارة النوعية عند الضغط الصفري	$J/kg\ K$
G	بارامتر جبس للطاقة الحرة	J
g	بارامتر جبس للطاقة الحرة النوعي	J/kg
h	بارامتر الإنتالبي النوعي	J/kg
dh	التغيير في بارامتر الإنتالبي النوعي	J/kg
∂h	تفاضل بارامتر الإنتالبي النوعي	J/kg
δQ	التغيير في كمية الحرارة على خطوة صغيرة	J
R	ثابت وسيط التشغيل (الغاز)	$J/kg\ K$
R_u	ثابت الغازات العامة	$J/kg\ K$
s	الإنتروبي النوعي	$kJ/kg\ K$

Bassam Badran Damascus University

s_f	إنتروبي حالة السائل المشبع النوعي	$kJ/kg\ K$
s_g	إنتروبي حالة البخار المشبع النوعي	$kJ/kg\ K$
s_{fg}	إنتروبي حالة التحول الطوري النوعي	$kJ/kg\ K$
ds	التغيير في بارامتر الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
∂s	تفاضل بارامتر الإنتروبي النوعي	$J/kg\ K$
T	درجة الحرارة	K أو $°C$
dT	التغيير في بارامتر درجة الحرارة	K أو $°C$
∂T	تفاضل بارامتر درجة الحرارة	K أو $°C$
T_{cr}	درجة الحرارة الحرجة	K أو $°C$
T_r	درجة حرارة المصغرة	K أو $°C$
P	الضغط	kPa أو bar
dP	التغيير في بارامتر الضغط	kPa أو bar
∂P	تفاضل بارامتر الضغط	kPa أو bar
P_r	الضغط المصغرة	kPa أو bar
V	الحجم	m^3
dV	التغيير في بارامتر الحجم	m^3
∂V	تفاضل بارامتر الحجم	m^3
v	الحجم النوعي	m^3/kg

Bassam Badran
Damascus University

m^3/kg	التغيير في بارامتر الحجم النوعي	dv
m^3/kg	تفاضل في بارامتر الحجم النوعي	∂v
m^3/kg	الحجم النوعي للسائل المشبع النوعي	v_f
m^3/kg	الحجم النوعي للبخار المشبع النوعي	v_g
m^3/kg	الحجم النوعي في التحول الطوري النوعي	v_{fg}
kJ/kg	الطاقة الداخلية النوعية	u
kJ/kg	التغيير في بارامتر الطاقة الداخلية النوعية	du
kJ/kg	تفاضل في بارامتر الطاقة الداخلية النوعية	∂u
لا بعدي	معامل الانضغاط	z
لا بعدي	إنتروبي الاختلاف	z_s
لا بعدي	إنتالبي الاختلاف	z_h
$1/kPa$	معامل الانضغاط الحراري	α
$1/°C$	معامل الانضغاط الحجمي	β
$kg\ K/kPa$	معامل جول – تومسون	μ_{JT}

Bassam Badran
Damascus University

مقدمة الفصل.

سنقوم في هذا الفصل بفحص البارامترات الترموديناميكية التي نستعملها في القوانين الأول والثاني والثالث ونجد الرابط بين هذه العلاقات. إن بارامترات درجة الحرارة والضغط والحجم يمكن أن تقاس مباشرة أما الكثافة والحجم النوعي فيمكن إيجادها من البارامترات السابقة ولكن الطاقة الداخلية و الإنتالبي والإنتروبي لا يمكن قياسها بشكل مباشر أو بواسطة بارامترات آخرى لذلك يجب أن نفهم كيفية إيجاد هذه البارامترات بمعزل عن الجداول الموجودة لها.

نبدأ بهذا الفصل بالحديث عن علاقات ماكسويل *Maxwell Relations* والتي تشكل الأساس في معرفة كافة البارامترات، ثم نتعرف على معادلة كلابيرون *Clapeyron Equation* والتي تحدد الطاقة الكامنة للمادة (إنتالبي التبخر *Enthalpy of Vaporization*) من خلال بارامترات الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة، ثم نحدد الحرارة النوعية عند ضغط ثابت وحجم ثابت وتغيير الطاقة الداخلية وتغيير الإنتالبي وتغيير الإنتروبي لمادة ذات طور واحد *Pure Substance* وبمختلف الشروط. نناقش بعدها معامل جول – تومسون *Joule-Thomson Coefficient* الذي يعبر عن تغيير درجة الحرارة مع الضغط في عملية الخنق. وأخيراً نطور طريقة لمعرفة التغيير في الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي للغازات الحقيقية من خلال استخدام مخططات الإنتالبي والإنتروبي.

<u>الفوائد العلمية من الفصل</u>

إن الأهداف المرجوة من هذا الفصل هي:

- ✓ تطوير العلاقات الأساسية بين البارامترات الترموديناميكية.
- ✓ التعبير عن البارامترات التي لا يمكن قياسها عن طريق بارامترات قابلة للقياس.
- ✓ تطوير علاقات ماكسويل التي هي أساس العلاقات الترموديناميكية.

Bassam Badran
Damascus University

- ✓ تطوير معادلة كلابيرون للمادة من خلال الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة.
- ✓ تطوير علاقة كلابيرون – كلاسيوس لمعرفة حرارة التبخر للمادة وحيدة الطور.
- ✓ تحديد الطاقة الكامنة للمادة من خلال الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة.
- ✓ تطوير العلاقات العامة للحرارة النوعية عند ضغط وحجم ثابت.
- ✓ تطوير علاقات تغيير الطاقة الداخلية والإنتروبي والإنتالبي لمادة ذات طور واحد.
- ✓ مناقشة معامل جول – طومسون.
- ✓ تطوير الطرائق لتحديد التغير في الإنتالبي والإنتروبي والطاقة الداخلية للغازات الحقيقية من خلال المخططات.

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

محتويات هذا الفصل:

		الصفحة
1.9	علاقات ماكسويل العامة.	534
2.9	معادلة كلابيرون.	539
3.9	العلاقات العامة لتغيير الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي والحرارة النوعية.	544
1.3.9	علاقة التغيير في الطاقة الداخلية.	544
2.3.9	علاقة التغيير في الإنتالبي.	546
3.3.9	علاقة تغيير في الإنتروبي.	547
4.3.9	علاقة الحرارة النوعية	549
1.4.3.9	العلاقة بين الحرارة النوعية عند ضغط وحجم ثابت.	550
2.4.3.9	معامل التمدد الحجمي والانضغاط الحراري.	551
4.9	معامل جول – طومسون.	556
5.9	العلاقات العامة لتغيير الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي للغازات الحقيقية.	560
1.5.9	التغيير في الإنتالبي للغازات الحقيقية.	560
2.5.9	التغيير في الطاقة الداخلية للغازات الحقيقية.	563
3.5.9	التغيير في الإنتروبي للغازات الحقيقية.	563
	ملخص الفصل.	568
	مسائل غير محلولة.	571
	نهاية الفصل.	572

Bassam Badran
Damascus University

1.9 علاقات ماكسويل العامة *The Maxwell Relations*.

العلاقات التي تربط المشتق التفاضلي *Partial Derivatives* لبارامترات الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة والإنتروبي لنظام بسيط قابل للانضغاط تسمى بعلاقات ماكسويل. نحصل على هذه العلاقات من مجموعة من المعادلات التي سبق شرحها وهي علاقة (TdS) المشهورة والتي حصلنا عليها من تطبيق القانون الأول في الترموديناميك لعملية عكوسة واعتبرنا أن كمية الحرارة يمكن أن تمثل بالإنتروبي

$$T * dS = dU + P * dV$$

- علاقة الطاقة الداخلية.

من علاقة القانون الأول في الترموديناميك وعلاقة (TdS) نجد أن التغيير في الطاقة الداخلية هو

$$dU = T * dS - P * dV \qquad (1-9)$$

أي أن الطاقة الداخلية تابع طبيعي *Thermodynamic Potential Function* لكل من الإنتروبي والحجم

$$U = U(S, V)$$

مفاضلة المعادلات السابقة

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV$$

بالمقارنة نجد أن

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T \qquad (2-9)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -P \qquad (3-9)$$

Bassam Badran
Damascus University

باستخدام التفاصل الثاني للتابع الطبيعي لبارامتر الطاقة الداخلية نجد

$$\frac{\partial^2 U}{\partial S\,\partial V} = \frac{\partial^2 U}{\partial V\,\partial S}$$

$$\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = \frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V$$

وباستخدام المعادلات (2−9) و(3−9) نجد

$$-\frac{\partial P}{\partial S} = \frac{\partial T}{\partial V} \qquad \leftarrow \qquad U \qquad\qquad (4-9)$$

- علاقة الإنتالبي.

باستخدام علاقة مايير وبمفاضلتها نجد أن التغيير في الإنتالبي هو

$$dH = dU + d(P * V)$$

$$dH = (dU + P * dV) + V * dP$$

بتعويض علاقة التغيير في الطاقة الداخلية من المعادلة (1−9) في معادلة الإنتالبي فنجد

$$dH = T * dS + V * dP$$

اي

$$dH = T * dS + V * dP \qquad\qquad (5-9)$$

أي أن الإنتالبي تابع طبيعي *Thermodynamic Potential Function* لكل من الإنتروبي والضغط

$$H = H(S, P)$$

مفاضلة المعادلات السابقة

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_P dS + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_S dP$$

بالمقارنة نجد أن

$$\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_P = T \qquad (6-9)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_S = V \qquad (7-9)$$

باستخدام التفاصل الثاني للتابع الطبيعي لبارامتر الإنتالبي نجد

$$\frac{\partial^2 H}{\partial S\,\partial P} = \frac{\partial^2 H}{\partial P\,\partial S}$$

$$\frac{\partial}{\partial S}\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_S = \frac{\partial}{\partial P}\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_P$$

وباستخدام المعادلات (6−9) و(7−9) نجد

$$\frac{\partial T}{\partial P} = \frac{\partial V}{\partial S} \quad \leftarrow \quad H \qquad (8-9)$$

- علاقة هلمهولتس.

وجدنا من علاقة (Tds) أيضاً بارامترات إضافية وهي بارامتر هلمهولتس *Helmholtz Function* والذي يرمز له (A) والذي يعطى بالشكل

$$A = U - T * S$$

بمفاضلة معادلة هلمهولتس نجد

$$dA = dU - T * dS - S * dT$$

بتعويض علاقة التغيير في الطاقة الداخلية من المعادلة (1−9) في معادلة هلمهولتس فنجد

$$dA = (T * dS - P * dV) - T * dS - S * dT$$

Bassam Badran Damascus University

أي

$$dA = -S * dT - P * dV \qquad (9-9)$$

أي أن هلمهولتس تابع طبيعي *Thermodynamic Potential Function* لكل من الحجم ودرجة الحرارة

$$A = A(T, V)$$

مفاضلة المعادلات السابقة

$$dA = \left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial A}{\partial V}\right)_T dV$$

بالمقارنة نجد أن

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_V = -S \qquad (10-9)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial V}\right)_T = -P \qquad (11-9)$$

باستخدام التفاصل الثاني للتابع الطبيعي لبارامتر هلمهولتس نجد

$$\frac{\partial^2 A}{\partial T\, \partial V} = \frac{\partial^2 A}{\partial V\, \partial T}$$

$$\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial A}{\partial V}\right)_T = \frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_V$$

وباستخدام المعادلات (10−9) و(11−9) نجد

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{\partial S}{\partial V} \quad \leftarrow \quad A \qquad (12-9)$$

- علاقة جبس.

وجدنا من علاقة (Tds) بارامتر جبس *Gibbs Function* والذي يرمز له (G) والذي يعطى بالشكل

Bassam Badran Damascus University

$$G = H - T * S$$

بمفاضلة معادلة جبس نجد أن

$$dG = dH - T * dS - S * dT$$

بتعويض علاقة التغيير في الإنتالبي من المعادلة (5−9) في معادلة جبس نجد

$$dG = (T * dS + V * dP) - T * dS - S * dT$$

$$dG = -S * dT + V * dP \qquad (13-9)$$

أي أن جبس تابع طبيعي *Thermodynamic Potential Function* لكل من الضغط ودرجة الحرارة

$$G = G(T, P)$$

مفاضلة المعادلات السابقة

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T dP$$

بالمقارنة نجد أن

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S \qquad (14-9)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V \qquad (15-9)$$

باستخدام التفاضل الثاني للتابع الطبيعي لبارامتر جبس نجد

$$\frac{\partial^2 G}{\partial T\, \partial P} = \frac{\partial^2 G}{\partial P\, \partial T}$$

Bassam Badran
Damascus University
Damascus University

$$\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = \frac{\partial}{\partial P}\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P$$

وباستخدام المعادلات (14−9) و(15−9) نجد

$$\frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{\partial S}{\partial P} \quad \leftarrow \quad G \qquad (16-9)$$

تسمى هذه العلاقات (4−9) و (8−9) و (12−9) و (16−9) بعلاقات ماكسويل *Maxwell's Relatioship* لنظام بسيط قابل للانضغاط.

Function	*Differential Equation*	*Maxwell Relation*
$U = U(S,V)$	$dU = -P * dV + T * dS$	$-\frac{\partial P}{\partial S} = \frac{\partial T}{\partial V}$
$H = H(S,P)$	$dH = V * dP + T * dS$	$\frac{\partial T}{\partial P} = \frac{\partial V}{\partial S}$
$A = A(T,V)$	$dA = -P * dV - S * dT$	$\frac{\partial S}{\partial V} = \frac{\partial P}{\partial T}$
$H = H(T,P)$	$dG = V * dP - S * dT$	$-\frac{\partial S}{\partial P} = \frac{\partial V}{\partial T}$

هذه العلاقات مهمة جداً لإنها تعطي إمكانية تحديد الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي وهلمهولتس وجبس بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي. وهي بارامترات يمكن قياسها تجريبياً. نلاحظ من العلاقات السابقة أنها تتعلق بحساب التغيير في الإنتروبي فقط كبارامتر غير قياسي.

يمكن إستخدام المربع الترموديناميك *Thermodynamic Square* من أجل معرفة المعادلات التفاضلية و علاقات ماكسويل كما يلي.

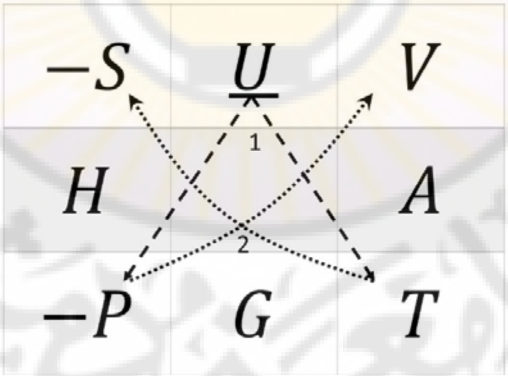
Bassam Badran
Damascus University

$-S$	U	V
H		A
$-P$	G	T

Great Physicists Have Studied Under Very Active Teachers

الشكل (1−9) المربع الترموديناميكي.

فمثلاً لإيجاد المعادلة التفاضلية للبارامتر الطاقة الداخلية نأخذ الزوايا لمقابلة للبارامتر وهي $(-P)$ و (T) وتكون الثوابت في المعادلة التفاضلية (نلاحظ اننا أخذنا الإشارات مع البارامترات) ثم نأخذ الزوايا المقابلة للثوابت بشكل تكون البارامترات التفاضلية في المعادلة (نلاحظ أننا لم نأخذ الإشارات مع البارامترات) كما في الشكل (2−9)

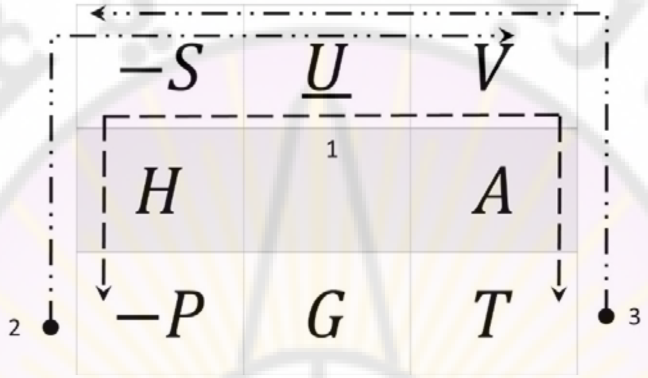


الشكل (2−9) المعادلة التفاضلية لبارامتر الطاقة الداخلية

$$dU = T * dS - P * dV$$

Bassam Badran
Damascus University

أما علاقة ماكسويل للطاقة الداخلية فتوجد بأخذ شكل U يشملفيه الطاقة الداخلية كما في الشكل (3-9) ومؤشر بالرمز (1) ثم نبدأ بأطراف الحرف U الحرة بكتابة معادلات ماكسويل مع أخذ إشارة الحد الأول كما هو مؤشر بالرمز (2) و(3) كما يلي:



الشكل (3−9) معادلات ماكسويل لبارامتر الطاقة الداخلية.

$$\left(\frac{\partial(-P)}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S$$

<u>المثال التطبيقي 9−1 – التحقق من معادلات ماكسويل</u>

تحقق من معادلات ماكسويل لبخار الماء بدرجة حرارة (250°C) وضغط ($300\ kPa$).

التحليل: لو وجدت المعادلات التحليلة التي تربط بين الإنتروبي والضغط عند درجة حرارة ثابتة وبين الحجم النوعي ودرجة الحرارة عند ضغط ثابت لبخار الماء لكان بالإمكان استخدام معادلات ماكسويل بالشكل التفاضلي الجزئي ولكن عدم وجود هذه المعادلات يجعلنا نستبدل الشكل التفاضلي الجزئي (∂) بالشكل التفاضلي الخطي (Δ).

تتحول المعادلة التالية

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

إلى

$$\left(\frac{\Delta s}{\Delta P}\right)_{T=250℃} \cong -\left(\frac{\Delta v}{\Delta T}\right)_{P=300\ kPa}$$

من جداول بخار الماء نجد أن الحالة $(250℃, 300\ kPa)$ هي بخار محمص لأن

$$T_{sat} = 133.54\ ℃ < T = 250℃$$

نستعمل جداول بخار الماء للحصول على القيم المطلوبة في هذا التفاضل الخطي بحيث يكون التقريب الخطي لدرجة حرارة بين $(300\ ℃ - 200℃)$ والتقريب الخطي للضغط بين $(400\ kPa - 200\ kPa)$ وبالتالي

$$\left(\frac{s_{400\ kPa} - s_{200\ kPa}}{400\ kPa - 200\ kPa}\right)_{T=250℃} \cong \left(\frac{v_{300\ ℃} - v_{200\ ℃}}{300\ ℃ - 200℃}\right)_{P=300\ kPa}$$

من جداول البخار المحمص نجد أن القيم هي

$$s_{400\ kPa@250℃} = 7.371\frac{kJ}{kgK}$$

$$s_{200\ kPa@250℃} = 7.702\frac{kJ}{kgK}$$

$$v_{300\ ℃@300\ kPa} = 0.875\frac{m^3}{kg}$$

$$v_{200\ ℃@300\ kPa} = 0.7161\frac{m^3}{kg}$$

بالتعويض نجد

$$\frac{(7.371 - 7.702)\ kJ/kg\ K}{(400 - 200)\ kPa} \cong \frac{(0.875 - 0.7161)\ m^3/kg}{(300 - 200)\ ℃}$$

$$-0.001655\ m^3/kg\ K \cong -0.001589\ m^3/kg\ K$$

حيث أن $(kJ = kPa * m^3)$ و $(k = ℃)$ هي نفسها في الشكل التفاضلي. الفرق بين القيمتين هو حوالي 4% وهو عائد إلى استعمال التفاضل الخطي بدلا من التفاضل الجزئي وبالتالي فإن معادلة ماكسويل هي محققة.

مناقشة:

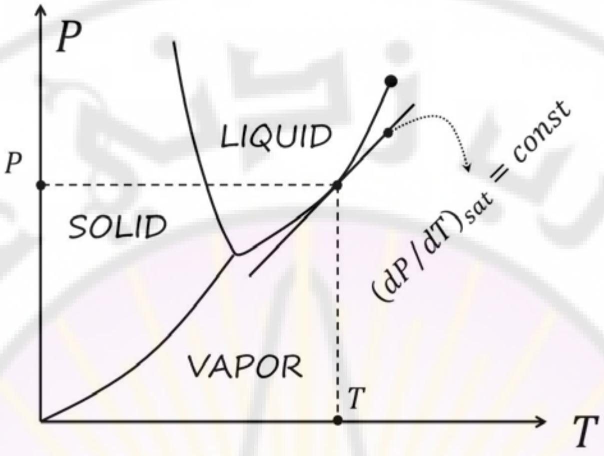
نلاحظ أننا يمكن أن نحسب التغيير في الإنتروبي $(\partial s \cong \Delta s)$ لنظام بسيط قابل للانضغاط من خلال معرفة بارامترات الضغط و الحجم النوعي ودرجة الحرارة باستخدام معادلات ماكسويل ذات الشكل التفاضلي الجزئي.

2.9 معادلة كلابيرون .The Claperyron Equation

تقوم معادلة كلابيرون على تحديد قيمة التغيير في الإنتالبي المرافق للتغيير الطوري للمادة (الطاقة الكامنة للتبخر $- h_{fg}$) من خلال معرفة الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة فقط. علاقة ماكسويل (6−9) تعطى من الشكل

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

في عملية التغيير الطوري يكون الضغط مشبعاً وتحدده درجة الحرارة الوسيط وليس الحجم النوعي أي أن $P_{sat} = f(T_{sat})$ وبالتالي فإن مشتق الضغط بالنسبة إلى درجة الحرارة بثبات الحجم النوعي يتحول من تفاضل جزئي $(\partial P/\partial T)_v$ إلى تفاضل تام $(dP/dT)_{sat}$هذا التفاضل هو عبارة عن خط مماس لمنحني الإشباع عند ضغط ودرجة حرارة معينة على مخطط $(P - T)$ كما هو واضح في الشكل (9-4)



الشكل (4−9) الميل على خط الإشباع.

ميل هذا المستقيم مستقل عن الحجم النوعي وبالتالي يمكن أن نتعامل معه على أساس قيمة ثابتة عند مكاملة معادلة ماكسويل السابقة.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat}$$

$$\partial s = \left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} \partial v$$

تتحول العلاقة بالمكاملة من أجل عملية إيزوثرمية على خط الإشباع لمزيج ماء − بخار إلى

$$s_g - s_f = \left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} (v_g - v_f)$$

أو يمكن كتابتها على الشكل

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} \qquad (17\text{−}9)$$

أيضاً يكون الضغط ثابتاً في هذه العملية وبالتالي تتحول المعادلة

$$dh = T * ds + v * dP$$

بالمكاملة إلى الشكل

$$\int_f^g dh = \int_f^g Tds$$

$$h_{fg} = T * s_{fg}$$

بتعويض معادلة حرارة التبخر (h_{fg}) في المعادلة (17−9) نجد أن

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{T * v_{fg}} \qquad (18-9)$$

تسمى المعادلة (18−9) بمعادلة كلابيرون.

<u>المثال التطبيقي 9−2 – تحديد h_{fg} من خلال بارامترات الضغط والحجم النوعي والحرارة</u>

من خلال معادلة كلابيرون حدد قيمة الطاقة الكامنة لوسيط الفريون $(134A)$ عند درجة حرارة $(20°C)$ وقارنها مع الجداول.

التحليل من معادلة كلابيرون نجد أن

$$h_{fg} = T * v_{fg}\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat}$$

من جداول وسيط الفريون $(134A)$ نجد ان

$$v_{fg} = (v_g - v_f)_{@20°C}$$

$$v_{fg} = 0.035969 - 0.0008161$$

Bassam Badran Damascus University Damascus University

$$v_{fg} = 0.035153\ \frac{m^3}{kg}$$

ولكن

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat,20℃} \cong \left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)_{sat,20℃}$$

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat,20℃} = \frac{P_{sat,24℃} - P_{sat,16℃}}{(24-16)℃}$$

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat,20℃} = \frac{646.18 - 504.58\ kPa}{8℃}$$

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat,20℃} = 17.70\ \frac{kPa}{K}$$

بالتعويض في معادلة كلابيرون نجد

$$h_{fg} = (293.15K)\left(0.035153\frac{m^3}{kg}\right)\left(17.7\frac{kPa}{K}\right)\left(\frac{1\ kJ}{kPa\ m^3}\right)$$

$$h_{fg} = 182.40\ \frac{kJ}{kg}$$

قيمة الطاقة الكامنة عند درجة الحرارة 20℃ من الجداول هي

$$h_{fg,tables} = 182.27\ \frac{kJ}{kg}$$

والفرق بين القيم تابع إلى حالة التقريب المفروضة سابقاً.

يمكن تقريب معادلة كلابيرون وتبسيطها من أجل طور بخار – ماء أو صلب – بخار عند ضغوط منخفضة حيث $(v_g \gg v_f)$ هنا نعد أن $(v_{fg} \approx v_g)$ وبمعاملة البخار على أساس غاز مثالي نجد إنه بالتعويض في المعادلة (10–9) تتحول إلى

Bassam Badran Damascus University

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{P * h_{fg}}{R * T^2}$$

$$\left(\frac{dP}{P}\right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{R}\left(\frac{dT}{T^2}\right)_{sat}$$

من أجل مجال صغير في درجات الحرارة يمكن أن نعد أن الطاقة الكامنة هي ثابتة وبالتالي فالتكامل يكون على الشكل

$$ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{sat} \cong \frac{h_{fg}}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)_{sat} \qquad (19-9)$$

تسمى هذه المعادلة بمعادلة كلابيرون – كلاسيوس *Clapeyron – Clausius Equation* والتي تساعد على تحديد التغييرات في ضغط الإشباع مع درجة الحرارة. يمكن أن نستخدمها في منطقة صلب – بخار بتبديل h_{fg} بالقيمة h_{ig} للمادة.

المثال التطبيقي 9–3 – مقارنة قيم الجداول مع معادلة كلابيرون

حدد ضغط الإشباع لوسيط الفريون (134*A*) عند درجة حرارة (−50°F) باستخدام الجداول لهذا الوسيط.

التحليل: من جداول وسيط التبريد (134*A*) نجد أن القيم الموجودة في الجداول تبدأ من درجة الحرارة (−40°F) ولاتوجد قيم لدرجة الحرارة المذكورة. لذلك يمكن اللجوء إلى مراجع آخرى أو استخدام التقريب الخارجي *Extrapolation* لإيجاد بارامترات هذه النقطة. من أجل إيجاد قيمة تقريبية عند درجة حرارة (−50°F) نأخذ معادلة كلابيرون – كلاسيوس فنجد أن

Bassam Badran Damascus University

$$ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{sat} \cong \frac{h_{fg}}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)_{sat}$$

قيمة $(R = 0.01946\ Btu/lbm * R)$ وقيمة حرارة التبخر لوسيط التشغيل عند درجة الحرارة $(-40°F)$ هي $(h_{fg} = 97.1\ Btu/lbm)$ والضغط عند درجة الحرارة نفسها لوسيط التشغيل هو $(P_1 = P_{sat@-40°F} = 7.432\ psia)$. بالتعويض في معادلة كلابيرون نجد

$$ln\left(\frac{P_2}{7.432\ psia}\right) \cong \frac{97.1\ Btu/lbm}{0.01946\ Btu/lbm\ R}\left(\frac{1}{420R}-\frac{1}{410R}\right)$$

$$P_2 = 5.56\ psia$$

نلاحظ أن قيمة الضغط مأخوذة من مراجع آخرى (الجمعية الوطنية للمقاييس والتكنولوجيا *National Institute of Standards and Technology*) هي $(P_2 = 5.5014\ psia)$ وبالتالي الخطأ هو 1 بالمئة فقط أما لو أخذنا التقريب الخطي الخارجي فنجد أن الضغط يكون $(5.134\ psia)$ أي بخطأ ومقداره 7 بالمئة.

3.9 العلاقات العامة لتغيير الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي والحرارة النوعية.

يمكن التعبير عن الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي والحرارة النوعية بنوعيها بشكل علاقات تفاضلية عند ضغط وحجم ثابتين.

1.3.9 علاقة التغيير في الطاقة الداخلية *Internal Energy Changes*.

باعتبار أن الطاقة الداخلية هي تابع لكل من درجة الحرارة والحجم النوعي $u = f(T, v)$ فإذا أخذنا التفاضل التام لعلاقة الطاقة الداخلية نجد أن

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

من تعريف الحرارة النوعية عند حجم ثابت نجد أن

$$du = c_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv \qquad (20-9)$$

وباعتبار أن الإنتروبي هو أيضاً تابع لكل من درجة الحرارة والحجم النوعي كما الطاقة الداخلية فإذا أخذنا التفاضل التام لعلاقة الإنتروبي نجد أن

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv$$

بضرب العلاقة بدرجة الحرارة

$$T * ds = T * \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + T * \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv$$

وبتعويض Tds بالعلاقة $(du = Tds - Pdv)$ نجد

$$du = T * \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left[T\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T - P\right] dv \qquad (21-9)$$

بمقارنة علاقتي الطاقة الداخلية (20−9) و(21−9) نجد التغيير في الإنتروبي بدلالة درجة الحرارة عند حجم ثابت يساوي الحرارة النوعية عند حجم ثابت على درجة الحرارة.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \frac{c_v}{T} \qquad (22-9)$$

ونجد أن

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T - P \qquad (23-9)$$

باستخدام علاقة ماكسويل

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

بالتعويض في العلاقة (23−9) نجد

Bassam Badran
Damascus University

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P$$

بالتعويض في المعادلة (21−9) نجد أن

$$du = c_v dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right] dv$$

وبالتالي فالتغيير في الطاقة الداخلية لنظام بسيط قابل للانضغاط بين الحالة الإبتدائية والحالة النهائية لعملية ما يعطى بالعلاقة

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right] dv \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (24\text{-}9)$$

إذا أخذنا نظاماً مغلقاً ذا حدود ثابتة (خزان صلب) ويحتوي على غاز مثالي بحرارة نوعية عند حجم ثابت تتحول المعادلة (24−9) إلى

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

وهذا ما وجدناه في فصل القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة.

2.3.9 **علاقة التغيير في الإنتالبي *Enthalpy Change*.**

باعتبار أن الإنتالبي هو أيضا تابع لكل من درجة الحرارة والضغط $h = f(T, P)$ فإذا أخذنا التفاضل التام لعلاقة الإنتالبي نجد أن

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP$$

$$dh = c_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP \qquad (25\text{-}9)$$

Bassam Badran
Damascus University

باعتبار بأن الإنتروبي هو تابع للضغط ودرجة الحرارة كما هو الحال في الإنتالبي فإذا أخذنا التفاضل التام لعلاقة الإنتروبي نجد أن

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

بضرب العلاقة بدرجة الحرارة

$$T * ds = T * \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + T * \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

بتعويض علاقة Tds بالعلاقة $dh = Tds + vdP$ نجد

$$dh = T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left[T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v\right] dP \qquad (26\text{-}9)$$

بمقارنة علاقتي الإنتالبي (25−9) و(26−9) نجد التغيير في الإنتروبي بدلالة درجة الحرارة عند ضغط ثابت يساوي الحرارة النوعية عند ضغط ثابت على درجة الحرارة.

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{c_P}{T} \qquad (27\text{-}9)$$

ونجد أن

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v \qquad (28\text{-}9)$$

باستخدام علاقة ماكسويل

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T = v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

بالتعويض في المعادلة (26−9) نجد أن التغيير في الإنتالبي هو

$$dh = c_P dT + \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] dP$$

Bassam Badran Damascus University

وبالتالي فالتغيير في الإنتالبي لنظام بسيط قابل للانضغاط بين الحالة الإبتدائية والحالة النهائية لعملية ما يعطى بالعلاقة

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_P \, dT + \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \right] dP \qquad (29\text{-}9)$$

إذا أخذنا نظاماً مغلقاً ذا حدود متغيرة (أسطوانة – مكبس) ويحتوي على غاز مثالي بحرارة نوعية عند ضغط ثابت تتحول المعادلة (29–9) إلى

$$h_2 - h_1 = c_P(T_2 - T_1) \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

وهذا ما وجدناه في فصل القانون الأول في الترموديناميك للأنظمة المغلقة.

3.3.9 <u>علاقة التغير في الإنتروبي</u> ***Entropy Change***.

عندما فرضنا أن بارامتر الإنتروبي هو تابع لدرجة الحرارة والحجم النوعي في اشتقاق علاقة التغيير في الطاقة الداخلية وجدنا أن

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv$$

ولكن بينا أن

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \frac{c_v}{T}$$

ومن علاقات ماكسويل وجدنا أن

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

بالتعويض في علاقة الإنتروبي نجد أن

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv$$

وبالتالي فالتغيير في الإنتالبي لنظام بسيط قابل للانضغاط بين الحالة الإبتدائية والحالة النهائية لعملية ما يعطى بالعلاقة

Bassam Badran
Damascus University

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv \qquad (30\text{-}9)$$

وعندما فرضنا أن بارامتر الإنتروبي هو تابع لدرجة الحرارة والضغط في اشتقاق علاقة التغيير في الإنتالبي وجدنا أن

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

ولكن

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{c_P}{T}$$

ومن علاقات ماكسويل وجدنا

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

بالتعويض في علاقة اللإنتروبي نجد أن

$$ds = \frac{c_P}{T} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

وبالتالي فالتغيير في الإنتالبي لنظام بسيط قابل للانضغاط بين الحالة الإبتدائية والحالة النهائية لعملية ما يعطى أيضاً بالعلاقة

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_P}{T} dT - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP \qquad (31\text{-}9)$$

يمكن استخدام إحدى المعادلتين (30–9) أو (31–9) لمعرفة التغيير في الإنتروبي.

4.3.9 علاقة الحرارة النوعية Specific Heat.

إن الحرارة النوعية للغاز المثالي تعتمد فقط على درجة الحرارة ولكن لأجل مادة وحيدة الطور فإنها تعتمد على الحجم النوعي أو الضغط كما تعتمد على درجة الحرارة.

Bassam Badran Damascus University

عند الضغوط المنخفضة تتصف الغازات بأنها غازات مثالية وتكون الحرارة النوعية لهذه الغازات معتمدة فقط على درجة الحرارة. تسمى الحرارة النوعية لهذه الغازات بالحرارة النوعية عند الضغط الصفري *Zero Pressure* أو الحرارة النوعية لغاز مثالي *Ideal-gas Specific Heat* وتعطى الرمز (c_{vo}, c_{po}). يمكن من أجل ضغوط مرتفعة أو أحجام نوعية منخفضة أن نحسب الحرارة النوعية من خلال معرفة الحرارة النوعية للغاز مثالي (c_{vo}, c_{po}) ومواصفات المادة من ضغط ودرجة حرارة وحجم النوعية. وجدنا أن الحرارة النوعية عند حجم ثابت هي

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \frac{c_v}{T}$$

بالمفاضلة بالنسبة إلى الحجم النوعي نجد

$$\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right) = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right) = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)$$

ومن علاقة ماكسويل وجدنا أن

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

بالتعويض نجد أن

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$$

ووجدنا أيضاً أن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت هي

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{c_P}{T}$$

بالمفاضلة بالنسبة إلى الضغط نجد

Bassam Badran
Damascus University

$$\frac{\partial}{\partial P}\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right) = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial c_P}{\partial P}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right) = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial c_P}{\partial P}\right)$$

ومن علاقات ماكسويل وجدنا

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

بالتعويض نجد أن

$$\left(\frac{\partial c_P}{\partial P}\right)_T = -T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P$$

بمكاملة العلاقة بين الضغط الصفري وضغط معين على طول منحى إيزوثرمي نجد

$$(c_P - c_{Po})_T = -T\int_o^P \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P dP \qquad (32\text{-}9)$$

1.4.3.9 العلاقة بين الحرارة النوعية عند ضغط وحجم ثابت.

يمكن أن نجد العلاقة التي تربط بين الحرارة النوعية عند الضغط ثابت والحرارة النوعية عند حجم ثابت بمساواة علاقات الإنتروبي السابقة

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv$$

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T dv = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T dP$$

ولكن من علاقات ماكسويل

Bassam Badran Damascus University

$$\frac{c_v}{T}dT + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv = \frac{c_P}{T}dT + \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP$$

$$dT = \frac{T(\partial P/\partial T)_v}{c_P - c_v}dv + \frac{T(\partial v/\partial T)_P}{c_P - c_v}dP$$

وباعتبار أن درجة الحرارة هي تابع لكل من الحجم النوعي والضغط $T = f(P, v)$ فيمكن أن نكتب التفاضل التام على الشكل

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_P dv + \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v dP$$

بمقارنة علاقات (dT) نجد أن

$$c_P - c_v = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \qquad (33\text{-}9)$$

ولكن

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_P \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T = -1$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T$$

بالتعويض نجد أن

$$c_P - c_v = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P^2 \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T \qquad (34\text{-}9)$$

2.4.3.9 معامل التمدد الحجمي والانضغاط الحراري.

يمكن أيضا استعمال بارامترات آخرى للتخلص من الأشكال التفاضلية للحجم النوعي وهو البارامتر الأول ويسمى معامل التمدد الحجمي *Coefficient of Volumetric Expansion* ويرمز له (β) والبارامتر الثاني ويسمى معامل الانضغاط الحراري *Isothermal Compressibility* ويرمز له (α). يعرف كل من المعاملات السابقة كما يلي

$$\beta = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \qquad (35\text{-}9)$$

$$\alpha = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T \qquad (36\text{-}9)$$

بالتعويض في معادلة الحرارة النوعي $(9-34)$

$$c_P - c_v = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

مع الأخذ بعين الاعتبار أن

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P}{-\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T}$$

ولدينا

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \frac{\beta}{\alpha}$$

نجد

$$c_P - c_v = T(v * \beta) * \frac{\beta}{\alpha}$$

$$c_P - c_v = \frac{v * T * \beta^2}{\alpha} \qquad (37\text{-}9)$$

تعرف هذه المعادلة باسم معادلة ماير *Mayer Relation* ويمكن أن نلاحظ منها التالي:

- بما أن معامل الانضغاط الحراري هو قيمة موجبة دوماً لكل المواد ولكل الأطوار ومعامل التمدد الحجمي قد يكون سالباً أو صفراً ودرجة الحرارة هي موجبة دوماً فإن الحرارة النوعية عند ضغط ثابت هي أكبر دوماً من الحرارة النوعية عند حجم ثابت أي $c_P \geq c_v$.

Bassam Badran Damascus University

- الفرق بين الحرارة النوعية عند ضغط ثابت والحرارة النوعية عند حجم ثابت يقترب من الصفر عندما تقترب درجة الحرارة المطلقة من الصفر.
- الحرارة النوعية عند ضغط ثابت تساوي الحرارة النوعية عند حجم ثابت من أجل مواد غير قابلة للانضغاط مثل السوائل والمواد الصلبة.

المثال التطبيقي 9–4 – التغيير في الطاقة الداخلية لغاز فاندرفالس.

إستخرج معادلة التغيير في الطاقة الداخلية لنظام قابل للانضغاط باستخدام معادلة فاندرفالس مع افتراض أن الحرارة النوعية تعطى بالعلاقة $(c_v = A_1 + A_2T)$.

التحليل: يعطى التغيير في الطاقة الداخلية لنظام قابل للانضغاط بسيط ولأي طور بالعلاقة

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right] dv$$

معادلة فاندر فالس هي

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

وبمفاضلة هذه المعادلة بالنسبة إلى درجة الحرارة مع ثبات الحجم نجد

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b}$$

ولكن القيمة ضمن التكامل الثاني هي

$$T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P = \frac{RT}{v-b} - \left(\frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}\right) = \frac{a}{v^2}$$

بالتعويض في علاقة التغيير في الطاقة الداخلية نجد أن

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} [A_1 + A_2T] dT + \int_{v_1}^{v_2} \frac{a}{v^2} dv$$

بمكاملة نجد

$$u_2 - u_1 = A_1(T_2 - T_1) + \frac{A_2}{2}(T_2^2 - T_1^2) + a\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right)$$

المثال التطبيقي 9–5 – الطاقة الداخلية كتابع للحرارة فقط.

استخرج الطاقة الداخلية 1) لغاز مثالي و 2) لمادة غير قابلة للانضغاط وطاقتها الداخلية تابعة لدرجة الحرارة فقط $u = u(T)$.

التحليل: التغيير في الطاقة الداخلية لنظام قابل للانضغاط وبسيط هو

$$du = c_v dT + \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right] dv$$

1) بمفاضلة علاقة الغاز مثالي $(Pv = RT)$ بالنسبة إلى درجة الحرارة مع ثبات الحجم النوعي نجد

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v}$$

ولكن

$$T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P = T\frac{R}{v} - P = P - P = 0$$

تتحول معادلة التغيير في الطاقة الداخلية إلى

$$du = c_v dT$$

وللتحقق بأن الحرارة النوعية عند حجم ثابت لاعلاقة لها بالحجم نأخذ العلاقة

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$$

Bassam Badran Damascus University

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v} \quad , \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v = \left[\frac{\partial(R/v)}{\partial T}\right]_v = 0$$

$$\rightarrow \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = 0$$

2) لمادة غير قابلة للانضغاط يكون $(v = constant)$ وبالتالي $(dv = 0)$ أيضا $(c_P = c_v = c)$ ويكون $(\alpha = \beta = 0)$. يكون التغيير في الطاقة الداخلية من الشكل

$$du = cdT$$

وتكون الطاقة الداخلية لمادة غير قابلة للانضغاط فقط تابع لدرجة الحرارة كما تظهر العلاقة

$$\left(\frac{\partial c_P}{\partial P}\right)_T = -T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P = 0$$

المثال التطبيقي 9–6 – الفرق بين الحرارة النوعية لغاز مثالي.

أظهر أن $c_P - c_v = R$ محققة لغاز مثالي.

التحليل: الفرق بين الحرارة النوعية عند حجم وضغط ثابت هي

$$c_P - c_v = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P^2 \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T$$

بمفاضلة علاقة الغاز المثالي $(Pv = RT)$ أولا الضغط بدلالة الحجم النوعي مع ثبات درجة الحرارة وثانياً الحجم النوعي بدلالة درجة الحرارة مع ثبات الضغط فنجد أن

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{v^2} = \frac{P}{v}$$

$$v = \frac{RT}{P} \rightarrow \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P^2 = \left(\frac{R}{P}\right)^2$$

بالتعويض نجد أن

Bassam Badran Damascus University

$$c_P - c_v = -T * \left(\frac{R}{P}\right)^2 * \left(-\frac{P}{v}\right) = \frac{TR^2}{vP} = R$$

4.9 معامل جول – طومسون *The Joule – Thomson Coefficient*.

عندما يمر سائل ضمن مادة نفوذية أو أنبوب شعري أو صمام خنق فإن ضغط هذا السائل ينخفض وتسمى هذه العملية بعملية خنق. قيمة إنتالبي السائل قبل عملية الخنق وبعدها تبقى ثابتة وتؤدي هذه العملية إلى انخفاض في درجة الحرارة وبشكل كبير مشكلة الفعل التبريدي الضروري في أجهزة التكييف والمبردات الصغيرة (البراد المنزلي) والكبيرة (شيلرات). ولكن في بعض الأحيان قد تبقى درجة حرارة السائل كما هي من دون أي تغيير أو قد ترتفع نتيجة عملية الخنق. إن ظاهرة تغيير درجة الحرارة في عملية الخنق يعبر عنها بما يسمى معامل جول – طومسون المعرف بالعلاقة

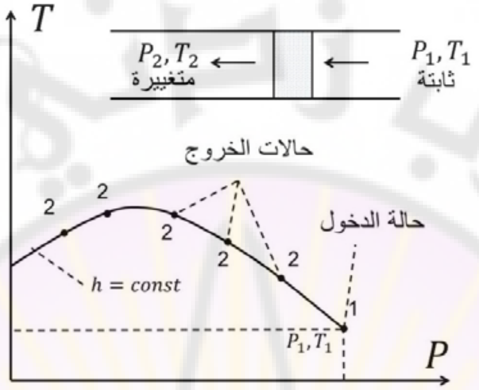
$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h \qquad (38\text{-}9)$$

يقوم المعامل على قياس التغيير في درجة الحرارة بالنسبة إلى الضغط عند ثبات الإنتالبي. نلاحظ من المعادلة السابقة إنه

- عندما يكون $(\mu_{JT} > 0)$ تزداد الحرارة.
- عندما يكون $(\mu_{JT} = 0)$ تبقى الحرارة ثابتة.
- عندما يكون $\mu_{JT} < 0$ تتناقص الحرارة.

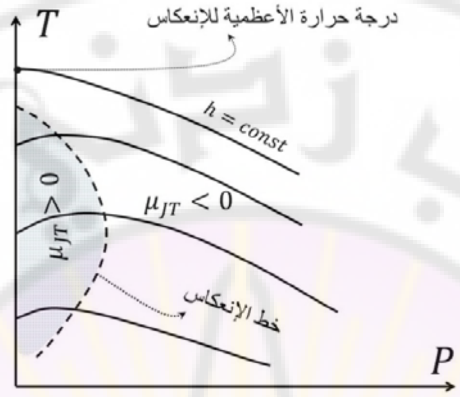
بالنظر إلى معادلة معامل جول – طومسون نجد أن المعامل يمثل ميل خط الإنتالبي الثابت على مخطط $(P - T)$. هذه الخطوط يمكن أن تنشأ من قياسات الحرارة والضغط في عملية خنق عند مرور السائل ذي البارامترات (P_1, T_1) عبر مادة نفوذية ما وقياس بارامترات الخروج (P_2, T_2) وإعادة التجربة للمادة نفسها ولكن بنفوذية مختلفة. رسم النقاط على مخطط $(P - T)$ يعطينا منحني الإنتالبي الثابت كما هو واضح في الشكل (5–9).

Bassam Badran Damascus University



الشكل (5−9) خط الإنتالبي الثابت على مخطط $(P - T)$.

إعادة التجربة السابقة لمجموعة مختلفة من بارامترات الدخول يعطينا الشكل (3−9). بعض هذه الخطوط يكون فيها الميل يساوي الصفر او المعامل يساوي الصفر. وصل هذه المقاطع بعضها ببعض يؤدي إلى الحصول على خط الانعكاس *Inversion Line* ونقاط تقاطع خطوط الإنتالبي الثابتة مع خط الانعكاس تسمى بنقاط درجات الحرارة المنعكسة *Inversion Temperature*. نقطة تقاطع الضغط الصفري مع خط الانعكاس تسمى درجة الحرارة الأعظمية للانعكاس *Maximum Inversion Temperature*. نلاحظ من الأشكال أن ميل خطوط الإنتالبي الثابتة سالبة $(\mu_{JT} < 0)$ على اليمين من خط الانعكاس وميل خطوط الإنتالبي الثابتة موجبة $(\mu_{JT} > 0)$ على اليسار من خط الانعكاس.



الشكل (6–9) خطوط الإنتالبي الثابتة لمادة على مخطط ($P - T$).

عملية الخنق على خطوط الإنتالبي الثابتة تتحرك باتجاه تناقص الضغط على الشكل (6–9) أي من اليمين إلى اليسار وبالتالي فإن درجة الحرارة تزداد على يمين خط الانعكاس وتنقص على يساره. نلاحظ من الشكل أيضاً بأن عملية التبريد لاتتم في عملية الخنق إلا إذا كانت درجة الحرارة الأعظمية للانعكاس أقل من درجة حرارة الفراغ. على سبيل المثال الهيدروجين يملك درجة حرارة أعظمية للانعكاس بقيمة (−68°C) لذلك يجب أن يبرد إلى درجة حرارة أقل من هذه الدرجة من أجل الحصول على الفعل التبريدي منه. لنطور علاقة عامة لمعامل جول – طومسون بدلالة الحرارة النوعية والضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة. من علاقة التغيير في الإنتالبي ومعامل جول التالية

$$dh = c_P dT + \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] dP$$

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$$

من أجل خطوط ثابتة للإنتالبي نجد أن التغيير في الإنتالبي هو صفر.

$$c_P dT = -\left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] dP$$

بالتالي

Bassam Badran
Damascus University

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_P}\left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] \qquad (39\text{-}9)$$

<u>المثال التطبيقي 9–7 – معامل جول – طومسون لغاز مثالي.</u>

أظهر أن معامل جول – طومسون لغاز مثالي هو صفر.

التحليل: بمفاضلة الحجم النوعي بدلالة درجة الحرارة عند ثبات الضغط لمعادلة الغاز المثالي $(v = RT/P)$ نجد أن

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{P}$$

بالتعويض في معادلة جول – طومسون العامة نجد أن

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_P}\left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]$$

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_P}\left[v - T\frac{R}{P}\right]$$

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_P}[v - v]$$

$$\mu_{JT} = 0$$

هذا ليس مفاجئاً لأن الإنتالبي هو تابع فقط لدرجة الحرارة في الغاز المثالي وعندما يكون الإنتالبي ثابتاً يجب أن تكون درجة الحرارة ثابتة أيضاً وبالتالي لا يمكن استخدام عملية الخنق لتخفيض درجة الحرارة عند استخدام الغاز مثالي.

Bassam Badran Damascus University

5.9 التغيير في الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي للغازات الحقيقية.

يمكن وصف الغاز عند ضغوط منخفضة على إنه غاز مثالي ويحقق معادلة الحالة للغاز المثالي. كافة البارامترات من طاقة داخلية وإنتالبي وحرارة نوعية عند ضغط ثابت وحجم ثابت تكون تابعة لدرجة الحرارة ويمكن أن تستنتج بشكل بسيط. عند الضغوط العالية ينحرف تصرف الغاز عن تصرف الغاز المثالي ويصبح غازاً حقيقياً. وجدنا فصول سابقة أن المقاربة بين الغاز المثالي والحقيقي تم من خلال استخدام معامل الانضغاط (Z) في معادلة الغاز المثالي ولمعرفة انحراف باقي البارامترات نستخدم معادلات التغيير في الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي.

1.5.9 التغيير في الإنتالبي للغازات الحقيقية.

يعتمد إنتالبي الغاز الحقيقي على الضغط ودرجة الحرارة (مثالي فقط على درجة الحرارة) وبالتالي يمكن معرفة هذا التغيير من المعادلة (9–22) للتغيير في الإنتالبي

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_P dT + \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP$$

حيث الرمز (1) يدل على الحالة الابتدائية و(2) على الحالة النهائية. من أجل عملية إيزوثرمية فإن

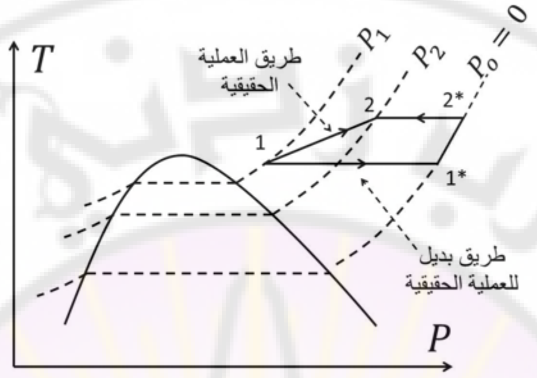
$$\int_{T_1}^{T_2} c_P dT = 0$$

ومن أجل عملية إيزوبارية فإن

$$\int_{P_1}^{P_2} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP = 0$$

يمكن تقييم التغيير في الإنتالبي $(h_2 - h_1)$ في العملية الممثلة على المخطط $(T - s)$ كما في الشكل (9–7) بالتكامل بين خطين إيزوثرميين (T_2, T_1) ثابتين وخط إيزوخوري (P_o) ثابت والممثل بالمسار بين النقطتين $(1^*, 2^*)$.

Bassam Badran
Damascus University



الشكل (7–9) مسارين مختلفين لتقييم التغيير في الإنتالبي للغاز الحقيقي.

الغاز الذي يسلك هذا المسار يعد غازاً مثالياً. الحالة الحقيقية تمثل على الشكل بالمسار بين النقطتين (1,2) والمتحرك بين ضغطين مختلفين (P_1, P_2). نلاحظ أن العمليتين هما بين خطي درجة الحرارة. يمكن أن نعبر عن التغيير في الإنتالبي في الحالة الحقيقية كما يلي

$$(h_2 - h_1) = (h_2 - h_2^*) + (h_2^* - h_1^*) + (h_1^* - h_1)$$

$$(h_2 - h_2^*) = 0 + \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]_{T=T_2} dP = \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]_{T=T_2} dP$$

$$(h_2^* - h_1^*) = \int_{T_1}^{T_2} c_P dT + 0 = \int_{T_1}^{T_2} c_P dT$$

$$(h_1^* - h_1) = 0 + \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]_{T=T_1} dP = \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]_{T=T_1} dP$$

الفرق بين (h, h^*) يسمى بإنتالبي الاختلاف *Enthalpy Departure* ويمثل الفرق في إنتالبي الغاز عند درجة حرارة ثابتة. إن حساب إنتالبي الاختلاف يكمن في معرفة تصرف الغاز على مخطط $(P - v - T)$. في حالة عدم وجود هذه العلاقة بوضوح

Bassam Badran Damascus University

يمكن أن نأخذ علاقة الغاز الحقيقي $(Pv = ZRT)$ حيث Z هو معامل الانضغاط. بالتعويض نجد أن

$$(h^* - h)_T = -RT^2 \int_o^P \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \frac{dP}{P}$$

يمكن أن نكتب العلاقة بدلالة $(T = T_{cr}T_r)$ و $(P = P_{cr}P_r)$ كما يلي

$$Z_h = \frac{(\overline{h^*} - \bar{h})_T}{R_u T_{cr}} = T_r^2 \int_o^{P_r} \left(\frac{\partial Z}{\partial T_r}\right)_{P_r} d(\ln P_r) \qquad (40\text{-}9)$$

حيث (Z_h) يسمى عنصر إنتالبي الاختلاف *Enthalpy Departure Factor* والتكامل الموجود في المعادلة السابقة يمكن أن يحسب من المخططات أو بشكل عددي باستخدام مخططات معامل الانضغاط لمجموعة من القيم $(P_R\ ,T_R)$. يسمى المخطط الناتج عن هذه العملية باسم مخطط إنتالبي الاختلاف العام *Generalized Enthalpy Departure Chart* ويستخدم لحساب انحراف الإنتالبي الغاز الحقيقي عند $(P\ ,T)$ من الغاز المثالي عند درجة الحرارة نفسها. باستبدال $(h^* \rightarrow h_{ideal})$ تتحول معادلة التغيير في الإنتالبي لغاز مثالي إلى معادلة التغيير لغاز حقيقي في العملية (1,2) كما يلي

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = (\bar{h}_2 - \bar{h}_1)_{ideal} - R_u T_{cr}(Z_{h_2} - Z_{h_1}) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right) \qquad (41\text{-}9)$$

أو

$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_1)_{ideal} - RT_{cr}(Z_{h_2} - Z_{h_1}) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (42\text{-}9)$$

حيث تحسب $(Z_{h_2} - Z_{h_1})$ من مخططات إنتالبي الاختلاف العامة و $(h_2 - h_1)_{ideal}$ من جداول الغاز المثالي. نلاحظ بأن الحد الثاني ينعدم في حال كان الغاز مثالياً.

Bassam Badran
Damascus University

2.5.9 التغيير في الطاقة الداخلية للغازات الحقيقية.

نحسب التغيير في الطاقة الداخلية للغاز الحقيقي باستبدال الإنتالبي في معادلة التغيير في إنتالبي الغاز الحقيقي بالعلاقة $\left(\bar{h} = \bar{u} + P\bar{v} = \bar{u} + ZR_uT\right)$ فنجد أن

$$\bar{u}_2 - \bar{u}_1 = \left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)_{ideal} - R_uT_{cr}(Z_2T_2 - Z_1T_1)\ \left(\frac{kJ}{kmol}\right) \tag{43-9}$$

3.5.9 التغيير في الإنتروبي للغازات الحقيقية.

العلاقة العامة لتغيير الإنتروبي تعطى

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_P}{T} dT - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP$$

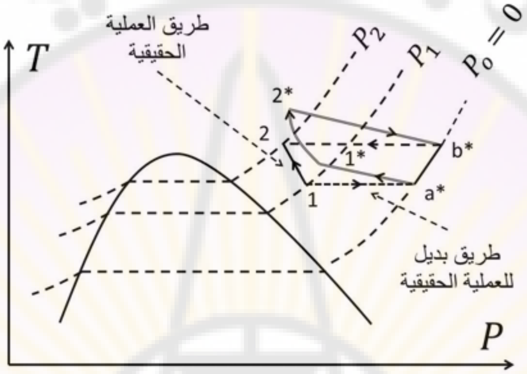
حيث الرمز (1) يدل على الحالة الابتدائية و(2) على الحالة النهائية. عند النظر في المعادلة السابقة لتغير الإنتروبي نجد إنه من الممكن تنفيذ التكامل على الخط الإيزوثرمي $(T_1 = constant)$ إلى ضغط صفري وبعدها نكامل على خط الضغط الصفري إلى درجة الحرارة (T_2) وبعدها على الخط الإيزوثرمي $(T_2 = constant)$ إلى ضغط (P_2) ولكن هذا الطريق صعب لأن الإنتالبي عند الضغط الصفري يساوي لا نهاية. يمكن أن نسلك طريقاً آخر كما هو مبين في الشكل (8−9). يمكن أن نكتب التغيير كما يلي

$$(s_2 - s_1) = (s_2 - s_b^*) + (s_b^* - s_2^*) + (s_2^* - s_1^*) + (s_1^* - s_a^*) + (s_a^* - s_1)$$

الحالة $(1, 1^*)$ هي متماثلة أي $(T_1 = T_1^*\ , P_1 = P_1^*)$ كما هي الحالة $(2, 2^*)$. يتصرف الغاز على إنه غاز مثالي في الحالة 1* و 2* وما بينهما فيحسب تغيير في الإنتروبي لغاز مثالي بين هاتين الحالتين. التغيير في الإنتروبي بين الحالة الحقيقة والمثالية يحسب من مخططات إنتروبي الاختلاف كما شرح سابقا. لحساب ماهو الفرق

Bassam Badran
Damascus University

في الإنتروبي لغاز عند الحالة (P,T) وحالته المثالية عند الشروط نفسها نأخذ عملية إيزوثرمية من الحالة (P,T) إلى الضغط الصفري وعودة إلى الحالة المثالية (P^*,T^*) كما في الشكل (5–9).



الشكل (8–9) طريق مختلف لحساب التغيير في الإنتروبي لغاز حقيقي.

يعبر عن الحالة بالمعادلة

$$(s_P - s_P^*)_T = (s_P - s_o^*)_T + (s_o^* - s_P^*)_T$$

$$(s_P - s_P^*)_T = -\int_o^P \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP - \int_P^o \left(\frac{\partial v^*}{\partial T}\right)_P dP$$

بأخذ معادلة الغاز المثالي وبالتفاضل والترتيب نجد

$$(s_P - s_P^*)_T = \int_o^P \left[\frac{(1-Z)R}{P} - \frac{RT}{P}\left(\frac{\partial Z_r}{\partial T}\right)_P\right] dP$$

بالتعويض بدلالة $(T = T_{cr} * T_R)$ و $(P = P_{cr} * P_R)$ نجد أن

$$Z_s = \frac{(\overline{s^*} - \bar{s})_{T,P}}{R_u} = \int_o^{P_r} \left[Z - 1 + T_R\left(\frac{\partial Z}{\partial T_r}\right)_{P_R}\right] d\,ln\,P_r \qquad (44\text{-}9)$$

الفرق $\left[(\bar{s^*}-\bar{s})_{T,P}\right]$ إنتالبي الاختلاف *Enthalpy Departure* و (Z_s) يسمى عنصر إنتالبي الاختلاف *Enthalpy Departure Factor*. التكامل في المعادلة يحسب من مخططات معامل الانضغاط. العنصر (Z_s) يمثل بشكل مخططات كتابع إلى (P_R, T_R) وتسمى بمخططات إنتروبي الاختلاف العامة *Generalized Entropy Departure Chart* وتستعمل لتحديد إنحراف الإنتروبي بين القيمة الحقيقية والمثالية عند الشروط نفسها من (P, T). باستبدال $(s^* \rightarrow \; s_{ideal})$ تتحول معادلة التغيير في الإنتروبي لغاز مثالي إلى معادلة التغيير لغاز حقيقي في العملية (1,2) كما يلي

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = (\bar{s}_2 - \bar{s}_1)_{ideal} - R_u\left(Z_{s_2} - Z_{s_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right) \qquad (45\text{-}9)$$

$$s_2 - s_1 = (s_2 - s_1)_{ideal} - R\left(Z_{s_2} - Z_{s_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad (46\text{-}9)$$

حيث تحسب $\left(Z_{s_2} - Z_{s_1}\right)$ من مخططات إنتروبي الاختلاف العامة و $(s_2 - s_1)_{ideal}$ من جداول الغاز المثالي. نلاحظ أن الحد الثاني ينعدم في حال كان الغاز مثالي.

المثال التطبيقي 9–8 – التغيير في الإنتالبي والإنتروبي لغاز الأوكسجين.

حدد التغيير في الإنتالبي والإنتروبي بالنسبة إلى واحدة المول لغاز الأوكسجين عندما ينتقل من الحالة $(220K, 5MPa)$ إلى $(300K, 10MPa)$ 1) باعتباره غازاً مثالياً و2) الانحراف بين حالته كغاز حقيقي وغاز مثالي.

التحليل: نجد من الجداول أن درجة الحرارة الحرجة والضغط الحرج للأوكسجين هما $(154.8K, 5.08MPa)$.

إذا بقي الغاز أعلى من هذه الدرجة فالغاز يبقى في الحالة الغازية وبضغوط عالية.

1- باعتبار أن الأوكسجين هو غاز مثالي فالإنتالبي هو تابع لدرجة الحرارة فقط ويمكن إيجاد قيم الإنتالبي من الجداول

$$(\bar{h}_2-\bar{h}_1)_{ideal}=8736-6404=2332\frac{kJ}{kmol\ K}$$

ولكن الإنتروبي يعتمد على درجة الحرارة والضغط كما في العلاقة

$$(\bar{s}_2-\bar{s}_1)_{ideal}=\bar{s}_2^o-\bar{s}_1^o-R_u\ln\frac{P_2}{P_1}$$

$$(\bar{s}_2-\bar{s}_1)_{ideal}=(205.213-196.171)\frac{kJ}{kmol\ K}-\left(8.314\frac{kJ}{kmol\ K}\right)ln\frac{10}{5}$$

$$(\bar{s}_2-\bar{s}_1)_{ideal}=3.28\frac{kJ}{kmol\ K}$$

2- لمعرفة انحراف الغاز الحقيقي عن الغاز المثالي يجب معرفة إنتالبي وإنتروبي الاختلاف من المخططات العامة لكلا الحالتين.

$$T_{r_1}=\frac{T_1}{T_{cr}}=\frac{220}{154.8}=1.42$$

$$P_{r_1}=\frac{P_1}{P_{cr}}=\frac{5}{5.08}=0.98$$

من القيم المحسوبة السابقة نأخذ من مخططات إنتالبي وإنتروبي الاختلاف العامة نجد أن

$$Z_{s_1}=0.25\,,\qquad Z_{h_1}=0.53$$

$$T_{r_2}=\frac{T_2}{T_{cr}}=\frac{300}{154.8}=1.94$$

$$P_{r_2}=\frac{P_2}{P_{cr}}=\frac{10}{5.08}=1.97$$

من القيم المحسوبة السابقة نأخذ من مخططات إنتالبي وإنتروبي الاختلاف العامة نجد أن

$$Z_{s_2} = 0.2\,, \qquad Z_{h_2} = 0.48$$

بالتعويض في علاقات تغيير الإنتالبي والإنتروبي لغاز حقيقي نجد

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = (\bar{h}_2 - \bar{h}_1)_{ideal} - R_u T_{cr}(Z_{h_2} - Z_{h_1})$$

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = 2332\,\frac{kJ}{kmol} - \left(8.314\frac{kJ}{kmol\ K}\right)(154.8K(0.48 - 0.53))$$

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = 2396\,\frac{kJ}{kmol}$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = (\bar{s}_2 - \bar{s}_1)_{ideal} - R_u(Z_{s_2} - Z_{s_1})$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = 3.28\frac{kJ}{kmol\ K} - \left(8.314\frac{kJ}{kmol\ K}\right)(0.2 - 0.25)$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = 3.70\frac{kJ}{kmol\ K}$$

نلاحظ أن الإنحراف مقداره 2.7 بالمئة للإنتالبي و 11.4 بالمئة للإنتروبي.

Bassam Badran
Damascus University

ملخص فصل العلاقات بين البارامترات الترموديناميكة

- علامات ماكسويل. تستخدم علاقات ماكسويل في تقدير بارامترات الطاقة الداخلية والإنتالبي والإنتروبي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي. تفاضل الإنتروبي بدلالة الضغط

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_v = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_s$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

تفاضل الإنتروبي بدلالة الحجم النوعي

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_P = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_s$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

- تحسب معادلة كلابيرون الطاقة الكامنة للمادة وحيدة الطور

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{T * v_{fg}}$$

- معادلة كلابيرون كلاسيوس

$$ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{sat} \cong \frac{h_{fg}}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)_{sat}$$

- التغيير في الطاقة الداخلية لغاز مثالي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي

$$du = T * \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v dT + \left[T\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T - P\right] dv$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \frac{c_v}{T}$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P\right] dv \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

Bassam Badran
Damascus University

- التغيير في الإنتالبي لغاز مثالي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي

$$dh = T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P dT + \left[T\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T + v\right] dP$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_P = \frac{c_P}{T}$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_P dT + \int_{P_1}^{P_2} \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right] dP$$

- التغيير في الإنتروبي لغاز مثالي بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v dv$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_P}{T} dT - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dP$$

- الحرارة النوعية بدلالة الضغط ودرجة الحرارة والحجم النوعي

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_v$$

$$\left(\frac{\partial c_P}{\partial P}\right)_T = -T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P$$

$$(c_P - c_{Po})_T = -T\int_o^P \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P dP$$

- العلاقة بين الحرارة النوعية بين ضغط وحجم ثابت

$$c_P - c_v = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$

$$c_P - c_v = -T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P^2 \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T$$

- معامل التمدد الحجمي والانضغاط الحراري

Bassam Badran
Damascus University

$$\beta = \frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

$$\alpha = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T$$

$$c_P - c_v = \frac{v * T * \beta^2}{\alpha}$$

- معامل جول – طومسون

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$$

عندما يكون $\mu_{JT} > 0$ تزداد الحرارة، عندما يكون $\mu_{JT} = 0$ تبقى الحرارة ثابتة، عندما يكون $\mu_{JT} < 0$ تتناقص الحرارة.

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_P}\left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P\right]$$

- التغيير في إنتالبي في الغازات الحقيقية

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = \left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)_{ideal} - R_u T_{cr}\left(Z_{h_2} - Z_{h_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right)$$

$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_1)_{ideal} - RT_{cr}\left(Z_{h_2} - Z_{h_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

كافة معاملات الانضغاط تؤخذ من الجداول.

- التغيير في الطاقة الداخلية للغازات الحقيقية

$$\bar{u}_2 - \bar{u}_1 = \left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)_{ideal} - R_u T_{cr}(Z_2 T_2 - Z_1 T_1) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right)$$

- التغيير في الإنتروبي للغازات الحقيقية

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = (\bar{s}_2 - \bar{s}_1)_{ideal} - R_u\left(Z_{s_2} - Z_{s_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kmol}\right)$$

$$s_2 - s_1 = (s_2 - s_1)_{ideal} - R\left(Z_{s_2} - Z_{s_1}\right) \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

Bassam Badran Damascus University

مسائل غير محلولة لفصل

العلاقات بين البارامترات الترموديناميكة

1. تحقق من معادلات ماكسويل لغاز الفريون $(134A)$ عند الضغط $(1.2\ MPa)$ ودرجة حرارة $(80°C)$.
2. إستخدم معادلات ماكسويل في تحديد علاقة الإنتروبي جميعها لغاز يحقق العلاقة التالية $[P(v-b)=RT]$.
3. باستخدام معادلة كلابيرون قدر حرارة التبخر للوسيط الفريون $(134A)$ عند درجة الحرارة $(40°C)$ وقارنها مع الجداول.
4. احسب القيمة (h_{fg}) و (s_{fg}) لبخار بدرجة حرارة $(120°C)$ من معادلة كلابيرون وقارنها مع الجداول.
5. قدر الفرق بين الحرارة النوعية عند حجم وضغط ثابت من أجل ماء بدرجة حرارة $(80°C)$ وضغط $(15\ MPa)$.
6. قدر معامل التمدد الحجمي ومعامل الانضغاط لوسيط التشغيل $(134A)$ عند درجة حرارة $(30°C)$ وضغط $(200\ kPa)$.
7. هل تتغير درجة حرارة الهيليوم إذا تم خنقه أدياباتياً من $(300K)$ وضغط $(600\ kPa)$ إلى ضغط $(150\ kPa)$.
8. اشتق معامل جول – طومسون ودرجة حرارة الانعكاس للغاز علاقته تعطى من الشكل التالي $[(P+a/v^2)v=RT]$.
9. قدر معامل جول–طومسون لبخار في الحالة 1) درجة حرارة $(300°C)$ وضغط $(3\ MPa)$ و2) درجة حرارة $(500°C)$ وضغط $(6\ MPa)$.
10. حدد التغيير في الإنتالبي والتغيير في الطاقة الداخلية والتغيير في الإنتروبي لغاز النتروجين المثالي عند درجة حرارة $(175\ K)$ وضغط $(8\ MPa)$.

Bassam Badran
Damascus University