المحاضرة الأولى
مقدمة ومفاهيم أساسية في الديناميكا الحرارية
المرحلة الثالثة | قسم المكائن والآلات الزراعية

مخرجات التعلم: تحديد الأنظمة وحدودها؛ والتمييز بين الخواص والحالات والعمليات؛ وتفسير قياسات درجة الحرارة والضغط باستخدام وحدات النظام الدولي(SI).

محاضرة 1، فقرة 1: الديناميكا الحرارية والهندسة الزراعية

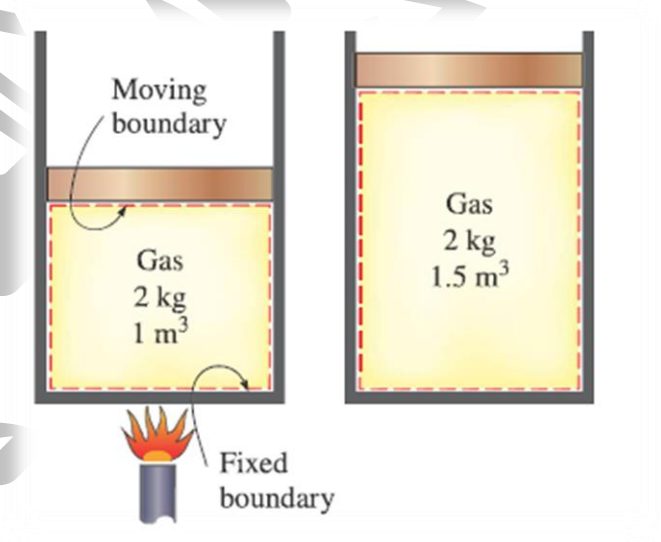
تدرس الديناميكا الحرارية (Thermodynamics) الطاقة وانتقالها وتحولاتها، وخواص المادة المرتبطة بهذه التغيرات. وهي تساعد المهندس على تحديد الطاقة التي تتطلبها المعدات، والمخرجات المفيدة التي يمكن الحصول عليها. يعتمد هذا المقرر المنهج العياني؛ أي وصف النظام باستخدام الضغط ودرجة الحرارة والكتلة والحجم، من دون تتبّع حركة الجزيئات المفردة.

تشمل التطبيقات الزراعية تحويل طاقة الوقود إلى شغل على عمود دوران الجرار، وتوفير القدرة لمضخات الري، وتسخين الهواء لتجفيف الحبوب، وسحب الحرارة من المنتجات الزراعية المخزونة. يعبّر القانون الأول للديناميكا الحرارية عن حفظ الطاقة، بينما يحدد القانون الثاني اتجاه تحولاتها وحدودها. وستُدرس الصياغة الرياضية لهذين القانونين في المحاضرات اللاحقة.

محاضرة 1، فقرة 2: الأنظمة والمحيط والحدود

النظام (System) هو كمية المادة أو الحيز المختار للتحليل. ويشكّل كل ما يقع خارجه المحيط (Surroundings). يفصل الحدّ الفاصل (Boundary) بين النظام ومحيطه، وقد يكون حقيقياً أو تخيلياً، ثابتاً أو متحركاً. يجب اختيار النظام أولاً، ثم تحديد تفاعلاته مع المحيط.

النظام المغلق (Closed system): نتتبّع فيه كمية ثابتة من المادة؛ فلا تعبر الكتلة حدوده، مع إمكان انتقال الطاقة عبرها على هيئة حرارة أو شغل. ويمكن تمثيل الغاز المحصور داخل أسطوانة محرك عندما يكون الصمامان مغلقين بهذا النوع من الأنظمة. تغيّر حركة المكبس حجم الغاز، ولكنها لا تغيّر كتلته المحصورة.



الشكل 1. نظام مغلق ذو حدّ متحرك.

حجم السيطرة أو حجم التحكم (Control volume؛ النظام المفتوح): نختار حيزاً يمكن أن تتدفق الكتلة عبره. تمثّل مضخة الري أثناء تشغيلها حجم سيطرة؛ إذ يدخل الماء ويخرج، ويُزوَّد عمودها بالشغل. ويُسمّى الحدّ المحيط بهذا الحيز سطح السيطرة(Control surface).

النظام المعزول (Isolated system): لا تعبر حدوده كتلة ولا طاقة. ولا يكفي العزل الحراري وحده لجعل النظام معزولاً؛ فقد يبقى انتقال الشغل أو الكتلة ممكناً. لذلك يعتمد تصنيف النظام على الحدّ المختار والفترة التشغيلية المدروسة، ولا يعتمد على اسم المعدّة وحده.

محاضرة 1، فقرة 3: الخواص والحالة والاتزان

الخواص (Properties): الخواص المكثفة(Intensive properties)، مثل درجة الحرارة والضغط والكثافة، لا تعتمد على مقدار المادة في النظام. أما الخواص الشمولية (Extensive properties)، مثل الكتلة والحجم الكلي والطاقة الكلية، فتعتمد على مقدار المادة. وعند التعبير عن خاصية شمولية لكل وحدة كتلة، تُسمّى خاصية نوعية (Specific property).

الكثافة والحجم النوعي: الكثافة هي الكتلة لكل وحدة حجم، والحجم النوعي هو الحجم لكل وحدة كتلة. وحدتاهما في النظام الدولي هما kg/m^3 وm^3/kg، على الترتيب. يرمز m إلى الكتلة بوحدة kg، وV إلى الحجم الكلي بوحدة m^3، وρ إلى الكثافة، وv إلى الحجم النوعي. يجب التمييز بين الحجم الكلي V والحجم النوعي v.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (kg/m^3) \qquad (1)$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (m^3/kg) \qquad (2)$$

الكثافة النسبية (Specific gravity): يعبّر الرمز SG عن نسبة كثافة المادة إلى كثافة مرجعية، ولذلك فهي كمية بلا وحدات. بالنسبة إلى السوائل المدروسة هنا، تعتمد المحاضرة الماء عند 4°C مرجعاً، بكثافة مقدارها $1000\ kg/m^3$. ويمكن باستخدام هذا التعريف حساب كثافة سائل المانومتر من كثافته النسبية المعطاة.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \qquad (3)$$

الجدول 1. الكثافات النسبية لبعض المواد عند 0°C.

المادة	الكثافة النسبية
الماء	1.0
الدم	1.05
ماء البحر	1.025
البنزين	0.7
الكحول الإيثيلي	0.79
الزئبق	13.6
الخشب	0.3–0.9
الذهب	19.2
العظام	1.7–2.0
الجليد	0.92
الهواء (عند 1 atm)	0.0013

الحالة (State): هي الوضع الذي تصفه خواص النظام. ويؤدي تغيّر إحدى الخواص إلى تغيّر الحالة. فمثلاً، يؤدي انضغاط الهواء المحصور إلى تغيّر حجمه، وعادةً إلى تغيّر ضغطه ودرجة حرارته أيضاً.

الاتزان الديناميكي الحراري (Thermodynamic equilibrium): يتطلب الاتزان الحراري تساوي درجات الحرارة، والاتزان الميكانيكي توازن القوى، واتزان الأطوار عدم وجود تغيّر صافٍ في كميات الأطوار، والاتزان الكيميائي عدم وجود تغيّر صافٍ في التركيب بسبب التفاعلات. يجب تحقق جميع شروط الاتزان ذات الصلة. ويمكن أن يزداد الضغط مع العمق في الماء الساكن، لأن قوى الضغط تتوازن مع وزن الماء.

مسلّمة الحالة (State postulate): تحدد خاصيتان مكثفتان مستقلتان حالة الاتزان لنظام بسيط قابل للانضغاط ومعلوم التركيب. وتُهمل عند تحديد هذه الحالة التأثيرات الإضافية الكهربائية والمغناطيسية وتأثيرات الحركة والسطح. والمقصود باستقلال الخاصيتين إمكان تغيير إحداهما دون أن يفرض ذلك قيمة محددة للأخرى.

يمكن عموماً تحديد حالة مادة في طور واحد باستخدام الضغط ودرجة الحرارة. أما عند اتزان السائل والبخار لمادة نقية، فيرتبط الضغط ودرجة الحرارة بعلاقة الإشباع، ولا يكونان مستقلين. لذلك نحتاج إلى خاصية مستقلة أخرى. ويصبح هذا التمييز أساسياً عند استخدام جداول البخار في المحاضرة الثالثة.

محاضرة 1، فقرة 4: العمليات والدورات

العملية (Process) هي الانتقال من حالة إلى أخرى، ويصف مسار العملية (Path) الحالات المتوسطة التي يمر بها النظام. ولتحديد العملية، تُحدَّد الحالتان الابتدائية والنهائية، والمسار، والتفاعلات مع المحيط. وقد تختلف كميتا الحرارة والشغل المنتقلتين باختلاف المسار، حتى عندما تكون حالتا البداية والنهاية متماثلتين.

مصطلحات العمليات: تجري العملية متساوية درجة الحرارة (Isothermal) عند درجة حرارة ثابتة، ومتساوية الضغط (Isobaric) عند ضغط ثابت، وثابتة الحجم (Isochoric) عند حجم ثابت. أما العملية الكظومة أو الأديباتية (Adiabatic) فلا يحدث خلالها انتقال للحرارة. ولا تعني الكظومة ثبات درجة الحرارة؛ إذ قد يؤدي انضغاط غاز معزول حرارياً إلى ارتفاع درجة حرارته.

عملية شبه الاتزان (Quasi-equilibrium process): يحدث التغيّر ببطء كافٍ، مقارنةً بسرعة استجابة النظام داخلياً، بحيث يبقى النظام قريباً من الاتزان. ويسمح هذا التمثيل المثالي باستخدام سلسلة من الحالات المحددة بوضوح في التحليل. وقد تؤدي حركة المكبس السريعة إلى فروق ملحوظة في الضغط داخل الأسطوانة. ولا يكفي افتراض شبه الاتزان لنفي وجود الاحتكاك أو لضمان الانعكاسية التامة.

الدورة والجريان المستقر: تعيد الدورة الديناميكية الحرارية (Cycle) المادة العاملة إلى حالتها الابتدائية؛ فتعود جميع خواص الحالة إلى قيمها الأصلية، رغم إمكان انتقال الطاقة عبر الحدود أثناء الدورة. أما الجريان المستقر (Steady flow)، فيعني أن الظروف عند كل موضع ثابت لا تتغير مع الزمن، مع إمكان اختلاف ظروف المدخل عن المخرج. وتوضح المضخة المستمرة التشغيل هذا التمييز.

محاضرة 1، فقرة 5: الوحدات ودرجة الحرارة والضغط

1.5.1. وحدات النظام الدولي والتجانس البُعدي: نستخدم الكيلوغرام (kg) للكتلة، والمتر (m) للطول، والثانية (s) للزمن، والكلفن (K) لدرجة الحرارة الديناميكية الحرارية. ومن الوحدات المشتقة الشائعة النيوتن (N) للقوة، والباسكال (Pa) للضغط، والجول (J) للطاقة، والواط (W) للقدرة. تقيس الكتلة مقدار المادة، بينما الوزن قوة ناشئة عن الجاذبية ويُعبَّر عنه بوحدة N. يجب أن تكون جميع الحدود التي تُجمع أو تُطرح في المعادلة متجانسة الأبعاد. حوّل السنتيمتر إلى المتر قبل حساب الضغط الهيدروستاتيكي، وميّز بين Pa وkPa.

1.5.2. درجة الحرارة والقانون الصفري: تحدد درجة الحرارة حالة الاتزان الحراري. إذا كان جسمان، كلٌّ على حدة، في اتزان حراري مع جسم ثالث، فإنهما يكونان في اتزان حراري أحدهما مع الآخر. وهذا هو القانون الصفري للديناميكا الحرارية، وهو أساس استخدام المحرار: يجب إتاحة الوقت لعنصر التحسس حتى يبلغ الاتزان الحراري مع المادة المراد قياس درجة حرارتها.

يُعدّ مقياس سيلسيوس مناسباً للقياسات الحقلية، بينما يُستخدم مقياس كلفن عندما تتطلب العلاقة درجة حرارة مطلقة. ويتساوى المقياسان في مقدار الفاصل بين الدرجات، لكنهما يختلفان في نقطة الصفر. لذلك يكون مقدار التغيّر في درجة الحرارة متساوياً عددياً بوحدتي K و°C. وتُضاف قيمة التحويل إلى قراءة درجة الحرارة، ولا تُضاف إلى فرق درجتي الحرارة. يُكتب الرمز K من دون علامة الدرجة.

$$T(K) = T(°C) + 273.15 \quad (4)$$

$$\Delta T(K) = \Delta T(°C) \quad (5)$$

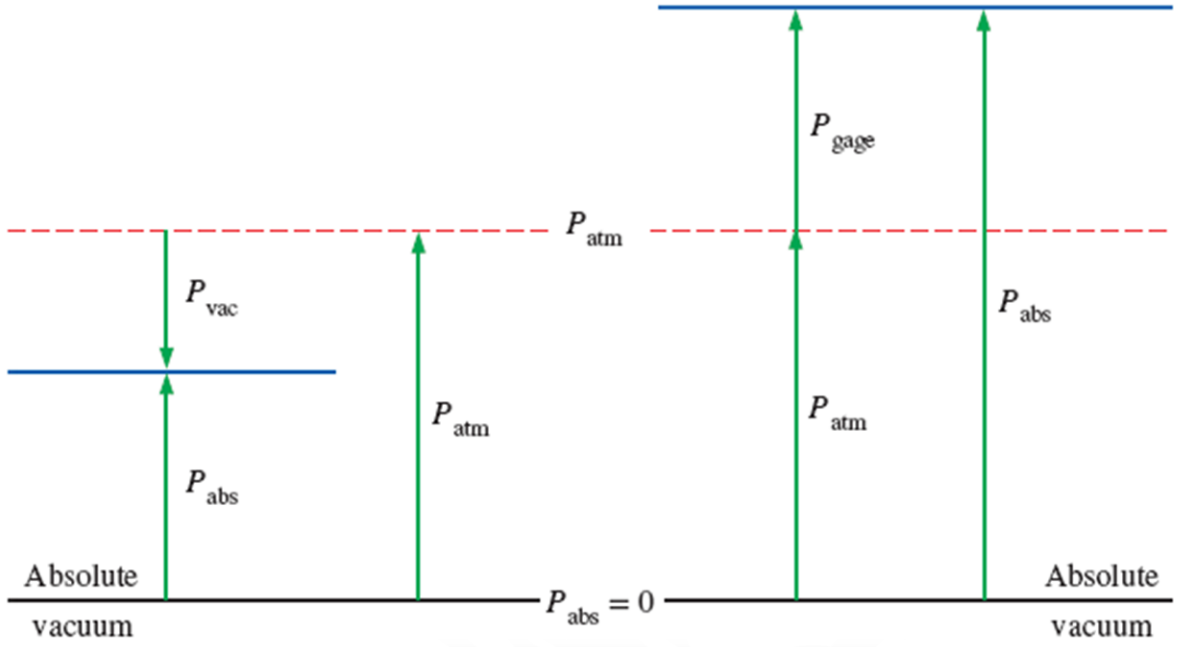
1.5.3 . مفهوم الضغط ومرجعه: ضغط المائع هو القوة العمودية لكل وحدة مساحة. ويساوي الباسكال الواحد نيوتناً واحداً لكل متر مربع. يشيع استخدام الكيلوباسكال أو الميغاباسكال في المعدات الزراعية؛ إذ يساوي 1 kPa مقدار 1000 Pa، ويساوي 1 MPa مليون باسكال. يجب دائماً بيان وحدة الضغط والمرجع الذي يُقاس بالنسبة إليه.

الضغط المطلق (Absolute pressure) يُقاس بالنسبة إلى الفراغ التام. أما الضغط المقاس أو النسبي (Gauge pressure)، فيُقاس بالنسبة إلى الضغط الجوي المحلي، وقد يكون موجباً أو سالباً. وتعبّر قراءة ضغط التخلخل (Vacuum pressure) عن مقدار انخفاض الضغط المطلق عن الضغط الجوي. تعرض معظم مقاييس ضغط الإطارات الاعتيادية الضغط المقاس، بينما تتطلب جداول الخواص الديناميكية الحرارية عادةً استخدام الضغط المطلق.

$$P_{gage} = P_{abs} - P_{atm} \quad (6)$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad (7)$$

تشير الرموز السفلية abs وatm وgage وvac إلى الضغط المطلق والجوي والمقاس والتخلخل، على الترتيب. يستخدم في هذه المحاضرة تهجئة gage. عند تحويل قراءة الضغط، استخدم الضغط الجوي المحلي الفعلي، ولا تستبدله تلقائياً بالضغط الجوي القياسي.



الشكل 2. الضغط المطلق والضغط المقاس وضغط التخلخل.

1.5.4. الضغط الهيدروستاتيكي: يزداد الضغط باتجاه الأسفل في المائع الساكن، لأن الطبقات الأعمق تحمل وزناً أكبر من المائع. وتتساوى الضغوط عند المنسوب نفسه في المائع الساكن نفسه والمتصل. وفي خزان ماء مفتوح، يكون الضغط عند السطح مساوياً للضغط الجوي. وتعتمد زيادة الضغط أسفل السطح على كثافة المائع، وتعجيل الجاذبية الأرضية، والعمق الرأسي.

$$P = P_{atm} + \rho gh \quad ; \quad P_{gage} = \rho gh \qquad (8)$$

في هذه المعادلة، تمثّل ρ كثافة المائع بوحدة kg/m³، وg تعجيل الجاذبية الأرضية بوحدة m/s²، وh العمق الرأسي بوحدة m. وتكون زيادة الضغط الهيدروستاتيكي الناتجة بوحدة Pa. تفترض هذه العلاقة المبسطة ثبات الكثافة وثبات تعجيل الجاذبية تقريباً، ولا تتضمن فواقد الاحتكاك في أنابيب الري التي يجري فيها الماء.

1.5.5. قياس الضغط: يقيس البارومتر الضغط الجوي. ويقيس المانومتر ذو العمود السائل فرق الضغط باستخدام فرق المنسوب الرأسي للسائل. يزداد الضغط عند الانتقال إلى الأسفل خلال سائل ساكن، وينخفض عند الانتقال إلى الأعلى. ويعتمد مقياس بوردون على تشوّه أنبوب منحنٍ، بينما ينتج محوّل الضغط إشارة كهربائية. يجب اختيار جهاز يتناسب مع مرجع الضغط المطلوب ومدى القياس.

نقاط أساسية: اختر حدود النظام أولاً. ميّز بين الخواص المكثفة والشمولية، وبين الحالة والعملية. يصف الاتزان والجريان المستقر حالتين مختلفتين. استخدم خواص مستقلة لتحديد الحالة. وتحقّق من مقياس درجة الحرارة ومرجع الضغط وتحويلات الوحدات قبل إجراء الحسابات.

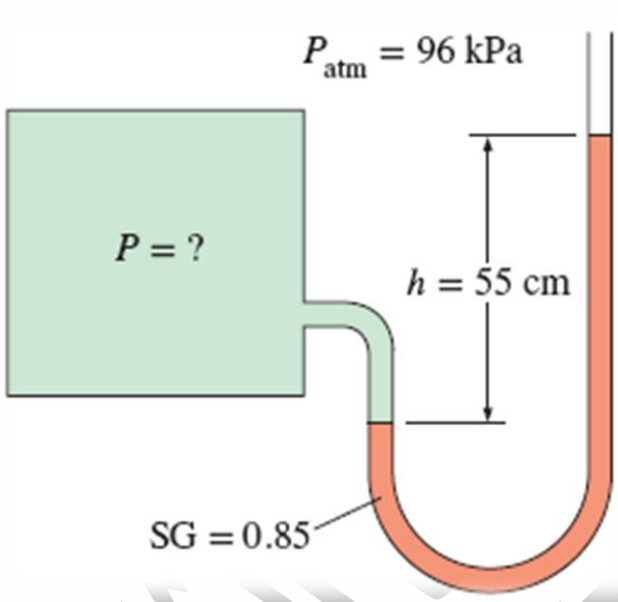
أسئلة للمراجعة: لماذا يمكن أن تكون للنظام المغلق حدود متحركة؟ هل يمكن أن يتغير الضغط داخل مائع في حالة اتزان؟ هل تحافظ العملية الكظومة بالضرورة على ثبات درجة الحرارة؟ ما القياس الإضافي اللازم لتحويل قراءة الضغط المقاس إلى ضغط مطلق؟

مثال عددي محلول: قياس الضغط

يجمع هذا المثال بين الكثافة النسبية والقياس بعمود سائل والضغط المطلق. وينطبق أسلوب التحليل نفسه على أوعية الهواء منخفضة الضغط المستخدمة مع المعدات الزراعية.

المثال1: قياس الضغط باستخدام المانومتر

يُستخدم مانومتر لقياس ضغط غاز داخل خزان. تبلغ الكثافة النسبية للسائل المستخدم 0.85، ويبلغ ارتفاع عمود المانومتر 55 cm، كما هو موضح في الشكل 3. إذا كان الضغط الجوي المحلي 96 kPa، فأوجد الضغط المطلق داخل الخزان.



الشكل 3. رسم تخطيطي للمثال 1.

الحل: المعطيات هي قراءة المانومتر المتصل بالخزان والضغط الجوي. والمطلوب تحديد الضغط المطلق داخل الخزان.

الفرضيات: كثافة الغاز داخل الخزان أقل بكثير من كثافة سائل المانومتر.

الخواص: الكثافة النسبية لسائل المانومتر تساوي 0.85. ونأخذ الكثافة المرجعية للماء مساويةً لـ 1000 kg/m³.

التحليل: تُحسب كثافة السائل بضرب كثافته النسبية في كثافة الماء:

$$\rho = SG(\rho_{water}) = (0.85)(1000\ kg/m^3) = 850\ kg/m^3$$

ثم نستخدم العلاقة النظرية للضغط، ونعوّض بالقيم بعد تحويل الارتفاع من 55 cm إلى 0.55 m:

$$P = P_{atm} + \rho g h \qquad (9)$$

$$P = 96\ kPa + (850\ kg/m^3)(9.81\ m/s^2)(0.55\ m)\frac{1\ kPa}{1000\ Pa}$$

$$P = 100.6\ kPa$$

مناقشة: لاحظ أن الضغط المقاس داخل الخزان يساوي 4.6 kPa.

تفسير النتيجة: تعطي قراءة العمود السائل فرقاً في الضغط، وتعتمد إشارته على تحديد السطح الأقل ارتفاعاً. ويُهمل هنا تغيّر ضغط الغاز مع الارتفاع، لأن كثافته أقل بكثير من كثافة السائل.