

## إنتاج كيميائي

أسس الهندسة الكيميائية

١١١ هـ



الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد :

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التتموي، لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " أسس الهندسة الكيميائية " لمتدربي قسم " كيمياء إنتاج " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

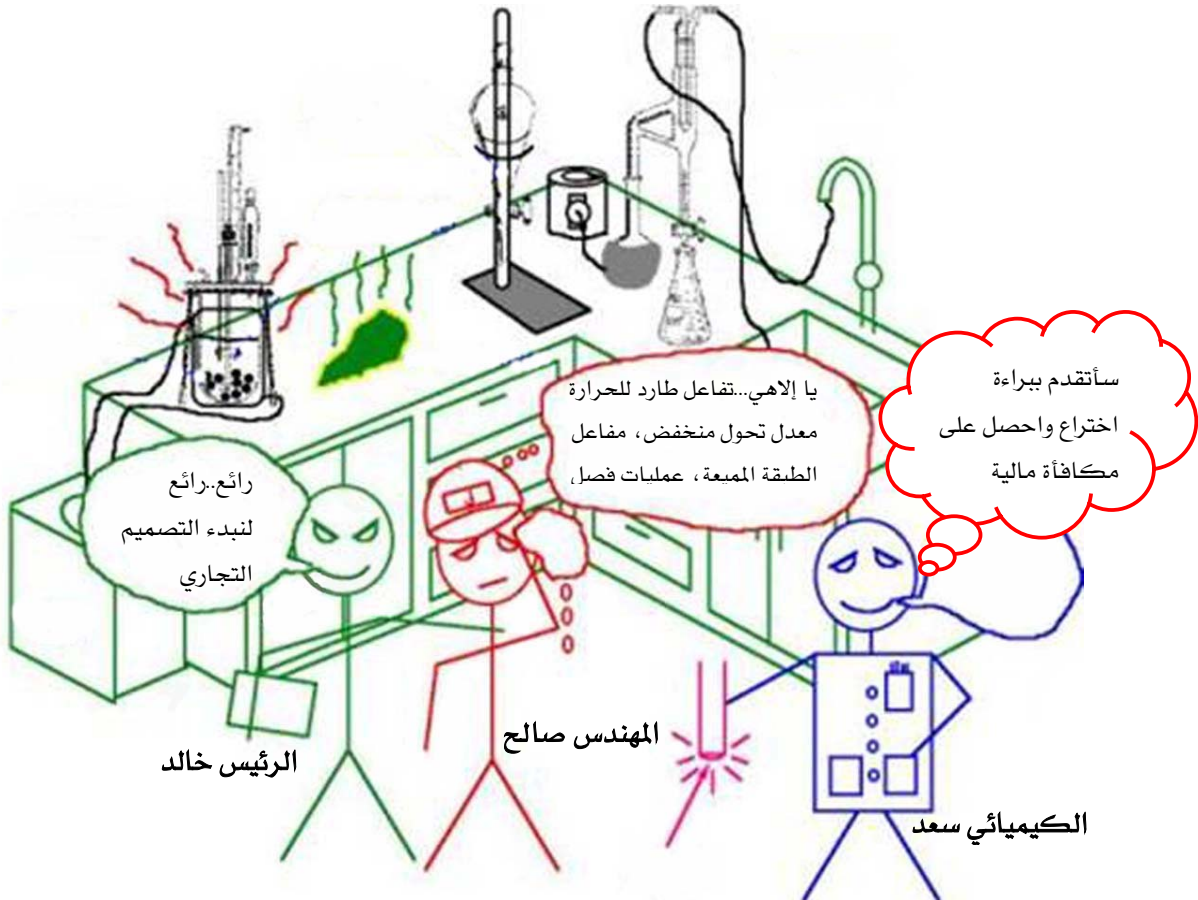
والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

يعتبر علم الهندسة الكيميائية أحد فروع الهندسة والذي يعنى بالعمليات الكيميائية والفيزيائية والمواد المستخدمة لإنتاج وتطوير المنتجات الكيميائية والصيدلية والغذائية الخ، حيث يُحتاج إلى الهندسة الكيميائية في احد أو جميع خطوات تصنيع هذه المنتجات.

وقد كان علم الهندسة الكيميائية -قبل الثورة الصناعية - احد فروع الكيمياء مثل العضوية والفيزيائية والتحليلية. ولان علم الكيمياء أثناء الثورة الصناعية اخذ منحى فهم وتوضيح الأساسيات وبتعد عن التطبيقات ومشاكلها ومحاولة الإجابة عن أسئلة مثل لماذا؟ وكيف؟، فقد تبلور الفرق بين الكيميائي والمهندس الكيميائي بأن الأول ربما يكتشف في المختبر مركبات أو مواد جديدة لا يمكن الاستفادة منها دون مساعدة المهندس الكيميائي. فالمهندس الكيميائي يقوم بعمل الحسابات والاختبارات اللازمة من اجل الانتقال من الحجم المعمل إلى الحجم الصناعي لإنتاج المادة المطلوبة. ويمكن توضيح الفرق بين الكيميائي والمهندس الكيميائي في الرسم الكرتوني التالي (شكل A):



الشكل A: رسم كرتوني لتوضيح الفرق بين الكيميائي والمهندس الكيميائي.

في الرسم أعلاه بدء الكيميائي سعد يفكر ببراءة الاختراع والترقية والزيادة في الراتب بعد اكتشافه - والذي تم في مختبر الشركة - لمادة كيميائية جديدة. أما رئيسه خالد فبدءا يفكر بالإرباح التي ستجنيها الشركة من هذا المنتج الجديد والثناء الذي سيحصل عليه من مجلس إدارة الشركة. بينما يحاول المهندس صالح -والذي تم تعيينه حديث للعمل في مشروع إنتاج هذه المادة الجديدة - معرفة حجم العمل الذي سيبدؤه قريبا وترتيب أفكاره من أجل ذلك. حيث يتوجب عليه تصميم عملية قادرة على إنتاج المادة الجديدة بكميات كبيرة بشكل اقتصادي وفي ظروف صحية وبيئية آمنة. فبدء يسأل نفسه أسئلة مثل هل عملية الإنتاج يجب أن تكون مستمرة أو متقطعة كما هو الحال في المختبر، كم عدد وحدات الفصل ونوعها، نسبة تحول المواد المتفاعلة إلى نواتج، مراعاة قوانين وضوابط المحافظة على البيئة وقواعد الأمان والسلامة في المصانع. وتعتمد الإجابة على هذه الأسئلة على مجموعة من الاعتبارات منها كمية الإنتاج ونقاوة المنتج واقتصاديات العملية الكلية. وهذه الاعتبارات تعتمد على الإلمام بأسس الهندسة الكيميائية مثل:

### اختيار المفاعلات وعمليات الفصل:

في حين يكفى دورق دائري أو مخروطي لإتمام التفاعل في المختبر، يمثل اختيار نوع المفاعل المناسب المفتاح الرئيس في تصميم وتطوير عملية الإنتاج التجارية. كما أن الاختيار المناسب لعمليات الفصل - نظرا لكلفتها العالية - فيعتبر حجر الزاوية في تصميم عملية إنتاج ذات جدوى اقتصادية.

### انتقال الحرارة:

عندما يكون التفاعل طرد للحرارة فإن التخلص أو الاستفادة من الحرارة الناتجة من التفاعل لا يعتبر مشكلة عندما يجري في المختبر. بينما تعتبر قضية انتقال الحرارة من الأمور الهامة في حال العمليات التجارية. فمثلا يلزم توافر معدل كافي لانتقال الحرارة من وإلى المفاعل لضمان ثبات درجة الحرارة عند القيمة المحددة، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة عن القيمة المحددة إلى تغير في خواص المنتج النهائي أو إلى حدوث تفاعلات جانبية أو إزاحة في ديناميكية التفاعل.

### انتقال المادة:

عند استخدام حفاز (عامل مساعد على التفاعل)، فإنه يجب الأخذ في الاعتبار قضية انتقال المادة أثناء حدوث التفاعل على سطح وداخل حبيبات الحفاز وعملية فصل الحفاز عن المنتج في حال عمليات الطور السائل.

## سريان الموائع:

في حين لا تمثل لزوجة المواد المتفاعلة والنااتجة -ولا تغيرها مع درجة الحرارة - أي مشكلة أثناء التجارب العملية، فإن اختيار نوع المفاعل في حال العمليات التجارية يعتمد على نوع وشدة الخلط المطلوبة مثلا. كما أن سريان الموائع داخل الأنابيب سيؤثر على حجم الأنابيب وتكلفة الضخ داخل الأنابيب.

## الديناميكا الحرارية:

لأي تفاعل كيميائي، فإن الديناميكا الحركية يجب أن تأخذ بعين الاعتبار عند اختيار المفاعل، حيث أنها تؤثر على القيمة العليا لمعدل تحول المواد المتفاعلة إلى نواتج.

## الاعتبارات البيئية:

بينما تحتل هذه الاعتبارات حيز صغير من تفكير الكيميائي بسبب قلة الكميات المستخدمة في المختبر وسهولة التخلص منها، يولي المهندس الكيميائي هذه القضية اهتمام أكبر نظرا لكثرة الكميات المستخدمة وضرورة التخلص منها وفق القوانين والمعايير الدولية.

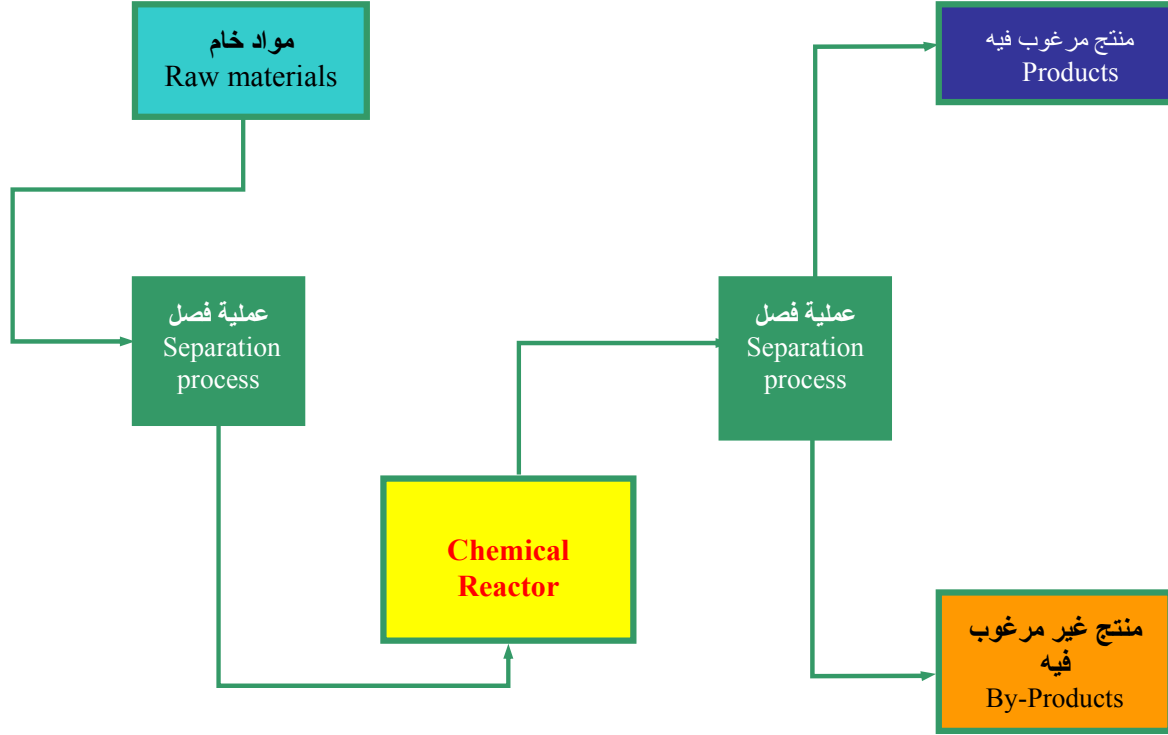
والشكل ٢ A رسم انسيابي لوحدة العمليات الكيميائية حيث يتم فصل المواد الخام و تنقيتها وفصل الشوائب عنها بواسطة عمليات الفصل الميكانيكية بعد ذلك تغذى هذه المواد الخام لإجراء العمليات الكيميائية عليها ثم يفصل المنتج المرغوب فيه من المنتج غير المرغوب فيها بواسطة عمليات الفصل الكيميائية كما هو موضح في الشكل (١).

ويعتبر هذه الكتاب مدخل لعلم الهندسة الكيميائية بشكل روعي فيه ساعات الاتصال وطبيعة العمل بعد التخرج لطلاب قسم التقنية الكيميائية في الكلية التقنية.

إن المرجو من هذا العمل هو مساعدة الطالب على فهم المبادئ الأساسية بعد تبسيطها ثم اكتساب القدرة على حل مسائل هذا الكتاب.

ويحتوي هذا الكتاب على ثلاثة فصول. الفصل الأول يتعرف فيه الطالب على الوحدات الحسابية المستعملة في مجالي الكيمياء و الهندسة الكيميائية وتدريبه على العمل بمختلف أنظمة الوحدات ثم الانتقال من نظام لآخر مع التأكيد على الالتزام بالنظام العالمي للوحدات. في الفصل الثاني يدرس الطالب متغيرات العمليات الكيميائية مثل درجة الحرارة والضغط والتركيز... الخ. في الفصل الثالث يتعرف الطالب على أنواع العمليات الكيميائية مثل المستقرة والمتقطعة والانتقالية ثم يتعلم الطالب أسس موازنة المادة عند الحالة المستقرة.

إن العدد الكبير من المسائل المحلولة في هذا الكتاب يعطي الطالب القدرة على تطبيق طرق حلها و حل المشاكل الأكثر تنوعا و تعقيدا.



الشكل ٢-٨ رسم انسيابي لوحدات العمليات الكيميائية.

## أسس الهندسة الكيميائية

### الأبعاد والنظم الأساسية



### الجدارة :

فهم أساسيات الحسابات الكيميائية للسهر على التشغيل الكفاء لأجهزة الإنتاج في الصناعة،  
المحافظة على الطاقة وإدراك الأسباب الكامنة وراء مشاكل التصنيع.

### الأهداف :

في نهاية هذا الفصل يكون الطالب قادرا على:

- معرفة أنظمة الوحدات (الدولية، الأمريكية، السنتيمتر-غرام -ثانية)
  - التتقل من نظام إلى آخر وبيسر،
  - تحويل وحدات معادلات الأبعاد
- مستوى الأداء المطلوب : أن لا تقل الجدارة عن ٩٥ .%
- الوقت المتوقع للتدريب: من ٨ إلى ١٠ ساعات اتصال.

الوسائل المساعدة : اعتمادا الطريقة المتبعة في المقرر لحل المسائل.

### متطلبات الجدارة :

قبل دراسة هذا الفصل يجب أن يكون الطالب ملما بالعلوم التالية:

الكيمياء العامة

الكيمياء الفيزيائية

الديناميكا الحرارية الكيميائية

الرياضيات الأساسية



## الوحدات والأبعاد

لأي كمية مقاسة هناك قيمة عددية ووحدة قياس. ومعرفة القيمة العددية ووحدة القياس من الأمور الضرورية في الحسابات الهندسية على سبيل المثال:

٣ جرام، ٢٠ دقيقة، ١١٠ كيلومتر.

فالقيمة العددية هي ٣ و ٢٠ و ١١٠ ووحدات القياس هي جرام و دقيقة و كيلومتر. والأبعاد هي كميات يمكن قياسها مثل الطول والوقت والكتلة ودرجة الحرارة أو حسابها بقسمة أو ضرب الأبعاد الأساسية، على سبيل المثال السرعة  $(\frac{\text{طول}}{\text{الزمن}})$ ، الحجم  $(\text{طول}^3)$ ، معدل السريران  $(\frac{\text{حجم}}{\text{الزمن}})$ ، الكثافة  $(\frac{\text{كتلة}}{\text{طول}^3})$ ، معدل انتقال المادة  $(\frac{\text{كتلة او مول}}{\text{الزمن}})$ .

و يمكن معاملة الوحدات كما تعامل الحدود في المعادلة الجبرية. فالقيمة العددية لأي كمية يمكن جمعها أو طرحها فقط إذا كانت الوحدات متماثلة.

$$8 \text{ cm} \square 6 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$$

ولكن لا يمكن عمل التالي:

$$8 \text{ m} \square 6 \text{ cm} = ?$$

في المقابل فإنه يمكن ضرب أو قسمة قيمتين عدديتين حتى في حال اختلاف وحدتيهما:

$$4 \text{ N} \times 5 \text{ m} = 20 \text{ N.m} \quad \text{أو} \quad \frac{5 \text{ kg}}{10 \text{ m}^3} = 0.5 \text{ kg/m}^3$$

$$\frac{12 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 3 \quad (\text{عديم الوحدة})$$

$$\left(8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) = 16 \text{ kg/s}$$

### تحويل الوحدات:

يمكن التعبير عن الكميات المقاسة باستخدام وحدات مختلفة لها الأبعاد المناسبة. فالسرعة يعبر عنها  $\text{km/h}$  أو  $\text{ft/min}$  أو  $\text{m/yr}$ . وتعتمد القيمة العددية للسرعة مثلاً على الوحدات المستخدمة في حسابها.

### تحويل الوحدات:

لتحويل وحدة كمية معين إلى ما يساويها من الوحدات الأخرى فإنه يتم ضرب الكمية المعطاة برقم يسمى معامل التحويل :

$$\frac{\text{الوحدة الجديدة}}{\text{الوحدة القديمة}}$$

فمثلا لتحويل 5 km إلى m فإننا نعمل التالي:

$$(5\text{ km}) \times \left( \frac{1000\text{ m}}{1\text{ km}} \right) = 5000\text{ m} \quad (1 \square 1)$$

فمعامل التحويل في هذه الحالة هو 1000 m/1 km.

ويمكن كتابة المعادلة (1 □ 1) كما يلي:

$$\begin{array}{c|c} 5 \text{ km} & 1000 \text{ m} \\ \hline & 1 \text{ km} \\ \hline & = 5000 \text{ m} \end{array}$$

مثال 1 □ 1

حول 1 cm/s<sup>2</sup> إلى ما يساويها بـ km/yr<sup>2</sup>

1 cm	3600 s <sup>2</sup>	24 <sup>2</sup> h <sup>2</sup>	365 <sup>2</sup> day <sup>2</sup>	1 m	1 km
s <sup>2</sup>	1 <sup>2</sup> h <sup>2</sup>	1 <sup>2</sup> day <sup>2</sup>	1 <sup>2</sup> yr <sup>2</sup>	100 cm	1000 m

$$= \frac{(3600 \times 24 \times 365) \text{ km}}{(10^2 \times 10^3) \text{ yr}^2} = 9.95 \times 10^9 \text{ km/yr}^2$$

## أنظمة الوحدات :

**الوحدات الأساسية:** مثل الكتلة، الطول، الزمن، درجة الحرارة، المول، قوة التيار الكهربائي، قوة إشعاع الأشعة.

**الوحدات المتعددة:** مثل اليوم = ٢٤ ساعة، والساعة = ٦٠ دقيقة، والدقيقة = ٦٠ ثانية، الكيلومتر = ١٠٠٠ متر، والمتر = ١٠٠ سنتيمتر، و سنتيمتر = ١٠ مليمتر. والغرض من هذه الوحدات هو تبسيط وتضادي التعقيدات. فعلى سبيل المثال فإن التعبير عن اليوم بـ ٢٤ ساعة أسهل من القول بان اليوم يساوي ٨٦٤٠٠ ثانية.

**الوحدات المشتقة:** ويقصد بها جميع الكميات اللازمة لوصف ما يحصل في الطبيعة، كالسرعة أو القوة أو الشغل... الخ والتي يمكن اشتقاقها من الكميات الأساسية بحيث تكون وحداتها مكونة من وحدتين أساسيتين أو أكثر (  $m^3$ , (ft/min, lb<sub>m</sub>.ft/s<sup>2</sup>, kg.m/s<sup>2</sup>).

جدول ١ - ٢: الوحدات المشتقة من وحدات الأساسية في النظام العالمي (SI)

المساوي لها بالوحدات الأساسية	الرمز	الوحدة	الكمية
$٠,٠٠١ m^3$ $١٠٠٠ cm^3$	L	لتر (liter)	الحجم (Volume)
$١ kg \cdot m/s^2$ $١ g \cdot cm/s^2$	N dyne	نيوتن (Newton) داين (dyne)	القوة (Force)
$١ N/m^2$	Pa	باسكال (Pascal)	الضغط (Pressure)
$١ N \cdot m$	J	جول (Joule)	الطاقة، الشغل (Energy, work)
$١ J/s$	W	وات (watt)	القدرة (Power)

### أنظمة القياس المستعملة من قبل المهندسين

#### نظام الوحدات الدولي (SI)

وهو النظام شائع الاستعمال عالميا ويعتمد على الكميات الأساسية التالية كما في الجدول ١- ٢-  
جدول ١- ٢: الوحدات بالنظام العالمي

الرمز	الوحدة	الكمية
m	متر	الطول
kg	كيلوجرام	الكتلة
s	ثانية	الزمن
mol or g-mole	جرام مول	المول
K	الكلفين	درجة الحرارة

#### نظام الوحدات الإنجليزي

وهو النظام الأقل شيوعا في الاستعمال العالمي ويعتمد على الكميات الأساسية التالية كما في الجدول ١- ٣-:

#### جدول ١- ٣: الوحدات بالنظام الإنجليزي

الرمز	الوحدة	الكمية
ft	القدم	الطول
lb <sub>m</sub>	رطل	الكتلة
s	الثانية	الزمن
lb-mole	رطل مول	المول
°R	رانكين	درجة الحرارة

الجدول ١ - ٤ يجمع أهم المضاعفات و الأجزاء المتعارف عليها:

جدول ١ - ٤: الوحدات المضاعفة

المعامل	رمز البادئة	البادئة
$10^{-9}$	n	نانو (nano)
$10^{-6}$	$\mu$	ميكرو (micro)
$10^{-3}$	m	ملي (mili)
$10^{-2}$	c	سنتي (centi)
$10^3$	k	كيلو (kilo)
$10^6$	M	ميغا (mega)
$10^9$	G	غيغا (giga)
$10^{12}$	T	تيرا (tera)

### القوة والوزن

بناءً على قانون نيوتن الأول للحركة فإن القوة عبارة عن حاصل ضرب الكتلة والتسارع ( $F = m \cdot a$ )، حيث تمثل  $F$  القوة و  $m$  الكتلة و  $a$  التسارع. وعلى هذا فإن وحدة القوة هي  $kg \cdot m/s^2$  أو  $g \cdot cm/s^2$  أو  $lb \cdot ft/s^2$  أو نيوتن (N) أو رطل قوة ( $lb_f$ ).

### مثال ١ - ٢

أ. احسب القوة اللازمة بالنيوتن (N) لجسم كتلته  $10 \text{ kg}$  و تسارعه  $25 \text{ m/s}^2$ .

ب. احسب القوة اللازمة بالرطل ( $lb_f$ ) لجسم كتلته  $10 \text{ lb}_m$  و تسارعه  $25 \text{ ft/s}^2$ .

الحل:

أ.

$$\text{القوة} = \text{الكتلة} \times \text{التسارع}$$

بما أن:

$$F = m \cdot a$$

إذن:

$$F = \frac{10 \text{ kg}}{1} \left| \frac{20 \text{ m}}{s^2} \right| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg}\cdot\text{m}/s^2} = 200 \text{ N}$$

ب.

$$1 \text{ lb}_f \equiv 32,174 \text{ lb}_m\cdot\text{ft}/s^2$$

بما أن:

إذن:

$$F = \frac{10 \text{ lb}_m}{1} \left| \frac{20 \text{ ft}}{s^2} \right| \frac{1 \text{ lb}_f}{32,174 \text{ lb}_m\cdot\text{ft}/s^2} = 7,77 \text{ lb}_f$$

الوزن

يعرف الوزن بأنه القوة المطبقة على جسم ما بواسطة الجاذبية الأرضية (g) ووحدته نيوتن (N) أو رطل قوة (lb<sub>f</sub>). أي أن:

$$W = m \cdot g$$

مثال ١ - ٣:

احسب وزن ٢ ft<sup>٣</sup> ماء كثافته ٦٢,٤ lb<sub>m</sub>/ft<sup>٣</sup> عند مستوى سطح البحر حيث تسارع الجاذبية يساوي ٣٢,١٣٩ ft/s<sup>٢</sup>.

الحل:

$$m = \rho \cdot V$$

أولا نوجد كتلة الماء:

$$m = \frac{62,4 \text{ lb}_m}{\text{ft}^3} \left| \frac{2 \text{ ft}^3}{1} \right| = 124,8 \text{ lb}_m$$

بما أن:

$$W = m \cdot g$$

إذن وزن الماء:

$$W = \frac{124.8 \text{ lb}_m}{32.174 \text{ ft/s}^2} \cdot 32.174 \text{ ft/s}^2 = 124.8 \text{ lb}_f$$

### المول:

إن الاستعمال الجاري لكلمة "مول" يشبه استعمالنا لكلمة مليون أو بليون أي أنه عدد ضخم. و  
بمعنى آخر، إن المول هو الكمية التي تحتوي على عدد أفوجادرو ( $6.02 \times 10^{23}$ ) من أي صنف من الوحدات  
سواء أكانت هذه الوحدات ذرات أو جزيئات أو أيونات أو إلكترونات أو أي نوعية معينة أخرى للدقائق.  
في النظام الدولي يعرف المول بكمية المادة التي تحوي عدة عناصر ذاتية كما هي حالة الذرات في  $0.012$   
كجم للكربون.

ويمكن حساب المول كالتالي:

$$\frac{\text{وزن المادة}}{\text{الوزن الجزيئي}} = \text{عدد المولات}$$

وحدة وزن المادة =  $\text{lb}_m, \text{kg}, \text{g}$

وحدة الوزن الجزيئي =  $\text{lb}_m/\text{lb-mol}, \text{kg}/\text{kmol}, \text{g}/\text{g-mol}$

### مثال ١ - ٤

يحتوي وعاء على  $4 \text{ lb}_m$  من هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) (الوزن الجزيئي =  $40 \text{ lb}_m/\text{lbmol}$ ).  
احسب كم  $\text{lbmol}$  و  $\text{gmol}$  مول هيدروكسيد الصوديوم يحتويه الإناء؟

### الحل

وزن هيدروكسيد الصوديوم بـ  $\text{lbmol}$

$$\frac{4,00 \text{ lb}_m \text{ NaOH}}{40,0 \text{ lb}_m \text{ NaOH}} = 0,1 \text{ lbmol NaOH}$$

وزن هيدروكسيد الصوديوم بـ gmol:

$$\frac{4,00 \text{ lb}_m \text{ NaOH}}{40,0 \text{ lb}_m \text{ NaOH}} \left| \frac{1 \text{ lbmole NaOH}}{1 \text{ lbmol}} \right| \frac{454 \text{ gmol}}{1 \text{ lbmol}} = 45,4 \text{ gmol NaOH}$$

مثال ١-٥

خط أنابيب ينقل ٤٥٠٠ gal/h ماء، احسب الكمية المنقولة بـ m<sup>٣</sup>/s علماً بأن ١ gal = ٣,٧٨٥ × ١٠<sup>-٣</sup> m<sup>٣</sup>.

الحل:

$$\frac{4500 \text{ gal}}{\text{h}} \left| \frac{3,785 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ gal}} \right| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 4,731 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

مثال ١-٦

حول ما يلي إلى الوحدات المطلوبة:

- ١ - ٢٥٠ g جرام إلى lb<sub>m</sub>.
- ٢ - ٧٠٠ L إلى ft<sup>٣</sup>.
- ٣ - ٥٠ g/L إلى lb/ft<sup>٣</sup>.
- ٤ - ٢٩,٤ lb<sub>m</sub>/in<sup>٣</sup> إلى kg/cm<sup>٣</sup>.
- ٥ - ٨٠ mil/h إلى m/s.
- ٦ - ٤٥ N/m<sup>٢</sup> إلى lb<sub>f</sub>/ft<sup>٢</sup>.
- ٧ - ١٧ J.m إلى Btu.
- ٨ - ٥ kW إلى J/s.



الحل:  
(١)

$$\therefore 1 \text{ lb}_m = 454 \text{ g}$$

$$\therefore \frac{250 \text{ g}}{454 \text{ g}} \left| \frac{1 \text{ lb}_m}{1 \text{ lb}_m} \right. = 0,551 \text{ lb}$$

$$\therefore 1 \text{ ft}^3 = 28.32 \text{ L}$$

$$\therefore \frac{700 \text{ L}}{28,32 \text{ L}} \left| \frac{1 \text{ ft}^3}{1 \text{ ft}^3} \right. = 24,72 \text{ ft}^3$$

(٢)

$$\frac{50 \text{ g}}{1 \text{ L}} \left| \frac{1 \text{ lb}_m}{454 \text{ g}} \right| \left| \frac{28,32 \text{ L}}{1 \text{ ft}^3} \right. = 3,12 \text{ lb}_m / \text{ft}^3$$

(٤)

$$\therefore 1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$$

$$\therefore \frac{29,4 \text{ lb}_m}{\text{in}^3} \left| \frac{0,454 \text{ kg}}{1 \text{ lb}_m} \right| \left| \frac{1 \text{ in}^3}{(2,54 \text{ cm})^3} \right. = 0,814 \text{ kg} / \text{cm}^3$$

(٥)

$$\therefore 1 \text{ mil} = 5280 \text{ ft}$$

$$1 \text{ m} = 3.28 \text{ ft}$$

$$\therefore \frac{80 \text{ mil}}{\text{h}} \left| \frac{5280 \text{ ft}}{1 \text{ mil}} \right| \left| \frac{1 \text{ m}}{3,28 \text{ ft}} \right| \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right. = 35,77 \text{ m/s}$$

(٦)

$$\begin{aligned} \therefore 1N &= 1kg.m/s^2 \\ 1lb_m &= 0.454kg \end{aligned}$$

$$\frac{45 N}{m^2} \left| \frac{1 kg.m/s^2}{1 N} \right| \left| \frac{1 lb_m}{0.454 kg} \right| \left| \frac{1 m}{3.28 ft} \right| = 0.939 lb_f/ft^2$$

(٧)

$$\begin{aligned} \therefore 1Btu &= 1055 J \\ 1m &= 3.28 ft \end{aligned}$$

$$\frac{17 J.m}{1055 J} \left| \frac{1 Btu}{1055 J} \right| \left| \frac{3.28 ft}{1 m} \right| = 0.0529 Btu$$

(٨)

$$\therefore 1J = 2.773 \times 10^{-7} kW.h$$

$$\frac{5 kW}{2.773 \times 10^{-7} kW.h} \left| \frac{1 J}{2.773 \times 10^{-7} kW.h} \right| \left| \frac{1 h}{3600 s} \right| = 5008.61 J/s$$

مثال ٧-

استعمل عوامل التحويل التالية:  $1 ft = 12 in$ ,  $1 in = 2.54 cm$ ,  $1 L = 1000 cm^3$  لإيجاد كم L في  $1 ft^3$ .

الحل

$$\frac{1 ft^3}{(1 ft)^3} \left| \frac{(12 in)^3}{(1 ft)^3} \right| \left| \frac{(2.54 cm)^3}{(1 in)^3} \right| \left| \frac{1 L}{1000 cm^3} \right| = 28.317 L$$

مثال ٨-

احسب كم يلزم  $ft^3$  لاستيعاب  $500 lb$  من سائل كثافته تساوي  $1.1 g/cm^3$  وكم US gal إذا كان  $7.481 U.S gal. = 1 ft^3$

الحل

$$V = m/\rho$$

٥٠٠ lb	٤٥٤ g	cm <sup>٣</sup>	١ L	١ ft <sup>٣</sup>	= ٧,٢٨ ft <sup>٣</sup>
	١ lb	١,١ g	١٠٠٠ cm <sup>٣</sup>	٢٨,٣٢ L	

عدد الـ US gal :

٧,٢٨ ft <sup>٣</sup>	٧,٤٨١ U.S gal	= ٥٤,٥ gal
	١ ft <sup>٣</sup>	

مثال ١ - ٩

سائل كثافته ١,٣ g/cm<sup>٣</sup> ، أوجد هذه الكثافة بـ lb<sub>m</sub>/ft<sup>٣</sup> .

الحل:

١,٣ g	١ lb <sub>m</sub>	١٠٠٠ cm <sup>٣</sup>	٢٨,٣٢ L	= ٨١,٠٩ lb <sub>m</sub> /ft <sup>٣</sup>
cm <sup>٣</sup>	٤٥٤ g	١ L	١ ft <sup>٣</sup>	

مثال ١ - ١٠

حول تسارع قدره ١٥ ft/s<sup>٢</sup> إلى ١٥ mil/h<sup>٢</sup> .

الحل:

١٥ ft	١ mil	(٣٦٠٠ s) <sup>٢</sup>	= ٣٦٨١٨ mil/h <sup>٢</sup>
s <sup>٢</sup>	٥٢٨٠ ft	h <sup>٢</sup>	

مثال ١ - ١١

حول معدل سريان حجمي لمائع من L/h إلى gal/min .

الحل:

$$\frac{1 \text{ L}}{\text{h}} \left| \frac{61.02 \text{ in}^3}{1 \text{ L}} \right| \frac{1 \text{ gal}}{23 \text{ in}^3} \left| \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right| = 0.044 \text{ gal/min}$$

مثال ١- ١٢-

حول  $20 \text{ lb}_m/(\text{ft}^2 \cdot \text{min})$  إلى  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

الحل:

$$\frac{20 \text{ lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{min}} \left| \frac{0.454 \text{ kg}}{1 \text{ lb}_m} \right| \frac{1 \text{ ft}^2}{(0.3048 \text{ m})^2} \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| = 1.63 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

مثال ١- ١٣-

أوجد الطاقة الحركية لسيارة كتلتها ٢ ton تسير بسرعة ٧٠ mil/h ثم عبر عنها بالوحدات التالية: J،  
L·atm ، W·s ، hp·s ، lb<sub>f</sub>·ft ، ergs

الحل:

$$\text{الطاقة الحركية} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

في النظام الدولي:

الكتلة:

$$\frac{2 \text{ ton}}{1 \text{ ton}} \left| \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \right| = 2000 \text{ kg}$$

السرعة:

$$\frac{70 \text{ mil}}{\text{h}} \left| \frac{5280 \text{ ft}}{1 \text{ mil}} \right| \frac{0.3048 \text{ m}}{1 \text{ ft}} \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| = 31.29 \text{ mil/s}$$

إذن:

$$\begin{aligned} \text{الطاقة الحركية} &= \frac{1}{2} \cdot 2000 \text{ kg} \cdot (31.29 \text{ mil/s})^2 = 9.8 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mil}^2/\text{s}^2 \\ &= 9.8 \cdot 10^6 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\frac{9.8 \times 10^0 \text{ J}}{1 \text{ J}} = \frac{10^7 \text{ erg}}{1 \text{ J}} = 9.8 \times 10^{12} \text{ erg}$$

$$\frac{9.8 \times 10^0 \text{ J}}{1 \text{ J}} = \frac{0.7376 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}}{1 \text{ J}} = 7.23 \times 10^0 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}$$

$$\frac{9.8 \times 10^0 \text{ J}}{1 \text{ J}} = \frac{1.34 \times 10^{-3} \text{ hp} \cdot \text{s}}{1 \text{ J}} = 1.31 \times 10^{-2} \text{ hp} \cdot \text{s}$$

$$\frac{9.8 \times 10^0 \text{ J}}{1 \text{ J}} = \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ J}} = 9.8 \times 10^0 \text{ W} \cdot \text{s}$$

$$\frac{9.8 \times 10^0 \text{ J}}{101.3 \text{ J}} = \frac{1 \text{ L} \cdot \text{atm}}{101.3 \text{ J}} = 9.67 \times 10^{-2} \text{ L} \cdot \text{atm}$$

مثال ١ - ١٤

يعبر عن كثافة مادة عضوية بالمعادلة الخطية التالية:

$$\rho = \rho_0 + a.T$$

حيث:

$\rho$  = الكثافة  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$  عند درجة الحرارة T

$\rho_0$  = الكثافة  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$  عند درجة الحرارة T.

ما هي وحدات الثابت a لكي تكون المعادلة منسجمة علما بأن وحدة درجة الحرارة هي  $^{\circ}\text{F}$ ؟

الحل

يجب أن تكون أبعاد الحد الأيمن والأيسر للمعادلة ثابتة و تساوي  $lb_m/ft^3$  .  
من هنا فان أبعاد الحد :  $lb_m/ft^3 = a.T$   
وإذا كانت وحدة درجة الحرارة هي  $^{\circ}F$  فان وحدة الثابت  $a$  هي :  
 $lb_m/(^{\circ}F .ft^3)$

مثال ١ - ١٥

في الرقم اللابيدي رقم رينولدز" والذي يعبر عن نوع السريان للموائع داخل الأنابيب و غيرها:  
 $Re = D.u.\rho/\mu$

حيث:

$D$ : القطر

$\rho$  : كثافة المائع

$u$  : سرعة المائع

$\mu$  : لزوجة المائع

ما هي وحدات اللزوجة إذا كانت وحدات القطر و الكثافة و السرعة كالتالي:  $m$  و  $kg/m^3$  و  $m/s$   
على التوالي؟

الحل

من معادلة رقم رينولدز تكون اللزوجة كالتالي:

$$\mu = D.u.\rho/Re$$

$$\frac{m}{s} = \frac{m}{s} \cdot \frac{kg}{m^3} = kg/s .m$$

مثال ١ - ١٦

نحاس موصليته الحرارية  $k$  تساوي  $30 \text{ Btu}/(\text{h.ft.}^{\circ}F)$ .

حول هذا القيمة إلى:  $\text{cal}/(\text{s.m.}^{\circ}C)$ .

علما بأن:

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$1^\circ\text{F} = 5/9 \text{ } 1^\circ\text{C}$$

الحل:

17 Btu	252 cal	1 h	1 ft	1 °F	= 7,03 cal/(s.m. °C)
h.ft. °F	1 Btu	3600 s	0,3048 m	5/9 °C	

مثال ١ - ١٧

معامل انتقال الحرارة بالحمل في وسط غازي عند السريران المضطرب ممثل بالمعادلة التالية:

$$h = 17 C_p \cdot G^{0.7} / D^{0.2} \quad (1 \square 2)$$

حيث:

السعة الحرارية ( $C_p$ ): Btu/(lb.°F)

القطر الداخلي للأنبوب (D): in

السرعة الكتلية للغاز (G): lb/(ft<sup>2</sup>.s)

معامل انتقال الحرارة بالحمل (h): Btu/(h.ft<sup>2</sup>.°F)

حول المعادلة (1 □ 2) إلى الصيغة التالية:

$$h_1 = x_1 C_{p1} \cdot G_1^{0.7} / D_1^{0.2} \quad (1 \square 3)$$

حيث:

السعة الحرارية ( $C_{p1}$ ): kcal/(kg.°C)

القطر الداخلي للأنبوب ( $D_1$ ): cm

السرعة الكتلية للغاز ( $G_1$ ): kg/(m<sup>2</sup>.s)

معامل انتقال الحرارة بالحمل ( $h_1$ ): kcal/(h.m<sup>2</sup>.°C)

معلومات إضافية:

$$1 \text{ kcal} = 3,97 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ m} = 3,28 \text{ ft}$$

$$1 \text{ cm} = 0,3937 \text{ in}$$

$$1 \text{ kg} = 2,2 \text{ lb}_m$$

الحل:

الطريقة المتبعة هي معاملة السعة الحرارية و القطر و سرعة الكتلة و معامل انتقال الحرارة كما لو كان قيمة عددية و تحويلها إلى الوحدات المطلوبة.



السعة الحرارية:

$$\frac{\text{Btu}}{\text{lb } ^\circ\text{F}} \left| \begin{array}{c} 1 \text{ kcal} \\ 3,97 \text{ Btu} \end{array} \right| \frac{2,2 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} \left| \begin{array}{c} 9/5 \text{ } ^\circ\text{F} \\ 1 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right| = 1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

إذن:  $C_p = C_{p1}$

سرعة الكتلة:

$$\frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^2 \cdot \text{s}} \left| \begin{array}{c} 1 \text{ kg} \\ 2,2 \text{ lb}_m \end{array} \right| \frac{1 \text{ ft}^2}{0,093 \text{ m}^2} = 4,88 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

إذن:

$$G = 0,205 G_1$$

$$G^{0,8} = 0,2815 G_1^{0,8}$$

القطر الداخلي:

$$\frac{1 \text{ in}}{1 \text{ in}} \left| \begin{array}{c} 2,54 \text{ cm} \\ 1 \text{ in} \end{array} \right| = 2,54 \text{ cm}$$

إذن:

$$D = 0,393 D_1$$

$$D^{0,2} = 0,8299 D_1^{0,2}$$

معامل انتقال الحرارة:

$$\frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \left| \begin{array}{c} 1 \text{ kcal} \\ 3,97 \text{ Btu} \end{array} \right| \frac{1 \text{ ft}^2}{0,093 \text{ m}^2} \left| \begin{array}{c} 9/5 \text{ } ^\circ\text{F} \\ 1 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right| = 4,875 \text{ kcal}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

إذن:

$$h = 0,205 h_1$$

بعد التعويض عن القيم في المعادلة (٢) نصل إلى:

$$0,204 h_1 = 17 C_p (0,2815) G_1^{0,75} / (0,8299 D_1^{0,25})$$

$$h_1 = 28,27 C_p G_1^{0,75} / D_1^{0,25}$$

مثال ١ - ١٨

محلول ( solution ) يحتوي على ٢٠٪ وزنا من ملح الطعام ( NaCl ) في الماء (H<sub>2</sub>O).

أ. احسب kg NaCl/kg H<sub>2</sub>O

ب. كم تصبح النسبة المئوية (٪) للملح إذا تبخر ٥٠٪ من الماء؟

ج. احسب كمية الماء التي يلزم تبخيرها لتصبح نسبته المئوية في المحلول تساوي ٢٥٪؟

الحل:

أ. لنفرض أن لدينا ١٠٠ kg من المحلول:

وان نسبة الملح في المحلول X:

ونسبة الماء في المحلول y:

$$(x)/(x+y) = 0,20$$

ومنها نستنتج أن:

$$x = (0,20/0,80)y = 0,25 y$$

$$x/y = 0,25 \text{ kg NaCl/kg H}_2\text{O}$$

ب.

إذا كانت كتلة الماء في المحلول = ٨٠ kg

أي أن كتلة الماء المتبقية بعد تبخر ٥٠٪ منه = ٨٠ kg - ٤٠ kg = ٤٠ kg

كتلة الماء والملح في المحلول بعد تبخر ٥٠٪ من الماء = ٢٠ kg NaCl + ٤٠ kg H<sub>2</sub>O = ٦٠ kg

$$\text{النسبة المئوية للملح} = 100 \times (20 \text{ kg} / 60 \text{ kg}) = 33\%$$

ج.

كتلة ٢٥٪ من الماء في المحلول = ٢٥٪ × ٨٠ kg H<sub>2</sub>O = ٢٠ kg H<sub>2</sub>O

## مثال ١ - ١٩

خليط يحوي على طين مسحوق في الماء. النسبة المئوية للماء = ٧٥%. على اثر عملية ترشيح متبوعة بتجفيف تم فصل ٨٠% من الماء لتصبح كتلته = ٦٠٠ kg.

أ. ما هي كتلة الخليط قبل عملية الفصل؟  
ب. ما هي نسبة الطين في الماء بعد العمليتين؟

## الحل

أ.

لنفرض  $m$  كتلة الخليط في البداية.

إذن: كتلة الماء في الخليط =  $0,75 \times m$

كتلة الماء المتبخر:  $0,80 \times 0,75 \times m$

كتلة الماء المتبقي بعد الترشيح:  $0,20 \times 0,75 \times m = 600 \text{ kg}$

إذن:

$$m = 600 / (0,20 \times 0,75) = 4000 \text{ kg}$$

كتلة الماء المتبخر:  $2400 \text{ kg} = 4000 \times 0,80 \times 0,75$

كتلة الطين الجاف في البداية:  $1000 \text{ kg} = 4000 \times 0,25$

كتلة الطين والماء بعد الترشيح و التجفيف:  $1600 \text{ kg} = 4000 - 2400$

ب.

النسبة المئوية للطين بعد العمليتين:  $62,5\% = 100 \times (1600 / 4000)$

## مثال ١ - ٢٠

إذا تم تبخير محلول ملح الصوديوم (NaCl) في الماء من ٤% إلى ٥%.

احسب:

أ. نسبة المئوية للماء المتبخر من المحلول الأصلي؟

ب. نسبة النقص في كتلة المحلول الأصلي؟

## الحل

أ.

لنفرض أن  $m_1$  كتلة المحلول الأصلي و  $m_2$  كتلة المحلول بعد عملية التبخير

كتلة الملح في البداية:  $0,04 \times m_1$

كتلة الملح في النهاية:  $0,05 \times m_2$

علما أن:  $0,04 \times m_1 = 0,05 \times m_2$

نسبة الماء المتبخر بالنسبة لكتلة الخليط:

$$(m_1 - m_2)/m_1 = 1 - m_2/m_1 = 0,2 = 20 \%$$

نسبة الماء المتبخر بالنسبة لكتلة الماء في البداية:

$$(m_1 - m_2)/0,96m_1 = 1,041(1 - m_2/m_1) = 0,2083 = 20,83 \%$$

أ - نسبة النقص في كتلة المحلول الأصلي:

$$(m_1 - m_2)/m_1 = (1 - m_2/m_1) = 0,20 = 20 \%$$

مثال ١ - ٢١

تم تخفيض نسبة الرطوبة في ورق مصنع (نسبة الرطوبة فيه ١٠ كيلو جرام ماء/١٠٠ كيلو جرام ورق جاف) بعد عملية تجفيف داخل مجفف نفقي إلى ٢٪.

=

الحل

كتلة الماء في الورق قبل التجفيف  $m_1$ :  $90,91 \text{ kg} = 1000 \times (110/100)$

كتلة الورق قبل التجفيف  $m_2$ :  $909,1 \text{ kg} = 1000 \times (110/100)$

كتلة الماء في الورق بعد التجفيف  $m_3$ :  $18,18 \text{ kg} = 0,02 \times 909,1$

كتلة الماء المتبخر أثناء التجفيف  $m_4$ :  $72,72 \text{ kg} = 18,18 - 90,91$

معدل التبخر:  $72,72 \text{ kg/h}$

مثال ١ - ٢٢

١٨ - احسب رقم رينولدز ( $Re = Dup/\mu$ ) لأنبوب قطره ( $D = 1 \text{ in}$ ) يجري داخله الماء بسرعة

$u = 4 \text{ ft/s}$  عند درجة حرارة تساوي  $60^\circ \text{F}$  علما أنه عند هذه الدرجة تكون كثافة و لزوجة الماء

هما على التوالي:  $\mu = 1,1 \text{ cp}$ ,  $\rho = 0,998 \text{ kg/m}^3$

قارن بين النتيجةين باستعمال وحدات  $\text{fps}$  و  $\text{S.I}$ .

الحل:

وحدات النظام الانجليزي

القطر

$$\frac{1 \text{ in}}{12 \text{ in}} \times \frac{1 \text{ ft}}{1 \text{ ft}} = 0,0833 \text{ ft}$$

السرعة

$$\frac{1 \text{ ft}}{1 \text{ s}} \times \frac{3600}{1 \text{ hr}} = 14400 \text{ ft/h}$$

الكثافة

$$\frac{0,998 \text{ g}}{\text{cm}^3} \times \frac{1 \text{ lb}}{454 \text{ g}} \times \frac{(30,48 \text{ cm})^3}{\text{ft}^3} = 62,30 \text{ lb/ft}^3$$

اللزوجة

$$\frac{1,1 \text{ cp}}{1 \text{ cp}} \times \frac{2,42 \text{ lb/(ft. h)}}{1 \text{ cp}} = 2,66 \text{ lb/(ft.h)}$$

رقم رينولدز

$$\frac{0,0833 \text{ ft}}{2,66 \text{ lb/(ft.h)}} \times \frac{14400 \text{ ft}}{\text{h}} \times \frac{62,30 \text{ lb}}{\text{ft}^3} = 28100$$

ب - وحدات S.I

القطر

$$\frac{1 \text{ in}}{1 \text{ in}} \left| \begin{array}{c} 0,0254 \\ 1 \text{ in} \end{array} \right. = 0,0833 \text{ ft}$$

السرعة

$$\frac{4 \text{ ft}}{\text{s}} \left| \begin{array}{c} 0,3048 \\ 1 \text{ ft} \end{array} \right. = 1,22 \text{ m/s}$$

الكثافة

$$\frac{0,998 \text{ g}}{\text{cm}^3} \left| \begin{array}{c} 1 \text{ kg} \\ 1000 \text{ g} \end{array} \right. \left| \begin{array}{c} 10^{-6} \text{ cm}^3 \\ 1 \text{ m}^3 \end{array} \right. = 998 \text{ kg/m}^3$$

اللزوجة

$$\frac{1,1 \text{ cp}}{100 \text{ cp}} \left| \begin{array}{c} 0,1 \text{ N.s/m}^2 \\ 100 \text{ cp} \end{array} \right. = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$$

رقم رينولدز

$$\frac{0,0254 \text{ m}}{1,1 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2} \left| \begin{array}{c} 1,22 \text{ m} \\ \text{s} \end{array} \right. \left| \begin{array}{c} 998 \text{ kg} \\ \text{m}^3 \end{array} \right. = 28100$$

### تمارين

- ١ - كم عدد الأمتار المكعبة في قضيب طوله ٣٠ in و قطره ٠,٣٥ in.  
٢ - حول ما يلي:

٥٠ mi/hr	إلى	ft/s	أ.
٣٠ lb/in <sup>٢</sup>	إلى	kg/m <sup>٢</sup>	ب.
٧ cm/hr <sup>٢</sup>	إلى	m/s <sup>٢</sup>	ج.
١ L/hr	إلى	gal/min	د.
١٠ lb/(ft <sup>٢</sup> .min)	إلى	kg/(m <sup>٢</sup> .s)	هـ.
٥٩ g H <sub>٢</sub> O	إلى	lb mole H <sub>٢</sub> O	و.
١٤,٧ psi	إلى	lb/ft <sup>٢</sup>	ز.
١٠٠ °C	إلى	K	ك.
٧٠ kg	إلى	lb	ل.

- ٣ - أوجد السرعة بالأقدام/ثانية لماء يجري داخل أنبوب بمعدل سريان يساوي ٦٠ U.S gal/min، إذا كانت مساحة مقطع الأنبوب العرضي تساوي ٣,٣٥٥ in<sup>٢</sup>.  
٤ - معادلة Colburn لانتقال الحرارة ممثلة بما يلي:

$$(h/C_p.G) (C_p \mu / k)^{1/4} = 0,23 / (D.G / \mu)^{1/4}$$

حيث:

السعة الحرارية  $C_p$ : Btu/(lb °F)

اللزوجة  $\mu$ : lb/(h.ft)

الموصلية الحرارية  $k$ : Btu/(h. ft. ° F)

قطر الأنبوب  $D$ : ft

سرعة الكتلة  $G$ : lb/(h.ft<sup>٢</sup>)

ما هي وحدات معامل انتقال الحرارة  $h$ ؟

٥ - أثبت صحة التحويلات التالية:

$$١,٩٨٧٢١ \text{ ft}^٣ = ٢٨,٣١٧ \text{ L} \quad \text{أ.}$$

$$١ \text{ m}^٣ = ٣٥,٣١٣ \text{ ft}^٣ \quad \text{ب.}$$

$$١ \text{ g cm/s}^٢ (\text{dyn}) = ٧,٢٣٣٠ \cdot ١٠^{\square٥} \text{ lb}_m \cdot \text{ft/s}^٢ \quad \text{ت.}$$

$$١ \text{ lb}_f = ٤,٤٤٨ \text{ N} \quad \text{ث.}$$

$$١ \text{ g cm/s}^٢ (\text{dyn}) = ٢,٢٤٨١ \cdot ١٠^{\square٦} \text{ lb}_f \quad \text{ج.}$$

$$١ \text{ psia} = ١ \text{ lbf/in}^٢ \quad \text{ح.}$$

$$١ \text{ lbf/ft}^٢ = ٤,٧٨٨٠ \cdot ١٠^{\square٧} \text{ dyn/cm}^٢ = ٤٧,٨٨ \text{ N/m}^٢ \quad \text{خ.}$$

$$١ \text{ mm Hg} (٠ \text{ }^\circ\text{C}) = ١,٣٣,٢٢٤ \cdot ١٠^{\square٨} \text{ N/m}^٢ = ٠,١٣٣٣٢٢٤ \text{ kPa} \quad \text{د.}$$

$$١ \text{ hp} = ٥٥٠ \text{ ft.lb/s} \quad \text{ذ.}$$

$$١ \text{ hp} = ٠,٧٠٦٨ \text{ Btu/s} \quad \text{ر.}$$

$$١ \text{ J/s} = ١ \text{ W} \quad \text{ز.}$$

$$١ \text{ J} = ١ \text{ N.m} = ١ \text{ kg.m/s}^٢ \quad \text{س.}$$

$$١ \text{ ft.lb}_f = ١,٣٥٥٨٢ \text{ J} \quad \text{ش.}$$

$$١ \text{ ft.lb}_f/\text{lb}_m = ٢,٩٨٩٠ \text{ J/kg} \quad \text{ص.}$$

$$١ \text{ Btu}/(\text{h.ft. } ^\circ\text{F}) = ٤,١٣٦٥ \cdot ١٠^{\square٩} \text{ cal}/(\text{s.cm. } ^\circ\text{C}) \quad \text{ض.}$$

$$١ \text{ Btu}/(\text{h.ft. } \text{F}) = ١,٧٣٠٧٣ \text{ W}/(\text{m. K}) \quad \text{ط.}$$

$$١ \text{ Btu}/(\text{h.ft. } ^\circ\text{F}) = ١,٣٥٧١ \cdot ١٠^{\square٤} \text{ cal}/(\text{s.cm}^٢. ^\circ\text{C}) \quad \text{ظ.}$$

$$١ \text{ kcal}/(\text{h.m}^٢. ^\circ\text{F}) = ٠,٢٠٤٨ \text{ Btu}/(\text{h.ft}^٢. ^\circ\text{F}) \quad \text{ع.}$$

$$١ \text{ cp} = ١٠^{\square٢} \text{ Pa.s} = ١٠^{\square٢} \text{ kg}/(\text{m.s}) = ١٠^{\square٢} \text{ N.s/m}^٢ \quad \text{غ.}$$

$$١ \text{ cp} = ٢,٠٨٨٦ \cdot ١٠^{\square٥} \text{ lb}_f \cdot \text{s}/\text{ft}^٢ \quad ١ \text{ cm}^٢/\text{s} = ٣,٨٧٥ \text{ ft}^٢/\text{h} \quad \text{ف.}$$

$$١ \text{ cm}^٢/\text{s} = ١٠^{-٤} \text{ m}^٢/\text{s} \quad \text{ق.}$$

$$١ \text{ m}^٢/\text{h} = ١٠,٧٦٤ \text{ ft}^٢/\text{h} \quad \text{ك.}$$

$$١ \text{ g}/(\text{s.cm}^٢) = ٧,٣٧٣٤ \cdot ١٠^{\square٦} \text{ lb}_m/(\text{h.ft}^٢) \quad \text{ل.}$$

$$١ \text{ g mol}/(\text{s.cm}^٢) = ٧,٣٧٣٤ \cdot ١٠^{\square٦} \text{ lb mol}/(\text{h.ft}^٢) \quad \text{م.}$$

$$١ \text{ Btu}/(\text{h.ft}^٢) = ٣,١٥٤٦ \text{ W/m}^٢ \quad \text{ن.}$$



$$١ \text{ cal/h} = ١,١٦٢٢ \cdot ١٠^{\square ٣} \text{ W} .$$

$$١ \text{ Btu/(lb}_m \cdot ^\circ \text{ F)} = ٤,١٨٦٨ \text{ kJ/(kg.K)} .$$

$$١ \text{ ft.lbf/lb}_m = ٢,٩٨٩٠ \text{ J/kg} .$$

$$١ \text{ cal/(g. } ^\circ \text{ C)} = ٤,١٨٦٨ \text{ kJ/(kg.K)} .$$

$$١ \text{ kcal/(g.mol)} = ٤,١٨٤٠ \cdot ١٠^{\square ٣} \text{ kJ/(kgmol)} .$$

$$١ \text{ cm/s} = ١٠^{\square ٢} \text{ m/s} .$$

$$١ \text{ ft/h} = ٨,٤٦٦٨ \cdot ١٠^{\square ٥} \text{ m/s} .$$

- ٦ - تقل كثافة الجو كلما ازداد الارتفاع عن سطح الأرض. فعندما يكون الضغط مساويا  $٤٠٠ \text{ mm Hg}$  ، احسب كم (in H<sub>٢</sub>O) و (kN/m<sup>٢</sup>) و (atm) المساوية لهذا الضغط؟
- ٧ - الضغط المقاس داخل خزان ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>٢</sub>) يساوي ٥١ psi. ما هو الضغط المطلق داخل الخزان إذا كان الضغط البارومتري ٢٨ in Hg
- ٨ - احسب الضغط المطلق لهواء يجري داخل قناة بضغط يساوي ٥ in H<sub>٢</sub>O بالوحدات التالية:
- أ - mm H<sub>٢</sub>O
- ب - Pa
- إذا كان الضغط البارومتري: ٧٣٠ mm Hg
- ٩ - ما هو الضغط المطلق داخل خزان إذا كان التخلخل داخله يساوي ٢٥,٤ in Hg و الضغط البارومتري ١٤,٧ psia
- ١٠ - ما هو حجم الزئبق، ب cm<sup>٣</sup> ، في أنبوب قطره الداخلي ٨ mm و طوله ٩٣ ft
- ١١ - إذا كانت كثافة الزئبق تساوي ١٣,٦ g/cm<sup>٣</sup> احسب كثافته بالوحدات التالية:
- أ - lb/ft<sup>٣</sup>
- ب - kg/m<sup>٣</sup>
- ١٢ - محلول ملحي كثافته ١,٢ g/cm<sup>٣</sup> وحجمه ٠,١ L عند درجة حرارة تساوي ٠°C ، يحتوي على ٢٥ g من ملح الطعام.
- أ - ما هي تركيبة المحلول بالكتلة (% ملح)؟
- ب - احسب كتلة الملح ب lb الممكن إذابتها في ١ ft<sup>٣</sup> من المحلول؟

ت - ما هي تركيبة المحلول بالمولات (% ملح)؟

١٣ - لمعايرة ثرمومتر مقابل ثرمومتر قياسي يعطي قراءة تساوي  $^{\circ}\text{F} 22$ . كم تكون قراءة الثرمومتر بالوحدات  $^{\circ}\text{C}$ ،  $^{\circ}\text{K}$ ؟

١٤ - إذا رفعت درجة حرارة المادة من  $^{\circ}\text{F} 0$  إلى  $^{\circ}\text{F} 100$ ، احسب:

أ - درجات الحرارة البدائية و النهائية بالوحدات  $^{\circ}\text{R}$ ،  $^{\circ}\text{K}$ ؟

ب - مقدار التغيير بدرجة الحرارة بالوحدات  $^{\circ}\text{R}$ ،  $^{\circ}\text{K}$ ؟

ج - الفرق بدرجة الحرارة بالوحدات  $^{\circ}\text{R}$ ،  $^{\circ}\text{K}$  عند ارتفاع درجة الحرارة بمقدار  $^{\circ}\text{F} 100$ .

١٥ - أثبت ما يلي:

$$\text{أ - } T(^{\circ}\text{F}) = 2 [ T(^{\circ}\text{C}) + 0,1 (160 - (^{\circ}\text{C})) ]$$

$$\text{ب - } T(^{\circ}\text{F}) = [ 2 T(^{\circ}\text{C}) - 0,1 ( 2 T(^{\circ}\text{C})) ] + 32$$

١٦ - احسب الضغط المقاس على عمق ٥ mil تحت سطح البحر عند  $60^{\circ}\text{F}$  بـ  $\text{lb}_f/\text{in}^2$  إذا كان الوزن النوعي لماء البحر عند  $60^{\circ}\text{F}$  يساوي ١,٠٤٢.



المملكة العربية السعودية  
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني  
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

## أسس الهندسة الكهربائية

### متغيرات العمليات الكيميائية

متغيرات العمليات الكيميائية



## الجدارة

فهم أساسيات الحسابات الكيميائية للسهر على التشغيل الكفاء لأجهزة الإنتاج في الصناعة ،  
المحافظة على الطاقة وإدراك الأسباب الكامنة وراء مشاكل التصنيع.

## الأهداف

في نهاية هذا الفصل يكون الطالب قادرا على:

- معرفة متغيرات العمليات الكيميائية (درجة الحرارة، الضغط، الكسر المولي، الكسر الحجمي، الكسر الكتلي، الكثافة، الوزن النوعي)
- المصطلحات المستعملة في طرق التحليل و القياسات.

**مستوى الأداء المطلوب :** أن لا تقل الجدارة عن ٩٥ %.

**الوقت المتوقع للتدريب :** من ٨ إلى ١٠ ساعات اتصال.

**الوسائل المساعدة :** اعتمادا الطريقة المتبعة في المقرر لحل المسائل.

## متطلبات الجدارة

قبل دراسة هذا الفص يجب أن يكون الطالب ملما بالعلوم التالية:

الكيمياء العامة

الكيمياء الفيزيائية

الديناميكا الحرارية الكيميائية

الرياضيات الأساسية

الكثافة ( $\rho$ ) Density

هي نسبة الكتلة على وحدة الحجم.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

يعبر عن الكثافة بالوحدات  $\text{kg/m}^3$  ,  $\text{g/cm}^3$  ,  $\text{lb}_m/\text{ft}^3$

يحتوي تعبير الكثافة عادة على كل من القيمة العددية والوحدات المرافقة والجدول التالي يوضح كثافة الماء عند درجة حرارة ( $4^\circ\text{C}$ ) للأنظمة المختلفة:

النظام	كثافة الماء
النظام الدولي (SI)	$1000 \text{ kg/m}^3$ $1.0 \text{ g/cm}^3$
النظام الأنجليزي	$62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$

## قياس الكثافة

١. للمواد الصلبة: بطريقة الإزاحة لمعرفة الحجم ويشترط أن وزن هذه المادة معروف.
٢. للمواد السائلة: بجهاز الهيدرومتر.
٣. للمواد الغازية: بميزان ادواردز.

## الوزن النوعي (S.G) Specific Gravity

هو نسبة مجردة من الأبعاد (الوحدات) بين كثافة المادة ذات الاهتمام (A) إلى المادة المتخذة كمرجع (reference).

$$S.G. = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (2-2)$$

و يعتبر الماء مرجع للسوائل والمواد الصلبة، لذا فالوزن النوعي (S.G.) هو نسبة كثافة المادة إلى كثافة الماء. أما الوزن النوعي للغازات فالمرجع هو الهواء ويمكن أن ينسب إلى غازات أخرى. وكثافة السوائل لا تعتمد على الضغط، ولكن تتغير مع درجة الحرارة. لذا فإنه من الضروري تثبيت درجة الحرارة عند نشير إلى الوزن النوعي.

## مثال ٢ - ١

إذا كان الوزن النوعي لثاني البروموبنتين مساويا ١,٥٧ ، احسب كثافته بالوحدات المختلفة لنظام الوحدات.

الحل

$$S.G. = \frac{\rho_A}{\rho_{H_2O}}$$

$$\rho_A = S.G. \times \rho_{H_2O}$$

$$\rho_A = 1.57 \times (1000 \frac{kg}{m^3}) = 1570 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_A = 1.57 \times (1 \frac{g}{cm^3}) = 1.57 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho_A = 1.57 \times (62.4 \frac{lb_m}{ft^3}) = 97.9 \frac{lb_m}{ft^3}$$

## الحجم النوعي (S.V.)

الحجم النوعي لأي مركب هو مقلوب الكثافة ( $S.V. = 1/\rho$ ) ويعبر عنه بالوحدات التالية:

$$ft^3/lb_m, cm^3/g, m^3/kg$$

## مثال ٢ - ٢

احسب الحجم النوعي لثاني البروموبنتين في المثال ٢ - ٢.

الحل

$$\frac{1}{\text{كثافة ثاني البروموبنتين}} = \text{الحجم النوعي لثاني البروموبنتين}$$

$$S.V. = \frac{1}{1570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 6.369 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$S.V. = \frac{1}{1.570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.6369 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

$$S.V. = \frac{1}{97.9 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3}} = 0.0102 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m}$$

### طرق التعبير عن تراكيب المخاليط والمحاليل

هناك طرق مختلفة وشائعة الاستخدام للتعبير عن تركيب المخاليط والمحاليل، وتوضيحها نفرض أن خليط مكون من مادتين A و B حيث تحتوي المادة A على (x kg) بينما تحتوي المادة B على (y kg). فإذا كانت الأوزان الجزيئية للمادتين A و B تساوي (M<sub>A</sub> kg/mol) و (M<sub>B</sub> kg/mol) على التوالي وحجم الخليط يساوي (V m<sup>3</sup>). عند فصل المادتين A و B من الخليط إلى حالتها النقية وجد أن حجمهما يكون V<sub>A</sub> و V<sub>B</sub> على التوالي.

### النسبة المئوية (%) الوزنية (Weight %)

تحسب النسبة المئوية الوزنية لأي مادة في خليط بقسمة وزنه تلك المادة على مجموع أوزان المواد في الخليط كما في المعادلة أدناه:

$$100 \times \frac{\text{وزن المادة A}}{(\text{وزن المادة A} + \text{وزن المادة B})} = \frac{\text{النسبة المئوية (\%)}}{\text{الوزنية للمادة A}}$$

إن هذه الطريقة شائعة الاستخدام لمركبات المواد الصلبة والسائلة ولا تستعمل عادة للحالات الغازية. و أحد الفوائد المستخلصة من تعبير التركيب بالنسبة المئوية الوزنية هو عدم تغير قيمة النسبة بتغير درجة حرارة الخليط (عند افتراض عدم وجود أي تبخر أو تبلور أو تفاعل كيميائي). ويجب أن يكون حاصل جمع جميع النسب المئوية لأوزان مركبات الخليط يساوي مائة.

### النسبة المئوية (%) الحجمية (Volume %)

تحسب النسبة المئوية الحجمية لأي مادة في خليط بقسمة حجم تلك المادة على مجموع احجام المواد في الخليط كما هو مبين في المعادلة أدناه:



$$100 \times \frac{\text{حجم المادة A}}{(\text{حجم المادة A} + \text{حجم المادة B})} = \frac{\text{النسبة المئوية (\%)}}{\text{الحجمية للمادة A}}$$

وتستعمل هذه النسبة في اغلب الأحيان للغازات تحت الضغوط المنخفضة وفي بعض الأحيان للسوائل ونادرا ما تستعمل للمواد الصلبة، وأي نسبة مئوية للغازات تذكر بدون بيان نوعها تؤخذ بأنها نسبة مئوية حجمية.

ويتم تحليل الغازات ومركباته بدرجة حرارة الغرفة وتحت الضغط الجوي. ويسلك تقريبا الخليط ومركباته الغازية المفردة سلوك الغاز المثالي.

ويمكن الحصول على الحجم الكلي بجمع أحجام المواد النقية للخليط:

$$V_A + V_B + \dots = V \quad (2 \square 3)$$

ويجب أن يكون حاصل جمع النسب المئوية الحجمية للمركبات يساوي مائة. وينتج عن أي تغيير بدرجة الحرارة تغير مساوي بالأحجام الجزيئية للمركبات، لذا فإن التركيب الحجمي للغازات ثابت بتغير درجة الحرارة.

أما في حالة المحاليل السائلة ففي اغلب الأحيان يلاحظ حدوث تقلص أو تمدد بحجم الخليط أي ان إن حاصل جمع أحجام المركبات النقية قبل الخلط لا يساوي حجم الخليط لذا فإن النسبة المئوية في هذه الحالة لا تساوي مائة، إضافة إلى ذلك فإن صفات التمدد للمركبات النقية فيما بينها في الغالب غير متساوية وتختلف عما عليه للخليط. ولهذا السبب فإن أي تغير بدرجة الحرارة سيؤدي إلى تغير تركيب المحلول السوائل ووفقا لهذا فإن حساب النسبة المئوية الحجمية لمحاليل السوائل يجب أن يتبعها علاقة تغير الحجم مع درجة الحرارة.

### مثال ٢ - ٣

إذا كان ٢١٥ kg من الزئبق تحتل حجم قدره ٠,٥٦ ft<sup>٣</sup> عند ٢٠°C وعلم أن تغير حجم الزئبق مع درجة الحرارة يمكن التعبير عنه بالمعادلة التالية:

$$V(T) = V_0 (1 + 0.18182 \times 10^{-3} T + 0.0078 \times 10^{-6} T^2) \quad (2-4)$$

١. احسب الحجم المحتل بواسطة الزئبق إذا رفعت درجة الحرارة إلى ١٠٠°C.

٢. افترض أن الزئبق وضع في أنبوب قطره يساوي ٠,٢٥ in ، احسب التغير في الارتفاع عندما ترفع درجة حرارة الزئبق من ٢٠°C إلى ١٠٠°C.

الحل

١. من المعادلة (٤) (٢)

$$V(100^{\circ}\text{C})=V_0(1+0.18182\times 10^{-3}(100)+0.0078\times 10^{-6}(100)^2) \quad (2-5)$$

و

$$V(20^{\circ}\text{C})=0.560\text{ft}^3=V_0(1+0.18182\times 10^{-3}(20)+0.0078\times 10^{-6}(20)^2) \quad (2-6)$$

بإيجاد قيمة  $V$  من المعادلة (2-6)

$$V(100^{\circ}\text{C})=0.568\text{ft}^3 \quad (2-7)$$

٢. حجم الزئبق في الأنبوب يساوي:

$$V=\frac{\pi D^2 H}{4} \quad (2-8)$$

حيث تمثل:

$D$ : قطر الأنبوب.

$H$ : الارتفاع.

$$H(100^{\circ}\text{C})-H(20^{\circ}\text{C})=\frac{V(100^{\circ}\text{C})-V(20^{\circ}\text{C})}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (2-9)$$

$$D = (0.25/12) \text{ ft} \\ = 23.5 \text{ ft}$$

### الكسر الكتلي و الكسر المولي Mass and Mole Fractions

غالباً ما تحتوي تيارات (streams) العملية على أكثر من مادة في صورة خليط من السوائل أو الغازات.

ويمكن التعبير عن التركيب الكتلي ( $x_i$ , mass fraction) أو المول ( $y_i$ , mole fraction) بواسطة المعادلات التالية:

$$\left(\frac{\text{lb}_m \text{ A}}{\text{lb}_m \text{ total}}\right) \left(\frac{\text{Kg A}}{\text{Kg total}}\right) \frac{\text{كتلة المادة A}}{\text{(الكتلة الكلية للخليط)}} = \frac{\text{الكسر الكتلي للمادة A}}{(x_A)}$$

و

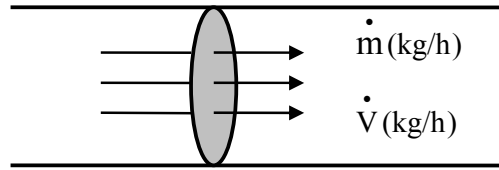
$$\left( \frac{\text{lb mol A}}{\text{lb mol total}} \right) \left( \frac{\text{kmol A}}{\text{kmol total}} \right) \frac{\text{عدد مولات المادة A}}{\text{(عدد المولات الكلية للخليط)}} = \frac{\text{الكسر المولي للمادة A}}{(y_A)}$$

ويمكن التعبير عن الكسر الكتلي أو المولي كنسبة مئوية كتلية أو مولية بضرب  $X_A$  أو  $y_A$  في ١٠٠ ويجب ان يساوي حاصل جمع الكسر الكتلي أو المولي مساويا لواحد (١).

### معدلات السريان الكتلي والحجمي Mass and Volumetric Flow Rate

معظم العمليات يتخللها حركة للمواد فيما بين وحدات العمليات أو من نقطة إلى أخرى. معدل انتقال هذه المواد هو معدل سريانها أو تدفقها. ويعبر عن معدلات السريان لتيارات العملية بمعدل السريان

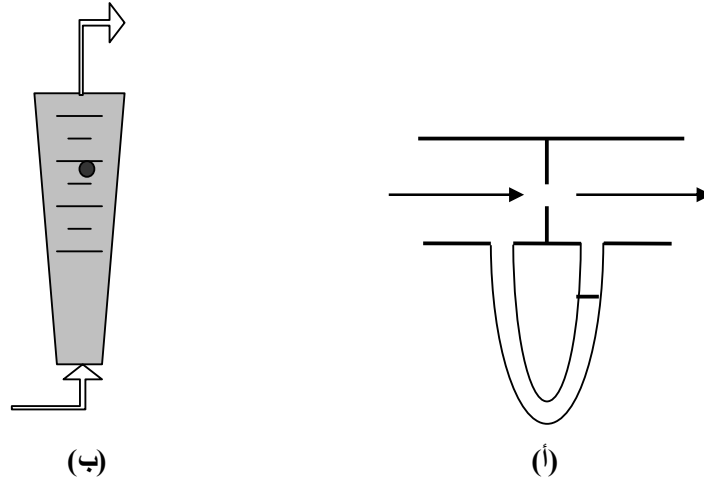
الكتلي (mass flow rate)  $\frac{\text{كتلة}}{\text{وقت}}$  أو معدل سريان حجمي (volumetric flow rate)  $\frac{\text{حجم}}{\text{وقت}}$



ويمكن استخدام الكثافة معدل السريان الحجمي إلى معدل سريان كتلي أو العكس كما يلي:

$$\frac{\text{معدل السريان الكتلي } (\dot{m})}{\text{معدل السريان الحجمي } (\dot{V})} = \frac{\text{الكتلة } (m)}{\text{الحجم } (V)} = \text{الكثافة } (\rho)$$

ويقاس معدل السريان بالروتاميتير (Rotameter) والاورفيس ميتر (Orifice meter).



شكل ٢ - ١: (أ) أورفيس ميثير (ب) روتاميتير

مثال ٢ - ٤

محلول يحتوي على نسبة كتلية تساوي ١٥% من المادة A ( $x_A = 0,15$ ) ونسبة مولية تساوي ٢٠% من المادة B ( $y_B = 0,20$ ). احسب:

١. كتلة المادة A في ١٧٥ kg من المحلول.
٢. معدل التدفق الكتلي للمادة A إذا كان معدل التدفق للمحلول يساوي ٥٣ lb<sub>m</sub>/h.
٣. معدل التدفق المولي للمادة B إذا كان معدل التدفق للمحلول يساوي ١٠٠٠ mol/min.
٤. معدل التدفق المولي للمحلول إذا كان معدل التدفق المولي للمادة B يساوي ٢٥ kmol B/s.
٥. كتلة المحلول المحتوي على ٣٠٠ lb<sub>m</sub> من المادة A.

الحل

١.

محلول ١٧٥ kg	0,15 kg A	=	٢٦ kg A
	kg محلول		

.٢

$$\frac{53 \text{ lb}_m}{h} \left| \frac{0,15 \text{ lb}_m \text{ A}}{\text{lb}_m} \right. = \frac{8,0 \text{ lb}_m \text{ A}}{h}$$

.٣

$$\frac{1000 \text{ mol}}{\text{min}} \left| \frac{0,2 \text{ mol B}}{\text{mol}} \right. = \frac{200 \text{ mol B}}{\text{min}}$$

.٤

$$\frac{28 \text{ kmol B}}{s} \left| \frac{1 \text{ kmol محلول}}{0,20 \text{ kmol B}} \right. = \frac{140 \text{ kmol محلول}}{s}$$

.٥

$$\frac{300 \text{ lb}_m \text{ A}}{\text{min}} \left| \frac{1 \text{ lb}_m \text{ محلول}}{0,15 \text{ lb}_m \text{ A}} \right. = 2000 \text{ lb}_m \text{ محلول}$$

الأساس الجاف في الحسابات :

إن تحاليل الغازات مثل الهواء ونواتج الاحتراق وغازات أخرى مشابهة تبني عادة على الأساس الجاف أي باستثناء بخار الماء حيث تسمى هذه التحاليل بتحاليل الأورست. ويحتوي الهواء على ٢١% أوكسجين و ٧٩% نيتروجين. و يعد الهواء من الغازات المثالية، لذا فإن كل نموذج من الهواء يحتوي على ٢١% حجماً أوكسجين وبنفس الوقت ٢١% مول أوكسجين. ولما كانت النسبة المئوية ممثلة بحاصل ضرب الكسر بمائة فإن الكسر المولي للأوكسجين يساوي ٠,٢١.

مثال ٢- ٥

مادة تستعمل لتنظيف مياه الصرف الصحي تحتوي على ٥,٠٠ kg ماء و ٥,٠٠ kg هيدروكسيد الصوديوم (NaOH). اوجد الكسر الكتلي والكسر المولي للماء وهيدروكسيد الصوديوم.

## الحل

ليكون الكسر الكتلي للماء و هيدروكسيد الصوديوم هما  $X_A$  و  $X_B$  على التوالي، الكسر المولي لهما  $Y_A$  و  $Y_B$  على التوالي.

اذن:

$$x_A = \frac{5 \text{ kg A}}{(5 \text{ kg A} + 5 \text{ kg B})} = 0.5$$

$$x_B = \frac{5 \text{ kg B}}{(5 \text{ kg A} + 5 \text{ kg B})} = 0.5$$

بما ان:

الوزن الجزئي للماء  $(H_2O) = (2 \times 1 + 16 \times 1) = 18$  كجم/مول

الوزن الجزئي لهيدروكسيد الصوديوم  $(NaOH) = (1 \times 23 + 16 \times 1 + 1 \times 1) = 40$  كجم/مول

$$0,278 \text{ mol} = \frac{5 \text{ kg}}{18 \text{ kg/mol}} = \text{عدد مولات الماء}$$

$$0,125 \text{ mol} = \frac{5 \text{ kg}}{40 \text{ kg/mol}} = \text{عدد مولات هيدروكسيد الصوديوم}$$

$$\frac{0,699 \text{ mol A}}{\text{total mol}} = \frac{0,278 \text{ mol}}{0,403 \text{ total mol}} = \text{الكسر المولي للماء (Y}_A\text{)}$$

$$\frac{0,311 \text{ mol A}}{\text{total mol}} = \frac{0,125 \text{ mol}}{0,403 \text{ total mol}} = \text{الكسر المولي لهيدروكسيد الصوديوم (Y}_B\text{)}$$

يجب أن يكون مجموع الكسر المولي للماء والكسر المولي لهيدروكسيد الصوديوم يساوي ١,٠.

$$1 = 0,311 + 0,699 \text{ أي}$$

يجب أن يكون مجموع الكسر الوزني للماء والكسر الوزني لهيدروكسيد الصوديوم يساوي ١,٠.

$$1 = 0,5 + 0,5 \text{ أي}$$

## مثال ٢ - ٦

احسب الكسر الكتلي ( $X_A$ ) للأوكسجين في خليط يحوي أوكسجين وهيدروجين، إذا كان الكسر المولي للأوكسجين يساوي ٠,٣٣٣.

## الحل

ليكون:  $y_B$  الكسر المولي للهيدروجين

$m_A$  وزن الأوكسجين

$m_B$  وزن الأوكسجين

$m_T$  وزن الخليط

$X_A$  الكسر الكتلي للأوكسجين

$$y_B = (0,333 - 1) = 0,667$$

$$m_A = (32 \text{ kg/mol}) \times 0,333 = 10,66 \text{ kg}$$

$$m_B = (2 \text{ kg/mol}) \times 0,667 = 1,33 \text{ kg}$$

$$m_T = 10,66 + 1,33 = 11,99 \text{ kg}$$

$$X_A = 10,66/11,99 = 0,889 \text{ kg}$$

## التركيز (Concentration)

إن المقصود بالتركيز هو التعبير عن كمية المذاب لكل وحدة حجم من المذيب في المحلول أو الخليط المكون من مركبين أو أكثر. وهناك وحدات مختلفة تستعمل للتعبير عن التركيز مثل:

$$g/cm^3, \text{ kg/L}, \text{ lb}_m/ft^3$$

وحدات الحجم الشائعة الاستعمال هي اللتر (L)، القدم المكعب ( $ft^3$ )، الجالون (gal)، والمتر المكعب ( $m^3$ ). أما بعض التعبيرات الشائعة للتركيز فممثلة بالتالي:

جم مذاب/لتر.

جم مولات مذاب/لتر.

رطل مذاب/جالون.

رطل مولات مذاب/جالون.

كجم مذاب/متر مكعب.



كيلو مولات مذاب/متر مكعب.

وهذه التعابير تستعمل بصورة واسعة لتعيين تراكيب المحاليل السائلة سواء كان ذلك في المختبرات أم المصانع. ويعود ذلك إلى سهولة قياس أحجام السوائل.

وبالنسبة للمحاليل ذات التركيز المنخفضة جدا فيعبر عن تركيزها بالأجزاء للمليون (parts per million-ppm). ويكافئ الـ ppm الكسر الكتلي للمواد الصلبة والسائلة وذلك لأن كمية المجموع أكثر بكثير من كمية المذيب.

و هناك طرق أخرى للتعبير عن التركيز مثل:

المولارية (Molarity) - (المول/لتر).

العيارية (Normality) - (الوزن المكافئ/لتر).

المولالية (Molality) - (مول/١٠٠٠ جرام مذيب).

مثال ٢ - ٧

محلول كلوريد الصوديوم (NaCl) في الماء يحتوي على  $230 \text{ kg/m}^3$  كلوريد الصوديوم عند درجة حرارة  $20^\circ \text{C}$  حيث تكون كثافة المحلول تساوي  $1148 \text{ kg/m}^3$  أوجد ما يلي:

١. التركيب بالنسبة المئوية الكتلية.
٢. النسبة المئوية الحجمية للماء.
٣. التركيب بالنسبة المئوية المولية.
٤. المولالية.

الحل

الأساس:  $1 \text{ m}^3$  من المحلول

ليكون:  $m_1$ : كتلة المحلول

$m_2$ : كتلة كلوريد الصوديوم (NaCl)

$m_3$ : كتلة الماء

$n_2$ : عدد مولات كلوريد الصوديوم (NaCl)

$n_3$ : عدد مولات الماء

$M_w$ : الوزن الجزيئي لـ NaCl

إذن:

$$\text{كتلة المحلول } (m_1) = \rho \times V = (1148 \text{ kg/m}^3) \times (1 \text{ m}^3) = 1148 \text{ kg}$$

و بما أن:

$$m_r = 230 \text{ kg}$$

اذن:

$$n_r \text{ kmol} = \frac{230 \text{ kg}}{58,5 \text{ kg/kmol}} = \frac{m}{M_w} = \frac{\text{عدد مولات NaCl}}{(n_r)}$$

$$918 \text{ kg} = \text{كتلة الماء } (m_r)$$

$$51 \text{ kmol} = \frac{\text{kg}}{18,0 \text{ kg/kmol}} = \frac{\text{عدد مولات الماء}}{(n_r)}$$

$$54,93 \text{ kmol} = \text{عدد مولات في المحلول}$$

مجموع المولات في المحلول

١. التركيب بالنسبة المئوية الكتلية

$$20\% = 100 \times \frac{\text{kg NaCl}}{\text{kg NaCl}} = \frac{\text{النسبة المئوية الكتلية لـ NaCl}}{\text{NaCl}}$$

$$80\% = 100 \times \frac{\text{kg H O}}{\text{kg}} = \frac{\text{النسبة المئوية للماء}}{\text{الماء}}$$

٢. النسبة المئوية الحجمية للماء

كثافة الماء النقي عند درجة حرارة  $20^\circ \text{C}$  هي  $998 \text{ kg/m}^3$

kg

$$0,920 \text{ m}^3 = \frac{\text{kg}}{998 \text{ kg/m}^3} = \text{حجم الماء}$$

$$92\% = 1 \text{ m}^3 \times 0,920 \text{ m}^3 = \text{النسبة المئوية الحجمية للماء}$$

٣. التركيب بالنسبة المئوية المولية

$$92,84\% = 100 \times \frac{51 \text{ kmol H}_2\text{O}}{54,93 \text{ total mole}} = \text{النسبة المئوية المولية للماء}$$

$$7,16\% = 100 \times \frac{3,93 \text{ kmol NaCl}}{54,93 \text{ total mole}} = \text{النسبة المئوية المولية لـ NaCl}$$

٤. المولالية

$$\frac{4,28 \text{ kmol NaCl}}{1000 \text{ kg H}_2\text{O}} = \frac{1000 \text{ kg H}_2\text{O}}{918 \text{ kg H}_2\text{O}} \times 3,93 \text{ kmol NaCl} = \text{المولالية}$$

مثال ٢ - ٨

عند ٦٠ °F الوزن النوعي (Specific Gravity, S.G) لمحلول يحتوي على ٣٠ % وزنا من حامض الكبريتيك (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) يساوي ١,٢٢. ما هو تركيز الحامض بالوحدات التالية؟

lb mole/U.S gal .

lb/ft .

ج. g/L

الحل:

أ. ١٠٠ lb من محلول تركيزه ٣٠ % وزنا يحتوي على ٣٠ lb من H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> النقي و ٧٠ lb من الماء H<sub>2</sub>O.

بما أن:

$$\frac{\text{عدد المولات}}{\text{حجم المحلول}} = \text{تركيز المحلول (المولارية)}$$

$$\frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}} = \text{الكثافة } (\rho)$$

$$\frac{\text{وزن المادة}}{\text{الوزن الجزيئي}} = \text{عدد المولات}$$

$$\text{الوزن الجزيئي لـ } H_2SO_4 = 2 \times \frac{1 \text{ lb}}{\text{lbmol}} + \frac{32 \text{ lb}}{\text{lbmol}} + \left( 4 \times \frac{16 \text{ lb}}{\text{lbmol}} \right) = \frac{98 \text{ lb}}{\text{lbmol}}$$

$$\text{عدد المولات} = \frac{30 \text{ lb}}{\frac{98 \text{ lb}}{\text{lbmol}}} = 0,306 \text{ lbmol}$$

$$\text{كثافة الماء } (\rho) \text{ عند } 40^\circ\text{C} = 62,4 \text{ lb/ft}^3$$

بما أن:

$$\text{الوزن النوعي للمحلول (S.G)} = \frac{\text{الكثافة}}{\text{كثافة الماء عند } 40^\circ\text{C}}$$

إذن

$$\text{كثافة المحلول} = \frac{\text{الوزن النوعي للمحلول}}{\text{(S.G)}} \times (\text{كثافة الماء عند } 4^{\circ}\text{C})$$

$$\text{كثافة المحلول} = 1,22 \times 62,4 \text{ lb/ft}^3 = 76,128 \text{ lb/ft}^3$$

إذن

$$\text{حجم المحلول} = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الكثافة}}$$

$$\frac{100 \text{ lb solution}}{76,128 \text{ lb/ft}^3} \times \frac{7,481 \text{ gal}}{1 \text{ ft}^3} = 9,83 \text{ gal}$$

إذن:

$$\text{تركيز الحامض (المولارية)} = \frac{0,306 \text{ lbmol}}{9,83 \text{ gal}} = 0,031 \text{ lbmol/gal}$$

ب.

$$\frac{0,03113 \text{ lbmol H}_2\text{SO}_4}{\text{gal}} \times \frac{98,08 \text{ lb H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ lb mol H}_2\text{SO}_4} \times \frac{7,481 \text{ gal}}{1 \text{ ft}^3} = 22,84 \text{ lb H}_2\text{SO}_4/\text{ft}^3$$

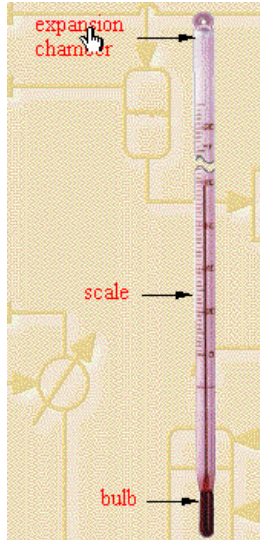
ج.

$$\frac{22,84 \text{ lb H}_2\text{SO}_4}{\text{ft}^3} \times \frac{454 \text{ g}}{1 \text{ lb}} = 366,15 \text{ g H}_2\text{SO}_4/\text{L}$$

١ ft<sup>3</sup> | ١ lb | ٢٨,٣٢ L

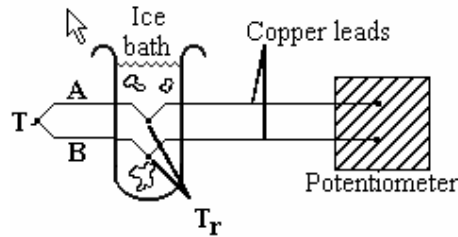
## درجة الحرارة (Temperature)

تم استنباط فكرة مقياس درجة الحرارة الترمومتر لتحديد نوع وكمية الحرارة.

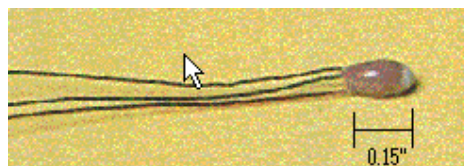


وهناك طرق أخرى شائعة الاستعمال لقياس درجة الحرارة من أهمها:

١. المزدوج الحراري - **Thermocouple** - يستعمل كمقياس لدرجة الحرارة و يعمل بتوليد الفولتية عند نقطة اتصال موصلين غير متشابهين والمتغيرة بتغير درجة الحرارة.



٢. الترمستر - **Thermister** - يعمل هذا الجهاز على أساس خواص تبديل المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة.



٣. البايروميتر - Pyrometer - جهاز يستعمل لقياس درجات الحرارة العالية حيث يسجل الطاقة المشعة التي تترك الجسم الحار.



ودرجة الحرارة هي قياس للطاقة الحرارية للحركة العشوائية لجزيئات الجسم المتوازن حرارياً. ووحدات قياس درجة الحرارة هي الفهرنهايت Fahrenheit ويرمز لها بـ °F و المئوية Celsius ويرمز لها بـ °C.

إن القياس العلمي الشائع الاستعمال هو مقياس المئوية - ميزان الحرارة المئوي حيث درجة الصفر تمثل نقطة تجمد الماء ودرجة المائة تمثل نقطة غليان الماء الاعتيادية . أما مقياس الفهرنهايت فان درجة °F ٣٢ تمثل نقطة تجمد الماء ودرجة °F ٢١٢ تمثل درجة غليان الماء الاعتيادية.

وهناك مقياسان لقياس الدرجة الحرارية المطلقة أولهما متدرج من المقياس المئوي وله نفس وحداته ويسمى بمقياس كلفن Kelvin ويرمز لها بـ K وثانيهما متدرج المقياس الفهرنهايت وله نفس وحداته ويسمى بمقياس رانكن Rankine ويرمز لها بـ °R . ويمكن التحويل من وحدة إلى أخرى كما يلي:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + ٢٧٣,١٥$$

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + ٤٥٩,٦٧$$

$$T(^{\circ}R) = ١,٨T(K)$$

$$T(^{\circ}F) = ١,٨T(^{\circ}C) + ٣٢$$

يوجد معاملات أخرى لتحويل درجات الحرارة المختلفة كما يلي:

$$\frac{١,٨^{\circ}C}{١^{\circ}C} , \frac{١,٨^{\circ}R}{١ K} , \frac{١^{\circ}F}{١^{\circ}R} , \frac{١^{\circ}C}{١ K}$$



مثال ٢- ٩

حول  $100^{\circ}\text{C}$  إلى ما يعادلها من وحدات درجة الحرارة الأخرى:

١. K
٢.  $^{\circ}\text{F}$
٣.  $^{\circ}\text{R}$

الحل

$$\begin{aligned} T(\text{K}) &= T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \\ &= 100 + 273,15 = \\ &= 373,15 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T(^{\circ}\text{F}) &= 1,8T(^{\circ}\text{C}) + 32 \\ &= 1,8(100^{\circ}\text{C}) + 32 = 212 \\ &= 212^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T(^{\circ}\text{R}) &= 1,8T(\text{K}) \\ &= 1,8(373,15\text{K}) \\ &= 671,67^{\circ}\text{R} \end{aligned}$$

الضغط (Pressure)

يعرف الضغط (P) بالقوة المسلطة على وحدة المساحات أي:

$$P = F/A \quad (2 \square 10)$$

تعريف هامة

١. الضغط الجوي Atmospheric Pressure: هو ضغط الهواء والجو المحيط بنا والمتغير من يوم إلى آخر.

٢. الضغط البارومتري Barometric Pressure: هو نفس الضغط الجوي ويسمى ضغط بارومتري بسبب استعمال البارومتر لقياسه.

٣. الضغط المطلق Absolute Pressure: هو قياس الضغط الذي يشير إلى فراغ تام (vacuum) أو ضغط صفر.

٤. ضغط المقاس Gauge Pressure: هو الضغط المعبر عنه بالكمية المقاسة من (فوق)

الضغط الجوي (أو لضغط آخر يستعمل كمرجع).

٥. الجو المخلخل من الهواء - فراغ - : هي طريقة التعبير عن الضغط بالكمية الأقل من

الضغط الجوي (أو لضغط آخر يستعمل كمرجع).

ومن وحدات قياس الضغط ما يلي:

$N/m^2$ ,  $dynes/cm^2$ ,  $lb_f/in^2$ ,  $psi$ ,  $pascal$ ,  $ft H_2O$ ,  $atm$ ,  $bar$ ,  $mmHg$

## قياس ضغط الموائع Fluid Pressure Measurement

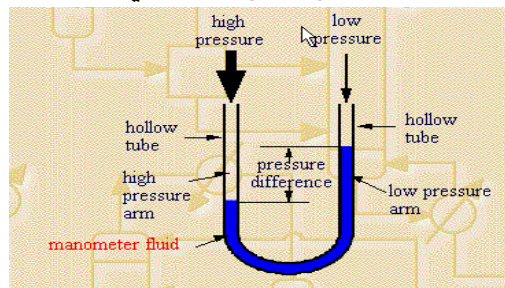
### ١. ساعة بُوردن (Bourdon gauge)

وهي عبارة عن أنبوب مطاطي مغلق من جهة ومثني على شكل حرف C. تعرض النهاية المفتوحة إلى المائع المراد قياس الضغط له. وعندما يزداد الضغط فإن الأنبوب المطاطي يبدأ بالاستطالة مسببا دوران للمؤشر المثبت في الأنبوب. موقع المؤشر على ساعة معايرة يعطي ضغط الساعة للمائع (gauge pressure).



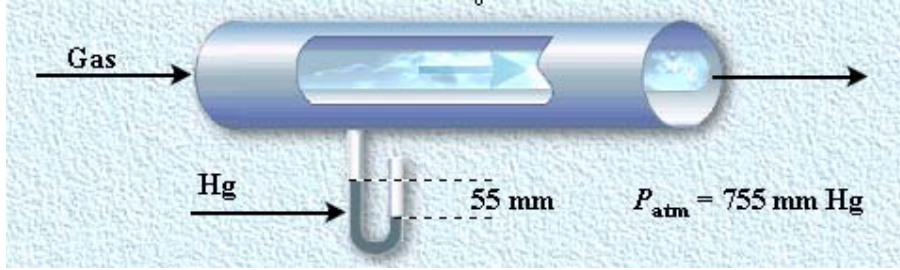
### ٢. المانوميتر Manometer

وهو عبارة عن أنبوب على شكل U مملوء بمائع معلوم الكثافة (يسمى مائع المانوميتر manometer fluid). عندما يتم تعريض نهايتي المانوميتر إلى ضغوط مختلفة، فإن مستوى المائع داخل الأنبوب ينخفض في الساق ذات الضغط العالي بينما يرتفع في الساق ذات الضغط المنخفض. ويمكن حساب الاختلاف في الضغط بواسطة قياس فرق ارتفاع المائع في ساقي المانوميتر



### أ. المانوميتر مفتوح النهاية Open-end Manometer

تعرض احد الساق المانوميتر إلى المائع المراد قياس ضغطه بينما تعرض الساق الأخرى إلى الضغط الجوي (atmospheric pressure).



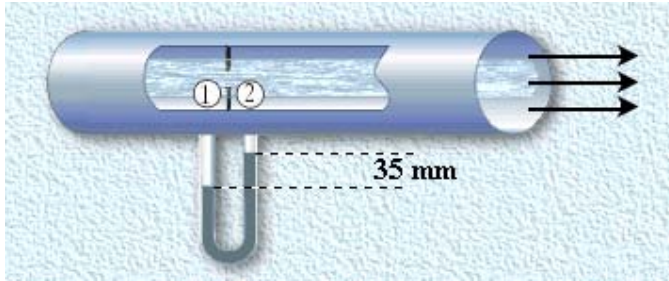
شكل ٢ - ٢: مانوميتر مفتوح النهاية

### ب. المانوميتر مغلق النهاية Seal-end Manometer

ويحتوي على فراغ (vacuum) عند احد نهايتيه.

### ت. المانوميتر التفاضلي Differential Manometer

ويستخدم لقياس الاختلاف في الضغط عند نقطتين في أي عملية.



شكل ٢ - ٣: مانوميتر التفاضلي

قياس الضغط (نسبي أو مطلق) يعتمد على نوعية المقياس المستعمل للقياس. فمثلا المانوميتر مفتوح النهاية (شكل ٢ - ٢) يقرأ الضغط النسبي نسبة إلى الضغط الجوي. و ضغط المرجع في النهاية المفتوحة هو الضغط الجوي. من جهة أخرى غلق نهاية المانوميتر يوليد فراغ مما يسهل علينا مقياسا الضغط مقابل فراغ (Vacuum) كامل أو ضغط معدوم .

إن هذا القياس للضغط يسمى بالضغط المطلق. وقياس الضغط المطلق منسوب إلى جو فارغ تماما وهذا المرجح لا يعتمد على الموقع أو درجة الحرارة أو الضغط الجوي أو أي عوامل أخرى وعليه فإن الضغط المطلق يعطى قيمة دقيقة وغير متغيرة وسهلة المعرفة.

تشير نقطة الصفر لمقياس الضغط المطلق إلى ضغط الفراغ التام بينما في حالة مقياس الضغط النسبي فيشير عادة إلى ضغط الهواء الذي يحيط به في جميع الأوقات وكما هو معروف أن ضغط الهواء الجوي يتغير قليلا من وقت إلى آخر.

إن فهم طريقة العمل الرئيسية للمانوميتر ستساعد على إدراك طبيعة الضغط المقاس به.

ويتذبذب مستوى سطح المائع في ساقى المانوميتر حتى نحصل على نقطة الموازنة للسائل ( Hydrostatic balance ) حيث يستقر السائل في المانوميتر والفرق بين ارتفاع المائع في الساق المفتوحة و الساق المتصلة بمصدر الضغط المطلوب قياسه يساوى الفرق بين الضغط الجوي والضغط المسلط. إذا كان العامل المؤثر للضغط اقل من الضغط الجوي - التفريغ ( Vacuum ) بدل من الضغط - أكثر من الضغط الجوي - والمرتبط بنفس الساق الأخرى، فإن فرق الضغط يساوى الفرق بارتفاع السائل في الساقين.

ويعتبر الماء و الزئبق المائعين الأكثر استعمالا في المانوميتر ويعبر عن القراءة بالبوصات أو بوصات الزئبق أو المليمتر زئبق.

إن مقاييس الضغط قد تكون أكثر إرباكا من مقاييس درجة الحرارة لكون نقطة الصفر بمقاييس الضغط النسبية ليست ثابتة وذلك لاعتمادها على الضغط الجوي المتغير نسبيا من وقت إلى آخر بينما في مقاييس درجة الحرارة فإن درجة الغليان أو درجة التجمد للماء دائما ثابتة القيم والممارسة خير وسيلة للتدريب على مقاييس الضغط .

إن العلاقة بين الضغط النسبي والمطلق يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

الضغط المطلق = الضغط المقاس + الضغط الجوي (الضغط البارومتري)

$$P_{\text{absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{atm}} \quad (2 \square 11)$$

يجب أن تستعمل وحدات ثابتة لجميع الحدود في المعادلة أعلاه ومن الملاحظ في هذه المعادلة أن الضغط الجوي أي الضغط البارومتري يضاف إلى قراءة الضغط المقاس أو الضغط النسبي (أو قراءة الباروميتر ذو النهاية المفتوحة) وذلك للحصول على الضغط المطلق.

إن نظام مقياس تخلخل الضغط شائع الاستعمال في الأجهزة التي تعمل تحت ضغط اقل من الضغط الجوي كما هي الحالة بالنسبة للمبخرات والمرشحات التي تعمل تحت جو مخلخل من الهواء. يجب الملاحظة وعدم الالتباس بين الضغط القياسي وبين الضغط الجوي.. فالضغط القياسي يعرف بالضغط (تحت تأثير قوة الجاذبية القياسية) المكافئ إلى ١٤,٦٩٦ psi أو ٧٦٠ mmHg عند درجة ١٠ °C والقيمة المكافئة بالوحدات الأخرى بينما الضغط الجوي متغير القيمة ويجب الحصول عليه من المانوميتر لكل مرة نحتاجه.

### تعيين فرق الضغط في المانوميتر

لتحديد العلاقة في تعيين فرق الضغط عند اختلاف مستوى السائل في المانوميتر فيجب أن يساوى ضغط السائل في أي نقطتين وفي نفس الارتفاع في السائل المستمر. وتوصف المعادلة العامة للمانوميتر بالشكل الآتي:

$$P_1 + \rho_1 g d_1 = P_2 + \rho_2 g d_2 + \rho_f g h \quad (2 \square 12)$$

- في المانوميتر التفاضلي يكون السائل ١ هو نفسه السائل ٢

وبالتالي تصبح المعادلة ١٢ - ٢ أعلاه:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_f \quad (2 \square 13)$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_f - \rho) g \cdot h \quad (2 \square 14)$$

- إذا كان أحد ساقي المانوميتر مفتوح للهواء الجوي فإن كثافة المائع في هذه الساق اقل بـ ١٠٠٠  $\square$  ١٠٠ مرة من كثافة سائل المانوميتر، لذا فإن  $\rho \cdot g \cdot d$  يمكن أن تهمل في المعادلة العامة للمانوميتر لتصبح المعادلة:

$$P_1 - P_2 = \rho_f \cdot g \cdot h \quad (2 \square 15)$$

- إذا كان كلا المائعين غاز تصبح المعادلة:

$$P_1 - P_2 = h \quad (2 \square 16)$$

## مثال ٢ - ١٠

مانوميتر تفاضلي يستخدم لقياس الانخفاض في الضغط بين نقطتين في أنبوب مياه. الوزن النوعي (S.G.) لمائع المانوميتر هو ١,٠٥. القياسات لكل مائع في كل ساق للمانوميتر معطاة كما هو موضح في الشكل أدناه. احسب الفرق في الضغط بين النقطتين ١ و ٢ .

الحل:

$$h = (382 - 374) \text{ mm} = 8 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} P_1 - P_2 &= (\rho_f - \rho) g \cdot h \\ &= (1,05 - 1,00) \times 980 \times 0,8 \\ &= 39,2 \text{ dynes /cm}^2 \end{aligned}$$

## مثال ٢ - ١١

ضغط الغاز المسحوب خلال أنبوب بواسطة مضخة تفريغ مقاس بمانوميتر زئبقي ذو نهاية مفتوحة وكانت القراءة ٢ in  $\square$  احسب الضغط المقاس بـ inHg ثم احسب الضغط المطلق إذا علمت أن الضغط الجوي يساوي ٣٠ inHg .

الحل

$$\begin{aligned} P_1 - P_{atm} &= \square 2 \text{ inHg} \\ P_1 &= P_{atm} + P_{gaug} \\ &= 30 - 2 = 28 \text{ inHg} \end{aligned}$$

## تمارين

١. احسب :

- الوزن بالـ  $lb_f$  لجسم كتلته  $1b_m$  ٢٥
- الكتلة بالـ  $kg$  لجسم وزنه  $25 N$
- الوزن بالـ  $dyne$  لجسم كتلته  $10 ton$

٢. خزان به سائل طول هذا الخزان  $50 m$  وعرضه  $15 m$  وعمقه  $2 m$  إذا كانت كثافة هذا السائل  $58 lb_m/ft^3$  فاحسب محتوى الخزان بالـ  $lb_f$

٣. احسب الكثافة للزئبق بالـ  $lb_m/ft^3$  إذا علمت أن الوزن النوعي للزئبق هو  $13.546$  عند  $20^\circ C$  ثم احسب الحجم بالـ  $ft^3$  لـ  $215 kg$  زئبق

٤. احسب الحجم النوعي للزئبق في السؤال الثالث .

٥. خليط مكون من مجموعة غازات وكان الكسر الكتلي لكل غاز من هذه الغازات هي على النحو التالي :

$$O_2 = 16 \%$$

$$CO = 4,0 \%$$

$$CO_2 = 17 \%$$

$$N_2 = 63 \%$$

احسب الكسر المولي للخليط.

٦. حول درجات الحرارة التالية :

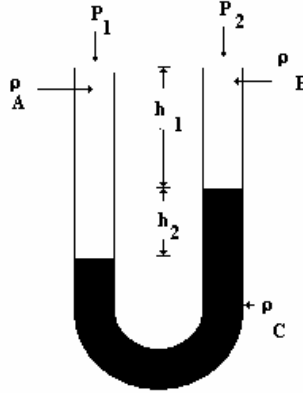
$$\bullet \quad 85^\circ F \quad \text{إلى} \quad R$$

$$\bullet \quad 40^\circ C \quad \text{إلى} \quad K$$

$$\bullet \quad 85^\circ F \quad \text{إلى} \quad C$$

$$\bullet \quad 10^\circ C \quad \text{إلى} \quad F$$

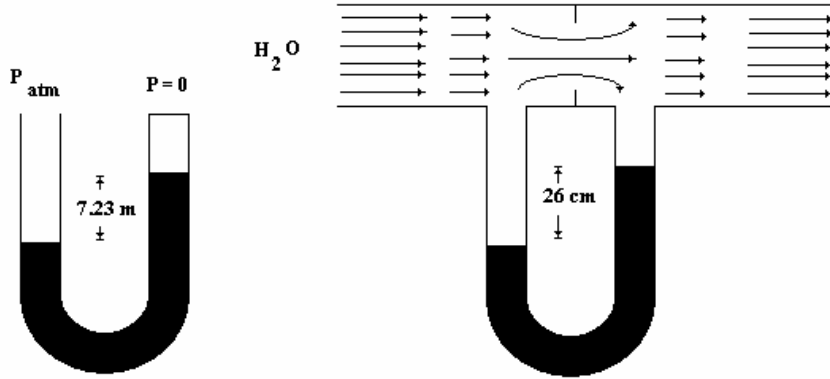
٧. ثلاث سوائل مختلفة في المانوميتر الموضح أدناه:



- اشتق العلاقة التي تبين فرق الضغط  $P_1 - P_2$  متضمنة  $\rho_B$ ،  $\rho_A$ ،  $h_1$ ،  $h_2$ ،  $\rho_C$
- افترض أن المائع A هو الميثانول والمائع B هو الماء و C هو مائع المانوميتر وان الوزن النوعي للمائع المانوميتر هو ١,٣٧ و  $P_2$  هو ١٢١ kPa و  $h_1$  هو ٣٠ cm و  $h_2$  هو ٢٤ cm احسب  $P_1$  بال kPa



٨. سائل مجهول الكثافة يستخدم في مانومتريين مانوميتر الأول أحد ساقيه مغلقه والمانوميتر الثاني متصل بأنبوب من نوع اروفيس الضغط الباروميترى قرىء خلال يوم وكان  $756 \text{ mmHg}$  احسب فرق الضغط بال  $\text{mmHg}$  من النقطة a الى النقطة b .



## أسس الهندسة الكيميائية

### موازنات المادة

موازنات المادة

١



## الجدارة

فهم أساسيات الحسابات الكيميائية للسهر على التشغيل الكفاء لأجهزة الإنتاج في الصناعة ،  
المحافظة على الطاقة وإدراك الأسباب الكامنة وراء مشاكل التصنيع.

## الأهداف

في نهاية هذا المقرر يكون الطالب قادرا على:

- ١ - فهم مبدأ موازنات المادة،
- ٢ - تطبيق قواعد الموازنة بطريقة مرتبة و سهلة و الحصول على خبرة واسعة لحل المسائل بطريقة علمية .

## مستوى الأداء المطلوب

أن لا تقل الجدارة عن ٩٥ ٪ نظرا لأهمية المقرر فيما بعد.

## الوقت المتوقع للتدريب

من ١٠ إلى ١٥ ساعات اتصال.

## الوسائل المساعدة

اعتمادا الطريقة المتبعة في المقرر لحل المسائل.

## متطلبات الجدارة

قبل دراسة هذا المقرر يجب أن يكون الطالب ملما بالعلوم التالية:

الكيمياء العامة

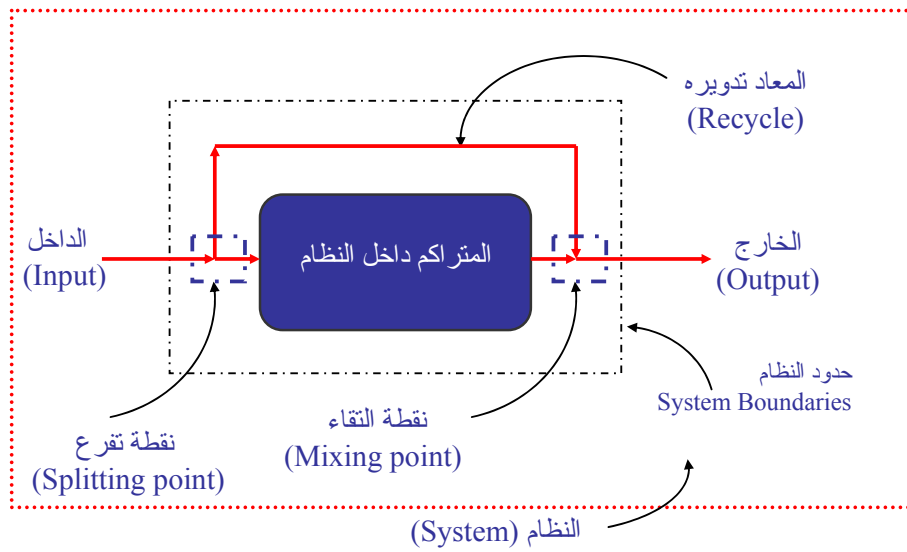
الكيمياء الفيزيائية

الديناميكا الحرارية الكيميائية

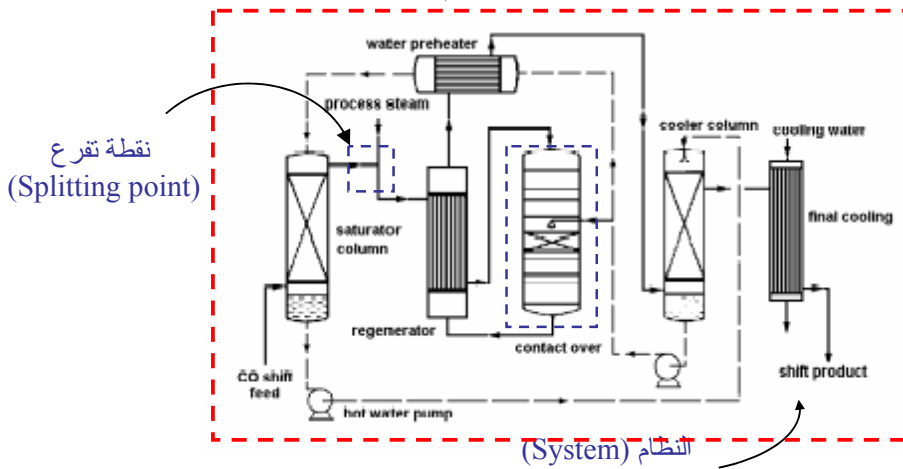
الرياضيات الأساسية

## موازنات المادة (Mass Balances)

يطلق على اي عملية (عمليات) كيميائية او فيزيائية نظام (System). ولكل نظام يوجد: داخل او تغذية (Feed or input) (المواد المتفاعلة في حالة التفاعلات الكيميائية)، خارج (Product or output) (المواد الناتجة من التفاعل)، متراكم داخل النظام (Accumulation) (وهو ماتبقى داخل النظام)، حدود النظام (System boundaries) (يعين حدود انتقال المادة او الطاقة من والى النظام) كما هو مبين في الشكل ٣ - ١.



الشكل ٣ - ١: مكونات النظام و مصطلحاته



الشكل ٣ - ٢: حدود النظام لعملية كيميائية

ويمكن تطبيق هذه المصطلحات على رسم انسيابي (flowchart) لعملية كيميائية كما هو مبين في الشكل ٣ - ٢.

ويوجد ضوابط لا يستطيع احد تجاهلها عند تصميم (Design) وحدة عمليات جديدة أو فحص وتحسين (Optimizing) وحدة قائمة. فمثلا فإننا لا يمكن تحديد كمية الداخل من مادة A إلى مفاعل ما ب g ٥٠٠ ثم نتوقع أن نحصل على g ١٠٠٠ من A أو الناتج B.

مثال آخر يوضح توازن المادة، فإذا فترضنا انه يتم حرق فحم - في فرن محطة توليد طاقة يوميا - يحتوي على kg ٢٠٠٠ من الكبريت (S)، فإننا نعلم - وبدون تحليل غازات المدخنة (Stack gases) أو الرماد الناتج من عملية الحرق - أن متوسط كمية الكبريت التي تغادر الفرن بشكل أو بآخر في اليوم هي kg ٢٠٠٠.

إن المرجع في الاستنتاجات أعلاه هو قانون حفظ المادة و الطاقة (الداخل للنظام يجب ان يخرج من النظام أو يتراكم فيه) والذي يعتبر قاعدة أساسية لكثير من القوانين في ميدان العلوم و الهندسة. أخذ هذا القانون البسيط أشكالا عدة منها:

أ - أن الكتلة أو الطاقة لا تستحدث و لا تفتنى.

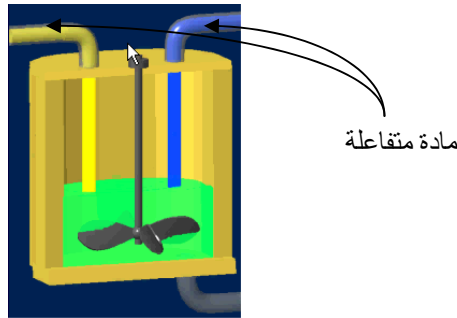
ب - أن الكتلة أو الطاقة - لأي نظام معزول (Isolated System) - ثابتة.

### تصنيف العمليات

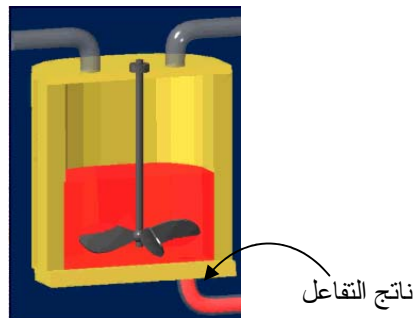
يمكن تصنيف العمليات الكيميائية والفيزيائية إلى:

#### العملية المتقطعة (Batch Process):

هي العملية التي تكون فيها التغذية الداخلة (Feed) في البداية و يبقى خلالها صمام الخارج مغلق إلى نهاية العملية و تفريغ المنتج (Product) كما هو موضح في الشكل ٣-٣. والسبب في إطلاق اسم متقطع على هذا النوع من العمليات هو عدم وجد انتقال للمادة من خلال حدود النظام أثناء حدوث العملية. وتستخدم عندما تكون الكمية المطلوب إنتاجها قليلة.



شكل ٣-٣: العملية المتقطعة (أ) قبل التفاعل يفتح صمام الدخول للمواد المتفاعلة (اللون الأصفر الأزرق).



شكل ٣-٣: العملية المتقطعة (ب) بعد التفاعل يفتح صمام الخروج للحصول على المنتج (اللون الأحمر).

#### العملية المستمرة (Continuous Process):

هي العملية التي يكون فيها سريان الداخل والخارج مستمر خلال حدوث العملية كما هو موضح في الشكل ٣-٤. وتستخدم عندما يكون المطلوب هو إنتاج كميات كبيرة.



شكل ٣ -٤: العملية المستمرة: تكون صمامات الدخول و الخروج أثناء التفاعل مفتوحة.

العملية شبه المتقطعة (Semibatch):

وهي العملية التي لا يمكن تصنيفها على أنها متقطعة أو مستمرة.



شكل ٣ -٥: العملية شبه المتقطعة (أ) قبل التفاعل يفتح صمام الدخول للمادة المتفاعلة الأولى

(اللون والأزرق).



شكل ٣ -٥: العملية شبه المتقطعة (ب) قبل التفاعل يفتح صمام الدخول للمادة المتفاعلة الثانية

(اللون والأصفر).



شكل ٣ - ٥: العملية شبه المتقطعة (ج) بعد التفاعل يفتح صمام الخروج للناتج (اللون والأحمر).

### الحالة مستقرة (Steady-state) :

عندما تكون متغيرات العملية (درجة الحرارة، الضغط، الحجم، التركيز، معدل السريان الخ) ثابتة مع الوقت تسمى العملية مستقرة، وهي عادة تتحقق أثناء العمليات المستمر.

### و الحالة انتقالية (Transient) :

عندما يحدث تغيير في أحد متغيرات العملية (درجة الحرارة، الضغط، الحجم، التركيز، معدل السريان الخ) تسمى العملية انتقالية أو غير مستقرة (Unsteady-state)، وتحدث أثناء العمليات المتقطعة وشبه المتقطعة وعند بدء التشغيل (Start-up) للعمليات المستمرة.

### معادلة الموازنة العامة (The General Balance Equation)

موازنة المادة هي حساب انتقال الكتلة والتغيرات في خزين الكتلة داخل أي نظام (System) على إثر أي عملية فيزيائية أو كيميائية:

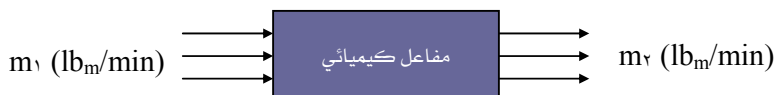
فلو فرضنا أن مادة A لها الكتلة  $m_1$  ( $lb_m/min$ ) تغذى إلى مفاعل كيميائي (Chemical Reactor) وتخرج منها بكتلة  $m_2$  ( $lb_m/min$ ) ، فإنه يلزم في الحالة المستقرة أن تكون  $m_1$  تساوي  $m_2$  أما في الحالة غير المستقرة فإن  $m_1$  لا تساوي  $m_2$  ويكون هذا الاختلاف راجع إما إلى:

١. وجود تسرب في المفاعل أو خطوط التغذية والخروج.

٢. خطأ أثناء قياس  $m_1$  أو  $m_2$ .

٣. استهلاك أو إنتاج المادة A أثناء التفاعل.

٤. تراكم المادة A داخل المفاعل.





فإذا تم استبعاد السبب الأول والثاني، فإن الاحتمالات الأخرى تصبح هي الأسباب الحقيقية في الاختلاف بين معدلات السريان الداخلة والخارجة.

وبالتالي يمكن كتابة معادلة الموازنة العامة لأي نظام كما يلي:

$$\begin{array}{rcccl} \text{تراكم} & \text{مجموع} & & & \\ \text{الكتلة} & \text{الكتلة} & & & \\ \text{الداخل} & \text{الداخلة إلى} & = & & \\ \text{النظام} & \text{النظام} & & & \\ \text{مجموع الكتلة} & \text{مجموع الكتلة} & & & \\ \text{الخارجة من} & \text{الكتلة المنتجة} & + & \text{مجموع الكتلة} & \\ \text{النظام} & \text{داخل النظام} & & \text{الداخلة إلى} & \\ \text{النظام} & \text{النظام} & & \text{النظام} & \\ \text{المستهلكة} & \text{المستهلكة} & - & \text{المستهلكة} & \\ \text{(1)} & \text{(1)} & & \text{(1)} & \end{array}$$

وعندما لا يكون هناك إنتاج أو استهلاك للكتلة داخل النظام وعندما تكون العملية في الحالة المستقرة (Steady-state)، فإن معادلة الموازنة العامة (١) يمكن كتابتها كما يلي:

$$\text{مجموع الكتلة الداخلة} = \text{مجموع الكتلة الخارجة من النظام} \quad (2)$$

و يمكن توضيح معنى كل حد في المعادلة (١) في المثال التالي.

مثال ٣ - ١:

إذا كان سنويا ينزح إلى مدينة ما خمسون ألف (٥٠,٠٠٠) نسمة ويغادرها سبعة وخمسون ألف (٥٧,٠٠٠) نسمة ويولد فيها اثنان وعشرون ألف (٢٢,٠٠٠) نسمة ويموت فيها تسعة عشر ألف (١٩,٠٠٠) نسمة، احسب معدل الزيادة أو النقصان في تعداد سكان المدينة سنويا.

**الحل:**

لنرمز للسكان بـ  $A$ .

$$(3) \quad 50,000 \text{ (A/yr)} + 22,000 \text{ (A/yr)} - 75,000 \text{ (A/yr)} = 19,000 \text{ (A/yr)} = X$$

إذن:

$$X = \square 22,000 \text{ A/yr}$$

أي أن المدينة تفقد ٢٢,٠٠٠ ألف نسمة سنويا من تعداد سكانها.

**خطوات إجراء موازنة المادة:**

ولتسهيل إجراء موازنة المادة فإنه ينصح بإتباع الخطوات التالية:

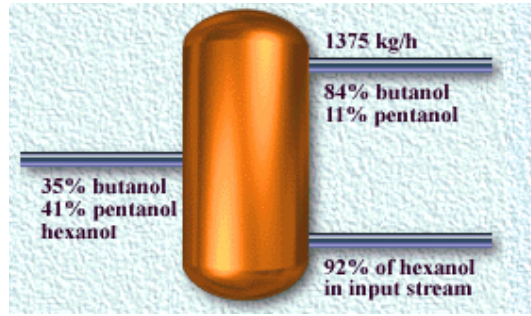
١. رسم مخطط انسيابي للعملية المراد عمل موازنة المادة لها، يوضح عليه كمية الداخل والخارج من كل وحدة في العملية.
٢. كتابة متغيرات العملية الفيزيائية والكيميائية والمعلومات المتوفرة (مثل درجة الحرارة، الضغط، التركيز... الخ) عن كل تيار (Stream) من تيارات الداخل (Input) أو الخارج (Output) أو المعاد تدويره (Recycle).
٣. اختيار أساس (Basis) للحسابات.
٤. رسم صندوق ذو خطوط متقطعة (يسمى الحدود، Boundaries) حول كل وحدة (Unit) ونقطة التقاء تيارات (Mixing point) و تفرع تيار (Splitting point) و حول العملية كاملة (Overall process).
٥. إيجاد معادلات تبين العلاقة بين الداخل والخارج من الصندوق. هذه المعادلات يجب أن تكون مستقلة (Independent equations) وهي المعادلة التي لا يمكن الحصول عليها من طرح أو جمع أو قسمة المعادلات الأخرى. كما يجب أن يكون عدد المعادلات المستقلة مساويا لعدد المجهول (Unknowns) داخل الصندوق المراد إجراء موازنة المادة عنده.

**مثال ٢ - ٢:**

افترض أن خليطا من الكحول يحتوي على ٣٥% بيوتانول (B) و ٤١% بينتانول (P) و الباقي هيكتانول (H). تيار (stream) من هذا الخليط يغذى إلى برج تقطير (Distillation column). المنتج المسحوب - بمعدل سريان ١٣٧٥ kg/h - من أعلى البرج يحتوي على ٨٤% من البيوتانول (B) و ١١% من البينتانول (P) والباقي (H). المنتج المسحوب من قاع البرج يحتوي على ٩٢% من الهيكتانول الداخل للبرج. ارسم مخطط السريان لهذه العملية موضحا عليه متغيرات جميع التيارات الداخلة والخارجة.

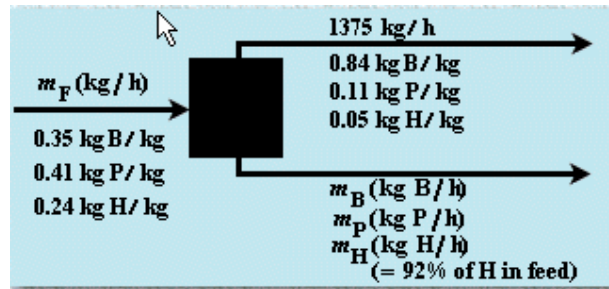
## الجل

- نقوم أولاً برسم العملية كبرج تقطير ووضعنا المعلومات المعطاة في السؤال فقط كما في الشكل ٣ - ٦.



شكل ٣ - ٦

- نقوم الآن برسم المخطط الانسيابي للعملية (flowchart) كما في الشكل ٣ - ٧.



شكل ٣ - ٧

مثال ٣ - ٢:

محلول ملحي يحتوي على:

$$\text{NaCl} = 20\%, \text{NaBr} = 0.5\%, \text{MgCl}_2 = 2\%, \text{H}_2\text{O} = 77.5\%$$

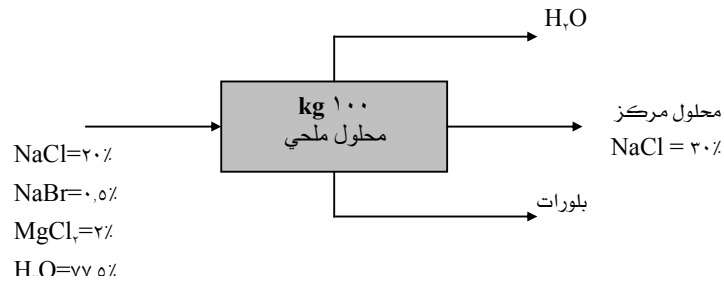
وعلى اثر عملية تبخير تم فصل بلورات نقية تمثل 50% من الكمية الأصلية لـ NaCl الموجود أصلاً في المحلول الملحي. على فرض أن الأساس في البداية هو 100 kg من المحلول أوجد ما يلي:

أ - مجموع كتل NaCl في المحلول المركز و البلورات.

ب - كتلة MgCl<sub>2</sub> في المحلول المركز بعد التبخير.

ت - كتلة NaBr في المحلول المركز بعد التبخير.

- ث - كتلة  $H_2O$  في المحلول المركز بعد التبخير.
- ج - كتلة (الماء المتبخر، كتل  $NaCl$  المبلور، المحلول الملحي المركز).
- ح - نسبة الماء المتبخر من مجموع الماء الموجود في المحلول.
- خ - إذا تم فصل جميع الماء الموجود في المحلول المركز، ما هو تركيب خليط الأملاح؟



شكل ٣ - ٨: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٢.

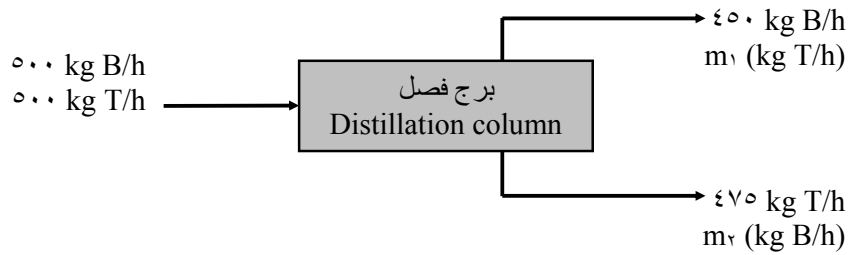
الحل:

- أ. كتلة  $NaCl$  في المحلول الملحي:  $20 \text{ kg} = 100 \times 0.20$
- $NaCl$  المتبلور:  $10 \text{ kg} = 0.50 \times 20$
- $NaCl$  في المحلول الملحي المركز:  $10 \text{ kg} = 20 - 10$
- إذن: مجموع  $NaCl$  في المحلول المركز والبلورات:  $20 \text{ kg} = 10 + 10$
- كتلة المحلول الملحي المركز:  $30 \text{ kg} = 100 \times 0.30$
- ب. كتلة  $MgCl_2$  في المحلول الملحي المركز:  $2 \text{ kg} = 100 \times 0.02$
- ت. كتلة  $NaBr$  في المحلول الملحي المركز:  $0.5 \text{ kg} = 100 \times 0.005$
- ث. كتلة  $H_2O$  في المحلول الملحي المركز:  $17.5 \text{ kg} = (10 + 2 + 0.5) \times 30$
- ج. كتلة (الماء المتبخر +  $NaCl$  المبلور + المحلول الملحي المركز):  $100 \text{ kg} = 60 + 10 + 30$
- ح. كتلة الماء المتبخر:  $60 \text{ kg} = 77.5 - 17.5$
- نسبة الماء المتبخر من مجموع الماء الموجود في المحلول:  $77.4 \% = 100 \times (60 / 77.5)$
- خ. بعد فصل جميع الماء الموجود في المحلول المركز سيصبح تركيب الخليط كالتالي:
- $NaCl = 10 \text{ kg}$
- $MgCl_2 = 2 \text{ kg}$

$$\text{NaBr} = ٠,٥ \text{ Kg}$$

مثال ٣ - ٣:

يتم فصل خليط (١٠٠٠ kg/h) مكون من ٥٠٪ البنزين (B) و ٥٠٪ التولوين (T). إذا كان معدل السريان ألكتلي للبنزين الناتج من أعلى برج الفصل يساوي ٤٥٠ kg/h ومعدل السريان ألكتلي للتولوين في أسفل البرج يساوي ٤٧٥ kg/h والعملية في الحالة المستقرة (steady-state)، اكتب معادلات الموازنة للبنزين والتولوين ثم احسب معدلات السريان المجهولة.



شكل ٣ - ٩: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٣.

بما أن العملية في الحالة المستقرة وليس هناك تفاعل كيميائي، فإنه لا يوجد تراكم أو إنتاج أو استهلاك لأي مادة داخل النظام وبالتالي فإن:

$$\text{الداخل (input) = الخارج (output)}$$

أ. موازنة البنزين:

$$٥٠٠ \text{ kg B/h} = ٤٥٠ \text{ kg B/h} + m_٢$$

$$m_٢ = ٥٠ \text{ kg B/h}$$

ب. موازنة التولوين:

$$٥٠٠ \text{ kg T/h} = m_١ + ٤٧٥ \text{ kg T/h}$$

$$m_١ = ٢٥ \text{ kg T/h}$$

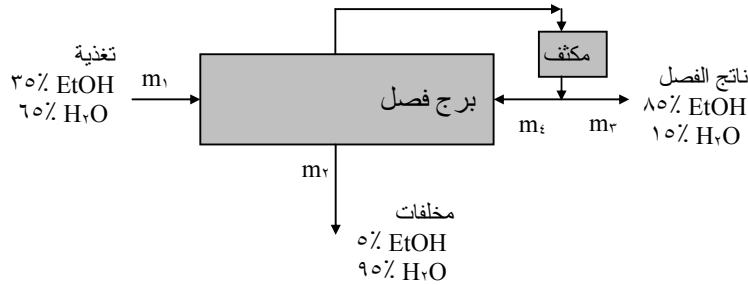
تأكيد الحسابات

$$١٠٠٠ \text{ kg/h} = (٤٥٠ + m_١ + m_٢ + ٤٧٥ \text{ kg/h})$$

$$١٠٠٠ \text{ kg/h} = ١٠٠٠ \text{ kg/h}$$

مثال ٣ - ٤:

من الشكل أدناه لبرج فصل، احسب كتلة ناتج الفصل بـ kg لكل كيلوجرام تغذية و لكل كيلو جرام مخلفات.



شكل ٣ - ١٠: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٤.

الحل:

نلاحظ أن جميع التراكيب معروفة ولكن معدل السريان الكتلي لكل تيار مجهولة.

الأساس: التغذية ( feed ) :  $m_1 = 100 \text{ kg/h}$

بما أنه لا يوجد تفاعل

إذن: الكتلة الداخلة = الكتلة الخارجة

أ. موازنة إجمالية:  $100 = m_2 + m_3$

ب. موازنة على EtOH:  $0,35 \times 100 = 0,85 m_2 + 0,05 m_3$

ت. موازنة على H<sub>2</sub>O:  $0,65 \times 100 = 0,15 m_2 + 0,95 m_3$

نستطيع حساب  $m_2$  و  $m_3$  من المعادلتين (أ) و (ب):

حيث سنحصل على:

$$m_2 = 37,5 \text{ kg/h}$$

$$m_3 = 62,5 \text{ kg/h}$$

$$m_2/m_1 = 0,375 \text{ kg/kg feed}$$

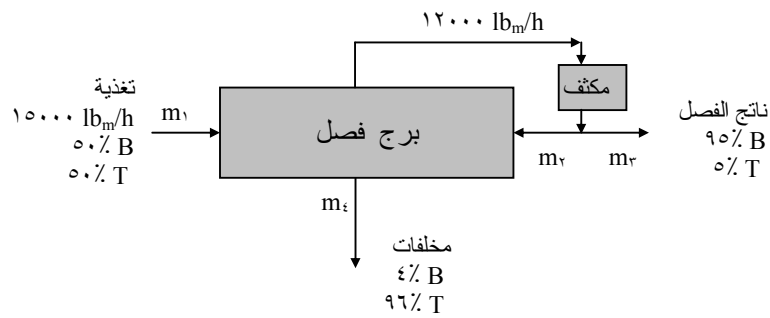
$$m_3/m_1 = 0,625 \text{ kg/kg feed}$$

$$m_2/m_3 = 0,60$$

مثال ٣ - ٥:

يتم فصل خليط مركب من ٥٠% بنزين (B) و ٥٠% تلوين (T) في عمود فصل. الناتج من أعلى العمود (the overhead product) يحتوي على ٩٥% بنزين (B)، بينما يحتوي الناتج من أسفل العمود (the bottom product) على ٩٦% تلوين (T).

إذا كان معدل السريان الكتلي للتغذية يساوي ١٥٠٠٠ lb<sub>m</sub>/h ومعدل البخار الداخل إلى المكثف يساوي ١٢٠٠٠ lb<sub>m</sub>/h حيث يتم استرجاع جزء من ناتج التقطير إلى العمود كسائل معاد و الباقي يسحب للاستعمال في مكان آخر، أوجد نسبة السائل المعاد إلى ناتج التقطير المسحوب .



شكل رسم ٣ - ١١: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٥.

الحل:

الأساس:

التغذية ١٥٠٠٠ lb<sub>m</sub>/h

عدد المجاهيل: ثلاثة وهي  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$

نحتاج إذن إلى ثلاث معادلات لإيجاد المجاهيل:

أ. موازنة إجمالية على العمود:

$$m_1 = m_2 + m_3$$

ب. موازنة إجمالية (قبل المكثف):

$$m_1 + m_4 = 12000 + m_2$$

$$m_3 - m_4 = 3000$$

ت. موازنة على بنزين (قبل المكثف):

$$3900 \text{ lb}_m/\text{h} = 0.95 m_2 - 0.05 m_3 = (0.95 \times 12000) \text{ lb}_m/\text{h} - (0.05 \times 15000) \text{ lb}_m/\text{h}$$

$$m_3 = 7263.2 \text{ lb}_m/\text{h}$$

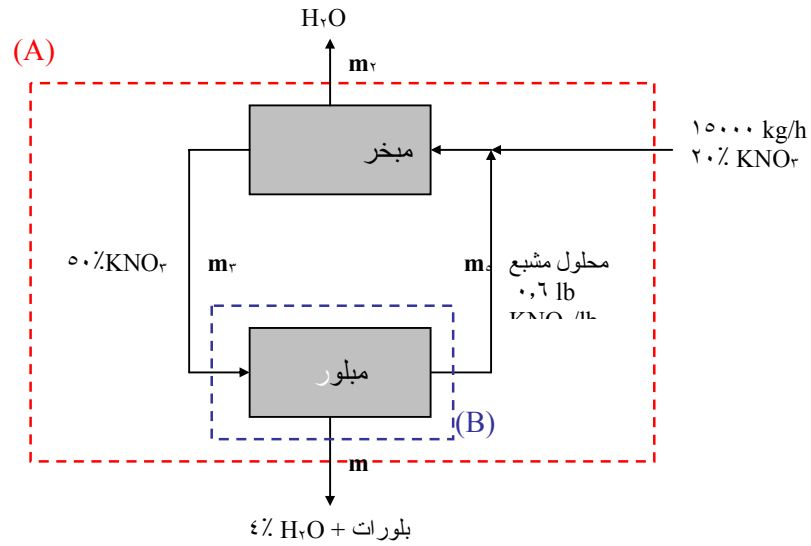
$$m_v = 4263,2 \text{ lb}_m/\text{h}$$

$$m_r = 7736,8 \text{ lb}_m/\text{h}$$

$$m_v/m_r = 0,55$$

مثال ٣ - ٦:

اعتمادا على المعلومات المعطاة في الشكل أسفل قم بأداء موازنة المادة وحساب معدلات السريان المجهولة ( $m_v$ ,  $m_r$ ,  $m_i$ ,  $m_o$ ).



شكل ٣ - ١٢: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٦.

الحل:

نبدأ بحساب معدل سريان تيار إعادة الدوران ( $m_o$ ) والذي يحوي على 1.6 lb  $\text{KNO}_3$  لكل lb من الماء (أي ان المجموع يساوي 1.6 lb) حيث يمكن حساب الكسر الكتلي لكل من  $\text{KNO}_3$  والماء كالتالي:

$$0.375 = \frac{0.6}{1.6} = x_{\text{KNO}_3}$$

$$0.625 = \frac{1}{1.6} = x_{\text{H}_2\text{O}}$$

لحساب  $m_i$  و  $m_r$  سنقوم:

أ. بموازنة كلية حول النظام (المربع الأحمر A)

$$(1) \quad 15000 = m_i + m_r$$



ب. موازنة على  $KNO_3$  :

(٢)

$$0,2 \times 15000 = 0,96 \times m_i$$

بعد حل المعادلة (١) و (٢) أنيا:

$$\text{إذن: } 3125 \text{ lb/h} = m_i$$

$$11875 \text{ lb/h} = m_r$$

لحساب  $m_r$  سنقوم بموازنة حول المبلور (المربع الأزرق B):

(٣)

$$m_r = m_i + m_o$$

موازنة  $KNO_3$  حول المبلور:

(٤)

$$0,5 m_r = 0,96 m_i + 0,375 m_o$$

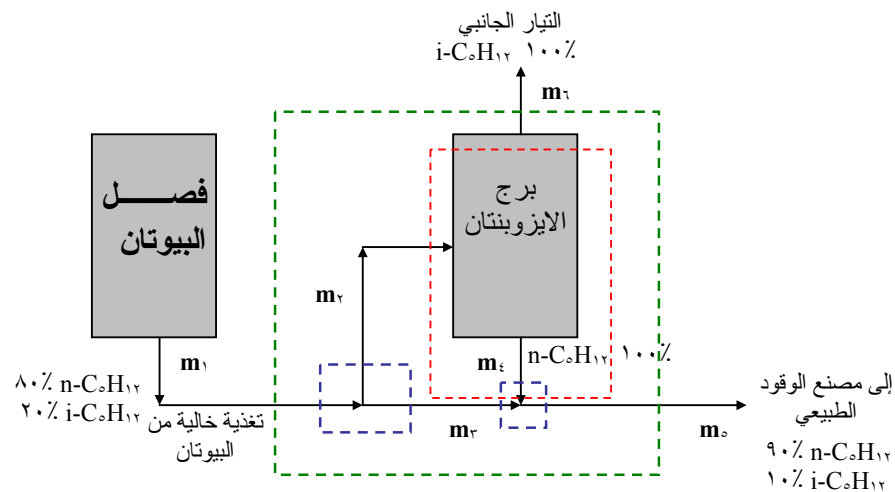
بعد حل المعادلة (٣) و (٤) أنيا:

$$\text{إذن: } m_r = 4768 \text{ lb/h}$$

$$m_o = 1643 \text{ lb/h}$$

مثال ٣ - ٧:

أثناء عملية تحضير المواد الخام في مصنع إنتاج الوقود الطبيعي يتم فصل الايزوبنتان ( $i-C_5H_{12}$ ) من البنتان العادي ( $n-C_5H_{12}$ ) وذلك كما هو مبين في الشكل أسفل. احسب معدلات السريان المجهولة.



شكل ٣ - ١٣: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٧.

الحل:

$$m_1 = 100 \text{ kg/h} \quad \text{الأساس: نفرض}$$

يمكن كتابة المعادلات التالية بعد القيام بموازنة كلية (المربع الأخضر):

$$(5) \quad 100 \text{ kg/h} = m_0 + m_1$$

موازنة كلية لـ  $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$ :

$$(6) \quad 0.8 (100 \text{ kg/h}) = 0.9 (m_0)$$

إذن:

$$m_0 = 89 \text{ kg/h}$$

$$m_1 = 11 \text{ kg/h}$$

موازنة حول برج الايزوبنتان (المربع الأحمر):

$$(7) \quad m_2 = m_3 + 11 \text{ kg/h}$$

موازنة  $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$  حول برج الايزوبنتان:

$$(8) \quad 0.8 (m_2) = m_3$$

إذن:

$$m_2 = 55 \text{ kg/h}$$

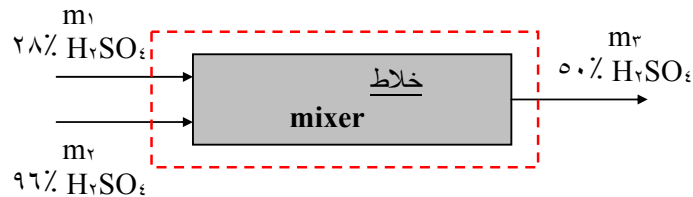
$$m_3 = 44 \text{ kg/h}$$

$$m_4 = 44 \text{ kg/h}$$

مثال ٣ - ٨:

يتم تحضير محلول تركيزه % ٦٠ من حامض الكبريتيك ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) بواسطة خلط محلول  $\text{H}_2\text{SO}_4$  تركيزه % ٢٨ و آخر تركيزه % ٩٦. احسب كتلة الحامض المضاف؟

الحل:



شكل ٣ - ١٤: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٨.

الأساس: نفرض  $100 \text{ g/min}$  من حامض  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ٢٨٪

جميع التراكيب معروفة

لدين مجهولين:  $m_1$  و  $m_2$  ومركبين هما الماء و الحامض أي يمكن القيام بموازنتين:

أ. موازنة كلية (المربع الأحمر):

$$(9) \quad 100 = m_1 + m_2$$

ب. موازنة على الماء:

$$(10) \quad (0,72 \times 100) \text{g/min} + 0,04 (m_1) = 0,50 (m_2)$$

بعد حل المعادلات (٩) و (١٠) نجد أن:

$$m_1 = 47,83 \text{ g/min}$$

$$m_2 = 147,83 \text{ g/min}$$

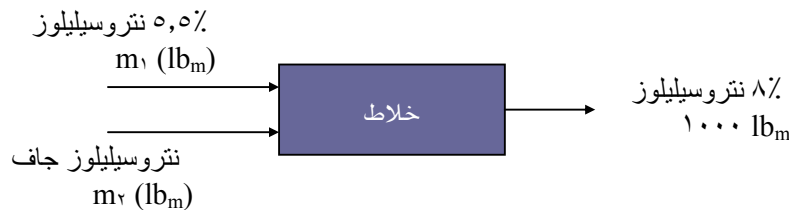
مثال ٣ - ٩:

ما هي كتلة النتروسيليلوز الجاف الواجب إضافتها إلى محلول تركيزه ٥,٥ % من نفس المركب

لتحضير  $1000 \text{ lb}$  من النتروسيليلوز بتركيز ٨٪.

الحل:

الرسم التخطيطي للعملية كما يلي:



شكل ٣ - ١٥: رسم انسيابي لمثال ٣ - ٩.

الأساس:  $1000 \text{ lb}$  من ٨٪ النتروسيليلوز.

لدينا مجهولين هما  $m_1$  و  $m_2$  ومركبين هما النتروسيليلوز و الماء.

إذن يمكن القيام بموازنتين:

أ. موازنة كلية (إجمالية):

$$(11) \quad m_1 + m_2 = 1000 \text{ lb}_m$$

ب. موازنة على الماء:

$$(12) \quad 0,945 (m_1) = 0,92 \times 1000 \text{ lb}_m$$

بحل المعادلتين (11) و (12)، إذن:

$$m_1 = 973,5 \text{ lb}_m$$

$$m_2 = 26,5 \text{ lb}_m$$

مثال ٣ - ١٠:

اعتمادا على المعطيات المبينة في الشكل أسفل، احسب معدلي السريان  $m_1$  و  $m_2$ .



شكل ٣ - ١٦: رسم انسيابي لمثال ٣ - ١٠.

الحل:

الأساس:  $100 \text{ g/s}$  من المحلول الملحي المنتج.

عدد المجهول اثنين ( $m_1, m_2$ )

أ. موازنة كلية:

$$(13) \quad m_1 + m_2 = 100 \text{ g/s}$$

ب. موازنة على الملح:

$$(14) \quad 0,05 m_2 + 0 m_1 = (0,62 \text{ g/s})$$

بحل المعدلتين (13) و (14)، إذن:

$$m_1 = 87,6 \text{ g/s}$$

$$m_2 = 12,4 \text{ g/s}$$

مثال ٣- ١١:

- تمت إذابة ١٢٠٠ lb من  $Ba(NO_3)_2$  عند  $90^\circ C$  في كمية كافية من الماء للحصول على محلول مشبع، ثم يبرد المحلول إلى  $20^\circ C$  حيث أن القابلية للذوبان عند هذه الدرجة تساوي  $8.6 \text{ g}/1000 \text{ g H}_2\text{O}$ .
- أ. احسب كتلة الماء اللازمة لإذابة  $Ba(NO_3)_2$  عند  $90^\circ C$ ، و كتلة البلورات الناتجة عند  $20^\circ C$
- ب. احسب كتلة الماء اللازمة لإذابة  $Ba(NO_3)_2$  عند  $90^\circ C$ ، و كتلة البلورات الناتجة عند  $20^\circ C$ ، بفرض استعمال أكثر من ١٠% ماء مما نحتاجه لمحلول مشبع عند  $90^\circ C$
- ت. احسب كتلة الماء اللازمة لإذابة  $Ba(NO_3)_2$  عند  $90^\circ C$ ، و كتلة البلورات الناتجة عند  $20^\circ C$ ، بفرض أن ٥% من الماء يتبخر بالتبريد و أن البلورات تحمل معها محلولاً مشبعاً بكمية مساوية لـ ٥% من كتلتها عند الجفاف؟

الحل:

الأساس: ١٢٠٠ lb من  $Ba(NO_3)_2$ جدول خواص الإذابة لـ  $Ba(NO_3)_2$ .

درجة الحرارة ( $^\circ C$ )	الإذابة ( lb/100 lb H <sub>2</sub> O )
٩٠	٣٠,٦
٢٠	٨,٦

أ. لإذابة ١٢٠٠ lb في الماء نحتاج إلى:

$$(15) \quad 100 \times (1200/30.6) = 3921.6 \text{ lb H}_2\text{O}$$

كتلة الملح المذابة لمحلول مشبع يحتوي على ٣٩٢١,٥٧ lb ماء و عند  $20^\circ C$ :

$$(16) \quad 8.6 \times (3921.6/100) = 337.21 \text{ lb}$$

كتلة البلورات الناتجة:

$$(17) \quad 1200 - 337.21 = 862.79 \text{ lb}$$

ب. كتلة الماء بحالة الإشباع ١١٠% و عند  $90^\circ C$ .

$$(18) \quad 1.1 \times 3921.6 = 4313.73 \text{ lb}$$

كتلة الملح المذابة لمحلول مشبع يحتوي على ٤٣١٣,٧٣ lb ماء و عند  $20^\circ C$ :

$$(19) \quad 8.6 \times (4313.73/100) = 371 \text{ lb}$$

كتلة البلورات الناتجة:

$$(20) \quad 1200 - 371 = 829 \text{ lb}$$

ت. كتلة الماء في الملح المبلور:

$$(21) \quad 0,05 \times 862,74 = 44 \text{ lb}$$

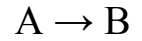
كتلة الماء اللازم:

$$(22) \quad 3921,6 \times 1,05 + 44 = 4161 \text{ lb}$$

إعادة التدوير (Recycle)

يندر أن يتم التفاعل التالي بشكل كامل في المفاعل الكيميائي (أي تتحول جميع المواد المتفاعلة

إلى نواتج):



وبغض النظر عن قلة كمية المادة A أو طول فترة مكوثها في المفاعل، فإن جزء من المادة A سيخرج مع المنتج. لذا فلا بد من إيجاد وسيلة لفصل المادة A عن المنتج إذا أردنا أن نبيع منتج عالي النقاوة ومن ثم إعادة تدوير (recycle) هذا الجزء من المادة A إلى المفاعل.

بالإضافة للسبب أعلاه فإنه يُحتاج إلى إعادة التدوير جزء في العمليات الكيميائية في الحالات التالية:

### ١. استعادة العامل الحفاز (Recovery of catalyst)

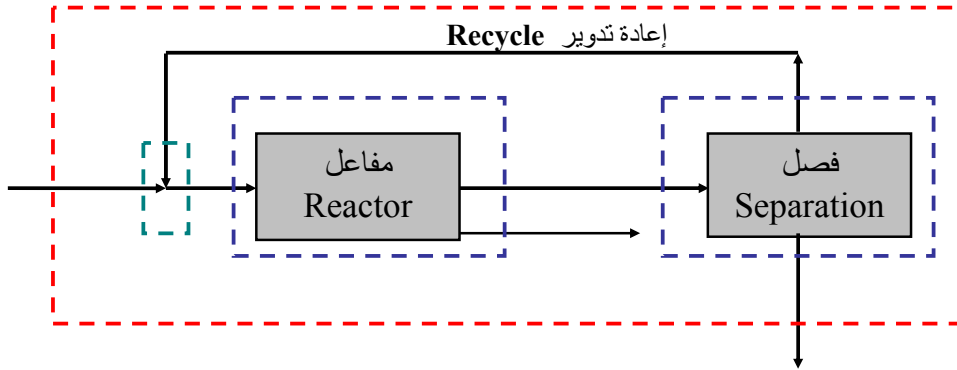
في كثير من الأحيان يتطلب الأمر إضافة مواد كيميائية غالية الثمن تسمى حفازات لزيادة سرعة التفاعل، وبالتالي فلا بد من وجود وحدات لفصل الحفاز من المنتج وإعادة استخدامه في المفاعل مرة ثانية.

### ٢. تخفيف تيار التغذية (Dilution of a process stream)

عندما تكون التغذية للعملية الكيميائية -مثلا لمرشح (Filter)- على شكل مادة صلبة معلقة في مادة سائلة (a suspension of solid in a liquid)، فإذا كان تركيز المادة الصلبة عالي فإنه يصعب نقل و التعامل مع تيار التغذية. لذا فلا بد من تخفيف تيار التغذية بتغذية جديدة فان السائل المستخلص من عملية الترشيح (filtrate) يعاد استخدامه لخفيف تركيز تيار التغذية.

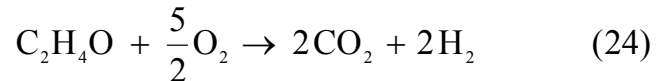
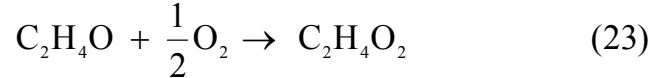
### ٣. التحكم بمتغيرات العملية (Control of a process variable)

إذا افترضنا أن التفاعل ينتج كمية كبيرة جدا من الحرارة مما يؤدي إلى صعوبة التحكم بالمفاعل، فإنه بتخفيف تركيز المواد المتفاعلة -بواسطة إعادة تدوير جزء من تيار الخارج من المفاعل إلى تيار التغذية - سيؤدي إلى خفض كمية الحرارة المنتجة من التفاعل وبالتالي يصبح من الممكن السيطرة على المفاعل



مثال ٣- ١٢:

تيار يحتوي على ٨٠ mole% من الاسيتالدهيد ( $C_2H_4O$ ) و ٢٠ mole% أوكسجين يغذى الى مفاعل (الشكل ٣- ١٧) حيث يحدث التفاعل التالي:



حيث حامض الخل ( $C_2H_4O_2$ ) هو المنتج المرغوب فيه. إذا كانت نسبة النحول للاسيتالدهيد داخل المفاعل ٤٠% وجميع الأوكسجين الداخل إلى المفاعل يتم استهلاكه. يتم إرسال الخارج من المفاعل إلى عملية فصل متعددة الوحدات (multiple-unit separation process) حيث يُفصل ثلاث تيارات نواتج هي تيار يحتوي على ٨٤% من الاسيتالدهيد غير متفاعل حيث يعاد تدويره إلى المفاعل، والتيار الثاني يحتوي على الباقي من الاسيتالدهيد و ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ )، والتيار الثالث يحتوي على حامض الخل وماء. إذا كانت التغذية الداخلة إلى العملية هي الاسيتالدهيد والأوكسجين أوجد:

رسم وتعليم (label) المخطط الانسيابي (flowchart) للعملية.

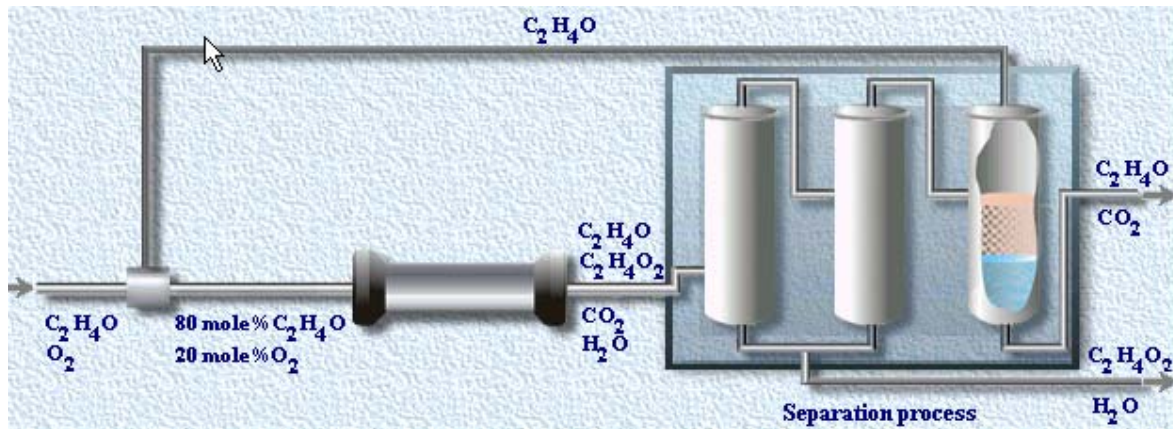
اختيار الأساس المناسب لإجراء الحسابات.

اكتب معادلات موازنة المادة للعملية كاملة ووحداتها.

تركيبة التغذية الداخلة إلى العملية.

تركيبة الخارج من المفاعل.

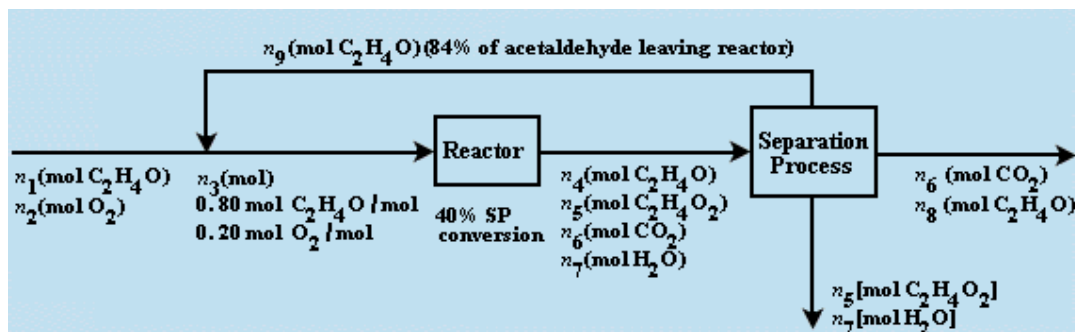
تركيبة التيارات الخارجة من عملية الفصل



شكل ٣- ١٧: رسم توضيحي لمثال ٣- ١٢.

الحل:

١. رسم المخطط الانسيابي (الشكل ٣- ١٧) للعملية وكتابة المعطيات المعلومة والمجهول:



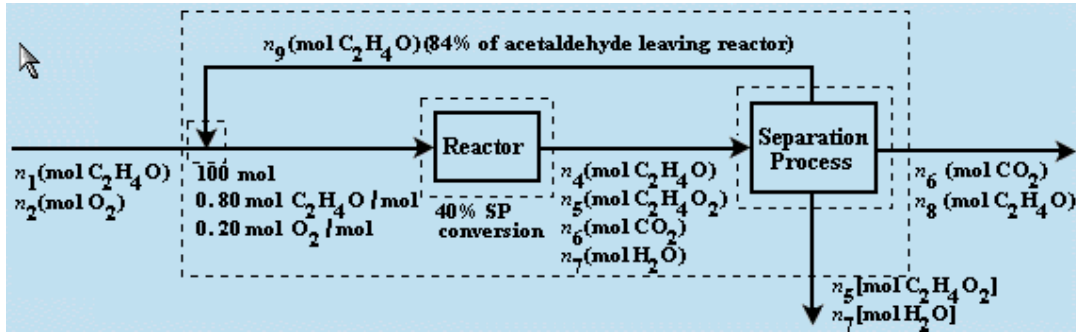
شكل ٣- ١٧: رسم تخطيطي لمثال ٣- ١٢.



٢. الأساس: ١٠٠ مول من التغذية الداخلة إلى العملية.

٣. كتابة معادلات موازنة المادة للعملية كاملة ووحداتها عمليات رسم حدود (صناديق مقطعة

الخطوط) حول العملية الكلية ووحداتها (الشكل ٣- ١٨):



شكل ٣- ١٨: رسم حدود حول العملية ووحداتها لمثال ٣- ١٢.

$$2n_1 = n_6 + 2n_5 \quad (25)$$

$$n_1 + n_9 = 0.8 \times 100 \quad (26)$$

$$2 \times 0.8 \times 100 = 2n_4 + 2n_5 + n_6 \quad (27)$$

$$n_4 = n_8 + n_9 \quad (28)$$

$$n_1 + 2n_2 = 2n_5 + n_7 + 2n_6 + n_8 \quad (29)$$

$$100 \times (0.8 + 0.2 \times 2) = n_4 + 2n_5 + 2n_6 + n_7 \quad (30)$$

$$4 \times 0.8 \times 100 = 4n_4 + 4n_5 + 2n_7 \quad (31)$$

$$n_9 = 0.84n_4 \quad (32)$$

$$n_4 = 0.8 \times 100 \times (1 - 0.4) \quad (33)$$

$$4n_1 = 4n_5 + 2n_7 + 4n_8 \quad (34)$$

$$n_2 = 0.2n_5 \times 100 \quad (35)$$

بعد حل المعادلات من ٢٥- ٣٥ نحصل على النتائج التالية:

$$n_1 = 39.68 \text{ mol}$$

$$n_6 = 30 \text{ mol}$$

$$n_7 = 4 \text{ mol}$$

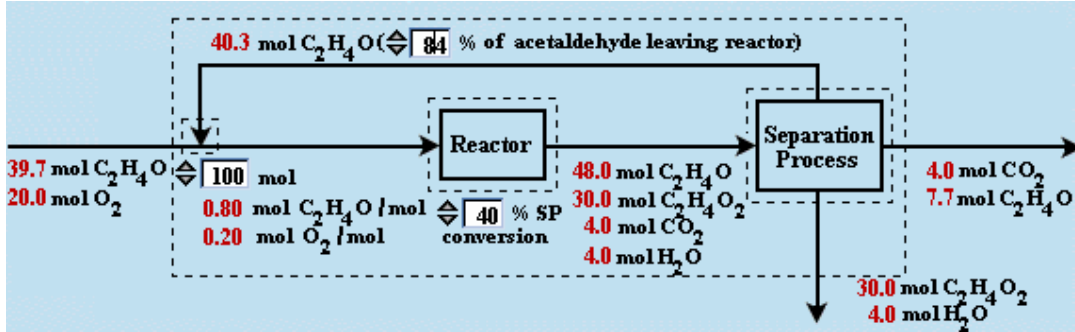
$$n_9 = 4 \text{ mol}$$

$$n_x = 7,68 \text{ mol}$$

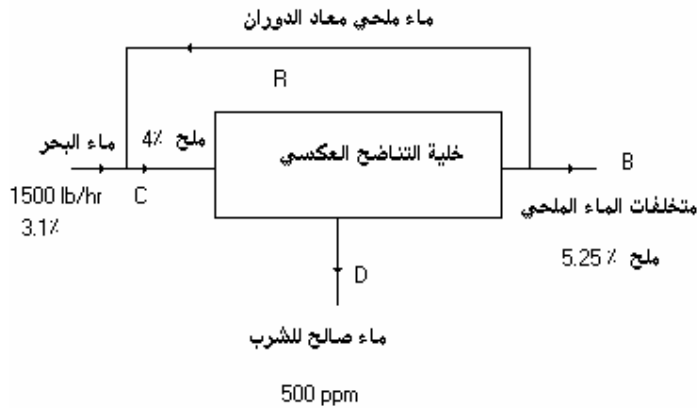
$$n_y = 40,32 \text{ mol}$$

$$n_z = 20 \text{ mol}$$

$$n_i = 48 \text{ mol}$$



مثال ٣ - ١٩:



شكل ٣ - ١٩: رسم توضيحي لمثال ٣ - ١٩.

- أ - معدل إزالة متخلفات المحلول الملحي B؟
- ب - معدل إنتاج ماء صالح للشرب D؟
- ت - كسر الماء المالح المغادر لخلية الفصل و المعاد دورانه؟

الحل

الأساس: 1500 lb/h ماء بحر

لحساب B و D سنقوم بموازنة كلية و موازنة على الملح:

$$(36) \quad B + D = 1500 \text{ lb/h}$$

$$(37) \quad 0,0525 \times B + 0,10 \times D = 0,31 \times 1500 \text{ lb/h}$$

بحل المعادلتين (36) و (37) نحصل على:

$$B = 888 \text{ lb}$$

$$D = 612 \text{ lb}$$

لحساب C و R سنقوم بموازنتين عند نقطة الخلط:

$$(38) \quad 1500 + R = C$$

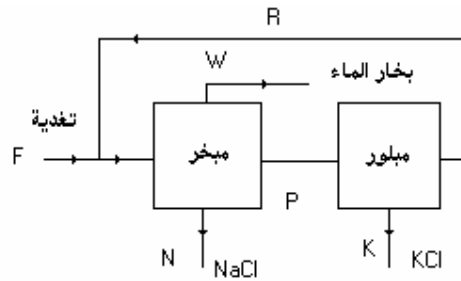
$$(39) \quad 0,31 \times 1500 + 0,0525 \times R = 0,04 \times C$$

$$C = 2580 \text{ lb} \quad \text{ب -}$$

$$R = 1080 \text{ lb}$$

مثال ٣ - ٢٠

اعتمادا على المعلومات المبينة في المخطط تحت احسب معدل السريان في النقطتين P و R .



شكل ٣ - ٢٠: رسم توضيحي لمثال ٣ - ٢٠.

النقطة	NaCl	KCl	H <sub>2</sub> O
F	0,10	0,03	0,87
P	0,168	0,216	0,616
R	0,189	0,123	0,688

## الحل

الأساس: التغذية: ١٠٠ kg/h

موازنة كلية:

أ - على الماء:

$$0.87 \times 100 = 87 \text{ kg/h} = W$$

ب - على ملح الطعام

$$0.10 \times 100 = 10 \text{ kg/h} = N$$

ت - على ملح البوتاسيوم:

$$0.030 \times 100 = 3 \text{ kg/h} = K$$

لحساب P و R سنقوم بموازنة على المبلور:

أ - موازنة كلية:

$$P = R + K = R + 3$$

ب - موازنة على ملح الطعام:

$$(0.168) P = (0.189) R$$

حل المعدلتين يعطي:

$$P = 27 \text{ kg/h}$$

$$R = 24 \text{ K/g/h}$$

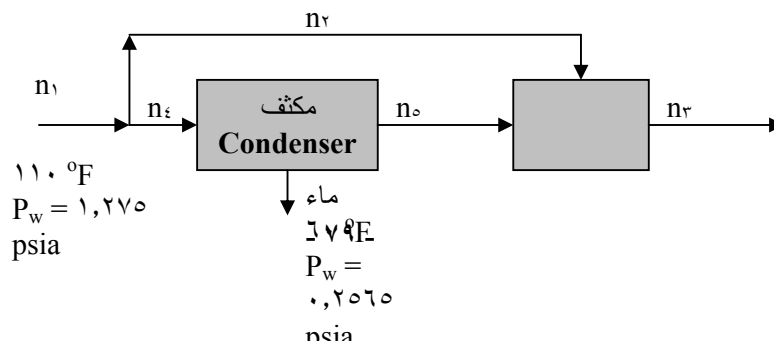
مثال ٣- ٢١:

اعتمادا على المعطيات المبينة في الشكل ٣- ٢١ و الجدول اسفل احسب:

أ - كتلة بخار الماء في كل رطل هواء جاف أصلي (حالة تشبع عند ١١٠ °F)

ب - كتلة بخار الماء في كل رطل هواء جاف للهواء الناتج من المكثف (حالة تشبع عند ٦٠ °F)

ث - النسبة الكتلية للهواء الجاف المار جانبياً للوحدة إلى كتلة الهواء الجاف المرسل إلى المكثف.



شكل ٣ - ٢١: رسم توضيحي لمثال ٣ - ٢١.

الضغط (psia)	درجة الحرارة (° F)
١,٢٧٤٨	٦٠
٠,٢٥٦	١١٠

الضغط الكلي: ١٤,٧ psia

**الحل**

الأساس: ١٠٠ mole هواء جاف

١ - في البداية سنفرض أن البخار غاز مثالي.

٢ - لحساب نسبة مولات بخار الماء في الهواء إلى مولات الهواء الجاف فإنها نسبة الضغط الجزئي لبخار

الماء في الهواء إلى الضغط الجزئي للهواء الحاف .

أ -

١,٢٧٤٨ mole H <sub>2</sub> O	١٨ lb H <sub>2</sub> O	mole dry air
(١٤,٧- ١,٢٧٤٨) mole dry air	mole H <sub>2</sub> O	٢٩ lb dry air
= ٠,٠٥٩ lb H <sub>2</sub> O/lb dry air		

ب -

٠,٢٥٦٣ mole H <sub>2</sub> O	١٨ lb H <sub>2</sub> O	mole dry air
(١٤,٧- ٠,٢٥٦٣) mole dry air	mole H <sub>2</sub> O	٢٩ lb dry air
= ٠,٠١١ lb H <sub>2</sub> O/ lb dry air		

ج - لنفرض  $n$  عدد مولات الهواء و  $y$  كسر البخار في الهواء (mole H<sub>2</sub>O/ mole dry air)

١ - موازنة كلية على الهواء الجاف:

$$n_1(1 - y_1) = n_r(1 - y_r)$$

من المعادلة فوق:

$$n_r = 96,7 \text{ mole air}$$

علما بأن:

$$n_1 = 100 \text{ mole}$$

$$y_1 = 0,059 \text{ mole H}_2\text{O/ mole dry air}$$

$$y_r = 0,02 \text{ mole H}_2\text{O/ mole dry air}$$

٢ - موازنة (كلية و على الماء) عند نقطة الخلط بين الهواء البارد و الساخن

$$n_r = n_o + n_r$$

$$n_r y_r = n_o y_o + n_r y_r$$

علما أن:

$$y_r = y_1 = 0,059 \text{ mole H}_2\text{O/ mole dry air}$$

$$y_r = 0,02 \text{ mole H}_2\text{O/ mole dry air}$$

$$y_o = 0,011 \text{ mole H}_2\text{O/ mole dry air}$$

حل العادلتين يؤدي إلى:

$$n_r = 18,3 \text{ mole air}$$

$$n_o = 78,4 \text{ mole air}$$

$$n_r/n_1 = 0,183$$

## المراجع

- ١ - صلاح حميد العنبيكي "أسس حسابات الهندسة الكيميائية"  
جامعة الموصل، ١٩٨٥، بغداد
- ٢- David M. Himmelblau, "Basic Principles and Calculation in Chemical Engineering", ٦<sup>th</sup> Edt. Printice Hall International Series, ١٩٩٥, USA
- ٣- Nicholas P. Chohey, "Handbook of Chemical Engineering Calculations", ٢<sup>nd</sup> Edt., ١٩٩٤, McGraw-Hill International Editions, USA
- ٤- Olaf. A. Hougen, Kenneth M. Warson and Roland A. Ragatz, chemical Process Principles, Material and Energy Balances, ١٩٦٨, Wiley & Sons, USA
- ٥- Reid R.C, Prausnitz J.M, Sherwood T.K, The Properties of Gases and Liquids, ٤<sup>th</sup> Edt. , McGraw-Hill International Editions, ١٩٩٧, USA
- ٦- Perry R.H, Chilton C.H, Chemical Engineer's Handbook, ٧<sup>th</sup> Edt., McGraw-Hill International Editions, ١٩٩٨, USA
- ٧- Richard M. Felder, Ronald W. Rousseau, Elementary Principles of Chemical Processes, ٣<sup>rd</sup> Edt., J. Wiley & Sons, ٢٠٠٠, USA
- ٨- Glyn J. Advanced Modern Engineering Mathematics, ٢<sup>nd</sup> Edt. Addison-Wesley, ١٩٩٩, USA

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

**BAE SYSTEMS**