

**الباب الأول**  
**حسابات نسب اتحاد المواد**  
**في التفاعلات الكيميائية**

obeikandi.com

# الباب الأول

## حسابات نسب اتحاد المواد في التفاعلات الكيميائية

إن موضوع حسابات نسب اتحاد المواد في التفاعلات الكيميائية في حقل الهندسة الكيميائية هو دراسة موازنات المادة وموازنات الطاقة والقوانين الكيميائية للأوزان المتكافئة كما تطبق في العمليات الصناعية .

وتعتمد موازنة المادة علي قانون حفظ المادة الذي ينص علي أن مجموع كتلة المواد الداخلة عملية ما ، في فترة محددة من الزمن يجب أن يساوي كتلة جميع المواد الخارجة زائداً أي تراكم ( Accumulation ) قد يحدث في العملية .

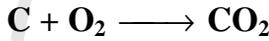
فإذا زود فرن فارغ مثلاً بمائة كيلو جرام من الفحم والهواء ، فمجموع المنتجات الغازية زائداً الرماد والمواد المتخلفة الباقية في الفرن يجب أن يساوي مائة كيلو جرام .

والمادة يمكنها أن تتحول إلي طاقة إشعاعية ( Radiant Energy ) أو تحول عنصري ( Transmutation ) غير أن فقدان المادة بهذه الكيفية هو من الضالة وإمكانية حدوثه من الندرة بمكان ، بحيث يمكن افتراض سريان مفعول قانون حفظ المادة لكل الأغراض العملية .

وقانون حفظ الطاقة هو الأساس لموازنة الطاقة ، والذي بمقتضاه يمكن تحويل الطاقة من شكل إلي آخر ولكن لا يمكن إتلافها مطلقاً . فإذا وضع 155 كيلو جرام من الفحم في فرن وكان يحتوي علي كمية من الطاقة مفاصة بدرجة حرارته ومحتوي حرارة الاحتراق الذاتية .

وإذا لم يكن هناك فقدان حراري للمحيط ، فيجب أن تظهر نفس الكمية من الطاقة في منتجات الاحتراق من الغازات والمواد الصلبة . حيث أن قسم من هذه الطاقة يمكن أن يظهر كحرارة محسوسة ( Heat Sensible ) ناشئة عن درجة حرارة منتجات الاحتراق وقسم منها كطاقة ذاتية ناشئة عن عدم اكتمال الاحتراق .

والقوانين الكيميائية للأوزان المتكافئة تعبر عن النسب الوزنية لاتحاد المواد التي تعاني تغيرات كيميائية . فعندما يحترق الكربون الذي في الفحم إلي ثاني اوكسيد الكربون ، ويمكن التعبير عن التفاعل الكيميائي :



وبمقتضى هذه المعادلة ، كتلة ذرية من الكربون يمكنها الاتحاد مع كتلة جزيئية من الأوكسجين لتكوين كتلة جزيئية من ثاني اوكسيد الكربون . ويمكن التعبير عنها بوحدات فعلية للكتلة باستعمال الكتل الذرية والجزيئية للمواد المتفاعلة والنااتجة . فيمكن القول أن 12 جم من الكربون يتحد مع 32 جم من الأوكسجين لتكوين 44 جم من ثاني اوكسيد الكربون .

### النظام الدولي للوحدات :

توصف جميع الأنظمة الفيزيائية عادة سواء كانت في حركة أو سكون بواسطة مقاييس معينة . والكميات الأولية كالطول والوقت تعرف وتستعمل كأساس للقياسات .

والكميات الثانوية كالكتافة واللزوجة تعرف بواسطة الكميات الأولية . وتسمى الكميات الأولية الأبعاد . ووحدات القياس للتعبير عن الأبعاد تختلف باختلاف الأنظمة المتبعة للوحدات .

والنظام الدولي للوحدات (International system of units) والذي يسمى اختصاراً SI هو النظام الدولي المتفق عليه في الوقت الحاضر . وقد أخذ هذا النظام يحل محل نظام الوحدات الهندسي الانجليزي ونظام سم . جم - ثانية كما بالجدول التالي :

الوحدات الأساسية للأبعاد بمقتضى هذا النظام هي :

الكتلة	كيلو جرام	كجم
الطول	متر	م
الزمن	ثانية	ثانية
درجة الحرارة	كلفن	ك
كمية المادة	مول	مول
شدة التيار	أمبير	أمبير
شدة الإضاءة	شمعة	شمعة

وتوجد عدة كميات ثانوية اشتقت وحداتها من الوحدات الأساسية وأعطيت أسماء خاصة للسهولة ، إلا أن هذه الأسماء ليست أساسية لنظام الوحدات . ومن هذه الكميات الثانوية والتي لها أهمية في الحقل الهندسي القوة والضغط والطاقة والقدرة .

فالقوة تساوي الكتلة  $\times$  معدل تغير السرعة ويعبر عنها (كجم) (م) / (ثانية)<sup>2</sup> بالوحدات الأساسية . وقد أعطي اسم نيوتن لهذا المركب من الوحدات .

$$\text{نيوتن} = (\text{كجم}) (\text{م}) / (\text{ثانية})^2$$

ويعرف الضغط بالقوة المسلطة علي وحدة المساحة ، ويمكن التعبير عنه (كجم) (م) / (ثانية)<sup>2</sup> أو نيوتن / م<sup>2</sup> ، ويطلق اسم باسكال علي هذا التركيب من الوحدات .

$$\text{باسكال} = (\text{كجم}) (\text{م}) / (\text{ثانية})^2 \text{ أو نيوتن} / \text{م}^2$$

غير أن وحدة الضغط الشائع استعمالها هي البار وهي ليست في الحقيقة من عائلة النظام الدولي للوحدات ولكنها شاملة الاستعمال في الممارسات الصناعية .

وبار واحد = 100.000 باسكال وقيمة البار قريبة جداً من الضغط الجوي القياسي حيث : بار واحد = 0.986923 ضغط جوي قياسي أو ضغط جوي قياسي 1.01325 بار .

والشغل يساوي القوة  $\times$  المسافة أو الضغط  $\times$  تغير الحجم ووحدة الشغل أو الطاقة نيوتن - متر وتسمى جول وهي الوحدة الوحيدة المعترف بها دولياً لأي نوع من الطاقة . أي جول = نيوتن - متر وتعرف القدرة بمعدل الشغل لوحدة زمن ووحدها جول / ثانية وتسمى وات (Watt) والوات = جول / ثانية .

ومن الخصائص الجيدة للنظام الدولي للوحدات استعمال المضاعفات والأجزاء العشرية للوحدات باستعمال كلمات معينة سابقة (Prefixes) للوحدات .

مثل كيلو بار ويساوي 1000 بار وميكرومتر يساوي  $1 \times 10^{-6}$  متر والجدول التالي يبين الكلمات السابقة للوحدات في النظام الدولي لتحويلها إلي مضاعفات أو أجزاء عشرية لها .

## الكلمات السابقة للوحدات في النظام الدولي

الكلمة السابقة		المعامل	الكلمة السابقة		المعامل
Deka	ديكا	$10^{-1}$	Atto	اتو	$10^{-18}$
Hecto	هيكثو	$10^{-2}$	Femto	فيمتو	$10^{-15}$
Kilo	كيلو	$10^{-3}$	Pico	بيكو	$10^{-12}$
Mega	ميغا	$10^{-6}$	Nano	نانو	$10^{-9}$
Giga	جيجا	$10^{-9}$	Micro	مايكرو	$10^{-6}$
Tera	تيرا	$10^{-12}$	Milli	ملي	$10^{-3}$
			Centi	سنتي	$10^{-2}$
			Deci	دسي	$10^{-1}$

وعندما يرفع مضاعف الوحدة أو جزء الوحدة العشري فالقوة تشمل كل المضاعف أو الجزء وليس الوحدة فقط . 1 دسم<sup>3</sup> هو حجم مكعب ضلعه 1 دسم أو 0.1 م ويساوي الحجم 0.001 م<sup>3</sup> وليس 0.1 م<sup>3</sup> .

### النظام الهندسي الانجليزي ونظام سم - جم - ثانية للوحدات :

ولو أن النظام الدولي للوحدات اخذ يحل تدريجياً الآن محل النظام الهندسي الانجليزي ونظام سم - جم - ثانية للوحدات ، إلا أنهما لا يزالان سائدين في الكتب والمصادر الهندسية في الوقت الحاضر .

ولذلك يصبح من الضروري لطالب الهندسة القدرة علي تحويل الوحدات من نظام إلي آخر . والجدول التالي يبين أهم الوحدات لأنظمة الثلاثة .

درجة الحرارة	الطاقة	القوة	الكتلة	الزمن	الطول	
كلفن	جول	نيوتن	كيلو جرام	ثانية	متر	النظام الدولي
فهرنهايت أو رانكين	وحدة حرارية بريطانية	قوة باوند	كتلة باوند	ثانية	قدم	النظام الهندسي الانجليزي
مئوية أو كلفن	أرك أو جول أو سعرة حرارة	داين	جرام	ثانية	سنتيمتر	نظام سم.جم.ث

وبيين الجدول التالي العلاقة بين قيم وحدات النظام الدولي وقيم وحدات النظامين الهندسي الانجليزي والمترى ( سم - جم - ثانية ) .

الكمية	التحويلات
الطول	1 م = 100 سم = 3.2808 قدم = 39.37 انج
الكتلة	1 كجم = 1000 جم = 2.2046 كتلة باوند
القوة	1 نيوتن = 1 كجم (م) / (ثانية) <sup>2</sup> = 10 <sup>5</sup> داين = 0.2248 قوة باوند
الضغط	1 باسكال = 1 نيوتن / م <sup>2</sup> = 10 داين / سم <sup>2</sup> = 1.4054 × 10 <sup>-4</sup> قوة باوند / انج <sup>2</sup> = 1 × 10 <sup>5</sup> بار

الحجم	1 م <sup>3</sup>	=	10 <sup>6</sup> سم <sup>3</sup>
		=	1000 لتر (دسم <sup>3</sup> )
		=	35.3147 قدم <sup>3</sup>
		=	264.172 جالون أمريكي
الكثافة	1 كجم/م <sup>3</sup>	=	1 جم / دسم <sup>3</sup>
		=	0.001 جم / سم <sup>3</sup>
		=	0.06243 كتلة باوند / قدم <sup>3</sup>
		=	0.00835 كتلة باوند / جالون أمريكي
الطاقة	1 جول	=	1 كجم (م) <sup>2</sup> / (ثانية) <sup>2</sup>
		=	1 نيوتن - م
		=	1 وات ثانية
		=	10 <sup>7</sup> دايين سم
		=	10 <sup>7</sup> إرك
		=	10 (سم <sup>3</sup> ) (بار)
		=	0.2390 سعر
		=	9.8692 (سم <sup>3</sup> ) (ضغط جوي)
		=	0.7376 قدم - قوة باوند
		=	9.4783 × 10 <sup>-4</sup> وحدة حرارية بريطانية
القدرة	1 وات	=	1 كجم (م) <sup>2</sup> / (ثانية) <sup>3</sup>
		=	1 جول / ثانية
		=	1 فولت (أمبير)
		=	0.2390 سعر / ثانية
		=	0.7376 قدم - قوة باوند / ثانية
		=	1.341 × 10 <sup>-3</sup> قوة حصانية
		=	5.687 × 10 <sup>-2</sup> وحدة حرارية بريطانية/ دقيقة

مثال : تحويل الوحدات :

إذا كانت سرعة طائرة ضعف سرعة الصوت ( بفرض أن سرعة الصوت = 335 م/ثانية ) ، فما سرعتها بالكيلو مترات في الساعة ؟

الحل :

2	335 م	1 كم	60 ثانية	60 دقيقة
	ثانية	1000 م	1 دقيقة	1 ساعة

$$= 2412 \text{ كم / ساعة}$$

ولتقليل احتمالات الأخطاء عند تحويل الوحدات من نظام إلي آخر استخدمت في المثال 1 أعلاه ما يسمى معادلة الأبعاد (**Dimensional Equation**) التي تضم الوحدات والأرقام معاً .

فلقد ضربت السرعة بعدد من النسب تسمى معاملات التحويل ذات قيم مكافئة لمجاميع الوقت والمسافة وغير ذلك للوصول إلي الجواب النهائي المرغوب . وتحتوي معادلة الأبعاد علي خطوط عمودية مرتبة لفصل النسب عن بعضها .

ولهذه الخطوط نفس معني علامة الضرب (x) موضوعة بين كل نسبة . ومن المفيد للطالب أن يتعود علي كتابة الوحدات دائماً بجانب القيم العددية المقترنة ( إلا إذا كانت الحسابات سهلة جداً ) حتي يصبح ملماً باستعمال الوحدات والأبعاد ويستطيع انجازها ذهنياً .

وحدة المول أو وحدة الجزيء الجرامي :

تعرف وحدة المول واحياناً تكتب مختصرة (**Mol**) في النظام الدولي للوحدات علي أنها كمية المادة التي تحتوي علي عدد من الجسيمات

الأولية ، مساوي لعدد ذرات الكربون الموجودة في 0.012 كجم من نظير الكربون 12 .

وتحتوي المول الواحدة علي  $6.02252 \times 10^{23}$  من الجسيمات الأولية . والجسيمات في حالة معظم الغازات في درجات الحرارة العادية تعني الجزيئات ( Molecules ) ، أما في حالة وجود الأيونات والذرات وغيرها مع الجزيئات فكلها تعتبر جسيمات أولية .

وكتلة المول تسمى الكتلة المولية أو كتلة جزيء جرامي . فكتلة مول من الأوكسجين تساوي 0.032 كجم ، بينما 32 كجم من الأوكسجين تكون كيلو مول واحد من الأوكسجين . أي أن :

$$\text{عدد المولات} = \frac{\text{الكتلة بالجرامات}}{\text{الكتلة المولية}}$$

$$\text{عدد الكيلو مولات} = \frac{\text{الكتلة بالكيلوجرامات}}{\text{الكتلة المولية}}$$

وتتكون كتل المول النسبية لمختلف العناصر والمركبات من مجموع الأوزان الذرية لمكونات المول علي أساس مقياس اختياري معين لكتل العناصر النسبية . ويستعمل نظير الكربون 12 كعنصر قياسي مرجعي الآن لقياس كتل العناصر الاخرى ، ووزنه الذري يساوي 12 تماماً في سلم الأوزان الذرية . وتجدر الإشارة هنا إلي أنه يجب عدم الاستمرار في استعمال الاصطلاحين الوزن الذري والوزن الجزيئي ، والاستعاضة عنهما بالاصطلاحين : الكتلة الذرية والكتلة المولية أو كتلة الجزيء ، اللذين هما أكثر دقة لعدم اعتمادهما علي الجاذبية الأرضية التي تختلف من محل إلي آخر .

غير أن الوزن كان الأسلوب الأساسي لمقارنة الكتل الذرية والأوزان الذرية النسبية الناتجة عن ذلك هي في الحقيقة مماثلة للكتل الذرية النسبية طالما استخدمت نفس قيمة الجاذبية في الحسابات .

### موازنة المادة : (Material Balance) :

إن أساس موازنة المادة هو قانون حفظ المادة . ويمكن تصور تطبيق هذا القانون بتخيل صندوق فارغ يصب فيه ثلاث مجاري من المواد ويخرج منه مجري واحد .

فمجموع وزن المجاري الثلاثة الداخلة خلال فترة محددة من الزمن يجب أن يساوي مجموع وزن المجري الخارج زائداً الوزن الإضافي لمكتسب للصندوق الناشئ عن تراكم المواد فيه خلال الفترة المذكورة .

ويمكن تطبيق قانون حفظ المادة علي العناصر الكيميائية أيضاً ، حيث يمكن الافتراض بأنه من المستحيل عملياً تحويل عنصر إلي عنصر آخر . فإذا دخلت مثلاً عشرة كيلو جرامات من الكربون المفاعل ، فيجب أن تخرج عشرة كيلو جرامات من الكربون من المفاعل أو تتراكم فيه .

ولا يغير شيئاً شكل الاتحاد الكيميائي الذي يطرأ علي الكربون عند ظروف دخوله أو خروجه المفاعل . وطالما تطبق الموازنة علي عنصر الكربون أو الهيدروجين أو الأوكسجين ، فالموازنة الكلية يجب أن تطبق ايضاً .

### المادة الرابطة :

تسهل الأعمال الرياضية الضرورية غالباً في حسابات اتحاد المواد ، إذا وجدت المادة التي تدخل العملية في مجري واحد فقط

وتخرج منها غير متغيرة في مجري واحد آخر . وتسمى مادة كهذه المادة الرابطة .

ومثل جيد لذلك يحدث في مركز (Concentrator) مستمر لمحلول ملحي . فيسيل المحلول الملحي المخفف إلي المركز الذي يتبخر فيه الماء ثم يندفع خارجاً المحلول الملحي المركز .

ويمكن الافتراض في هذه العملية ، بعدم حصول أي تراكم في المركز ، حيث يأتي كل الملح في مجري واحد إلي الجهاز ويخرج بنفس الكمية بمجري آخر . ويمكن أن يؤخذ الملح عندئذ كمادة رابطة في هذه العملية .

ولإيضاح التطبيق المباشر للمادة الرابطة لحسابات موازنة المادة ، لناخذ الحالة التي يراد فيها حساب كمية الماء المتبخر من 100 كجم من محلول 10% وزناً NaCL في الماء لتركيزه إلي محلول 20% وزناً NaCL .

فإذا أخذنا كأساس للحل 100 كجم من المحلول الأصلي فيوجد 10 كجم من الملح و 90 كجم من الماء فيه قبل التركيز ، ويجب إن يكون هناك في المحلول المركز الباقي 10 كجم من الملح التركيز . ولذا يمكن اعتبار الملح مادة رابطة حيث يدخل جميعه في مجري واحد ويخرج دون تغير في مجري واحد آخر أيضاً .

فإذا فرضنا X يمثل كجم من الماء الباقي في المحلول المركز ،

يجب إن يساوي تركيز الملح في المحلول المركز ،  $\frac{10}{X+10}$  (100)

$$20 = (100) \frac{10}{X+10}$$

وبحل المعادلة لإيجاد قيمة  $X$  ،  $40 = X$

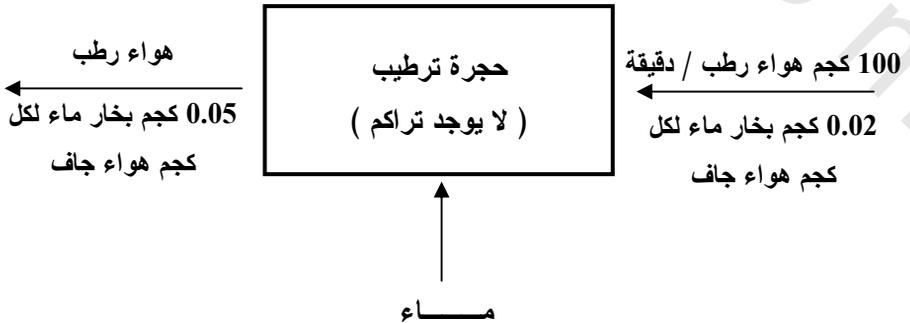
فقبل التركيز ، يوجد 90 كجم من الماء في المحلول لكل 100 كجم من المحلول الأصلي أو لكل 10 كجم من الملح . وبعد التركيز يوجد 40 كجم من الماء في المحلول النهائي لكل 10 كجم من الملح . فكمية الماء المتبخر لكل 100 كجم من المحلول الأصلي يجب لذلك أن تساوي  $90 - 40 = 50$  كجم .

مثال :

تطبيق موازنة المادة المتضمن مادة رابطة في مسائل ترطيب الهواء (**Humidification**) . وجد في عملية مستمرة ، 100 كجم من الهواء الرطب في الدقيقة يحتوي علي 0.02 كجم من بخار الماء لكل كجم من الهواء الجاف . يدخل حجرة ترطيب حيث يضاف فيها بخار الماء إلي الهواء .

ويحتوي الهواء الخارج من الحجرة علي 0.05 كجم بخار ماء لكل كجم من الهواء الجاف والمطلوب حساب كمية الماء المضاف إلي الهواء الرطب الداخل في الدقيقة .

والشكل التالي رسم تخطيطي للعملية .



## الحل :

ليكن أساس الحل دقيقة واحدة ، ومعادلة إلي 100 كجم من الهواء الرطب الداخل إلي الحجرة . كل الهواء الجاف الداخل للحجرة في مجري واحد يجب أن يخرج في مجري الهواء الخارج ، ولذا يمكن اعتبار الهواء مادة رابطة .

نفرض أن  $X$  يساوي وزن بخار الماء الداخل للحجرة في الدقيقة ، فوزن الهواء الجاف الداخل للحجرة يجب أن يساوي  $100 - X$  كجم . وحيث أن كجم بخار ماء لكل كجم هواء جاف في المجري الداخل يساوي 0.02 ، لذا  $\frac{X}{X-100} = 0.02$  ،  $X = 1.96$  كجم / دقيقة

كجم هواء جاف داخل إلي الحجرة = كجم هواء جاف خارج من الحجرة =  $100 - 1.96 = 98.04$  كجم / دقيقة

وحيث يوجد 0.05 كجم بخار الماء لكل كجم هواء جاف خارج من الحجرة ، فكجم بخار ماء خارج من الحجرة في الدقيقة يساوي  $(98.04)(0.05) = 4.90$  وبما أن الحسابات المتقدمة أنجزت علي أساس دقيقة واحدة ، لذلك فكجم الماء المضاف إلي الهواء الأصلي في الدقيقة يساوي كجم بخار الماء الخارج مع الهواء النهائي في الدقيقة ناقصاً كجم بخار الماء الداخل مع الهواء الأصلي في الدقيقة ، أو  $4.90 - 1.69 = 2.94$  كجم من الماء أضيف إلي الهواء في الدقيقة .

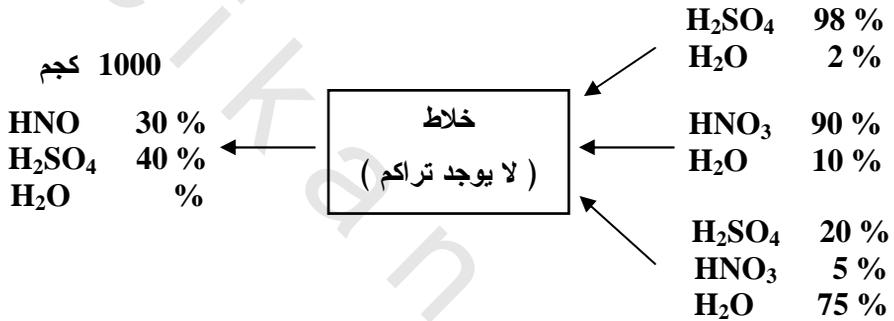
## مثال :

عند تطبيق موازنة المادة علي مجار متعددة . يراد تحضير خليط يحتوي علي 30% وزناً حامض النتريك و 40% وزناً حامض الكبريتيك و 30% وزناً ماء بصورة مستمرة وذلك بخلط حامض الكبريتيك المركز

(90% و 2% وزناً  $H_2SO_4$  و  $H_2O$ ) وحامض النتريك المركز (90% وزناً  $HNO_3$  و 10% وزناً  $H_2O$ )

وحامض النفاية (20%  $H_2SO_4$  و 75%  $H_2O$  و 5%  $HNO_3$ ).  
المطلوب حساب الكيلوجرامات الضرورية من حامض الكبريتيك المركز وحامض النتريك المركز وحامض النفاية لكل 1000 كجم من الخليط النهائي.

والشكل التالي رسم تخطيطي للعملية



الحل :

أساس الحل 1000 كجم من الخليط النهائي .

نفرض  $x$  = كجم حامض الكبريتيك المركز الضروري و  $y$  = كجم حامض النتريك المركز الضروري و  $z$  = كجم حامض النفاية الضروري .

موازنة المواد الكلية :

الوزن الداخل = الوزن الخارج

الوزن الداخل =  $z + y + x$

( 1 ) ...

الوزن الخارج = 1000

موازنة  $\text{HNO}_3$  :

$$\text{وزن } \text{HNO}_3 \text{ الداخل} = 0.05 Z + 0.90 Y$$

$$\text{وزن } \text{HNO}_3 \text{ الخارج} = (1000) (0.30)$$

$$300 = 0.05 Z + 90 Y \quad \dots (2)$$

موازنة  $\text{H}_2\text{SO}_4$  :

$$\text{وزن } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ الداخل} = 0.20 Z + 0.98 X$$

$$\text{وزن } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ الخارج} = (1000) (0.40)$$

$$400 = 0.20 Z + 0.98 X \quad \dots (3)$$

تمثل المعادلات (1) و (2) و (3) ثلاثة معادلات مستقلة متضمنة

ثلاثة مجاهيل ، يمكن حلها لتنتج :

$$X = 338 \text{ كجم حامض الكبريتيك المركز الضروري .}$$

$$Y = 313 \text{ كجم حامض النتريك المركز الضروري .}$$

$$Z = 349 \text{ كجم حامض النفاية الضروري .}$$

---

1000 كجم مجموع الوزن

ويمكن التأكد من هذه النتائج بتطبيق موازنة الماء للعملية

$$\text{وزن الماء الداخل} = (0.02)(338) + (0.10)(313) + (0.75)(349) = 300$$

$$\text{وزن الماء الخارج} = (1000) (0.30) = 300$$

وحيث أن وزن الماء الداخل للجهاز يساوي وزن الماء الخارج من

الجهاز فموازنة الماء متوفرة والنتائج لذلك صحيحة .

## التفاعلات الكيميائية ووحدات المول :

وجد أنه عندما تتضمن العملية تفاعلات كيميائية فالأفضل معاملة موازنات المادة علي أساس حفظ العناصر باستعمال وحدات المول . فإذا احترق 24 كجم من الفحم مثلاً إلي ثاني أكسيد الكربون وأول اوكسيد الكربون .

وكانت كمية ثاني اوكسيد الكربون المتكون 66 كجم كما يشير التحليل ، فيمكن حساب كمية أول أكسيد الكربون المتكون بموازنة الكربون .

والكتلة المولية لثاني أوكسيد الكربون هي 44 ، لذلك يوجد  $44/66 = 1.5$  كيلو مول من ثاني اوكسيد الكربون متكون ، وذلك باستعمال وحدات المول . وحيث أن كيلو مول واحد من  $CO_2$  يحتوي علي 12 كجم كربون و 32 كجم أوكسجين .

فيحتوي 1.5 كيلو مول من  $CO_2$  علي (1.5) (12) = 18 كجم كربون . 24 كجم من الكربون يدخل التفاعل و 18 كجم من هذا الكربون يتحول إلي  $CO_2$  . فبقية الكربون ، أو  $24-18 = 6$  كجم يجب أن يكون متحولاً إلي  $CO$  .

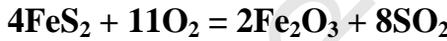
وبما أن كيلو مول واحد من  $CO$  يحتوي 12 كجم كربون و 16 كجم أوكسجين ، وحيث أن 6 كجم من الكربون في  $CO$  ، فيجب أن يكون 0.5 كيلو مول من  $CO$  قد تكون . كيلو مول واحد من  $CO$  يزن 28 كجم ، فمجموع وزن  $CO$  المتكون (0.5) (28) = 14 كجم .

## القوانين الكيميائية والأوزان المكافئة :

يمكن التوصل إلي العلاقة بين أوزان المواد المتفاعلة (Reactants) والمواد الناتجة (Products) في تفاعل كيميائي من دراسة معادلة التفاعل والكتل المولية للمواد المشمولة .

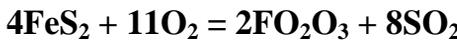
فتكتب المعادلة بحيث تكون المواد المتفاعلة في الجهة اليسري والمواد الناتجة في الجهة اليمني . والكتل المولية لأي عنصر أو مركب يمكن الحصول عليها من جدول الأوزان الذرية ..

ولتوضيح ذلك ، يمكن أن يؤخذ إنتاج ثاني اوكسيد الكبريت بأكسدة بيرات الحديد (Pyrites) كمثل . فالمواد المتفاعلة هي الأوكسجين والبيرات، والمواد الناتجة هي ثاني اوكسيد الكبريت واوكسيد الحديدك . ويمكن كتابة المعادلة الموزونة كما يلي :



وعلي ذلك فالصيغة الكيميائية للبيرات يمكن أن تؤخذ  $\text{FeS}_2$  ، والكتلة المولية لهذا المركب تساوي الوزن الذري للحديد زائداً ضعف الوزن الذري للكبريت . أو تساوي  $55.85 + (2)(32.06) = 119.97$  ويمكن الحصول علي الكتل المولية للمواد الاخري المشمولة في التفاعل بطريقة مماثلة .

وحسب معادلة التفاعل 4 مولات من  $\text{FeS}_2$  تتفاعل مع 11 مول  $\text{O}_2$  لتنتج مولين  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و 8 مولات  $\text{SO}_2$  . ويمكن كتابة ذلك بشكل يدل علي الأوزان الموجودة بالاتحاد :



$$(4)(119.97) \quad (11)(32.0) \quad 2(159.70) \quad 8(64.06)$$

$$479.88 \quad 352.00 \quad 319.40 \quad 512.48$$

أي أن 479.88 أجزاء وزنية  $\text{FeS}_2$  تتفاعل مع 352.00 أجزاء  
وزنية أوكسجين لإنتاج 319.40 أجزاء وزنية  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و 512.48 أجزاء  
وزنية  $\text{SO}_2$  .

وهذه النسب الوزنية يجب أن تسري علي هذا التفاعل بغض النظر  
عن كمية كل المواد الموجودة . فإذا كان وزن احد المركبات معروفاً ، فمن  
الميسور حساب الكميات النظرية للمركبات الثلاثة الاخرى .  
فكمية الأوكسجين الضرورية للتفاعل مع 100 كجم من كبريتيد  
الحديد تساوي وزن الأوكسجين اللازم لكيلو جرام من كبريتيد الحديد  
مضروباً بمائة . أو :

$$100 \text{ كجم} \times \frac{352.00}{479.88} = 73.5 \text{ كجم من الأوكسجين اللازم للتفاعل مع } 100 \text{ كجم}$$

من كبريتيد الحديد . وبطريقة مماثلة ، وزن اوكسيد الحديد الناتج من 100  
كجم  $\text{FeS}_2$  يكون :  $100 \times \frac{319.40}{479.88} = 66.6$  كجم

$$100 \text{ كجم} \times \frac{512.48}{479.88} = 106.9 \text{ كجم}$$

ويمكن التأكد من هذه النتائج بتحديد إمكانية إجراء الموازنة الكلية .  
مجموع أوزان المواد المتفاعلة =  $100 + 73.5 = 173.5$  كجم .  
مجموع أوزان المواد الناتجة =  $66.6 + 106.9 = 173.5$  كجم .  
وحيث أن وزن المواد الناتجة يساوي وزن المواد المتفاعلة فشرط  
الموازنة الكلية متوفر والنتائج لذلك صحيحة .

### قوانين الغازات :

وعند تطبيق مبادئ حسابات نسب اتحاد المواد للغازات ،  
فالعلاقة بين كتلة المادة ودرجة الحرارة والضغط والحجم مهمة جداً .

وهناك طرق عديدة متوفرة تبين تأثير تبدل واحد أو أكثر من هذه المتغيرات .

والقوانين التي تطبق علي ما يسمي الغازات المثالية ( Idea Gases ) مهمة جداً ، ولو أنها ليست دقيقة ولكنها تعطي نتائج وافية بالغرض للحسابات العادية طالما تكون الغازات المعنية تحت ضغط لا يزيد عن ضغط جوي واحد أو اثنين .

### قانون الغاز المثالي :

أدت البحوث التجريبية لعدد كبير من الغازات المختلفة وفي ظروف متغيرة إلي المعادلة التالية ، المشتقة عملياً ، والتي تسمي معادلة الغاز المثالي :

$$PV = n R T$$

حيث  $P$  = الضغط المطلق كجم / (م) (ثانية) أو نيوتن / م<sup>2</sup>  
أو باسكال . و  $V$  = حجم مولات  $n$  من الغاز . و  $n$  = عدد المولات من الغاز . و  $T$  = درجة الحرارة المطلقة ك . و  $R$  = ثابت الغاز العام .

$$R = 8.314 \text{ (كجم) (م}^2\text{) / (ثانية)}^2\text{(مول) (ك)}$$
$$\text{أو } R = 8.314 \text{ (نيوتن) (م) / (مول) (ك)} .$$

والتعبير عنه بالوحدات الثانوية أكثر شيوعاً ، حيث يستعاض عن نيوتن متر بجول :  $R = 8.314 \text{ جول / (مول) (ك)} .$

ومقياس درجة الحرارة المطلقة يعتمد علي نقطة الصفر المطلقة ، تلك الدرجة التي تتوقف عندها نظرياً حركة الجزيئات . ولقد وجد أن هذه الدرجة تساوي  $-273^\circ\text{م}$  ودرجة الحرارة المطلقة بدرجات كلفن = درجة الحرارة بالمقياس المئوي  $+ 273 .$

مثال :

احسب الحجم الذي يشغله مولان من الغاز المثالي تحت ضغط 120 كيلو باسكال Kpa وعند درجة حرارة 300 ك .

الحل :

$$V = \frac{nRT}{P} \quad \therefore \quad V = \frac{(2)(8.314)(300)}{(120)(1000)} = 0.04157 \text{ م}^3$$

مثال :

إذا كانت درجة حرارة غاز 311 ك وضغطه 96.5 كيلو باسكال ويشغل حجماً مقداره 1.416 م<sup>3</sup> ، فما حجمه إذا تغيرت درجة الحرارة إلي 339 ك والضغط إلي 172.4 كيلو باسكال ؟

الحل :

يمكن التعبير عن الظروف الأولى حسب قانون الغاز المثالي :

$$(1) \dots \quad (311) (R) (n) = 1.416 (96.5)$$

نفرض أن V يمثل الحجم في الظروف الثانية والتي يمكن التعبير عنها :

$$(2) \dots \quad (339) (R) (n) = (V_2) (172.4)$$

وحيث لم يضاف أو يؤخذ غاز من الجهاز فعدد مولات الغاز يجب إن تكون متساوية في المعادلتين (1) و (2) . كما أن قيمة R ثابتة لكلي المعادلتين وذلك لاستعمال نفس الوحدات للكميات المماثلة . وبتقسيم المعادلة (2) علي المعادلة (1) يحذف n و R وينتج حجم الغاز في الظروف الثانية .

$$\frac{(172.4)(V_2)}{(96.5)(1.416)} = \frac{(n)(R)(339)}{(n)(R)(311)}$$

$$^3_0 0.864 = \frac{(1.416)(96.5)(339)}{(172.4)(311)} = V_2$$

### قانون دالتون : Dalton's Law :

يعرف الضغط الجزئي لكل من الغازات المكونة لخليط غازي بأنه الضغط الذي يسلطه الغاز المكون لو وجد لوحده في نفس حجم وعند نفس درجة حرارة الخليط الغازي .

وينص قانون دالتون علي أن الضغط الكلي لخليط من الغازات المثالية يساوي حاصل جمع الضغوط الجزئية للغازات المكونة إلي يتألف منها الخليط ، أي أن :  $P = Pa + Pb + Pc + \dots$

حيث :  $P$  الضغط الكلي و  $Pa$  ,  $Pb$  ,  $Pc$  وغير ذلك الضغوط الجزئية لكل من الغازات المكونة .

ونتيجة طبيعية مهمة جداً لقانون دالتون تنص علي إن نسبة الجزء المولي **Mole Fraction** لغاز مكون في خليط من الغازات المثالية يساوي الضغط الجزئي لهذا المكون مقسوماً علي الضغط الكلي .

$$X_a = \frac{n_a}{n_a + n_b + n_c + \dots} = \frac{P_a}{P}$$

ويمكن البرهنة علي ذلك باستعمال قانون الغاز المثالي بالاقتران مع قانون دالتون ، لذا فللغاز المثالي :

$$(1) P_a v = n_a RT$$

$$(2) (P_a + P_b + \dots) V = PV = (n_a + n_b + \dots) RT$$

وبقسمة المعادلة (1) علي المعادلة (2) :

$$\frac{Pa}{P} = \frac{na}{na + nb + nc + \dots} = Xa$$

### قانون الحجم :

يعرف حجم الغاز النقي في خليط من الغازات بأنه الحجم الذي يشغله ذلك الغاز لو وجد لوحده في نفس درجة حرارة وضغط الخليط الغازي .  
وينص قانون الحجم علي أن الحجم الكلي الذي يشغله خليط غازي يساوي حاصل جمع حجوم الغازات النقية ، أو :

$$V = Va + Vb + Vc + \dots$$

حيث  $V$  = الحجم الكلي و  $va$  ,  $vb$  ,  $vc$  الخ ... حجوم الغازات النقية التي يتألف منها الخليط .

وتنص نتيجة طبيعية لقانون الحجم علي أن نسبة الجزء المولي لغاز في خليط من الغازات المثالية ، تساوي حجم الغاز النقي مقسوماً علي الحجم

$$Xa = \frac{va}{V} \quad \text{أو : الكلي للخليط ،}$$

ويمكن إثبات ذلك بنفس الأسلوب الذي اتبع لإثبات قانون دالتون . بما أن النسبة المئوية للمول تساوي نسبة الجزء المولي مضروباً بمائة . والنسبة المئوية للحجم تساوي نسبة الجزء الحجمي مضروباً بمائة .

ولذا يمكن القول بأن النسبة المئوية للحجم لغاز في خليط من الغازات المثالية تساوي دائماً نسبته المئوية المولية في الخليط . وتستعمل هذه الحقيقة بصورة واسعة في حسابات نسب اتحاد المواد لتسهيل الحسابات المعتمدة علي تحاليل النسب المئوية للحجم في خليط غازي .

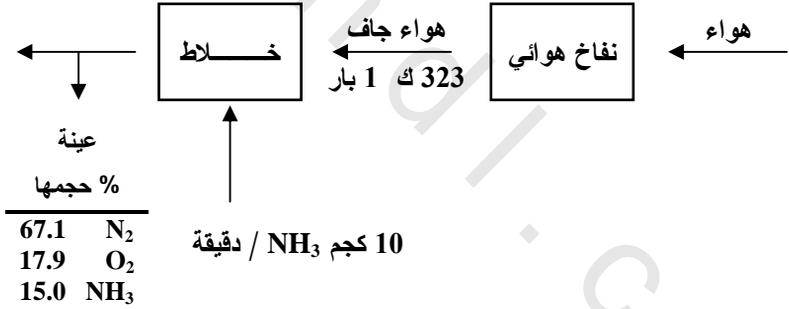
## مثال :

يدفع نفاخ (Blower) هواء جاف بدرجة حرارة تساوي 323 كلفن وضغط يساوي بار واحد ، ثم يضاف إلي الهواء المدفوع 10 كجم من الامونيا في الدقيقة . وعند تحليل عينة من الخليط الغازي تبين انه يتكون من :  $\text{NH}_3$  %15.0 ,  $\text{O}_2$  %17.9 ,  $\text{N}_2$  %67.1

حجماً والمطلوب حساب معدل سرعة الهواء المدفوع بالنفاخ كمتري مكعب في الثانية . يمكن اعتبار تركيب الهواء الجاف  $\text{NH}_2$  %79 ,  $\text{O}_2$  %21 .

## الحل :

الشكل التالي يبين رسماً تخطيطاً للعملية :



عدد كيلو مول  $\text{NH}_3$  في الخليط الغازي =  $\frac{10}{17} = 0.59$  كيلو مول .

0.59 كيلو مول = 15% حجماً من الخليط الغازي = 15% مولاً من الخليط الغازي .

نفرض  $x$  = مجموع الكيلومولات من  $\text{NH}_3$  ,  $\text{N}_2$  ,  $\text{O}_2$  في الخليط .

$$3.93 = x \quad , \quad 0.59 = x \cdot 0.15$$

عدد الكيلو مولات للأوكسجين والنتروجين في خليط الامونيا والهواء يساوي عدد الكيلو مولات للأوكسجين والنتروجين في الهواء المدفوع بالنفاخ = 3.93 - 0.59 = 3.34 كيلو مول من الهواء يدفعه النفاخ علي أساس دقيقة واحدة

$$V = \frac{nRT}{P} \quad \text{معدل سرعة الهواء باستعمال قانون الغاز المثالي}$$

$$n = 3.34 \text{ كيلو مول} = (3.34) (1000) \text{ مول}$$

$$V = \frac{(323)(8.314)(3.314)(1000)}{100.000} = 89.693 \text{ م}^3 / \text{دقيقة}$$

مثال :

المطلوب حساب معدل الكتلة المولية والكثافة للهواء الجاف عند درجة حرارة 294.4 كلفن وضغط 0.973 بار ، مع فرض أن الهواء الجاف يحتوي علي  $O_2$  بنسبة 21 % و  $N_2$  بنسبة 79 % حجماً .

الحل :

أساس الحل : كيلو مول واحد من الهواء الجاف

المكون	% حجما	نسبة الجزء المولي	الكتلة المولية	كيلو جرام في كيلو مول من الهواء الجاف
$O_2$	21.0	0.21	32.0	$6.72 = (32) (0.21)$
$N_2$	79.0	0.79	28.0	$\frac{22.12}{28.84} = (28) (0.79)$
المجموع				

كيلو مول واحد من الهواء يزن 28.8 كجم ، لذلك فمعدل الكتلة المولية للهواء هو 28.48

حجم كيلو مول واحد من الهواء عند درجة 294.4 كلفن وضغط

$$V = \frac{nRT}{P} \quad \text{0.973 بار هو}$$

$$V = \frac{(1)(1000)(8.314)(294.4)}{(0.973)(100.000)} = 25.156 \text{ م}^3$$

كثافة الهواء الجاف عند 294.4 كلفن و 0.973 بار

$$\text{هي } \frac{28.84}{25.156} = 1.1464 \text{ كجم / م}^3$$

مثال :

يتفكك  $\text{N}_2\text{O}_4$  جزئياً في الحالة الغازية حسب المعادلة التالية :  $\text{N}_2\text{O}_4 = 2\text{NO}_2$  فإذا وجد 24.0 جم من خليط غازي محتويًا علي  $\text{N}_2\text{O}_4$  و  $\text{NO}_2$  يشغل حجماً مقداره 15.100 سم<sup>3</sup> عند درجة حرارة 363 كلفن وضغط 0.973 بار . المطلوب حساب النسبة المئوية لتفكك

$\text{N}_2\text{O}_4$  إلي  $\text{NO}_2$

الحل :

أساس الحل : 24.0 جم  $\text{N}_2\text{O}_4$  قبل التفكك . والكتلة المولية

$$\text{لغاز } \text{N}_2\text{O}_4 = 92 = \text{مول من } \text{N}_2\text{O}_4 \text{ موجود قبل التفكك} = \frac{24.0}{92} = 0.261$$

نفرض أن  $X =$  عدد مولات  $\text{N}_2\text{O}_4$  التي تفككت . وحيث أن

مولين من  $\text{NO}_2$  تتكون لكل مول واحدة  $\text{N}_2\text{O}_4$  تتفكك  $X2 =$  عدد مولات  $\text{NO}_2$  متكونة .

وعدد المولات النهائية في الغاز = عدد مولات  $\text{N}_2\text{O}_4$  + عدد مولات

$$\text{NO}_2 = (0.61 - X) + X2$$

وباستعمال قانون الغاز المثالي ، العدد النهائي لمولات الغاز هي :  $n = \frac{PV}{RT}$

$$0.487 = \text{مول} = \frac{(0.973)(100,000)(15,1000)}{(8.314)(363)(1,000,000)}$$

$$\text{لذلك ، } 0.487 = X2 + (0.261 - X) \therefore X = 0.226$$

$$\text{النسبة المئوية لتفكك } \text{N}_2\text{O}_4 \text{ هي } \frac{0.226}{0.261} (100) = 86.7\%$$

## موازنة الطاقة :

ينص قانون حفظ الطاقة على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ،  
ومجموع كمية الطاقة الداخلة لجهاز معين يجب أن تساوي الطاقة الخارجة  
زائداً أي طاقة متراكمة في الجهاز . ويسمى التعبير الرياضي لهذا القانون  
موازنة الطاقة .

ويوجد نوعان أساسيان للطاقة هما الطاقة الكامنة والطاقة الحركية .  
والطاقة الكامنة تشير إلى طاقة الجسم أو المادة الناتجة عن موضع ذلك الجسم  
أو المادة نسبة إلى مادة أخرى .

مثلاً قطعة فحم تحتوي على طاقة كامنة معينة عندما توضع عند  
مسافة ثابتة من سطح الأرض وذلك لقدرتها على السقوط والارتطام بسطح  
الأرض بعزم يعتمد على كتلتها وسرعتها . وتشير الطاقة الحركية إلى الطاقة  
الناشئة عن الحركة . فالرصاصة بعد انطلاقها يكون لها طاقة حركية ناشئة  
عن حركتها .

وانسياب الحرارة من جسم إلى آخر يمكن اعتباره طاقة في حالة  
انتقال - ( **Energy in Transition** ) فعندما تتساقط الحرارة من الجسم  
الحار إلى الجسم البارد تزداد الطاقة الداخلية للجسم البارد على حساب الطاقة  
الداخلية للجسم الذي انتقلت منه الحرارة .

والشغل نوع آخر من الطاقة في حالة انتقال . ويعرف الشغل  
بالطاقة المنتقلة بفعل قوة ميكانيكية متحركة تحت ضوابط معينة خلال مسافة  
ملموسة . ولا يمكن تخزين الشغل كشغل ، ولكن القدرة لعمل شغل يمكن  
تخزينها كطاقة كامنة أو طاقة حركية أو طاقة داخلية .

## السعة الحرارية والحرارة النوعية :

يتطلب غالباً في أكثر الأعمال الكيميائية ذات العلاقة بالحرارة حساب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جسم معين قيمة معينة . ويمكن حساب ذلك باستعمال السعة الحرارية أو الحرارة النوعية .

وتعرف السعة الحرارية بكمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كمية معينة من المادة درجة حرارية واحدة . والحرارة النوعية لجسم معين هي نسبة السعة الحرارية لذلك الجسم إلى السعة الحرارية لوزن مساو له من الماء في درجة حرارة 288.13 كلفن .

فإذا كانت الحرارة النوعية لمادة ما تساوي 2.3 مثلاً فمعناها أنه يتطلب :  $2.3 \times 4.184$  كيلو جول لرفع درجة حرارة كجم من تلك المادة درجة كلفن واحدة .

ويمكن التعبير عن السعة الحرارية للمادة على أساس الوزن أو الكتلة المولية ، فالسعة الحرارية المولية للماء عند درجة حرارة 288.13 كلفن تساوي 75.3 جول / (مول) (ك) ، كما يمكن التعبير عن السعة الحرارية للماء 4.184 جول / (جم) (ك) .

## متوسط السعة الحرارية للغازات :

يتطلب حساب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غاز ما من درجة حرارة إلى أخرى . وحيث أن السعة الحرارية للغازات تتغير مع درجة الحرارة ، لذا فمعرفة متوسط السعة الحرارية لغاز ما على مدى درجات الحرارة المشمولة أمر مرغوب فيه جداً .

فإذا كان متوسط السعة الحرارية معروف فمن السهولة حساب الحرارة الكلية بضرب متوسط السعة الحرارية بتغيير درجة الحرارة وبعده المولات أو الكيلومولات للغاز .

ومن الممكن حساب السعة الحرارية للغازات عند أي درجة حرارة من معادلات من النوع :  $C_p = a + bT + cT^2$  حيث  $C_p =$  السعة الحرارية عند ضغط ثابت ودرجة حرارة مطلقة  $T$  أما  $a$  و  $b$  و  $c$  ثوابت تجريبية ( **Empirical Constants** ) لكل غاز . ويمكن الحصول على معدل السعة الحرارية لمدى درجات حرارة معينة .

كما أن اعتبار متوسط السعة الحرارية للغازات الشائعة ، كالهواء والأوكسجين والنتروجين والهيدروجين وأول أوكسيد الكربون وبخار الماء وثاني أوكسيد الكربون . على أنها السعة الحرارية عند معدل الدرجة الحرارية المطلقة خلال التسخين يتضمن إدخال خطأ ضئيل فقط .

وبوجه عام يمكن افتراض عدم تأثر السعة الحرارية للغازات الشائعة بالضغط إذا كانت درجات الحرارة أعلى من 273 كلفن والضغط اقل من 5 بار .

وتسهل حسابات المحتويات الحرارية للغازات باستعمال جداول أو مخططات تبين متوسط السعة الحرارية أو محتوى الحرارة المحسوسة ( **Sensible Heat** ) بالنسبة إلى درجة حرارة مرجعية ملائمة .

وتجري معظم حسابات نسب اتحاد المواد بظروف يكون الضغط عندها ثابت . غير انه إذا سخن الغاز عند حجم ثابت فالحرارة المطلوبة لرفع درجات حرارة معينة تكون اقل عما هو ضروري عند ضغط ثابت .

و هذا لعدم تطلب أي طاقة لشغل التمدد (Work of Expansion) ،  
ولقد وجد أن السعة الحرارية المولية للغازات المثالية عند حجم ثابت تساوي  
السعة الحرارية المولية عند ضغط ثابت ناقصاً الثابت العام للغاز المثالي  $R$   
في وحدات منسجمة :  $C_v = C_p - R$

ولذلك إذا كانت السعة الحرارية المولية لثاني أكسيد الكربون عند  
ضغط ثابت = 38.70 جول / (مول) (ك) فالسعة الحرارية لهذا الغاز عند  
حجم ثابت تساوي :  $38.70 - 8.314 = 30.386$  جول / (مول) (ك)

ووحدة  $R$  يجب أن تكون نفس وحدات السعة الحرارية ، فوحدة  $R$   
في المثال أعلاه تساوي 8.314 جول / (مول) (ك) .

### مثال :

المطلوب حساب كمية الحرارة اللازمة لتسخين 10 مولات  $CO_2$  من  
373 إلى 773 ك عند ضغط ثابت مقداره بار واحد .

### الحل :

إن قيم السعات الحرارية هي عند ضغط ثابت مقداره 1.013 بار ،  
وسوف تطبق هذه القيم نفسها عند ضغط ثابت مقداره بار واحد . ووجد أن  
قيمة السعة الحرارية لثاني أكسيد الكربون بين 273 و 373 ك هي  
38.166 جول / (مول) (ك) .

وبفرض المحتوي الحراري يساوي صفر عند 273 ك ، فيكون  
المحتوي الحراري لـ 10 مولات لثاني أكسيد الكربون عند 373 ك :  
 $(38.166) (10) (373-273) = 38.166$  جول

إذن متوسط السعة الحرارية لثاني أكسيد الكربون بين 273 و 773  
ك يساوي 44.685 ومجموع المحتوي الحراري للغاز عند 773 ك :

$$223.425 = (773 - 273) (10) (44.685) \text{ جول}$$

فمجموع الحرارة المضافة لرفع درجة حرارة الغاز من 373 و 773 ك هي الفرق بين المحتوي الحراري عند 373 ك والمحتوي الحراري عند 773 ك :

$$223.425 - 38.166 = 185.259 \text{ جول} / 10 \text{ مولات } \text{CO}_2$$

### حرارة التفاعل :

وجد أن التفاعلات الكيميائية يصاحبها انبعاث أو امتصاص حرارة عند حدوثها. ويعبر دائماً عن حرارة التفاعل بوحدة المول في موازنات الطاقة عند حسابات نسب اتحاد المواد ، وذلك حتي يمكن تطبيقها مباشرة في معادلة التفاعل .

فإذا تفاعل مثلاً مول واحد من  $\text{CaO}$  عند درجة حرارة 291 ك مع مول واحد من  $\text{CO}_2$  عند درجة حرارة 291 ك لإنتاج مول واحد من  $\text{CaCO}_3$  عند درجة حرارة 291 ك ، فالحرارة المنبعثة تساوي 182.422 جول . ويمكن التعبير عن ذلك :



ولو انعكس هذا التفاعل لوجب تزويد وسط التفاعل بحرارة قيمتها 182.422 جول قبل أن يتحلل مول واحد من  $\text{CaCO}_3$  عند درجة 291 ك إلي مول واحد من  $\text{CaO}$  ومول واحد من  $\text{CO}_2$  كلاهما عند درجة 291 ك .

لذا يمكن تعريف حرارة التفاعل ، بصورة عامة ، علي أنها كمية الحرارة المنبعثة أو الممتصة عند حدوث التفاعل مع

اعتبار المواد المتفاعلة والنتيجة في حالتها العادية عند درجة 291 ك وضغط بار واحد .

ونجد أن القيم الحرارية للتفاعل مع محتوى الحرارة المحسوسة للمواد الداخلة إلي الجهاز والخارجة منه ، تشكل أساس معظم موازنات الطاقة في حسابات نسب اتحاد المواد . ولتسهيل هذه الحسابات ، تختار دائماً درجة حرارة ملائمة يفرض عندها المحتوى الحراري مساوياً لصفر .

مثال :

يحترق 100 كجم من الكربون النقي إلي  $\text{CO}_2$  مع الكمية الضرورية نظرياً من الهواء الجاف ( $\text{N}_2$  %79 و  $\text{O}_2$  %21) لتزويد الأوكسجين اللازم للاحتراق . يدخل الكربون والهواء إلي الحارق (Bruner) عند درجة حرارة 291 ك ، وتخرج الغازات الناتجة عند درجة حرارة 2273 ك ، كما يعمل الحارق عند ضغط ثابت مقداره بار واحد . المطلوب حساب كمية الحرارة المنبعثة .

الحل :

أساس الحل : 100 كجم من الكربون النقي عند درجة حرارة 291 ك والتي عندها يعتبر مستوي الطاقة يساوي صفر .

التفاعل الكامل :  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 393.654$  كيلو جول

الحسابات المبدئية : كيلو مول كربون =  $\frac{100}{12} = 8.34$

كيلو مول  $\text{O}_2$  يتطلب من الهواء = 8.34

كيلو مول هواء يتطلب =  $\frac{(100)(8.34)}{21} = 39.7$

كيلو مول  $\text{CO}_2$  في الغاز الناتج = 8.34

كيلو مول  $\text{N}_2$  في الغاز الناتج = (39.7) (0.79) = 31.36

موازنة الطاقة الحرارية : الطاقة الحرارية الداخلة

الحرارة المحسوسة في الهواء = O (الهواء يدخل عند مستوى الصفر للطاقة)

الحرارة المحسوسة في الكربون = O (الكربون يدخل عند مستوى الصفر للطاقة)

حرارة التفاعل = (8.34) (393.654) = 3.283.083 كيلو جول

مجموع الطاقة الحرارية الداخلة = 3.283.083 كيلو جول

الطاقة الحرارية الخارجة = متوسط السعة الحرارية المولية لـ  $\text{CO}_2$  عند ضغط ثابت بين 291 و 2273 ك = 54.52 كيلو جول / (كيلو مول) (ك) .

متوسط السعة الحرارية لـ  $\text{N}_2$  عند ضغط ثابت بين 291 و 2273 ك = 33.43 كيلو جول / (كيلو مول) (ك) .

مجموع الحرارة المحسوسة الخارجة في الغازات :

(8.34) (54.52) (291-2273) + (31.36) (33.43) (291-2273)

= 901.209 + 2.077.859 = 2.979.068 كيلو جول

مجموع الطاقة الحرارية الخارجة = 2.979.068 + الحرارة المنبعثة الموازنة الكلية للطاقة الحرارية .

مجموع الطاقة الحرارية الداخلة = مجموع الطاقة الحرارية الخارجة

الحرارة المنبعثة = 3.283.083 - 2.979.069 = 304.014 كيلو جول .

## الوقود والاحتراق :

إن تطبيق مبادئ حسابات نسب اتحاد المواد علي المسائل المتضمنة الوقود والاحتراق من الأهمية بمكان في مجال الصناعات الحديثة . ولقد طورت طرق معينة لحساب النتائج بسهولة وبسرعة دون الحاجة إلي أجهزة معقدة وباهضة التكاليف للحصول علي تلك النتائج .

## أصناف الوقود :

يصنف الوقود من حيث طور المادة إلي ثلاثة أصناف رئيسية : الصلبة والسائلة والغازية . ومعالجة المسائل المتضمنة هذه الأصناف المختلفة متشابهة في حسابات نسب اتحاد المواد ولذا ، فطور الوقود ليس مهماً جداً في دراسة الطرق المختلفة للاستفادة من المعلومات المتوفرة ذات العلاقة .

## القيمة الحرارية :

إن من أهم صفات الوقود قيمته الحرارية . وتمثل القيمة الحرارية كمية الحرارة المنبعثة عن احتراق كامل لكمية معينة من الوقود والمواد الرئيسية الناتجة عن الاحتراق الكامل للوقود هي ثاني اوكسيد الكربون والماء .

ويتكون ثاني اوكسيد الكربون من تأكسد الكربون في الوقود ، كما يتكون الماء من تأكسد الهيدروجين في الوقود زائداً الماء الموجود في الوقود في الأصل . ونظراً لوجود كميات متفاوتة من الماء في أنواع الوقود المختلفة ، فهناك طريقتان شائعتان للتعبير عن القيمة الحرارية .

القيمة الحرارية الإجمالية (**Gross Heating value**) وتعرف بكمية الحرارة المنبعثة عن الاحتراق الكامل لوحدة وزن من الوقود تحت ضغط ثابت ودرجة حرارة معينة ، مثل 291 ك .

وعندما يتكثف جميع الماء الموجود في الأصل والماء المتكون خلال التفاعل إلي ماء سائل عند هذه الدرجة الحرارية (وهي 291 ك) . والقيمة الحرارية الصافية (**Net Heating value**) وتعرف بكمية الحرارة المنبعثة من الاحتراق الكامل لوحدة وزن من الوقود تحت ضغط ثابت عند درجة حرارة معينة .

ويكون ذلك مثل 291 ك ، عندما تكون كل النواتج بضمنها الماء في الحالة الغازية عند هذه الدرجة الحرارية (291 ك) .

والقيمة الحرارية الإجمالية اكبر من القيمة الحرارية الصافية بمقدار حرارة التبخر الكامنة (**Latent Heating of Vaporization**) لجميع الماء الموجود في الأصل في الوقود والماء المتكون خلال احتراق الهيدروجين .

### الهواء الزائد : Excess Air

الهواء هو مصدر الأوكسجين اللازم للتأكسد في أكثر عمليات الاحتراق . ومن الممارسة الشائعة إدخال أوكسجين أو هواء أكثر مما يتطلب فعلياً للتأكد من توفر كمية كافية من الأوكسجين ، وهذا يعني أن بعض الأوكسجين الزائد يخرج ضمن الغازات الناتجة دون تغيير .

ويعرف الهواء الزائد بكمية الهواء المزودة الزائدة عن تلك الكمية الضرورية نظرياً للتأكسد الكامل للمواد القابلة للاحتراق في الوقود . والنسبة المئوية للهواء الزائد يساوي 100 مضروباً بنسبة كمية الهواء الزائد إلي كمية الهواء المطلوبة نظرياً .

وتوجد عدة طرق للتعبير عن النسبة المئوية للهواء الزائد كما يلي :

$$100 \times \frac{\text{الهواء الزائد}}{\text{الهواء الضروري نظرياً}} = \text{النسبة المئوية للهواء الزائد}$$

$$\frac{\text{مجموع الهواء} - \text{الهواء الضروري نظرياً}}{\text{الهواء الضروري نظرياً}} = \text{النسبة المئوية للهواء الزائد}$$

$$100 \times \frac{\text{الهواء الزائد}}{\text{مجموع الهواء} - \text{الهواء الزائد}} = \text{النسبة المئوية للهواء الزائد}$$

مثال :

في عملية احتراق 100 كجم من الفحم يحتوي علي 80% وزناً  
كربون و 10% وزناً هيدروجين و 10% وزناً رماد ينتج غاز يحتوي  
علي 60 كيلو مول نتروجين إضافة إلي CO و CO<sub>2</sub> و O<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O .  
المطلوب حساب النسبة المئوية للهواء الزائد .

الحل :

كمية الهواء الضرورية نظرياً هي الكمية اللازمة لإحراق 80 كجم  
كربون إلي ثاني اوكسيد الكربون زائداً الكمية اللازمة لإحراق 10 كجم من  
الهيدروجين إلي ماء .



كيلو مول من الأوكسجين الضروري نظرياً من الهواء

$$O_2 \text{ كيلو مول} = \frac{(1)(10)}{(2.02)(2)} + \frac{(1)(80)}{12} = 9.14$$

علي أساس 100 كجم من الفحم ، يوجد 60 كيلو مول نتروجين في  
الغاز الناتج . وحيث يمكن اعتبار النتروجين كمادة رابطة ، 60 كيلو مول

من النتروجين يجب أن تجهز مع الهواء المزود الأصلي ، أو مجموع الكيلو مولات للهواء المجهز فعلياً :

$$76.0 \text{ كيلو مول} = \frac{(100)(60)}{(79)} =$$

النسبة المئوية للهواء الزائد =  $\frac{\text{مجموع الهواء-الهواء الضروري نظرياً}}{\text{الهواء الضروري نظرياً}}$  (100)

$$\% 74.7 = \frac{(43.5 - 76.0)}{43.5} =$$

ولا يؤثر عدم تأكسد بعض الكربون في الفحم بصورة كاملة علي حساب النسبة المئوية للهواء الزائد في أي حال .

### الوقود السائلة والغازية :

تتألف الوقود السائلة أساساً من الكربون والهيدروجين في شكل هيدروكربونات مختلفة . وبعض المكونات الشائعة للوقود الغازية هي الميثان والايثان والبروبان وأول أكسيد الكربون والهيدروجين والنتروجين وثاني أكسيد الكربون .

ويستحصل علي اوكسيد الكالسيوم بتسخين كربونات الكالسيوم في فرن الجير ( Lime Klin ) فيشحن الفرن بحجر الكلس الذي يحتوي علي كربونات الكالسيوم وتزود الحرارة اللازمة بإحراق وقود صلبة أو سائلة .

ويطلق علي عدد الكيلوجرامات من اوكسيد الكالسيوم الناتجة لكل كيلو جرام واحد من الوقود المجهز بنسبة الوقود (Fuel Ratio) ويمكن حساب نسبة الوقود هذه من تحاليل الوقود والغازات الناتجة .

## مثال :

حجر الكلس يحتوي علي  $\text{CaCO}_3$  ومادة خاملة تحرق مع فحم الكوك الذي يحتوي علي 80% وزنا كربون و 20% وزنا رماده وتركيب الغازات الناتجة حجماً هو 25%  $\text{CO}_2$  و 5%  $\text{O}_2$  و 70%  $\text{N}_2$  فإذا نحلل كل كربونات الكالسيوم إلي  $\text{CaO}$  و  $\text{CO}_2$  واحترق كل الكربون في الكوك إلي  $\text{CO}_2$  . فالمطلوب حساب نسبة الوقود .

## الحل :

يوجد 25 كيلو مول  $\text{CO}_2$  في الغاز الناتج

$$= 25 \text{ كيلو مول كربون} = 25 \text{ كيلو مول أوكسجين} .$$

مجموع كيلو مولات أوكسجين في الغازات الناتجة .

$$= 25 + 5 = 30 \text{ كيلو مول} .$$

عدد كيلو مولات الأوكسجين المجهز من الهواء علي أساس النتروجين في

$$\text{الغازات الناتجة} = \frac{(20)(70)}{(79)} = 18.6$$

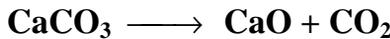
الفرق بين عدد كيلو مولات الأوكسجين الموجودة في الغازات

وعدد كيلو مولات الأوكسجين المجهزة من الهواء يجب أن تكون في

تركيب  $\text{CO}_2$  الناتج من تحلل  $\text{CaCO}_3$  لذلك فعدد كيلو مولات الأوكسجين

$$\text{في } \text{CO}_2 \text{ الناتج من تحلل } \text{CaCO}_3 = 30.0 - 18.6 = 11.4$$

لكل مول واحد من الأوكسجين في  $\text{CO}_2$  الناتج من التفاعل



يتكون مول واحد  $\text{CO}_2$  ومول واحد  $\text{CaO}$  . لذلك فمجموع كيلومولات اوكسيد الكالسيوم المتكون = 11.4 كيلو مول .

$$(11.4) (56) = 638 \text{ كجم } \text{CaO} \text{ متكون}$$

وحيث يوجد 25 كيلو مول  $\text{CO}_2$  في الغاز الناتج ، 11.4 مول ناتج عن تحلل  $\text{CaCO}_3$  ، أو  $11.4 - 25.0 = 13.6$  كيلو مول  $\text{CO}_2$  ناتج عن احتراق الكوك . وهذا يعني :

$(13.6)(12) = 163$  كيلو جرام كربون مجهز من الكوك لكل 100 كيلو مول من الغاز الناتج . ويوجد 100 كجم من الكوك في الأصل لكل 80 كجم من الكربون في الكوك ، لذلك فمجموع الكيلوجرامات من الكوك المجهز =  $\frac{(100)}{80} = 204$  كجم

$$\text{نسبة الوقود} = \frac{\text{كجم CaO تكون}}{\text{كجم وقود استعمل}} = \frac{638}{204} = 3.13$$

## " الأسئلة "

1- ورق رطب يحتوي علي 20% وزنا ماء يدخل إلي مجفف ( Drier ) في عملية مستمرة . ويخرج الورق من المجفف محتوياً علي 2% وزنا ماء . احسب وزن الماء المزال من الورق لكل 100 كجم من الورق الرطب الأصلي .

2- 100 كجم من هواء رطب يحتوي علي 0.1 كجم بخار ماء لكل كجم هواء جاف خلط مع 50 كجم من هواء رطب آخر يحتوي علي 0.02 كجم بخار ماء لكل كجم هواء جاف ، احسب كيلوجرامات بخار الماء لكل كجم من الهواء الجاف في الخليط النهائي .

3- 20 كجم من الكربون النقي حرق مع هواء ليعطي ناتج غازي يحتوي علي 16 وزنا  $CO_2$  و 4% وزنا  $CO$  . احسب وزن  $CO_2$  المتكون .

4- افرض أن التفاعل  $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = CaCO_3 + 2NaOH$  يصل حد الاكتمال ، احسب ما يلي :

(أ) كجم  $Ca(OH)_2$  ليتفاعل مع 100 كجم  $Na_2CO_3$

(ب) كجم  $CaCO_3$  ينتج من 100 كجم  $Na_2CO_3$

(ج) كجم  $Ca(OH)_2$  ضروري لإنتاج 100 جم  $NaOH$

(د) كجم  $Na_2CO_3$  ضروري لإنتاج 400 جم  $CaCO_3$

5- احسب حجم 4 كجم من الهيدروجين كمتر مكعب

(أ) عند درجة حرارة 273 ك وضغط بار واحد .

(ب) عند درجة حرارة 293 ك وضغط 97.360 باسكال .

(ج) عند درجة حرارة 300 ك وضغط 99.500 باسكال .

6- احسب وزن بخار الماء لكل كيلو جرام من الهواء الجاف في خليط من الهواء - بخار ماء عند ضغط كلي يساوي 98.680 باسكال عندما يكون الضغط الجزئي لبخار الماء في الخليط يساوي 5260 باسكال .

7- احسب الكثافة كجم / م<sup>3</sup> عند درجة حرارة 273 ك وضغط بار واحد لغاز يتكون من 25 % حجماً CO<sub>2</sub> و 10% حجماً CO و 5% حجماً O<sub>2</sub> و 60% حجماً N<sub>2</sub> .

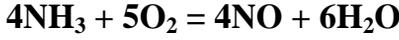
8- ما مقدار الكثافة كجم / م<sup>3</sup> لخليط غازي يتكون من الهواء وبخار الماء إذا كان الضغط الجزئي لبخار الماء = 26300 باسكال ، والضغط الكلي = 97.370 باسكال ودرجة الحرارة = 343 ك .

9- 4230 جول من الحرارة أضيفت إلى 22.4 دسم<sup>3</sup> من غاز مثالي عند ضغط ثابت مقداره بار واحد ، وعند درجة حرارة مقدارها 273 ك . ما هي درجة الحرارة النهائية لهذا الغاز إذا كان متوسط السعة الحرارية عند ضغط ثابت وعلني مدي درجات الحرارة المشمولة يساوي 30.12 جول / (مول) (ك) .

10- مول من غاز يحتوي علي 30% حجماً CO و 60% حجماً N<sub>2</sub> و 10 حجماً O<sub>2</sub> ، عند درجة حرارة 373 ك وضغط بار واحد ، سخن من 373 ك إلي 773 ك مع بقاء الضغط ثابت . احسب كمية الحرارة المضافة إلي هذا الغاز ككيلو جول .

11- كجم واحد من الكربون النقي ( جرافيت ) عند درجة حرارة 291 ك أكسد إلي CO نقي عند درجة حرارة 2273 ك وقد زودت الكمية الضرورية نظرياً من الأوكسجين النقي عند 291 ك . احسب كمية الحرارة المنبعثة ككيلو جول .

12- تأكسد  $\text{NH}_3$  إلي  $\text{NO}$  بواسطة محفز بلاتيني ودرجة حرارة عالية حسب المعادلة الآتية :



احسب كم كجم من الأوكسجين يجب أن يزود لإنتاج 20 كجم من  $\text{NO}$  باستعمال 35% هواء زائد ؟ افرض التفاعل التأكسدي أعلاه يصل حد الاكتمال .

13- 50 كجم من محلول  $\text{NaCl}$  (  $\text{NaCl}$  %40 ,  $\text{H}_2\text{O}$  %60 ) و 40 كجم محلول الفضلات (  $\text{NaCl}$  %10 و 5% سكر و  $\text{H}_2\text{O}$  %80 ) مزجت سووية وسختت . بعض الماء فقد بالتبخر . فإذا كان الخليط النهائي يحتوي علي 15%  $\text{NaCl}$  ما هي النسبة المئوية للماء المتبخر إلي مجموع الماء الداخل للمزيج ؟ ( كل النسب علي أساس الوزن ) .

14- 100 كجم من حجر الكلس يحتوي علي 80%  $\text{CaCO}_3$  و 20% مادة خاملة ، حرق مع 100 كجم من الفحم النقي واستعمل 21% هواء زائد . فإذا تحلل كل كربونات الكالسيوم إلي  $\text{CaO}$  و  $\text{CO}_2$  وتحول كل الفحم إلي  $\text{CO}_2$  . احسب التركيب الحجمي لخليط الغازات الناتجة .