

تقنية مختبرات كيميائية

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

٢٧٠ كيم



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 التنموي: 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 " أساسيات الكيمياء الفيزيائية (نظري) " لمتدربي قسم " تقنية مختبرات كيميائية" للكلية 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، وبالإستعانة 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

تختص الكيمياء الفيزيائية بوضع و تطوير الأسس و القوانين و النظريات التي تحكم التغيرات الكيميائية. و تشمل دراسة خواص المواد و تركيبها و تحليل سرعة التفاعلات و ميكانيكية حدوثها. و تقدم الكيمياء الفيزيائية الأسس التي تقوم عليها أجهزة التحليل الكيميائي سواء الطرق الطيفية أو الكهروكيميائية أو الكروماتوجرافية، بالإضافة إلى الأجهزة التي تقوم بقياس خواص فيزيائية للمواد مثل معامل الإنكسار و النشاط الضوئي و اللزوجة و درجات الانصهار و التجمد و الغليان و غيرها. و بالنسبة للقطاع الصناعي فهي تمدّه بالمعلومات عن الطاقة المطلوبة لإنتاج الكيماويات أو المطرودة كعادم يمكن الاستفادة منه، و كذلك الظروف المثالية لإتمام التفاعلات و التحكم في سرعتها.

و تنقسم الكيمياء الفيزيائية إلى عدة فروع، من أهمها:

-الكيمياء الحرارية و التي تتعلق بحرارة التفاعل و كيفية تطبيق الحساب الكيميائي الحراري للحصول على حرارة تكوين المركبات.

-الدناميكا الحرارية و التي تبحث في إمكانية حدوث التفاعلات تحت ظروف معينة و كيفية التأثير عليها.

-الكيمياء الحركية و التي تعين سرعة التفاعلات و تبحث في ميكانيكية التفاعلات.

-الكيمياء الكهربائية و تدرس تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهرباء و استعمال الكهرباء في إنتاج الكيماويات.

- الكيمياء النووية و التي تبحث في انشطار و اندماج أنوية الذرات و طرق قياس الإشعاع و التطبيق الآمن للمواد المشعة.

-كيمياء الكم و الدراسات الطيفية: و هي تستخدم الأشعة الكهرومغناطيسية لدراسة تركيب المواد الكيميائية. و تستخدم كيمياء الكم نماذج رياضية لموجات إلكترونيات التكافؤ لحساب طاقة تكوين الجزيئات و غيرها من الخواص.

- الحفز الكيميائي و يتعلق بزيادة سرعة التفاعلات عبر إضافة مواد لا تستهلك أثناء التفاعلات.

-كيمياء السطح و تدرس نشاط السطح البيني بين الأطوار و خاصة ظاهرة الإمتزاز التي تلعب دوراً هاماً في تحديد طبيعة و سرعة التفاعلات، و كذلك الغرويات و المنظفات و التشحيم.

و يجب ملاحظة أن الكيمياء الفيزيائية تحتاج إلى إلمام بمبادئ الجبر و الدوال و حساب التفاضل والتكامل و حل المعادلات و التمثيل البياني للنتائج. يلزم كذلك دراية بالخواص الفيزيائية و الميكانيكية للمواد و مبادئ الكهربائية و المغناطيسية. و نقترح على المتدرب لهذه الحقبة الاطلاع على كتاب أساسيات الكيمياء العامة، و بخاصة الوحدات التي تناقش الغازات و الاتزان الكيميائي.

تغطي الحقيبة الفروع الهامة و الضرورية من الكيمياء الفيزيائية التي يحتاج إليها متدرب دبلوم تقنية المختبرات الكيميائية، وتركت بعض الفروع للمقررات المتخصصة التالية في الدراسة. كذلك استبعدت الموضوعات قليلة الأهمية لفني المختبرات الكيميائية. و يوجد في نهاية الحقيبة ملاحق مفيدة و قائمة مراجع يمكن أن يفيد منها الطالب لمزيد من الاطلاع و التعمق في موضوع ما. و مرفق مع هذه الحقيبة حقيبة عملي و تتضمن تجارب تطبيقية على كل وحدة لصقل المهارة العملية للمتدرب.



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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

حركية التفاعلات الكيميائية

حركية التفاعلات الكيميائية

الجدارة: تعيين رتبة و سرعة و نصف عمر التفاعلات الكيميائية و طاقة تنشيطها.

الأهداف:

- أن يعين المتدرب رتبة التفاعل و ثابت سرعته و زمن نصف عمر التفاعل.
- أن يعين المتدرب طاقة تنشيط التفاعل.
- أن يحدد المتدرب العوامل المحددة لحركية التفاعل.
- أن يحسب المتدرب ثابت سرعة التفاعل وفق نظريات حركية التفاعلات الكيميائية.

الوقت المتوقع للدراسة: ست ساعات في الفصل الدراسي.

متطلبات الجدارة: يجب على المتدرب إتقان الحساب الكيميائي في مقرر الكيمياء العامة و كذلك الإلمام بحساب التفاضل و التكامل.

حركية التفاعلات الكيميائية

يتعلق هذا الفرع من الكيمياء بقياس سرعة التفاعلات الكيميائية والعوامل المؤثرة عليه. وتعتمد سرعة التفاعل الكيميائي على الكتل الفعالة للمواد المتفاعلة أو بعضها، وكذلك على درجة الحرارة، ووجود بعض المواد التي تسمى حوافز. ويقصد بالكتل الفعالة التركيز في حالة المحاليل والضغط في حالة الغازات ومساحة السطح في حالة المواد الصلبة. ولهذا الفرع أهمية كبيرة في الصناعة حيث من المهم إتمام التفاعلات بأقصى سرعة ممكنة. ويتطلب ذلك معرفة العوامل التي من الممكن التأثير بها على سرعة التفاعل، مثلاً رفع درجة الحرارة تزيد عموماً من سرعة التفاعلات الكيميائية ولكن هذا يستدعي استهلاك طاقة، وعليه يجب دراسة الجدوى الاقتصادية لذلك. ولفهم حركية التفاعلات الكيميائية لابد من فهم ميكانيكية التفاعل الكيميائي.

لإتمام أي تفاعل كيميائي لابد من اصطدام collision جزيئات المواد المتفاعلة، وعندما يكون الاصطدام فعال فإنه يؤدي إلى حدوث التفاعل. وهذا يفسر لماذا تزيد سرعة التفاعل بزيادة تركيز المواد المتفاعلة، حيث أن الاصطدامات تزيد. ولكن يلاحظ من الدراسة أن تركيز بعض المواد المتفاعلة فقط هو المؤثر، فلماذا؟

يعود السبب في ذلك إلى أن التفاعل الكيميائي يحدث على مراحل أو خطوات مختلفة السرعة، والمحدد لسرعة التفاعل الظاهرية بالطبع هي الخطوة الأبطأ (عنق الزجاجة).

رتبة التفاعل (n) order of reaction :

المواد المتفاعلة الداخلة في الخطوة الإبط هي المحددة لسرعة التفاعل النهائية وعدد جزيئات (أو حدود تركيز) هذه المواد يسمى رتبة التفاعل. ويمكن تصور ذلك بعملية تصادم مطلوب بين الجزيئات المتفاعلة، حيث قد يحتاج الأمر إلى تصادم جزيئات مادة واحدة وهنا تكون رتبة التفاعل أولى، وقد يحتاج الأمر إلى تصادم جزيئات مادتين متفاعلتين وهنا تكون رتبة التفاعل ثانية، وقد يحتاج الأمر إلى تصادم جزيئات ثلاث مواد وهنا تكون رتبة التفاعل ثالثة. ولما كانت الجزيئات تتحرك وتنتشر في الوسط عشوائياً، فإنه من الصعب أن يتصادم في نفس اللحظة أكثر من جزيئين. وعلى ذلك فإن رتب أغلب التفاعلات الكيميائية لا تتعدى الرتبة الثانية وتعتبر التفاعلات من الرتبة الثالثة نادرة في الكيمياء ولا توجد في الواقع تفاعلات رتبته رابعة أو أعلى. ولكن التفاعلات الكيميائية قد تحدث في خطوات معقدة ومتنوعة، مثل احتواء التفاعل على أكثر من خطوة بطيئة، أو حدوث عمليات اتزان، أو تشعب التفاعل، مما يجعل التنبؤ برتبة التفاعل نظرياً بالغ الصعوبة، وعليه يجب محاولة الحصول على رتبة التفاعل بالدراسة العملية. وقد تكون رتبة التفاعل عدداً صحيحاً أو كسراً حسب تعقد حركية التفاعل.

وعندما لا يعتمد التفاعل على الكتل الفعالة للمواد المتفاعلة، بل على عوامل أخرى مثل الكتلة الفعالة لمادة حافزة، تصبح الرتبة صفرية. و سنرمز لرتبة التفاعل بالرمز n .

سرعة التفاعل (v) : Rate of reaction

يعبر عن سرعة التفاعل الكيميائي بمعدل تغير الكتلة الفعالة لأحد المواد المتفاعلة أو الناتجة من التفاعل بالنسبة للزمن. مثلاً زيادة تركيز أو ضغط أحد النواتج لكل وحدة زمن أو تناقص تركيز أو ضغط أحد المواد المتفاعلة لكل وحدة زمن. وفي حالة المحاليل نتوقع أن تكون وحدة قياس سرعة التفاعل الكيميائي هي مول لكل لتر لكل وحدة زمن mol/L/time . وتختلف وحدة الزمن باختلاف التفاعل، فقد تكون ثانية s أو دقيقة min أو ساعة hour أو سنة year. ويُعبر تفاضل تركيز المادة بالنسبة للزمن عن سرعة التفاعل: $v = dC/dt$ ، حيث C تركيز المادة و t الزمن. و عموماً تقل قيمة معدل سرعة التفاعل مع الزمن بسبب انخفاض تركيز المواد المتفاعلة مع مرور الوقت.

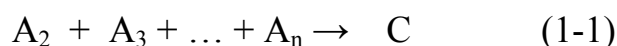
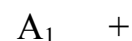
زمن نصف عمر التفاعل ($t_{0.5}$) : Half-life time

للحصول على معلومة حركية تدل على الزمن اللازم لانتهاء التفاعل الكيميائي، اقترح زمن نصف عمر التفاعل $t_{0.5}$ وهو الزمن اللازم لاستهلاك نصف الكتلة الفعالة للمادة المتفاعلة و تحولها إلى نواتج. في حالة المحاليل يكون الزمن المقابل لخفض التركيز الابتدائي لمادة متفاعلة إلى النصف هو زمن نصف عمر التفاعل. و من الواضح أن وحدة قياس زمن نصف عمر التفاعل هي وحدة قياس الزمن، بغض النظر عن رتبة التفاعل.

المعادلة الحركية العامة:

يمكن تلخيص حركية التفاعل الكيميائي عبر كتابة معادلة رياضية تشمل حدود تركيز المواد المتفاعلة المؤثرة على التفاعل (وقد تضم أيضاً المواد الحافزة للتفاعل)، بالإضافة إلى ثابت يعبر عن سرعة التفاعل.

نفرض أن تفاعل كيميائي تُحدد سرعته المعادلة الآتية:



يمكن كتابة معادلة تعبر عن الحركية كما يلي:

$$v \propto$$

$$[A_1] [A_2] [A_3] \dots [A_n] \quad (1-2)$$

$$v = k [A_1] [A_2] [A_3] \dots [A_n] \quad (1-3)$$

$$v = k [A]^n \quad (1-4)$$

حيث k ثابت تناسب يسمى ثابت سرعة التفاعل reaction rate constant، و بالطبع تشير الأقواس المربعة إلى التركيزات للمواد المكتوبة داخلها. لاحظ أن المعنى الرياضي لاعتماد التفاعل على تركيزات المواد هو ضرب حدود التركيزات المعنية. وقد افترضنا في المعادلة (1-4) أن تركيزات جميع المواد المتفاعلة متساوية. و كما سبق الإشارة، يمكن التعبير عن سرعة التفاعل الكيميائي بأحد المقادير الآتية:

$$v = -d[A_1]/dt = -d[A_2]/dt = -d[A_3]/dt = -d[A_n]/dt = d[C]/dt \quad (1-5)$$

لاحظ أن الإشارة السالبة ضرورية لتوضيح أن تركيز المادة المتفاعلة يقل مع الزمن، بينما يزيد تركيز المادة الناتجة. ولتسهيل كتابة المعادلات الرياضية سنصطلح على ما يلي:

يعبر عن التركيز الابتدائي للمادة المتفاعلة قبل بدء التفاعل بالرمز a و بعد مرور زمن مقداره t بالرمز $a-x$ و عن تركيز المادة الناتجة بعد مرور زمن t بالرمز x .

و الآن يمكن كتابة المعادلة الحركية العامة على الصورة:

$$dx/dt = k(a-x)^n$$

(1-6) و يمكن حل المعادلة السابقة بإجراء عملية تكامل بعد وضع قيمة رتبة التفاعل (n) .

أمثلة:

١. تفاعلات الرتبة الصفرية zero-order reactions:

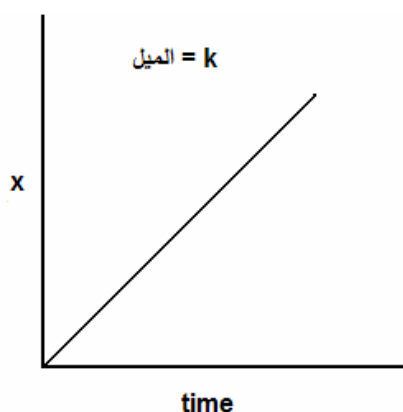
يعني ذلك التفاعلات التي لا تعتمد سرعتها على تركيز المواد المتفاعلة و أن $n = 0$ ، و عند التعويض في المعادلة (1-6) نحصل على:

$$dx/dt = k$$

(1-7) و بإجراء تكامل للمعادلة السابقة نحصل على معادلة الرتبة الصفرية:

$$x = kt$$

(1-8) و تدل المعادلة السابقة على أن تفاعلات الرتبة الصفرية تتميز بزيادة خطية لتركيز الناتج مع الزمن، و أن ميل الخط المستقيم slope للعلاقة يساوي ثابت سرعة التفاعل k . ويعرض الشكل (1-1) للتمثيل البياني لمعادلة الرتبة الصفرية.



شكل (1-1): التمثيل البياني لمعادلة الرتبة الصفرية

ويمكن استنتاج أن وحدة k لتفاعلات الرتبة الصفرية تساوي مول لكل لتر لكل وحدة زمن

mol/L time^{-1} . ويمكن حساب زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الصفرية كما يلي:

عند وضع $t = t_{0.5}$ في المعادلة (1-8) يجب وفق التعريف وضع $x = a/2$ ، و عليه تكون:

$$t_{0.5} = a/2k$$

(1-9)

و كما هو واضح فإن زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الصفرية يزيد مع زيادة التركيز الابتدائي للمادة المتفاعلة.

مثال:

- التحلل الضوئي لغاز الكلور: في وجود ضوء يمكن لجزيء الكلور التحلل إلى ذرتين كما يلي:



و لا تعتمد سرعة التحلل على ضغط الكلور، و لكن على كمية الضوء و الطول الموجي له و درجة الحرارة.

٢. تفاعلات الرتبة الأولى First-order reactions:

في هذه الحالة تعتمد سرعة التفاعل على حد تركيز واحد لأحد المواد المتفاعلة، أي $n = 1$. عند

التعويض في المعادلة (1-6) نحصل على:

$$dx/dt$$

$$= k(a-x) \quad (1-10)$$

$$dx/$$

$$d(a-x) = k dt \quad (1-11)$$

و بإجراء عملية تكامل محدود للمعادلة السابقة نحصل على:

$$-\ln(a-x) = k t + C \quad (1-12)$$

حيث C ثابت يمكن تقديره بوضع $x = 0$ عند $t = 0$ فنحصل على قيمته

$$-\ln a = C \quad (1-13)$$

و بالتعويض عن قيمة C نحصل على المعادلة الحركية لتفاعلات الرتبة الأولى:

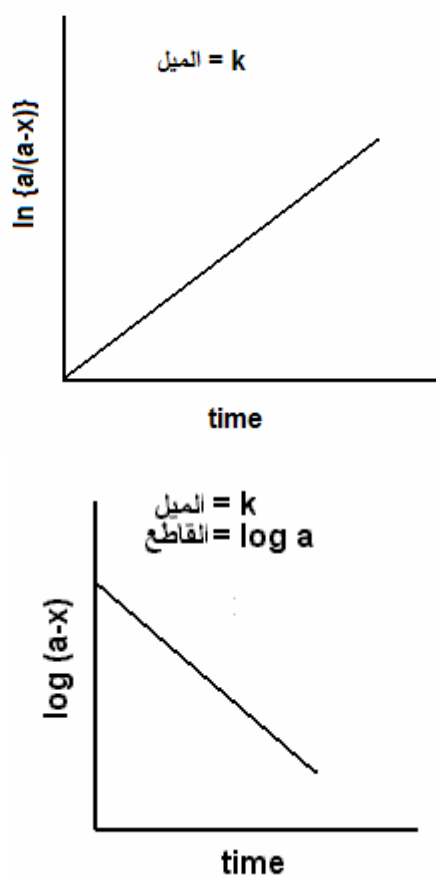
$$\ln(a/(a-x)) = kt \quad (1-14)$$

و قد يفضل أحيانا كتابة المعادلة السابقة على الصورة الآتية لسهولة المعالجة عند غياب قيمة التركيز الابتدائي:

$$\ln a - \ln(a-x) = kt \quad (1-15)$$

و تدل المعادلة السابقة على أن تفاعلات الرتبة الأولى تتميز بزيادة خطية للوغاريتم تركيز المتبقي من المادة المتفاعلة السالب مع الزمن، وأن ميل الخط المستقيم slope للعلاقة يساوي ثابت سرعة التفاعل k. ويعرض الشكل (1-2) للتمثيل البياني لمعادلتى الرتبة الأولى.

ويمكن استنتاج أن وحدة k لتفاعلات الرتبة الأولى تساوي مقلوب وحدة الزمن time^{-1} . ويمكن حساب زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الأولى كما يلي:



شكل (1-2): التمثيل البياني لمعادلتى الرتبة الأولى

عند وضع $t = t_{0.5}$ في المعادلة (1-14) يجب وفق التعريف وضع $x = a/2$ ، و عليه تكون:

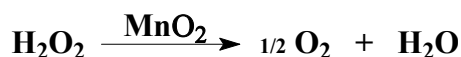
$$t_{0.5} = \ln 2/k = 0.693/k$$

(1-16)

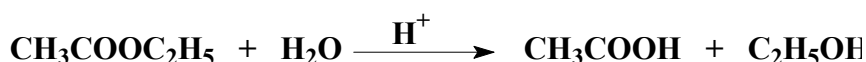
و كما هو واضح فإن زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الأولى لا يعتمد على التركيز الابتدائي للمادة المتفاعلة.

أمثلة: -

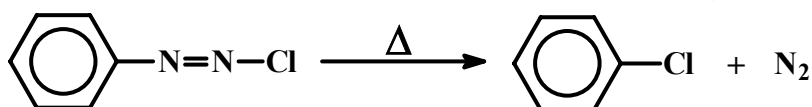
أ. التحلل الحفزي لفوق أكسيد الهيدروجيني:



ب. تميؤ خلات الإيثيل:



ج. تحلل كلوريد ازنويوم البنزين:



٣. تفاعلات الدرجة الثانية second-order reactions:

في هذه الحالة تعتمد سرعة التفاعل على حدين من حدود تركيز المواد المتفاعلة، أي $n = 2$. و بفرض أن التركيزين الابتدائيين للمادتين المتفاعلتين متساويتان، وعند التعويض في المعادلة (1-6) نحصل على:

$$dx / dt = k (a-x)^2$$

(1-17)

و بإجراء عملية تكامل محدود للمعادلة السابقة ، بعد فصل المتغيرات، نحصل على:

$$1/(a-x) = k t + C$$

(1-18)

حيث C ثابت يمكن تقديره بوضع $x = 0$ عند $t = 0$ فنحصل على قيمته

$$1/a = C$$

(1-19)

و بالتعويض عن قيمة C نحصل على المعادلة الحركية لتفاعلات الرتبة الثانية:

$$1/(a-x) - 1/a = k t$$

(1-20)

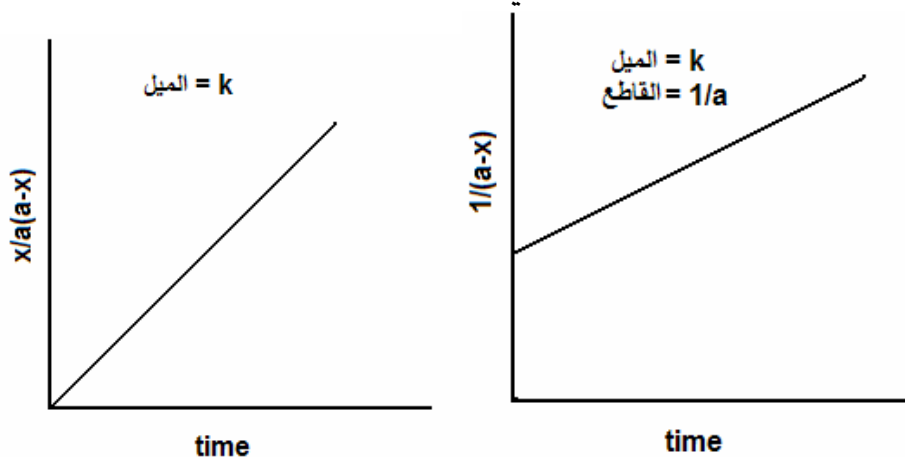
و يمكن كتابة المعادلة الأخير على الصورة الآتية:

$$x / a (a-x) = k t$$

(1-21)

و يمكن الحصول على ثابت سرعة التفاعل k برسم علاقة بين $1/(a-x)$ و الزمن وفق المعادلة (1-20) أو رسم علاقة بين $x/a(a-x)$ و الزمن وفق المعادلة (1-21). و يعرض الشكل (1-3) التمثيل البياني للمعادلتين

السابقتين. ويمكن استنتاج أن وحدة k لتفاعلات الرتبة الثانية تساوي $(\text{mol/L})^{-1} \text{time}^{-1}$. ويمكن حساب زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الثانية كما يلي:



شكل (3-1): التمثيل البياني لمعادلتي الرتبة الثانية

عند وضع $t = t_{0.5}$ في المعادلة (1-21) يجب وفق التعريف وضع $x = a/2$ ، و عليه تكون:

$$t_{0.5} = \frac{1}{k} a$$

(1-22)

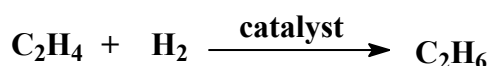
و كما هو واضح فإن زمن نصف عمر التفاعل من الرتبة الثانية يقل مع زيادة التركيز الابتدائي للمادة المتفاعلة.

أمثلة:

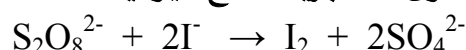
أ - تصبن خلات الإيثيل بقلوي:



ب - هدرجة الإيثيلين:



ج - تفاعل فوق الكبريتات مع اليوديد:



تعيين رتبة التفاعل:

١. طريقة التعويض و الرسم البياني

بعد الحصول على النتائج العملية، يمكن التعويض في معادلات الرتب المختلفة عند أزمنة مختلفة للحصول على ثابت سرعة التفاعل k . و من الحكم على مدى ثبات قيمة k يمكن معرفة الرتبة الصحيحة. و تصلح هذه الطريقة عند توقع الرتبة و عندما يكون التفاعل غير معقد حركيا. و عوضا عن

التعويض و أفضل منه رسم العلاقة البيانية المعبرة عن المعادلة الحركية المتوقعة، و عند الحصول على خط مستقيم تكون الرتبة هي رتبة المعادلة المستخدمة.

٢. طريقة زمن نصف العمر

يلاحظ مما سبق أن زمن نصف عمر التفاعل $t_{0.5}$ يعتمد على التركيز الابتدائي للمادة المتفاعلة بصورة متباينة. و في الحالة العامة يمكن التوصل إلى أن:

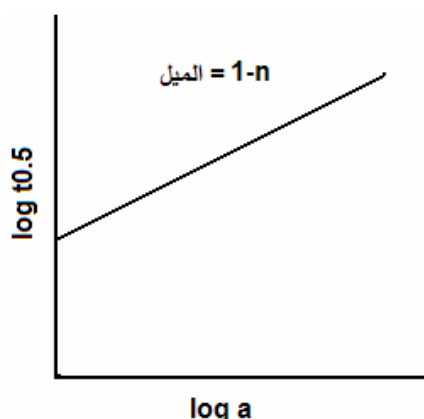
$$t_{0.5} \propto a^{1-n} \quad (1-23)$$

$$t_{0.5} = C a^{1-n} \quad (1-24)$$

حيث C ثابت. و بأخذ لوغاريتم الطرفين نحصل على:

$$\log t_{0.5} = \log C + (1-n) \log a \quad (1-25)$$

وبقياس نصف العمر للتفاعل عند تركيزات ابتدائية مختلفة لأحد المواد المتفاعلة، و ثبوت تركيزات المواد المتفاعلة الأخرى، يمكن الحصول على رتبة التفاعل بالنسبة لهذه المادة من ميل العلاقة بين $\log t_{0.5}$ و $\log a$. و كما هو واضح من الرسم و العلاقة، فإن الرتبة n تساوي $(1 - \text{slope})$. و تكرر العملية بالنسبة للمواد المتفاعلة الأخرى و تكون رتبة التفاعل الكلية هي مجموع الرتب بالنسبة للمواد المتفاعلة جميعا. و يجب التنبيه إلى أن الرسم في الشكل (1-4) يظهر فقط أحد الحالات، و هي عندما يكون الميل موجب و



شكل (1-4): التمثيل البياني لمعادلة تعيين الرتبة وفق طريقة نصف العمر

ذلك يحدث فقط للرتبة الصفرية، و لكن في حالة الرتبة الأولى يكون صفرا، و في حالة الرتبة الثانية يكون سالب واحد.

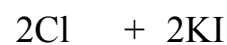
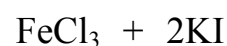
٣. طريقة العزل لأستوالد Ostwald's isolation method:

تستخدم هذه الطريقة في دراسة التفاعلات المعقدة و التي تحتوي على أكثر من مادة متفاعلة. وفيها تستخدم تركيزات أعلى بكثير من كل المواد المتفاعلة باستثناء المادة المراد تحديد رتبة التفاعل بالنسبة لها. و يمكن اتباع طريقة نصف العمر لتعيين الرتبة بالنسبة لهذه المادة. و تكرر العملية لكل المواد المتفاعلة حتى الحصول على الرتبة الكلية للتفاعل.

مثال: درست حركية أكسدة أيون اليوديد بأيون الحديدك وفق المعادلة الكيميائية الآتية:



و استخدمت طريقة استوالد لعزل المادتين المتفاعلتين FeCl_3 , KI , ووجد أن التفاعل رتبته الكلية تساوي ثلاث، حيث يعتمد على $[\text{KI}]^2$ و $[\text{FeCl}_3]$. و يمكن استخدام هذه المعلومات في التوصل إلى ميكانيكية مقبولة للتفاعل، كما يلي:



تبين الميكانيكية أن أيون الحديدك يُختزل و تنطلق ذرة كلور في خطوة بطيئة slow، يتبعها أكسدة اليوديد و خروج اليود في خطوة سريعة fast. و يحتاج إتمام التفاعل إلى حدوث الخطوة البطيئة مرتين.

تأثير درجة الحرارة على سرعة التفاعل:

لما كان التفاعل يحدث نتيجة تصادم الجزيئات المتفاعلة المنشطة، فإنه يمكن إدراك أهمية الحرارة في تسريع التفاعلات. و الغالبية العظمى من التفاعلات الكيميائية يمكن تنشيطها بالحرارة، ويتوقف مدى التنشيط على ما يسمى بطاقة التنشيط (activation energy (E_a). و هي كمية الطاقة الحرارية التي تستخدم في تنشيط المواد المتفاعلة لتتحول إلى نواتج. و تقاس بوحدة J/mol أو cal/mol . و تستخدم عادة معادلة أرهينيوس Arrhenius لتقدير طاقة التنشيط من خلال اعتماد ثابت سرعة التفاعل على درجة الحرارة:

$$k = A \exp(E_a/RT)$$

(1-29)

حيث k ثابت سرعة التفاعل، و T درجة الحرارة المطلقة، و R ثابت عام الغازات و A ثابت للتفاعل.

و بأخذ لوغاريتم الطرفين نحصل على:

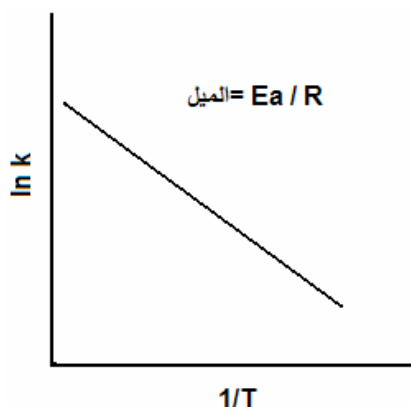
$$\ln k = \ln A -$$

$$E_a/RT \quad (1-30)$$

و برسم علاقة بين لوغاريتم ثابت التفاعل و مقلوب درجة الحرارة المطلقة، يمكن الحصول على طاقة التنشيط وفق المعادلة السابقة و تساوي حاصل ضرب الميل في ثابت الغازات (slope x R). و يعرض الشكل (1-5) للرسم البياني المستخدم لتعيين طاقة تنشيط تفاعل كيميائي. و تعتمد قيمة طاقة التنشيط ووحدة قياسها على قيمة ووحدة ثابت الغازات، حيث :

$$E_a = \text{slope} \times 1.987 \text{ cal/mol} , E_a = \text{slope} \times 8.314$$

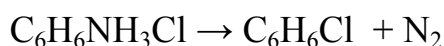
J/mol



شكل (1-5): التمثيل البياني لمعادلة أرهينيوس لتعيين طاقة التنشيط

مسائل:

١. يتبع تفاعل تحلل ملح كلوريد اوزونيوم البنزين الرتبة الأولى و قد سجلت نتيجة التحلل في الجدول:



Time / min	5	20	40	∞
P(N ₂) / mm Hg	5	40	80	200

أ - احسب نصف عمر التفاعل

ب - احسب الزمن اللازم لإنهاء ٩٩٪ من التفاعل.

٢. نصف عمر الراديوم المشع ١٥٩٠ سنة. احسب الزمن اللازم لفقد ٩٠٪ من الإشعاع.

٣. تحتوي عينة أثرية من الخشب على كربون ¹³C بنسبة ٨٠٪ إشعاع. احسب عمر عينة الخشب، علما بأن نصف عمر نظير الكربون ٥٧٣٠ سنة.

٤. وجد في تجربة لتحلل ثنائي اوزونيوم البنزين أن ثابت سرعة التحلل يساوي . احسب الزمن اللازم لخفض التركيز الابتدائي إلى ٩٠٪.

٥. يمثل الجدول الآتي تركيز السلفاميد في الدم:

Time/ hour	2	4	6
C / $\mu\text{g L}^{-1}$	7.2	4.8	3.2

أ - أثبت أن حركية الدواء تتبع تفاعلات الرتبة الأولى.

ب - احسب نصف عمر التفاعل البيولوجي.

٦. يسجل الجدول الآتي نتائج تصبن خلاات الإيثيل مع هيدروكسيد الصوديوم عند ١٥ درجة مئوية،

علما بأن التركيزين الابتدائيين للمادتين المتفاعلتين متساويان و هو 0.01M.

Time / s	120	180	330	530	600
%hydrolyzed	33.0	41.8	58.0	69.0	71.4

أحسب ثابت سرعة التفاعل و زمن نصف عمر التفاعل.

٧. سجل الجدول الآتي لتحلل أكسيد الايثيلين عند ٦٠٠ كلفن وفق المعادلة:



Time / min	10	20	40	100	∞
P _{total} / mm Hg	139.14	151.67	172.65	212.34	249.88

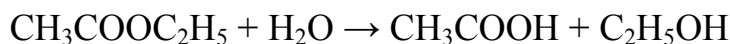
أ - كم الضغط الابتدائي؟

ب - أثبت بيانيا أن التفاعل يتبع الرتبة الأولى.

ج - احسب ثابت سرعة التفاعل.

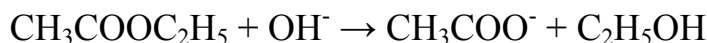
د - احسب زمن نصف عمر التفاعل.

٨. لتفاعل تميؤ خلاات الإيثيل:



وجد أن زمن نصف عمر التفاعل ١٠ ساعات. احسب الزمن اللازم لتميؤ يساوي ٩٠٪.

٩. لتصبن خلاات الإيثيل وفق المعادلة الآتية:



وجد أن زمن نصف عمر التفاعل يساوي ١٠ دقائق عند تركيز ابتدائي يساوي ٠,٠٥ مولار. كما وجد أن

زمن نصف عمر التفاعل يساوي ١٠٠ دقيقة عند تركيز ابتدائي يساوي ٠,٠٠٥ مولار. ما هو التركيز

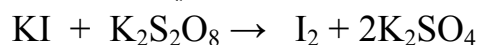
الابتدائي المطلوب ليصبح زمن نصف عمر التفاعل ٢٠٠ دقيقة؟

١٠. يحتاج ٢٠٪ خفض في التركيز الابتدائي لتفاعل من الرتبة الأولى إلى ١٥ دقيقة عند ٤٠

درجة مئوية و إلى ٣ دقائق عند ٦٠ درجة مئوية. احسب طاقة تنشيط التفاعل.

١١. وجد أن نصف عمر تفاعل تميؤ خلات الإيثيل في الوسط الحمضي عند ٢٥ درجة مئوية هو ١٢ ساعة. احسب نصف عمر التفاعل عند ٧٠ درجة مئوية، علما بأن طاقة تنشيط التفاعل تساوي 16.5 كيلو سعر للجزيء.

١٢. يمكن التعبير عن تفاعل اليوديد مع فوق الكبريتات كما يلي:



أ - كيف يمكن أن يصبح التفاعل خاضعا للرتبة الأولى؟

ب - كيف يمكن تتبع التفاعل حركيا؟

ج - اكتب المعادلة المعبرة حركيا عن التفاعل عندما يخضع للرتبة الثانية.

١٣. سجلت النتائج الآتية لتفاعل كيميائي:

Time / min	0	5	15	25
a-x	16.00	10.24	6.13	4.32

أ - أثبت أن التفاعل يتبع الرتبة الثانية.

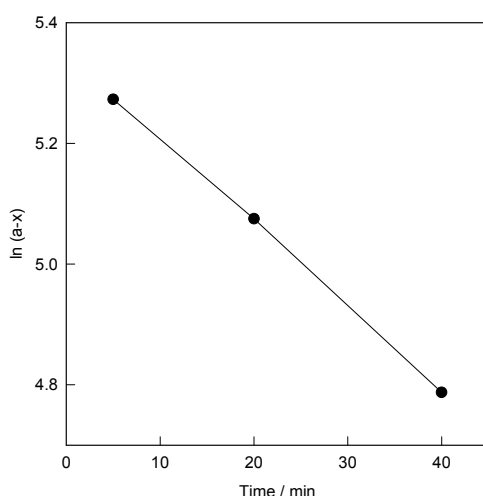
ب - احسب ثابت سرعة التفاعل و زمن نصف عمر التفاعل.

حلول مسائل الوحدة الأولى

١ - أ) من الواضح أن ضغط النتروجين المعطى يمثل ضغط المادة الناتجة كدالة في الزمن (x) و

القيمة عند مالا نهاية هي (a) و عليه يمكن إكمال الجدول و الرسم كما يلي:

Time, min	5	20	40	∞
$P(N_2) = x$	10	40	80	200
$a - x$	190	160	120	



الميل : $k = 0.0139 \text{ min}^{-1}$ و منه يمكن حساب نصف عمر التفاعل:

$$t_{0.5} = 0.693 / k = 0.693 / 0.0139 = 49.8 \text{ min}$$

ب - يعني انتهاء ٩٩٪ من التفاعل أن: $a = 100$ و $x = 99$ ، و يمكن حساب الزمن اللازم كما يلي:

$$t = (1/k) \ln \{a/(a-x)\}$$

$$= (1/0.0139) \ln 100/1 = 331.3 \text{ min}$$

٢ - يحسب أولاً ثابت سرعة تحلل النووي (تتبع عملية التحلل النووي البسيطة الرتبة الأولى

عموماً):

$$k = 0.693 / t_{0.5} = 0.693 / 1590 = 4.4 \times 10^{-4} \text{ year}^{-1}$$

الزمن اللازم لفقد ٩٠٪ من الإشعاع:

$$t = (1/k) \ln \{a/(a-x)\} = 1 / 4.4 \times 10^{-4} \ln 100/10 = 5233 \text{ year}$$

٣ - يحسب أولاً ثابت سرعة التحلل الكربون المشع:

$$k = 0.693 / t_{0.5} = 0.693 / 5730 = 1.2 \times 10^{-4} \text{ year}^{-1}$$

و حيث أن العينة تحتوي على ٨٠٪ من الإشعاع الموجود في الأشجار الحية، فإنه عندما تكون $a = 100$

يكون $a - x = 80$ ، و على ذلك فعمر العينة يمكن حسابه من المعادلة:

$$t = (1/k) \ln \{a/(a-x)\}$$

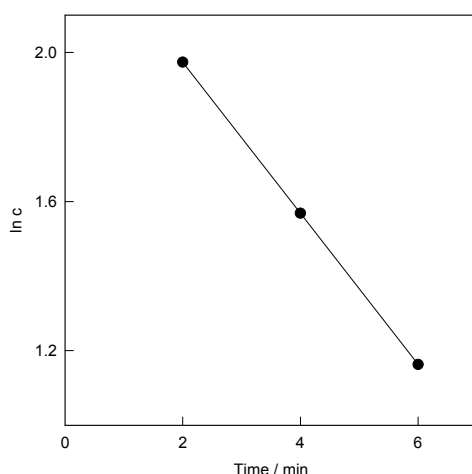
$$= 1 / 1.2 \times 10^{-4} \ln 100/80 = 1859.5 \text{ year}$$

٤ - للحصول على الزمن اللازم للتحلل نفرض أن $a = 100$ و عليه يكون $a-x = 10$ ، و هكذا:

$$t = (1/k) \ln \{a/(a-x)\}$$

$$= 1/5 \times 10^{-4} \ln 100/10 = 4605 \text{ s}$$

٥ - من الواضح أن تركيز الدواء المعطى يمثل $a-x$ و عليه يمكن إثبات أن حركية التفاعل تتبع الرتبة الأولى برسم لوغاريتم تركيز الدواء مقابل الزمن و يكون الميل مساويا لثابت سرعة امتصاص الدواء في الدم و من الأخير يمكن حساب نصف عمر الدواء البيولوجي.

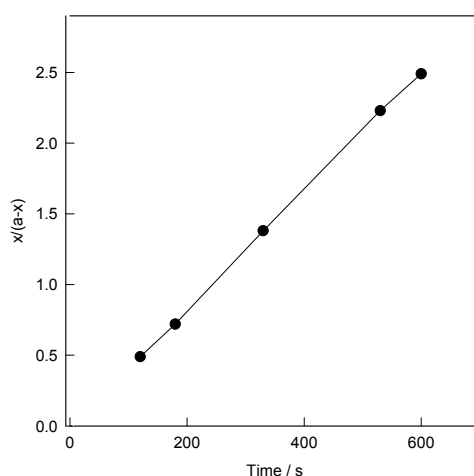


الميل: $k = 0.203$ و عليه يكون نصف العمر البيولوجي:

$$t_{0.5} = 0.693 / k = 0.693 / 0.203 = 3.4 \text{ hour}$$

٦ - يُعبر %hydrolyzed عن x بفرض أن $a = 100$ ، و يمكن تكملة الجدول و رسم علاقة بيانية بين $x/a-x$ و الزمن ، فيكون الميل هو ثابت سرعة التفاعل و ذلك لأن التصبن يتبع الرتبة الثانية.

Time, s	120	180	330	530	600
% hydrolyzed	33	41.8	58	69	71.4
$x/(a-x)$	0.49	0.72	1.38	2.23	2.33



الميل: $k a = 4.22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ويمكن حساب نصف عمر التفاعل من العلاقة:
 $t_{0.5} = 1 / k a = 1 / 4.22 \times 10^{-3} = 237 \text{ s}$

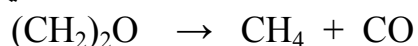
و للحصول على قيمة ثابت سرعة التفاعل يجب التعويض عن التركيز الابتدائي بوحدة التركيز mol/L لكي تكون وحدة الثابت متفقة مع كونه ثابت سرعة تفاعل من الرتبة الثانية (الوحدة $\text{L mol}^{-1} \text{time}^{-1}$):

$$k = 1 / t_{0.5} \quad a = 1 / 237 \times 0.01 = 0.422$$

٧ - أ) الضغط الابتدائي يساوي نصف الضغط المسجل عند زمن مقداره مالا نهاية

$$p_i = 249.88 / 2 = 124.94 \text{ mm Hg}$$

ب) لأن التفاعل غازي يجب معالجته باستخدام الضغط عوضا عن التركيز كما يلي:



$$\text{at } t = 0 \quad P_i \quad 0 \quad 0$$

$$\text{at } t \neq 0 \quad P_i - x \quad x \quad x$$

$$P_t = P_i - x + x + x = P_i + x$$

$$x = P_t - P_i$$

و الآن يمكن كتابة معادلة الرتبة الأولى

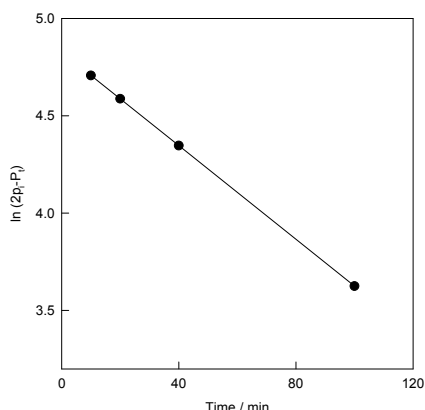
$$k = 1/t \ln a/a-x$$

في الصورة الآتية:

$$k = 1/t \ln P_i / (2P_i - P_t)$$

يكمل الجدول الآتي و ترسم علاقة بين $\ln(2p_i - P_t)$ و الزمن فنحصل على خط مستقيم ميله هو ثابت سرعة التفاعل k .

Time / min	10	20	40	100
P_t / mm Hg	139.14	151.67	172.65	212.34
$2P_i - P_t$	110.74	98.21	77.23	37.54



الميل: $k = 0.012 \text{ min}^{-1}$. نصف عمر التفاعل $t_{0.5} = 0.693 / k = 0.693 / 0.012 = 57.75 \text{ min}$

٨ - تفاعل تميؤ خلاات الايثيل يتبع حركيا الرتبة الأولى و عليه يمكن حساب الزمن اللازم لإتمام ٩٠٪ من التميؤ من معادلة الرتبة الأولى بعد الحصول على ثابت سرعة التفاعل من نصف العمر المعطى :

$$k = 0.693 / t_{0.5} = 0.693 / 10 = 0.0693 \text{ hour}^{-1}$$

$$t = (1/k) \ln(100/10) = 33.22 \text{ hour}$$

٩ - أ) نستخدم المعادلة الآتية للحصول على الرتبة لتصبين خلاات الايثيل:

$$\text{Log } t_{0.5} = \text{const.} + (1-n) \log a$$

و حيث أن هناك ثابتان في المعادلة فإن المطلوب قيمتان لكل من المتغيرين a و $t_{0.5}$ ، و قد أعطيا.

و هكذا:

$$\text{Log } (t_{0.5})_2 / \text{Log } (t_{0.5})_1 = (1-n) \log a_2 / a_1$$

$$(1-n) = \{ \log 100 / 10 \} / \{ \log 0.005 / 0.05 \} = -1$$

$$n = 2$$

ب - للحصول على التركيز a_2 عند $t_{0.5} = 200 \text{ min}$ ، يمكن استخدام العلاقة:

$$\text{Log } (t_{0.5})_2 / \text{Log } (t_{0.5})_1 = (1-n) \log a_2 / a_1$$

$$\text{Log } (t_{0.5})_2 / \text{Log } (t_{0.5})_1 = - \log a_2 / a_1 = \log a_1 / a_2$$

$$\log a_2 = \log \{ a_1 (t_{0.5})_1 / (t_{0.5})_2 \} = \log 10 \times 0.05 / 200$$

$$a_2 = 0.0025 \text{ M.}$$

١٠ - نحسب أولا ثابتا السرعة k عند درجتى الحرارة المعطيتين بفرض أن :

$$T_1 = 40 + 273 = 313 \text{ K}$$

$$T_2 = 60 + 273 = 333 \text{ K}$$

$$t_1 = 15 \text{ min}$$

$$t_2 = 3 \text{ min}$$

$$k_1 = 1/t \ln 100/80 = 1/15 \ln 100/80 = 0.0149 \text{ min}^{-1}$$

$$k_2 = 1/t \ln 100/80 = 1/3 \ln 100/80 = 0.0744 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln k_2/k_1 = (E_a/R) \{(T_2-T_1)/T_2 T_1\}$$

$$E_a = T_2 T_1 R / T_2 - T_1 \ln k_2/k_1$$

$$= (333 \times 313 \times 1.987 / 20) \ln (0.0744/0.0149)$$

$$= 16.67 \text{ kcal mol}^{-1}$$

١١ - نستخدم معادلة طاقة التنشيط (معادلة أرهينيوس) للحصول على ثابت سرعة التفاعل k_2

عند درجة الحرارة ٧٠ درجة مئوية و منها نصف العمر $t_{0.5}$ بدلالة المتغيرات و الثوابت الموجودة

في المعطيات، و لكن بعد الحصول على ثابت سرعة التفاعل k_1 عند درجة ٢٥ مئوية من

نصف العمر المعطى، كما يلي:

$$T_1 = 25 + 273 = 298 \text{ K}$$

$$T_2 = 70 + 273 = 343 \text{ K}$$

$$(t_{0.5})_1 = 12$$

$$E_a = 16.5 \text{ kcal mol}^{-1}$$

$$k_1 = 0.693/12 = 0.0578 \text{ min}^{-1}$$

$$\ln k_2/k_1 = (E_a/R) \{(T_2-T_1)/T_2 T_1\}$$

$$\ln k_2 = (E_a/R) \{(T_2-T_1)/T_2 T_1\} + \ln k_1$$

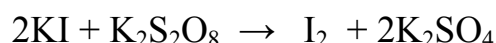
$$\ln k_2 = (16500/1.987) \{55/298 \times 343\} + \ln 0.0578$$

$$\ln k_2 = 4.468 - 2.851 = 1.617$$

$$k_2 = 5.04$$

$$t_{0.5} = 0.693/5.04 = 0.138 \text{ hour} = 8.25 \text{ min}$$

١٢ - تتفاعل فوق الكبريتات مع اليوديد وفق المعادلة:



(أ) يدخل في التفاعل جزيئان وأظهرت الدراسة الحركية أن التفاعل يتبع الرتبة الأولى عندما يتواجد الجزيئان بتركيز متقارب. و يمكن للتفاعل أن يظهر حركية تفاعل من الرتبة الأولى عند استعمال تركيز أعلى كثيرا لأحد المكونين مقارنة بتركيز الآخر.

مثلا يكون $[\text{KI}] = 1 \text{ M}$ بينما $[\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8] = 0.01 \text{ M}$. و يعود السبب في ذلك إلى أن التفاعل لا يعتمد على تركيز المادة إذا تواجدت بصورة لا تتغير تقريبا أثناء التفاعل. و تعد عملية استعمال تركيز أعلى كثيرا لمادة أو أكثر من الطرق القياسية لتحديد المادة حركيا.

(ب) يمكن تتبع التفاعل حركيا بتقدير كمية اليود الناتج من التفاعل بالمعايرة الحجمية مع ثيوكبريتات الصوديوم و في وجود النشا كدليل، و يتم ذلك بسحب عينة تمثل المحلول المتفاعل عند أزمنة مناسبة. و يكافئ حجم الثيوكبريتات حجم اليود الناتج و الذي يمثل المتغير (x). إذا تركنا التفاعل زمناً كافياً للانتهاء، يكون حجم اليود مكافئ للمتغير (a). و هكذا يمكن التعويض في المعادلة المناسبة، مع مراعاة وحدة ثابت التفاعل.

ج - عندما يكون التفاعل خاضعا للرتبة الأولى يحقق المعادلة الآتية:

$$k = x / a t (a-x)$$

حيث a التركيز الابتدائي و x تركيز الناتج و t الزمن و k ثابت سرعة التفاعل.

١٣ - أ) رتبة التفاعل: هي عدد حدود التركيز من المواد المتفاعلة التي تحدد سرعة التفاعل.

ب) ميكانيكية التفاعل: هي الخطوات و المواد المتصورة لحدوث التفاعل و تحقق نتائج التحليل الكيميائي و قوانين الحركة.

ج - زمن نصف عمر التفاعل: هو الزمن اللازم لاستهلاك نصف المواد المتفاعلة (خفض التركيز الابتدائي للنصف).

١٤ - أ) هناك طريقتان لإثبات تحقيق التفاعل لمعادلة الرتبة و هما التعويض عند كل نقطة

والحصول على قيمة ثابتة لثابت سرعة التفاعل، أو الرسم البياني و هو الأفضل و الحصول

على خط مستقيم. و سنعرض فيما يلي الطريقتين:

- طريقة التعويض:

$$k_1 = x / a t_1 (a-x)$$

$$= (16.0 - 10.24) / 16.0 \times 5 \times 10.24 = 0.00703 \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

$$k_2 = x / a t_2 (a-x)$$

$$= (16.0 - 6.13) / 16.0 \times 15 \times 6.13 = 0.00671 \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

$$k_3 = x / a t_3 (a-x)$$

$$= (16.0 - 4.32) / 16.0 \times 25 \times 4.32 = 0.00676 \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

نلاحظ أن قيمة k ثابتة تقريبا و هو ما يعني تحقق المعادلة.

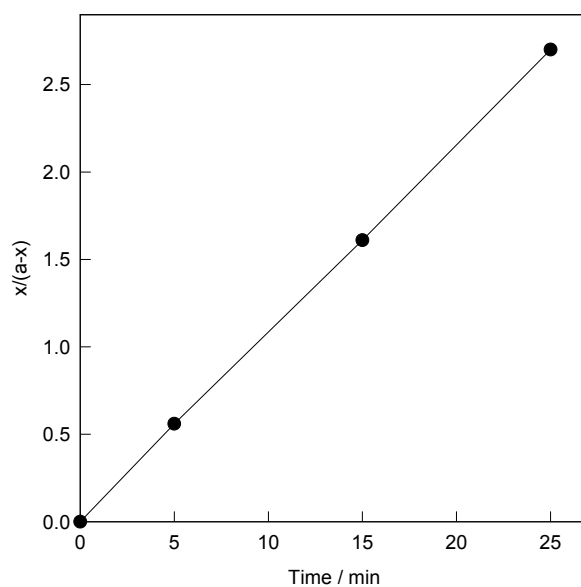
- طريق التمثيل البياني:

Time / min	0	5	15	25
a-x	16.0	10.24	6.13	4.32
x/(a-x)		0.56	1.61	2.70

يوضح الرسم البياني مدى تحقق المعادلة و بصورة أوضح من طريقة التعويض.

من الرسم الميل: $k a = 0.108 \text{ min}^{-1}$ ، وعليه يكون $t_{0.5} = 1/k a = 9.3 \text{ min}$.

ثابت سرعة التفاعل $k = 1/ t_{0.5} a = 1/ 9.3 \times 16.0 = 0.0067 \text{ L mol}^{-1}\text{min}^{-1}$





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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

الحفز الكيميائي

الحفز الكيميائي

١

الجدارة: تحديد المادة الحافزة المناسبة لتفاعل كيميائي ما و كيفية تعظيم الاستفادة من الحفز.

الأهداف:

- أن يحدد المتدرب المادة الحافزة المناسبة لكل تفاعل قابل للحفز ، و التي تسرع التفاعل بوضوح وتستهلك طاقة أقل مقارنة بالتفاعل غير المحفوز.
- أن يزيد المتدرب من كفاءة المادة الحافزة بزيادة مساحة السطح أو اعتبار العاملين الإلكتروني والهندسي
- أن يتجنب المتدرب أو يتخلص من المواد السامة للحفز.
- أن يوظف الطالب الأملاح لحفز التفاعلات الكيميائية التي يدخل فيها أيونات متماثلة الشحنة.

الوقت المتوقع للدراسة: أربع ساعات في الفصل الدراسي.

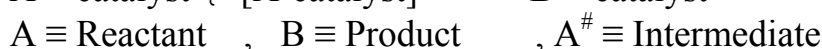
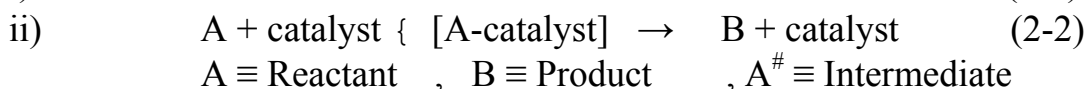
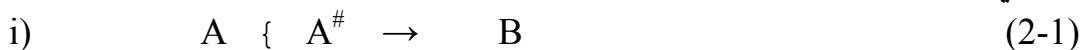
متطلبات الجدارة: دراسة حركية التفاعلات الكيميائية و كيمياء السطوح في هذه الحقبة.

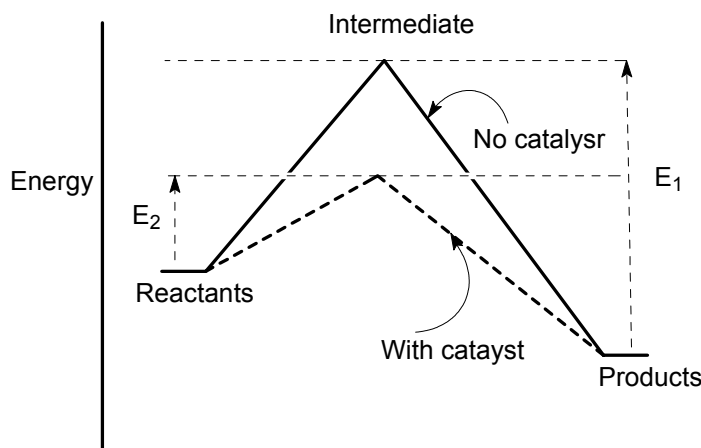
الحفز الكيميائي Chemical Catalysis

هي عملية تسريع للتفاعل الكيميائي، أي زيادة معدل خروج النواتج، من خلال إضافة مادة تسمى المادة الحافزة Catalyst لا تستهلك في التفاعل ولا تبدؤه. وتقوم المادة الحافزة بتغيير مسار التفاعل والاشتراك فيه ثم الخروج مرة ثانية. وتكون طاقة تنشيط مسار التفاعل المحفوز أقل من تلك التي يحتاج إليها التفاعل غير المحفوز. وعملية الحفز الكيميائي لها أهمية اقتصادية كبرى في كثير من الصناعات، حيث أن زيادة سرعة إنتاج المواد واستهلاك طاقة أقل هي من متطلبات الجدوى الاقتصادية للمشروعات. وكثيرة هي الصناعات التي تحتاج إلى مواد حافزة وبدونها لا تقوم هذه الصناعات، ومنها صناعة الأسمدة النتروجينية عبر تحضير الأمونيا، وإنتاج الأحماض المعدنية مثل الكبريتيك والنيتريك، وصناعة تكسير البترول، وصناعة البلمرات مثل البولي إيثيلين، وصناعة هدرجة الزيوت والهيدروكربونات غير المشبعة. وتعد الأنزيمات أرقى المواد الحافزة للتفاعلات الحيوية مثل عملية الهضم وبناء البروتين وتمثيل المواد الغذائية.

المادة الحافزة: هي أي مادة تؤثر على سرعة التفاعل الكيميائي ولا تُستهلك ولا تبدأ التفاعل. إذا قللت المادة من سرعة التفاعل تُسمى مادة حافزة سلبية negative catalyst.

كيفية عمل المادة الحافزة: يسير التفاعل الكيميائي عادة في مسار يشمل عدة خطوات تحتاج كل خطوة إلى طاقة للتنشيط. وكلما كانت طاقة تنشيط التفاعل عالية نتوقع أن يكون التفاعل بطيء ويحتاج إلى مدة بالحرارة لزيادة سرعته. في وجود مادة حافزة جيدة للتفاعل تدخل المادة الحافزة في خطوة أو أكثر من خطوات التفاعل المؤثرة في تحديد سرعته. ويشمل ذلك تكوين مواد وسيطة بين المادة الحافزة والمواد المتفاعلة، ثم يتم في خطوات تالية استرجاع المادة الحافزة وظهور المواد الناتجة. والمحصلة هي زيادة معدل خروج جزيئات النواتج واستهلاك طاقة أقل مقارنة بحالة التفاعل غير المحفوز. ويصور شكل (2-1) عملية الحفز بطريقة مبسطة، حيث يلاحظ أن التفاعل غير المحفوز يحتاج إلى طاقة تنشيط E_1 أعلى من طاقة تنشيط التفاعل المحفوز E_2 . ويمكن كتابة معادلتين للتعبير عن التفاعل غير المحفوز (i) والتفاعل المحفوز (ii) كما يلي:





شكل (1-2): طاقة التنشيط في حالات التفاعلين المحفوز و غير المحفوز

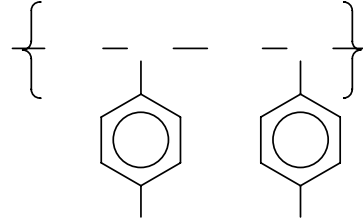
لاحظ أن الحافز يجب أن يدخل التفاعل و يخرج ثانية، أي لا يُستهلك و لا يدخل في تركيب المواد الناتجة. و بجانب هذا التأثير الحفزي السابق شرحه فإن هناك حفز من نوع آخر يخص تفاعلات الإلكتروليتات، و يعرف بتأثير الملح الحفزي catalytic salt effect و سيشرح فيما بعد. أنواع الحفز: بغرض تسهيل الدراسة يمكن تقسيم الحفز الكيميائي إلى قسمين: الحفز المتجانس والحفز غير المتجانس، و ذلك حسب طبيعة الوسط الذي يتم فيه التفاعل و الحالة الفيزيائية التي تتواجد عليها المواد المتفاعلة و المادة الحافزة.

١. الحفز المتجانس: قصد به الحفز الذي يتم في المحاليل و أشباهها مثل الغرويات، و تكون المادة الحافزة و المواد المتفاعلة ذائبة في مذيب مناسب. و عادة تزيد سرعة التفاعل المحفوز طرديا مع زيادة تركيز المادة الحافزة. و من هذه الحوافز الهامة الأحماض و القلويات، و المواد المؤكسدة و المختزلة والمترابكات وغيرها، و حوافز البلمرة، و أخيرا الأنزيمات.

الأحماض و القواعد: هناك كثير من التفاعلات التي يتم التحكم في سرعتها من خلال الحفز بالأحماض والقواعد أو بعبارة أكثر مباشرة من خلال التحكم في الأس أو الرقم الهيدروجيني pH. و يتم ذلك عبر إطلاق أيونات الهيدروجين H^+ ، أو بصورة أكثر واقعية H_3O^+ ، عند استخدام حمض كمادة حافزة. كما تعمل القواعد كمادة حافزة عبر استقبال هذا الأيون أو إطلاق أو توليد أيون OH^- في الوسط. و قد يدخل الحمض أو القاعدة مباشرة في التفاعل و يخرج في خطوة تالية بعد إتمام دوره كمادة حافزة.

و بجانب الأحماض و القواعد البسيطة التركيب مثل أحماض الهيدروكلوريك و الخليك، و مثل هيدروكسيد الصوديوم و هيدروكسيد الأمونيوم، فقد تستخدم البلمرات المحتوية على مجموعات فعالة

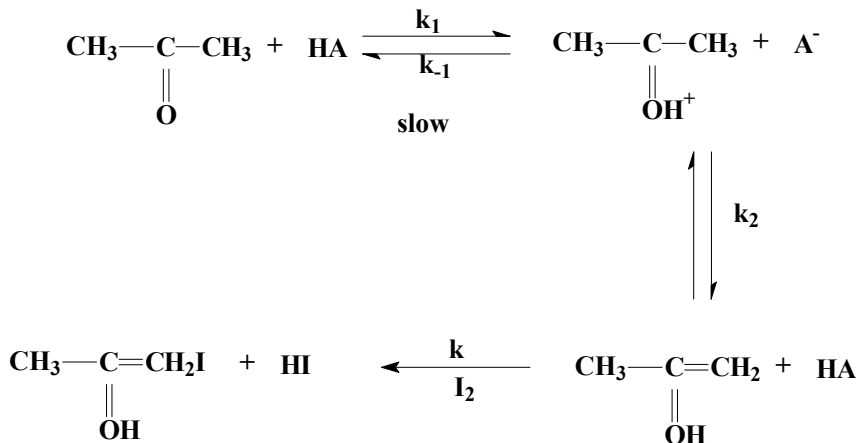
مثل الكربوكسيليك COOH- و السلفونيك SO₃H- ومن أمثلة ذلك استخدام بولي استيرين سلفونيك polystyrenesulfonic acid في حفز التميؤ الحمضي للاستير.



مثال ١: هلجنة الأسيتون

تتأثر سرعة عملية هلجنة الكيتونات ketones (RCOR') و الألدهيدات aldehyde (RCHO) بالرقم الهيدروجيني، ويُعتبر الحمض أو القاعدة مادة حافزة، و تكون سرعة التفاعل أبطأ ما يمكن في الوسط المتعادل وتزيد السرعة مع زيادة تركيز الحمض أو القاعدة. و الهلجنة halogenation هي استبدال ذرة هيدروجين من المركب العضوي بذرة هالوجين، مثل اليود أو البروم أو الكلور أو الفلور. ومن الواضح هنا أن ميكانيكية التفاعل المحفوز تعتمد على نوع المادة الحافزة (حمض أم قاعدة).

أ - في الوسط الحمضي:



و حسب الميكانيكية السابقة تصبح المعادلة المعبرة عن حركية تفاعل الهلجنة في الوسط

الحمضي على الصورة:

$$\text{Rate} = K_2 [\text{CH}_3\text{COHCH}_3^+] [\text{A}^-] \quad (2-3)$$

و يمكن الحصول على تركيز CH₃COHCH₃⁺ باستخدام العلاقة:

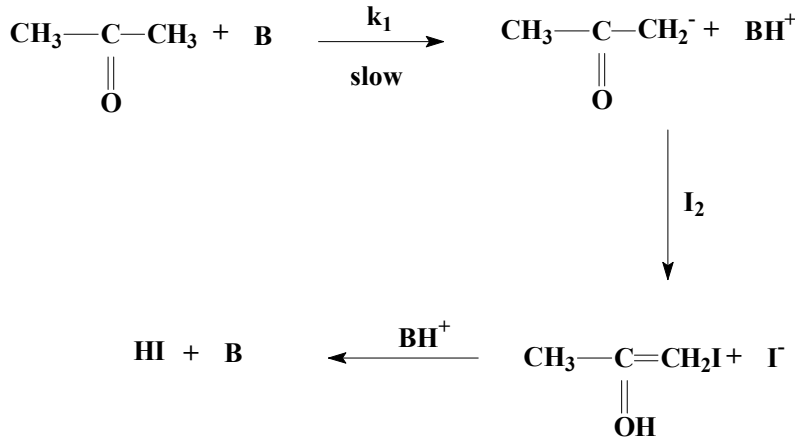
$$K_1 = [\text{CH}_3\text{COHCH}_3^+] [\text{A}^-] / [\text{CH}_3\text{COCH}_3] [\text{HA}] \quad (2-4)$$

$$[\text{CH}_3\text{COHCH}_3^+] = [\text{CH}_3\text{COCH}_3] [\text{HA}] / [\text{A}^-] \quad (2-5)$$

$$(2-5) \text{ Rate} = k_1 k_2 [\text{CH}_3\text{COCH}_3] [\text{HA}]$$

و توضح المعادلة الأخيرة أن سرعة التفاعل Rate تعتمد على تركيز كل من الأسيتون و الحمض.

ب - في الوسط القلوي:



و حسب الميكانيكية السابقة تصبح المعادلة المعبرة عن حركية تفاعل الهلجنة في الوسط

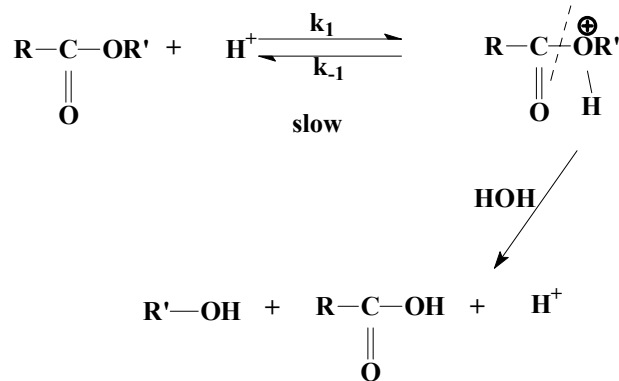
القاعدي على الصورة:

$$\text{Rate} = k_1 [\text{acetone}] [\text{base}] \quad (2-6)$$

حيث يتضح أن سرعة التفاعل Rate تعتمد على تركيز كل من الكيتون و القاعدة.

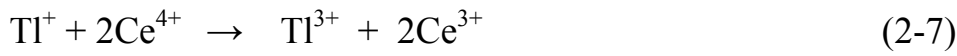
مثال ٢: تميؤ الاستر في الوسط الحمضي

عملية التميؤ هي إضافة الماء، أو بصورة أدق H^+ و OH^- إلى مادة كيميائية فتتحلل المادة إلى نواتج جديدة يدخل في تركيبها الأيونان المكونان للماء. فمثلا تميؤ الملح يُنتج الحمض و القاعدة المكونين للملح، و يُنتج تميؤ الاستر بالمثل الحمض و الكحول المكونين للاستر. و تزيد سرعة عملية تميؤ الاستر مع زيادة تركيز الحمض. و تُفترض الميكانيكية التالية لهذه العملية:

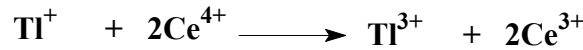
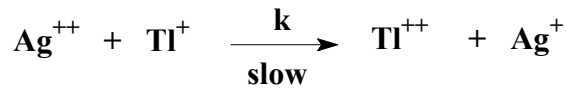
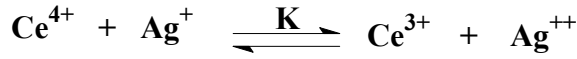


المواد الريدوكسية Redox catalyst: هي مواد أو أيونات يتم أكسدها أو اختزالها أثناء الحفز، ثم تُستعاد الحالة الأصلية في خطوة تالية. و من الأمثلة على هذا النوع من الحفز ما يقوم به أيون الفضة Ag^+ من حفز لأوكسدة أيون التليريوم Ti^+ بايون السريك Ce^{4+} .

التفاعل غير المحفوز:



التفاعل المحفوز يتم وفق الميكانيكية الآتية:



و يمكن استنتاج أن المعادلة الحركية للتفاعل المحفوز على الصورة:

$$\text{Rate} = k [\text{Ag}^{++}] [\text{Ti}^+] \quad (2-8)$$

$$K = [\text{Ce}^{3+}] [\text{Ag}^{++}] / [\text{Ce}^{4+}] [\text{Ag}^+] \quad (2-9)$$

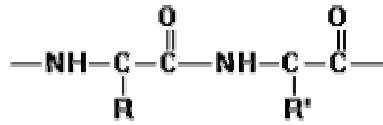
و بالتعويض عن الأيون غير الثابت Ag^{++} من معادلة الاتزان، نحصل على:

$$\text{Rate} = k K [\text{Ti}^+] [\text{Ce}^{4+}] [\text{Ag}^+] / [\text{Ce}^{3+}] \quad (2-10)$$

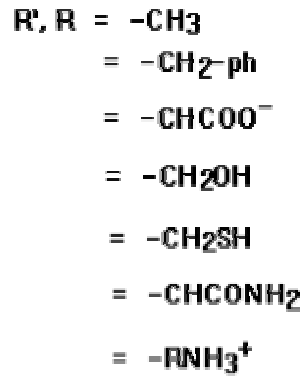
حفز البلمرة Polymerization catalysis:

لعل أشهر الأمثلة على البلمرة الحفزية في الصناعة هو بلمرة الإيثيلين و الأولفينات عموماً، عند الضغوط العادية، باستخدام حافز زيغلر و نطا Ziegler-Natta catalysis، و هو ما جعل الأكياس البلاستيكية الشفافة واسعة الانتشار. و يتكون الحافز من تفاعل هاليدات عناصر انتقالية مثل Ti, Cr, Zr, V مع ألكيل alkyl عناصر غير انتقالية مثل Al, Mg. و من المعروف أنه يصعب جداً بلمرة الإيثيلين وغيره من الأولفينات و الحصول على بلمرات ذات وزن جزيئي عالٍ بدون هذا النوع من الحوافز.

الأنزيمات Enzymes: هي مواد حافزة للتفاعلات الحيوية داخل جسم الكائن الحي. و الأنزيمات على درجة عالية من التخصص بحيث يحتاج كل نوع من التفاعلات إلى أنزيم خاص به. و تتكون الأنزيمات من جزء بروتيني يسمى الببتيد peptide و جزء يحتوي على مجموعات فعالة هي المسؤولة عن الحفز، حيث تلتصق هذه المجموعات بالمادة المتفاعلة في أكثر من مكان و تؤدي إلى إتمام تفاعلها. و يعود تخصص الأنزيم إلى التركيب المتباين للأحماض الأمينية المكونة للجزء البروتيني من الأنزيم.



Peptide linkage



وفي الشكل المبين لتركيب الأنزيم قد تدخل المجموعة الفعالة الممثلة الرمز R أو R' في تفاعلات مخيلية chelation تضمن أيونات معدنية مثل Zn^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} .

ومن الأمثلة على تفاعلات الأنزيمات:

-تحلل السكر و البروتين و النشويات

-تكوين البروتين

-البناء الضوئي للسكر و النشا

-أكسدة الطعام إلى CO_2 و H_2O للحصول على الطاقة

أمثلة على الأنزيمات:

-تميؤ السكريات و يقوم بها أنزيم lysozyme

-تحول النظائر و يقوم بها أنزيم isomerase

- نزع الهيدروجين و يقوم بها أنزيم hydrogenase

و قد يكون الأنزيم متخصصاً في مادة واحدة أو مجموعة فعالة واحدة مثل:

-أنزيم L-lactate hydrogenase

- أنزيم alcohol dehydrogenase

حركية تفاعلات الأنزيمات وفق معادلة ميكلس و منتين Michaelis-Menten:

في كثير من تفاعلات الأنزيمات يمكن وضع الميكانيكية المبينة فيما يلي لوصف تفاعلات

الأنزيمات، حيث E يمثل الأنزيم و R المادة المتفاعلة و RE الوسيط المتكون بين المادة المتفاعلة و الأنزيم و P هو الناتج. و تسمى تلك النوعية من التفاعلات بتفاعلات التشبع و هي كثيرة الوقوع في الأحياء.



و يمكن استنتاج معادلة ميكلس و منتين الحركية كما يلي:

عند الاتزان يكون تركيز الأنزيم الكلى $[E]_t$ موزع بين جزئين، جزء متحد مع المادة المتفاعلة $[RE]$ وجزء حر يمكنه المشاركة في الحفز $[E]$:

$$[E]_t = [RE] + [E]$$

$$k_1 [R] [E] = k_{-1} [RE]$$

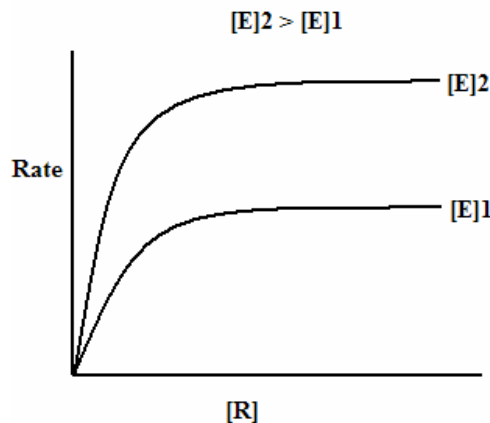
$$[E] = [E]_t - [RE]$$

$$[RE] = \frac{[R] [E]_t}{\frac{k_{-1}}{k_1} + [R]}$$

$$\text{Rate} = k_2 [RE]$$

$$\text{Rate} = \frac{k_2 [R] [E]}{k_M + [R]}, \quad k_{-1}/k_1 = k_M \quad (2-12)$$

و تسمى المعادلة الأخيرة بمعادلة ميكلس و منتين و يسمى الثابت بثابت ميكلس و هو مميز لكل تفاعل بيولوجي. و يمكن تمثيل معادلة ميكلس و منتين بيانيا كما هو موضح في الشكل (2-2). ويتضح من المعادلة أن سرعة التفاعل المحفوز بالأنزيم يزيد مع زيادة تركيز المادة المتفاعلة في البداية، ثم يقل تأثيرها عند الوصول إلى تركيزات عالية. و لكن سرعة التفاعل تزيد مع زيادة تركيز الأنزيم باستمرار.



شكل (2-2): التمثيل البياني لمعادلة ميكلس و منتين

١. **الحفز غير المتجانس:** في هذا النوع من الحفز تكون المادة الحافزة صلبة عادة، و يتم التفاعل على سطحها عبر اشتراك سطح المادة الحافزة مع المواد المتفاعلة في تكوين وسيط نشط يتحول بعد ذلك إلى نواتج، ثم يُستعاد سطح المادة الحافزة مرة أخرى ليدخل مرة ثانية في عملية الحفز. و من الواضح هنا أن سرعة التفاعل المحفوز تعتمد على مساحة السطح المتاحة، و لهذا يجب أن تكون المادة الحافزة على صورة مسحوق دقيق قدر الإمكان لتعظيم الاستفادة منها. و لما كان سطح المادة الحافزة يدخل في تكوين روابط قوية مع المواد المتفاعلة، ثم يحدث تكسير للروابط بعد ذلك، فإنه يجب أن نتوقع نوع من التخصص للمواد الحافزة، و هو ما تحتاج إليه التفاعلات الكيميائية. و على ذلك فهناك مواد حافزة معينة لنوعيات معينة من التفاعلات. و تختلف كفاءة حفز المادة تجاه نفس التفاعل أحيانا مع الشكل البلوري المتواجدة عليه المادة الحافزة. و لفهم ميكانيكية عمل المواد الحافزة الصلبة يجب دراسة ظاهرة الامتزاز adsorption، و قد خصصت الوحدة الثالثة من هذا المقرر لذلك. و على المستوى الصناعي يُعد هذا النوع من الحفز هام للغاية في كثير من الصناعات، مثل صناعة الأسمدة و التي تحتاج إلى تكوين الأمونيا في تفاعل حفزي يلعب فيه الحديد دور المادة الحافزة. و يعتبر تكسير زيت البترول من الصناعات التي تحتاج إلى مواد حافزة، مثل الزيوليت zeolite. و تتطلب عمليات تكوين كثير من الكيماويات الوسيطة و الخاصة بعمليات حفز، مثل نزع ماء الكحول alcohol dehydration، و نزع الهيدروجين dehydrogenation، و الهدرجة hydrogenation، و تكوين الحلقات cyclization. و من أهم المواد الحافزة المعادن و الأكاسيد المعدنية.

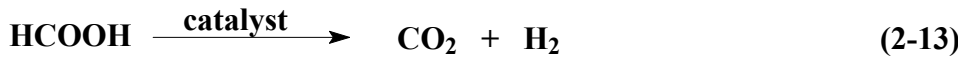
الحفز بالمعادن: تظهر المعادن، و بخاصة التي تنتمي إلى ما يعرف في الجدول الدوري للعناصر بالانقالية transition metals، نشاطا حفزيا واضح، و متخصص أحيانا، تجاه تفاعلات غازية هام على الصعيد الصناعي. و من تلك العناصر: الحديد و النيكل و الكوبالت و الفضة و البلاتين و الذهب و الباليديوم. و من المعروف أن تلك المعادن تقوم بامتزاز كيميائي chemisorption متخصص للغازات. فمثلا يُمتاز الهيدروجين كيميائيا على المعادن W, Ni, Pt، بينما لا يحدث له امتزاز كيميائي على Cu, Al. و تحتاج الغازات المتفاعلة بخاصة إلى مواد حافزة تقربها من بعضها أثناء عملية الامتزاز مما يسرع من التفاعل. و من الممكن تقسيم العوامل المحددة لكفاءة المعدن الحفزية إلى عاملين: عامل إلكتروني electronic factor و عامل هندسي geometric factor.

- **العامل الإلكتروني:** يقصد بالعامل الإلكتروني نوع العنصر و مدى موائمة التركيب الإلكتروني لمدارات التكافؤ في المعدن مع متطلبات الحفز و تكوين روابط مع المواد المتفاعلة. حيث ينتظر حدوث

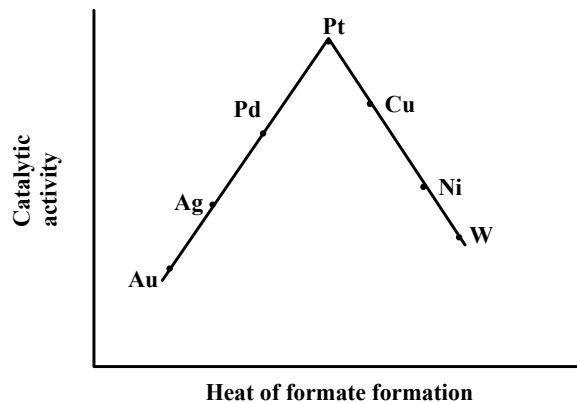
انتقال للإلكترونات بين المعدن الحافز و المادة المتفاعلة أثناء عملية الامتزاز الضرورية لإتمام التفاعل. و يوضح المثال الآتي ذلك.

مثال ١: - نزع الكربوكسيل من حمض الفورميك **formic acid decarboxylation**:

يمكن استخدام أغلب العناصر الانتقالية في حفز تفاعل نزع الكربوكسيل من حمض الفورميك وفق المعادلة:



و في محاولة لتفسير اعتماد سرعة التفاعل على نوع المعدن، أُقترح أن هناك علاقة بين النشاط الحفزي catalytic activity للمعدن و حرارة تكوين ملح فورمات المعدن heat of formate formation. و يصور شكل (2-3) اعتماد النشاط الحفزي للمعدن على حرارة تكوين الفورمات. يظهر الشكل أن هناك زيادة ابتدائية في النشاط الحفزي مع زيادة حرارة تكوين الفورمات، حتى الوصول إلى النهاية العظمى للنشاط في حالة البلاتين، و بعد ذلك يحدث انخفاض في النشاط مع زيادة حرارة تكوين الفورمات. و لتفسير النتائج افترض أن المواد الوسيطة المتكونة من تفاعل حمض الفورميك مع المعدن تشبه في تركيبها ملح الفورمات. و يعني المنحنى البياني بركاني الهيئة أن المعادن التي على يسار المنحنى تكون مع حمض الفورميك أملاح فورمات ضعيفة، و بالتالي يكون تكوين الفورمات هو العامل المحدد لكفاءة الحفز. أما العناصر التي على اليمين فتكون فورمات القوية و يكون تكسير هذه الفورمات هو العامل المحدد لكفاءة الحفز. و يعتبر البلاتين هنا الحالة المثالية التي تقدم أنسب قوة ربط كيميائي مع حمض الفورميك قبل تكسيده.



شكل (2-3): اعتماد نشاط المعادن الحفزي لتكسير حمض الفورميك على حرارة تكوين ملح الفورمات

و لتوضيح ميكانيكية الحفز المعدني يعرض المثال القادم عملية أكسدة غاز أول أكسيد الكربون على معدن البالاديوم Pd، و لهذا التفاعل أهمية تطبيقية حيث يمكن أن يستخدم في المركبات للتخلص من الغاز الضار قبل خروج العادم للجو و تحويله إلى غاز أقل ضررا للبيئة و هو غاز ثاني أكسيد الكربون.

مثال ٢: - أكسدة أول أكسيد الكربون على البالاديوم:



و فيما يلي الميكانيكية المقترحة لعملية الحفز:



حيث S يمثل منطقة حفزية على السطح الحافز.

-العامل الهندسي: يمكن للكثير من المعادن التبلور في أكثر من شكل بلوري، و يتبع ذلك انتظام ذرات المعدن في شبكات بلورية مختلفة الأبعاد. و لما كان تفاعل بعض المواد مع ذرات سطح المعدن أثناء الحفز يتطلب تكوين روابط لها أبعاد محددة، فإن بعض الأشكال البلورية للمعدن قد تظهر نشاطا أعلى من بعض الأشكال الأخرى.

مثال: - تكوين الأمونيا على الحديد



يتم التفاعل وفق الميكانيكية الآتية:



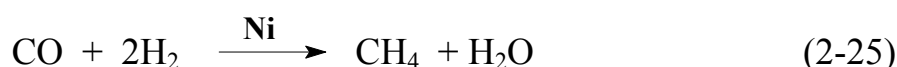
حيث S يمثل منطقة حفزية على السطح الحافز. و يظهر حفز تكوين الأمونيا بالحديد اعتمادا واضح على العامل الهندسي للمادة الحافزة، حيث وجد أن نسب النشاط الحفزي للحديد، عند درجة حرارة ٥٢٥ درجة مئوية و ضغط كلي يساوي ٢٠ جوي، كما يلي:

$$\text{Fe}(111) : \text{Fe}(100) : \text{Fe}(110) = 400 : 25 : 1$$

حيث Fe(111) و Fe(100) و Fe(110) ثلاث صور بلورية للحديد.

تسمم المادة الحافزة: و ترتبط بعملية الحفز أيضا عملية مضادة و هي عملية تسمم المادة الحافزة catalyst poisoning ، و بخاصة عندما تكون المادة الحافزة صلبة. و يقصد بتسمم المادة الحافزة فقدان النشاط الحفزي للمادة بسبب امتزاز (امتصاص على السطح) لبعض المواد بحيث يصبح جزء من السطح غير قادر على المساهمة في عملية الحفز. و يؤدي وجود المادة السامة للحفز و لو بتركيز متناهي في الصغر إلى فقد ملحوظ في النشاط الحفزي. وفي الصناعة يجب مراعاة التخلص من هذه المواد (السموم) قدر الإمكان لضمان استمرار عمل المادة الحافزة.

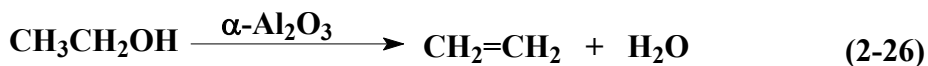
مثال: تسمم النيكل في تفاعل تكوين الميثان ببقايا كبريتيد الهيدروجين:



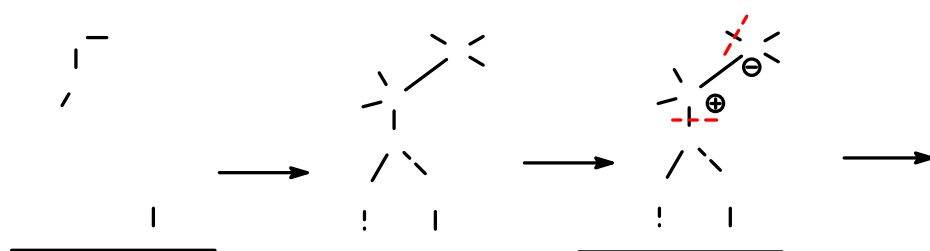
لوحظ التأثير الشديد لتثبيط نشاط النيكل الحفزي تجاه التفاعل السابق في وجود بقايا من كبريتيد الهيدروجين H_2S ، و الذي يتواجد في الأجواء الصناعية و البيئة بصفة عامة.

الحفز بالأكاسيد: تلعب الأكاسيد دورا هاما في الحفز غير المتجانس، و بخاصة أكاسيد المعادن، مثل أكسيد الألومنيوم و أكسيد المنجنيز.

مثال: -نزع الماء من الكحولات على أكسيد الألومنيوم من النوع ألفا



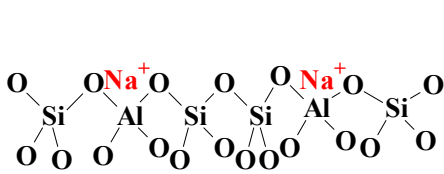
و تُفسر عملية نزع الماء من الكحول بافتراض أن سطح الألومينا (أكسيد الألومنيوم) مُهيدَر جزئياً partially hydrated ، بمعنى وجود جزء من السطح في صورة أكسجين و هيدروكسيل، كما هو مبين في الميكانيكية الآتية:



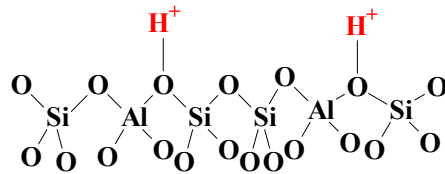
و مما يؤيد الميكانيكية السابقة أن هيدرة hydration الأكسيد (أي تحويل كل السطح إلى هيدروكسيل) يُفضّل الحفز. و لا يبدو أن أيون الألومنيوم (حمض لويس) يدخل في التفاعل حيث لا يؤدي إضافة قاعدة مثل البريدين إلى فشل الحفز.

الزيوليتات Zeolite: هي عبارة عن نوع من الصخور المسامية المنتمية إلى السيليكات الألومنيومية Aluminosilicates (Al, Si, O, Na). و للزيوليت إمكانية استبدال بعض أيوناته مع أيونات المحلول، و

عليه يمكن تعديل الزيوليت ليناسب عملية الحفز المطلوبة، حيث يمكن استبدال جزئي لأيون الصوديوم بأي كتيون مناسب مثل أيون الهيدروجين. والزيوليت قد تكون طبيعية أو صناعية تحضر في المختبر. وتلعب هذه المواد دورا هاما في الحفز المتخصص كحمض أو قاعدة. وتعتبر الزيوليتات في تخصصها تجاه التفاعلات الكيميائية المقابل غير العضوي للأنزيمات. ويعود التخصص الحفزي للزيوليت إلى وجود نوعيات متباينة الحموضة أو القاعدية، و إلى إمكانية التواجد في صورة حافز مسامي دقيق المسام إلى حدود الأبعاد الجزيئية. وتتميز الزيوليتات بالثبات عند درجات حرارة عالية و كفاءة الحفز لارتفاع تركيز المواقع الحفزية داخل مسامها. وهذا يؤهل الزيوليت للعمل كحافز حمضي في كثير من العمليات الصناعية مثل تكسير البترول oil cracking. و يعرض الشكل الآتي لصورتين من صور زيوليت بسيط.

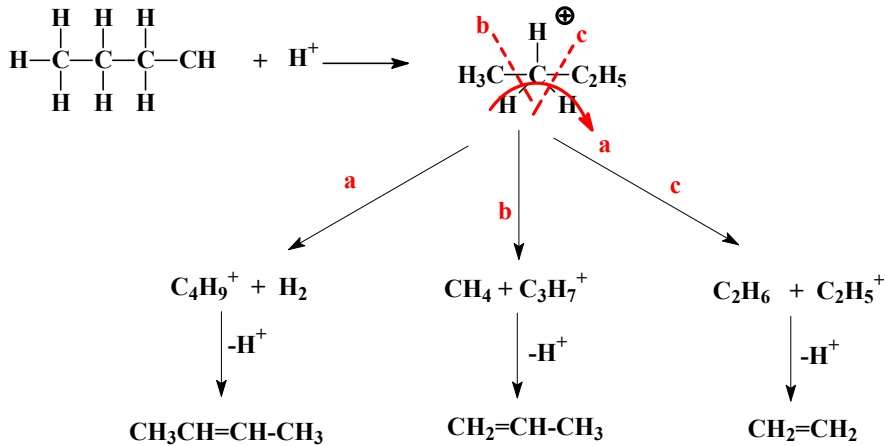


Sodium Form



Hydrogen Form

مثال: تكسير البرفانات paraffins cracking: يتم تكسير البرفانات عبر عملية منح بروتون من الزيوليت للبرفان، يليه عملية تكسير للبرفان و خروج نواتج برفينية أقصر و نواتج أوليفينية olefins، و بالطبع البروتون، كما في تكسير البيوتان العادي n-butane:



تأثير الملح الحفزي catalytic salt effect:

بجانب المواد الحافزة التي تسرع التفاعل من خلال الاشتراك في الخروج من التفاعل، يلاحظ أن للإلكتروليتات تأثير حفزي لتفاعل الأيونات مختلف. ويعزى هذا النشاط الحفزي إلى تأثير الإلكتروليت على التركيز الفعال activity للمواد المتفاعلة من الأيونات. و يختلف التركيز المحضر concentration من المواد الأيونية عن التركيز الفعال، و الذي يحدد نشاط الأيون في التفاعل. ومن المعروف أن التركيز

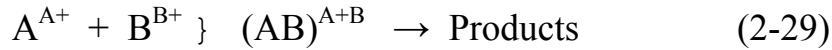
الفعال لأي أيون يعتمد على القوة الأيونية ionic strength للمحلول وفق معادلة ديبياي و هيكل Debye-Huckel:

$$\text{Log } f_{\pm} = - A Z_A Z_B (U)^{1/2} \quad (2-27)$$

حيث f_{\pm} متوسط معامل الفعالية للإلكتروليت، و Z_A و Z_B شحنتا الأيونين المكونين للإلكتروليت، و U القوة الأيونية للمحلول، و A ثابت.

$$U = \frac{1}{2} \sum (m_i Z_i)^2 \quad (2-28)$$

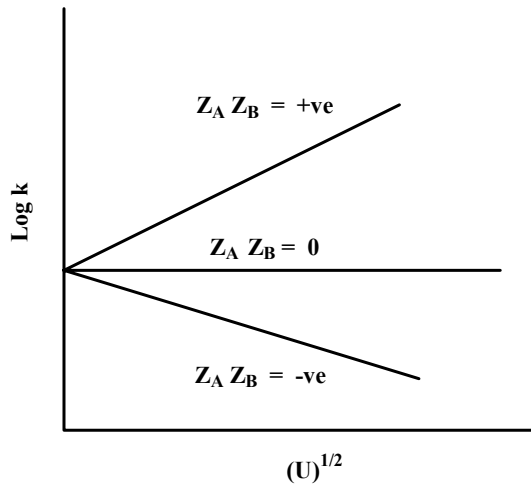
حيث m_i و Z_i هما مولاريتا الأيون و شحنته. و قد درس برونست Brønsted و غيره هذا التأثير على سرعة التفاعلات الأيونية. و بافتراض التفاعل الآتي:



و توصل برونست إلى المعادلة الآتية:

$$\log k = C + A Z_A Z_B (U)^{1/2} \quad (2-30)$$

حيث k ثابت سرعة التفاعل، و C ثابت. و يمكن تمثيل المعادلة السابقة بيانياً، فنحصل على ثلاثة خطوط حسب ناتج ضرب الشحنتين:



- إذا كانت Z_A و Z_B موجتان أو سالتان يحدث حفز موجب و يزيد ثابت سرعة التفاعل مع زيادة قوة المحلول الأيونية.

- إذا كانت Z_A موجبة و Z_B سالبة، أو العكس، يحدث تثبيط للتفاعل، و يقل ثابت سرعة التفاعل مع زيادة قوة المحلول الأيونية.

- إذا كانت Z_A أو Z_B صفر (أي جزيء و ليس أيون)، لا يحدث حفز أو تثبيط و لا يتغير ثابت سرعة التفاعل مع زيادة قوة المحلول الأيونية.

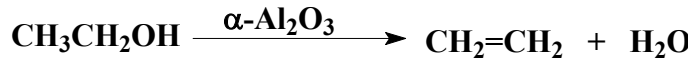
أسئلة:

١. ما المقصود بما يلي:
 أ -المادة الحافزة
 ب -المادة السامة للحوافز
 ج -الحفز غير المتجانس
 د -العامل الهندسي في الحفز بالمعادن
٢. ناقش ميكانيكية نزع الماء من الكحول باستخدام أكسيد الألومنيوم كمادة حافزة.
٣. ناقش ميكانيكية تكوين الأمونيا باستخدام الحديد كمادة حافزة، مع توضيح دور العامل الهندسي.
٤. تكلم عن ما يلي:
 أ -الحفز الملحي
 ب -الزيوليت
 ج -الحوافز الريدوكسية
 د -المعادن كمواد حافزة
٥. ناقش ميكانيكية حفز تميؤ الاستر بالأحماض.
٦. تكلم عن ميكانيكية الحفز بالإنزيمات و معادلة ميكلس و منتن.

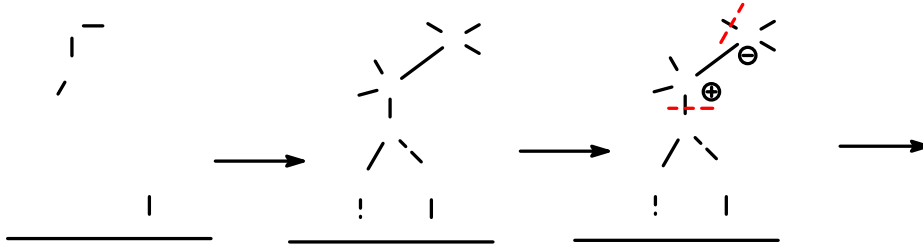
حل مسائل الوحدة الثانية (الحفز الكيميائي)

- أ. المادة الحافزة: هي أي مادة تؤثر (تسرع عادة) على سرعة التفاعل دون أن تستهلك فيه أو تبدأ.
- ب. المادة السامة: هي مادة إذا تواجدت ولو بنسبة بسيطة تؤدي إلى تثبيط عمل المادة الحافزة ، من خلال امتزاز شديد غير عكسي على سطح المادة الحافزة.
- ج. الحفز غير المتجانس: هو الحفز الذي يتم في وسط غير متجانس، و غالبا ما تكون المادة الحافزة صلبة.
- د. العامل الهندسي في الحفز: يحدث ذلك في حالة الحفز بالمعادن لبعض التفاعلات، حيث يلعب الشكل البلوري دورا هاما في كفاءة الحافز، مثل اعتماد تكوين الأمونيا على الشكل البلوري للحديد.

١. ميكانيكية نزع الماء من الكحولات على أكسيد الألومنيوم من النوع ألفا:



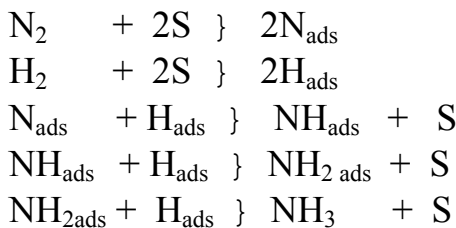
و تفسر عملية نزع الماء من الكحول بافتراض أن سطح الألومينا (أكسيد الألومنيوم) مهيدروجيني، بمعنى وجود السطح في صورة أكسجين و هيدروكسيل، كما هو مبين:



- و مما يؤيد الميكانيكية أن هيدرة الأكسيد (أي تحويل كل السطح إلى هيدروكسيل) يفشل الحفز. ولا يبدو أن أيون الألومنيوم يدخل في التفاعل حيث لا يؤدي إضافة قاعدة مثل البريدين إلى فشل الحفز.
٢. تكوين الأمونيا على الحديد وفق التفاعل العكسي:



و يتم التفاعل وفق الميكانيكية الآتية (حيث S يمثل منطقة حفزية على السطح الحافز):



و يظهر حفز تكوين الأمونيا بالحديد اعتمادا واضحا على العامل الهندسي للمادة الحافزة، حيث وجد أن النشاط الحفزي للحديد عند درجة حرارة ٥٢٥ درجة مئوية و ضغط كلي يساوي ٢٠ جوي كما يلي:

$$\text{Fe(111)} : \text{Fe(100)} : \text{Fe(110)} = 400 : 25$$

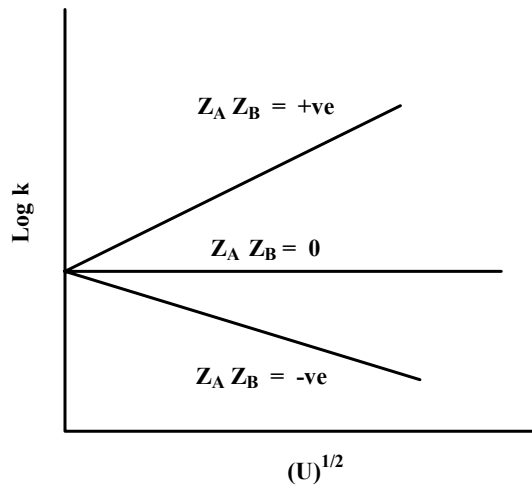
٣. أ - الحفز الملحي: هو ما يلاحظ من تأثير للإلكتروليتات (و بخاصة الأملاح) على سرعة تفاعلات الأيونات. درس برونست Brønsted وغيره هذا التأثير على سرعة التفاعلات الأيونية. و بافتراض التفاعل الآتي:



و توصل برونست إلى المعادلة الآتية:

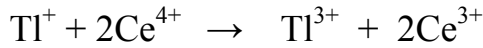
$$\log k = C + A Z_A Z_B (U)^{1/2}$$

ووفق نوعية الشحنات يكون التأثير، كما يوضحه الرسم البياني الآتي:

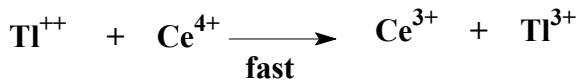
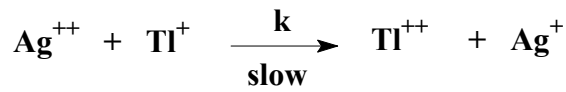


ب - الزيوليت: هي عبارة عن نوع من الصخور المسامية المنتمية إلى السيليكات الألومنيومية Aluminosilicates (Al, Si, O, Na). و للزيوليت إمكانية استبدال بعض أيوناته مع أيونات المحلول، وعليه يمكن تعديل الزيوليت ليناسب عملية الحفز المطلوبة، حيث يمكن استبدال جزئي لأيون الصوديوم بأي كتيون مناسب مثل أيون الهيدروجين. وهي قد تكون طبيعية أو صناعية تحضر في المختبر. و تلعب هذه المواد دورا هاما في الحفز المتخصص كحمض أو قاعدة. و تعتبر الزيوليتات في تخصصها تجاه التفاعلات الكيميائية المقابل غير العضوي للأنزيمات. و يعود التخصص الحفزي للزيوليت إلى وجود نوعيات متباينة الحموضة أو القاعدية، و إلى إمكانية التواجد في صورة حافز مسامي دقيق المسام إلى حدود الأبعاد الجزيئية. و تتميز الزيوليتات بالثبات عند درجات حرارة عالية و كفاءة الحفز لارتفاع تركيز المواقع الحفزية داخل مسامها. و هذا يؤهل الزيوليت للعمل كحافز حمضي في كثير من العمليات الصناعية مثل تكسير البترول oil cracking.

ج - الحوافز الريدوكسية: هي مواد أو أيونات يتم أكسدها أو اختزالها أثناء الحفز ، ثم تستعاد الحالة الأصلية في خطوة تالية. و من الأمثلة على هذا النوع من الحفز ما يقوم به أيون الفضة Ag^+ من حفز لأكسدة أيون التليريوم Tl^+ بايون السريك Ce^{4+} .
التفاعل غير المحفوز:



التفاعل المحفوز يتم وفق الميكانيكية الآتية:



يمكن استنتاج أن المعادلة الحركية للتفاعل المحفوز على الصورة:

$$\text{Rate} = k [Ag^{++}] [Tl^+]$$

$$K = [Ce^{3+}] [Ag^{++}] / [Ce^{4+}] [Ag^+]$$

و بالتعويض عن الأيون غير الثابت Ag^{++} من معادلة الاتزان، نحصل على:

$$\text{Rate} = k K [Tl^+] [Ce^{4+}] [Ag^+] / [Ce^{3+}]$$

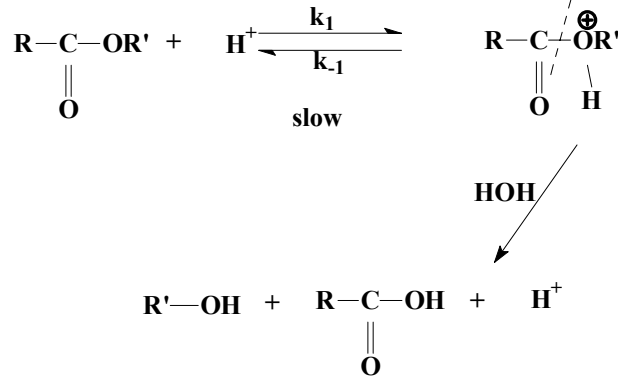
د - المعادن كمواد حافزة: تظهر المعادن، وبخاصة التي تنتمي إلى ما يعرف في الجدول الدوري للعناصر بالعناصر الانتقالية، نشاطا حفزيا واضحا، ومتخصصا أحيانا، تجاه تفاعلات غازية هامة على الصعيد الصناعي. و من تلك العناصر: الحديد و النيكل و الكوبالت و الفضة و البلاتين و الذهب و الباليديوم. ومن المعروف أن تلك المعادن تقوم بامتزاز كيميائي متخصص للغازات. فمثلا يمتز الهيدروجين كيميائيا على المعادن W, Ni, Pt ، بينما لا يحدث له امتزاز كيميائي على المعادن Cu, Al . و تحتاج الغازات المتفاعلة بخاصة إلى مواد حافزة تقربها من بعضها أثناء عملية الامتزاز مما يسرع من التفاعل. و من الممكن تقسيم العوامل المحددة لكفاءة المعدن الحفزية إلى عاملين: عامل إلكترون، و يقصد به نوعية المادة الحافزة، و عامل هندسي، و يقصد به الحالة البلورية للمعدن.

٤. ميكانيكية تميؤ الاستري في الوسط الحمضي: عملية التميؤ هي إضافة الماء، أو بصورة أدق H^+

و OH^- ، إلى مادة كيميائية فتتحلل المادة إلى نواتج جديدة يدخل في تركيبها الأيونان المكونان للماء.

فمثلا تميؤ الملح ينتج الحمض و القاعدة المكونين للملح، و ينتج تميؤ التستر بالمثل الحمض و الكحول

المكونين للاستتر. و تزيد سرعة عملية تميؤ الاستر مع زيادة تركيز الحمض. و تفترض الميكانيكية التالية لهذه العملية:



٥. هي مواد حافزة للتفاعلات الحيوية داخل جسم الكائن الحي. و الأنزيمات على درجة عالية من التخصص بحيث يحتاج كل نوع من التفاعلات إلى أنزيم خاص به. و تتكون الأنزيمات من جزء بروتيني يسمى الببتيد peptide و جزء يحتوي على مجموعات فعالة هي المسؤولة عن الحفز، حيث تلتصق هذه المجموعات بالمادة المتفاعلة في أكثر من مكان و تؤدي إلى إتمام تفاعلها. و يعود تخصص الأنزيم إلى التركيب المتباين للأحماض الأمينية المكونة للجزء البروتيني من الأنزيم. ومن الأمثلة على تفاعلات الأنزيمات: تحلل السكر و البروتين و النشويات و تكوين البروتين والبناء الضوئي للسكر و النشا وأكسدة الطعام إلى CO_2 و H_2O للحصول على الطاقة. و من الأنزيمات: أنزيم lysozyme، و أنزيم isomerase، و أنزيم hydrogenase، و قد يكون الأنزيم متخصصاً في مادة واحدة أو مجموعة فعالة واحدة مثل أنزيم L-lactate hydrogenase، و أنزيم alcohol dehydrogenase. و حركية تفاعلات الأنزيمات كما يعبر عنها بالميكانيكية الآتية:



تتم عادة وفق معادلة ميكلس و منتين:

$$\text{Rate} = \frac{k_2 [\text{R}] [\text{E}]}{k_M + [\text{R}]}$$

و يتضح من المعادلة أن سرعة التفاعل المحفوز بالأنزيم يزيد مع زيادة تركيز المادة المتفاعلة في البداية، ثم يقل تأثيرها عند الوصول إلى تركيزات عالية. و لكن سرعة التفاعل تزيد مع زيادة تركيز الأنزيم باستمرار.



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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

كيمياء السطح

تصميم وتنفيذ

٢

الجدارة: معرفة خواص السطوح السائلة و الصلبة و دور السطوح في الحفز الكيميائي.

الأهداف :

١. أن يعين الطالب مساحة سطح بودرة من الامتزاز الكيميائي.
٢. أن يقدر الطالب قدرة المواد المازة على امتزاز مواد معينة.
٣. أن يعين الطالب قطر الثقب المتوسط و عدد المسام في الوحدة الوزنية من مادة صلبة مسامية مثل الفحم.
٤. أن يحدد الطالب نوع الامتزاز من شكل منحنى الإمتزاز.

الوقت المتوقع للدراسة: أربع ساعات في الفصل الدراسي.

متطلبات الجدارة: دراسة وحدة الديناميكا الحرارية الكيميائية في هذه الحقيبة.

كيمياء السطح:

يتميز السطح البيني بين الأطوار أحيانا بنشاط غير معتاد مقارنة بنشاط وسط الطور، مما يجعل دراسة السطح البيني بين الأطوار مهماً في الكيمياء وبخاصة في دراسة الحفز الكيميائي غير المتجانس وكذلك الغرويات والكيمياء الكهربائية. وتهتم كيمياء السطح بهذه الدراسات وخاصة ظاهرة الامتزاز (الامتصاص) adsorption وتعني تركيز مادة ما على سطح مادة أخرى بسبب قوى التجاذب بين المادة المازة adsorbent والمادة الممتزة adsorbate. أما الامتصاص absorption فهو تشبع مادة في كل أجزائها بالمادة الممتصة.

صور الامتزاز:

١. إمتزاز سائل على سائل: عند إضافة كمية صغيرة من مادة نشطة سطحياً surfactant، مثل الأحماض الدهنية طويلة السلسلة الكربونية، إلى الماء تترتب جزيئات الحمض الدهني على سطح الماء و تؤثر على توتره السطحي. و مثل هذا النوع من الامتزاز هام لصناعة المنظفات والتشحيم والمستحلبات.

٢. إمتزاز غاز على صلب: سندرس هذا النوع بتوسع لأهميته في صناعة المواد الحافزة catalysts الضرورية لتصنيع كثير من المواد، مثل الأمونيا والبلمرات والمهدرجات والأحماض المعدنية. و في عملية امتزاز غاز على صلب يجب التنبيه إلى أن الغاز لا يخرق الصلب و إلا كانت العملية امتصاصاً و ليست إمتزازاً. و قد تتكون طبقة ممتزة واحدة أو أكثر على سطح الصلب، حسب نوع الامتزاز (كيميائي أو فيزيائي). و يلخص الجدول (1-3) الفروق بين النوعين. و من الواضح أن الامتزاز الكيميائي Chemisorption هو الأهم في الدراسات الكيميائية من الامتزاز الفيزيائي Physisorption.

جدول (3-1): الفروق بين الامتزاز الكيميائي و الامتزاز الفيزيائي.

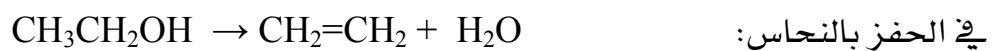
الإمتزاز الفيزيائي Physisorption	الإمتزاز الكيميائي Chemisorption
-تتكون طبقات عديدة على السطح -لا تزيد حرارة الامتزاز عن ١٠ كيلو سعر للجزيء -لا تعتمد على الغاز الممتز فقط -تحدث عند درجات أقل من غليان الغاز الممتز -يزيد معدل الامتزاز مع زيادة ضغط الغاز الممتز -قوى التجاذب هي قوى فان درفال	-تتكون طبقة واحدة على السطح -حرارة الامتزاز أعلى من ٢٠ كيلو سعر للجزيء -تعتمد على نوع الغاز الممتز و المادة المازة -يمكن أن تحدث في درجات الحرارة العالية -يقل معدل الامتزاز مع زيادة ضغط الغاز الممتز -تتكون روابط كيميائية بين الغاز الممتز والمادة المازة

حرارة الإمتزاز: في جميع عمليات الامتزاز تنطلق حرارة تسمى حرارة الإمتزاز. أي أن عملية الامتزاز هي عملية طاردة للحرارة exothermic. ويعود السبب في ذلك إلى قانون الديناميكا الحرارية الآتي:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3-1)$$

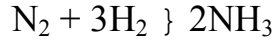
حيث ΔH حرارة الامتزاز و ΔS التغير في الأنتروبي و ΔG التغير في الطاقة الحرة و T درجة الحرارة المطلقة. وكما سيُدرس في وحدة الديناميكا الحرارية (الوحدة الخامسة)، فإن ΔG هي مقدار سالب لعملية تلقائية مثل الإمتزاز، و في عملية الامتزاز ΔS سالبة بسبب انخفاض عشوائية الغاز و انتظامه على سطح المادة المازة مقارنة بحالة الغاز قبل الإمتزاز. و هكذا يجب أن تكون ΔH سالبة دائماً. في الامتزاز الكيميائي تتكون روابط كيميائية، و لهذا تكون أكبر من ٢٠ كيلو سعر للجزيء، بينما لا تتكون روابط كيميائية في حالة الامتزاز الفيزيائي، بل عملية تكثيف للغاز الممتز، لهذا لا تزيد حرارة الامتزاز الفيزيائي عن ١٠ كيلو سعر للجزيء. و لما كانت الروابط الكيميائية تتكون بين ذرات معينة وفق تركيبها الالكتروني، فإن الامتزاز الكيميائي هو امتزاز متخصص، يعتمد على نوع الغاز و المادة المازة.

مثال: يختلف ناتج تكسير الكحول الإيثيلي حسب المادة الحافزة ، نحاس أم ألومينا:

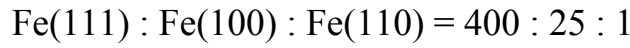


التفاعل الأول في وجود النحاس يسمى نزع الماء dehydration و التفاعل الثاني في وجود ألومينا يسمى نزع الهيدروجين dehydrogenation.

أيضا تعتمد سرعة التفاعل ، ليس على نوع مادة الحافز ، بل على التركيب البلوري في بعض الأحيان.
مثال: تصنيع النشادر (الأمونيا) في وجود الحديد كعامل حافز:



حيث وجد أن سرعة التفاعل تعتمد على نوع بلورة الحديد :



يمتاز الهيدروجين كيميائيا على المعادن W, Ni, Pt ، بينما لا يحدث له امتزاز كيميائي على Cu, Al. و بالطبع يمكن امتزاز الهيدروجين فيزيائيا على الجميع. في الامتزاز الفيزيائي لمجموعة من الغازات على نفس المادة المازة يزيد مقدار الامتزاز مع انخفاض الدرجة الحرجة لإسالة الغاز. يعرض الجدول (3-2) كمية الغاز الممتز على جرام واحد من الفحم عند درجة حرارة ٢٥ مئوية و ضغط جوي مساو للوحدة.

جدول (3-2): اعتماد كمية الغاز الممتز على نوع الغاز الممتز أو درجة الإسالة للغاز.

الغاز	كمية الغاز الممتز / سم ³	درجة الإسالة / درجة مئوية
ثاني أكسيد الكبريت SO ₂	٣٤٠	١٥٧
الأمونيا NH ₃	١٣٦	١٣٠
ثاني أكسيد الكربون CO ₂	٦٠	٣١
نتروجين N ₂	١١	١٤٧-
هيدروجين H ₂	٢	٢٤٦-

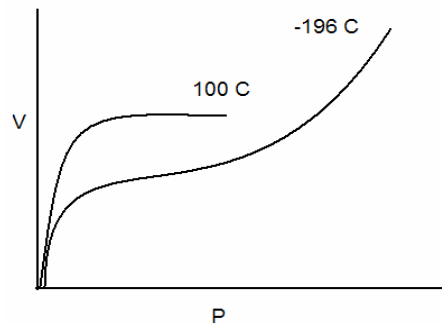
أيزوثرم الامتزاز Adsorption isotherm

الأيزوثرم هو علاقة بين متغيرين في العملية أو التفاعل عند ثبوت درجة الحرارة، مثل تغير ضغط غاز مع حجمه عند درجة حرارة ثابتة أو تغير كمية الغاز الممتز مع ضغط الغاز عند درجة حرارة معينة. وتسمى العلاقة الرياضية و كذلك التمثيل البياني لها أيزوثرم. في عملية الامتزاز يكون الأيزوثرم عبارة عن علاقة أو رسم بين كمية الغاز الممتز و ضغط الغاز. و كثيرا ما يؤخذ حجم الغاز الممتز عند الظروف القياسية (STP = 1 atm , 0 °C) كمعبر عن كمية الغاز الممتز. و من التجارب أمكن ملاحظة تعدد أشكال أيزوثرم الإمتزاز، حسب نوع الغاز و المادة الصلبة المازة و كذلك درجة الحرارة. و يعرض الشكل (3-1) لأيزوثرم امتزاز النتروجين عند درجتى الحرارة ١٠٠ و -١٩٦ مئوية على الفحم الحيواني.

عند درجة الحرارة العالية يحدث الامتزاز الكيميائي فقط، بينما يحدث النوعان عند درجة الحرارة المنخفضة. و يمكن تمثيل عملية الامتزاز بالمعادلة الآتية:



و كقاعدة عامة، تقل كمية الغاز الممتز مع رفع درجة الحرارة، بينما تزيد مع ارتفاع الضغط وفق قاعدة لوشاتليه. تقول القاعدة أن العملية، عند الاتزان، تقاوم المؤثر مثل درجة الحرارة أو الضغط بالتحرك في



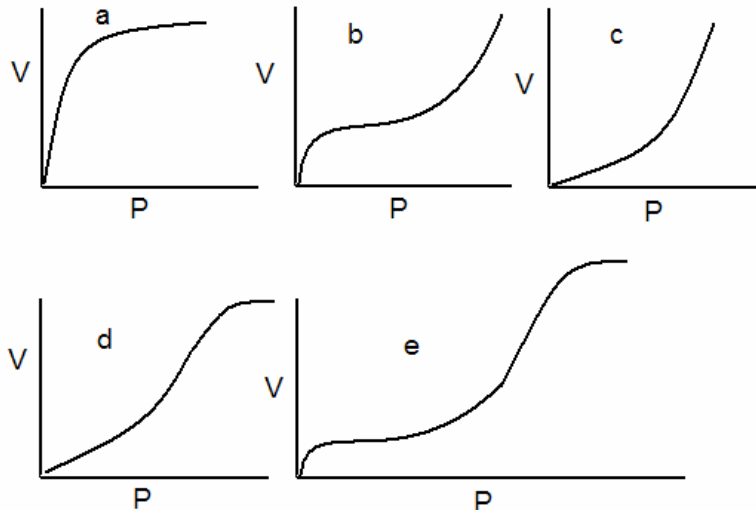
شكل (3-1): أيزوثرم امتزاز النتروجين عند درجتى الحرارة ١٠٠ و -١٩٦ مئوية على الفحم الحيواني.

الاتجاه المعاكس للمؤثر. في المعادلة (3-2) تنتج حرارة يقاومها التفاعل بتقليل كمية الغاز الممتز، وحيث أن الامتزاز يصاحب بانخفاض الضغط نتيجة الامتزاز فزيادة الضغط تؤدي إلى مزيد من الإمتزاز.

أشكال أيزوثرم الإمتزاز:

يمكن تلخيص الحالات المختلفة لأيزوثرم الامتزاز في الخمسة أشكال المبينة في الشكل (3-2)، ويسببها ثلاث أنواع مختلفة من الامتزاز وهي:

١. إمتزاز الطبقة الواحدة monolayer وهو النوع الكيميائي (شكل a).
٢. إمتزاز الطبقات المتعددة على سطح مصمت non-porous وهو من النوع الفيزيائي (أشكال b-c).
٣. إمتزاز الطبقات المتعددة على سطح مسامي porous وهو من النوع الفيزيائي (أشكال d-e). وهو يشمل أيضا التكثيف في المسام و الأنابيب الشعرية. لاحظ أن الشكلين b, e يظهران كلا من الامتزاز الكيميائي (في المرحلة الأولى) و الامتزاز الفيزيائي (فيما بعد). يتضح من الشكل a أن الامتزاز الكيميائي يؤدي إلى حالة تشبع مع ارتفاع الضغط، حيث لا تزيد كمية الغاز الممتز بعد الوصول إلى حالة التشبع. وتسمى كمية الغاز الممتز للوصول إلى حالة التشبع بسعة الطبقة الواحدة، و لها أهمية كبرى في تقدير مساحة سطح المواد المجزأة تجزئة دقيقة في صورة مسحوق. يفسر الامتزاز الكيميائي بعدة نماذج، لعل من أبسطها أيزوثرم لانجمير Langmuir isotherm.

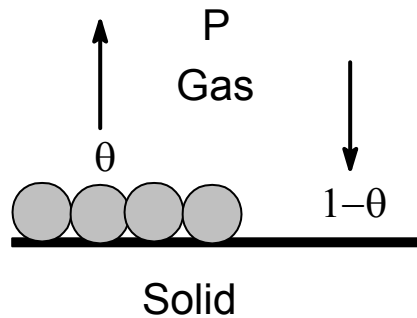


شكل (3-2): أيزوثرم الإمتزاز في الحالات المختلفة.

أيزوثرم لانجمير:

الافتراضات:

١. سمك الطبقة الممتزة على سطح الصلب الماز لا تزيد عن طبقة واحدة غير متحركة.
٢. عملية الامتزاز هي عملية اتزان ديناميكي يتساوى فيها معدل الامتزاز على الجزء العاري من السطح مع معدل تبخر الغاز الممتز من الجزء المغطى من السطح ، انظر الشكل (3-3).
٣. حرارة الامتزاز لا تعتمد على كمية الغاز الممتز.



شكل (3-3): الاتزان الديناميكي لعملية الامتزاز وفق لانجمير.

الاشتقاق:

بتطبيق الافتراض الثاني نحصل على: معدل الإمتزاز (V_f) = معدل التبخر (V_b)

$$V_f = K_f P (1 - \theta) \quad (3-3)$$

$$V_b = K_b \theta e^{-Q/RT} \quad (3-4)$$

حيث K_f ثابت يعطى من النظرية الحركية للغازات، و P ضغط الغاز، و θ هو كسر السطح المغطى، و $(1 - \theta)$ هو كسر السطح العاري، و K_b ثابت، و Q حرارة الامتزاز و R ثابت الغازات و T درجة الحرارة المطلقة. من تساوي المعادلتين (3-3) و (3-4) نستطيع الحصول على المعادلة المبسطة:

$$\theta / (1 - \theta) = K P \quad (3-6)$$

حيث $K = (K_f / K_b) e^{Q/RT}$ ، و هو ثابت يعتمد على نوع الغاز و المادة الصلبة. و المعادلة (3-6) هي أيزوثرم لانجمير، و يمكن إعادة كتابته على الصورة:

$$\theta = K P / (1 + K P) \quad (3-7)$$

و عمليا يقدر كسر السطح المغطى بالمقدار:

$$\theta = V / V_m \quad (3-8)$$

حيث V هو حجم الغاز الممتز و V_m هو سعة الطبقة الواحدة (أقصى حجم من الغاز الممتز لتكوين

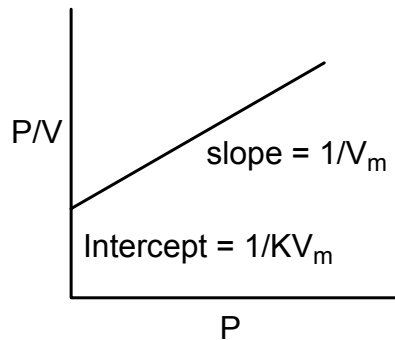
طبقة واحدة كاملة) و ذلك عند $\theta = 1$. من المعادلتين (3-7) و (3-8) نحصل على المعادلة:

$$V/V_m = K P / (1 + K P) \quad (3-9)$$

وللحصول على ثابت الإمتزاز K و سعة الطبقة الواحدة V_m ، نقوم بإعادة ترتيب المعادلة (3-9) للحصول على المعادلة الآتية:

$$P/V = 1/KV_m + P/V_m \quad (3-10)$$

من الرسم البياني للمعادلة السابقة كما في الشكل (3-4)، نحصل على الميل و يساوي مقلوب سعة الطبقة الواحدة، و القاطع و يساوي مقلوب حاصل ضرب ثابت الاتزان و سعة الطبقة الواحدة. و ثابت الاتزان يعطى بقسمة الميل على القاطع.



شكل (3-4): الرسم البياني لمعادلة لانجمير.

تقدير مساحة السطح: من أهم تطبيقات أيزوثرم لانجمير هو تقدير مساحة سطح مسحوق المادة المازة. ولأهمية ذلك في الحفز الكيميائي و غيره من التطبيقات نُوضح الطريقة. يتم عمليا دراسة امتزاز غاز معلوم مساحة السطح التي يشغلها جزيء واحد من الغاز على سطح المادة المطلوب معرفة مساحة سطح الجرام منها. يتم تعيين كسر السطح المغطى كدالة في ضغط الغاز، ثم يرسم علاقة بيانية مثل الرسم السابق وتُعين منه سعة الطبقة الواحدة V_m . نطبق العلاقة الآتية للحصول على مساحة السطح لكل جرام من المادة عند استخدام غاز النتروجين:

$$A(m^2) = V_m (cm^3) \times 6.02 \times 10^{23} \times 16.2 (\text{\AA}^2) \times 10^{-20} / 22414 \quad (3-11)$$

حيث المقدار 16.2\AA^2 هو المساحة التي يشغلها جزيء النتروجين، و المقدار 6.02×10^{23} هو عدد أفوجادرو، و المقدار 22414 هو حجم المول من الغاز عند الظروف القياسية (1 atm, 273K). و يجب التنبيه إلى أن سعة الطبقة الواحدة يتم استخدامها عند الظروف القياسية. و يمكن عمليا تعيين سعة الطبقة الواحدة عن أي درجة حرارة و بعد ذلك يتم تقديرها عند الظروف القياسية وفق المعادلة الآتية، بفرض صحة قانون الغاز المثالي:

$$P^0 V_m / T^0 = P V / T \quad (3-12)$$

حيث V هي السعة المعينة عمليا عند درجة الحرارة T و الضغط P و $P^0 = 1 \text{ atm}$ و $T^0 = 273 \text{ K}$.

تعيين حرارة الامتزاز (Q): بتطبيق معادلة كلاوسيوس و كليرون على الامتزاز الكيميائي كعملية إتزان، يمكن حساب حرارة الامتزاز من معرفة الضغط اللازم للوصول إلى كمية ممتزة معينة من الغاز عند درجات حرارة مختلفة. عند استعمال درجتى الحرارة T_1 , T_2 نحصل على الضغطين P_1 , P_2 اللازمين للوصول إلى نفس كسر السطح المغطى، و هكذا:

$$\ln (P_2/P_1) = (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \} \quad (3-13)$$

عندما يكون الامتزاز الكيميائي وفق أيزوثرم لانجمير، يمكن الاستفادة من ثابت الاتزان عوضا عن الضغط، حيث إنه لنفس كسر السطح المغطى يكون $K \propto 1/P$. و على ذلك:

$$\ln (K_1/K_2) = (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \} \quad (3-14)$$

سؤال ١: احسب حرارة امتزاز النتروجين على الفحم الحيواني عند امتزاز حجم مقداره ٠,٩ سم^٣ لكل جرام، علما بأن الضغط عند ١٩٠ كلفن كان ٤,٨ جوي و كان ٣٢ جوي عند ٢٥٠ كلفن.
الحل: نطبق العلاقة

$$\begin{aligned} \ln (P_2/P_1) &= (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \} \\ \ln (32/4.8) &= (Q/2) \{ (250-190)/190 \times 250 \} \\ Q &= 3003.7 \text{ cal mol}^{-1} \end{aligned}$$

سؤال ٢: احسب مساحة جرام من مادة حافزة تمتز النتروجين حتى سعة الطبقة الواحدة ٢,٨٦ سم^٣ عند الظروف القياسية.

الحل: نطبق العلاقة

$$\begin{aligned} A(m^2) &= V_m (cm^3) \times 6.02 \times 10^{23} \times 16.2 (\text{\AA}^2) / 22414 \\ &= 2.86 \times 6.02 \times 10^{23} \times 16.2 (\text{\AA}^2) \times 10^{-20} / 22414 \\ &= 124.4 m^2 \end{aligned}$$

أيزوثرم تمكن: افترض لانجمير في اشتقاق أيزوثرمه أن حرارة الامتزاز ثابتة و لا تعتمد على كسر السطح المغطى و أن الجزيئات الممتزة لا تتحرك على السطح. الواقع أن هذا غير دقيق، و لمعالجة ذلك اشتق تمكن أيزوثرم يأخذ في الاعتبار اعتماد حرارة الامتزاز على كسر السطح المغطى، على الصورة:

$$Q = \Delta H^0 (1 - \beta \theta) \quad (3-15)$$

حيث ΔH^0 هي الغير في الإنثالبي القياسي للإمتزاز و β ثابت. حسب الافتراض يجب أن تقل حرارة الامتزاز كلما زاد كسر السطح المغطى. بإدخال التعديل تصبح المعادلة (3-4) في الصورة:

$$V_b = K_b \theta \exp \{ - \Delta H^0 (1 - \beta \theta) / RT \} \quad (3-16)$$

و بالتقدم مثل لانجمير نساوي $V_f = V_b$ ، لنحصل على

$$K_f P (1 - \theta) = K_b \theta \exp \{ - \Delta H^0 (1 - \beta \theta) / RT \} \quad (3-17)$$

و لتبسيط العلاقة السابقة، نجمع المقادير الثابتة في ثابت واحد فنحصل على

$$D P = \{ \theta / (1 - \theta) \} \times e^{C_0} \quad (3-18)$$

$$D = K_f / K_b \exp \{ \Delta H^0 / RT \} \quad (3-19)$$

$$C = \Delta H^\circ \beta / RT \quad (3-20)$$

عند درجات امتزاز متوسطة، يمكن اعتبار أن: $(1 - \theta) \approx 1$ ، و تصبح المعادلة (3-18)، بعد أخذ لوغاريتمي الطرفين، على الصورة:

$$\theta = (1/C) \ln P + G \quad (3-21)$$

حيث: $G = (1/C) \ln D$. المعادلة (3-21) هي أيزوثرم تمكّن، ويمكن ملاحظة أن θ تزيد خطياً مع P ، وهي تنطبق عند درجات امتزاز متوسطة $\theta \approx 0.5$.

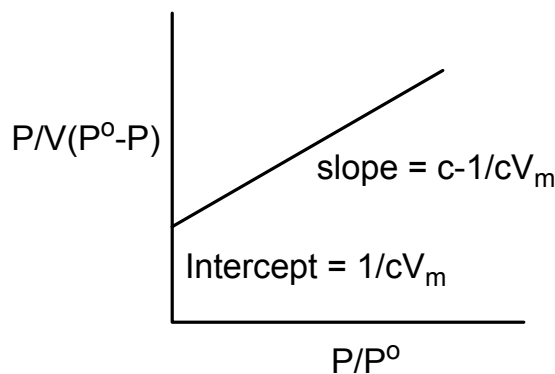
معادلة BET: توصل إلى هذه المعادلة العلماء: برانور وإميت و تيلر Brunauer-Emmett-Teller، وهي للإمتزاز الفيزيائي متعدد الطبقات. و تستنتج المعادلة وفق طريقة لانجمير و بنفس الافتراضات و لكن يسمح هنا بتعدد الطبقات الممتزة. وتكتب المعادلة على الصورة:

$$\frac{V}{V_m} = \frac{C(P/P^\circ)}{[1 - (P/P^\circ)] [1 + (P/P^\circ) (C - 1)]} \quad (3-22)$$

حيث C ثابت و P° الضغط البخاري المشبع للغاز الممتز. و للاستفادة من المعادلة يمكن كتابتها على الصورة:

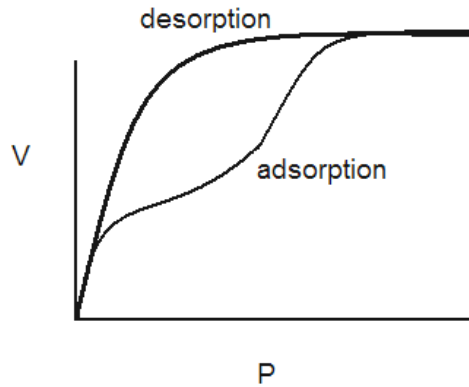
$$\frac{P}{V(P^\circ - P)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C-1)}{CV_m} \frac{P}{P^\circ} \quad (3-23)$$

و برسم $P/V(P^\circ - P)$ مقابل P/P° ، نحصل على خط مستقيم ميله $C-1/CV_m$ و قاطعه $1/CV_m$. وللحصول على سعة الطبقة الواحدة V_m نأخذ مقلوب مجموع الميل و القاطع، انظر الشكل (3-5).



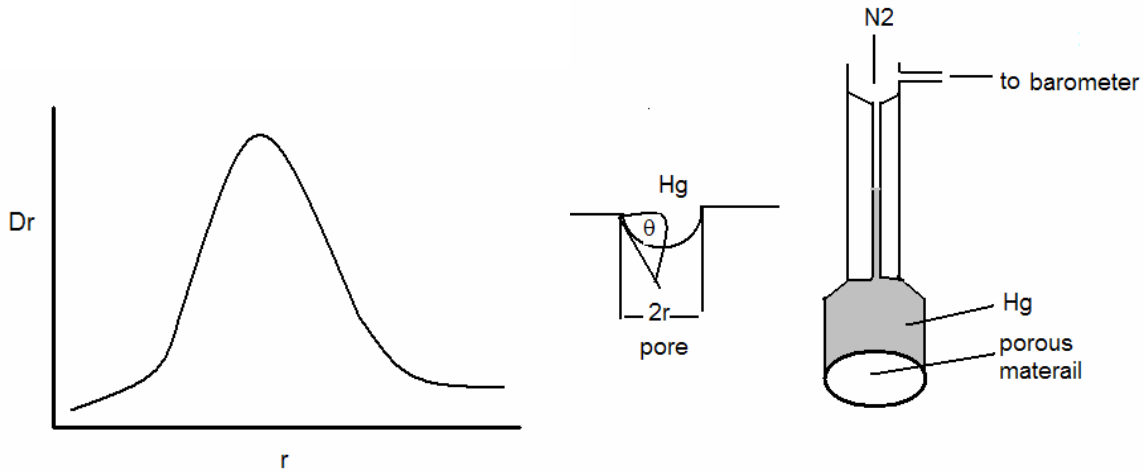
شكل (3-5): الرسم البياني لمعادلة EBT للإمتزاز عديد الطبقات .

الإمتزاز على المواد الصلبة المسامية: تُقسم المسام حسب القطر إلى ثلاثة أصناف: المسامات الدقيقة micropores وهي أقل من 10nm و المسامات الكبيرة macropores وهي أكبر من 100nm و المسامات المتوسطة mesopores وهي بين الصنفين السابقين 10-100 nm. و يمثل الفخار و الفحم صور



شكل (3-6): أيزوثرم الامتزاز و التبخر من مادة مازة مسامية.

شائعة لهذه المواد. و يظهر الامتزاز علي سطح هذه المواد المسامية ما يعرف بالتخلف الإمتزازي، كما يظهر في الشكل (3-6). حيث لا ينطبق منحنى الامتزاز مع منحنى عملية طرد الغاز الممتز desorption، وهو مما يميز المواد المسامية. و يعزى هذا السلوك إلى تباين الضغط الذي يبدأ عنده تكثيف الغاز داخل المسام P_1 و الضغط الذي يحدث عنده تبخر الغاز الممتز P_2 ، حيث دائما $P_1 > P_2$. تقدير قطر الثقب (المسام): لتقدير نصف قطر المسام يستخدم مقياس المسام porosimeter المبين في الشكل (3-7). الجهاز عبارة عن انتفاخ يحتوي على عينة من المادة المسامية المفرغة تماما من الهواء.



شكل (3-7): مقياس مسام المواد المسامية، وتغيير دالة توزيع قطر الثقب مع قطر الثقب.

يملاً الانتفاخ بالزئبق حتى علامة معينة على الأنبوبة الشعرية التي تعلو الانتفاخ. وباستخدام غاز حامل مثل النتروجين يُجبر الزئبق على دخول المسام التي لا يستطيع دخولها لارتفاع الضغط داخل المسام، وذلك وفق معادلة لابلاس:

$$\Delta P = 2 \gamma \cos \theta / r \quad (3-24)$$

حيث ΔP هو فرق الضغط فوق سطح منحنى و γ التوتر السطحي للزئبق، و θ زاوية البلل، و r نصف قطر الثقب. يعين المانومتر ΔP ، و يمكن تعيين γ للزئبق مع المادة المسامية، و بمعلومية θ للزئبق يمكن حساب نصف قطر الثقب حسب المعادلة (3-24). و يستدل على دخول الزئبق من انخفاض الزئبق في الأنبوبة الشعرية للجهاز. و لما كانت المسامات ليست واحدة القطر، بل متنوعة، فمن المهم أيضا معرفة دالة توزيع المسام D_r و هي وصف لتغير عدد المسامات مع نصف قطر الثقب. و يمكن التوصل إلى دالة توزيع المسام من العلاقة:

$$D_r = - (P/r) d(V-V_0)/dP \quad (3-25)$$

حيث V هو حجم المسام أكبر r من عند ضغط P و V_0 حجم جميع المسام. و برسم D_r مقابل r يمكن تقدير متوسط نصف قطر المسام الذي يمثل أغلب المسام، كما هو مبين في الشكل الموضوع يمين مقياس المسام. و من المهم إدراك أن الضغط اللازم لدخول الزئبق يزيد مع نقص نصف قطر الثقب كما يظهر بوضوح من الجدول (3-3):

جدول (3-3) : اعتماد الضغط اللازم لدخول الزئبق في الثقب على نصف قطر الثقب لفحم مسامي.

الضغط اللازم لدخول الزئبق الثقب (atm)	قطر الثقب (nm)
1.7	8550
98	147
197	74
296	49
395	37
493	29
592	25
691	21

الإمتزاز من المحاليل: لهذا النوع أهمية كبيرة في إزالة الألوان و الملوثات من المياه و عوادم الصناعة قبل الصرف الصحي الآمن، وذلك عبر امتزاز هذه المواد على مادة مازة قوية مثل الفحم المنشط أو الطفلة أو السيليكا. و كثيرا ما نصادف تحقق أيزوثرم لانجمير أو تمكن عند دراسة امتزاز مواد مثل حمض الخليك أو حمض الأكساليك على الفحم، أو عند دراسة تثبيط تآكل المعادن بمواد شديدة الامتزاز على سطح المعادن مثل امتزاز الأمينات طويلة السلسلة و الثيويوريا على الصلب و التراي أزل على النحاس. ولعل أشهر أيزوثرم لإمتزاز المواد الذائبة في المحاليل على مواد مازة عديدة هو أيزوثرم فريندليش

: Freundlich isotherm

$$W_a = K C^{1/n} \quad (3-25)$$

حيث K و n ثابتان يعتمدان على المادة المازة و المادة الممتزة و W_a هي وزن المادة الممتزة لكل جرام من المادة المازة و هي C تركيز الاتزان (تركيز المادة الممتزة في المحلول بعد عملية الامتزاز).

مسائل:

١. اذكر الفرق بين نوعي الإمتزاز: الكيميائي و الفيزيائي.

٢. عرف ما يلي:

أ. سعة الطبقة الواحدة.

ب. الإمتزاز الفيزيائي.

ج. الإمتزاز الكيميائي.

د. حرارة الإمتزاز.

٣. اذكر إحدى صور معادلة لانجمير و وضح بالرسم كيفية الحصول على كل من ثابت الاتزان و سعة الطبقة الواحدة.

٤. وضح كيفية تعيين مساحة سطح مسحوق من دراسة الإمتزاز.

٥. اذكر معادلة فريندليش للإمتزاز من المحاليل، ووضح بالرسم كيفية الحصول على ثوابت المعادلة.

٦. وضح قصور معادلة لانجمير للإمتزاز الكيميائي و كيف استطاع تمكين تعديل المعادلة.

٧. اذكر المعادلة التي تختص بالإمتزاز الفيزيائي، ووضح كيفية الحصول على سعة الطبقة الواحدة.

٨. اذكر كيفية تقدير حجم المسام لمادة مسامية.

٩. ضع علامة (✓) أمام العبارات الصحيحة و (×) أمام العبارات الخاطئة:

أ. حرارة الامتزاز تكون موجبة أو سالبة حسب نوع الإمتزاز.

ب. الإمتزاز الكيميائي يتم في صورة طبقة واحدة.

ج. الإمتزاز الكيميائي يتميز بارتفاع حرارة الامتزاز مقارنة بالإمتزاز الفيزيائي.

د. الإمتزاز الكيميائي يعتمد على نوع المادة المازة و لا يعتمد على المادة الممتزة.

١٠. عند إضافة جرام من الفحم الحيواني إلى ١٠٠ ملي لتر من محلول ٠,١ عياري من حمض الخليك، وجد أن التركيز قد انخفض بعد الوصول إلى الاتزان إلى ٠,٠١ عياري. بفرض أن الامتزاز يتم وفق أيزوثرم لانجمير، و علما بأن ثابت الاتزان يساوي ١٠٠٠ جزيء لكل لتر،

احسب سعة الطبقة الواحدة. و إذا كانت المساحة التي يشغلها الجزيء المتمز على الفحم هي ٢٣ انجستروم فاحسب المساحة الكلية لجرام الفحم.

١١. يمتاز حمض الأكساليك على الفحم الحيواني وفق معادلة فريندليش. في تجربة وجد أن إضافة جرام من الفحم الحيواني إلى ٢٠٠ ملي لتر من محلول ٠,٥ مول من حمض الأكساليك تؤدي إلى خفض التركيز، بعد الوصول إلى الاتزان، إلى ٠,٣٥ مول. بفرض أن الثابت $n = 2$ ، احسب ثابت الاتزان.

١٢. احسب حرارة امتزاز حمض الخليك على جرام من الفحم الحيواني إذا كان تركيزا الاتزان هما ٠,٢ مول و ٠,٠٥ مول عند درجتى الحرارة ٢٥ و ٤٠ مئوية و كسر السطح المغطى $\theta = 0.5$.

١٣. احسب حرارة امتزاز حمض الفورميك على جرام من الفحم الحيواني إذا كان تركيز الاتزان عند درجة حرارة ٢٠ مئوية و كسر السطح ٠,٢٥ هو ٠,٠٥ مول و كان تركيز الاتزان عند درجة حرارة ٤٠ مئوية و كسر السطح ٠,٥ هو ٠,٤٥ مول. الامتزاز يتم وفق لانجمير.

١٤. احسب مساحة سطح ١٠ جرامات من مسحوق مادة حافزة سجلت سعة طبقة واحدة من النتروجين مقدارها ٠,٢١ سم^٣ لكل جرام عند الظروف القياسية. المساحة التي يشغلها جزيء النتروجين عند نفس الظروف ١٢,٦ انجستروم مربع.

١٥. سُجلت النتائج الآتية عند امتزاز أول أكسيد الكربون على الفحم عند درجة حرارة ٢٧٣ كلفن:

P, mmHg	100	200	300	400	500	600	700
V, cm ³	10.2	18.6	25.5	31.4	36.9	41.6	46.1

اثبت أن الامتزاز يتم حسب أيزوثرم لانجمير. أوجد قيمة سعة الطبقة الواحدة. احسب مساحة سطح الجرام من هذا الفحم، علما بأن المساحة التي يشغلها جزيء واحد من أول أكسيد الكربون هي ١٩ انجستروم مربع.

١٦. حجم غاز النتروجين المتمز على مادة مازة عند درجة حرارة ٢٠ مئوية كان ٠,٨٩ سم^٣ عند ضغط مقداره ٤,٨ جوي. احسب الضغط اللازم للوصول إلى نفس حجم الغاز المتمز عند درجة حرارة ٨٠ مئوية، علما بأن حرارة الامتزاز ٢٠ كيلو سعر للجزيء.

حلول أسئلة الوحدة الثالثة

١.

الإمتزاز الفيزيائي Physisorption	الإمتزاز الكيميائي Chemisorption
<ul style="list-style-type: none"> -تتكون طبقات عديدة على السطح -لا تزيد حرارة الامتزاز عن ١٠ كيلو سعر للجزيء -لا تعتمد على الغاز الممتز فقط -تحدث عند درجات أقل من غليان الغاز الممتز -يزيد معدل الامتزاز مع زيادة ضغط الغاز الممتز -قوى التجاذب هي قوى فان درفال 	<ul style="list-style-type: none"> -تتكون طبقة واحدة على السطح -حرارة الامتزاز أعلى من ٢٠ كيلو سعر للجزيء -تعتمد على نوع الغاز الممتز و المادة المازة -يمكن أن تحدث في درجات الحرارة العالية -يقل معدل الامتزاز مع زيادة ضغط الغاز الممتز -تتكون روابط كيميائية بين الغاز الممتز و المادة المازة

٢.

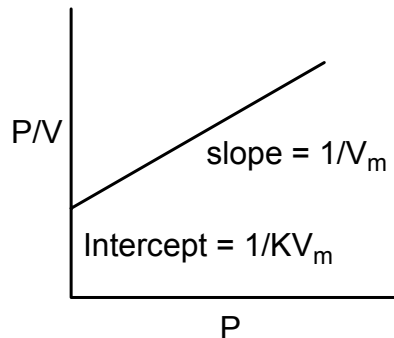
أ. سعة الطبقة الواحدة: هي حجم الغاز الممتز المكون لطبقة واحدة كاملة على سطح المادة المازة عند الظروف القياسية.

ب. الإمتزاز الفيزيائي: هو تراكم طبقات عديدة من غاز ممتز على سطح مادة صلبة بقوى ترابط ضعيف مثل قوى فان درفال و يعتمد على كمية الغاز الممتز.

ج. الإمتزاز الكيميائي: هو امتصاص طبقة واحدة من المادة الممتزة على سطح المادة المازة بقوى ترابط كيميائية و يعتمد هذا النوع من الامتزاز على نوع الغاز الممتز و نوع المادة المازة.

د. حرارة الإمتزاز: هي كمية الحرارة المنطلقة من امتزاز غاز على مادة صلبة امتزاز كيميائي عند درجة امتزاز (كسر سطح مغطى) معين.

٣. معادلة لانجمير للإمتزاز الكيميائي تمثل بيانيا كما يلي:



ثابت الاتزان يمكن الحصول عليه بقسمة الميل على القاطع، أما سعة الطبقة الواحدة V_m فتساوي

مقلوب الميل.

٤. يمكن تعيين مساحة مسحوق مادة صلبة بإجراء عملية امتزاز كيميائي باستخدام غاز قياسي مثل النتروجين. ويكون معلوما مساحة السطح التي يشغلها الجزيء الواحد $A_{gas} (cm^2)$ من الغاز على سطح الصلب. يعين حجم الغاز الممتز المكون لطبقة واحدة (سعة الطبقة الواحدة V_m) من خلال رسم علاقة كما في المسائل السابقة و من قيمة V_m يمكن حساب مساحة السطح $A (m^2)$ وفق المعادلة:

$$A = V_m (cm^3) \times 6.02 \times 10^{23} \times A_{gas} \times 10^{-20} / 22414$$

٥. معادلة فريندليش للإمتزاز من المحاليل تأخذ الشكل:

$$W_a = K C^{1/n}$$

حيث n و K ثابتان، و W_a كمية المادة الممتزة بالجرام لكل جرام من المادة المازة، و C تركيز الاتزان للمادة الممتزة.

٦. قصور معادلة لانجمير: أ - الغاز الممتز ساكن على السطح و لا يتحرك .

ب - حرارة الامتزاز لا تعتمد على كسر السطح المغطى بالغاز الممتز .

و قام تمكن بتعديل معادلة لانجمير بفرض أن حرارة الإمتزاز ΔH تعتمد على كسر السطح المغطى بالغاز

$$\Delta H = \Delta H^0 (1 - \beta \theta)$$

حيث ΔH^0 حرارة الامتزاز عند $\theta = 0$ و β ثابت. و بالاشتقاق يمكن الحصول على معادلة تمكن و هي على الصورة:

$$\theta = 1/C \ln PC$$

حيث G و C ثابتان و P ضغط الغاز الممتز.

٧. المعادلة التي تختص بالإمتزاز الفيزيائي هي معادلة و هي على الصورة:

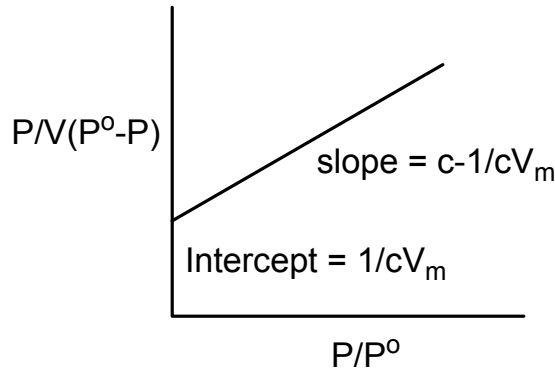
$$\frac{V}{V_m} = \frac{C(P/P^0)}{[1 - (P/P^0)] \left[1 + (P/P^0) (C-1) \right]}$$

و يمكن الحصول على سعة الطبقة الواحدة بإعادة صياغة المعادلة السابقة على الصورة:

$$\frac{P}{V(P^0 - P)} = \frac{1}{CV_m} + \frac{(C-1)}{CV_m} \frac{P}{P^0}$$

و برسم $P/V(P^0 - P)$ مقابل P/P^0 ، نحصل على خط مستقيم ميله $C-1/CV_m$ و قاطعه $1/CV_m$.

وللحصول على سعة الطبقة الواحدة V_m نأخذ مقلوب مجموع الميل و القاطع .

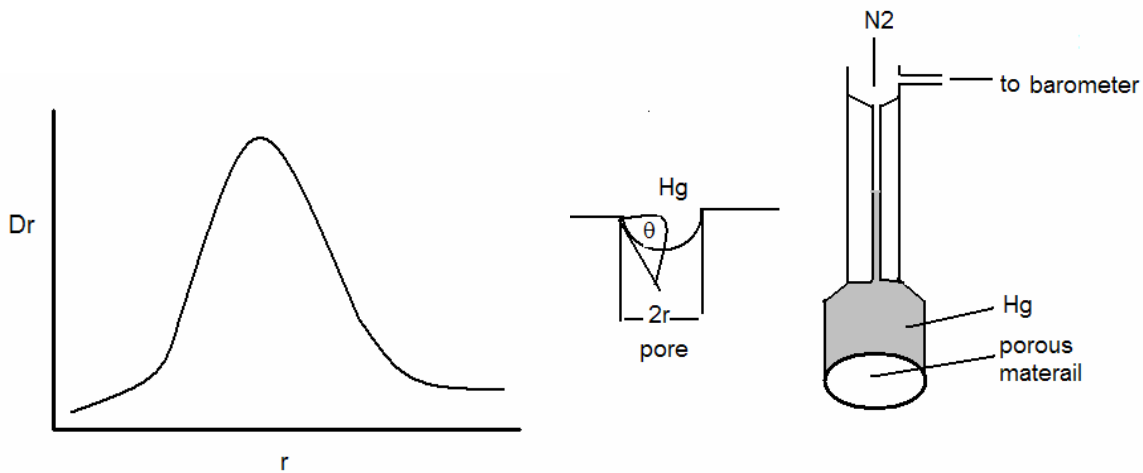


الرسم البياني لمعادلة EBT للإمتزاز عديد الطبقات .

٨. يستخدم جهاز مقياس الثقوب لتعيين الضغط اللازم لدخول الزئبق في ثقوب المادة المثقوبة. وللحصول على دالة توزيع نصف قطر الثقب تستخدم المعادلة:

$$D_r = - (P/r) d(V-V_0)/dP$$

حيث V هو حجم الثقوب أكبر r من عند ضغط P و V_0 حجم جميع الثقوب. و برسم D_r مقابل r يمكن تقدير متوسط نصف قطر الثقوب الذي يمثل أغلب الثقوب، كما هو مبين في الشكل الموضوع يمين مقياس الثقوب.



مقياس ثقوب المواد المثقوبة، وتغيير دالة توزيع قطر الثقب مع قطر الثقب.

د - x

ج - ✓

ب - ✓

٩. أ - x

١٠. يمكن استخدام أيزوثرم لانجمير في حالة المحاليل، و يأخذ الصورة:

$$N/N_m = K C / (1 + K C)$$

حيث N عدد جزيئات الحمض الممتز، و N_m عدد جزيئات الحمض الممتز لتكوين طبقة واحدة و K ثابت الاتزان و C تركيز اتزان الحمض. تحسب عدد جزيئات الحمض الممتز من الفرق بين تركيزي الحمض قبل و بعد الإمتزاز:

$$N = (0.1 - 0.01)/1000 = 0.0099 \text{ mol}$$

و بالتعويض نحصل على:

$$0.009/N_m = 1000 \times 0.01 / \{1 + (1000 \times 0.01)\}$$

$$N_m = 0.0099 \text{ mol}$$

مساحة جرام الفحم تحسب من العلاقة:

$$A = N_m \times 6.02 \times 10^{23} \times 23 \times 10^{-20}$$

$$= 0.0099 \times 6.02 \times 10^{23} \times 23 \times 10^{-20}$$

$$= 1370.8 \text{ m}^2.$$

١١. نحسب أولاً كمية الحمض الممتز من حجم مقداره ٢٠٠ مليلتر

$$W_a = (0.5 - 0.35) \times 200/1000 = 0.03 \text{ g}$$

ثم نعوّض في معادلة فريندلش:

$$W_a = K C^{1/n}$$

$$K = W_a / C^{1/n} = 0.03 / (0.35)^{1/2} = 0.05$$

١٢. نحسب حرارة الامتزاز من المعادلة:

$$\ln (C_2/C_1) = (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \}$$

$$Q = RT_2 T_1 / (T_2 - T_1) \ln (C_2/C_1)$$

$$= 2 \times 298 \times 313 / 15 \ln (0.05/0.2)$$

$$= -17.242 \text{ kcal mol}^{-1}$$

١٣. نحسب حرارة الامتزاز من المعادلة:

$$\ln (K_1/K_2) = (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \}$$

ولحساب K_1 و K_2 نستخدم قيمتي θ و C عند درجتي الحرارة 20 و 40 درجة مئوية، و نعوّض في معادلة لانجمير مرتين:

$$\theta/1-\theta = KC$$

عند درجة حرارة ٢٠ درجة مئوية:

$$0.25/1-0.25 = K_1 \times 0.05$$

$$K = 0.0167$$

$$0.5/1-0.5 = K_2 \times 0.45$$

عند درجة حرارة ٤٠ درجة مئوية:

$$K_2 = 0.225$$

و هكذا يمكن حساب حرارة الامتزاز :

$$Q = RT_2 T_1 / (T_2 - T_1) \ln (K_1/K_2)$$

$$= 2 \times 298 \times 313 \times \ln (0.0167/0.225)$$

$$= -23.867 \text{ kcal mol}^{-1}$$

١٤. المساحة الكلية لعشر جرامات من المسحوق A تُعطى من العلاقة:

$$A = V_m \times 6.02 \times 10^{23} \times 12.6 \times 10^{-20} \times W/22414$$

حيث W_m سعة الطبقة الواحدة عند الظروف القياسية و W وزن المسحوق.

$$A = 0.21 \times 6.02 \times 10^{23} \times 12.6 \times 10^{-20} \times 10/22414$$

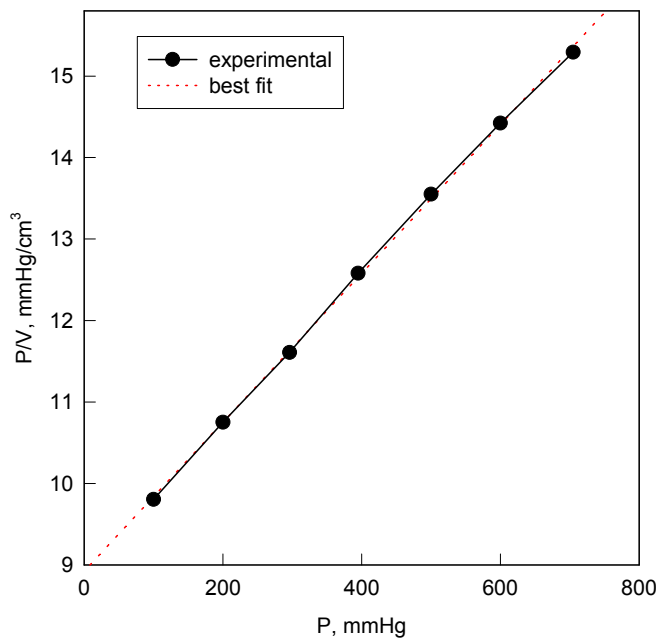
$$= 7.1 \text{ m}^2.$$

١٥. يُفضل في تلك الحالة التمثيل البياني للنتائج وفق المعادلة:

$$P/V = 1/KV_m + P/V_m$$

حيث P ضغط الغاز الممتز و V حجم الغاز الممتز و K ثابت الاتزان و V_m سعة الطبقة الواحدة.

برسم علاقة بين P/V و P نحصل على خط مستقيم ميله $1/V_m$ و قاطعه $1/KV_m$. ومن الرسم وجد أن الميل يساوي 9.13، و عليه فإن V_m تساوي 0.11.



و هكذا يمكن حساب المساحة التي يشغلها جرام الفحم وفق العلاقة:

$$A = V_m \times 6.02 \times 10^{23} \times 19 \times 10^{-20} / 22414$$

$$= 0.11 \times 6.02 \times 10^{23} \times 19 \times 10^{-20} / 22414 = 0.56 \text{ cm}^2$$

١٦. يمكن حساب الضغط المطلوب من المعادلة:

$$\ln (P_2/P_1) = (Q/R) \{ (T_2 - T_1) / T_2 T_1 \}$$

حيث Q حرارة الامتزاز و P_1 و P_2 الضغطان عند درجتى الحرارة T_1 و T_2 .

$$\ln(P_2/4.6) = (-20000/2) (60/239 \times 353)$$

$$P_2 = 0.013 \text{ atm.}$$



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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

المحاليل

المحاليل

٤

الجدارة: الاستفادة من خواص المحاليل لفصل المكونات و تنقيتها و تعيين الوزن الجزيئي.

الأهداف:

- أن يفصل المتدرب مكونات المحاليل بالتقنية المناسبة و بخاصة التقطير الجزيئي.
- أن يعين المتدرب الوزن الجزيئي للمواد الكيميائية من خواص المحاليل الجامعة.
- أن يحضر المتدرب المحاليل المختلفة و يراعي التغير الحراري و الحجمي حسب المكونات.
- أن يستفيد المتدرب من الخواص الجامعة للمحاليل في تحضير محاليل مائية ذات تبريد عالي.
- أن يحدد المتدرب تأين أو تجمع المواد في مذيب ما و الاستفادة من ذلك في تعيين درجة التأين.

الوقت المتوقع للدراسة: ست ساعات في الفصل الدراسي.

متطلبات الجدارة: يتطلب لدراسة الوحدة إتقان الحساب الكيميائي و معرفة تحضير المحاليل و دراسة الديناميكا الحرارية.

ماهية المحلول:

المحلول solution هو مخلوط من أكثر من مادة كيميائية متجانس في كل أجزائه على المستوى الميكروسكوبي و ثابت مع الزمن و يعتبر طورياً واحداً. و يستدعي ذلك غالباً أن تكون جزيئات المواد المكونة للمحلول متقاربة في الحجم و لها خواص و تركيب متقارب أو متناغم. مثلاً المذيبات القطبية كالماء تذيب الأملاح المكونة من أيونات و تكون محاليل، والمذيبات غير القطبية مثل البنزين أو التولوين تذيب المواد غير القطبية مثل النفطالين و تكون أيضاً محاليل. وعلى العكس لا يمكن تكون محاليل من الماء و النفطالين أو من جهة أخرى من البنزين و الأملاح. و قد تكون المحاليل في أي من حالات المادة الثلاث، الغازية أو السائلة أو الصلبة. و باستثناء الحالة الصلبة، فإن المحاليل تتميز بأنها شفافة و منفذة للضوء و لا تتهدم مع مرور الزمن مادام مكوناتها لا تتغير.

و لتبسيط الدراسة سنعتبر المحلول مكون من مادتين فقط، ويسمى المكون الأثقل وزناً المذيب solvent بينما يعتبر الأخف وزناً مذاب solute.

و يجب التنبيه الى حالة مخلوط قريب من المحلول في بعض خواصه الظاهرية و لكنه مختلف و متميز عن المحلول، و هو ما يسمى الغروي colloid. و للغرويات خواص تميزها عن المحاليل، مثل تشتيت الضوء و الحركة البراونية و إمكانية ترسيب أحد المكونات و غيرها من الخواص. و اللبن مثال للغروي، بينما السكر المذاب تماماً في الماء مثال للمحلول.

أنواع المحاليل:

يمكن تقسيم المحاليل حسب حالة المذيب و المذاب إلى عدة أنواع مميزة من المحاليل ذات الأهمية التطبيقية و غالباً ما تخضع لقوانين مختلفة و تظهر خواص متباينة وفق هذا التقسيم. و يلخص الجدول (4-1) أنواع متعددة من المحاليل.

جدول (4-1): أنواع المحاليل حسب حالة المذيب و المذاب.

حالة المحلول	المذيب	المذاب	أمثلة
غازي	غاز	غاز	أي نسب من مجموعة من الغازات
غازي	غاز	سائل	الايروسولات
غازي	غاز	صلب	الدخان
سائل	سائل	سائل	الماء و الكحول
سائل	سائل	غاز	الصودا ($H_2O + CO_2$)
سائل	سائل	صلب	محلول ملح أو سكري
صلب	صلب	غاز	بلاطين مشبع بالهيدروجين
صلب	صلب	سائل	الجلي (بروتين + ماء)
صلب	صلب	صلب	السبائك المعدنية

التعبير عن تركيز المحلول:

سبق في مقرري الكيمياء العامة و أساسيات الكيمياء الفيزيائية التطرق إلى هذا الموضوع بإسهاب، و يهنا هنا فقط طريقتين للتعبير عن تركيز المحلول، و هما المولالية m و كسر الجزئ X والذين يعبران عن التركيز لمحاليل عند درجات حرارة مختلفة. و بفرض أن رمز المذيب هو A و أن المذاب رمزه B ، نصف تركيز المحلول عادة في صورة مولالية المذاب كما يلي:

المولالية: هي عدد جزيئات المذاب في كيلو جرام من المذيب

$$m = 1000 \times \frac{W_B}{M_B W_A} \quad (4-1)$$

حيث W_B و M_B هما كتلة المذاب ووزنه الجزيئي، و W_A هو وزن المذيب، و الجميع بوحدة الجرام. ووحدة المولالية هي mol kg^{-1} .

كسر الجزئ المذاب X : هو نسبة عدد جزيئات المذاب إلى عدد الجزيئات الكلي للمذاب و المذيب

$$X_B = \frac{n_B}{(n_A + n_B)} = \frac{(W_B/M_B)}{\{(W_A/M_A) + (W_B/M_B)\}} \quad (4-2)$$

حيث n_A و n_B هما عددا جزيئات المذيب و المذاب و M_A هو الوزن الجزيئي للمذيب.

دراسة محاليل ذات أهمية تطبيقية:

١. محاليل مكونة من غاز مذاب في سائل

عند إذابة غاز أو أكثر في سائل نحصل على محلول، سواء كان الغاز شحيح الذوبان في الماء، مثل H_2 , O_2 , N_2 ، أو شديد الذوبان في الماء، مثل NH_3 , SO_3 , HBr , HCl . و تعتمد كمية الغاز الذائبة في حجم معين من المذيب على ضغط الغاز ودرجة الحرارة و نوعيتا الغاز و المذيب. و الغازات شحيحة الذوبان، و عند ضغط منخفض، تخضع لقانون هنري.

قانون هنري **Henry's law**: كتلة الغاز شحيح الذوبان الذائبة في حجم معين من سائل ما تتناسب طرديا مع ضغط الغاز فوق السائل، عند ثبوت درجة الحرارة. و يعبر عند القانون رياضيا بالمعادلة الآتية:

$$m = k P \quad (4-3)$$

حيث m كتلة الغاز، و P ضغط الغاز، و k ثابت للغاز و المذيب و يعتمد على وحدات القياس.

و يظهر الجدول (4-2) نتائج ذوبان غاز HCl في التولوين عند درجة ٢٥ مئوية، حيث يلاحظ أن كتلة الغاز الذائبة معبر عنها بكسر الجزئ X_{HCl} تتناسب طرديا مع ضغط الغاز P_{HCl} ، مما يؤدي إلى الحصول على قيمة ثابتة تقريبا لثابت قانون هنري k .

معامل امتصاص غاز في سائل α (absorption coefficient): هو طريقة للتعبير عن قابلية امتصاص الغازات المختلفة في السوائل، و يعرف بأنه حجم الغاز، بالمليتر mL و بعد تحويله إلى الظروف القياسية

جدول (4-2): نتائج ذوبان غاز HCl في التولوين عند درجة حرارة ٢٥ مئوية.

P_{HCl} / atm	X_{HCl}	k^{-1}
0.0033	0.00141	0.0427
0.0338	0.00154	0.0456
0.0964	0.00431	0.0446
0.158	0.00702	0.0444
0.282	0.0126	0.0446

STP (1 atm, 273 K)، الذي يُشيع ملتر واحد من السائل عند درجة حرارة معينة و تحت ضغط جزئي للغاز يساوي واحد ضغط جوي 1 atm. و للحصول على المعامل نستخدم العلاقة:

$$\alpha = v' / V P$$

(4-4) حيث v' حجم الغاز بعد تحويله إلى الحجم عند الظروف القياسية، و V حجم السائل و P الضغط الجزئي للسائل. لاحظ أن وحدة قياس معامل الامتصاص هي atm^{-1} .

٢. محاليل مكونة من سائلين تاما الامتزاج:

يقصد بتمام الامتزاج هنا هو أن مزج أي نسب حجمية أو وزنية من السائلين تؤدي إلى تكون محلول، مثلا مزج الماء و الأسيتون. و يلاحظ أحيانا عند مزج سائلين أو أكثر تغير في درجة الحرارة (مص أو طرد). كذلك قد يقل حجم المحلول عن مجموع حجومات السوائل الممزوجة أو قد يزيد. و كما هو حال السوائل، فإن للمحاليل أيضا ضغط بخاري vapor pressure يعتمد ليس فقط على درجة الحرارة، بل أيضا على نوعي السائلين و نسبتهما في المحلول. و تبعا لهذه المتغيرات الثلاثة: التغير في إنثالبي (حرارة) المزج ΔH_m ، و التغير في حجم المزج ΔV_m ، و سلوك الضغط البخاري للمحلول، يمكن تقسيم المحاليل

المكونة من سائلين تاما الامتزاج إلى قسمين: محاليل مثالية ideal solutions و محاليل غير مثالية non-ideal solutions.

المحاليل المثالية: لمحلول مثالي مكون من سائلين A و B، فإن قوى التجاذب تكون كما يلي:

$$A-A = B-B = A-B \quad (2-5)$$

و يعني ذلك أن قوة الجذب أو التآفر بين جزيئات السائلين تساوي تقريبا تلك التي بين جزيئات أي من السائلين. ويمكن أن يقابل هذا في حالة الجزيئات شديدة التشابه في التركيب البنائي و الفراغي، مثلا الكلوروبنزين و البروموبنزين أو البنزين و التولوين. و ينتج عن هذا التماثل أن تتدرج الخواص الطبيعية للمحلول و تكون وسطا بين خواص السائلين، و أن يتحقق ما يلي:

$$1. \text{ تكون حرارة المزج مساوية للصفر } \Delta H_m = 0.$$

$$2. \text{ يكون حجم المحلول مساويا لحجمي السائلين، أي أن: } \Delta V_m = 0.$$

$$3. \text{ تخضع الضغوط البخارية، الجزئي للمكونين و الكلي للمحلول لقانون راؤول.}$$

قانون راؤول Raoult's law: يتناسب الضغط البخاري لمكون متطاير (سائل) في محلول طرديا مع كسر الجزيء لهذا المكون. و كما هو معلوم فإن كسر الجزيء لمكون في محلول هو نسبة عدد جزيئات هذا المكون إلى العدد الكلي لمكونات المحلول. بمعنى أن:

$$X_A = n_A / (n_A + n_B) \quad (2-6)$$

$$X_B = n_B / (n_A + n_B) \quad (2-7)$$

$$1 = X_A + X_B \quad (2-8)$$

و عليه فوفق القانون يكون:

$$P_A \propto n_A / (n_A + n_B) \quad (2-9)$$

$$P_A = C n_A / (n_A + n_B) \quad (2-10)$$

حيث C ثابت تناسب، يمكن تقديره بوضع $n_B = 0$ ، فيكون الضغط البخاري الجزئي P_A مساويا الضغط البخاري للسائل النقي P_A^0 .

$$P_A = P_A^0 \{ n_A / (n_A + n_B) \} \quad (2-11)$$

$$P_A = P_A^0 X_A \quad (2-12)$$

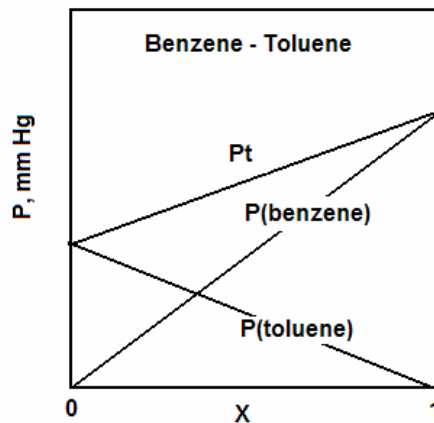
و بالمثل يمكن حساب الضغط البخاري الجزئي للمكون الآخر B، فنحصل على:

$$P_B = P_B^0 X_B \quad (2-13)$$

و يكون الضغط البخاري للمحلول P_t ، وفق قانون دالتون، مساويا لمجموع الضغطين الجزئيين للسائلين.

$$P_t = P_A + P_B \quad (2-14)$$

و يعرض شكل (4-1) لاعتماد الضغوط البخارية على كسر الجزيء للسائل B. و يتضح أن العلاقات الثلاث عبارة عن خطوط مستقيمة مما يدل على التدرج الخطي لخاصية الضغط البخاري للمحلول.



شكل (4-1): الضغوط البخارية مقابل كسر الجزيء لمحلول مثالي من البنزين و التولوين

المحاليل غير المثالية: هي محاليل ناتجة عن امتزاج تام لسوائل مختلفة في التركيب البنائي و الفراغي و لها خواص كيميائية مختلفة. مثلا مزج كبريتيد الكربون و الأسيتون أو مزج الكلوروفورم و الأسيتون. ويلاحظ هنا حدوث في حرارة المزج (مص أو طرد)، أي أن $\Delta H_m \neq 0$. كذلك فإن حجم المحلول لا يساوي مجموع حجوم السوائل الممزوجة، أي أن $\Delta V_m \neq 0$ ، وأخيرا الحيود عن قانون راؤول. ووفقا لاتجاه الحيود فهناك قسمان من المحاليل غير المثالية: محاليل ذات حيود إيجابي positive deviation و محاليل ذات حيود سلبي negative deviation.

أ - المحاليل غير المثالية ذات الحيود الإيجابي:

مثال: محلول من الأسيتون و كبريتيد الكربون $(CH_3COCH_3 + CS_2)$.

يلاحظ في حالة هذه المحاليل ما يلي:

١. تكون حرارة المزج موجبة (أي مص للحرارة) $\Delta H_m > 0$.

٢. يكون حجم المحلول أكبر من حجمي السائلين، أي أن: $\Delta V_m > 0$.

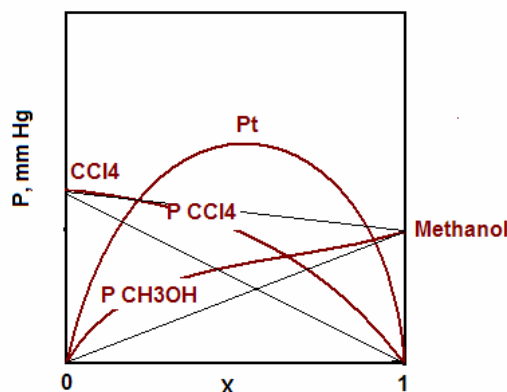
٣. تكون الضغوط البخارية، الجزئي للسائلين و الكلي للمحلول أعلى من المحاليل المثالية (أي

أعلى من المحسوبة وفق قانون راؤول). و يعزى السبب في ذلك إلى أن قوى التجاذب تكون كما

يلي:

$$A-A \neq B-B > A-B \quad (2-15)$$

و يعني ذلك أن قوة التناثر بين جزيئات السائلين سائدة و أن الجزيئات تفضل الهروب من المحلول إلى الخارج كبخار. و يؤدي ذلك إلى ارتفاع الضغط البخاري بالمقارنة مع المحلول المثالي. و يعني ذلك أيضا امتصاص حرارة للهروب كبخار. و كنتيجة للتناثر يزيد أيضا الحجم بعد المزج.



شكل (2-4): الضغوط البخارية مقابل كسر الجزيء لمحلول غير مثالي ذي حيود إيجابي من الأسيتون و كبريتيد الكربون

ب - المحاليل غير المثالية ذات الحيود السلبي:

مثال: محلول من الأسيتون و الكلوروفورم ($\text{CH}_3\text{COCH}_3 + \text{CCl}_3\text{H}$)

يلاحظ في حالة هذه المحاليل ما يلي:

١. تكون حرارة المزج سالبة (أي طرد للحرارة) $\Delta H_m < 0$.

٢. يكون حجم المحلول أصغر من حجمي السائلين، أي أن: $\Delta V_m < 0$.

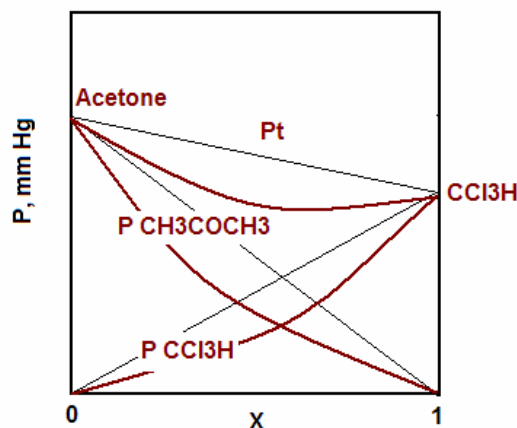
٣. تكون الضغوط البخارية، الجزئي للسائلين و الكلي للمحلول أقل من المحاليل المثالية (أو أقل

من المحسوبة وفق قانون راؤول). و يعزى السبب في ذلك إلى أن قوى التجاذب تكون كما يلي:

$$A-A \neq B-B < A-B \quad (2-16)$$

و يعني ذلك أن قوة التجاذب بين جزيئات السائلين سائدة و أن الجزيئات تفضل البقاء في المحلول.

ويؤدي ذلك إلى انخفاض الضغط البخاري بالمقارنة مع المحلول المثالي. و يعني ذلك أيضا طرد حرارة نتيجة تكون روابط بين جزيئات السائلين. و كنتيجة للتجاذب يقل أيضا الحجم بعد المزج.



شكل (3-4): الضغوط البخارية مقابل كسر الجزيء لمحلول غير مثالي ذي حيود سلبي

من الأسيتون و الكلوروفورم

تركيب البخار vapor composition: يجب التنبه إلى أن تركيب البخار (نسبتا المكونين) يختلف عن تركيب المحلول، و عموماً فإن البخار يكون أغنى بالمكون الأكثر تطايراً (أي الأقل في درجة حرارة الغليان) من المحلول. و يمكن إثبات ذلك كما يلي:

نفرض أن كسر الجزيء للسائل A في البخار هو X'_A ، و حسب قانون دالتون فإن:

$$P_A = P_t X'_A \quad (4-17)$$

و من قانون راؤول:

$$P_A = P_A^0 X_A \quad (4-18)$$

و من العلاقتين السابقتين يمكن الحصول على:

$$X'_A = (P_A^0 X_A) / (P_A^0 X_A + P_B^0 X_B) \quad (4-19)$$

$$X'_A / X_A = P_A^0 / (P_A^0 X_A + P_B^0 X_B) \quad (4-20)$$

$$= 1 / (X_A + (P_B^0 / P_A^0) X_B) \quad (4-21)$$

بفرض أن السائل A أكثر تطايراً من المكون B، يكون $P_A^0 > P_B^0$ ، و عليه فوفق المعادلة الأخيرة يجب أن يكون $X'_A > X_A$. و تعد هذه الحقيقة مفتاح عملية فصل المكونات بالتقطير، كما سنشرح فيما بعد.

٣. محاليل مكونة من مذاب غير متطاير في مذيب متطاير:

أغلب المحاليل التي تصادفنا في المختبر الكيميائي تنتمي لهذه النوعية، مثل محاليل الأملاح والقلويات و المواد الصلبة التي تذوب في الماء مثل محاليل السكر و البلمرات و اليوريا. و يتميز بخار مثل تلك المحاليل بأنه يتكون فقط على بخار السائل المذيب. و يكون دور المذاب solute هنا هو التأثير على خواص المذيب الفيزيائية. و تنشأ أربع ظواهر أو خواص تميز هذه المحاليل و تسمى الخواص الجامعة للمحاليل Colligative properties of solutions. و لا تعتمد هذه الخواص على طبيعة المذاب بل على تركيزه في المحلول، و من هنا جاءت كلمة "الجامعة". و من الممكن توقع تأثير المذاب على الخواص

الأربع، بشرط عدم تفكك أو تجمع جزيئات المذاب في المذيب، فإن حدث ذلك وجب أخذه ذلك في الاعتبار. وكما هو الحال في الغازات، فإن التوظيف الأمثل للقوانين المشتقة من الخواص الجامعة يتطلب أن يكون تركيز المذاب قليلاً قدر الإمكان. و يعتبر المذيب النقي هو الحالة التي تقاس إليها الخواص الجامعة.

الخواص الجامعة للمحاليل

١ - انخفاض الضغط البخاري: عند تحضير محلول يحتوي على كسر جزيء X_B من المذاب و كسر جزيء X_A من المذيب، فإن الضغط البخاري للمحلول يعطى بالعلاقة:

$$P_t = P_A^0 X_A + P_B^0 X_B$$

(4-22)

و حيث أن المذاب غير متطاير، فإن $P_B^0 = 0$ ، و عليه:

$$P_t = P_A^0 X_A = P^0 X_A \quad (4-23)$$

حيث استبدل الرمز P_A^0 بالرمز P^0 لوجود ضغط بخاري واحد. ويمكن التعبير عن المعادلة السابقة كما يلي:

$$P_t = P^0 (1 - X_B) = P^0 - P^0 X_B \quad (4-24)$$

$$P^0 - P_t / P^0 = \Delta P / P^0 = P^0 X_B \quad (4-25)$$

و تظهر المعادلة الأخيرة أن الانخفاض في الضغط البخاري للمحلول يتناسب طردياً مع كسر جزيء المذاب. ويمكن استخدام الانخفاض في الضغط البخاري لحساب الوزن الجزيئي للمذاب وفق المعادلة الآتية:

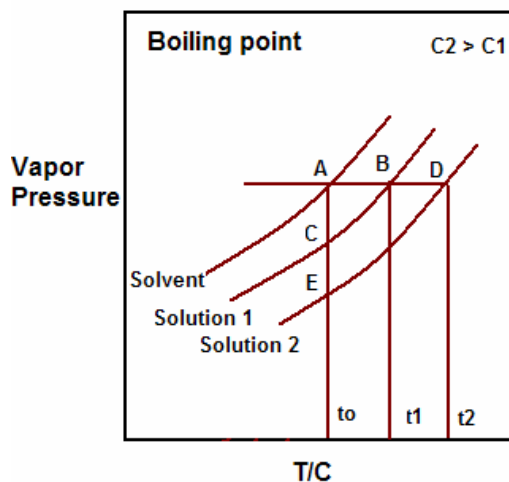
$$\Delta P / P^0 = (W_B M_B) / \{ (W_B M_B) + (W_A M_A) \} \quad (4-26)$$

حيث W_A و W_B كتلتا المذاب و المذيب و M_A و M_B الوزنان الجزيئيان للمذاب و المذيب. عند استعمال محاليل مخففة، أي $W_B \rightarrow 0$ ، تأول المعادلة السابقة إلى الصورة:

$$\Delta P / P^0 = (W_B M_B) / (W_A M_A) \quad (4-27)$$

$$M_B = (\Delta P / P^0) W_A M_A / W_B \quad (4-28)$$

٢ - ارتفاع درجة حرارة الغليان: ينتج عن انخفاض الضغط البخاري للمحلول ارتفاع في درجة غليان المحلول، كما يتضح ذلك من شكل (4-4). يمثل الخط ABC الضغط الذي يحدث عنده الغليان (واحد جوي عادة)، و يقابله درجات حرارة غليان تعبر عن غليان المذيب و محلولين مختلفا التركيز C_1 ، C_2 . من الواضح أن هناك ارتفاع في درجة الغليان للمحلولين مقارنة بالمذيب t_0 ، و أن المحلول الأعلى تركيزاً C_2 يغلي عند درجة أعلى t_2 من المحلول الأخف تركيزاً C_1 و الذي يغلي عند t_1 .



شكل (4-4): منحنيات الغليان للمذيب و محلولين مختلفا التركيز

و يمكن الحصول على تقييم كمي لمقدار الارتفاع كما يلي:

من تشابه المثلثين ABC و ADE يمكن التوصل إلى أن:

$$\frac{AB}{AD} = \frac{AC}{AE}$$

(4-29)

$$(t_1 - t_0)/(t_2 - t_0) = (P^0 - P_1)/(P^0 - P_2) \quad (4-30)$$

$$\Delta T_1/\Delta T_2 = \Delta P_1/\Delta P_2 \quad (4-31)$$

و من المعادلة (4-12) يمكن التوصل إلى:

$$\Delta t_b \propto \Delta P \propto X_B \quad (4-32)$$

$$\Delta t_b = k X_B = k n_B / (n_A + n_B) \quad (4-33)$$

و في حالة المحاليل المخففة، يكون $n_2 \ll n_1$ ، و يمكن اختصار المعادلة السابقة إلى الصورة:

$$\Delta t_b = k (W_B/M_B)/(W_A/M_A) \quad (4-34)$$

و من تعريف المولالية، وفق المعادلة (4-1)، نصل إلى:

$$\Delta t_b = k (M_A / 1000) m \quad (4-35)$$

$$\Delta t_b = k_b m \quad (4-36)$$

حيث k_b ثابت يسمى ثابت الارتفاع المولالي molal elevation constant. و هو مميز لكل مذيب. و تُظهر

المعادلة السابقة أن مقدار الارتفاع في درجة الغليان يتناسب طرديا مع زيادة مولالية المذاب. و من الممكن

استعمال الارتفاع في درجة الغليان للحصول على الوزن الجزيئي للمذاب بتعديل المعادلة (4-34) و إعادة

كتابتها على الصورة:

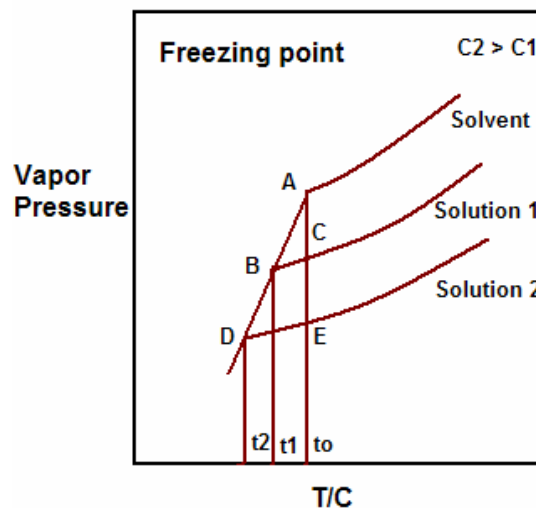
$$M_B = 1000 k_b W_B / (\Delta t_b W_A) \quad (4-37)$$

٣ - انخفاض درجة التجمد: ينتج أيضا عن انخفاض الضغط البخاري للمحلول انخفاض في درجة التجمد مقارنة بالمذيب. ويمكن الحصول على معادلة تعبر عن مقدار الانخفاض في درجة تجمد المحلول بمساعدة المنحنيات المعبرة عن تغير الضغط البخاري مع درجة التجمد freezing point و المبينة في شكل (4-4). وباستخدام تشابه المثلثات و التقدم في الاستنتاج كما في الخاصية السابقة، يمكن الحصول على المعادلة:

$$\Delta t_f = k_f m \quad (4-38)$$

حيث Δt_f الانخفاض في درجة حرارة التجمد و k_f ثابت التجمد المولالي molal depression constant . ويفضل تعيين الوزن الجزيئي للمذاب من هذه الخاصية عن الخاصية السابقة و ذلك وفق المعادلة الآتية وبشرط أن يكون المحلول مخفف:

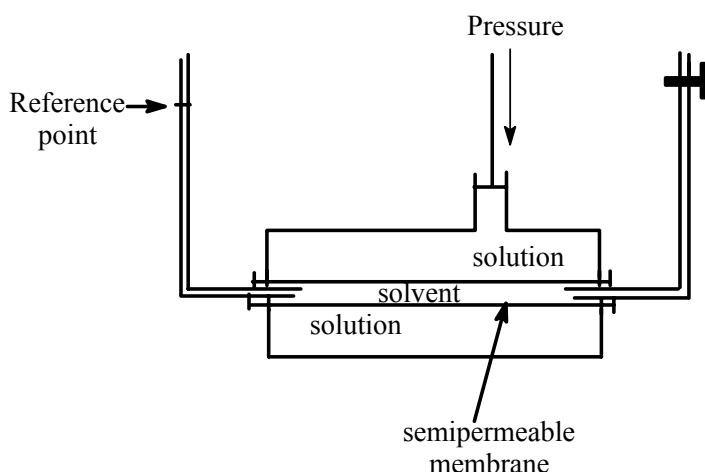
$$M_B = 1000 k_f W_B / (\Delta t_f W_A) \quad (4-39)$$



شكل (4-4): منحنيات التجمد للمذيب و محلولين مختلفا التركيز

٤ - الضغط الأسموزي: هناك عدة طرق لانتقال المواد الذائبة في الموائع، مثل الانتشار و هو انتقال المادة ذات التركيز الأعلى إلى منطقة ذات تركيز أقل، و الهجرة و هو انتقال الأيونات تحت تأثير فوق الجهد بين القطبين. في حالة وجود غشاء شبه منفذ semipermeable membrane يفصل بين محلول و المذيب يلاحظ أن المذيب هو الذي ينتقل إلى المحلول، و ذلك لأن الغشاء شبه المنفذ لا يسمح بمرور المذاب، وتسمى هذه الظاهرة بالأسموزية Osmosis. وإذا أردنا أن نجبر المذيب إلى الخروج ثانية من المحلول يجب أن نطبق ضغطاً من الخارج. و يسمى الضغط اللازم للعودة إلى الحالة الأصلية بالضغط الأسموزي osmotic pressure . و للضغط الأسموزي أهمية كبرى في انتقال المواد داخل الأجسام الحية و يعتبر

جدار الخلية وبعض الأنسجة الحيوية بمثابة غشاء شبه منفذ ضروري للعمليات الحيوية. كما يوجد تطبيق هام لهذه الخاصية و هو ما يعرف بالأسموزية العكسية reverse osmosis و تستغل في تحلية مياه البحر. و يعرض شكل (4-5) لشكل مبسط لمقياس بركيلي و هارتلي Berkeley-Hartley osmometer للضغط الاسموزي.



شكل (4-5): رسم مبسط لمقياس الضغط الاسموزي لبركيلي و هارتلي

معادلة فانت هوف Van't Hoff للضغط الاسموزي للمحاليل المثالية: هي معادلة تصف اعتماد الضغط الاسموزي على تركيز المحلول، حين يكون المحلول مخفف (أي مثالي كما في الغازات) و تأخذ شكل قانون الغاز المثالي كما في المعالجة الآتية:

$$\pi V = n R T \quad (4-40)$$

$$\pi V = (W_B/M_B) R T \quad (4-41)$$

$$\pi = C R T \quad (4-42)$$

حيث π هو الضغط الاسموزي بوحدة atm و C تركيز المذاب بوحدة المولارية mol/L و V الحجم بوحدة اللتر و T درجة الحرارة المطلقة، و R ثابت الغازات. و المعادلة الأخيرة صورة مفيدة لقانون فانت هوف للضغط الاسموزي للمحاليل المثالية. و يجب عند التعويض مراعاة الوحدات، حيث نعوض عن قيمة R بالمقدار $0.082 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. و عادة ما يكون الضغط الاسموزي بوحدة mm Hg فيجب أيضا التحويل إلى ضغط جوي بالقسمة على 670. و من التطبيقات الهامة لهذه الخاصية، تعيين الوزن الجزيئي وبخاصة للجزيئات العملاقة مثل البروتين و البلمرات. و من السهل تعديل المعادلة (4-41) لتصبح على الصورة:

$$M_B = W_B R T / \pi V \quad (4-43)$$

عامل فانت هوف Van't Hoff factor: عند حدوث تجمع أو تأين للجزيئات فإن قيمة أي من الخواص الجامعة تختلف (تقل في حالة التجمع و تزيد في حالة التأين) عن القيمة الطبيعية التي تمكن توقعها. وهذا لأن الخاصية الجامعة تعتمد على العدد الحقيقي لجزيئات particles المذاب في المحلول. و يسمى خارج قسمة الخاصية المُعَيَّنة عمليا على الخاصية الطبيعية والتي يمكن حسابها نظريا بعامل فانت هوف، و سنرمز له بالرمز i ، بحيث يكون:

$$i = \Delta P / (\Delta P)_o = \Delta t_b / (\Delta t_b)_o = \Delta t_f / (\Delta t_f)_o = \Delta \pi / (\Delta \pi)_o \quad (4-44)$$

حيث تمثل العلامة "o" الخاصية المحسوبة نظريا في غياب تأين أو تجمع الجزيئات. و يمكن تعيين درجة تأين أو تجمع جزيء ما من قيمة هذا العامل و التركيز. و تستخدم هذه الطريقة في دراسة تأين الإلكتروليتات كما هو موضح في المثال الآتي:

تعيين درجة تأين إلكتروليت: تظهر جميع الإلكتروليتات، مثل الأملاح و الأحماض و القلويات، تأين تختلف درجته حسب نوع و تركيز الإلكتروليت. و في حالة الإلكتروليت القوي يكون التأين كاملا ونحصل على قيمة صحيحة لعامل فانت هوف تتعكس في تضعف قيمة الخاصية الجامعة. أما في حالة الإلكتروليت الضعيف فتكون قيمة عامل فانت هوف كسرا مرتبطة بدرجة التأين (α) و عدد الأجزاء التي يتفكك إليها الإلكتروليت (n). في حالة جزيء واحد من الإلكتروليت A_n :

$$\begin{matrix} A_n & \rightarrow & A_1 & + & A_2 & + & \dots & + & A_n \\ 1-\alpha & & \alpha & & \alpha & & \dots & & \alpha \end{matrix} \quad (4-45)$$

و عدد الأجزاء في المحلول هو $1+(n-1)\alpha$. و حيث أن الخاصية الجامعة، انخفاض الضغط البخاري مثلا، تتوقف على عدد الأجزاء فإن:

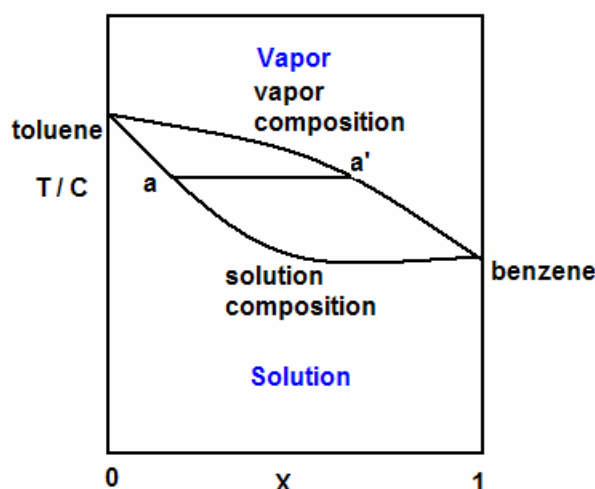
$$i = \Delta P / (\Delta P)_o = 1+(n-1)\alpha \quad (4-46)$$

و من العلاقة السابقة يمكن الحصول على درجة التأين:

$$\alpha = (i - 1) / (n - 1) \quad (4-47)$$

التقطير التجزيئي Fractional Distillation : هو عملية فصل مكونات المحاليل، و مخاليط الموائع عموما، باستغلال فكرة اختلاف تركيب المحلول في الحالة السائلة عنه في الحالة البخارية. و هو من العمليات الهامة التي تقوم عليها صناعة تكرير البترول و تقطير الفحم الحجري. و لفهم نظرية العمل لابد من الإشارة إلى منحنيات الغليان boiling point curves و هي علاقات بيانيا بين درجة حرارة الغليان وتركيز المحلول. و سنشير إلى ثلاث حالات تمثل غليان المحاليل المثالية و المحاليل غير المثالية (حيود إيجابي و حيود سلبي) السابقة الإشارة إليها.

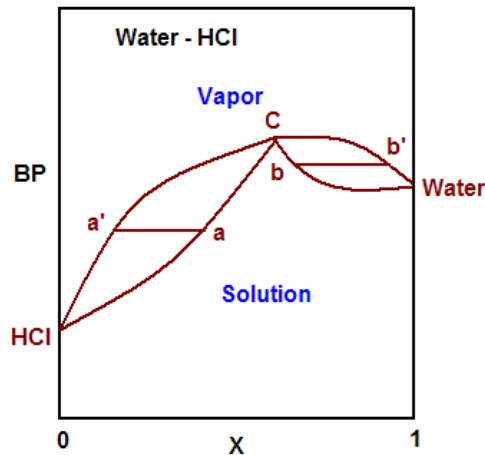
١. عندما تزيد درجة الغليان بانتظام: نقابل هذا في حالة المحاليل المثالية، و فيها تكون درجة غليان المحلول وسطا بين درجتي غليان المكونين، كما هو مبين في الشكل (4-6). و تؤدي عملية الغليان إلى تغير تدريجي في تركيز المحلول (a) بسبب اختلاف تركيزه عن البخار (a'). لاحظ أن البخار أغنى بالبنزين من المحلول. و يمكن هنا التمييز بين الجزء المتبقي من الحلول residue و الجزء البخاري الذي يتم تكثيفه و يطلق عليه القطير distillate. و عند إعادة تقطير القطير فإنه يغلي عند درجة غليان أقل و يمكن الحصول منه على بخار أكثر غني بالبنزين. و عند تكرار عملية تقطير القطير يمكن في النهاية الحصول على البنزين النقي. و في نفس الوقت فإن استمرار عملية غليان المتبقي تؤدي إلى ارتفاع نسبة التولوين فيه حتى يمكن الحصول على التولوين النقي في النهاية. و الخلاصة العامة أن تقطير محلول ثنائي يؤدي إلى الحصول على المكون الأعلى في درجة الغليان كمتبقي بينما يتطلب الحصول على المكون الأقل في درجة الغليان إلى تكرار عملية التقطير المصحوبة بارتفاع نسبته في القطير.



شكل (4-6): اعتماد درجة الغليان على كسر الجزيء في حالة محلول مثالي

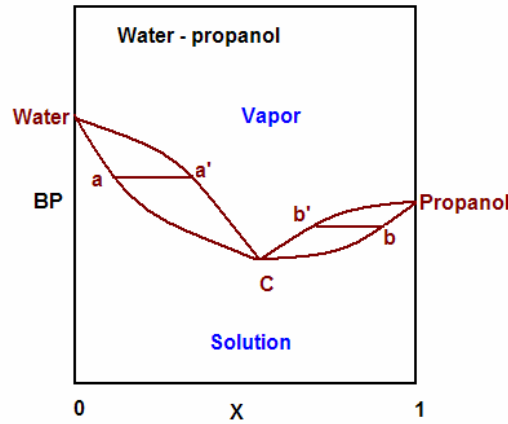
٢. أنظمة ذات درجة غليان عظمى Maximum BP: هذه هي المحاليل غير المثالية ذات الحيود السلبي، ومن الأمثلة محلول حمض الهيدروكلوريك في الماء، كما هو موضح في الشكل (4-7). و تمثل النقطة C درجة الغليان العظمى للمحلول، و عنده يكون تركيزا المحلول و البخار متساويين. و ينشأ عن ذلك غليان المحلول عند هذه النقطة دون تغير في تركيز المحلول أو درجة الغليان، و يطلق على المحلول الذي يغلي دون تغير في درجة غليانه الأيزوتروب Azeotrope. و يختلف ناتج التقطير حسب التركيز الابتدائي مقارنة بنقطة الأيزوتروب C. إذا بدأنا بالتركيز a يكون تركيز البخار هو a' وهكذا نحصل على الأيزوتوب كمتبقي بينما يمكن في النهاية الحصول على HCl النقي بإعادة

تقطير القطير الغني ببخار HCl. أما إذا كان التركيز أعلى من الأيزوتروب C ، عند b مثلاً، فإن المتبقي يكون الأيزوتروب C و نحصل على الماء النقي بإعادة تقطير القطير.

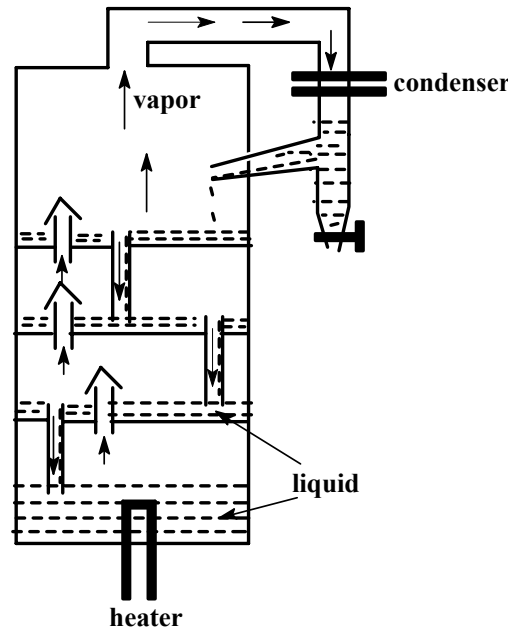


شكل (4-7): اعتماد درجة الغليان على كسر الجزيء في حالة محلول غير مثالي ذي حيود سلبي
 ٣. أنظمة ذات درجة غليان صغرى Minimum BP: هذه هي المحاليل غير المثالية ذات الحيود الإيجابي، ومن الأمثلة محلول كحول البروبينول و الماء، كما هو موضح في الشكل (4-8). و تمثل النقطة C درجة الغليان الصغرى للأيزوتروب، و عنده يكون تركيزا المحلول و البخار متساويين، وغليان المحلول عند هذه النقطة يكون دون تغير في تركيز المحلول أو درجة الغليان. و هنا أيضا يختلف ناتج التقطير حسب التركيز الابتدائي مقارنة بنقطة الأيزوتروب C. إذا بدأنا بالتركيز a يكون تركيز البخار هو a'، و هكذا نحصل على الماء كمتبقي، بينما يمكن في النهاية الحصول على الأيزوتروب بإعادة تقطير القطير. أما إذا كان التركيز أعلى من الأيزوتروب C ، عند b مثلاً، فإن المتبقي يكون كحول البروبينول، و نحصل في النهاية الحصول على الأيزوتروب بإعادة تقطير القطير.

مما سبق يتضح الحاجة إلى تكرار عملية التقطير للحصول على بعض المكونات النقية و هي عملية مكلفة في المجهود و الوقت، مما يستدعي البحث عن طريقة عملية تتغلب على ذلك. و يعتبر برج أو عمود التقطير المبين في شكل (4-9) محاولة ناجحة للفصل بالتقطير. و هو عبارة عن عمود يحتوي على المحلول



شكل (4-8): اعتماد درجة الغليان على كسر الجزيء في حالة محلول غير مثالي ذي حيود إيجابي أو المخلوط في أسفل و مخرج مُزود بمكثفات للتبريد في الجزء العلوي، بالإضافة إلى عدة صواني plates متواجدة على طول البرج تتخللها نوعان من الأنابيب، بعضها لإرجاع المواد المكثفة إلى الصينية السابقة وبعضها مزود بحاجز علوي يساعد المواد الثقيلة على التكثيف فوق الصواني. ويتم التقطير داخل البرج



شكل (4-9): رسم مبسط لوحدة تقطير تجزيئي لمخلوط سائل

بتسخين المخلوط في الأسفل بواسطة سخان heater فيرتفع بخار يحتوي على المكونات إلى أعلى. وحسب تطاير المكونات يتم التكثيف بحيث يزيد تركيز المكون الأقل في درجة الغليان كلما ارتفعنا. وتعمل الصواني كمصدر غني بهذا المكون و هو ما يعادل عمليا إعادة تقطير القطير. و تتوقف كفاءة الفصل على عدد الصواني و طول العمود و تفاصيل التصميم الهندسي و درجة الحرارة.

قانون التوزيع Distribution law:

يلاحظ عند إذابة مادة في سائلين غير قابلين للامتزاج متلامسين أن المادة تتوزع بين السائلين بحيث يكون نسبة تركيزها في السائل الأول إلى تركيزها في السائل الثاني قيمة ثابتة، عند ثبوت درجة الحرارة. و يشترط لذلك أن المادة الذائبة في السائلين لا يحدث لها تفكك (تأين) dissociation أو تجمع association في أي من السائلين. و يعبر عن ذلك بقانون التوزيع الآتي:

$$C_A/C_B = K \quad (4-48)$$

حيث C_A تركيز المادة في السائل A و C_B تركيز المادة في السائل B و K معامل التوزيع distribution coefficient. أما إذا حدث تجمع للمادة في السائل A و ليس في السائل B فإن قانون التوزيع يأخذ الصورة:

$$(C_A)^{1/n}/C_B = K \quad (4-49)$$

حيث n هو عدد الجزيئات المتجمعة في السائل A. أما إذا حدث تفكك للمادة في السائل A و ليس في السائل B فإن قانون التوزيع يأخذ الصورة:

$$(C_A)^n/C_B = K \quad (4-50)$$

حيث n هو عدد الأجزاء التي تفككت إليه المادة في السائل A.

و يستفاد كثيرا من هذه الظاهرة في تركيز و فصل المواد، مثلا الحصول على اليود المتواجد في مياه البحار، من خلال تركيزه في مذيب عضوي مثل رابع كلوريد الكربون. كذلك يستفاد منها في دراسة تأين و تجمع المواد، حيث أن تحقيق أي من العلاقات السابقة يدل على حدوث أو عدم حدوث للتجمع أو التأين في أحد السائلين. ومن ذلك اكتشاف أن حمض الخل يحدث له تجمع واضح في صورة جزيئين في البنزين و ليس في الماء.

مسائل:

- ١ - ما هي المحاليل المثالية و المحاليل غير المثالية؟ بين بالرسم سلوك الضغط البخاري في كل حالة مع تركيز المكون.
- ٢ - اذكر الخواص الجامعة التي تنشأ عند إذابة مادة غير متطايرة في مذيب متطاير. اذكر العلاقة الرياضية التي يمكن استعمالها لحساب الوزن الجزيئي للمادة المذابة لكل خاصية.
- ٣ - احسب الضغط البخاري لمحلول مكون من ١٠٪ نترات الصوديوم NaNO_2 في الماء عند درجة حرارة ٣٠ درجة مئوية، علما بأن الضغط البخاري للماء عند درجة حرارة التجربة ٣٩,٥ ملم زئبق.
- ٤ - الجدول الآتي يمثل تغير الضغط البخاري لمحلول مكون من سائلين A و B كدالة في كسر جزيء السائل. أكمل الجدول، ثم ارسم علاقة بين الضغط البخاري لكل من السائلين و كسر الجزيء B و كذلك الضغط الكلي و كسر الجزيء B. هل المحلول مثالي؟ لماذا؟.

P_t , mmHg	X_B	P_B	P_A
300	0.0		
290	0.1		
280	0.2		
270	0.3		
250	0.4		
240	0.5		
230	0.7		
210	0.9		
200	1.0		

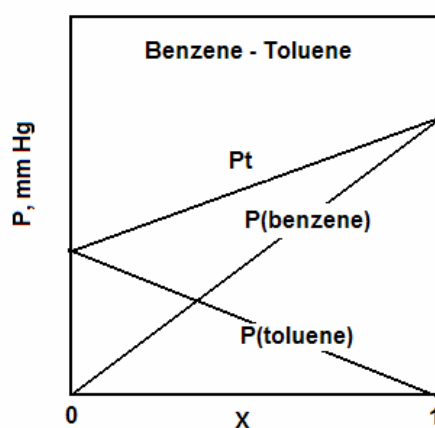
- ٥ - احسب الضغط الكلي و الجزئي لمحلول مثالي مكون من ٧٠٪ بنزين و ٣٠٪ تولوين، علما بأن الضغطين البخاريين للبنزين و التولوين النقيين هما ١١٨,٢ و ٣٦,٧ ملم زئبق عند ٣٠ درجة مئوية، على الترتيب.
- ٦ - يغلي محلول مثالي من الكلوروبنزين و البروموبنزين عند ١٤٠ درجة مئوية تحت ضغط واحد جوي. احسب تركيب المحلول عند نقطة الغليان، علما بأن الضغطين البخاريين للكلوروبنزين و البروموبنزين هما، على الترتيب، ٩٣٩,٤ و ٩٥,٨ ملم زئبق.
- ٧ - احسب الضغط البخاري لمحلول مائي يحتوي على ٥ جرامات من اليوريا $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ و ١٠٠ جرام ماء، علما بأن الضغط البخاري للماء ٢٤ ملم زئبق عند نفس درجة الحرارة.

- ٨ - محلول مائي يتجمد عند -1.5°C . احسب درجة غليان المحلول المتوقعة ، علما بأن ثابتا الغليان و التجمد المولاليين للماء هما 0.5°C و 1.85°C ، على الترتيب.
- ٩ - أذيب ٥٠ جرام من بروتين في ٥٠٠ ملتر من الماء فأعطى ضغطاً أسموزياً مقداره ١٩ ملم زئبق عند 20°C . احسب الوزن الجزيئي المتوقع للبروتين.
- ١٠ - عامل فانت هوف لمحلول $0.5\text{ M K}_2\text{CrO}_4$ يساوي ٢.١ . احسب الضغط الأسموزي للمحلول عند 15°C . احسب درجة تفكك الالكتروليت.

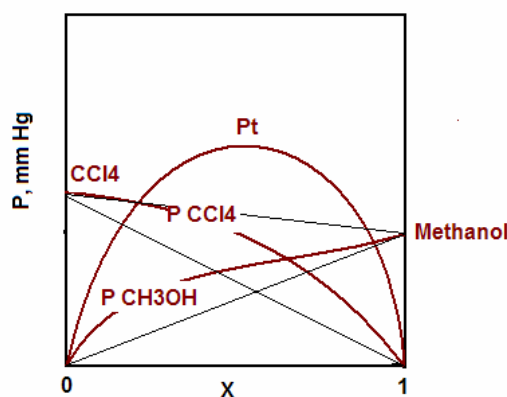
حلول مسائل الوحدة الرابعة

١. المحلول المثالي: هو محلول حجمه يساوي مجموع حجوم السوائل الداخلة في تكوينه ، و حرارة مزجه تساوي صفر، و يحقق قانون راؤول. المحلول غير المثالي لا يساوي حجمه مجموع حجوم السوائل المكون له، و قد تنطلق حرارة أو تمتص عند المزج ، و يحدد عن قانون راؤول. و هناك نوعان من الحيوذ، حيوذ ايجابي يصحبه زيادة نسبية في الضغط البخاري مقارنة بالمحلول المثالي و زيادة في الحجم بعد المزج و امتصاص للحرارة. بينما الحيوذ السلبي يصحبه نقص في الضغط البخاري و نقص في الحجم بعد المزج و انطلاق حرارة.

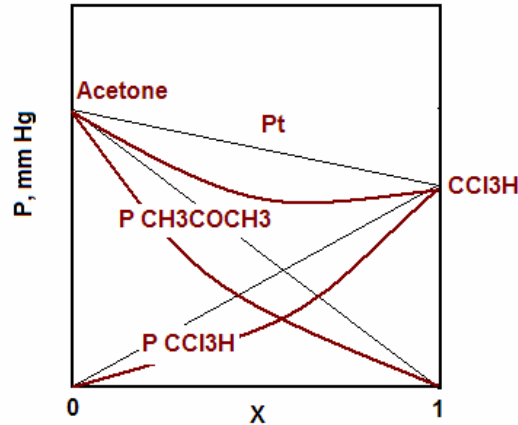
رسم بياني يوضح سلوك المحلول المثالي



رسم بياني يوضح سلوك المحلول غير المثالي ذي الحيوذ الإيجابي



رسم بياني يوضح سلوك المحلول غير المثالي ذي الحيوذ السلبي



٢. عند إذابة مادة غير متطايرة في مذيب متطاير تنشأ أربع خواص جامعة للمحاليل تعتمد على تركيز المذاب ولا تعتمد على نوعه وهي:

-انخفاض الضغط البخاري مقارنة بالمذيب و معادلته المستخدمة في تعيين الوزن الجزيئي للمذاب هي:

$$P_t = P_A^0 X_A + P_B^0 X_B$$

-انخفاض درجة التجمد مقارنة بالمذيب و معادلته المستخدمة في تعيين الوزن الجزيئي للمذاب هي:

$$\Delta t_f = k_f m$$

-ارتفاع درجة الغليان مقارنة بالمذيب و معادلته المستخدمة في تعيين الوزن الجزيئي للمذاب هي:

$$\Delta t_b = k_b m$$

-نشوء الضغط الأسموزي و معادلته المستخدمة في تعيين الوزن الجزيئي للمذاب هي:

$$\pi = C RT$$

حيث P^0 الضغط البخاري للمذيب و P الضغط البخاري للمحلول و M_A الوزن الجزيئي للمذيب و M_B الوزن الجزيئي للمذاب و W_A وزن المذيب و W_B وزن المذاب و k_f ثابت التجمد المولالي للمذيب و k_b ثابت الغليان المولالي للمذيب و V حجم المحلول و π الضغط الأسموزي و T درجة الحرارة و R ثابت الغازات.

٣. يمكن حساب الضغط البخاري لهذا المحلول من العلاقة (نعتبر نترت الصوديوم ممثلة بالرمز B):

$$\Delta P = P^0 - P = X_B$$

$$X_B = (W/M)_B / \{ (W/M)_A + (W/M)_B \}$$

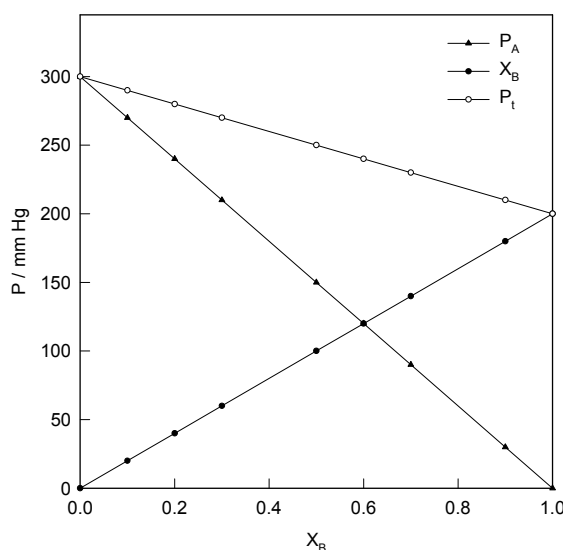
$$= (10/69) / \{ 90/18 + 10/69 \} = 0.0281$$

$$P = P^0 - X_B = 39.5 - 0.0281 = 39.47 \text{ mm Hg}$$

٤. نكمل الجدول كما يلي

P_t , mmHg	X_B	P_B	P_A
300	0.0	0	300
290	0.1	20	270
280	0.2	40	240
270	0.3	60	210
250	0.4	100	150
240	0.5	120	120
230	0.7	140	90
210	0.9	180	30
200	1.0	200	0

و يمثل الرسم الآتي تغير كل من الضغطين البخاريين الجزئيين للمكونين و الضغط الكلي مع كسر جزئي المكون B . المحلول مثالي لتحقيقه قانون راؤول.



٥. نحسب أولاً كسر الجزئي للبنزين كما يلي :

$$M_{\text{benzene}} (\text{C}_6\text{H}_6) = 78, \quad M_{\text{toluene}} (\text{C}_7\text{H}_8) = 92$$

$$X_{\text{benzene}} = (70/78) / \{70/78 + 30/92\} = 0.733$$

$$X_{\text{toluene}} = 1.0 - 0.733 = 0.267 \quad \text{و عليه فكسر الجزئي للتولوين يكون:}$$

الضغط الجزئي للبنزين يعطى بالعلاقة:

$$P_{\text{benzene}} = (P^\circ X)_{\text{benzene}} = 118.2 \times 0.733 = 86.6 \text{ mm Hg}$$

الضغط الجزئي للتولوين يعطى بالعلاقة:

$$P_{\text{toluene}} = (P^\circ X)_{\text{toluene}} = 36.7 \times 0.267 = 9.8 \text{ mm Hg}$$

الضغط الكلي يعطى بالعلاقة:

$$P_t = P_{\text{benzene}} + P_{\text{toluene}} = 86.6 + 9.8 = 96.4 \text{ mm Hg}$$

٦. المعطيات

$$P_t = 760 \text{ mm Hg}$$

$$P^{\circ}_{\text{chlorobenzene}} = 939.4 \text{ mm Hg}$$

$$P^{\circ}_{\text{bromobenzene}} = 95.8 \text{ mm Hg}$$

$$X_{\text{chlorobenzene}} = ?$$

يمكن حساب تركيب المحلول في صورة كسر الجزيء للكلوروبنزين في المحلول كما يلي:

$$P_t = P_{\text{chlorobenzene}} + P_{\text{bromobenzene}}$$

$$P_{\text{chlorobenzene}} = P^{\circ}_{\text{chlorobenzene}} X_{\text{chlorobenzene}}$$

$$P_{\text{bromobenzene}} = P^{\circ}_{\text{bromobenzene}} X_{\text{bromobenzene}}$$

$$X_{\text{bromobenzene}} + X_{\text{chlorobenzene}} = 1$$

$$P_t = P^{\circ}_{\text{bromobenzene}} X_{\text{bromobenzene}} + P^{\circ}_{\text{chlorobenzene}} (1 - X_{\text{chlorobenzene}})$$

$$X_{\text{chlorobenzene}} = \{P_t - P^{\circ}_{\text{bromobenzene}}\} / \{P^{\circ}_{\text{chlorobenzene}} - P^{\circ}_{\text{bromobenzene}}\} \\ = 760 - 95.6 / \{939.4 - 95.8\} = 0.787$$

٧. المعطيات

$$W_{\text{urea}} = 5 \text{ g}$$

$$W_{\text{water}} = 100 \text{ g}$$

$$P^{\circ} = 24 \text{ mm Hg}$$

$$P_{\text{solution}} = ?$$

يمكن حساب الضغط البخاري للمحلول وفق العلاقة:

$$\Delta P / P^{\circ} = X_B$$

$$P^{\circ} - P_{\text{solution}} / P^{\circ} = (W/M)_{\text{urea}} / (W/M)_{\text{urea}} + (W/M)_{\text{water}}$$

$$24 - P_{\text{solution}} / 24 = (5/58) / \{5/58 + 100/18\} = 0.015$$

$$P_{\text{solution}} = 24 - 24 \times 0.015 = 23.64 \text{ mm Hg}$$

٨. المعطيات

$$T_f = -1.5^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}_f = 0^{\circ}\text{C}$$

$$K_f = 1.85^{\circ}\text{C/molal}$$

$$k_b = 0.5^{\circ}\text{C/molal}$$

لحساب درجة غليان المحلول يجب أولاً حساب مولالية المحلول وفق العلاقة الآتية:

$$\Delta t_f = T^{\circ}_f - T_f = k_f m$$

$$m = T_f - T^{\circ}_f / k_f = 0.0 - 1.5 / 1.85 = 0.81 \text{ mol kg}^{-1}$$

$$\Delta t_b = T_b - T^{\circ}_b = k_b m$$

$$T_b = 100 + 0.5 \times 0.81 = 100.4^{\circ}\text{C}$$

٩. المعطيات

$$V = 500 \text{ mL} = 0.5 \text{ L}$$

$$W_{\text{protein}} = 50 \text{ g}$$

$$\pi = 19 / 760 \text{ mm Hg} = 0.025 \text{ atm}$$

$$T = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

يمكن حساب الوزن الجزيئي للبروتين وفق العلاقة:

$$\pi V = n R T = (W/M) R T$$

$$M = W R T / \pi V$$

$$M = 50 \times 0.082 \times 293 / (0.025 \times 0.5) = 96,104 \text{ g mol}^{-1}$$

١٠. المعطيات

$$C = 0.5 \text{ M}$$

$$T = 15 + 273 = 288 \text{ K}$$

$$i = 2.1$$

يمكن حساب الضغط الأسموزي النظري كما يلي:

$$\pi^0 = C R T = 0.5 \times 0.082 \times 288 = 11.8 \text{ atm}$$

قبل حساب الضغط الأسموزي الحقيقي للمحلول الألكتروليتي يجب حساب درجة التآين أولاً كما يلي:



$$1 - \alpha \qquad 2\alpha \qquad \alpha$$

$$n = 1 + 2\alpha$$

يرتبط عامل فانت هوف مع الخاصية الجامعة (الحقيقية و النظرية) بالعلاقة:

$$i = \pi_{\text{real}} / \pi^0 = n / 1$$

لاحظ أن الفرق في الخاصية ينتج فقط من العدد الحقيقي للجزيئات مقارنة بغياب التآين أو التجمع.

$$i = 1 + 2\alpha / 1$$

$$2.1 = 1 + 2\alpha$$

$$\alpha = 2.1 - 1 / 2 = 0.55$$

$$\pi = i \times \pi^0 = 2.1 \times 11.8 = 24.8 \text{ atm}$$



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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

الديناميكا الحرارية الكيميائية

الديناميكا الحرارية الكيميائية

٥

الجدارة: تعيين و استعمال الدوال الثرموديناميكية لبيان اتجاه التفاعل و العوامل المؤثرة عليه.

الأهداف :

- أن يحسب الطالب الشغل الميكانيكي لتمدد الغازات في العمليات المختلفة.
- أن يحسب الطالب طاقة تكوين المركبات التي لا يمكن تعيينها مباشرة و ذلك من الحساب الكيميائي.
- أن يحسب الطالب التغير في الأنتروبي في العمليات المختلفة.
- أن يستنتج الطالب إمكانية حدوث التفاعل من تطبيق قواعد الديناميكا الحرارية.
- أن يحسب الطالب التغير في الطاقة الحرة و الإنثالبي للتفاعلات.

الوقت المتوقع للدراسة : عشر ساعات في الفصل الدراسي.

متطلبات الجدارة: إتقان مبادئ الحساب الكيميائي و كتابة المعادلات و الاتزان الكيميائي في مقرر الكيمياء العامة.

علم الديناميكا الحرارية الكيميائية :

يدرس علم الديناميكا الحرارية في الأساس تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي و كذلك تحويل الطاقة الميكانيكية إلى شغل ميكانيكي. و لما كانت الطاقة الكيميائية صورة من صور الطاقة و التي ترتبط بالصور الأخرى و خاصة الحرارة فإن تطبيق قواعد الديناميكا الحرارية على التفاعلات الكيميائية كنظم محددة مفيد كثيرا لفهم التفاعلات الكيميائية و تعيين كميات هامة في الكيمياء. باختصار تقدم الديناميكا الحرارية الكيميائية دوال Functions يمكن من خلال تقديرها استنتاج احتمالية حدوث التفاعل الكيميائي تحت ظروف محددة. و يستلزم الوصول إلى تلك الدوال دراسة القوانين و الدوال الأساسية للديناميكا الحرارية كما سيأتي.

علم الكيمياء الحرارية : هو فرع الكيمياء الذي يتعامل من حيث القياس و الحساب مع التغيرات الحرارية التي تحدث أثناء التفاعلات الكيميائية و كذلك تأثير العوامل الخارجية مثل الضغط و درجة الحرارة. و هنا نوعان من التفاعلات: تفاعلات ماصة للحرارة Endothermic و أخرى طاردة للحرارة Exothermic. و نادرا ما نصادف تفاعلات لا حرارية Athermal حيث لا تمتص أو تطرد حرارة.

كون النظام: يمكن تقسيم الكون Universe (معمل أو مختبر مثلا) إلى نظام System (مثل كأس به سائل) و وسط محيط Surroundings (كل ما في المختبر باستثناء الكأس سالف الذكر).

النظم: النظام هو أي جزء من الكون نريد أن نخضعه للدراسة و يمكن معاملته كوحدة و له صفات محددة مثل أسطوانة غاز أو كأس يحتوي محلول معين. و يمكن تقسيم النظم حسب الظروف إلى ثلاثة أنواع:

- أ - **نظام مفتوح:** هو النظام الذي يمكنه تبادل المادة و الطاقة مع الوسط المحيط. مثل كأس غير مغطى يحتوي على سائل يغلي، حيث يمتص السائل الطاقة من الوسط المحيط و ينطلق بخار السائل من الكأس إلى الوسط المحيط.
 - ب - **نظام مغلق:** هو النظام الذي يمكنه تبادل الطاقة فقط مع الوسط المحيط. مثلا عند وضع غطاء محكم على كأس السائل الذي يغلي.
 - ج - **نظام معزول:** هو النظام الذي لا يمكنه تبادل المادة أو الطاقة مع الوسط المحيط. مثلا ترمس مثالي يحتوي على قهوة، حيث تظل القهوة ساخنة بدون فقد في الكمية أو الطاقة.
- العمليات:** هي الأحداث التي تشمل مواد النظام و مكوناته و تبادلها للمادة و الطاقة مع الوسط المحيط. وقد تكون العمليات كيميائية أو فيزيائية أو مختلطة.

العمليات حسب سرعة التغير

- أ - عمليات غير عكسية: يكون التغير كبيراً و ملحوظاً بالنسبة للدارس. مثل عقرب الثواني لمستطلع الوقت، أو تفريغ أسطوانة من الغاز المضغوط، أو تفاعل حمض و قلوي.
- ب - عمليات عكسية: يكون التغير متناهي في الصغر بحيث يبدو الحدث كما لو كان لا يتغير. مثل تحرك عقرب الساعات لمستطلع الوقت.
- ج - عمليات الاتزان: هنا تكون العملية متوقفة تماماً و لا يحدث التغير بغض النظر عن فترة الرصد. وعملياً لا يمكن التفرقة بين عمليات عكسية و عمليات الاتزان، و تعامل التفاعلات العكسية على أنها في حالة اتزان.

التعبير الرياضي عن سرعة العملية:

نفرض أن المتغير مع الزمن هو x .

في العملية غير العكسية يكون التغير هو $\Delta x = x_f - x_i$

في العملية العكسية يكون التغير هو $(\Delta x)_{\rightarrow 0} = dx$

في عملية الاتزان يكون التغير هو $\Delta x = dx = 0$

العمليات حسب تلقائية الحدوث

- أ - عمليات تلقائية: هي العمليات التي تحدث ذاتياً دون الحاجة لتغيير خواص المواد المكونة للنظام أو تغيير الظروف مثل الضغط أو درجة الحرارة. مثلاً سقوط حجر نحو الأرض تحت تأثير الجاذبية أو تفاعل قطعة صوديوم مع الماء لتكوين هيدروكسيد الصوديوم و تصاعد غاز الهيدروجين. و يرجع السبب في حدوث العملية تلقائياً إلى أن النظام سيكون أقل في الطاقة (الطاقة الحرة تحديداً كما سنتعلم) بعد تمام العملية. و قد تكون العملية التلقائية مصحوبة بشغل نافع يمكن الاستفادة منه.

- ب - عمليات غير تلقائية: هي محاولة عكس اتجاه العملية التلقائية و في هذه الحالة لا بد من التدخل الخارجي لتغيير الظروف أو خواص النظام، و عادة يلزم بذل شغل لإتمام تلك العمليات. مثلاً يلزم بذل شغل لرفع حجر ضد الجاذبية أو مد النظام بشغل كهربائي للحصول على فلز الصوديوم من هيدروكسيد الصوديوم.

العمليات حسب ظروف إجرائها

- أ - عمليات درجة الحرارة الثابتة (إيزوثرمية) Isothermal : هي العمليات التي تحدث عند ثبوت درجة الحرارة. و نتيجة لذلك لا يحدث تغيير في الطاقة الداخلية للنظام، $\Delta E = 0$.

ب - عمليات الضغط الثابت (إيزوبارية) Isobaric : هي العمليات التي تحدث عند ثبوت الضغط و غالبا ما يكون الضغط الجوي العادي. نتيجة لذلك يمكن أن يحدث تمدد أو انكماش لغازات النظام و بالتالي تغيير حجم النظام.

ج - عمليات أدياباتيكية Adiabatic : هي العمليات التي تحدث في نظام معزول، أي لا يحدث انتقال للحرارة (q) من أو إلى النظام، أي $q = 0$.

د - عمليات الحجم الثابت (إيزوكورية) Isochoric : هي العمليات التي تحدث في نظام مغلق ذو حجم ثابت. نتيجة لذلك لا يمكن أن يحدث شغل من أو على النظام، أي $W = 0$.

صور الطاقة :

الطاقة هي إحدى صفات المادة التي تحدد حالتها و نشاطها و قدرتها على إحداث التغيير في النظام و الوسط المحيط. أن الطاقة باختصار هي المقدرة على بذل الشغل. و لا يمكن حساب أو تقدير الطاقة المطلقة للمادة و لكن يمكن تقدير أو حساب التغيير في الطاقة عندما تدخل المادة في تفاعل أو عملية. وللطاقة صور عديدة مثل الطاقة الحرارية و الطاقة الميكانيكية و الطاقة الضوئية و الطاقة الكهربائية و الطاقة الكيميائية. و عموما يمكن تحويل إحدى صور الطاقة إلى صور أخرى، مثل تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي أو تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهرباء. و الشغل يعتبر من صور الطاقة أو مرادف لها في كثير من الحالات و يقاس بنفس الوحدات.

وحدات قياس الطاقة :

في البداية لابد من التذكير بالنظام الدولي SI و النظام المتري المعروف اختصارا cgs. و يلخص الجدول (5-1) الوحدات الأساسية للنظامين.

جدول (5-1) : الوحدات الأساسية للنظامين الدولي و cgs.

الكمية	النظام الدولي	نظام cgs
الطول	المتر (m)	سم (cm)
الكتلة	كيلو جرام (kg)	جرام (g)
الزمن	الثانية (s)	الثانية (s)
شدة الاستضاءة	القنديل (cd)	
التيار الكهربائي	أمبير (A)	
كمية المادة	المول (mol)	

هناك وحدات عديدة لقياس الطاقة و الشغل حسب صورة الطاقة أو الشغل، و من الصور الهامة والتي تعيننا في هذه الحقيبة ما يلي:

١. الطاقة الميكانيكية و الشغل الميكانيكي يقاس في النظام الدولي بالجول (J) و بالأرج erg في نظام cgs. الجول: هو الطاقة اللازمة لنقل كيلو جرام من المادة بتسارع (عجلة) مقدارها متر لكل ثانية مربعة و لمسافة متر واحد. الأرج: هو الطاقة اللازمة لنقل جرام من المادة بتسارع (عجلة) مقدارها سم لكل ثانية مربعة و لمسافة سم واحد.

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$$

٢. الطاقة الحرارية تقاس بالسعر أو الكالوري (Calorie (cal و هو كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام من الماء درجة مئوية واحدة، عند درجة حرارة 15°C.

٣. الطاقة الكيميائية وهي الطاقة المخزونة في الجزيئات و التي تتطلق غالبا في صورة حرارة في التفاعلات مثل احتراق وقود. تقاس هذه الطاقة بإحدى الوحدتين السابقتين.

العلاقة بين وحدة الشغل الميكانيكي و وحدة الحرارة:

من السهل تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي و بالعكس و لهذا يلزم معرفة المكافئ الميكانيكي الحراري. وقد وجد أن:

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

اصطلاحات الطاقة و الشغل و كمية الحرارة:

كل من الطاقة و الشغل و كمية الحرارة عبارة عن كمية قياسية (أي لا تعتمد على الاتجاه). وقد اصطلح على إعطاء إشارة للتغيير في الكمية حسب طبيعة العملية (و هو اختياري بالاتفاق و قد يختلف من مرجع إلى آخر). و الاصطلاحات في هذا الكتاب على النحو الآتي:

أ - الطاقة E : إذا امتصت طاقة من النظام تكون الإشارة موجبة و التغيير في الطاقة $\Delta E = +ve$

إذا خرجت طاقة من النظام تكون الإشارة سالبة و التغيير في الطاقة $\Delta E = -ve$

ب - الشغل W : الشغل المفعول من النظام على الوسط المحيط يأخذ إشارة موجبة $W = +ve$

الشغل المفعول على النظام من الوسط المحيط يأخذ إشارة سالبة $W = -ve$

ج - الحرارة q : إذا امتصت حرارة من النظام تكون الإشارة موجبة و التغيير في الحرارة $q = +ve$

إذا خرجت حرارة من النظام تكون الإشارة سالبة و التغيير في الحرارة $q = -ve$

القانون الأول للديناميكا الحرارية:

"في كل العمليات التي تحدث في نظام معزول تكون الطاقة الداخلية للنظام ثابتة" هذا القانون هو مبدأ بقاء الطاقة: "الطاقة لا تفنى و تستحدث". وهذا يعني أن المجموع الجبري للتغيرات في جميع صور الطاقة في النظام المعزول يساوي الصفر. إذا اختفت صورة من صور الطاقة تظهر صورة أخرى مساوية في المقدار. يمكن التعبير رياضياً عن هذا القانون بالعلاقة الآتية:

$$q = \Delta E + W \quad (5-1)$$

حيث q هي كمية الحرارة التي يمتصها النظام أو يطردها، و W هو الشغل المبذول من النظام أو عليه، ΔE هو التغير في الطاقة الداخلية للنظام. يمكن أن نفهم المعادلة (5-1) بأن النظام عندما يمتص كمية حرارة فإنه يستطيع استغلال الحرارة في عمل شغل ضد الوسط المحيط أو رفع الطاقة الداخلية له أو الأمرين معا.

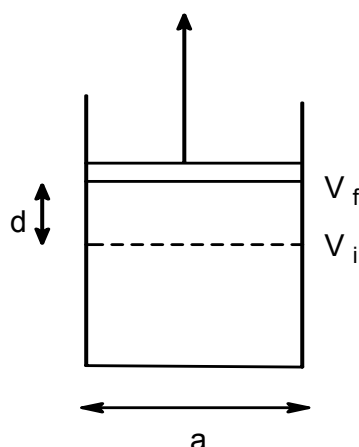
مسار العملية: في أي عملية فيزيائية أو كيميائية هناك دائماً حالة ابتدائية (i) initial و حالة نهائية final (f) و التغير في كمية ما يحدده أمرين: الحالتين الابتدائية و النهائية و مسار التغير. الكمية التي لا يعتمد التغير فيها على مسار العملية بل الحالتين الابتدائية و النهائية تسمى دالة حالة state function أو دالة ديناميكا حرارية thermodynamic function. و يمكن التعبير رياضياً عن ذلك بما يلي:

$$\Delta E = E_f - E_i \quad (5-2)$$

و من الأمثلة على دوال الحالة الحجم و الضغط و الطاقة الداخلية. أما الكميات التي تعتمد على مسار العملية فلا يمكن حساب التغير فيها من الحالتين الابتدائية و النهائية فقط. ومن الأمثلة على ذلك الشغل، حيث تعتمد كمية الشغل على طريقة بذل الشغل و ليس فقط نقطتي البداية و النهاية.

شغل التمدد Work of expansion:

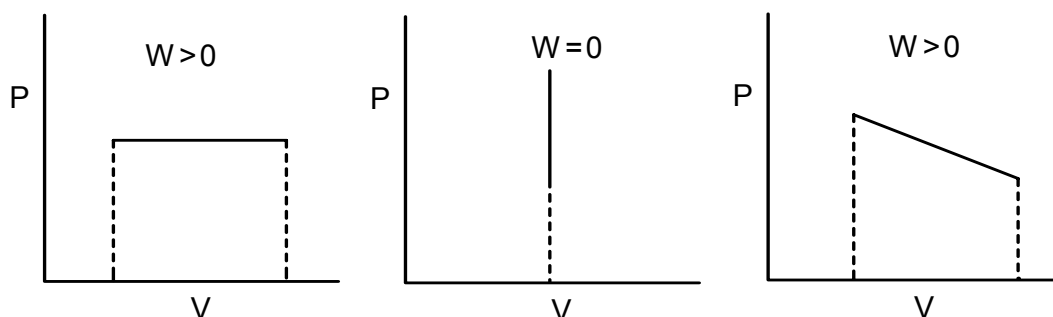
في الغالب يؤخذ في الاعتبار تمدد الغازات فقط كشكل من أشكال الشغل الميكانيكي، و يهمل تمدد المواد الصلبة و السائلة. و لحساب شغل تمدد غاز نتصور جزيء واحد من غاز لا يتفاعل موضوع في اسطوانة معزولة و مغطاة بمكبس عديم الاحتكاك قابل للحركة صعوداً و هبوطاً، كما مبين في الشكل (5-1).



شكل (5-1): نموذج النظام المستخدم لبيان شغل تمدد الغاز.

بفرض أن مساحة مقطع الاسطوانة a (cm^2) و ضغط الغاز P (atm) و تمدد الغاز من الحجم V_i إلى الحجم V_f ، أي ارتفاع المكبس مسافة d (cm)، فإن الشغل المبذول من الغاز ضد الوسط المحيط هو:

$$W = P a d = P(V_f - V_i) = P\Delta V \quad (5-3)$$



شكل (5-2): التمثيل البياني لشغل التمدد في حالات تغيير الحجم أو الضغط.

من المهم ملاحظة أن التغير في الحجم مُلزم لحدوث الشغل، بينما تغير أو ثبوت الضغط ليس ضروري. و لفهم ذلك نستعين بالمقابل البياني للشغل من العلاقة البيانية بين الضغط و الحجم، انظر الشكل (3-2). يلاحظ من الرسوم أن مساحة تنتج فقط إذا تغير الحجم، و المساحة المحصورة بين خطي تغير كل من الضغط و الحجم هي المقابل البياني للشغل. و السؤال الآن هو: هل مقدار الشغل ثابت دائماً ولا يعتمد إلا على الضغط و التغير في الحجم؟ بالطبع لا. لأن الشغل يعتمد على مسار العملية. يجب ملاحظة أن المقدار $P\Delta V$ يكافئ الشغل أو الطاقة من حيث الوحدات أيضاً، و يجب عند الحاجة استخدام التحويل المناسب للحصول على الشغل بالوحدة الصحيحة. و لما كان الضغط يُقاس عادة بوحدة الضغط الجوي atm و الحجم بالتر L، يلزم إجراء التحويل الآتي للحصول على الشغل بوحدة الجول:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 101,325 \text{ Pa (kg/ms}^2\text{)} \\ 1 \text{ L} &= 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$P\Delta V (\text{atm} \times \text{L}) = 101325 \times 10^{-3} = 101.325 (\text{kg m}^2/\text{s}^2) = 101.325 \text{ J}$$

و على ذلك يجب أن نضرب ناتج الشغل بوحدة atm L بالمقدار 101.325 ليصبح الشغل بوحدة الجول. حسب القانون الأول، عند امتصاص كمية من الحرارة فمن الممكن استغلال ذلك في عمل شغل بالإضافة إلى تغير الطاقة الداخلية للغاز. و بالتحكم في ظروف العملية و كذلك سرعة العملية يمكن الحصول على مقادير مختلفة للشغل.

من المعادلتين (5-2) و (5-3) نحصل على المعادلة:

$$q = \Delta E + P(V_f - V_i) \quad (5-4)$$

دالة الإنثالبي H: و يمكن كتابة المعادلة السابقة في الصورة:

$$q = E_2 - E_1 + P (V_f - V_i) \quad (5-5)$$

$$q = (E_f + PV_f) - (E_i + PV_i) \quad (5-6)$$

$$q_p = H_f - H_i = \Delta H \quad (5-7)$$

تسمى الدالة الجديدة الإنثالبي (H) Enthalpy أو المحتوى الحراري heat content و هي مساوية لكمية الحرارة الممتصة أو المنطلقة عند ثبوت الضغط، كما يدل على ذلك الرمز q_p ، و تقاس بوحدة السعر أو الجول. بالمقابل عند ثبوت الحجم لا يستطيع النظام عمل شغل، أي أن $W = 0$ ، ويكون:

$$q_v = \Delta E \quad (5-8)$$

و على ذلك فإن الحرارة الممتصة أو المنطلقة في العملية ذات الحجم الثابت تختزن في صورة تغير في الطاقة الداخلية للنظام، و تقاس بوحدة السعر أو الجول. من المعادلتين السابقتين يمكن استنتاج أن:

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V \quad (5-9)$$

مثال: احسب التغير في الإنثالبي لغاز تمدد عند ضغط 2.6 atm من حجم مقداره 2.5 L إلى 5.3 L و كان التغير في الطاقة الداخلية 200 cal.

$$\text{الحل: الشغل الذي بذله الغاز هو } W = P\Delta V = 2.6 \times (5.3 - 2.5) = 7.28 \text{ atm L}$$

$$\text{للتحويل إلى جول نضرب الناتج في المقدار 101.325 : } W = 7.28 \times 101.325 = 737.646 \text{ J}$$

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V = 200 + 737.646 = 937.645 \text{ J} \quad \text{التغير في الإنثالبي :}$$

الحرارة النوعية: هي كمية الحرارة اللازمة لرفع جم واحد من المادة درجة مئوية واحدة. وحدة القياس سعر لكل درجة كلفن لكل جرام cal/K/g.

السعة الحرارية: هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة المادة درجة مئوية واحدة. وحدة القياس سعر لكل درجة كلفن cal/K.

السعة الحرارية الجزيئية (C): هي كمية الحرارة اللازمة لرفع الجزيء الجرامي الواحد من المادة درجة مئوية واحدة. وحدة القياس سعر لكل درجة كلفن لكل جزيء cal/K/mol. وهناك نوعان من السعة الحرارية الجزيئية للغازات خاصة: عند ثبوت الحجم C_v و عند ثبوت الضغط C_p .

السعة الحرارية الجزيئية عند ثبوت الحجم (C_v): وفق القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$q_v = n \Delta E \quad (5-10)$$

$$C_v = q_v / \Delta T = \Delta E / \Delta T \quad (5-11)$$

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (5-12)$$

حيث q هي كمية الحرارة، n هي عدد الجزيئات، و ΔE هو التغير في الطاقة الداخلية للغاز، و ΔT هي فرق درجات الحرارة النهائية T_f و الابتدائية T_i .

السعة الحرارية الجزيئية عند ثبوت الضغط (C_p): بالمثل وفق القانون الأول

$$q_p = n \Delta H \quad (5-13)$$

$$C_p = q_p / \Delta T = \Delta H / \Delta T \quad (5-14)$$

العلاقة بين C_p و C_v : من المعادلات (5-9, 5-11, 5-13) يمكن الوصول إلى العلاقة:

$$C_p = C_v + P (\Delta V / \Delta T) \quad (5-15)$$

من قانون الغاز المثالي و لجزيء واحد من الغاز:

$$PV = RT \quad (5-16)$$

بالتعويض في المعادلة (5-15) نحصل على العلاقة الآتية:

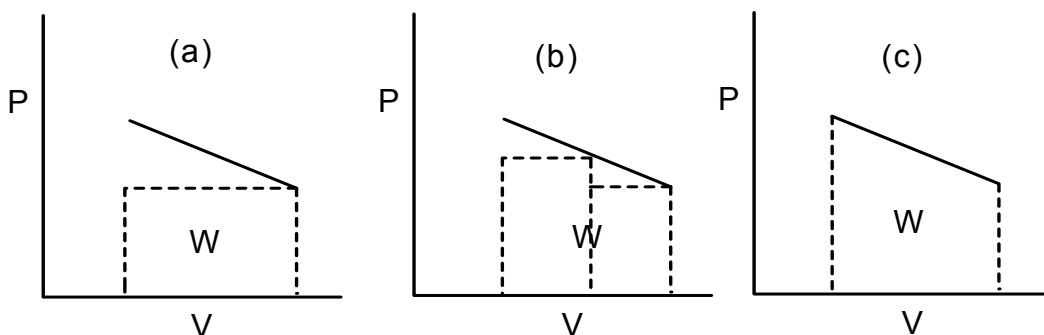
$$C_p = C_v + R = C_v + 2 \quad (5-17)$$

حساب شغل التمدد:

أ - في العملية الايزوثرمية: وفق القانون الأول و عند ثبوت درجة الحرارة فإن

$$\Delta E = 0, \quad q = W \quad (5-18)$$

من المعادلة (5-3)، الشغل هو حاصل ضرب الضغط في التغير في الحجم، $W = P\Delta V$ ، ولا يمكن حساب ذلك لأنه حسب قانون الغاز المثالي، و عند ثبوت درجة الحرارة، يجب أن يتغير الضغط مع تغير الحجم. وعند محاولة تطبيق المعادلة (5-3) لحساب الشغل، يمكن أن نحصل على مقادير مختلفة حسب عدد وحجم خطوات العملية. يعرض الشكل (5-3) مقدار الشغل (مقدار المساحة) عند إجراء التمدد في خطوة (a) أو خطوتين (b) أو عدد لا نهائي من الخطوات (c).



شكل (3-5): اعتماد شغل التمدد على عدد خطوات العملية.

من الواضح أن النهاية العظمى للشغل W_{\max} نحصل عليها عند إجراء التمدد في عدد لا نهائي من الخطوات، أي إجراء العملية عكسياً. و من المعروف أن تجزئة العملية إلى عدد لا نهائي من الخطوات يُقابل رياضياً بإجراء تفاضل للمتغير. أما تجميع الخطوات أو المساحات فهو رياضياً التكامل. و هكذا نستنتج أن شغل التمدد في العملية الأيزوثرمية يمكن حسابه فقط و يكون أكبر ما يمكن عند إجراء التمدد بطريقة عكسية. و يصبح القانون الأول على الصورة:

$$q_{\text{rev}} = W_{\max} \quad (5-19)$$

والآن نجري عملية تكامل للتغيرين التفاضليين للضغط و للحجم كما يلي:

$$W = \int \partial(PV) = \int V \partial P + \int P \partial V \quad (5-20)$$

من السابق لا ينتج حاصل ضرب الحجم في التغير الضغط شغلاً. أي أن:

$$\int V \partial P = 0 \quad (5-21)$$

$$W_{\max} = \int P \partial V \quad (5-22)$$

ونتخلص من المتغير P باستبداله بالمقدار المناسب من قانون الغاز المثالي، ثم نجري تكامل محدود من

الحجم الابتدائي V_i إلى الحجم النهائي V_f ، فنحصل على:

$$W_{\max} = n R T \int \partial V/V \quad (5-23)$$

$$W_{\max} = n R T \ln (V_f/V_i) \quad (5-24)$$

مثال: احسب شغل تمدد ١٠ جزيئات من غاز مثالي تمدد عكسي و أيزوثرمي عند درجة حرارة ٢٩٨

كلفن من حجم ٣ لترات إلى ٧ لترات.

$$\text{الحل: } W_{\max} = n R T \ln (V_f/V_i) = 10 \times 8.314 \times 298 \times \ln (7/3) = 20992.4 \text{ J}$$

ب - في العملية الأديباتيكية: من تعريف العملية الأديباتيكية $q = 0$ ، و يصبح القانون الأول على الصورة:

$$W = - \Delta E = - C_v \Delta T \quad (5-25)$$

مثال: احسب شغل تمدد ٤ جزيئات من غاز مثالي تمدد عكسي و أديباتيكي من درجة حرارة ٢٩٨

كلفن إلى ٢٠٠ كلفن. السعة الحرارية الجزيئية للغاز ٤,٦ سعر لكل درجة لكل جزيء.

$$\text{الحل: } W = -n C_v (T_f - T_i) = -4 \times 4.6 \times (200 - 298) = 1803.2 \text{ cal}$$

العلاقة المميزة للعمليات الأديباتيكية:

$$\begin{aligned} dE + dW &= 0 \\ C_v dT + P dV &= 0 \\ C_v dT/T + RT dV/V &= 0 \\ C_v dT/RT + dV/V &= 0 \end{aligned}$$

بإجراء التكامل للمعادلة السابقة، نحصل على:

$$C_v/R \ln (T_f/T_i) = - \ln (V_f/V_i)$$

وبالترتيب نحصل على العلاقة الآتية:

$$(T_f/T_i)^{C_v/R} = V_i/V_f \quad (5-26)$$

قوانين الكيمياء الحرارية

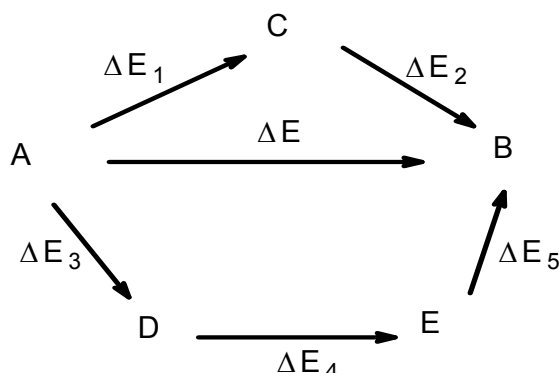
حرارة التفاعل: هي التغير الحراري المصاحب للتفاعل الكيميائي. و لتوحيد القياس تسجل حرارة التفاعل عند الظروف القياسية المعتادة (٢٥ مئوية و ١ ضغط جوي) لكل نوع من التفاعلات و لجزيء واحد من المادة، مثل حرارة التكوين و حرارة الاحتراق و حرارة التعادل و حرارة الذوبان. و حرارة التحول الفيزيائي للمادة (الحرارة الكامنة) هامة أيضا في الحساب الكيميائي، مثل الحرارة الكامنة للغليان أو الانصهار أو التسامي (التصعيد). وعموما اصطلح على أن تكون الحرارة الممتصة موجبة و يسمى التفاعل تفاعل ماص للحرارة، و الحرارة المنطلقة سالبة و يسمى التفاعل تفاعل طارد للحرارة.

حرارة التكوين: التغير في كمية الحرارة المصاحب لتكوين جزيء واحد من عناصره في الحالة الأكثر ثباتا عند الظروف القياسية الاعتيادية.

حرارة الاحتراق: كمية الحرارة المنطلقة عند احتراق جزيء واحد من المادة احتراقاً كاملاً في وجود كثير من الأكسجين عند الظروف القياسية الاعتيادية.

حرارة التعادل: كمية الحرارة المنطلقة عند تعادل مكافئ جرامي من حمض مع مكافئ جرامي من قاعدة أو قلوي، بشرط أن تكون المحاليل مخففة جدا.

قانون هيس: "حرارة التفاعل لا تعتمد على طريقة أو مسار التفاعل، بل على الحالتين الابتدائية و النهائية". وهذا القانون تطبيق مباشر على القانون الأول للديناميكا الحرارية. و يستخدم التغير في دالة الإنثالبي ΔH كمقياس لحرارة التفاعل عند ثبوت الضغط، بينما يستخدم التغير في دالة الطاقة الداخلية ΔE عند ثبوت الحجم. ولما كانت الدالتان لا تعتمدان على مسار العملية فإنه من الممكن إجراء التفاعل بعدة طرق متكافئة بشرط البدء و الانتهاء بنفس المواد و في نفس الحالة. و يصور الشكل الآتي ثلاث طرق لتحويل A إلى B. و لعمل ذلك يلزم معرفة كتابة التفاعل الكيميائي الحراري.

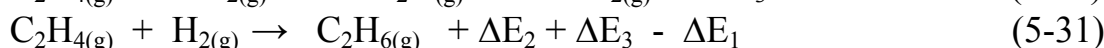
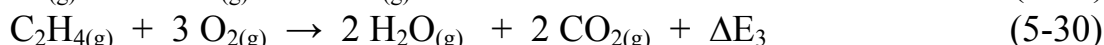
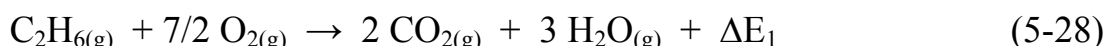


$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = \Delta E_3 + \Delta E_4 + \Delta E_5$$

التفاعل الكيميائي الحراري: هو التفاعل الكيميائي الموزون بالإضافة إلى تحديد الحالة الفيزيائية للمواد وإضافة حرارة التفاعل، كما في المثال الآتي (هدرجة اللايثيلين إلى الإيثان):



ومعرفة للتفاعل السابق غير ممكنة عمليا، و لذلك نلجأ للحساب الكيميائي وقانون هيس مع استخدام حرارة احتراق المواد الداخلة في التفاعل و النواتج:



بتطبيق قواعد المعادلات الرياضية يمكن الوصول إلي المعادلة (5-27) من المعادلات (5-28-5-30).

نطرح المعادلة (5-28) من مجموع المعادلتين (5-29,5-30). نلاحظ أن المواد الكيميائية متساوية في المعادلتين (5-27,5-31) و عليه فيجب أن يكون:

$$\Delta E = \Delta E_2 + \Delta E_3 - \Delta E_1 \quad (5-31)$$

و هكذا يمكن الحصول على حرارة أي تفاعل بإعادة تكوينه من تفاعلات معلومة حرارتها. و كثيرا ما يتم التفاعل تحت ضغط ثابت و ليس في حجم ثابت و يلزم معرفة التغير في الإنثالبي. و الفرق هنا هو حدوث شغل ينتج عادة من اختلاف عدد الجزيئات المتفاعلة عن عدد الجزيئات الناتجة. يمكن حساب ذلك كما يلي، و عند ثبوت درجة الحرارة:

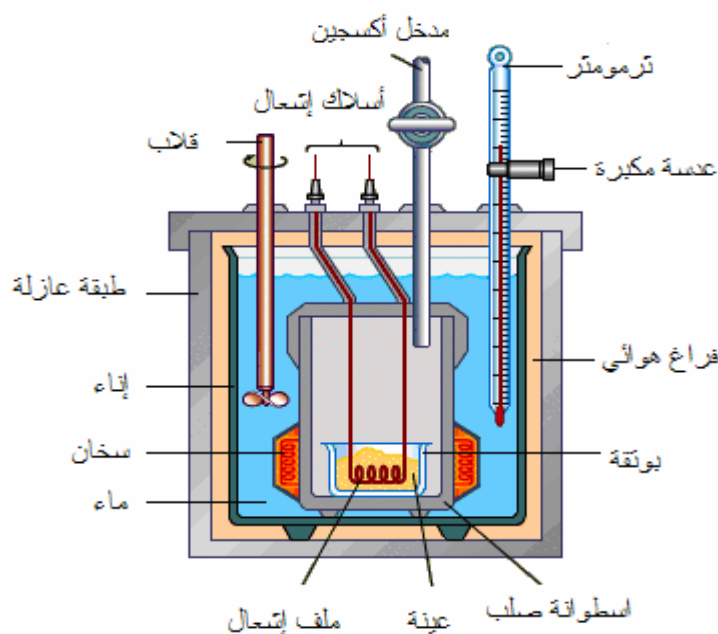
$$P \Delta V = \Delta n RT \quad (5-32)$$

$$\Delta H = \Delta E + \Delta n RT \quad (5-33)$$

بتطبيق المعادلة الأخيرة في حالة التفاعل (5-27) : $\Delta n = n_f - n_i = 1 - 2 = -1$ ، إذا :

$$\Delta H = \Delta E - RT$$

تعيين حرارة الاحتراق: يستخدم لذلك مُسعر، مثل المسعر التفجيري الأديباتيكي (adiabatic bomb calorimeter)، شكل (4-5)، حيث توضع وزنة معينة من المادة المراد حرقها في قنينة من الكوارتز، داخل اسطوانة من الصلب الذي لا يصدأ خاصة بالمسعر. بعد ذلك تملأ الأسطوانة بالأكسجين (حوالي ٣٠ ضغط جوي)، ثم يتم الاحتراق باستخدام تيار كهربائي وتسجل درجة حرارة مياه المسعر بدقة. تجرى بعض الحسابات الخاصة بالمسعر و المادة المحترقة للتوصل إلى التغير في الطاقة الداخلية و هو حرارة الاحتراق تحت حجم ثابت.



شكل (4-5): المسعر التفجيري الأديباتيكي .

قانون كيرشوف: يمكن استخدام هذا القانون لتقدير حرارة التفاعل عند درجة حرارة معينة بدلالة حرارة التفاعل عند درجة أخرى و السعة الحرارية للمواد الداخلة في التفاعل و النواتج:

$$d \Delta H/dT = \Delta C_p \quad (5-34)$$

$$\Delta C_p = \sum C_{p(\text{product})} - \sum C_{p(\text{reactant})} \quad (5-35)$$

قانون كيرشوف تقريبي لأن السعة الحرارية الجزيئية تعتمد على درجة الحرارة، و لكن يمكن

إهمال اعتماد السعة الحرارية على درجة الحرارة إذا كان نطاق التغير في درجة الحرارة صغير.

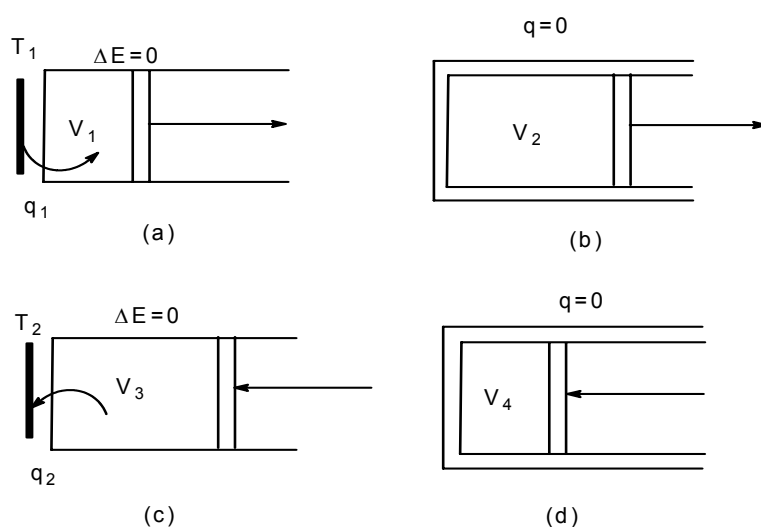
القانون الثاني للديناميكا الحرارية:

على الرغم من أن القانون الأول يتعامل مع صور الطاقة المختلفة و أن الطاقة الداخلية للنظام المعزول تكون ثابتة فإنه لم يتعامل مع اتجاه تحول الطاقات المختلفة و لم يقل كيف نميز بين حالة التلقائية و حالة الاتزان، و هو ما يعالجه القانون الثاني، و الذي ينص على أن العملية تكون تلقائية إذا أدى اتجاهها للحصول على شغل نافع. و تكون العملية غير تلقائية إذا ما احتاجت العملية لبذل شغل للقيام

بها. فمثلا لا يمكن لجسم ما رفع درجة حرارته بامتصاص حرارة من جسم له نفس درجة الحرارة بدون بذل شغل و تحويله إلى حرارة قبل إتمام العملية. و هكذا يستحيل تلقائيا انتقال الحرارة من جسم بارد إلى جسم أعلى في درجة الحرارة أو انكماش غاز تحت ضغط أعلى من الضغط الخارجي الواقع عليه. أيضا تحدث العمليات التلقائية في محاولة للوصول أخيرا إلى حالة الاتزان، مثلما يحدث عند تبريد جسم ساخن ليكتسب في النهاية درجة حرارة الغرفة (الوسط المحيط). أيضا عندما يتمدد غاز تحت ضغط عالي حتى يصل في النهاية إلى ضغط الوسط المحيط. و فيما يلي محاولة الوصول إلى دالة يمكن استخدامها في التنبؤ باتجاه التغير.

كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي: يعود السبب في عدم إمكانية التحويل الكامل للحرارة إلى شغل ميكانيكي إلى أن جزء من الحرارة يطرد من النظام و لا يمكن تحويله إلى شغل نافع بسبب طبيعة الحركة الترددية للمكابس في غرف الاحتراق المُولد للشغل الميكانيكي. أيضا لا يمكن عمليا الاستفادة من الشغل العكسي، مما يعني فقد جزء من الشغل بسبب التحميل غير العكسي. و السؤال الآن: كيف نرفع كفاءة تحول الحرارة إلى شغل؟ ذلك ما بحثه المهندس كارنوت كما يلي:

دورة كارنوت: الشغل النافع في المحركات يتكون من مشوارين أساسيين هما تمدد الغاز الحار ثم انكماشه و تبريده، ثم يتكرر هذان المشواران. و كل مشوار من المشوارين السابقين يتكون من نوعين من التمدد (الانكماش)، هما التمدد (الانكماش) الأيزوثيرمي و التمدد (الانكماش) الأديابتيكي. وللحصول على أقصى شغل افترض أن المشاوير تتم عكسيا. و تسمى العملية بعملية حلقية حيث يتم الوصول في النهاية إلى الحالة الابتدائية، شكل (5-5) و شكل (5-6).



شكل (5-5): الأربع خطوات المتضمنة عملية تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكي.

الخطوة الأولى: امتصاص كمية حرارة q_1 للحصول على الشغل الايزوثيرمي W_1 عند درجة حرارة T_1

$$W_1 = q_1 = RT_1 \ln (V_2/V_1) \quad (5-36)$$

الخطوة الثانية: امتصاص كمية حرارة q_2 للحصول على الشغل الأديابتيكي W_2

$$W_2 = q_2 = -C_v (T_2 - T_1) \quad (5-37)$$

الخطوة الثالثة: امتصاص كمية حرارة q_3 للحصول على الشغل الايزوثيرمي W_3 عند درجة حرارة T_2

$$W_3 = q_3 = RT_2 \ln (V_4/V_3) \quad (5-38)$$

الخطوة الرابعة: امتصاص كمية حرارة q_4 للحصول على الشغل الأديابتيكي W_4

$$W_4 = q_4 = -C_v (T_1 - T_2) \quad (5-39)$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (5-40)$$

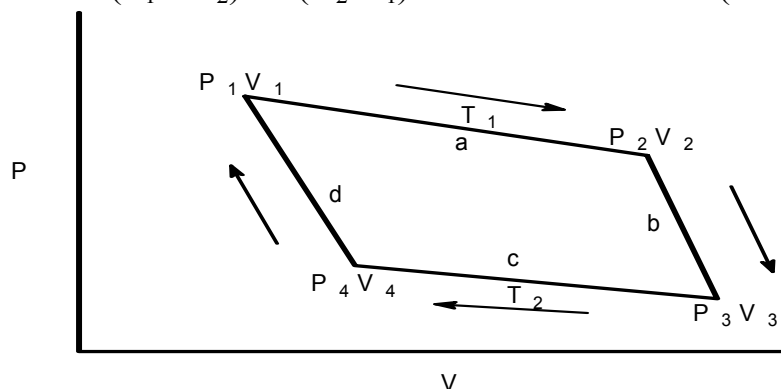
$$W = RT_1 \ln (V_2/V_1) + C_v(T_1-T_2) - RT_2 \ln (V_3/V_4) - C_v (T_1 - T_2) \quad (5-41)$$

من العلاقة المميزة للعمليات الأديابتيكية يمكن إثبات أن:

$$V_2/V_1 = V_3/V_4 \quad (5-42)$$

محصلة الشغل W هي:

$$W = R(T_1 - T_2) \ln (V_2/V_1) \quad (5-43)$$



شكل (5-6): التمثيل البياني للأربع خطوات المتضمنة تحويل الحرارة إلى شغل وفق دورة كارنوت.

كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل يمثلها $Eff = W/q$ ، بمعنى أن:

$$Eff = W/q = q_1 - q_2 / q_1 = R(T_1 - T_2) \ln (V_2/V_1) / RT_1 \ln (V_2/V_1) \quad (5-44)$$

$$Eff = q_1 - q_2 / q_1 = T_1 - T_2 / T_1 \quad (5-45)$$

و على ذلك تتوقف كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل على فرق درجات الحرارة المطلقة لعمليتي الاحتراق وطررد العادم. و لما كانت عملية طرد الحرارة عند الانكماش لا يمكن أن تصل للصفر المطلق، فإن الكفاءة لا يمكن أن تصل إلى ١٠٠٪. مثلاً إذا كانت درجة الاحتراق ٣٦٧ درجة مئوية و حرارة المكثف

عند خروج العادم ٤٠ درجة مئوية، فإن الكفاءة هي:

$$Eff = T_1 - T_2 / T_1 = \{(367+273) - (40+273)\} / (367+273) = 0.25 = 25\%$$

بمعنى أن من كل ٤ سرعات يمتصها المحرك فإن سعر واحد فقط هو الذي يتحول إلى شغل ميكانيكي و تضع ٣ سرعات في عملية طرد العادم، مع الأخذ في الاعتبار أننا نفترض أن المحرك يعمل عكسياً و هو ما ليس ممكن في الواقع العملي. بمعنى أن الكفاءة الواقعية أقل من ٢٥٪.

دالة الأنتروبي: قبل الحديث عن هذه الدالة، ربما كان من الأفضل استنتاجها من المعادلة السابقة (5-45). نعيد كتابة المعادلة (5-45) في الصورة:

$$q_1/T_1 + q_2/T_2 = 0 \quad (5-46)$$

$$\sum q/T = 0 \quad (5-47)$$

$$\sum S = 0 \quad (5-48)$$

حيث $S = q/T$ هو ما يعرف بدالة الأنتروبي. و يقاس الأنتروبي بوحدة سعر لكل درجة كلفن cal K^{-1} . وما هو واضح من المعادلة (5-48) فإن مجموع دوال الأنتروبي لعملية حلقية عكسية يساوي الصفر. هذا يعني أن الوصول من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية لا يعتمد على مسار العملية. وهكذا تكون دالة الأنتروبي دالة حالة أو دالة ثرموديناميكية. و لمثل هذه الدوال يمكن التعبير عن التغير في الدالة على الصورة:

$$\Delta S = S_f - S_i \quad (5-49)$$

حيث S_f, S_i هما الحالتين النهائية و الابتدائية. ويجب التنبيه إلى أن التغير في الأنتروبي لا يمكن قياسه أو تعيينه إلا في عملية عكسية و لكن متى ما تم حسابه فإن مقداره هو نفسه للعملية بغض النظر عن طريقة أجزائها.

مثال: هناك جسمان، أحدهما ساخن عند درجة حرارة T_h و الآخر بارد عند درجة الحرارة T_l في نظام معزول، و نريد حساب التغير في الأنتروبي للنظام عندما تكون العملية عكسية (a) و عندما تكون العملية غير عكسية (b)، كما هو مبين في الشكل (5-7).

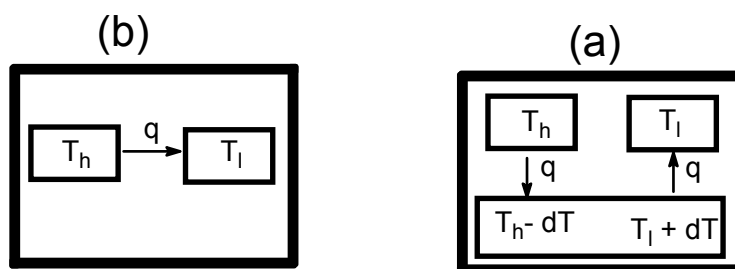
الحل: بالنسبة للعملية غير العكسية لا يمكن حساب التغير في الأنتروبي مباشرة، لأن التغير في الأنتروبي ΔS يجب أن

يعين من عملية

عكسية. في حالة

العملية العكسية (a)

يجب أن نفترض وجود



شكل (5-7): انتقال الحرارة بالطريقتين العكسية و غير العكسية.

وسط محيط داخل النظام المعزول يتم تبادل الحرارة بين النظام و بينه و بطريقة عكسية. حسب الشكل يتم انتقال الحرارة من الجسم الساخن، عند T_h إلى جزء من الوسط المحيط أبرد قليلا، عند $T_h - dT$ ، و في نفس الوقت تنتقل الحرارة إلى الجسم البارد، عند T_ℓ من جزء من الوسط المحيط أسخن قليلا عند $T_\ell + dT$. التغير في الأنتروبي ΔS هو محصلة العمليتين السابقتين.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{system}} + \Delta S_{\text{surroundings}} \quad (5-50)$$

$$\Delta S_{\text{system}} = \Delta S_{\text{hot body}} + \Delta S_{\text{cold body}} \quad (5-51)$$

$$= -q/T_h + q/T_\ell \quad (5-52)$$

$$\Delta S_{\text{surroundings}} = \Delta S_{\text{hot surroundings}} + \Delta S_{\text{cold surroundings}} \\ = -q/T_\ell + q/T_h \quad (5-53)$$

$$\Delta S = 0 \quad (5-54)$$

و على ذلك فإنه في العملية العكسية تكون ΔS مساوية للصفر. وللحصول على قيمة ΔS في العملية غير العكسية نهمل وجود الوسط المحيط، بمعنى أن $\Delta S_{\text{surroundings}} = 0$ ، و عليه:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{system}} = -q/T_h + q/T_\ell, \quad T_h > T_\ell \\ = +ve \text{ value}$$

لاحظ أن عملية انتقال الحرارة من جسم ساخن إلى جسم بارد هي عملية تلقائية تعطي قيمة موجبة للتغير في الأنتروبي. بفرض أن الحرارة تنتقل من جسم بارد إلى جسم ساخن، فإن التغير في الأنتروبي يكون:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{system}} = q/T_h - q/T_\ell, \quad T_h > T_\ell \\ = -ve \text{ value}$$

لاحظ أن عملية انتقال الحرارة من جسم بارد إلى جسم ساخن و هي عملية غير تلقائية تعطي قيمة سالبة للتغير في الأنتروبي. مما سبق يمكن استخدام التغير في الأنتروبي كمؤشر علي تلقائية العملية أو الوصول إلى الاتزان. و بينما لا يمكن حساب أو تعيين القيمة المطلقة للدوال الثرموديناميكية، مثل الطاقة الداخلية و الإنثالبي و الطاقة الحرة، فإن الأنتروبي المطلق يمكن تعيينه للمواد الكاملة النقاء. و يقيس الأنتروبي في الواقع مقدار عشوائية أو عدم انتظام النظام. كلما زاد انتظام النظام يقل الأنتروبي، بينما يزيد الأنتروبي مع زيادة عدم الانتظام. الغاز الذي ترتفع درجة حرارته أو يزيد حجمه يصاحب بزيادة في الأنتروبي. و لما كانت العمليات التلقائية يزيد فيها الأنتروبي فإن الأنتروبي للكون في حالة تزايد.

عملية عكسية (اتزان): $\Delta S = 0$

عملية غير عكسية تلقائية: $\Delta S = +ve$

عملية غير تلقائية: $\Delta S = -ve$

حساب التغير في الأنتروبي:

أ - في العمليات الأيزوثرمية: لغاز مثالي مكون من n جزيء عند ثبوت درجة الحرارة فإن $\Delta E = 0$

$$q_{\text{rev}} = W_{\text{max}} = RT \ln (V_f/V_i) \quad (5-55)$$

$$\Delta S = q/T = W/T \quad (5-56)$$

$$\Delta S = n R \ln (V_f/V_i) \quad (5-57)$$

ب - في العمليات الأدياباتيكية: من التعريف $q = 0$

و عليه :

$$\Delta S = q/T = 0 \quad (5-58)$$

ج - في العمليات الأيزوبارية: عند ثبوت الضغط، نفرض أن عملية عكسية يتم فيها امتصاص كمية

الحرارة dq من غاز مثالي تحتوي على n جزيء. حسب القانون الأول:

$$dq_p = dH \quad (5-59)$$

$$= n C_p dT \quad (5-60)$$

$$dS = n dq_p/T \quad (5-61)$$

$$= n C_p dT/T \quad (5-62)$$

نجري تكامل للحدين:

$$\int dS = \int n C_p dT/T \quad (5-63)$$

$$\Delta S = n C_p \ln (T_f/T_i) \quad (5-64)$$

د - في عمليات التحول: عملية تحول حالة فيزيائية إلى حالة أخرى تتم عند درجة حرارة ثابتة تعرف بدرجة

التحول و يمتص أو يطرد فيها كمية من الحرارة تعرف بالحرارة الكامنة للتحول. من عمليات التحول:

الغليان و التجمد و التسامي و الانصهار. و لحساب التغير في الأنتروبي لعملية تحول نستخدم العلاقة الآتية:

$$\Delta S = n \Delta H_{\text{trans}}/T_{\text{trans}} \quad (5-65)$$

حيث T_{trans} هي درجة التحول و ΔH_{trans} هي كمية الحرارة الكامنة لتحول جزيء واحد من المادة.

دالة الطاقة الحرة:

يمكن استخدام دالة الأنتروبي في التنبؤ باتجاه تغيير العمليات التي تتم في نظام معزول حرارياً. و

لما كانت أغلب العمليات الفيزيائية و الكيميائية تتم في نظام مفتوح أو غير معزول فإننا نحتاج إلى دالة

ترموديناميكية أخرى. وتسمى الدالة الجديدة بدالة الطاقة الحرة free energy و هي من نوعين: دالة

جيبس للطاقة الحرة $\text{Gibb's free energy}$ وتستخدم عند ثبوت الضغط و هي أهم و أكثر شيوعاً و تُعطى

الرمز G ، و دالة هيلمهولتز للطاقة الحرة $\text{Helmholtz free energy}$ و تستخدم عند ثبوت الحجم و تُعطى

الرمز A . و تعرف الدالتان بالعلاقتين الآتيتين:

$$G = H - TS \quad (5-66)$$

$$A = E - TS \quad (5-67)$$

نلاحظ من العلاقتين السابقتين أن طاقة النظام (H أو E) تنقسم إلى جزئين : جزء يحدد مدى

انتظام مكونات النظام و هو TS ، و جزء يمثل الطاقة القابلة للتحول إلى شغل نافع و هو G أو A . و

بالمقارنة مع الطاقة الكلية لحجر مثلا، يمكن أن نعتبر G أو A كطاقة الحركة، أما TS فهي طاقة الوضع. وتقاس الطاقة الحرة مثل باقي دوال الطاقة بوحدة السعر أو الجول. و فيما يلي سنقصر الدراسة على دالة جبس للطاقة الحرة، و يمكن استنتاج العلاقات المقابلة لدالة هيلمهولتز بنفس الطريقة.

لاحظ أن دالة الطاقة الحرة دالة حالة لا تعتمد على مسار العملية، و ذلك لأنها تساوي كميات لا تعتمد على المسار. و على ذلك يمكن كتابة التغير في الطاقة الحرة على الصورة:

$$\Delta G = G_f - G_i \quad (5-68)$$

عند ثبوت درجة الحرارة يمكن حساب التغير في الطاقة الحرة من المعادلة (5-66) كما يلي:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5-69)$$

مفهوم الطاقة الحرة:

للتوصل إلى مفهوم دالة الطاقة الحرة نقوم بإجراء تفاضل لطرفي المعادلة (5-66):

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (5-70)$$

$$= d(E + PV) - TdS - SdT \quad (5-71)$$

$$= dE + VdP + PdV - TdS - SdT \quad (5-72)$$

عند ثبوت درجة الحرارة و الضغط: $VdP = 0$, $SdT = 0$

$$dG = dE + pdV - TdS \quad (5-73)$$

بفرض أن العملية تتم عكسيا: $dq_{rev} = TdS$ و بالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على:

$$dG = dE + pdV - dq_{rev} \quad (5-74)$$

ويمكن كتابة القانون الأول في الصورة: $dE = dq_{rev} - dW_{max}$

و بالتعويض يصبح التغير في الطاقة الحرة: $-dG = dW_{max} - pdV$

$$-dG = dW_{useful} \quad (5-76)$$

حيث dW_{useful} هو الشغل النافع الذي يفعله النظام بخلاف شغل التمدد. لاحظ أن الشغل النافع يُقابل بقيمة سالبة للتغير في الطاقة الحرة. يعني هذا أن التغير في الطاقة الحرة يكون سالب في حالة العملية التلقائية و التي تنتج شغل نافع. وعندما يكون التغير في الطاقة الحرة موجب يكون الشغل مفعول على النظام، أي أن العملية غير تلقائية. أخيرا إذا ساوى التغير في الطاقة الحرة الصفر تكون العملية في حالة اتزان.

بناء على ما سبق يمكن استخدام التغير في الطاقة الحرة للتنبؤ باتجاه العملية كما يلي:

العملية تكون العكسية عند $dG = 0$

العملية تكون غير عكسية و تلقائية عند $dG = -ve$

العملية تكون غير تلقائية عند $dG = +ve$

التغير في الطاقة الحرة لغاز مثالي يتمدد عكسياً:

$$PdV = dW_{\max} , \quad TdS = dq_{\text{rev}} \quad \text{لمثل هذا الغاز:}$$

بالتعويض في الصورة التفاضلية للتغير في الطاقة الحرة المعادلة (5-72):

$$dG = dE + dW_{\max} + VdP - dq_{\text{rev}} - SdT \quad (5-77)$$

$$dE = dq_{\text{rev}} - dW_{\max} \quad \text{و لكن من القانون الأول:}$$

$$dG = VdP - SdT \quad (5-78)$$

تأثير الضغط على الطاقة الحرة: عند ثبوت درجة الحرارة، تؤول المعادلة الأخيرة إلى

$$dG = VdP \quad (5-79)$$

بالتعويض من قانون الغاز المثالي عن الحجم تصبح المعادلة في الصورة التكاملية الآتية:

$$\int dG = nRT \int dP/P \quad (5-80)$$

$$\Delta G = G_2 - G_1 = nRT \ln (P_2/P_1) \quad (5-81)$$

و بوضع نحصل على الطاقة الحرة القياسية، و تكتب المعادلة الأخيرة على الصورة:

$$G = G^0 + nRT \ln P \quad (4.82)$$

تظهر المعادلة الأخيرة أن الطاقة الحرة لغاز مثالي تزيد خطياً مع اللوغاريتم الطبيعي لضغط الغاز.

يمكن تطبيق نفس المعادلة على المحاليل مع تغيير الضغط إلى تركيز (أقواس مربعة تحتوي داخلها على

المادة المتفاعلة أو الناتجة). و الواقع أن كل المعادلات الآتية بخصوص الطاقة الحرة يمكن استخدامها في

جميع الأوساط (غازية أو سائلة أو صلبة).

تطبيق دالة الطاقة الحرة على التفاعلات الكيميائية:

للتفاعل الغازي العكسي:



يعطى ثابت اتزان التفاعل بالعلاقة:

$$K = P_C^c P_D^d / P_A^a P_B^b \quad (5-84)$$

التغير في الطاقة الحرة للتفاعل:

$$\Delta G = \sum G_{\text{products}} - \sum G_{\text{reactants}} \quad (5-85)$$

بالتعويض عن الطاقة الحرة لكل مكون نحصل على:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \{P_C^c P_D^d / P_A^a P_B^b\} \quad (5-86)$$

$$\Delta G^0 = G_D^0 + G_C^0 - G_B^0 - G_A^0 \quad (5-87)$$

بالتعويض من المعادلة (5-84) في المعادلة (5-86) نحصل على:

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln K \quad (5-88)$$

عند الاتزان: $\Delta G = 0$ ، و عليه:

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln K \quad (5-89)$$

تأثير درجة الحرارة على الطاقة الحرة: عند ثبوت الضغط، تؤول المعادلة (5-78) إلى:

$$dG = -SdT \quad (5-90)$$

المعادلة الأخيرة تبين طريقة تعيين الأنتروبي لغاز مثالي و ذلك من خلال تعيين مقدار التغير في الطاقة الحرة بالنسبة لدرجة الحرارة المطلقة. بالنسبة للتفاعلات تأخذ المعادلة الصورة:

$$d\Delta G/dT = -\Delta S \quad (5-91)$$

بالتعويض من المعادلة (5-69) يمكن أن نحصل المعادلة الآتية:

$$d\Delta G/dT = (-\Delta H - \Delta G)/T \quad (5-92)$$

وبإعادة الترتيب نحصل على:

$$T d\Delta G/dT - \Delta G/T = -\Delta H/T \quad (5-93)$$

باستخدام قواعد التفاضل العامة حيث:

$$d(u/v) = (udv - u dv)/v^2 \quad \text{نضع } u = \Delta G \text{ و } v = T, \text{ ثم نطبق القاعدة:}$$

فيتحول الطرف الأيسر من المعادلة (5-93) إلى الصورة:

$$T d\Delta G/dT \equiv d\Delta G/dT - \Delta G/T \quad (5-94)$$

و بهذا يمكن كتابة المعادلة (93) كما يلي:

$$T d\Delta G/dT = -\Delta H/T \quad (5-95)$$

$$d\Delta G/dT = -\Delta H/T^2 \quad (5-96)$$

$$d(\ln K)/dT = -\Delta H^{\circ}/RT^2 \quad (5-97)$$

$$d(\ln K)/d(1/T) = -\Delta H^{\circ}/T \quad (5-98)$$

$$\ln K = -\Delta H^{\circ}/RT + \text{constant} \quad (5-99)$$

$$\ln (K_2/K_1) = -(\Delta H^{\circ}/R) (1/T_2 - 1/T_1) \quad (5-100)$$

العلاقتان (5-99) و (5-100) يمكن استخدامهما لتعيين التغير في الإنثالبي القياسي (حرارة التفاعل القياسية) للتفاعل.

مسائل

١. احسب الشغل الناتج عن تمدد ١٠ جزيئات من غاز مثالي تحت ضغط ثابت هو الضغط الجوي العادي. الحجم الابتدائي ٥ لترات و الحجم النهائي ١٠ لترات و درجة الحرارة ٦٠ مئوية.
٢. في المسألة السابقة، هل امتص الغاز حرارة أم طرد حرارة؟ ما مقدار التغير في كمية الحرارة؟
٣. تمدد ٤ جزيئات من غاز مثالي في نظام معزول فتغيرت درجة الحرارة من ٦٠ مئوية إلى ٤٠ مئوية. احسب الشغل و التغير في الطاقة الداخلية للغاز و كمية الحرارة. السعة الحرارية الجزيئية عند حجم ثابت تساوي ٢ سعر لكل درجة حرارة.
٤. في المسألة السابقة احسب الحجم النهائي للغاز، علما بأن الحجم الابتدائي كان لترين.
٥. احسب التغير في الإنثالبي في المسألة ٣.
٦. احسب التغير في الإنثالبي لاحتراق النفثالين حسب المعادلة:

$$1. \text{C}_{10}\text{H}_8(\text{s}) + 12\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 10\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$
 علما بأن حرارة الاحتراق تحت حجم ثابت كانت $619 \text{ kcal mol}^{-1}$ عند درجة حرارة 288 K .
٧. عند درجة حرارة 298 K كانت قيم حرارة احتراق الميثانول و الجرافيت و الهيدروجين هي $173 \text{ kcal mol}^{-1}$ و 84 kcal mol^{-1} و $94.2 \text{ kcal mol}^{-1}$. احسب حرارة تكوين الميثانول.
٨. عند درجة حرارة ١٨ مئوية، الحرارة المتصاعدة من ذوبان جرام ذري من الحديد في حمض وفق المعادلة الآتية كانت $20.8 \text{ kcal mol}^{-1}$. احسب التغير في الطاقة الداخلية.

$$1. \text{Fe}(\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$$
٩. احسب التغير في الإنثالبي للتفاعل الآتي:

$$1. \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{C}(\text{graphite}) \rightarrow 2\text{Al}(\text{s}) + 3\text{CO}(\text{g})$$
 علما بأن الجرام من الألمونيوم يصعد عند أكسدته تحت ضغط ثابت 7.01 kcal و تحترق الجرافيت تحت ضغط ثابت وفق المعادلة الآتية و يصعد حرارة مقدارها $67.6 \text{ kcal mol}^{-1}$:
١٠. احسب حرارة تكوين أول أكسيد الكربون، علما بأن قيمتي حرارة احتراق الجرافيت و أول أكسيد الكربون تحت ضغط ثابت هما: 84 kcal mol^{-1} و $64.6 \text{ kcal mol}^{-1}$.
١١. احسب حرارة تكوين الأسيتيلين، علما بأن حرارتي احتراق الأسيتيلين $310.7 \text{ kcal mol}^{-1}$ و الهيدروجين و قيمة حرارة تكوين ثاني أكسيد الكربون $94.2 \text{ kcal mol}^{-1}$ و 84 kcal mol^{-1} .
١٢. حرارة تبخر جزيء جرامي من الهليوم هي 22.0 cal عند درجة غليانه 4.29 K . احسب التغير في الطاقة الداخلية.

١٣. للتفاعل الآتي : $A + B \rightarrow 2C$

التغير في الإنثالبي يساوي $153 \text{ kcal mol}^{-1}$ عند درجة حرارة 25°C . احسب التغير في الإنثالبي لهذا التفاعل عند 300°C . علما بأن السعات الحرارية للمواد A و B و C هي $5.1 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ و $7.3 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ و $6.2 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

١٤. تحول ٣٠ جرام من الماء إلى بخار ماء عند درجة الغليان (100°C درجة مئوية) و ضغط جوي عادي. الحرارة الكامنة لغليان الماء $192 \text{ kcal mol}^{-1}$. احسب : كمية الحرارة الممتصة و الشغل و التغير في الأنتروبي و التغير في الطاقة الداخلية.

١٥. احسب الكفاءة القصوى لمحرك يحرق الوقود عند 200°C و يطرد العادم عند 80°C .

١٦. تمدد ٥ جزيئات من غاز النيتروجين عكسيا و أيزوثيرميا عند درجة حرارة و ضغط ، فزاد الحجم من ٣ لترات إلى ٧,٥ لتر. احسب التغير في الأنتروبي.

١٧. احسب التغير في الأنتروبي عندما ترتفع درجة حرارة ١٠ جرامات من الماء من 20°C إلى 30°C . السعة الحرارية الجزيئية للماء $18.5 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

١٨. ثابت اتزان تفاعل عكسي تحت ضغط ثابت يساوي 0.01 عند درجة حرارة 200°C . احسب التغير في الطاقة الحرة القياسية للتفاعل.

١٩. احسب التغير في الطاقة الحرة لثلاثة جزيئات من الأكسجين ارتفع ضغطها من 1 atm إلى 10 atm عند درجة حرارة 25°C .

٢٠. ثابتي اتزان تفاعل عكسي عند درجتى الحرارة 25°C و 150°C هما 0.12 و 0.031 . احسب حرارة التفاعل.

٢١. احسب التغير في الأنتروبي لتفاعل كمية حرارته تساوي $-110 \text{ kcal mol}^{-1}$ و التغير في طاقته الحرة يساوي $-120 \text{ kcal mol}^{-1}$ عند درجة حرارة 25°C .

حلول أسئلة الوحدة الخامسة

١. الشغل يعطى من العلاقة:

$$\begin{aligned} W &= n R T \ln (V_f/V_i) \\ &= 10 \times 2 \times 333 \ln (10/5) \\ &= 4.616 \text{ kcal.} \end{aligned}$$

٢. حيث إن $W = +ve$ و $\Delta E = 0$ فوق القانون الأول:

$$\begin{aligned} q &= \Delta E + W \\ q &= W \end{aligned}$$

و هكذا يجب أن تكون $q = +ve$ مما يعني امتصاص حرارة و مقدارها يساوي قيمة الشغل:
 $q = 4.616 \text{ kcal.}$

٣. حيث إن النظام معزول حراريا فإن $q = 0$ و حسب القانون الأول $q = \Delta E + W$

$$\begin{aligned} \Delta E &= -W \\ W &= -n C_v \Delta T \\ &= 4 \times 2 \times 20 = 160 \text{ cal.} \\ \Delta E &= -160 \text{ cal.} \end{aligned}$$

٤. حسب العلاقة المميزة للعمليات الأديباتيكية :

$$\begin{aligned} (T_f/T_i)^{C_v/R} &= V_i/V_f \\ (50/60)^{3/2} &= 2/V_f \\ V_f &= 3.67 \text{ L} \end{aligned}$$

٥. تعطى قيمة التغير في الإنثالبي بالمعادلة:

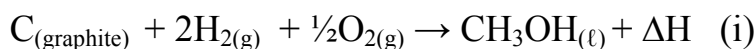
$$\Delta H = \Delta E + W$$

و حيث أن $\Delta E = -W$ فإن $\Delta H = 0$

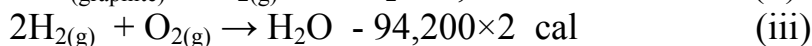
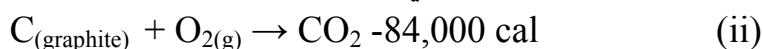
٦. التغير في الإنثالبي يحسب من العلاقة:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta E + \Delta nRT \\ \Delta n &= 10 - 12 = -2 \\ \Delta H &= -618,800 - 2 \times 2 \times 288 = -619,952 \text{ cal} \end{aligned}$$

٧. يتكون الميثانول وفق المعادلة:



و يحترق الكربون و الهيدروجين و الميثانول كما يلي:



بجمع المعادلتين (ii) و (iii) و طرح المعادلة (iv) ، يمكن الحصول على المعادلة (i) ، و عليه:

$$\Delta H = -84,000 - 2 \times 94,200 + 173,000$$

$$= -99,400 \text{ cal}$$

٨. الحرارة المتصاعدة (ΔH) ترتبط بالطاقة الداخلية وفق العلاقة:

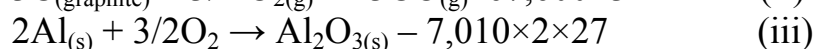
$$\Delta H = \Delta E + \Delta nRT$$

$$\Delta n = 1 - 0 = 1$$

$$\Delta H = -20,800 - 1 \times 2 \times 298$$

$$= -21,396 \text{ cal mol}^{-1}$$

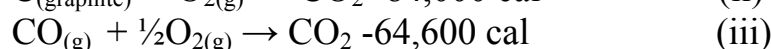
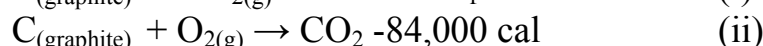
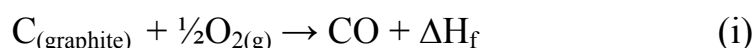
٩. يمكن حساب التغير في الإنثالبي للتفاعل الآتي وفق المعادلات الآتية:



نضرب طرفي المعادلة (iii) في سالب واحد ، ثم نجمع المعادلتين (ii) و (iii) فنحصل على المعادلة (i)، وعليه:

$$\Delta H = 378,540 - 202,800 = 175,740 \text{ cal}$$

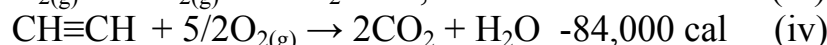
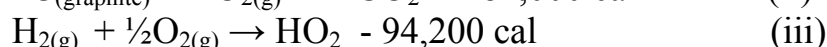
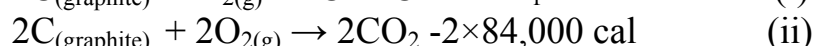
١٠. تكون أول أكسيد الكربون كما يلي:



نضرب طرفي المعادلة (iii) في سالب واحد ، ثم نجمع المعادلتين (ii) و (iii) فنحصل على المعادلة (i)، وعليه:

$$\Delta H = 84,000 - 64,000 = -19,400 \text{ cal mol}^{-1}$$

١١. نكون الأسيتيلين كما يلي:



نضرب طرفي المعادلة (iv) في سالب واحد ، ثم نجمع المعادلتين (ii) و (iii) و (iv) فنحصل على المعادلة (i)، وعليه:

$$\Delta H = 2 \times 84,000 - 94,200 + 310,700 = 48,500 \text{ cal mol}^{-1}$$

١٢. حسب القانون الأول:

$$q = \Delta E + W$$

$q = 22 \text{ cal}$ و الشغل يمكن حسابه من العلاقة $W = \Delta n RT$ و $\Delta n = 1$ وعليه:

$$\Delta E = q - W$$

$$= 22 - 8.58 = 13.42 \text{ cal}$$

$$d\Delta H/dT = \Delta C_p$$

١٣. نطبق قانون كيرشوف:

$$\Delta C_p = \sum C_p(\text{product}) - \sum C_p(\text{reactant}) \quad \text{حيث:}$$

يمكن كتابة معادلة كيرشوف على الصورة:

$$\begin{aligned} \Delta H_2 - \Delta H_1 / T_2 - T_1 &= \sum C_p(\text{product}) - \sum C_p(\text{reactant}) \\ \Delta H_2 + 153,000 / (300 - 25) &= 2 \times 7.3 - (6.2 + 5.1) \\ \Delta H_2 &= 152,092 \text{ cal mol}^{-1} \end{aligned}$$

$$30/18 = 1.667 \text{ ن حسب أولا عدد الجزيئات و يساوي}$$

غليان الماء يصاحب بشغل يُعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned} W &= \Delta n RT \\ &= 1.667 \times 2 \times 373 = 1243.58 \text{ cal} \end{aligned}$$

$$q = 1.667 \times 192,000 = 320,000 \text{ cal} \quad \text{كمية الحرارة الممتصة:}$$

$$q = \Delta E + W \quad \text{حسب القانون الأول:}$$

$$\Delta E = q - W = 318,756 \text{ cal}$$

$$\Delta S = \Delta n \Delta H_b / T_b \quad \text{التغير في الأنتروبي يحسب من العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} &= 1.667 \times 192,000 / 373 \\ &= 858.08 \text{ cal K}^{-1} \end{aligned}$$

$$15. \text{ الكفاءة القصوى تعطى من العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} \text{Eff} &= T_h - T_l / T_h \\ &= 473 - 353 / 473 = 0.25 \end{aligned}$$

$$16. \text{ التغير في الأنتروبي لهذه العملية يعطى من العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= n RT \ln (V_f / V_i) \\ &= 5 \times 2 \ln (7.5/3) = 9.16 \text{ cal K}^{-1} \end{aligned}$$

$$17. \text{ التغير في الأنتروبي لهذه العملية يعطى من العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= n C_p \ln (T_f / T_i) \\ &= (10/18) \times 18.5 \ln (303/293) = 0.34 \text{ cal K}^{-1} \end{aligned}$$

$$18. \text{ تحسب الطاقة الحرة القياسية من ثابت الاتزان وفق العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} \Delta G^0 &= - RT \ln K \\ &= - 2 \times 573 \ln 0.01 = -5277.5 \text{ cal mol}^{-1} \end{aligned}$$

$$19. \text{ تحسب الطاقة الحرة من العلاقة:}$$

$$\begin{aligned} \Delta G &= n RT \ln P_f / P_i \\ &= 3 \times 2 \times 298 \ln 10 = 4,114 \text{ cal} \end{aligned}$$

٢٠. تحسب حرارة التفاعل من ثابت الاتزان عند درجتى حرارة وفق المعادلة:

$$\ln K_2/K_1 = (\Delta H^\circ/R) \{(T_2-T_1)/T_2T_1\}$$

$$\ln 0.03/0.12 = (\Delta H^\circ/2) \{150-25/298 \times 423\}$$

$$\Delta H^\circ = -2,796 \text{ cal mol}^{-1}$$

٢١. العلاقة المستخدمة لحساب التغير في الأنتروبي بدلالة التغير في الطاقة الحرة و كمية الحرارة:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

$$\Delta S = (\Delta H - \Delta G) / T$$

$$= -110,000 - 120,000 / 298 = 33.6 \text{ cal K}^{-1}$$



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

أساسيات الكيمياء الفيزيائية

قاعدة الطور

قاعدة الطور

١

الجدارة: التوصل إلى المتغيرات المؤثرة على النظم الطورية المتزنة.

الأهداف :

- أن يعين الطالب المتغيرات التي يمكن التأثير بها على النظام المتزن دون هدمه.
- أن يوظف الطالب قاعدة الطور في الاستخدام التطبيقي للنظم الهامة مثل السبائك و الأملاح.
- استتباط مخاليط ذات درجة انصهار منخفضة من السبائك المعدنية.
- تكوين مركبات لها خواص فيزيائية محددة من مخاليط معينة.

الوقت المتوقع للدراسة: أربع ساعات في الفصل الدراسي.

متطلبات الجدارة: معرفة الاتزان و الديناميكا الحرارية الكيميائية و خواص المواد.

قاعدة الطور (الصف): Phase rule:

هي علاقة رياضية تصف حالة الاتزان لمجموعة من الأطوار في نظام ما. ويمكن من قاعدة الطور استنتاج المتغيرات الممكن التأثير بها على النظام مع احتفاظه بجميع الأطوار المكونة للنظام. وقبل مناقشة قاعدة الطور يلزم وضع تعاريف واضحة لمجموعة من المصطلحات الواردة في القاعدة.

النظام System: هو كل ما يمكن معاملته و النظر إليه كوحدة واحدة من الناحيتين الكيميائية والفيزيائية. فقد يكون دورق يحتوي على مادة أو أكثر نظاما، و قد يكون هواء غرفة نظاما آخر. والنظام نوعان: متجانس Homogeneous و غير متجانس Heterogeneous. يقال للنظام أنه متجانس إذا تماثل كل جزء فيه على المستوى الميكروسكوبي. محلول سكري مثلا هو نظام متجانس و يمكن أن يظل متجانس إذا أذيب فيه قليل من ملح الطعام. فإذا تبقى بعض الملح دون ذوبان أصبح نظاماً غير متجانس. الماء العكر مثلا نظام غير متجانس.

الطور Phase: و يقال له أيضا الصف، هو كل جزء متجانس من النظام له صفات كيميائية و فيزيائية تميزه عن غيره من الأطوار و يمكن فصله عن غيره من الأطوار بطريقة ميكانيكية. مثلا كوب من الماء فيه قطع ثلج، هنا الماء السائل يُعد طورا و الثلج طورا آخر، فعدد الأطوار هنا اثنان. أما كأس فيه ماء وملح كثير و رمل، فهنا المحلول الملحي طورا و الرمل طورا ثانيا و المتبقي من الملح دون ذوبان طورا ثالثا. وسنرمز لعدد الأطوار بالرمز P.

المكون Component: يقصد بالمكون المادة الكيميائية ذات التركيب الكيميائي الذي يجعلها متميزة عن غيرها من المواد. مثلا الماء و الثلج مكون واحد، بينما الماء و ملح الطعام مكونان. أما عدد المكونات فهو أقل عدد يمكن أن يصف الكيماويات الموجودة في النظام. إذا كانت الكيماويات في النظام أو بعضها يساهم في عملية اتزان فإن عدد المكونات يقل بمقدار واحد. في حالة وجود عمليتي اتزان يقل عدد المكونات بمقدار اثنين، و هكذا. و يعود السبب في ذلك إلى أن عملية الاتزان يمكن استخدامها في الحصول على قيمة أحد المكونات من معرفة الكيماويات الأخر و ثابت الاتزان. و سنعطي عدد المكونات الرمز C. مثال: احسب عدد المكونات في النظام المتزن الآتي:



العدد الإجمالي هو ثلاثة، يمكن معرفة أحدهم من قيمتي المكونين الآخرين و ثابت الاتزان، وعليه يكون عدد المكونات اثنين. لاحظ أن التفاعل السابق يحتوي على طور واحد، و ذلك لأن جميع المكونات غازية، و الغازات تعد طورا واحدا مهما احتوت على مكونات كيميائية.

درجات الطلاقة Degrees of Freedom: هو عدد المتغيرات المستقلة التي يمكن التأثير بها على النظام دون هدمه (أي اختفاء أحد الأطوار أو ظهور أطوار جديدة). وتشمل هذه المتغيرات درجة الحرارة والضغط وتركيز المكونات.

استنتاج قاعدة الطور: درجات الطلاقة (F) تساوي الفرق بين العدد الكلي للمتغيرات في النظام (F_1) مطروح منها عدد المتغيرات الثابتة بعمليات الاتزان (F_2).

$$F = F_1 - F_2 \quad (6-2)$$

العدد الكلي للمتغيرات F_1 لنظام مكون من C مكون و P طور هو حاصل ضرب عدد المكونات المطلوبة لوصف الطور الواحد في عدد الأطوار، بالإضافة إلى درجة الحرارة والضغط:

$$F_1 = (C - 1)P + 2 \quad (6-3)$$

عدد المتغيرات الثابتة بالاتزان F_2 هو حاصل ضرب عدد معادلات اتزان الطور الواحد في عدد المكونات:

$$F_2 = (P - 1)C \quad (6-4)$$

من المعادلتين (6-3, 6-4) يمكن حساب قيمة F من المعادلة (6-1):

$$F = P(C - 1)P + 2 - C(P - 1) \quad (6-5)$$

$$F = C - P + 2 \quad (6-6)$$

المعادلة الأخيرة هي قاعدة الطور لنظام مكون من C مكون و P طور.

النظم المكثفة Condensed systems: هو كل نظام لا يلعب الضغط فيه دوراً، مثل تكوين السبائك المعدنية و ذوبان الأملاح في الماء، هنا يمكن إهمال الضغط وبالتالي تقل درجات الطلاقة درجة واحدة، وتصبح قاعدة الطور في الصورة:

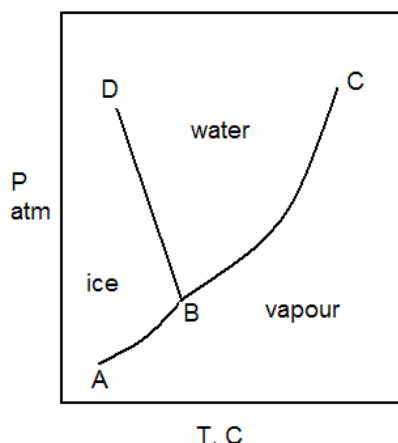
$$F = C - P + 1 \quad (6-7)$$

تطبيقات قاعدة الطور:

١. **نظم المكون الواحد** One-component systems: تمثل هذه النظم الأطوار المختلفة لمادة كيميائية واحدة و تحولات الأطوار عند درجات حرارة و ضغوط مختلفة.

مثال ١: الماء

عند درجات الحرارة العادية و الضغوط المتوسطة يمكن أن يوجد الماء في ثلاث حالات أساسية، الماء (سائل) و الثلج (صلب) و بخار الماء (غاز). يمكن التعبير بيانياً من تواجد الأطوار الثلاثة من خلال رسم شكل الطور Phase diagram للماء، و هو علاقة بين الضغط و درجة الحرارة توضح سلوك الماء و تحوله من طور لآخر، انظر الشكل (6-1). يلاحظ من الشكل تكون ثلاث مناطق للأطوار الثلاثة للماء وهي المنطقة المحصورة بين DBC للماء السائل و ABC المنطقة لبخار الماء و ABD المنطقة للثلج. و يوجد طور واحد فقط في كل منطقة، وحسب قاعدة الطور فإن $C = 1$ و $P = 1$ و عليه فدرجات الطلاقة



شكل (6-1): شكل الطور لنظام الماء.

و يعني ذلك إمكانية تغيير درجة الحرارة و الضغط في نفس الوقت داخل أي منطقة دون تلاشي النظام. مثلا يمكن تسخين الماء أو تبريده قليلا و خفض الضغط عليه أو رفعه قليلا و يظل الماء في الحالة السائلة فقط.

وتمثل الخطوط عمليات تحول الأطوار المختلفة للماء. الخط الممثل لجليان أو تكثف الماء هو BC و الخط الممثل لتجمد الماء أو انصهار الثلج هو DB و الخط الممثل لتسامي الثلج هو AB. و عند كل نقطة على أحد هذه الخطوط يوجد كلا الطورين الداخليين في عملية التحول و التي تعد من عمليات الاتزان. ويمكن حساب درجات الطلاقة على الخطوط كما يلي:

$$F = C - P + 2 = 1 - 2 + 2 = 1$$

و يعني ذلك وجود درجة طلاقة واحدة أثناء عملية التحول. مثلا عند غليان الماء عند ضغط معين توجد درجة حرارة غليان واحدة لا يمكن تغييرها. إذا أردنا أن يغلي الماء عند درجة حرارة معينة يمكن تغيير الضغط فقط لتحقيق ذلك. أخيرا نلاحظ أن النقطة B هي يوجد عندها الأطوار الثلاثة و على ذلك تسمى النقطة الثلاثية للماء triple point. و عدد درجات الطلاقة عند النقطة B هي:

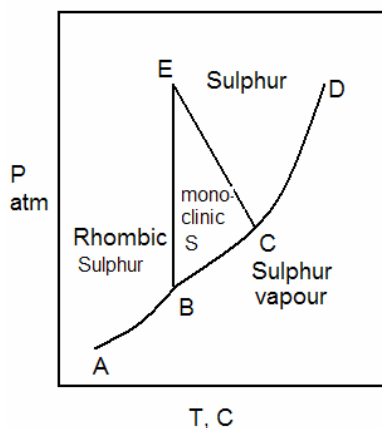
$$F = C - P + 2 = 1 - 3 + 2 = 0$$

أي لا يوجد أي درجة من درجات الطلاقة عند الوصول إلى تلك النقطة. و تعد هذه النقطة مميزة لنظام الماء، و قد اصطلح على اعتبار درجة الحرارة عندها مساوية للصفر المئوي عند معايرة الترمومتر المئوي.

مثال ٢: الكبريت

يمكن للكبريت الصلب التواجد في صورتين Allotropies، هما الكبريت المعيني و الكبريت المنشوري. و يمثل الشكل (6-2) شكل الطور لنظام الكبريت. و كما في المثال الأول فإن درجات

الطلاقة في كل منطقة $F = 2$ و على الخطوط المعبرة عن عمليات التحول الطوري للكبريت $F = 1$ و أخيرا فإن هناك نقطتان ثلاثيتان للكبريت هما B, C . النقطة الأولى تمثل وجود الأطوار الثلاثة:



شكل (2-6): شكل الطور لنظام الكبريت.

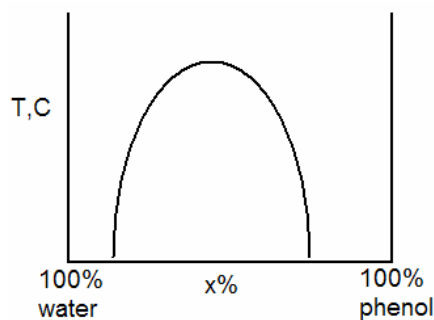
الكبريت السائل و بخار الكبريت و الكبريت المنشوري، بينما تمثل النقطة الثانية وجود الأطوار الثلاثة: الكبريت المنشوري و الكبريت المعيني و بخار الكبريت.

٢. نظم المكونين:

هذه النظم شائعة في الكيمياء و تمثل عملية ذوبان مادة في مذيب أو امتزاج سائلين أو تبلور ملح أمثلة على ذلك. و غالبا ما يلعب الضغط دورا محدودا في مثل تلك العمليات و يمكن اعتبار تلك النظم نظم مكثفة. و هنا تصبح قاعدة الطور: $F = C - P + 1$.

مثال ١: نظام الماء و الفينول

عند ثبوت الضغط، فإن تغير تركيب المخلوط و درجة الحرارة هما العاملين الممثلين لشكل الطور لنظام ثنائي مكثف. و يقصد بتركيب المخلوط هنا النسبة المئوية لأحد المكونين في المخلوط (%x). و يظهر في شكل الطور، شكل (3-6)، منحنى ذو قمة يحدد منطقتين: الأولى يوجد فيها طبقة واحدة تامة الامتزاج خارج المنحنى، و الثانية يوجد فيها طبقتان إحداهما غنية بالماء و الأخرى غنية بالفينول، و هي أسفل المنحنى. لاحظ أن الماء و الفينول يكونان تامة الامتزاج عند جميع درجات الحرارة إذا كانت نسبة أحدهما

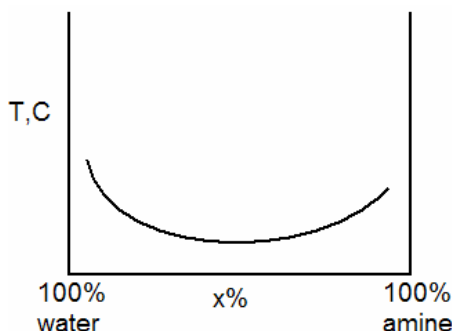


شكل (6-3): شكل الطور لنظام الماء و الفينول.

عالية جدا. و عموما تزيد قابلية الامتزاج كلما زادت درجة الحرارة. ويُميز هذا النظام درجة حرارة حرجة عظمى للامتزاج و هي درجة الحرارة التي يتم فوقها الامتزاج التام بأي نسبة للمكونين. و يمثل المنحنى ذو القمة عملية ذوبان أحد المكونين في الآخر عند درجات حرارة مختلفة. درجات الطلاقة في المنطقة الخارجية (طبقة واحدة) هي: $F = 2 - 1 + 1 = 2$. و يعني ذلك إمكانية تغيير درجة الحرارة و نسبة أحد المكونين في نفس الوقت و تظل الطبقة متجانسة. و على خط الذوبان: $F = 2 - 2 + 1 = 1$ أي لا يوجد إلا عامل واحد يمكن تغييره، إما درجة الحرارة أو نسبة أحد المكونين. في المنطقة الداخلية للمنحنى (طبقتان): $F = 2 - 1 + 1 = 2$ ، و ذلك لأن تركيز كل طبقة يعتمد على الآخر و على التركيب الكلي للمخلوط و هو وحيد عند كل درجة حرارة، و يمكن تغييره بتغيير درجة الحرارة فقط.

مثال ٢: نظام الماء و أمين ثلاثي الإيثيل:

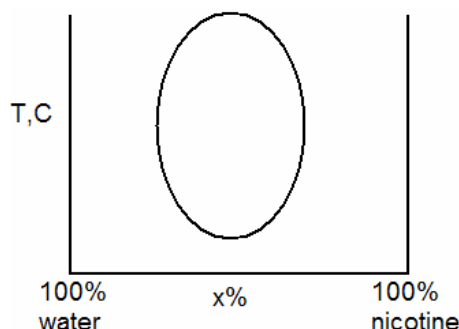
يمثل شكل الطور لهذا النظام، شكل (6-4)، منحنى ذو نهاية صغرى، داخله من أعلى توجد طبقتان و يوجد أسفله طبقة واحدة. المادتان تامتا الامتزاج عندما تكون نسبة أحد المكونين عالية جدا. و يمكن مناقشة هذا النظام كما في المثال السابق. و يميز النظام درجة حرارة حرجة صغرى للذوبان و هي الدرجة التي تحتها يتم الامتزاج التام للمكونين بأي نسبة.



شكل (6-4): شكل الطور لنظام الماء و أمين ثلاثي الإيثيل.

مثال ٣: نظام الماء و النيكوتين

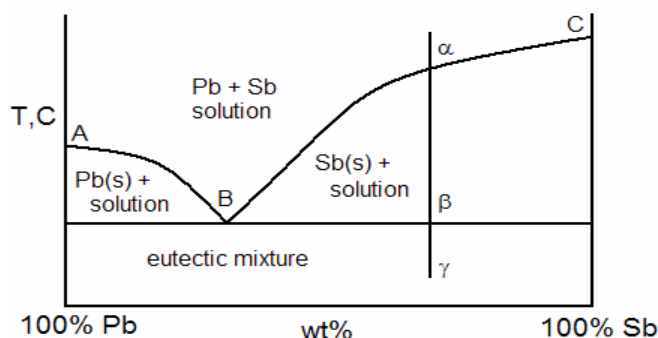
يمثل شكل الطور لهذا النظام، شكل (5-6)، بطوق loop يوجد داخله طبقتان و خارجه طبقة واحدة. وهكذا فإن للنظام درجتين حرجتين، إحداهما عظمى و الأخرى صغرى.



شكل (5-6): شكل الطور لنظام الماء و النيكوتين.

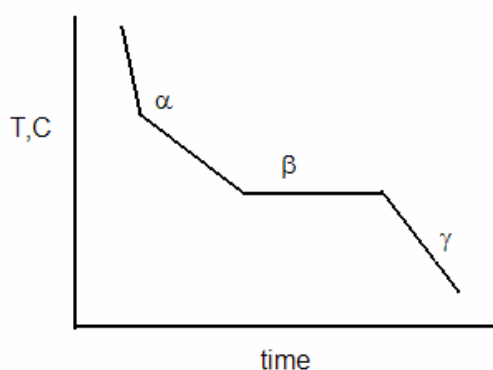
تكوين المخاليط الإتيكتية Eutectic mixtures:

يتكون المخلول الإتيكتيكي البسيط لمكونين من مخلول صلب للمكونين بنسبة معينة ذات درجة حرارة انصهار هي الأقل لكل نسب المكونين. و من الأمثلة على تكوين مخلول إتيكتيكي نظام الماء و ملح يوديد البوتاسيوم، و كثير من السبائك المعدنية مثل النحاس مع الفضة و كذا الرصاص مع الأنثيمون. و يصور الشكل (6-6) شكل الطور لنظام ثنائي مكثف من الرصاص و الأنثيمون، و يكون النظام مخلول إتيكتيكي تركيبيه 13% Sb و له أقل درجة انصهار للنظام. و تسمى درجة حرارة المخلول الإتيكتيكي eutectic temperature، و هي مميزة للنظام عند ضغط ثابت. و يمثل المنحنى AB منحنى ذوبان الرصاص عند درجات حرارة مختلفة، بينما يمثل المنحنى BC تغير ذوبان الأنثيمون. أما الخط الأفقي فيمثل تجمد (أو انصهار) المخلول الإتيكتيكي، إما بمفرده عند النقطة B، أو بالإضافة إلى الزيادة من الرصاص (إلى اليسار من المخلول الإتيكتيكي) أو الزيادة من الأنثيمون (إلى اليمين من



شكل الطور لنظام الرصاص و الأنثيمون.

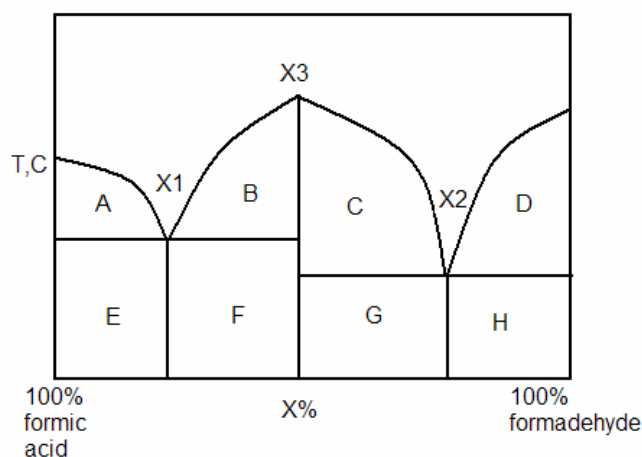
المخلوط الإتيكتيكي) عند النقاط الأخرى على الخط. و لتحديد درجة حرارة المخلوط الإتيكتيكي يستخدم منحنى التبريد cooling curve عند التركيب الممثل بالخط الرأسي $\alpha\beta\gamma$ ، على سبيل المثال، كما هو مبين في الشكل (6-7). عند تبريد المحلول تنخفض درجة الحرارة حتى الوصول إلى النقطة α وعندها يبدأ الأنتميون الزائد في الانفصال كمادة صلبة و عليه يقل معدل التبريد أثناء تلك العملية التي تطرد حرارة. عندما ينفصل الأنتميون الزائد عن تركيب المخلوط الإتيكتيكي و نصل إلى النقطة β ، يبدأ المخلوط الإتيكتيكي في التجمد و يظهر في الرسم كخط أفقي حتى تمام التجمد. بعد ذلك تنخفض درجة حرارة المخلوط الصلب حتى الوصول إلى النقطة γ .



شكل (6-7): منحنى التبريد لنظام ثنائي يكون مخلوط إتيكتيكي.

تكوين المركبات : Formation of compounds

بالإضافة إلى تكوين المخاليط الإتيكتية، يُمكن لمكونين تكوين مركب كيميائي أو أكثر. و يعرض شكل الطور (6-8) للمكونين عملية تكوين مركب من المكونين حمض الفورميك والفورمالدهيد عندما تكون النسبة ٥٠٪ من أحد المكونين.

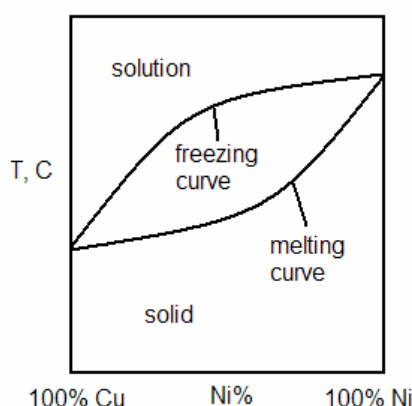


شكل (6-8): شكل الطور لنظام الفورمالدهيد و حمض الفورميك.

نلاحظ أن هذا المخلوط يُكوّن مركب مميز بقمة عند التركيب X_3 و له درجة حرارة عالية، بالإضافة إلى مخلوطين إتيكتيكيين عند التركيبين X_2 و X_1 . في المنطقة A ينفصل حمض الفورميك الزائد عن تركيب المخلوط الإتيكتيكي X_1 ، بينما يوجد في المنطقة E المخلوط الإتيكتيكي و حمض الفورميك الصلب. في المنطقة B ينفصل المركب X_3 الزائد عن تركيب المخلوط الإتيكتيكي X_1 ، بينما يوجد في المنطقة F المخلوط الإتيكتيكي X_1 بالإضافة إلى المركب X_3 . و يمكن استخلاص الباقي بنفس الطريقة.

المحاليل الصلبة تامة الامتزاج : Miscible solids

يحدث الذوبان التام لمكونين صلبين عندما يتماثل حجمًا ذرتي المكونين، و تتكون السبائك الاستبدالية بهذا الشكل. و يعرض الشكل (6-9) محلول صلب من النحاس و النيكل، حيث يظهر من الشكل اختفاء تكون المخاليط الإتيكتية أو المركبات و لكن يمكن تمييز منحنيين لعملية الذوبان:



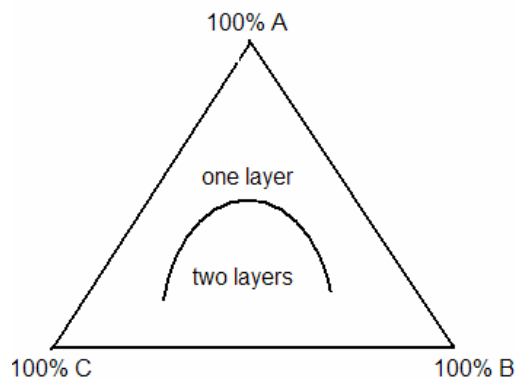
شكل (6-9): شكل الطور لنظام النحاس و النيكل.

الأول يمثل منحنى التجمد و الآخر يمثل منحنى الانصهار. و يمكن ملاحظة أن تركيز المكون ذا درجة الانصهار الأعلى يكون أغنى في المحلول الصلب من المحلول السائل الذي ينفصل منه.

٣. نظم المكونات الثلاثة : Three-component systems

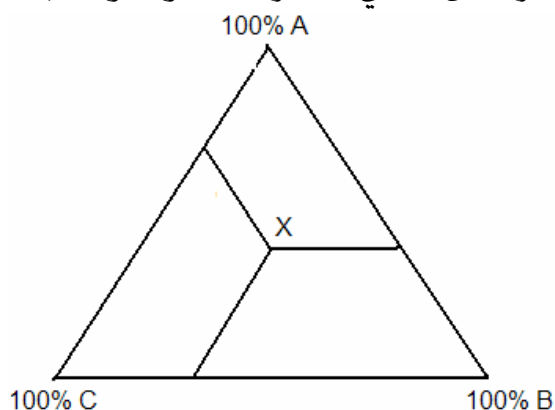
عند وجود ثلاثة مكونات يمكن رسم شكل الطور للنظام عند درجة حرارة ثابتة و ضغط ثابت في شكل مثلث متساوي الأضلاع. عند كل رأس (زاوية) يكون تركيز أحد المكونات ١٠٠٪ و يتغير نسبته على طول أحد الأضلاع. و يصور شكل الطور (6-10) ولنظام ثلاثي من الماء و خلاص الإيثيل و الإيثانول عملية الذوبان المتبادل للمكونات الثلاثة. لاحظ أن كل من الماء و الإيثانول أو الإيثانول و

الخلاط تام الامتزاج، بينما الماء و الخلاط يمتزجا جزئيا. المنطقة السفلية تحت المنحنى يتكون فيها طبقتان، بينما تتكون طبقة واحدة في المنطقة العليا فوق المنحنى.



شكل (6-10): شكل الطور لنظام ثلاثي .

ويمكن حساب درجات الطلاقة على طول المنحنى: $F = C - P = 3 - 2 = 1$ ، أي أن هناك نسبة مكون واحد يمكن تغييرها و نسبتي المكونين الآخرين لا يمكن تغييرهما في نفس الوقت. في المنطقة العلوية ذات الطبقة الواحدة: $F = 3 - 1 = 2$ ، أي يمكن تغيير نسبتي مكونين. في المنطقة ذات الطبقتين: $F = 3 - 2 = 1$ ، تعامل كل طبقة كما لو كانت نظام، وهي في ذلك تشابه النقاط الواقعة على المنحنى. و لتمثيل أي نقطة على المنحنى، والمسمى بالمنحنى ثنائي العقدة binodal curve، تُعين أولا نسبة الإضافة من المادة التي تذوب بأي نسبة في أي من المكونين الآخرين (الإيثانول) و التي تكفي لتحويل العكرة أو الطبقتين إلى طبقة واحدة. و بمعرفة النسب الثلاث يمكن التعبير عن ذلك بيانيا حيث ترسم كل نسبة كخط مواز للقاعدة المقابلة لزاوية المكون (١٠٠٪ مكون)، وعند تلاقي الخطوط الثلاثة تتكون نقطة معبرة عن النسب. و بتوصيل النقاط يمكن الحصول على المنحنى. و يمثل الشكل (6-11) هذه الطريقة في حالة افتراضية للنقطة X المتكونة من تلاقي المكونات A و B و C بنسب افتراضية.



شكل (6-11): تمثيل نقطة (X) معبرة عن تركيب نظام ثلاثي .

مسائل

١. احسب درجات الطلاقة للنظم الآتية:
 - أ. نظام مكون من الماء و الزيت و بخارهما.
 - ب. نظام مكون من الماء و الإيثانول و بخارهما.
 - ج. مخلوط غازي متفاعل و عند الاتزان من الأمونيا و الهيدروجين و النتروجين.
 - د. مخلوط من الماء و الكثير من كلوريد الصوديوم.
 - هـ. نظام مكون من الماء و الثلج و بخار الماء.
٢. ما معنى كل مما يلي:
 - أ. النظام المتجانس و النظام غير المتجانس.
 - ب. درجات الطلاقة.
 - ج. الطور.
 - د. المخلوط الإتيكتيكي.
٣. ارسم شكل الطور لنظام مكون من الرصاص و الأنتيمون و اذكر درجات الطلاقة عند النقاط الحرجة و علي الخطوط التي تصف اتزان الأطوار و في داخل المناطق.
٤. ارسم شكل الطور لنظام الكبريت، و اذكر درجات الطلاقة عند النقاط الحرجة، و علي الخطوط التي تصف اتزان الأطوار، و في داخل المناطق.

حلول أسئلة الوحدة السادسة

١. درجات الطلاقة كما يلي:

$$F = C - P + 2 = 2 - 3 + 2 = 1 \quad \text{أ.}$$

$$F = C - P + 2 = 2 - 2 + 2 = 2 \quad \text{ب.}$$

$$F = C - P + 2 = 2 - 1 + 2 = 3 \quad \text{ج.}$$

$$F = C - P + 2 = 2 - 2 + 2 = 2 \quad \text{د.}$$

$$F = C - P + 2 = 1 - 3 + 2 = 0 \quad \text{هـ.}$$

٢.

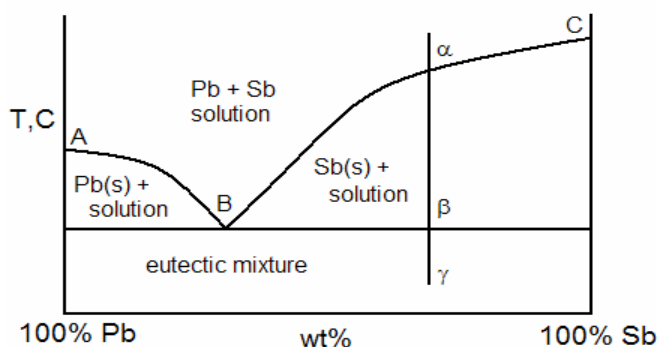
أ. النظام المتجانس: هو كل جزء من الكون يمكن معاملته كوحدة واحدة و يكون متماثلاً في كل أجزائه حتى على المستوى الميكروسكوبي و يعد طوراً واحداً. النظام غير المتجانس: هو جزء من الكون يمكن معاملته كوحدة واحدة و لكنه يحتوي على أكثر من طور واحد.

ب. درجات الطلاقة: هي عدد المتغيرات المستقلة التي يمكن التأثير بها على نظام متزن دون تدميره (ظهور أو اختفاء طور أو أكثر).

ج. الطور: كل جزء من النظام متماثل في كل أجزائه و يمكن فصله بطريقة ميكانيكية عن غيره من الأطوار.

د. المخلوط الإتيكتيكي: هو تركيب معين (نسبة) من مخلوط من أكثر من مادة كيميائية لها أقل درجة انصهار لكل النسب الممكن تكوينها من مواد المخلوط.

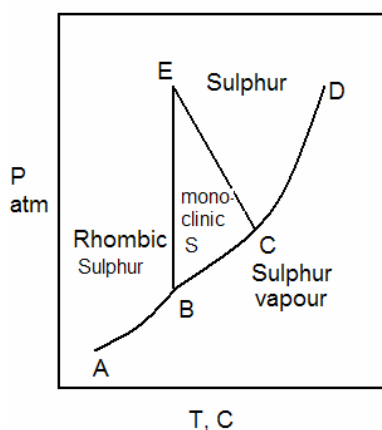
٣. الشكل يصور شكل الطور لنظام ثنائي مكثف من الرصاص و الأنتيمون، و يظهر النظام تكون مخلوط إتيكتيكي، تركيبه 13% Sb، و له أقل درجة انصهار للنظام و تسمى درجة حرارة المخلوط الإتيكتيكي eutectic temperature، و هي مميزة للنظام عند ضغط ثابت. و يمثل المنحنى AB منحنى ذوبان الرصاص عند درجات حرارة مختلفة، بينما يمثل المنحنى BC تغير ذوبان الأنتيمون.



شكل الطور لنظام الرصاص و الأنثيمون.

أما الخط الأفقي فيمثل تجمد (أو انصهار) المخلوط الإتيكتيكي، إما بمفرده عند النقطة B، أو بالإضافة إلى الزيادة من الرصاص (إلى اليسار من المخلوط الإتيكتيكي) أو الزيادة من الأنثيمون (إلى اليمين من المخلوط الإتيكتيكي) عند النقاط الأخرى على الخط. أما درجات الطلاقة في المناطق فهي: $F = C - P + 2 = 2 - 1 + 1 = 2$ في المنطقة العليا فوق منحنى الذوبان. تحت منحنى الذوبان وكذلك هناك طوران وهكذا: $F = 2 - 2 + 1 = 1$ في المنطقة السفلى تحت الخط الأفقي للتجمد التام للمخاليط: $F = 2 - 2 + 1 = 1$ وأخيرا عند النقطة B وهي نقطة تكون المخلوط الإتيكتيكي: $F = 2 - 2 + 1 = 1$.

٤. يمكن للكبريت التواجد في صورتين هما الكبريت المعيني و الكبريت المنشوري. و يمثل الشكل شكل الطور لنظام الكبريت. درجات الطلاقة في كل منطقة $F = 2$ و على الخطوط المعبرة عن عمليات التحول الطوري للكبريت $F = 1$ و أخيرا فإن هناك نقطتان ثلاثيتان للكبريت هما B, C. النقطة الأولى تمثل وجود الأطوار الثلاثة: الكبريت السائل و بخار الكبريت و الكبريت المنشوري، بينما تمثل النقطة الثانية وجود الأطوار الثلاثة: الكبريت المنشوري و الكبريت المعيني و بخار الكبريت.



شكل الطور لنظام الكبريت.

بعض الثوابت المهمة

اسم الثابت	القيمة
سرعة الضوء	$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
عجلة (تسارع) الجاذبية الأرضية	$g = 9.806 \text{ m/s}^2$
ثابت فارادي	$F = 96.485 \text{ C/mol}$
ثابت العام للغازات	$R = 8.314 \text{ J / K .mol}$ $R = 1.987 \text{ cal / K .mol}$ $R = 0.082 \text{ l.atm / K .mol}$
ثابت بلتزمان Boltzman	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$
عدد افوجادرو Avogadro	$N = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
شحنة الإلكترون (البروتون)	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ $e = 4.803 \times 10^{-10} \text{ esu}$
ثابت بلانك Planck	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
وحدة الكتلة الذرية	$u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$
كتلة الإلكترون	$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
كتلة البروتون	$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
كتلة النيوترون	$m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
العدد (أساس اللوغاريتم الطبيعي) e	$e = 2.71828182846$
التقدير الدائري π	$\pi = 3.1415926535 \text{ 9}$

تحويلات مهمة

$$1\text{K}=1^{\circ}\text{C}+273.16$$

درجة الحرارة

$$1\text{ atm} = 760\text{ mm Hg}$$

$$= 760\text{ Torr}$$

$$= 101.325\text{ kPa}$$

الضغط

$$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$$

$$1\text{ L} = 10^3\text{ cm}^3$$

$$= 1000\text{ mL}$$

الحجم

$$1\text{ N} = 10^5\text{ dyne}$$

القوة

$$1\text{ J} = 10^7\text{ erg}$$

الطاقة

$$1\text{ cal} = 4.184\text{ J}$$

$$1\text{ year} = 365.25\text{ days(d)}$$

الزمن

$$1\text{ day} = 24\text{ hours (h)}$$

$$1\text{ hour} = 60\text{ minutes (min)}$$

$$1\text{ minute} = 60\text{ second(s)}$$

$$1\text{ C} = 3 \times 10^9\text{ esu}$$

الشحنة الكهربائية

وحدات القياس

الكمية	وحدة القياس	رمز وحدة القياس
النظام الدولي SI		
الطول	meter متر	M
الكتلة	kilogram كيلوجرام	Kg
الزمن	second ثانية	S
القوة	Newton نيوتن	N
الطاقة	Joule جول	J
القدرة	Watt وات	W
كمية المادة	مول	mol
شدة الاستضاءة	Candle قنديله	Cd
شدة التيار	Ampere أمبير	A
الضغط	Pascal باسكال	Pa
النظام المتري cgs		
الطول	Centimeter سم	cm
الكتلة	gram جرام	G
الزمن	second ثانية	S
القوة	dyne داين	dyne
الطاقة	erg ارج	erg
وحدات أخرى		
الجهد الكهربى	Volt فولت	Volt
المقاومة الكهربائية	Ohm أوم	Ω
الشحنة الكهربائية	Colom كولوم	C
الحجم	liter لتر	L
الضغط	atmosphere جو	atm
درجة الحرارة	kelvn كلفن	K

مضاعفات وأجزاء القيم والوحدات

هناك لواحق يعبر عنها برمز معين يضاف أمام الوحدة أو القيمة ليعطي بعض المضاعفات أو أجزاء منها.

اللاحقة الأمامية	رمز اللاحقة الأمامية	المعنى
femto فمتو	f	10^{-15}
pico بيكو	p	10^{-12}
nano نانو	n	10^{-9}
micro ميكرو	μ	10^{-6}
milli ملي	m	10^{-3}
centi سنتي	c	10^{-2}
deci ديسي	d	10^{-1}
kilo كيلو	k	10^3
mega ميغا	M	10^6
giga جيغا	J	10^9
tetra تترا	T	10^{12}

حالة خاصة لوحدة الطول:

$$1 \text{ m} = 10 \text{ dm} = 100 \text{ cm} = 10^6 \mu\text{m}$$

حروف يونانية

الشكل الأول	الشكل الثاني	نطق الحرف
α	A	ألفا
β	B	بيتا
γ	Γ	جاما
δ	Δ	دلتا
η	H	إيتا
σ	Σ	سيجما
π	Π	باي
ϕ	Φ	فاي
ψ	Ψ	بساي
ω	Ω	أوميغا
θ	Θ	سيتا
ρ	R	رو
κ	K	كبا
ε	E	ابسلون
μ	M	ميو
ν	N	نيو
λ	Λ	لندا
τ	T	تاو
χ		كساي
ξ	Ξ	زيتا

بعض ثوابت العناصر الشهيرة

EN	EA kJ mol ⁻¹	IE kJ mol ⁻¹	r Å	الوزن الذري	العدد الذري	الرمز	العنصر
2.2		1312	0.37	1.008	1	H	هيدروجين
-		2373	0.5	4.003	2	He	هليوم
1.0	-58	520	1.52	6.939	3	Li	ليثيوم
1.6	250		1.11	9.012	4	Be	بريليوم
2.0	-23		0.88	10.811	5	B	بورون
2.6	-108		0.77	12.011	6	C	كربون
3.0	0		0.70	14.007	7	N	نيتروجين
3.4	0		0.66	15.999	8	O	أكسجين
4.0	-333		0.64	18.998	9	F	فلور
-		2080	0.70	20.183	10	Ne	نيون
0.9	-53	496	1.86	22.99	11	Na	صوديوم
1.3	230		1.60	24.31	12	Mg	ماغنسيوم
1.6	-44		1.43	26.98	13	Al	ألومنيوم
1.9	-135		1.17	28.09	14	Si	سيلكون
2.2	-74	1012	1.10	30.97	15	P	فوسفور
2.6	-200		1.09	32.06	16	S	كبريت
3.2	-348		0.99	35.45	17	U	كلور
-		1527	0.94	39.95	18	Ar	ارجون
0.8	-48	419	2.31	39.10	19	K	بوتاسيوم
1.0	154	590	1.97	40.08	20	Ca	كالسيوم
1.6				52.00	24	Cr	كروم
1.5				54.94	25	Mn	منجنيز

1.8			55.85	26	Fe	حديد	
1.9			58.93	27	Co	كوبالت	
1.9			58.71	28	Ni	نيكل	
1.9			63.54	29	Cu	نحاس	
1.6			65.37	30	Zn	خارصين	
2.2	-77	1.21	74.92	33	As	زرنيخ	
3.0	-324	1.14	79.91	35	Br	بروم	
-		1356	1.09	83.80	36	Kr	كربتون
0.9	120	2.15	87.62	38	Sr	استرانشيوم	
1.9			107.87	47	Ag	فضة	
1.7			112.40	48	Cd	كادميوم	
2.0	-121	1.40	118.69	50	Sn	قصدير	
2.1	-101	1.41	121.75	51	Sb	انتمون	
2.7	-295	1.33	126.90	53	I	يود	
-		1176	1.30	131.30	54	Xe	زينون
0.9	52	2.17	137.34	56	Ba	باريوم	
1.7			183.85	74	W	تنجستن	
2.2			195.09	78	Pt	بلاتين	
2.0			169.97	79	Au	ذهب	
1.9			200.59	80	Hg	زئبق	
2.3	-101	1.75	207.19	82	Pb	رصاص	
2.0	-100	1.46	208.98	83	Bi	بزموت	

طاقة التأين = IE ، الألفة الإلكترونية = EA ، السالبية الكهربائية = EN ، نصف قطر الذرة = r

ثوابت تفكك الأحماض والقلويات عند ٢٥°م

ثابت التفكك	الالكتروليت
k_a	الأحماض
$k_1 = 4.3 \times 10^{-7}, k_2 = 5.6 \times 10^{-11}$ □ H_2CO_2	حمض الكربونيك
4.8×10^{-10} HCN	حمض الهيدروسيانيك
1.8×10^{-5} CH_3COOH	حمض الخليك (الخل)
1.8×10^{-4} HCOOH	حمض الفوميك (النمل)
6.3×10^{-5} C_6H_5COOH	حمض البنزويك
7.2×10^{-10} H_3BO_3	حمض البوريك
10^7 HCl	حمض الهيدروكلوريك
10^9 HBr	حمض الهيدروبروميك
10^{11} HI	حمض الهيدرواويديك
$k_1 = 5.6 \times 10^{-2}, k_2 = 5.1 \times 10^{-5}$	حمض الاوكساليك
$k_1 = 6.9 \times 10^{-3}, k_2 = 6.2 \times 10^{-8}, k_3 = 4.8 \times 10^{-13}$ H_3PO_4	حمض الفسفوريك
5.9×10^{-9} □ H_3BO_3	حمض البوريك
$k_1 = 8.9 \times 10^{-8}, k_2 = 1.2 \times 10^{-13}$ H_2S	حمض كبريد الهيدروجين
k_b	قواعد
1.7×10^{-5} NH_4OH	هيدروكسيد الامونيوم
4.1×10^{-10} $C_6H_5NH_2$	انيلين
5×10^{-4} CH_3NH_2	امين الميثيل
1.7×10^{-9} C_5H_5N	بريدين

ثابتا الارتفاع (k_b) والتجمد (k_f) المولاليان للمذيبات

المذيب	k_b	k_f
	$^{\circ}\text{C/molal}$	$^{\circ}\text{C/molal}$
الماء	0.51	1.86
الإيثانول	1.22	
الميثانول	0.83	
البنزين	2.53	5.12
التلوين		
ايثيل ايثر	2.02	
كلوروفورم	3.63	
رابع كلوريد الكربون	5.02	
الكافور		37.7
حمض الخليك		3.9
الهكسان الحلقي		20
برومو بنزين		14.4
نفتالين		6.9
فينول		7.3

التوصيلية الأيونية عند تخفيف لانهائي عند ٢٥ م.

الأيون	الرمز	التوصيلية الأيونية λ_{∞}
الهيدروجين	H^{+}	349.8
الليثيوم	Li^{+}	38.69
الصوديوم	Na^{+}	50.11
البوتاسيوم	K^{+}	73.52
الأمونيوم	NH_4^{+}	73.4
الكالسيوم	$\frac{1}{2}Ca^{+}$	59.5
الباريوم	$\frac{1}{2}Ba^{+}$	127.2/2
الرصاص	$\frac{1}{2}Pb^{+}$	
الزئبق	$\frac{1}{2}Zn^{+}$	105.6/2
الهيدروكسيد	OH^{-}	198.0
الكلوريد	Cl^{-}	75.23
البروميد	Br^{-}	78.1
اليوديد	I^{-}	76.80
الخلات	CH_3COO^{-}	40.9
الكبريتات	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	79.8
الكربونات	$\frac{1}{2}CO_3^{2-}$	138.6/2

الجهد القياسي لتفاعلات الأكسدة والاختزال عند ٢٥°م (اختزال).

الجهد القياسي	التفاعل
-3.045	$\text{Li}^+ + e = \text{Li}$
-2.925	$\text{K}^+ + e = \text{K}$
-2.714	$\text{Na}^+ + e = \text{Na}$
-1.662	$\text{Al}^{3+} + 3e = \text{Al}$
-0.763	$\text{Zn}^{2+} + 2e = \text{Zn}$
-0.440	$\text{Fe}^{2+} + 2e = \text{Fe}$
-0.36	$\text{PbSO}_4 + 2e = \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$
-0.250	$\text{Ni}^{2+} + 2e = \text{Ni}$
-0.136	$\text{Sn}^{2+} + 2e = \text{Sn}$
-0.126	$\text{Pb}^{2+} + 2e = \text{Pb}$
0.00	$\text{H}^+ + e = 1/2\text{H}_2$
0.15	$\text{Sn}^{4+} + 2e = \text{Sn}^{2+}$
0.153	$\text{Cu}^{2+} + e = \text{Cu}^+$
0.222	$\text{AgCl} + e = \text{Ag} + \text{Cl}^-$
0.268	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$
0.337	$\text{Cu}^{2+} + 2e = \text{Cu}$
0.521	$\text{Cu}^+ + e = \text{Cu}$
0.536	$\text{I}_2 + 2e = 2\text{I}^-$
0.68	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}_2$
0.771	$\text{Fe}^{3+} + e = \text{Fe}^{2+}$
0.799	$\text{Ag}^+ + e = \text{Ag}$
1.229	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e = 2\text{H}_2\text{O}$
1.455	$\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + 2e = \text{Pb}^{2+} + 2\text{HO}$

حاصل الإذابة للأملاح شحيحة الذوبان في الماء عند ٢٥ م°

المادة	حاصل الإذابة k_s
هيدروكسيد الألومنيوم	3.7×10^{-15}
هيدروكسيد الكالسيوم	$Ca(OH)_2$
هيدروكسيد الماغنسيوم	1.2×10^{-11}
هيدروكسيد الباريوم	$Ba(OH)_2$
هيدروكسيد النحاس	$Cu(OH)_2$
كلوريد الفضة	1.0×10^{-10}
يوريد الفضة	1.5×10^{-16}
بروميد الفضة	7.7×10^{-13}
كرومات الفضة	9.0×10^{-12}
كبريتيد النحاسيك	8.5×10^{-45}
كبريتيد الزئبقوز	Hg_2S
كبريتيد الرصاص	7×10^{-29}
كبريتيد البزموت	PbS
كبريتيد الفضة	Bi_2S_3
كبريتات الباريوم	Ag_2S
كبريتات الكالسيوم	1.1×10^{-10}
كربونات الكالسيوم	$BaSO_4$
كربونات الباريوم	$CaSO_4$
كربونات الخارصين	$CaCO_3$
	$BaCO_3$
	2×10^{-10}
	$ZnCO_3$

طاقة التكوين القياسية (ΔH° /kcal mol⁻¹) للمركبات عند ٢٥ م°

ΔH°	المركب	ΔH°	المركب الغازي
11.72	C ₆ H ₆ سائل البنزين	-26.42	أول أكسيد الكربون CO
-57.08	CH ₄ سائل الميثانول	-94.05	ثاني أكسيد الكربون CO ₂
-66.41	C ₂ H ₃ سائل الإيثانول	-17.89	الميثان CH ₄
-33.25□	CCl ₄ سائل رابع كلوريد الكربون	54.19	الأسيتيلين C ₂ H ₂
-68.32	H ₂ O سائل الماء	-20.24	الايثان CH ₃ CH ₃
-98.35	NaCl كلوريد الصوديوم الصلب	-24.82	البروبان C ₃ H ₈
-270.53	NaCO ₃ كربونات الصوديوم الصلب	19.82	البنزين C ₆ H ₆
-217.92	SiO ₂ أكسيد السليكون الصلب	-48.08	الميثانول CH ₃ OH
-288.73	كربونات الكالسيوم الصلب CuCO ₃	-56.63	الايثانول C ₂ H ₅ OH
-51.20	PbO أكسيد الرصاص الصلب	-57.80	الماء H ₂ O
-30.38	AgCl كلوريد الفضة الصلب	-11.04	الأمونيا NH ₃
-23.80	AgBr بروميد الفضة الصلب	-22.06	كلوريد الهيدروجين HCl
-14.93	AgI يوديد الفضة الصلب	-8.66	بروميد الهيدروجين HBr
-23.52	PbS كبريتيد الرصاص الصلب	6.2	يوديد الهيدروجين HI
		-70.96	ثاني أكسيد الكبريت SO ₂
		-94.45	ثالث أكسيد الكبريت SO ₃
		12.50	الايثيلين C ₂ H ₄
		-116□	فورمالدهيد HCOH

-طاقة تكوين الغازات مثل F₂, Br₂, Cl₂, O₂, N₂, H₂ وهي الصفر.

-طاقة تكوين المواد الصلبة مثل الجرافيت والسليكون والصوديوم والكبريت المعيني واليود هي الصفر.

طاقة الرابطة الكيميائية (كيلو جول لكل جزئ)

طاقة الرابطة	الرابطة	طاقة الرابطة	الرابطة
323	H—Si	432	H-H
305	C—N	146	O-O
358	C—O	160	N-N
259	C—S	154	F-F
485	C—F	239	Cl-Cl
339	C—Cl	193	Br-Br
276	C—Br	347	C-C
240	C—I	614	C=C
272	N—F	839	C≡C
200	N—Cl	418	N=N
243	N—Br	495	O=O
799	C=O	413	H—C
1072	C≡O	427	H—Cl
607	N=O	467	H—O
887	C≡N	391	H—N
941	N≡N	363	H—Br
		347	H—S

معلومات رياضية

خواص اللوغاريتمات :

عند كتابة أي عدد موجب في صورة أساس (base) و أس (power) فإن لوغاريتم العدد هو الأس

، هناك أساسان شهيران هما :

١. العدد 10 ويسمى اللوغاريتم لهذا الأساس log.

٢. العدد $e = 2.71828$ ويسمى اللوغاريتم لهذا الأساس ln.

مثال ١ : أوجد اللوغاريتم الطبيعي واللوغاريتم العشري للعدد 34.67 .

$$\log 34.67 = 1.540$$

$$\ln 34.67 = 3.5459$$

مثال ٢ : أوجد العدد المقابل للوغاريتم الطبيعي للعدد -1.67 والعدد المقابل للوغاريتم العشري للعدد 3.76.

$$\text{Anti log } (3.76) = 5754.3393$$

$$\text{Anti ln } (-1.76) = 0.1720$$

العملية	المقابل في اللوغاريتمات
الجمع *	$\log A + \log B \neq \log (A+B)$
الطرح *	$\log A - \log B \neq \log (A-B)$
الضرب *	$\log A + \log B = \log (AB)$
القسمة *	$\log A - \log B = \log (A/B)$
الأس *	$B \log A = \log (A^B)$
المقلوب *	$-\log A = \log \left(\frac{1}{A}\right)$
	$\log 10 = 1 ; \ln e = 1$
	$\log 0 = \ln 0 = -\infty$
	$\log 1 = \ln 1 = 0$
	$\ln A = 2.303 \log A$
تحويل	

* تسلك ln مسلك log في هذه العمليات.

معادلة الدرجة الثانية في مجهول واحد :

كثيراً ما يحتاج الأمر إلى حساب مجهول يحقق معادلة من الدرجة الثانية على الصورة :

$$ax^2 + bx + c = 0$$

حيث a, b, c ثوابت تحدد قيمة المتغير X حسب العلاقة :

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

ومن الواضح أن هناك قيمتان للمتغير X لتحقيق المعادلة.

مثال : احسب قيمة X التي تحقق المعادلة الآتية :

$$x^2 + 2x = 4$$

الحل : نكتب المعادلة في الصورة العامة :

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$x^2 + 2x - 4 = 0$$

للحصول على قيمة x نستخدم الصورة :

$$x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a$$

$$= (-2 \pm \sqrt{4 - 4 \times 1(-4)}) / 2 \times 1$$

$$x = -3.236 \text{ أو } x = 1.236$$

الأسس :

تقوم كتابة الأعداد بالطريقة العلمية Scientific notation على استخدام الأسس في هذه التعابير. ويعبر عن العدد بجزئين : الأول عدد بسيط يحتوي على الدقة المراد ظهورها والثاني هو الأساس عشرة مرفوع إلى الأس (قوة) تحقق مع الجزء الأول قيمة العدد، يحتاج إلى ذلك طبعاً عندما تكون الأعداد بالغة الكبر أو الصغر بحيث تصبح طريقة كتابة قيمة العدد غير مريحة للقارئ. ويمكن الإستعاضة عن الأساس عشرة بأي أساس آخر والخواص تظل ثابتة.

مثال ١: العدد 3570000000 يمكن كتابته على الصورة العلمية 35.7×10^8 وهي أكثر وضوحاً دون مساس بالقيمة أو دقتها.

مثال ٢: العدد 0.000000000357 يكتب على الصورة 3.57×10^{-10} أيضاً يمكن أن يكتب 35.7×10^{-9} أو 357×10^{-8} وذلك حسب الدقة المطلوب التعامل معها.

خواص الأسس:

$$A10^a + B10^a = (A+B)10^a$$

١. جمع عددين متحدين في الأس

$$A10^a - B10^a = (A-B)10^a$$

٢. طرح عددين متحدين في الأس

$$10^a 10^b = 10^{(a+b)}$$

٣. ضرب الأسس

$$10^a / 10^b = 10^{(a-b)}$$

٤. قسمة الأسس

$$1/10^a = 10^{-a}$$

٥. مقلوب الأسس

$$10^0 = 1$$

$$10^\infty = \infty$$

$$0^a = 0$$

مثال ١: أوجد مجموع العددين 0.00081, 0.0037.

الحل : نكتب العددين على الصورة العلمية:

$$37 \times 10^{-4} + 8.1 \times 10^{-4}$$

$$= (37 + 8.1) 10^{-4} = 45.1 \times 10^{-4} = 0.00451$$

مثال ٢: أوجد حاصل ضرب العددين $8 \times 10^5, 7.1 \times 10^{-3}$.

الحل :

$$8 \times 10^5 \times 7.1 \times 10^{-3} = 8 \times 7.1 \times 10^{5-3} = 65.8 \times 10^2 = 6580$$

تفاضل وتكامل الدوال:

عمليتا التفاضل والتكامل شائعتا الاستخدام في الكيمياء ويجب على الطالب أن يتقن فهم هاتين العمليتين للدوال البسيطة التي تواجهه كثيراً أثناء الدراسة.

١. تفاضل الدوال ذات المجهول الواحد (x) حيث a, n ثوابت:

التفاضل	الدالة
adx	ax
nx^{n-1}	x^n
$\frac{dx}{x}$	$\ln x$
$e^x dx$	e^n
0	a
$-\frac{dx}{x^2}$	$\frac{1}{x}$
$\frac{dx}{(a-x)^2}$	$\frac{1}{a-x}$

٢. تكامل الدوال ذات المجهول الواحد (x):

التكامل غير المحدد	الدالة
$\frac{1}{2} x^2$	x
$\frac{1}{n+1} x^{n+1}$	x^n
e^x	e^x
ax	a
$\ln x$	$\frac{1}{x}$
$-\ln(a-x)$	$\frac{1}{a-x}$

نموذج اختبار (١)

١. اذكر العلاقتين المعبرتين عن ثابت سرعة تفاعلات الرتبة الأولى و زمن نصف عمر التفاعل. أعط أمثلة على هذا النوع من التفاعلات.
٢. احسب الزمن اللازم لإتمام ٩٠٪ من تصبن خلاات الإيثيل مع هيدروكسيد الصوديوم، علما بأن زمن نصف عمر عملية التصبن في هذه الحالة ١٣ دقيقة.
٣. اذكر الخواص الجامعة و المعادلات المستخدمة لربط تركيز المذاب بكل خاصية.
٤. اذكر الفروق بين الامتزاز الكيميائي و الامتزاز الفيزيائي.
٥. ما هو الحفز الكيميائي و أنواعه. أعط أمثلة على كل نوع.
٦. اذكر درجات الطلاقة للنظم الآتية:
 - أ - ماء و بخار ماء و ثلج.
 - ب - محلول ملحي من كبريتات الصوديوم و كبريتات البوتاسيوم و بخار الماء.
٧. احسب الوزن الجزيئي لبروتين أذيب منه ٣ جرامات في ٢٠٠ مليلتر ماء، فأعطى ضغطاً أسموزياً مقداره ٣٥ مليمتر زئبق عند درجة حرارة ٢٥ مئوية.
٨. امتز حمض الخليك على الفحم وفق أيزوثرم لانجمير، فوجد أن كسر السطح يساوي ٠,٣ عند تركيز اتزان مقداره ٠,١٢ مول لكل لتر. احسب ثابت الاتزان.
٩. أكمل ما يلي:
 - أ -تزيد سرعة التفاعل مع ٠٠٠٠ درجة الحرارة وفق معادلة ٠٠٠٠٠
 - ب -يتناسب نصف عمر تفاعل الرتبة الثانية ٠٠٠٠ مع التركيز الابتدائي.
 - ج -تزيد سرعة التفاعل الحفزي مع ٠٠٠٠ الحافز الصلب، بينما تزيد مع ٠٠٠٠٠ الحافز الذائب.
 - د - ٠٠٠٠ الضغط البخاري لسائل عند إذابة مذاب غير متطاير، و ٠٠٠٠٠ درجة غليانه، و تنخفض درجة ٠٠٠٠ و ينشأ ٠٠٠٠٠

نموذج اختبار (٢)

- أ. اذكر العلاقات المعبرة عن ما يلي:
- أ - الشغل العكسي عند ثبوت درجة الحرارة.
- ب - الشغل الأديابتيكي.
- ج - التغير في الأنثروبي عند ثبوت الضغط.
- د - كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي في المحركات.
- ب. احسب كمية الحرارة و الشغل و التغير في الطاقة الداخلية عند تمدد ١٠ جزيئات من غاز مثالي تمدد عكسي عند درجة حرارة ثابتة مقدارها ٣٠ درجة مئوية من حجم مقداره ٣,٥ لتر إلى ٧,٤ لتر.
- ج. في نظام ثنائي مكثف مثل الماء و الفينول ، احسب درجات الطلاقة فيما يلي:
- أ - على منحنى الذوبان
- ب - المنطقة تحت المنحنى
- ج - المنطقة فوق المنحنى
- د. اذكر العلاقات المعبرة عن ما يلي:
- أ - تفاعلات الرتبة الصفرية
- ب - نصف عمر تفاعلات الرتبة الأولى
- ج - حرارة تنشيط التفاعلات الكيميائية
- د - قانون راؤول للمحاليل المثالية
- هـ. احسب فترة نصف عمر تفاعل من الرتبة الصفرية ، علما بأن التركيز الابتدائي كان ٠,٣ مول/جزيء و ثابت سرعة التفاعل ٠,٠١٢ (مول/لتر) - ١ دقيقة - ١ .
- و. أكمل ما يلي:
- أ - هناك عدد ٠٠٠٠ نقطة ثلاثية للماء و ٠٠٠ نقطة ثلاثية للكبريت.
- ب - أقل درجة انصهار لمخلوط ثنائي توجد عند ٠٠٠٠ ، بينما يتميز المركب بدرجة انصهار ٠٠٠٠
- ج - الروابط تكون ٠٠٠٠ في الامتزاز الكيميائي و الذي يعتمد على ٠٠٠٠ و ٠٠٠٠٠ ، بينما الروابط تكون ٠٠٠٠ في الامتزاز الفيزيائي و الذي يعتمد على ٠٠٠٠
- د - يتناسب مقدار التغير في الخاصية الجامعة مع ٠٠٠٠ ، بينما لا يعتمد على ٠٠٠٠٠

ز. احسب الانخفاض في الضغط البخاري لكيلو جرام من مذيب أذيب فيه ١٠ جرعات من مذاب غير متطاير، علما بأن الوزن الجزيئي للمذاب ٤٨ جرام/مول و الوزن الجزيئي للمذيب ١٨ جرام/مول و الضغط البخاري للمذيب ٣١٠ ملليمتر زئبق.

نموذج اختبار (٣)

اختر الإجابة الصحيحة:

أ. عدد الجزيئات في المول الواحد من المادة هو:

- (١) 6.5×10^{-20} (٢) 6.02×10^{23} (٣) 6.625×10^{-34} (٤) 4.184×10^{18}

ب. نصف عمر تفاعل الرتبة الصفري يعطى بالعلاقة:

- (١) $a/2k$ (٢) ka (٣) $k/2a$ (٤) $0.693/k$

ج. التغير في الطاقة الداخلية عند ثبوت درجة الحرارة:

- (١) صفر (٢) موجب (٣) سالب (٤) غير موجود

د. الأنثروبي في العمليات الأديابتيكية:

- (١) يزيد (٢) يقل (٣) صفر (٤) ثابت

هـ. الخواص الجامعة للمحاليل تعتمد على:

- (١) نوع و عدد جزيئات المذاب (٢) نوع المذيب (٣) نوع المذاب (٤) عدد جزيئات المذاب

و. المحاليل المثالية عند الامتزاج تصاحب بالتغير الآتي:

- (١) تنطلق حرارة (٢) تمتص حرارة (٣) لا تغير في الحرارة أو الحجم (٤) يزيد الحجم

ز. ثابت الغازات يساوي:

- (١) $2.5 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ (٢) $2 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ (٣) 4.18 J K^{-1} (٤) $0.082 \text{ l atm g}^{-1}$

ح. عند إضافة مادة حافزة للتفاعل يحدث ما يلي:

- (١) ترتفع درجة الحرارة (٢) تزيد سرعته (٣) يبدأ التفاعل (٤) تستهلك المادة

ط. في الامتزاز الكيميائي يحدث ما يلي:

- (١) تمتص حرارة (٢) تتكون طبقة واحدة (٣) يزيد الأنثروبي (٤) تطرد حرارة و تتكون طبقات عديدة

ي. لنظام مكون من الماء و الثلج و بخار الماء و قليل من ملح الطعام، عدد الأطوار هو:

- (١) ثلاثة (٢) اثنان (٣) واحد (٤) أربعة

حل نموذج الاختبار الأول

١ - ثابت سرعة تفاعل الرتبة الأولى: $k = (1/t) \ln (a/a-x)$

فترة نصف العمر: $t_{1/2} = 0.693/k$

مثال: تميؤ خلات الإيثيل في وسط حمضي و تفكك تنائي ازونيوم البنزين.

٢ - تصبن الخللات بهيدروكسيد الصوديوم تفاعل من الرتبة الثانية وفق المعادلة: $k = x/at(a-x)$

و يرتبط ثابت سرعة التفاعل بفترة نصف العمر وفق العلاقة: $t_{1/2} = 1/ka$

وعليه فإن الزمن اللازم لإتمام ٩٠٪ من التصبن:

$$t = 13 \times 90 / 10 = 117 \text{ min.} \square$$

٣ - الخواص الجامعة للمحاليل المكونة من مذاب غر متطاير أو أكثر في مذيب متطاير هي:

- انخفاض الضغط البخاري للمذيب: $\Delta P/P^0 = X_B$

- ارتفاع درجة غليان المذيب: $\Delta t_b = k_b m$

- انخفاض درجة تجمد المذيب: $\Delta t_f = k_f m$

- الضغط الأسموزي للمحلول: $\pi V = n RT$

- ٤

الإمتزاز الكيميائي	الإمتزاز الفيزيائي
مكون من طبقة واحدة	مكون من طبقات عديدة
حرارة الامتزاز أكبر من ٢٠ كيلو سعر للجزيئ	حرارة الامتزاز أقل من ١٠ كيلو سعر للجزيئ
يعتمد على نوع الغاز الممتز و المادة المازة	يعتمد على نوع الغاز الممتز فقط
تتكون روابط كيميائية	قوى الترابط هي قوى فان درفال
يقبل معدل الامتزاز مع زيادة الضغط	يزيد معدل الامتزاز مع زيادة الضغط

٥ - الحفز الكيميائي هو زيادة سرعة التفاعل الكيميائي بإضافة مادة لا تستهلك في التفاعل تغير في مسار التفاعل و لا تغير النواتج أو تبدأ التفاعل. تعتمد سرعة التفاعل على كمية الحافز. في الحفز المتجانس تزيد سرعة التفاعل مع زيادة تركيز الحافز، و في الحفز غير المتجانس تزيد السرعة مع مساحة سطح الحافز.

أمثلة على الحفز المتجانس: هلجنة الأسيتون باليود في وجود حمض و تميؤ الأستري في وسط حمضي.

أمثلة على الحفز غير المتجانس: تكوين الأمونيا في وجود الحديد و تكسير فوق أكسيد الهيدروجين في وجود ثاني أكسيد المنجنيز.

٦ - درجات الطلاقة للنظم:

$$F = C - P + 2 = 1 - 3 + 2 = 0 \quad \text{أ -}$$

$$F = 3 - 2 + 2 = 3 \quad \text{ب -}$$

٧ - يمكن حساب الوزن الجزيئي من الضغط الأسموزي وفق العلاقة:

$$\pi V = n R T$$

حيث n عدد الجزيئات و V حجم المحلول و π الضغط الأسموزي و R ثابت الغازات و T درجة الحرارة المطلقة.

$$n = w/M$$

حيث w وزن المذاب و M وزنه الجزيئي.

$$M = w R T / \pi V = 3 \times 0.082 \times 298 \times 760 / (0.2 \times 35) \\ = 7959 \text{ g mol}^{-1}$$

٨ - معادلة لانجمير: $\theta/(1-\theta) = KC$

$$K = \theta/(1-\theta)C = 0.3/(0.12 \times 0.7) = 3.57 \text{ l mol}^{-1}$$

٩ - أ - تزيد سرعة التفاعل مع ارتفاع درجة الحرارة وفق معادلة أرهينيوس.

ب - يتناسب نصف عمر تفاعل الرتبة الثانية عكسيا مع التركيز الابتدائي.

ج - تزيد سرعة التفاعل الحفزي مع مساحة سطح الحافز الصلب، بينما تزيد مع تركيز الحافز الذائب.

د - ينخفض الضغط البخاري لسائل عند إذابة مذاب غير متطاير، و ترتفع درجة غليانه، و تنخفض درجة تجمده و ينشأ الضغط الأسموزي.

حل نموذج الاختبار الثاني

١ - أ - الشغل العكسي عند ثبوت درجة الحرارة: $W_{\max} = n R T \ln (V_f/V_i)$

حيث V_f و V_i هما الحجمان النهائيان و الابتدائي و n عدد الجزيئات.

ب - الشغل الأديابتيكي: $W = - n C_v \Delta T$

حيث C_v السعة الحرارية عند ثبوت الحجم و ΔT التغير في درجة الحرارة.

ج - التغير في الأنتروبي عند ثبوت الضغط: $\Delta S = n C_p \ln (T_f/T_i)$

حيث T_i و T_f هما درجتا الحرارة المطلقتين النهائية و الابتدائية و C_p السعة الحرارية عند ثبوت الضغط.

د - كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل في المحركات: $\text{eff} = W/q = (T_h - T_\ell)/T_h$

حيث T_h حرارة احتراق الوقود و T_ℓ حرارة العادم.

٢ - حيث إن درجة الحرارة ثابتة، يجب أن تكون $\Delta E = 0$ ، و عليه وفق القانون الأول للديناميكا

الحرارية: $q = W$

الشغل العكسي يعطى بالعلاقة: $W = n R T \ln (V_f/V_i)$

$W = 10 \times 2 \times 303 \ln (7.4/3.5) = 45.372 \text{ kcal.}$

٣ - درجات الطلاقة: أ - على منحني الذوبان لنظام الماء و الفينول: $F = C - P + 2 = 2 - 2 + 1 = 1$

ب - المنطقة تحت المنحنى: $F = 2 - 1 + 1 = 2$

ج - المنطقة خارج المنحنى: $F = 2 - 1 + 1 = 2$

٤ - أ - تفاعلات الرتبة الصفرية: $x = k t$

حيث x تركيز الناتج و t الزمن و k ثابت سرعة التفاعل.

ب - نصف عمر تفاعلات الرتبة الأولى: $t_{1/2} = 0.693/k$

ج - حرارة التنشيط حسب معادلة أرهينيوس: $k = A e^{-E_a/RT}$

حيث E_a حرارة التنشيط و A ثابت.

د - قانون راؤول للمحاليل المثالية (سائلان A و B): $P_t = P_A + P_B$, $P_A = P_A^0 x_A$, $P_B = P_B^0 x_B$

٥ - حسب العلاقة: $t_{1/2} = a/2k = 0.3/2 \times 0.012 = 12.5 \text{ min}$

٦ - أ - هناك عدد واحد نقطة ثلاثية للماء اثنان نقطة ثلاثية للكبريت.

ب - أقل درجة انصهار لمخلوط ثنائي توجد عند المخلوط الإتكيتيكي، بينما يتميز المركب بدرجة

انصهار مرتفعة.

- ج - الروابط تكون قوية في الامتزاز الكيميائي و الذي يعتمد على نوع الغاز الممتز و نوع المادة المازة ،
بينما الروابط تكون ضعيفة في الامتزاز الفيزيائي و الذي يعتمد على نوع الغاز الممتز.
- د - يتناسب مقدار التغير في الخاصية الجامعة مع عدد جزئيات المذاب ، بينما لا يعتمد على نوع المذاب.
- ٧ - حسب علاقة انخفاض الضغط البخاري: $\Delta P/P^0 = X_B$

حيث هو كسر الجزيء للمذاب في المذيب : $X_B = (W_B/M_B) / \{W_B/M_B + W_A/M_A\}$
 $= (10/48) / \{10/48 + 1000/18\} = 0.0037$
 $\Delta P = P^0 X_B = 310 \times 0.0037 = 1.16 \text{ mm Hg}$

حل نموذج الاختبار الثالث

أ - 6.02×10^{23} ب - $a/2k$

ج - صفر

د - لا يتغير

هـ - عدد جزيئات المذاب

و - لا تغير في الحرارة أو الحجم

ز - $2 \text{ cal K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

ك - تزيد سرعته

ل - تتكون طبقة واحدة

م - ثلاثة

المراجع العربية :

- ١ - أحمد عبد العزيز العويس و سليمان حماد الخويطر و عبد العزيز إبراهيم الواصل و عبد العزيز عبد الله السحيباني، الكيمياء العامة ، دار الخريجي، الرياض، ١٩٩٦ م.
- ٢ - جوردن م بارو، الكيمياء الفيزيائية، ترجمة أحمد محمد عزام، دار ماجروهيل، ١٩٨٢ م.
- ٣ - سليمان حماد الخويطر و عبد العزيز عبد الله السحيباني، الثرموديناميك الكيميائي، دار الخريجي، الرياض، ١٩٩٨ م.
- ٤ - سمير مصطفى المدني، أساسيات الكيمياء العامة، جامعة الملك سعود - النشر العلمي و المطابع، الرياض، ١٩٩٣ م.

المراجع الأجنبية :

- 1- Ralph H. Petruccii and William S. Harwood, **General Chemistry, Principle and Modern Applications**, Prentice-Hall, New Gersey, 1997.
- 2- James E. Brady and John R. Holum, **Chemistry, The study of Matter and its Changes**, Wiley, New York, 1993.
- 3- Petter Atkins and Loretta Jones, **Chemistry, Matter and Change**, 3rd Edition, W.H. Freedman and Co., New York, 1997.
- 4- James E. Brady, **General Chemistry, Principles and Structure**, 5th Edition, Wiley, New York, 1990.
- 5- David E. Goldberg, **Schaum's Outline Series, Theory and Problems of Chemistry Foundations**, International Editions, McGraw-Hill, New York, 1991.
- 6- James E. Brady and John R. Holum, **Fundamentals of Chemistry**, 3rd Edition, Wiley, New York, 1988.
- 7- Raymond Chang, **Chemistry**, 5th Edition, International Edition, McGraw-Hill, New York, 1994.
- 8- R. Abu-Etta, Y. Essa and A. El-Ansary, **General Chemistry**, Cairo University Press, 1998.
- 8- P.W. Atkins, **Physical Chemistry**, Oxford Press, Oxford, UK, 1982.
- 9- G.M. Barrow, **Physical Chemistry**, MacGraw-Hill, New York, USA, 1996.
- 10- Maurice Wahba, Hanna A. Rizk, **Introduction to Physical Chemistry**, Anglo-Egyptian, 1978.
- 11- Robert A. Alberty and Robert J. Silby, **Physical Chemistry**, Wiley, New York, 1992.

الصفحة	الموضوع
	تمهيد
٢	الوحدة الأولى حركية التفاعلات الكيميائية
٢٢	الوحدة الثانية الحفز الكيميائي
٤١	الوحدة الثالثة كيمياء السطح
٦١	الوحدة الرابعة المحاليل
٨٥	الوحدة الخامسة الديناميكا الحرارية الكيميائية
١١٢	الوحدة السادسة قاعدة الطور
١٤٢	نماذج اختبار و حلولها
	ملاحق
١٥١	المراجع

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