

الباب الرابع

الحالة السائلة
The Liquid State

الباب الرابع

الحالة السائلة The Liquid State

- . خاصية التبخير .
- . حرارة التبخير .
- . الضغط البخارى .
- . قياس الضغط البخارى .
- ١ - الطريقة البارومترية .
- ٢ - الطريقة المباشرة .
- . منحنيات ضغط بخار السوائل ومعادلة كلاوزيوس - كلابيرون .
- . الغليان ودرجة الغليان .
- . التجمد ودرجة التجمد .
- . التوتر السطحي .
- . قياس التوتر السطحي .
- . اللزوجة .
- . الأسئلة .

الحالة السائلة : The Liquid state

الحالة السائلة هي الحالة الوسط بين الصلبة والغازية حيث يمكن الحصول عليها إما بانصهار الحالة الصلبة أو بتكثيف الحالة الغازية كما تتكون الحالة السائلة من جزيئات ذات حركة مستمرة وعشوائية وبين هذه الجزيئات وبضعها قوى تجاذب داخلية ، كما أن معدل طاقة حركتها يتناسب طرديا مع درجة الحرارة المطلقة لهذه السوائل ، وهناك بعض الخصائص التي تميز بها السوائل وهي كما يلي :

خاصية التبخير :

إذا ترك سائل في إناء مفتوح فإنه ينتقل إلى الحالة الغازية (التبخير) وتختلف سرعة التبخر من سائل لآخر ، فالأثير يتبخر بسرعة بينما يتبخر الزئبق ببطء شديد ، ويفسر التبخر بأن السرعة المتوسطة للجزيئات في الحالة السائلة تعتمد على طبيعة السائل نفسه ، وتعتمد على درجة الحرارة المطلقة للسائل ، ولكن تختلف سرعة كل جزيء منفرد عن السرعة المتوسطة إختلافا واضحا ، إذ أن بعض الجزيئات تكون أكثر سرعة ، وعندما تصل إلى السطح تكون طاقة حركتها كافية على قوى جذب الجزيئات السطحية المحيطة فتترك سطح السائل على هيئة بخار وتكون السرعة المتوسطة للجزيئات المتبقية أقل ، فتنخفض درجة حرارة السائل ، ونتيجة لإمتصاص السائل حرارة من الجو المحيط ، قرنه يستمر في طرد بعض الجزيئات على هيئة بخار ، وهكذا حتى ينتهي كل السائل وتتضح ظاهرة إمتصاص الحرارة عندما يبرد سطح الجسم في الأيام الحارة نتيجة للتبخر والعرق .

حرارة التبخير :

من الضروري لكي تترك الجزيئات سطح السائل متحولة إلى الحالة البخارية أن تتغلب على قوى جذب جزيئات السوائل الأخرى . وهذه القوى كبيرة نسبيا . نظرا لأن الجزيئات تكون

أكثر إتصاقا فى السائل ، بالمقارنة بالحالة البخارية ، وبشرط أن تكون درجة الحرارة أدنى من الدرجة الحرجة ولكى يمكن التغلب على قوى التجاذب ، بحيث يجب إمداد السائل على هيئة حرارة .

وتعرف كمية الحرارة بالسعرات التى يمتصها جرام واحد من السائل ليتحول إلى الحالة البخارية بالحرارة النوعية للتبخير . وتختلف كمية الحرارة باختلاف درجة الحرارة التى يتم عندها التبخير فعند 1000°م تكون الحرارة النوعية . للماء متساوية 540 سعر / جم . وهى نفس كمية الحرارة المنطلقة عندما يتكثف جرام واحد من البخار إلى سائل عند درجة 1000°م .

والحرارة الجزيئية = الحرارة النوعية للتبخير × الوزن الجزيئى .

كما يمكن وضع الحرارة النوعية للتبخير فى معادلة كما يلى :

$$\Delta H = H_{\text{(بخار)}} + H_{\text{(سائل)}} \quad \text{(للتبخير)}$$

وهناك بعض أمثلة للحرارة النوعية للتبخير وهى على سبيل المثال للماء تساوى 540 سعر / جم ، والبنزين تساوى 94 سعر / جم ، والكلورفورم تساوى 59 سعر / جم ، والكحول الأيثلى تساوى 204 سعر / جم ، وللزئبق تساوى 71 سعر / جم .

الضغط البخارى ، Vapour pressure

نفرض أن لدينا إناء مغلق ، متصل بمانومتر زئبقى ، وأن الإناء قد ملء جزئيا بسائل وطبقا للنظرية الحركية سوف يحدث إنطلاق مستمر للجزيئات من سطح السائل إلى الفراغ الحر الموجود فوقه . وفى نفس الوقت سوف يرتد البخار إلى سطح السائل بمعدل يعتمد على تركيز البخار ، وأخيرا سوف تنشأ حالة إتزان بين السائل وبخاره . حيث يكون معدل الهروب مساويا تماما لمعدل تكثيف البخار . أى عندما يكون عدد الجزيئات التى تترك السطح والسائل فى

الثانية متحولة إلى بخار مساويا لعدد الجزيئات التي تتكثف إلى الحالة السائلة في الثانية الواحدة . وعند ذلك يقال أن البخار مشبع ، ويعرف الضغط الناتج عن البخار الموجود في حالة إتزان مع السائل بالضغط البخارى . وتعرف حالة الإتزان هذه بالإتزان الديناميكي ومن أهم العوامل التي تتوقف عليها سرعة تحول السائل إلى بخار ما يلي :

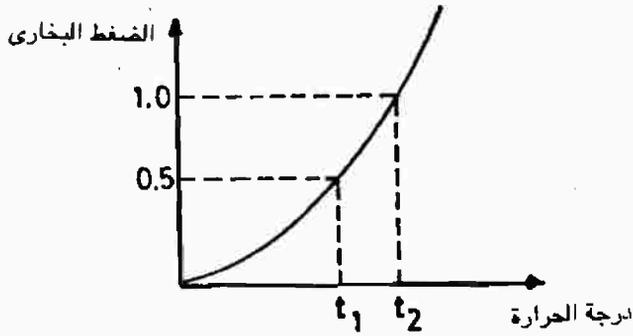
١ - هناك قوى جذب مختلفة تربط الجزيئات مع بعضها مثل قوى فان درفال والرابطة الهيدروجينية ، والإستقطاب ، فكلما إزداد تأثير هذه القوى يقل ميل الجزيئات إلى التبخر ، وكلما ضعفت فان التبخر يزداد .

٢ - وجود تيارات هوائية ناقلة وهذا يعنى أنه إذا حملت جزيئات السائل المتبخرة بعيدا عن السطح يزداد معدل التبخر وتنخفض تبعا لذلك درجة الحرارة .

٣ - مساحة السطح ، فكلما ازدادت مساحة سطح السائل المعرضة للجو يزداد التبخر .

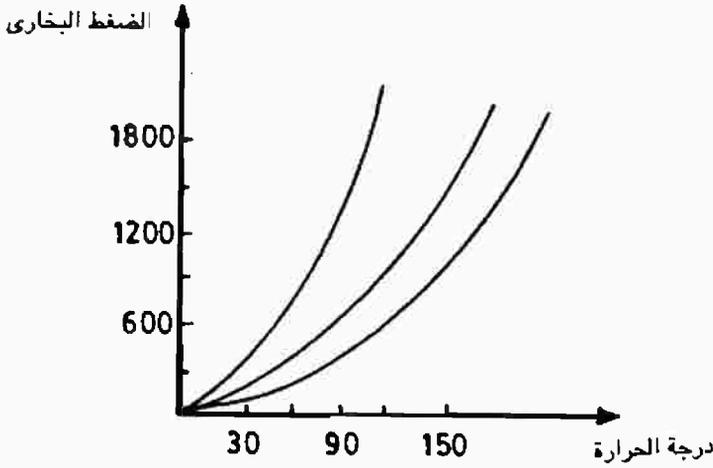
٤ - درجة الحرارة . عند رفع درجة الحرارة يزداد معدل الطاقة الحركية للجزيئات التي لها طاقة حركة عالية تستطيع التغلب بفعالها على قوى جذب الجزيئات الأخرى . ويلاحظ أن التبخير يتم مهما كانت درجة الحرارة إلا أن إرتفاع درجة حرارة السائل يزيد من سرعة تبخره .

٥ - وعند رفع درجة الحرارة ، سوف ينشأ وضع إتزان جديد يكون الضغط البخارى للسائل عنده أعلى . ويوضح الشكل (١) . أنه في الحالة الأولى ، حيث درجة الحرارة t_1 يكون الضغط مساويا $\frac{1}{2}$ جو ، وعندما رفعت درجة الحرارة إلى t_2 يزداد الضغط البخارى إلى واحد جو .



شكل (١) : علاقة الضغط البخارى لسائل بدرجة الحرارة

وتجدر الإشارة إلى أن الضغط البخارى لسائل عند أى درجة حرارة يكون كمية ثابتة ، لا تعتمد على كمية السائل ، أو البخار الموجود فى الإناء المغلق والذين يكونان فى وضع إتزان مع بعضهما . وإذا ضبط الضغط فوق سطح سائل ، عند قيمة معينة ولتكن ١ جو فإنه من الممكن رفع درجة الحرارة ، حتى تصل قيمة الضغط البخارى إلى قيمة الضغط الخارجى (١ جو) . وعند هذه النقطة سوف تلاحظ أن فقاعيا من البخار تتكون داخل السائل ثم تهرب من السطح ، وتلك هى نقطة غليان السائل وتعرف بأنها درجة الحرارة التى يكون عندها الضغط البخارى للسائل مساويا للضغط الخارجى فإذا كان الضغط الخارجى يساوى (١ جو) ، فإن درجة الحرارة تلك هى نقطة الغليان العادية للسائل ، ويعنى خفض الضغط البخارى أن نقطة الغليان سوف تنخفض ويوضح الشكل (٢) أنه عند درجة حرارة معينة ، تختلف السوائل المختلفة فى قيم ضغوطها البخارية المترنة ، وأنه عند ضغط يساوى (١ جو) ، وتختلف نقاط الغليان العادية للسوائل باختلاف أنواعها .



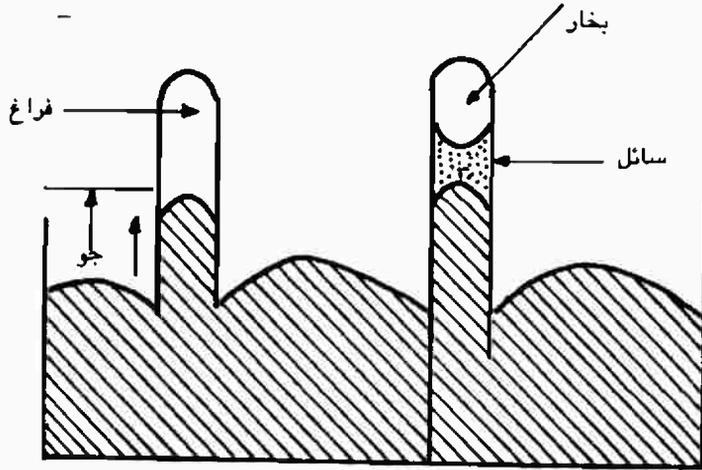
شكل (٢) : الضغط البخارى للبنزين والماء وحمض الخليك

قياس الضغط البخارى : Measurement of Vapor pressure

هناك طريقتان لقياس الضغط البخارى وهما :

١ - الطريقة البارومترية : Parometric Methods

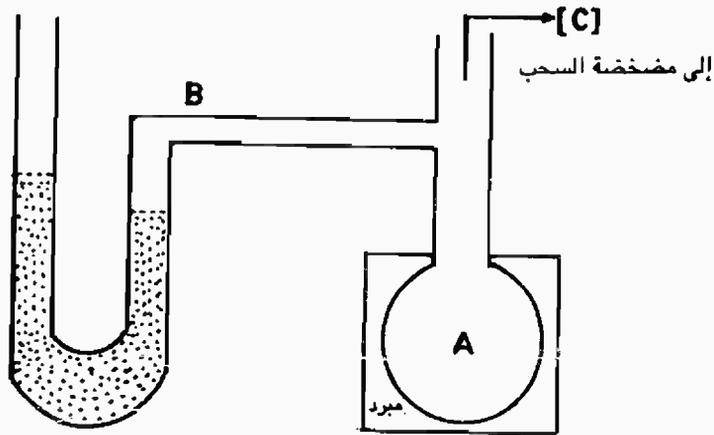
تستخدم أنبويتان بارمتريتان مملوءتان بالزئبق ومنكستين فوق حوض به زئبق ، وتستخدم إحدى الأنبويتين للمقارنة ويوضع فى الأنبوبة الأخرى كمية من السائل فوق سطح الزئبق وبعد فترة من الزمن ، عندما يكون الفراغ الموجود فوق سطح الزئبق مشبعاً بالأبخرة ، مع التأكد من وجود قطرات السائل لى تؤكد وجود إتزان ويعتبر الفرق بين سطحى الزئبق فى الأنبويتين مقياساً للضغط البخارى للسائل المراد تعيين ضغطه عند درجة حرارة التجربة . ويعتبر هبوط سطح الزئبق بتأثير السائل ضئيلاً جداً بحيث يمكن إهماله . وقد وجد أن الضغط البخارى للماء المقيس فى هذه التجربة عند ٢٠م يساوى ١٧٤ مم / ز والشكل (٣) يوضح هذه التجربة .



شكل (٢) : الطريقة البارومترية

٢- الطريقة المباشرة : Direct Method

يستخدم لقياس الضغط البخارى بالطريقة المباشرة جهاز كما فى شكل (٤) ، ويتكون من لورق منتفخ (A) متصل بمانومتر (B) وبعد أن يوضع السائل فى (A) يوصل الجهاز بمضخة سحب عند (C) يجمد السائل بوضع مخلوط مبرد حول الدورق ثم يفرغ الجهاز إلى ضغط منخفض بواسطة المضخة . تبعد المخلوط المبرد وتسمح للسائل المتصلب بالإنصهار .



شكل (٤) : الطريقة المباشرة

بوضع الجهاز فى منظم لدرجة الحرارة بحيث يمكن الحصول على الدرجة المطلوبة . وبعد مدة يحدث الإتزان حيث يقاس الضغط البخارى للسائل بواسطة المانومتر .

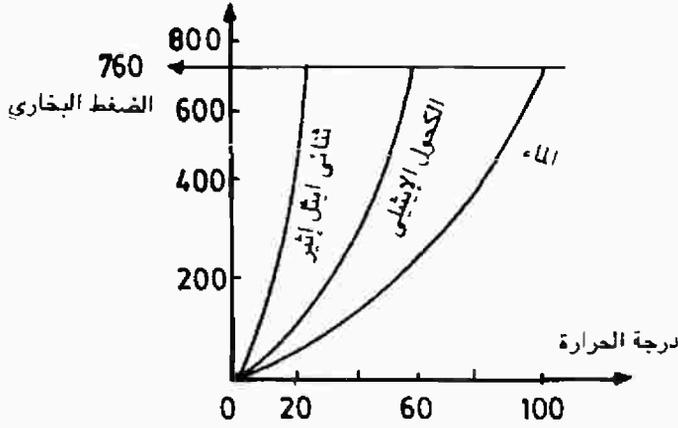
وكما ذكرنا سابقا بأنه كلما إرتفعت درجة الحرارة تزداد قيمة الضغط البخارى للسوائل . وفيما يلى جدول بالضغط البخارى لكل من الماء والكحول الإيثيلى والبنزين عند درجات حرارة مختلفة .

البنزين	الكحول الايثيلى	الماء	درجة الحرارة
27 مم / زئبق	12.2 مم / زئبق	4.6 مم / زئبق	0°C
45 مم / زئبق	23.6 مم / زئبق	9.2 مم / زئبق	10°C
50 مم / زئبق	30.8 مم / زئبق	12.8 مم / زئبق	15°C
74 مم / زئبق	43.9 مم / زئبق	17.5 مم / زئبق	20°C
95 مم / زئبق	58.5 مم / زئبق	28.8 مم / زئبق	25°C
118 مم / زئبق	78.8 مم / زئبق	31.8 مم / زئبق	30°C
271 مم / زئبق	222.2 مم / زئبق	92.5 مم / زئبق	50°C
643 مم / زئبق	666.1 مم / زئبق	289.1 مم / زئبق	75°C
1360 مم / زئبق	1693.3 مم / زئبق	760 مم / زئبق	100°C

منحنيات ضغط بخار السوائل ومعادلة كلاوزيوس - كلايرون :

Clausius - Clapeyron Equation

العلاقة بين الضغط البخارى ودرجة الحرارة لكل من الماء والكحول الإيثيلى وثنائى أيثل أثير يوضحها الشكل (٥) .



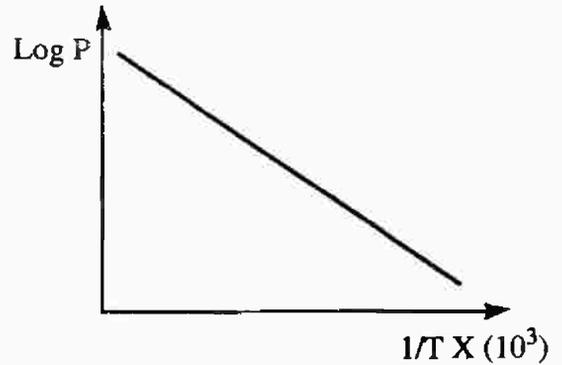
شكل (٥) : الضغط البخاري ودرجة الحرارة

ونجد أنه عند درجات الحرارة المنخفضة يتغير ضغط البخار ببطء نسبياً . بينما يصبح معدل تغير ضغط البخار سريعاً جداً عند درجات الحرارة العالية ، وتنتهي هذه المنحنيات عند درجة حرارة تسمى درجة الحرارة الحرجة (T_c) والتي توجد المادة بعدها دائماً في الحالة الغازية نستنتج أن ضغط البخار وحرارة التبخر متعلقان بقوة التجاذب ما بين جزيئات السائل ، ولذلك فهناك علاقة كمية بين ضغط البخار ودرجة الحرارة وحرارة التبخر فإذا رسمنا العلاقة بين لوغاريتم ضغط البخار ($\log P$) مع مقلوب درجة الحرارة ($1/T$) كما في شكل (٦) فإننا نحصل على خط مستقيم تكون معادلتها هي : $Y = b + mX$.

حيث $m =$ ميل المستقيم . وحيث $b =$ نقطة تقاطع الخط المستقيم مع المحور العمودي .

$$\therefore \log P = b + m(1/T)$$

$$m = - \Delta H / 2.303 R$$



شكل (٦) : العلاقة بين لوغاريتم ومقلوب درجة

الحرارة

فإذا كان تبخير $\Delta H =$ جول / مول . فإن $R = 8.31$ جول / مول / K .

وإذا كان تبخير $\Delta H =$ كالورى / مول . فإننا $R = 1.99$ كالورى / مول / K .

وتعطى معادلة كلاوزيوس - كلايرون العلاقة بين التبخير ΔH وضغط البخار وهى :

$$\text{Lg } P_1 / P_2 = - \Delta H / 2.303R (1/T_1 - 1/T_2)$$

حيث P_1 ضغط بخار السائل عند درجة حرارة T_1 . وحيث P_2 ضغط بخار السائل عند

درجة T_2 .

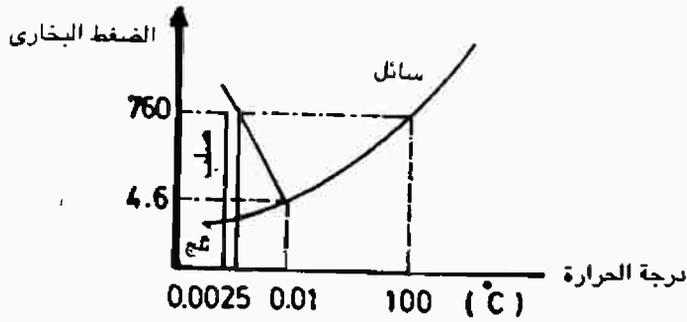
الغليان ودرجة الغليان : Boiling and boiling point

عندما يتساوى الضغط البخارى لسائل ما مع الضغط الخارجى الواقع عليه تتكون فقاعات غازية من جزيئات السائل تطفو على السطح نظرا لكثافتها وتنفجر وعند ذلك يكون السائل قد بدأ فى الغليان درجة الغليان : هى الدرجة التى يتساوى عندها الضغط البخارى للسائل مع الضغط الخارجى أى الضغط الجوى ولا تعتمد درجة الغليان على طبيعة السائل فقط . ولكن تعتمد أيضاً على قيمة الضغط الجوى وقت قياس درجة الغليان ، وتسمى درجة الحرارة التى يتساوى فيها الضغط البخارى للسائل 760 مم / زئبق بدرجة الغليان العادية للسائل . من هذا نستنتج أنه كلما زاد الضغط الواقع على سطح السائل إرتفعت درجة الغليان والعكس صحيح ، وهناك تجربة بسيطة توضح أن السائل يغلى عن درجة حرارة أقل تحت الضغوط المنخفضة ، وذلك بأخذ كمية من الماء فى دورق وإضافة كمية من النشادر إليها مع التسخين إلى ما قبل الغليان ثم ينكس فى حوض به ماء ويصب فوق الدورق ماء بارد فيلاحظ أن الماء أخذ يغلى . كما يلاحظ أن درجة الغليان تزداد بإزدياد الوزن الجزيئى فى السلاسل المتجانسة كنتيجة لإزدياد قوى فان درفالس ، كما أن درجة الغليان تقل فى المركبات ذات التركيب المتفرع أى فى المركبات العضوية غير المستقطبة وبشكل عام فإن درجة الغليان تعبر عن قوة أو ضعف إرتباط

الجزئيات مع بعضها ، فكلما كانت الجزئيات مرتبطة بقوة أكبر فإنه يلزم لتفككها عن بعضها طاقة عالية ، وبالتالي ترتفع درجة الغليان أو العكس .

التجمد ودرجة التجمد : Freezing and Freezing point

عندما تبرد السوائل تبريدا كافيا فإنها تتجمد أو تتحول إلى الحالة الصلبة وفي هذه الحالة تقل حرية حركة الجزئيات عنها في الحالة السائلة ولهذا فإن للمواد الصلبة شكل مميز وقابل للإنسياب . ويكون للمواد الصلبة ضغط بخارى منخفض جدا وتعرف درجة التجمد بالدرجة التى يكون عندها الصلب والسائل مكافئ وضع إتزان ويوضح الشكل (٧) تغير الضغط البخارى للماء فى كل من حالتيه الصلبة والسائلة ، عند درجات حرارة مختلفة كما يوضح الشكل قيمة لكل من درجة التجمد ، والغليان العادية عند ضغط واجد جو .



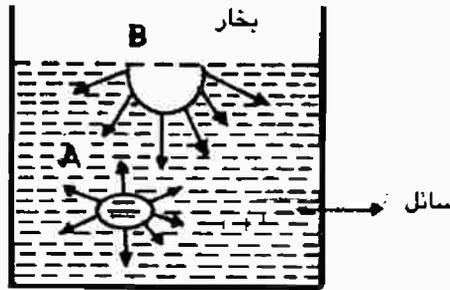
شكل (٧) : تغير الضغط البخارى للماء فى الحالة السائلة والصلبة

وتجدر الإشارة إلى أن درجة تجمد الماء تقل بزيادة الضغط المؤثر ، فعند درجة حرارة الصفر المئوى يشغل المول من H_2O حجما قدره 18.00 cm^3 فى الحالة السائلة ، فى حين تشغل نفس الكمية فى الحالة الصلبة (التليج) حجما قدره 19.63 أى أنه عندما يتجمد الماء يزداد حجمه .

التوتر السطحي ، Surface Tension

إذا نظرنا إلى شكل (٨) نجده عبارة عن سائل في إناء مفتوح فإننا نجد أن جزيء السائل A في قلب الإناء ويتعرض لقوى جذب من جميع الجزيئات المجاورة ، وفي جميع الاتجاهات ، وأن محصلة هذه القوى متزنة ، أما بالنسبة للجزيء B على السطح فإنه يتعرض لقوى جذب غير متساوية محصلتها شدة إلى الداخل وبذلك ، فإن عدد الجزيئات على السطح تقل وبالتالي مساحة السطح تميل إلى أن تكون أقل ما يمكن .

ومحاولة السائل تقليل سطحه هي التي تجعل قطرة السائل كروية الشكل ، إذ أن مساحة الكرة هي أصغر مساحة لحجم معين . ولكي يتمدد السطح لابد من عمل شغل لدفع الجزيئات ضد قوى الجذب الداخلية ناحية السطح والشغل اللازم لزيادة مساحة السطح بمقدار ١ سم^٢ يسمى طاقة السطح الحرة ووحداته دايين / سم ، ويرمز للتوتر السطحي بالرمز γ وهو يساوي عدديا الطاقة السطحية .

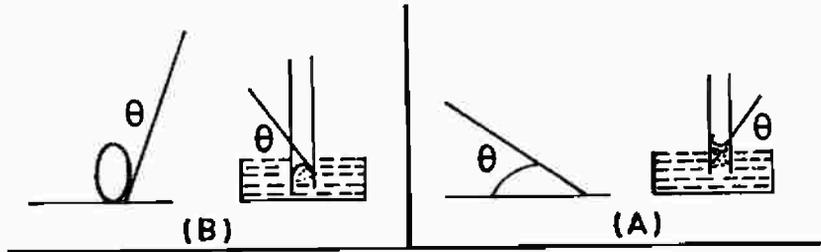


شكل (٨) : التوتر السطحي

ويلاحظ أنه عند وضع سائل على سطح صلب أملس فإن قوتين تؤثران على سلوك هذا السائل هما : قوى الالتصاق ، قوى التماسك والقوة الأولى هي قوى تجاذب بين جزيئات السائل ، وجزيئات المادة الصلبة ، أما القوة الأخرى فهي قوى التجاذب بين جزيئات السائل بعضها ببعض .

وعندما تكون قوى الإلتصاق أكبر من قوة التماسك ينتشر السائل على السطح الصلب وتكون زاوية التماسك بين السائل والصلب أقل من 90° والسوائل التي تعطي هذه الظاهرة تنتشر على السطح الداخلى لأنبوبة زجاجية شعرية وتبلل سطح الصلب كما فى شكل (A ٩) .

أما إذا كانت قوى التماسك أكبر من قوى الإلتصاق فرن زاوية التماس θ تكون أكبر من 90° ويكون شكل (B ٩) وفيه مستوى مثل هذا السائل فى الأنبوبة الشعرية يكون منخفضا عن مستواه خارج الأنبوية الشعرية . وهذه السوائل لا تبلل سطح السطح ، ويقل التوتر السطحي بارتفاع درجة حرارة السائل أو بإذابة مادة مثل الصابون ، الكحولات .



شكل (٩) : ظاهرة التوتر السطحي

قياس التوتر السطحي : Measurement of Surface tension

تلتصق جزيئات سائل كالماء بقوة مع سطح الزجاج فتبلله وتكون النتيجة إنه إذا وضعت أنبوية شعرية رأسيا فى الماء سوف يتكون فيلم رقيق على السطح الداخلى ومساحة هذا الفيلم الرقيق كبيرة جدا بالنسبة لحجم السائل الداخلى فى الأنبوية الشعرية وحيث أن التوتر السطحي يميل إلى تقليل المساحة ، فإنه إما أن تجذب الجزيئات المكونة للفيلم الرقيق إلى أسفل ، وهذا يصعب جدا نظرا لقوى الإلتصاق الكبيرة ، وإما أن يرتفع السائل داخل الأنبوية ليقلل من مساحة الفيلم الرقيق وهذا أسهل وهو يحدث فعلا . ويستمر الإرتفاع حتى تتساوى قوى الشد إلى أسفل نتيجة للجاذبية مع قوى التوتر السطحي والتي تعمل لأعلى .

قوى الجذب لأسفل :

وهذه القوى مقدارها $\pi r^2 h d g$.

حيث : h ارتفاع السائل فى الأنبوبة الشعرية . r : نصف قطرها . d : كثافة السائل ، g عجلة الجاذبية الأرضية .

قوى الشد لأعلى :

وهذه القوة مقدارها $2 \pi r \gamma$

حيث γ هى التوتر السطحي .

وعند الاتزان تتساوى القوتان أى أن :

$$2 \pi r \gamma = \pi r^2 h d g$$

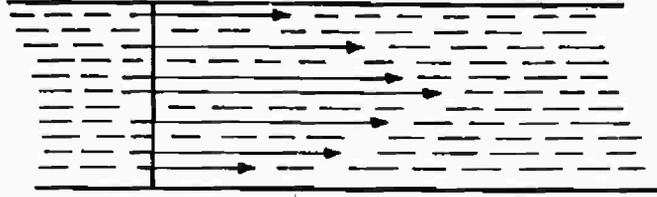
$$\therefore \gamma = \frac{1}{2} r h d g$$

وعندما تكون r بالسـم ، d تكون جم / سم^٣ ، g سم / ثانية^٢ . فإن وحدات التوتر السطحي (γ) هى داين / سم .

اللزوجة ، Viscosity

تبدى جميع السوائل مقاومة معينة للسريان ؛ تختلف من سائل لآخر وتعرف باللزوجة وتظهر اللزوجة نتيجة لقوى الإحتكاك الداخلى فى السائل ، وحيث أنه فى أى سائل توجد قوى جذب التصاقين بين الجزيئات المتعددة ، فإنه عندما تتحرك طبقة أسرع من طبقة أخرى فإنه يسبب قوى التجاذب القوية ، وسوف يحدث إبطاء للطبقة الأسرع ولو نظرنا إلى أنبوبة يسرى بها سائل حيث تكون طبقات السائل فى وسط الأنبوبة كما فى شكل (١٠) أسرع سرياناً من الطبقات الملاصقة لها على الجانبين ، وتقل سرعة السريان كلما إتجهنا من الوسط إلى الجانبين ناحية جدارى الأنبوية أقل ما يمكن بسبب احتكاكهما بالجدارين ، وقد وجد من

التجارب العلمية أن قوى الاحتكاك (F) التي تضاد الحركة النسبية بطبقتين متلاصقتين واللازمة لكي يبقى هناك فرق ثابت من سرعة الطبقتين المتتاليتين يتناسب طرديا مع مساحة سطح التماس بين طبقتي السائل .



شكل (١٠) : اللزوجة

$$F \propto S \dots\dots\dots (1)$$

حيث S هي مساحة سطح التماس .

كما أنها تتناسب مع معدل تغير السرعة .

$$F \propto dV / dx \dots\dots\dots (2)$$

حيث V السرعة . و X المسافة التي تفصل الطبقتين .

بالجمع بين العلاقتين (١) ، (٢) نجد أن : $F \propto S (dV / dX)$

$$\therefore F = \eta S (dV/dX)$$

حيث η ثابت الثابت ويعرف بمعامل اللزوجة .

قوى الاحتكاك = معامل اللزوجة \times مساحة سطح التماس \times (سرعة على مساحة) .

ويمكن بذلك تعريف معامل اللزوجة (أو اللزوجة) كما يلي :

هو القوة بالداين التي تؤثر بين طبقتين متوازيتين من سائل ؛ مساحة مقطع كل منهما

اسم^٢ ؛ ويبعدان عن بعضهما مسافة 1 سم^٢ . لكي تحفظ سرعة سريان إحدى الطبقتين بالنسبة للأخرى بسرعة قدرها 1 سم في الثانية .

ويمكن قياس لزوجة أى سائل باستخدام جهاز الفسكومتر وبمعرفة لزوجة أحد السوائل القياسية يمكن معرفة لزوجة السائل المجهول من خلال المعادلة .

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{d_1 t_1}{d_2 t_2}$$

حيث η تساوى اللزوجة ، d تساوى الكثافة ، t تساوى زمن نزول السائل .

الأسئلة

- ١ - أكتب ما تعرفه عن خاصتى التبخير ، وحرارة التبخير ؟
- ٢ - تكلم عن الضغط البخارى مبينا العوامل التى تتوقف عليها سرعة تحول السائل إلى بخار؟
- ٣ - إشرح بالتفصيل طرق قياس الضغط البخارى . مع الرسم ؟
- ٤ - أكتب مذكرات مختصرة عن :
 - ١ - الغليان ودرجة الغليان .
 - ٢ - التجمد ودرجة التجمد .
- ٥ - إشرح ظاهرة التوتر السطحى ؟
- ٦ - بين كيف يمكن قياس التوتر السطحى لسائل ما ؟
- ٧ - إشرح معنى لزوجة السائل . وكيف يمكن تعيينها ؟