

## كيمياء السطوح

الفصل الأول: التوتر السطحي للسوائل

الفصل الثاني: عمليات الامتزاز

الفصل الثالث: أيسوثرمات الامتزاز

الفصل الرابع: الامتزاز على الأسطح الحرة للسوائل



## الفصل الأول

### التوتر السطحي للسوائل

- ظاهرة التوتر السطحي
- تعريف التوتر السطحي
- حساب قوى التوتر السطحي
- وحدات التوتر السطحي
- تأثير درجة الحرارة على التوتر السطحي
- قوى التماسك والتلاصق وحدوث البلل
- خاصية الأنبوبة الشعرية
- قياس التوتر السطحي لسائل
- أولاً: طريقة ارتفاع السائل في الأنبوبة الشعرية
  - خطوات التجربة
  - طريقة الحسابات
  - التوتر السطحي لسائل موجود مع بخاره
  - أمثلة محلولة
- ثانياً: طريقة وزن النقطة
  - خطوات التجربة
  - طريقة الحسابات
- التوتر بين السطحي (التوتر السطحي البيني)
  - ظواهر مرتبطة بالتوتر السطحي
  - التوتر السطحي ودرجة الحرارة
- 1- معادلة إوتفوس
- 2- معادلة رامساي شيلدنز
- 3- معادلة كاتاياما
- 4- معادلة ماكلويد
- أسئلة ومسائل عامة



## ظاهرة التوتر السطحي

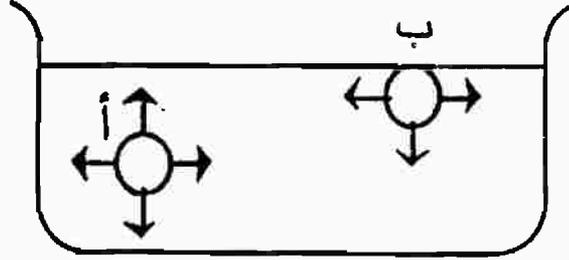
تعد خاصية التوتر السطحي من أهم الظواهر السطحية والتي لها تطبيقات متعددة. فجميع السوائل تقاوم تمدد سطوحها فالقطرة الصغيرة من سائل تميل إلى التشكل بالشكل الكروي؛ لأن نسبة مساحة السطح إلى الحجم في الكرة أقل منها في أي شكل هندسي آخر، فنجد أن مساحة سطح مكعب حجمه (1) سم تساوي (6) سم، بينما مساحة سطح كرة لها نفس الحجم تساوي (4.56) سم. وفي بعض الحالات تكون مقاومة التمدد كبيرة لدرجة أن أشياء كثيفة لا تستطيع اختراق السائل ولكنها تطفو على سطحه. فمن الممكن أن تطفوا أبرة صلب نظيفة أو شاشة معدنية على سطح الماء النقي إذا وضعت بعناية على السطح.

ويمكن تفسير مقاومة سطح السائل للتمدد بأنها ناتجة عن أن الجزيئات الموجودة عند السطح تتعرض لقوى غير متماثلة بين الجزيئات بخلاف الجزيئات الموجودة في داخل السائل، فإنها تتعرض لقوى متماثلة (متوازنة).

ولكى نتفهم ظاهرة التوتر السطحي، نفترض أنه لدينا سائل موضوع في إناء كما هو موضح بالشكل (1-1)، حيث يكون الجزئ (A)؛ والموجود في وسط السائل، محاط بواسطة جزيئات السائل الأخرى في جميع الاتجاهات؛ أي إنه يكون منجذبا في جميع الاتجاهات بالتساوي بواسطة الجزيئات المجاورة. ولكن بالنسبة للجزيئات الموجودة عند السطح، ومنها الجزئ (B)، فإنها تكون واقعة تحت تأثير قوى تجاذب فقط نحو داخل السائل. فنجد أن قوى الجذب الواقعة على الجزئ (B) من الجزيئات المحيطة به يمينا ويسارا، وإلى الأمام والخلف متساوية، ولكن لا يوجد ما يجذب هذا الجزئ إلى أعلى. ولهذا، فإن قوى الجذب الواقعة عليه من الجزيئات التي تقع أسفله لا تجد ما يعادلها من الناحية الأعلى.

وتكون النتيجة انجذاب تلك الجزيئات الموجودة عند السطح إلى الداخل. ونتيجة لتعرض الجزيئات السطحية لكي تتجذب نحو الداخل، فإن المساحة السطحية للسائل

تميل إلى أن تنقص (تقل) حتى الحد الأدنى، مما يؤدي إلى انكماش سطح السائل إلى أقل مساحة ممكنة.



شكل (1-1): جزئ السائل في وسط الإناء وعلى سطح السائل (حدوث توتر السطح).

ويمكن مشاهدة ذلك عند إسقاط قطرة من الماء -مثلا- من قطارة، حيث أن قطرة الماء تكون على هيئة كرة بسبب هذه الظاهرة؛ لأن سطح الكرة هو أقل مساحة بالنسبة لأي حجم من الحجم.

### تعريف التوتر السطحي

ويترتب على ذلك، أنه لزيادة سطح السائل؛ أي زيادة مساحته، ضد قوى الجذب السابقة لابد من بذل قدر من الطاقة؛ والتي تعرف بـ "التوتر السطحي" للسائل. ويعد التوتر السطحي مقياساً لتلك القوى الواقعة على سطح السائل والمتجهة نحو داخل السائل؛ وهي تلك القوة التي يلزم التغلب عليها لكي يتمدد سطح السائل. ويعرف التوتر السطحي لسائل بأنه: "تلك القوة بالداين التي تؤثر بزواوية عمودية على خط طوله 1 سم من سطح السائل".

### حساب قوى التوتر السطحي

نظراً لأن أي سائل لديه القدرة على إنقاص مساحة سطحه، فإنه يلزم عمل شغل ضد ذلك السحب نحو الداخل، بحيث يعمل الشغل بطريقة عكسية للتوتر، مما يعيد الجزيئات إلى السطح مرة أخرى، بحيث تزيد مساحة السطح.

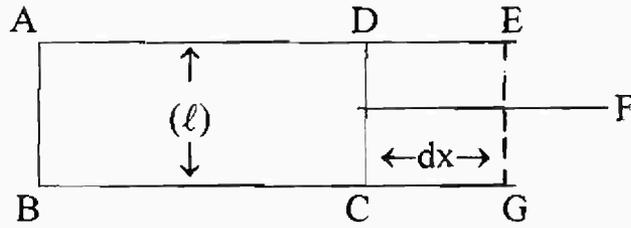
ولكى نتمكن من التوصل إلى تعبير لهذا الشغل، نفرض أنه لدينا غشاء من سائل ممطوط على إطار من سلك على هيئة مستطيل، وبفرض أن أحد جوانب المستطيل قابلاً للتحرك (شكل 2-1) وبفرض أن القوة المؤثرة عمودياً على الجانب المتحرك يرمز لها بالرمز "F"، بحيث تحركه ضد قوى التوتر السطحي. فإذا تحرك هذا الجانب مسافة (dx)، فإن الشغل المبذول (W) يعطى بالعلاقة التالية:

$$W = Fdx \quad (1-1)$$

والزيادة الناتجة في المساحة السطحية ( $\Delta A$ ) للغشاء تعطى بالعلاقة:

$$\Delta A = 2(\ell \cdot dx) \quad (1-2)$$

حيث  $\ell$  : طول الجانب المتحرك، مع ملاحظة وضع المعامل (2)، نظراً لوجود غشائين على جانبي الإطار.



شكل (2-1): تجربة توضح كيفية حساب قوة التوتر السطحي.

وحيث أن القوة "F": المؤثرة تضاد قوى التوتر السطحي ( $\gamma$ ) المؤثرة على الغشاء، فإن

$$F = \gamma \cdot 2\ell \quad (1-3)$$

$$\gamma = \frac{F}{2\ell} = \frac{\text{Force}}{\text{unit length}} \quad (1-4)$$

وبالتعويض عن قيمة "F" من المعادلة (3) في المعادلة (1)، فإننا نحصل على العلاقة التالية:

$$W = \gamma \cdot 2\ell \cdot dx \quad (1-5)$$

$$\therefore W = \gamma \Delta A \quad (1-6)$$

أو

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} = \frac{\text{Work}}{\text{area}} \quad (1-7)$$

وكما هو واضح من المعادلة (3)، يعرف التوتر السطحي بأنه: "تلك القوة بالداين التي تؤثر على وحدة الأطوال من سطح السائل".

وكذلك، فإنه من المعادلة (7)، يمكن أن يعرف التوتر السطحي بأنه: "الشغل بالإرج اللازم لإحداث زيادة في مساحة سطح السائل قدرها وحدة المساحات". أى إنه الشغل اللازم لدفع جزيئات السائل بعيدا ناحية السطح ضد قوى الجذب الداخلية. ولذلك يشار إليها أيضا بـ "الطاقة الحرة لسطح السائل" لكل سم<sup>2</sup> من المساحة.

### وحدات التوتر السطحي

ومن خلال هذين التعريفين، نجد أن وحدات التوتر السطحي هي dyne/cm (داين/سم) فى حالة تعريف التوتر السطحي بأنه القوة. أو هي (erg/cm<sup>2</sup>) (إرج/سم<sup>2</sup>) فى حالة تعريف التوتر السطحي بأنه الشغل.

### تأثير درجة الحرارة على التوتر السطحي

يقال التوتر السطحي لسائل بزيادة درجة الحرارة، حيث أن قوى التجاذب الداخلية للجزيئات تقل، مما يؤدي إلى تحرر الجزيئات.

ويمكن تفسير ذلك، بأنه عند رفع درجة حرارة سائل ما، فإن الطاقة الحركية لجزيئات السائل تزداد، مما يجعلها قادرة على أن تتغلب على قوى التجاذب الواقعة بينها، حيث تبدأ فى الابتعاد بعضها عن بعض مما يؤدي إلى تمدد السائل.

وتعتمد القوى المؤثرة على جزيئات سطح السائل، والتي تجذب هذه الجزيئات إلى الداخل، على عدد جزيئات السائل فى وحدة الحجم. ونظرا لتمدد السائل بالحرارة،

يقال عدد الجزيئات التي تشغل وحدة الحجم. وبذلك تقل قوى الجذب الناتجة من هذه الجزيئات، ويقال معها التوتر السطحي للسائل بارتفاع درجة الحرارة. ويوضح الجدول (1-1)، قيم التوتر السطحي لبعض السوائل عند درجات الحرارة المختلفة، والتي يتضح منها انخفاض التوتر السطحي للسوائل بزيادة درجات الحرارة.

جدول (1-1): قيم التوتر السطحي لبعض السوائل عند درجات الحرارة المختلفة.

التوتر السطحي السائل	$\gamma \cdot 10^{-3}$ (Dynes/cm)			
	0°C	25°C	50°C	75°C
بنزين	31.60	28.20	25.00	21.00
كلورفورم	29.00	26.10	23.10	20.20
كحول إيثيلي	24.00	21.80	19.80	---
نتروفيرن	46.40	43.20	40.20	37.30
ماء	75.64	71.19	67.91	63.50

### قوى التماسك والتلاصق وحبوث الببل

عند وضع سائل على سطح صلب، فإنه تؤثر قوتان على سلوك هذا السائل، وهما: قوى التماسك وقوى التلاصق.

### قوى التماسك

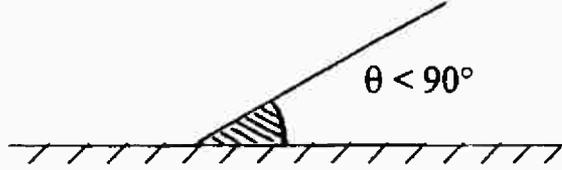
تعرف قوى التماسك بأنها: تلك القوى التي تربط جزيئات السائل بعضها ببعض. وهي تعتمد على قوى التجاذب المتبادلة بين جزيئات المادة الواحدة، وتكون هي المسئولة عن المظهر المتماسك للمادة؛ أي بمعنى إلى أي مدى تكون المادة متماسكة.

## قوى التلاصق

وتعرف قوى التلاصق بأنها: تلك القوى التي تربط جزيئات السائل بسطح الجسم الصلب". وهي تعتمد على التجاذب بين جزيئات مادة وجزيئات مادة أخرى، وتكون مسئولة عن مدى التلاصق بين المادتين.

## ظاهرة البلل

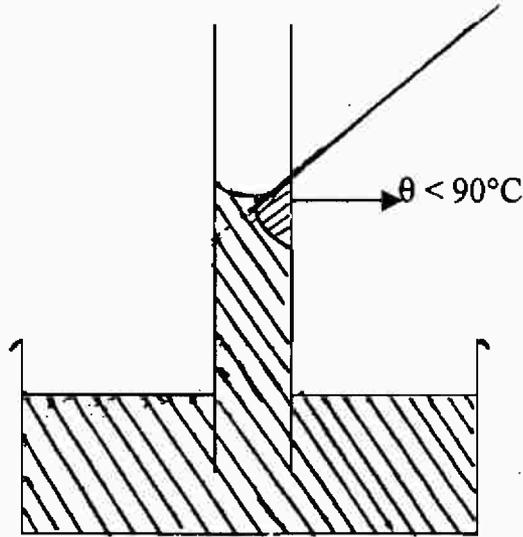
فعندما تكون قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك، فإن السائل ينتشر على سطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (3-1) وتكون زاوية التماس ( $\theta$ ) بين السائل وسطح الصلب أقل من  $90^\circ$  درجة. والسوائل التي تعطى هذه الظاهرة تنتشر على السطح الداخلي لأنبوبة زجاجية شعرية، ويتبلل سطح الصلب.



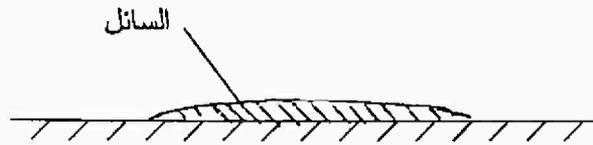
شكل (3-1): زاوية التماس  $\theta$  أقل من  $90^\circ$

فإذا غمست أنبوبة شعرية مفتوحة الطرفين في السائل، وحيث أن قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك وزاوية التماس ( $\theta$ ) في هذه الحالة أصغر من  $90^\circ$  درجة، نلاحظ ارتفاع مستوى السائل داخل الأنبوبة الشعرية عنه خارجها (حيث  $h$  تمثل مقدار ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية). كما هو موضح بالشكل (4-1).

أما إذا كانت زاوية التماس ( $\theta$ ) بين السائل والسطح الصلب تساوي الصفر، فإنه يحدث البلل الكامل، وينتشر السائل انتشاراً تاماً على السطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (5-1).

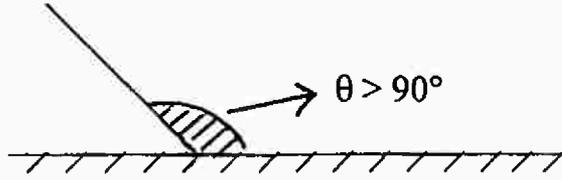


شكل (4-1): يوضح ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية تحت تأثير قوى التوتر السطحي (حيث تكون قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك).

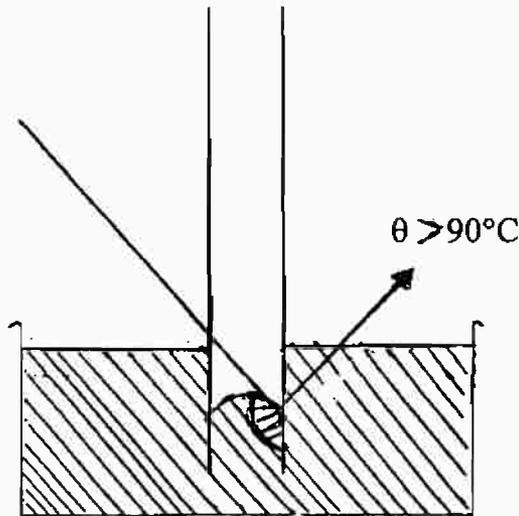


شكل (5-1): زاوية التماس  $(\theta) = 0$  وحدوث (حدوث بلل كامل)

أما إذا كانت قوى التماسك أكبر من قوى التلاصق، فإن السائل لا ينتشر على سطح الصلب، كما هو موضح بالشكل (6-1)، وتكون زاوية التماس بين السائل وسطح الصلب أكبر من  $(90)$  درجة. ويكون مستوى مثل هذا السائل في الأنبوبة الشعرية منخفضاً عن مستواه خارج الأنبوبة الشعرية، كما هو موضح بالشكل (7-1)، حيث تمثل مقدار انخفاض ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية. وفي هذه الحالة، فإن السوائل لا تبلل سطح الصلب.



شكل (6-1): زاوية التماس  $\theta$  أكبر من  $90^\circ$  (لا يحدث البلل)



شكل (7-1): يوضح انخفاض السائل داخل الأنبوية الشعرية تحت تأثير قوى التوتر السطحي حيث لا يحدث بلل (قوى التماسك أكبر من قوى التلاصق).

### خاصية الأنبوية الشعرية

تلتصق جزيئات سائل كالماء بقوة مع سطح الصلب كالزجاج فتبطله (قوى التلاصق أكبر من قوى التماسك). وتكون النتيجة أنه إذا وضعت أنبوية شعرية (دقيقة) رأسياً (عمودياً) في إناء به ماء، فإنه سوف يتكون فيلم رقيق على السطح الداخلي

للأنبوبة. ومساحة هذا الفيلم الرقيق تكون كبيرة جدا بالنسبة لحجم السائل الداخلى فى الأنبوبة الشعرية. وحيث أن التوتر السطحي يميل إلى تقليل المساحة، فإنه إما أن تجذب الجزيئات المكونة للفيلم الرقيق إلى أسفل تحت تأثير قوى الجاذبية الأرضية، وهذا صعب جدا أن يحدث بسبب قوى التلاصق الكبيرة الناشئة بين جزيئات الماء وسطح الزجاج. وإما أن يرتفع الماء داخل الأنبوبة ليقبل من مساحة الفيلم الرقيق. وهذا أسهل وهو ما يحدث بالفعل، أى ارتفاع السائل يتم تحت تأثير قوى التوتر السطحي.

ويستمر ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعرية تحت تأثير قوى التوتر السطحي حتى يصل إلى ارتفاع معين تتساوى عنده قوى الشد إلى أسفل (قوى الجاذبية الأرضية) مع القوى التى تعمل لشد السائل لأعلى (قوى التوتر السطحي)، وعند هذه اللحظة يتوقف ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية.

#### قياس التوتر السطحي لسائل

توجد عدة طرق مختلفة يمكن استخدامها لقياس التوتر السطحي لسائل. وأهم هذه الطرق ماياتى:

- 1- طريقة ارتفاع السائل فى الأنبوبة الشعرية (Capillary rise method).
- 2- طريقة وزن النقطة (drop weight method).
- 3- طريقة الميزان الالتوائى (The torsion balance method).
- 4- طريقة ضغط الفقاعة (Pubble pressure).
- 5- باستخدام جهاز التتسيوميتر (Tensiometer).

وسوف نتناول بعض هذه الطرق بشئ من التفصيل:

أولاً: طريقة ارتفاع السائل في الأنبوبة الشعرية

### خطوات التجربة

يتم تعيين التوتر السطحي لسائل بهذه الطريقة باتباع الخطوات التالية:

- 1- نحضر السائل المراد تعيين التوتر السطحي له ونضعه في إناء (كثافة ذلك السائل "d" تكون معلومة).
- 2- نحضر أنبوبة شعرية مفتوحة الطرفين، ومعلومة نصف القطر (r)، ونغمسها من أحد طرفيها في السائل.
- 3- نلاحظ ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، ويستمر ارتفاع السائل داخل الأنبوبة تحت تأثير قوى التوتر السطحي، كما هو موضح بالشكل (1-8).
- 4- عند ارتفاع معين داخل الأنبوبة الشعرية، يتوقف ارتفاع السائل. وعند هذه النقطة يكون السائل واقع تحت تأثير قوتين متساويتين في المقدار، ومتضادتين في الاتجاه، وهما قوى التوتر السطحي، التي تدفع السائل لأعلى، وقوى الجاذبية الأرضية، التي تشد السائل لأسفل.
- 5- نقيس ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، وليكن "h" سم.

### طريقة الحسابات

عندما يتوقف ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية، فإن السائل يكون واقع تحت تأثير قوتين متساويتين في المقدار ومتضادتين في الاتجاه، وهما: قوى التوتر السطحي، وقوى الجاذبية الأرضية، حيث إن:

$$\begin{aligned} \text{قوى التوتر السطحي} &= 2\pi r \gamma \cos \theta \\ \text{قوى الجاذبية الأرضية} &= \pi r^2 h d g \\ \text{قوى الجاذبية الأرضية} &= \text{قوى التوتر السطحي} \\ 2\pi r \gamma \cos \theta &= \pi r^2 h d g \\ \gamma \cos \theta &= \frac{1}{2} r h d g \end{aligned}$$

وفي حالة ما إذا كانت السوائل تبلل السطح الزجاجي، فإنه يمكن اعتبار أن

$$\theta = 0$$

وبالتالي، فإن:

$$\cos \theta = \cos 0 = 1$$

وتؤول المعادلة السابقة إلى الصورة

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

حيث  $\gamma$  : التوتر السطحي لسائل

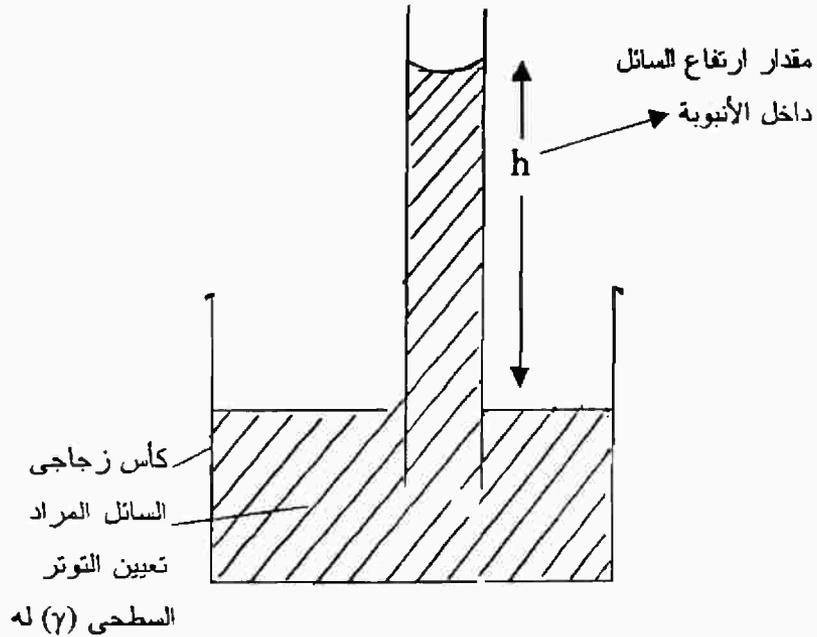
$r$  : نصف قطر الأنبوبة الشعرية

$h$  : ارتفاع السائل داخل الأنبوية.

$d$  : كثافة السائل.

$g$  : عجلة الجاذبية الأرضية.

وهكذا، وبمعلومية قيمة "h" التي تم تعيينها من التجربة، يمكن التعويض في المعادلة السابقة، حيث يمكن تعيين "γ" للسائل.



شكل (8-1): تجربة عملية لقياس التوتر السطحي لسائل عن طريق ارتفاع السائل داخل الأنبوية الشعرية.

### التوتر السطحي لسائل موجود مع بخاره

فى حالة ما إذا كان السائل موجود وبخاره أيضا، فإنه عند قياس التوتر السطحي لذلك السائل، فإن المعادلة المستخدمة وهى:

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

تصبح غير دقيقة لحساب قيمة التوتر السطحي للسائل، وبالنسبة لحسابات دقيقة

لقيمة التوتر السطحي، فإنه يلزم عمل التصحيحين التاليين:

أ- تصحيح بالنسبة لسطح السائل فى الأنبوبة الشعرية:

فيصبح الارتفاع بدلا من  $h$  هو  $(h + r/3)$

ب- تصحيح بالنسبة لكثافة البخار المتجمع فوق السائل:

فتكون كثافة السائل الفعلية هى كثافة السائل  $d_L$  مطروحا منها كثافة بخار

السائل  $d_V$ ، حيث تصبح كثافة السائل الفعلية هى:  $(d_L - d_V)$

وبإجراء هاتين التصحيحين فى المعادلة السابقة، نحصل على الصورة التالية:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left( h + \frac{r}{3} \right) (d_L - d_V) r g$$

أمثلة محلولة

(1) إذا كان نصف قطر أنبوبة شعرية هو (0.0335) سم، وعند غمسها فى سائل

كثافته هى (0.866) جم/سم<sup>3</sup>، ارتفع السائل فى الأنبوبة إلى ارتفاع قدره

(2.0) سم. احسب التوتر السطحي لذلك السائل، علما بأن عجلة الجاذبية الأرضية

هى (981) م/ث<sup>2</sup>.

الحل:

من المعطيات، نجد أن:

$$r = 0.0335 \text{ cm}, \quad d = 0.866 \text{ gm/cm}^3$$

$$h = 2.0 \text{ cm}, \quad g = 981 \text{ ms}^2 \quad \gamma = ?$$

ولحساب التوتر السطحي للسائل، نستخدم العلاقة التالية:

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

وبالتعويض عن القيم المعطاة، في المعادلة السابقة، نحصل على:

$$\gamma = \frac{1}{2} \times 0.0335 \times 2.0 \times 0.866 \times 981$$

$$\gamma = 28.46 \text{ dynes/cm}$$

(2) احسب ارتفاع الماء داخل أنبوبة شعيرية نصف قطرها ( $0.2 \times 10^{-2}$ ) متر عند درجة حرارة ( $30^\circ$ ) درجة مئوية علماً بأن كثافة الماء هي ( $0.996 \times 10^3$ ) جم/سم<sup>3</sup>، والتوتر السطحي للماء هو ( $71.18 \times 10^{-3}$ ) نيوتن/م. والجاذبية الأرضية هي (981) م/ث<sup>2</sup>

الحل:

من المعطيات، نجد أن:

$$h = ?,$$

$$r = 0.2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$d = 0.996 \times 10^3, \text{ gm/cm}^3, \quad g = 981 \text{ m/s}^2, \quad \gamma = 71.18 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

ولحساب ارتفاع الماء داخل الأنبوبة الشعيرية "h"، نستخدم العلاقة التالية:

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

$$h = \frac{2\gamma}{rdg}$$

وبالتعويض عن القيم المعطاة في المعادلة السابقة، نحصل على:

$$h = \frac{2 \times 71.18 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-2} \times 0.996 \times 10^3 \times 981 \times 10^{-2}}$$

$$h = \frac{142.36 \times 10^{-3}}{195.4152 \times 10^{-1}}$$

$$h = 0.7285 \times 10^{-2} \text{ m}$$

(3) إذا كان التوتر السطحي للكورفورم عند (20) درجة مئوية يساوي (16.2) داين/سم، وكانت كثافتا السائل وبخاره عند نفس درجة الحرارة هما: (0.9188) جم/سم<sup>3</sup> و (0.011) جم/سم<sup>2</sup>، على الترتيب. احسب ارتفاع السائل في أنبوبة شعرية نصف قطرها (0.105) مم، علما بأن زاوية التلامس  $\theta$  مساوية للصفر. وعجلة الجاذبية هي (981) م/ث<sup>2</sup>.

الحل:

من المعطيات، نجد أن:

$$\begin{aligned} \gamma &= 16.2 \text{ dynes/cm} & , & & d_L &= 0.9188 \text{ gm/cm}^3 \\ d_v &= 0.011 \text{ gm/cm}^3 & , & & r &= 0.105 \text{ mm} = 0.0105 \text{ cm} \\ h &= ? & , & & g &= 981 \text{ m/sec}^2 \end{aligned}$$

ولحساب ارتفاع السائل داخل الأنبوبة الشعرية (h) ، فإننا نستخدم العلاقة التالية (للسائل وبخاره):

$$\gamma = \frac{1}{2} \left( h + \frac{r}{3} \right) (d_L - d_v) gr$$

وبالتعويض عن القيم المعطاة في المعادلة السابقة، نحصل على:

$$16.2 = \frac{1}{2} \left( h + \frac{0.0105}{3} \right) (0.9188 - 0.0110) 981 \times 0.0105$$

$$\therefore h = 3.46 \text{ cm}$$

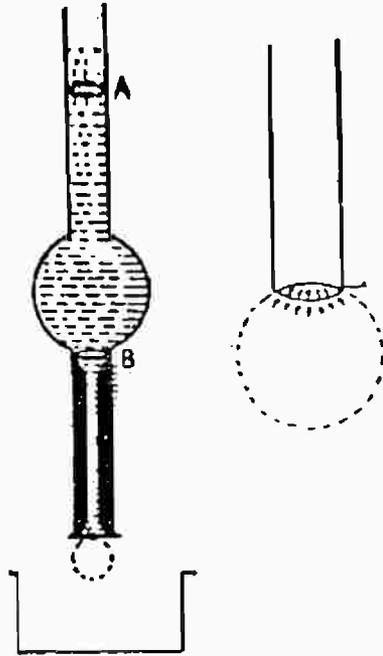
ثانياً: طريقة وزن النقطة

تستخدم هذه الطريقة لتعيين التوتر السطحي لسائل بمعلومية التوتر السطحي لسائل آخر معروف، حيث يعرف هذا السائل المعلوم التوتر السطحي له بـ "السائل المرجع".

ويعرف الجهاز المستخدم لهذا الغرض باسم "الاستالاجموميتر" stalagmometer. وهو عبارة عن أنبوبة شعيرية ذات فقاعة، كما هو موضح بالشكل (9-1).

وفي هذه الطريقة يمكن المقارنة بين قيمتى التوتر السطحي  $\gamma_A$  و  $\gamma_B$  لسائلين مختلفين هما: A، B حيث يمر كل منهما على انفراد عبر نفس الأنبوبة الشعيرية، مع تعيين كتلتى القطرتين  $W_A$  و  $W_B$ . وبناء على ذلك، فإن:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{W_A}{W_B}$$



شكل (9-1): جهاز الاستالاجموميتر (أنبوبة شعيرية ذات فقاعة)

## خطوات التجربة

- 1- نحضر جهاز "الاستلاجوميتتر" (الأنبوبة ذات الفقاعة)، نغسل الأنبوبة ونجففها تماما.
- 2- نحضر السائل (A) المراد تعيين التوتر السطحي له ( $\gamma_A$ )، ونملأ الأنبوبة بهذا السائل (بواسطة) السحب حتى للعلامة "A"، كما هو موضح بالشكل (1-9).
- 3- يسمح للسائل بالسقوط ببطء جدا على هيئة نقط تجمع في زجاجة معلومة الوزن.
- 4- يحصى عدد النقط الساقطة (بمعدل نقطة في كل ثانيتين، ويعين وزنها. ويأخذ متوسط وزن نقطة من السائل (A)، وهو ( $W_A$ ).
- 5- تعاد الخطوات السابقة باستخدام السائل (B) وهو سائل معلوم التوتر السطحي له ( $\gamma_B$ )، حيث يمكن تعيين متوسط وزن نقطة من السائل (B)، وهو ( $W_B$ ).

## طريقة الحسابات

نفرض أن  $n_A$ ،  $n_B$ ، هما أعداد النقط التي تم الحصول عليها من حجمين متساويين من السائلين A و B، وكثافتيهما:  $d_A$ ،  $d_B$  على الترتيب.

يتحدد متوسط وزن النقطة من السائل (A) من العلاقة:

$$W_A = \frac{V}{n_A} d_A$$

وبنفس الطريقة، يتحدد متوسط وزن النقطة من السائل (B) من العلاقة:

$$W_B = \frac{V}{n_B} d_B$$

وحيث أن:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{W_A}{W_B}$$

وبالتعويض عن قيم  $W_B$ ،  $W_A$ ، نحصل على:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{\frac{V}{n_A} \cdot d_A}{\frac{V}{n_B} \cdot d_B}$$

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{d_A n_B}{d_B n_A}$$

وبمعلومية التوتر السطحي للسائل (B)، السائل المرجع، فإنه يمكن تعيين التوتر السطحي للسائل الآخر (A)، وذلك بمعرفة كثافة كل من السائلين  $d_A$ ،  $d_B$  وبمعرفة عدد النقط المتكونة من حجمين متساويين من السائلين،  $n_A$  و  $n_B$  على الترتيب.

**مثال:**

عند تعيين التوتر السطحي لسائل (A)، باستخدام طريقة وزن النقطة باستخدام جهاز الاستالاجموميتر، أعطى السائل (A) (55.0) نقطة، وأعطى نفس الحجم من الماء (السائل B) (25.0) نقطة. فإذا كانت كثافتا السائلين A و B هما: (0.800) و (0.966) جم/سم<sup>3</sup>، على الترتيب، وكان التوتر السطحي للماء (72) دايين/سم.

احسب التوتر السطحي للسائل (A)

**الحل:**

من المعطيات، نجد أن:

$$n_A = 55 \quad , \quad n_B = 25 \quad , \quad d_A = 0.800 \text{ gm/cm}^3$$

$$d_B = 0.996 \text{ gm/cm}^3 \quad , \quad \gamma_A = ? \quad , \quad \gamma_B = 72 \text{ dynes/cm}$$

ولتعيين التوتر السطحي للسائل A، ( $\gamma_A$ )، نستخدم العلاقة:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{d_A n_B}{d_B n_A}$$

وبالتعويض عن القيم المعطاه، فى المعادلة السابقة، نحصل على:

$$\gamma_A = \frac{0.80 \times 25}{72 - 0.996 \times 55}$$

$$\gamma_A = 26.3 \text{ dynes/cm}$$

### التوتر بين السطحي (التوتر السطحي البيني)

يحدث توتر بين سطحي، عندما يتلامس سائلان A، B، عديمى الامتزاج أو محدودى الامتزاج، ويحدث هذا التوتر عند الحد الفاصل بين طبقتى السائلين. ويرمز للتوتر بين السطحي فى هذه الحالة بالرمز ( $\gamma_{AB}$ ).

ويمكن قياس التوتر بين السطحي باستخدام طرق شبيهة جدا بتلك المستخدمة لقياس التوتر السطحي فى حالة السوائل النقية. وعادة ما تكون قيمته وسطا بين قيمتى التوتر السطحي للسائلين  $\gamma_A$ ،  $\gamma_B$ ، ولكنها عادة ما تكون أقل من أى منهما.

فإذا تصورنا أنه يمكن نزع عمود من سائل نقي مساحة مقطعة (1) سم<sup>2</sup> إلى جزئين بعيدا عن بعضهما البعض، فإنه سوف ينشأ سطحان، مساحة مقطع كل منهما هى (1) سم<sup>2</sup>.

وحيث أن التوتر السطحي هو أيضا عبارة عن الشغل اللازم لإحداث وحدة مساحة سطحية، فإن الشغل المبذول فى نزع السائل إلى جزئين بعيدا عن بعضهما، يعطى بالعلاقة:

$$W_C = 2\gamma$$

حيث  $W_C$  هى شغل التماسك بالنسبة للسائل.

وبطريقة مماثلة، فإذا تصورنا عمود سائل مكون من سائلين عديمى الامتزاج أو محدودى الامتزاج، فإن الشغل اللازم لفصل أحد السائلين عن الآخر، والمؤثر ضد قوى التوتر السطحي، كما هو موضح بالشكل (10-1) يعطى بالعلاقة:

$$W_a = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

حيث  $W_a$  هى شغل الالتصاق. وتسمى هذه المعادلة بمعادلة "دوبرية".

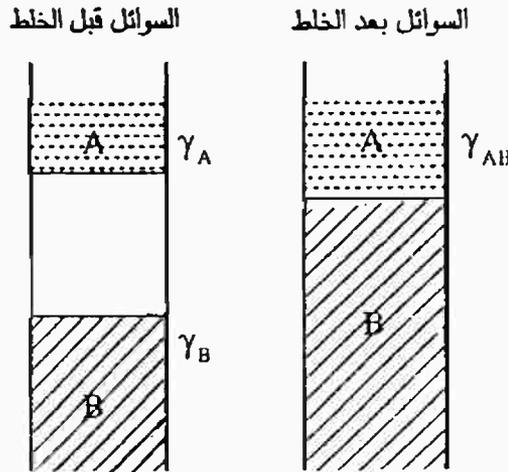
ويمكن من هذين النوعين من الشغل، الحصول على كمية هامة، تعرف  
بـ "معامل الانتشار"، والذي تمثله العلاقة التالية:

$$S_{BA} = W_a - W_{CB}$$

$$= \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

حيث  $S_{BA}$  هي معامل انتشار السائل B على سطح السائل A.  
 $W_{CB}$  هو شغل التماسك في السائل B

وتدل النقيمة المرجبة للمقدار ( $S_{BA}$ ) على أنه إذا وضعت كمية صغيرة من  
السائل (B) على سطح (A)، فإنها سوف تنتشر فوق السطح، مثل انتشار زيت على  
الماء.



شكل (10-1): رسم توضيحي للسوائل قبل وبعد الخلط.

أما إذا كانت ( $S_{BA}$ ) سالبة الإشارة، فإنه سوف لا يحدث لانتشار، ويبقى السائل  
المضاف على هيئة نقطة على السطح.

ظواهر مرتبطة بالتوتر السطحي

يستفاد من ظاهرة التوتر السطحي، وبخاصة في التطبيقات العملية، في الكثير  
من المنتجات الصناعية، ومنها:

- 1- يقلل الصابون من التوتر السطحي البيئي بين الماء والمواد الدهنية أثناء عملية الغسيل، فيسمح للماء بأن يحيط بالمادة الدهنية، ويسهل غسلها.
- 2- تضاف لمعاجين الأسنان والحلاقة بعض المواد التي تقلل التوتر السطحي، فتسمح للمادة الفعالة في المستحضر بالانتشار على السطح المراد معالجته، فيسهل تلامسها به، وتزداد قدرته على التطهير.
- 3- تضاف بعض المواد التي تزيد من التوتر السطحي أثناء معالجة الأقمشة، فيكون لها القدرة على منع بلل (تبلل) الأنسجة. وتستخدم هذه الفكرة في صناعة الأقمشة الخاصة بالمطر، وتسمى (water proof).

### التوتر السطحي ودرجة الحرارة

كما ذكرنا سابقاً، فإن التوتر السطحي لجميع السوائل يقل بزيادة درجة الحرارة، حتى يصل إلى القيمة (صفر) عندما تصل درجة الحرارة إلى الدرجة الحرجة. فعند هذه الدرجة، لا يوجد سطح فاصل بين السائل وبخاره. وقد توصل عدد من العلماء إلى علاقات رياضية تربط بين التوتر السطحي للسائل والتغير الذي يطرأ على درجة الحرارة. وسوف نتعرض لبعض هذه العلاقات، ومنها:

### 1- معادلة إوتفوس Eotvos Equation

أقترح العالم "أوتفوس" في عام 1886م، علاقة رياضية تربط بين التوتر السطحي للسائل والتغير في درجة الحرارة.

فإذا افترضنا أن حجم (I) جم من السائل موجود على هيئة كرة نصف قطرها

(r) سم، هو (V)، وأن مساحة السطح هي (S)، فإن:

$$V \propto r^3$$

أو

$$r \propto V^{1/3}$$

ولكن

$$S \propto r^2$$

$$S \propto (V^{1/3})^2 \propto V^{2/3}$$

فإذا كانت (M) هي الوزن الجزيئي للسائل، و (d) كثافته، فنكون النسبة:

$$\frac{M}{d_L} = MV$$

حيث MV هي الحجم الجزيئي (المولاري) للسائل. ويكون مساحة السطح لهذا الحجم المولاري متناسبا مع  $(MV)^{2/3}$ . وتكون  $\gamma(MV)^{2/3}$  هي طاقة السطح الجزيئية. وقد وجد أوتفوس أن الكمية  $\gamma(MV)^{2/3}$  تقل خطيا مع درجة الحرارة، تبعا للمعادلة التالية:

$$\gamma \left( \frac{M}{d_L} \right)^{2/3} = \gamma(MV)^{2/3} = K(t_c - t)$$

حيث  $\gamma$ : هي التوتر السطحي للسائل عند درجة حرارة "t"

K: مقدار ثابت لايعتمد على درجة الحرارة

M: الحجم الجزيئي.

$d_L$ : كثافة السائل.

$t_c$ : درجة الحرارة الحرجة للسائل.

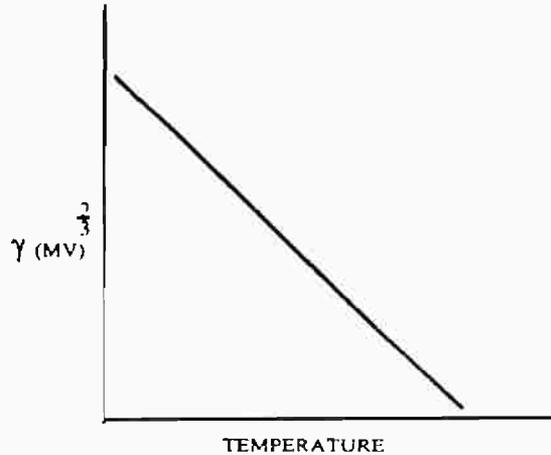
## 2- معادلة رامساي شيلدز Ramsay – Shields equation

اقترح "شيلدز" هذه المعادلة في عام 1893. وهي تعد تطورا لمعادلة

"أوتفوس"، والمعادلة هي:

$$\gamma \left( \frac{M}{d_L} \right)^{2/3} = K (t_c - t - 6)$$

وطبقا لهذه المعادلة، فإن قيمة "γ" تصبح صفرا عند درجة حرارة أدنى (أقل) من الدرجة الحرجة بمقدار (6) درجات. وتصلح هذه المعادلة لكثير من السوائل. ويكون الثابت (K) في المعادلتين السابقتين هو ميل الخط المستقيم للعلاقة بين  $\gamma(MV)^{2/3}$  ودرجة الحرارة (t). وهي معامل درجة الحرارة لطاقة السطح الجزيئية. ويوضح العلاقة السابقة الشكل (11-1).



شكل (11-1): أثر الحرارة على الشد السطحي

### 3- معادلة كاتا ياما Katayama's Equation

تعد هذه المعادلة، صورة معدلة لمعادلة "شيلنز". فقد استبدل كاتا ياما المقدار  $(t_c - 6)$  في معادلة "شيلنز"، واستخدم بدلا منه المقدار "t".  
وحيث أن هذه المعادلة تستخدم في الحالات التي يوجد عندها السائل وبخاره، فقد أجرى تعديلا أيضا على  $(d_L)$  واستبدالها بالمقدار  $(d_L - d_v)$  وأصبحت معادلة "كاتاياما" على الصورة التالية:

$$\gamma \left( \frac{M}{d_L - d_V} \right)^{2/3} = K(t_c - t)$$

حيث  $d_V$  هي كثافة البخار الموجود فوق السائل عند درجة الحرارة  $t$ .

#### 4- معادلة ماكليود Macleod's Equation

توصل "ماكليود" إلى هذه العلاقة في عام 1923م ، وهي تمثل بالمعادلة:

$$\gamma = C(d_L d_V)^4$$

والتي يمكن وضعها على الصورة التالية:

$$\frac{\gamma^{1/4}}{d_L - d_V} = C$$

حيث  $d_L$  كثافة السائل (عند  $t^\circ\text{C}$ ).

$d_V$  كثافة البخار الموجود فوق السائل (عند  $t^\circ\text{C}$ ).

$C$  مقدار ثابت يميز كل سائل، ولكنه لايعتمد على درجة الحرارة.

وتتميز هذه المعادلة بدقة نتائجها بالنسبة للسوائل، سواء كانت متجمعة

الجزئيات أو غير متجمعة، وذلك في مدى كبير من درجات الحرارة.

مثال:

احسب ( $t_c$ ) لثاني أكسيد الكربون، مستخدماً معادلة رامساي، علماً بأنه عند

درجتى (الصففر) و (20) درجة مئوية تكون قيمتى الكثافة هما: (0.927) جم/سم<sup>3</sup>،

و(0.772) جم/سم<sup>3</sup>، كما أن قيمتى التوتر السطحي هما (1.16) داين/سم، و (4.5)

داين/سم.

الحل:

$$\gamma_{273} = 1.16 \text{ dynes/cm}, \quad \gamma_{293} = 4.5 \text{ dynes/cm}$$

$$d_{273} = 0.927 \text{ gm/cm}^3, \quad d_{293} = 0.772 \text{ gm/cm}^3$$

$$M_{\text{CO}_2} = 12 + (2 \times 16) = 12 + 32 = 44$$

بالتعويض عن القيم السابقة في معادلة رامساي:

$$\gamma \left( \frac{M}{d_1} \right)^{2/3} = K (t_c - t - 6)$$

عند 273°K

$$4.5 \left( \frac{44}{0.927} \right)^{2/3} = K(t_c - 279)$$

$$\therefore 140.85 = K(t_c - 279)$$

عند 293°K

$$1.16 \left( \frac{44}{0.772} \right)^{2/3} = K(t_c - 299)$$

$$36.31 = K(t_c - 299)$$

وبأخذ النسبة بين المعادلتين:

$$\frac{140.85}{36.31} = \frac{(t_c - 279)}{(t_c - 299)}$$

$$\therefore t_c = 306^\circ\text{K}$$

$$t_c = 33^\circ\text{C}$$

## أسئلة ومسائل عامة

- 1- "التوتر السطحي .. ظاهرة سطحية" .. اشرح هذه العبارة.
- 2- عرف التوتر السطحي لسائل.
- 3- أذكر وحدات التوتر السطحي
- 4- تكلم عن أثر الحرارة على التوتر السطحي
- 5- عرف كل مما يأتي: قوى التماسك- قوى التلاصق
- 6- عند وضع سائل على سطح صلب، فإنه قد يحدث بلل للسطح وقد لا يحدث بلل. ناقش الظروف التي يحدث عندها البلل والتي لا يحدث عندها البلل مع إعطاء أمثلة.
- 7- اشرح خاصية الأنبوبة الشعرية.
- 8- وضح كيف يمكن استخدام طريقة الأنبوبة الشعرية لقياس التوتر السطحي لسائل.
- 9- اشرح طريقة وزن النقطة لقياس التوتر السطحي لسائل.
- 10- تكلم عن التوتر السطحي البيئي.
- 11- ناقش بعض التطبيقات العملية للاستفادة من ظاهرة التوتر السطحي.
- 12- إلى أي ارتفاع يصعد الماء عند (20) درجة مئوية في أنبوبة نصف قطرها (0.024) سم، وإلى أي مدى يصعد الطولوين في نفس الأنبوبة عند نفس درجة الحرارة إذا كان توتره السطحي عند تلك الدرجة هو (28.4) داین/سم، وكثافته (0.866) جم/سم<sup>3</sup>.
- 13- أحسب التوتر السطحي للأسيتون، إذا ارتفع في أنبوبة شعرية قطرها (0.2 mm) مسافة قدرها (6) سم، علما بأن كثافة الأسيتون (0.792) جم/سم<sup>3</sup>.
- 14- إذا علمت أن التوتر السطحي للطولوين يساوي (24.8) داین/سم عند (20) درجة مئوية، وكثافته عند ذات الدرجة هي (0.866) جم/سم<sup>3</sup>. أحسب نصف قطر الأنبوبة الشعرية التي تسمح للطولوين بالارتفاع مسافة (2) سم.