#### • شاس الكتافة:

يتم قياس الكثافة باستخدام إحدى الأجهزة التالية:

- a) باستخدام البكنومتر (Pycnometer): والذي هو عبارة عن حوجلة زجاجية قياسية تتسع لحجم معين غالباً ( $50cm^3$ ) أو ( $50cm^3$ ). توزن الحوجلة قبل وبعد ملئها بالسائل ويقسم الفرق بين الوزنين على حجم السائل فنحصل على كثافة السائل المقاسة عند درجة حرارة القياس.
- (b) المكثاف العائم (الهيدرومتر العائم: Precision Hydrometer): يعتمد على مبدأ قوة دافعة أرخميدس الذي ينص على أن الأحسام المغمورة كلياً أو جزئياً في سائل ذو كثافة معينة تتلقى قوة من الأسفل تحاول رفعها إلى الأعلى وتساوي إلى وزن السائل المزاح وبتعبير آخر فهي تساوي حجم السائل المزاح (وهو يساوي حجم الجزء المغمور من الجسم) مضروباً بالكثافة وقوة الجاذبية الأرضية ( $F = V \cdot \gamma = V \cdot g \cdot \rho$ ) فإذا كان حجم الهيدرومتر ثابت وقوة الجاذبية الأرضية ثابتة للمكان نفسه فإن مقدار انغماس الهيدرومتر يعود بالدرجة الأولى إلى كثافة السائل، وتحتوي الهيدرومترات على مقاييس حرارة حيث يجب أن يشار عادة إلى درجة الحرارة التي يتم عندها قياس الكثافة.



الشكل (2)، الشكل العام للمكثاف العائم.

c) الأجهزة الحديثة: وتعتمد على انتشار الأمواج داخل السائل (صوتية، اهتزازية...وغيرها).

### قياس لروجة السوائل:

تحدد لزوجة السوائل بالتجربة بواسطة أجهزة تسمى بمقاييس اللزوجة ويسمح مقياس أنكلر للزوجة والمستخدم على نطاق واسع في تحديد قيم لزوجة السائل الاصطلاحية  $[E^{\circ}]$ . ويتحدد بواسطة الجهاز الموضح في الشكل (4) زمن مرور  $(t_f)$  200  $cm^3$  ( $t_f$ ) من السائل الخاضع للتجربة عند درجة الحرارة المعطاة، ومن ثم يتم تحديد

زمن مرور  $(t_w)$  وعندئذ تكون لزوجة السائل بدرجات درجة الحرارة (C) (C)، وعندئذ تكون لزوجة السائل بدرجات اللزوجة الاصطلاحية (أنكلر):

$$\mathbf{E}^{\circ} = \frac{t_f}{t_w} \tag{7}$$

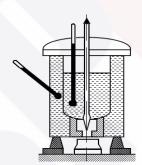
ويتم الانتقال من اللزوجة الاصطلاحية إلى اللزوجة الحركية (الكينماتيكية) المقدرة بواحدة (Stokes) بواسطة استخدام عدة معادلات أهمها:

● قانون فون-ميس:

$$v = 0.0731 \cdot E^{\circ} - \frac{0.0631}{E^{\circ}}$$
 (8)

• قانون فوجل:

$$v = E^{\circ} \times 0.076^{\left[1 - \frac{1}{(E^{\circ})^{3}}\right]}$$
 (9)



الشكل (4)، الرسم التخطيطي لمقياس أنكلر للزوجة.

غالباً مايستخدم جهاز أوستفلد لقياس لزوجة السوائل النيوتونية (Ostwald Viscometer) وهو يعتمد كما في مقياس أنكلر على النسبة بين الزمن الذي يستغرقه تفريغ كمية معينة من السائل إلى الزمن الذي يستغرقه تفريغ الكمية نفسها من الماء.



الشكل (5)، الشكل العام لمقياس أوستفلد.

وعلاوةً على ذلك يتم استخدام الأجهزة التالية بمدف قياس لزوجة السوائل:

#### مقياس اللزوجة ذو الكرة الساقطة:

عندما يسقط حسم صلب تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية خلال وسط سائل فإن الجسم سيتسارع حتى يصل إلى سرعة ثابته تدعى السرعة النهائية أو الحدية (Terminal Velocity)، عند هذه السرعة تكون قوة المقاومة ( $F_2$ ) إضافة إلى قوة الطفو —دافعة أرخميدس— ( $F_1$ ) مساوية للقوة الناتجة عن وزن الكرة ( $F_2$ ).



الشكل (6)، مقياس اللزوجة ذو الكرة الساقطة.

من قانون نيوتن للحركة لدينا:

$$\sum F = m \times a$$

وبالتالي فإن:

weight force – bouyancy force – drag force = 0

1. يحسب وزن الجسم كحاصل جداء الوزن النوعي لمعدن الكرة بحجمها، أي:

$$F = \gamma_b \left( \frac{\pi}{6} \cdot D^3 \right)$$

2. قوة الطفو تساوي وزن السائل المزاح:

$$F_1 = \gamma_f \cdot \mathbf{V}_b = \gamma_f \left( \frac{\pi}{6} \cdot \mathbf{D}^3 \right)$$

حيث إنَّ:

الوزن النوعي للسائل.  $\gamma_f$ 

 $V_{h}$ : حجم الكرة:

D: قطر الكرة.

3. تعطى قوة المقاومة على جسم كروي يتحرك ضمن سائل لزج بسرعة قليلة بالعلاقة التالية:

$$F_2 = 3\pi\mu \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{D}$$

. اللزوجة المطلقة عند درجة حرارة القياس.  $\mu$ 

v: السرعة الحدية للكرة.

D: قطر الكرة.

بالتعويض في المعادلة الأساسية، ينتج:

$$\gamma_b \left(\frac{\pi}{6} \cdot D^3\right) - \gamma_f \left(\frac{\pi}{6} \cdot D^3\right) - 3\pi \mu \cdot \mathbf{v} \cdot D = 0$$

تحدد السرعة (v) بقياس الزمن (t) اللازم لكي تقطع الكرة مسافة (L) محددة على الجهاز بسرعة حدية (V) و يكون:

$$v = \frac{L}{t}$$

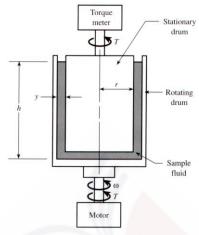
وبالتالي ينتج:

$$\mu = \frac{\left(\gamma_b - \gamma_f\right)D^2 \cdot t}{18L}$$

وعندما يتم تقدير  $(\gamma_b)$  و $(\gamma_b)$  بواحدة  $(N/m^3)$  و $(N/m^3)$  وعندما يتم تقدير  $(\gamma_b)$  بواحدة  $(pa\cdot s)$  وعندما يتم تقدير واحدة قياس اللزوجة هي  $(pa\cdot s)$ 

# • جهاز اللزوجة الدؤار (Rotating Viscometer)

يتألف هذا الجهاز من وعاء دوّار (Rotating Drum) يُحرك بواسطة محرك كهربائي بسرعة ( $\omega$ ) وبداخله إسطوانة مصمتة (Stationary Drum) نصف قطرها ( $\tau$ ) ثابتة ومرتبطة مع مؤشر العزم (Meter) ويملأ الفراغ بين الإسطوانتين بالسائل المراد قياس لزوجته. فعند دوران الإسطوانة الدوّارة بسرعة ( $\omega$ ) فإن السائل الملامس لها يدور بنفس السرعة في حين تكون سرعته عند جدار الإسطوانة الداخلية مساوية للصفر وهذا مايوّلد إجهادات قص ( $\tau$ ) داخل السائل والتي بدورها تؤدي إلى خلق قوة ( $\tau$ ) على سطح الإسطوانة الداخلية وتحركها بحيث يؤشر مؤشر العزم ( $\tau$ ) المربوط بها على ذلك مما يدل على قياس اللزوجة المطلقة ( $\tau$ ) للسائل.



## الشكل (7)، الرسم التخطيطي لجهاز اللزوجة الدوار.

 $\frac{F}{A} = \tau$  هو عبارة عن إجهادات القص (Shear Stress) التي تؤثر على السطح الملامسة له باتجاه مخالف  $\frac{F}{A} = \tau$  الاتجاه المؤثرة (الإسطوانة الدوّارة)، ويعبر ميل منحني السرعة بين الإسطوانتين بتدرج السرعة (الإسطوانة الدوّارة)، ويعبر ميل منحني السرعة بين الإسطوانتين بتدرج السرعة اللزوجة على ألما النسبة بين إجهادات القص إلى تدرج السرعة، أي:

$$\eta = \frac{Shear\ Stress}{Velocity\ Gradient} = \frac{\tau}{v/y}$$

و. كما أن العزم يساوي إلى جداء القوة (F) بنصف القطر (r)، يكون:

$$F = \frac{T}{r} \Rightarrow \tau = \frac{F}{A} = \frac{T}{r \times A}$$

حيث إنَّ A المساحة الجانبية للإسطوانة الثابتة.

$$A = 2\pi rh$$

حيث إنَّ:

r: نصف قطر الإسطوانة الثابتة.

h: h ارتفاع عينة السائل في المقياس.

عندئذٍ يكون:

$$\tau = \frac{\mathrm{T}}{2\pi \, r^2 h}$$

ومن المعروف في الفيزياء أن السرعة الزاوية في أي نقطة من سطح الإسطوانة الدوّارة تعطى بالعلاقة التالية:

$$\mathbf{v} = (r + \mathbf{v}) \cdot \boldsymbol{\omega}$$

أو

 $\mathbf{v} \cong r \times \boldsymbol{\omega}$ 

حيث إنَّ:

y: صغيرة قياساً بنصف القطر (r).

 $\omega$ : السرعة الزاوية، (rad/s).

ومنه يكون:

$$\mu = \frac{\mathbf{T} \cdot \mathbf{y}}{2\pi \, r^3 h \cdot \boldsymbol{\omega}}$$

وبما أن كافة البارامترات في الطرف الأيمن من المعادلة معلومة فإم مؤشر العزم (T) يدل مباشرة على اللزوجة المطلقة بالواحدات التالية:

Parameter	U.S. Customary Units	SI Units
$\mu$	$lb \cdot s / ft^2$	$N \cdot s / mt^2$
T	$lb \cdot ft$	$N \cdot ft$
y	ft	m
r	ft	m
h	ft	m
$\omega$	rad/s	rad/s

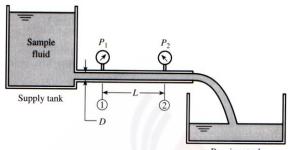
يمثل الشكل (8) جهاز قياس اللزوجة الدوّار مع ملاحظة أن الإسطوانة الدوارة هي الإسطوانة الداخلية وتدعى بالمغزل (Spindle) والخارجية هي الثابته. ويزود كل جهاز بعدد من المغازل بمدف تغطية كافة مجالات اللزوجة.



الشكل (8)، يوضح الشكل العام لمقياس اللزوجة الدوار.

• دقياس اللزوجة ذو الأنبوب الشعري (Capillary Tube Viscometer):

يبين الشكل (9) أنبوب ذو قطر صغير يدعى بالأنبوب الشعري مرتبط إلى خزان تغذية ممتلئ بالسائل المراد قياس لزوجته.



Receiver tank (9)، مقياس اللزوجة ذو الأنبوب الشعرى.

ففي الجريان الخطي فإن السائل يتحرك على شكل صفيحات وتصفه معادلة هاجن-بوازيل (-Hagen) التالية:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \cdot L \cdot \mu} \Delta p \Rightarrow \Delta p = \frac{8 \cdot L \cdot \mu}{\pi R^4} Q$$

و بما أنَّ:

$$Q = \mathbf{v} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{v} \cdot \pi R^2$$

وبالتعويض، تأخذ معادلة بوازيل الشكل التالي:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot L \cdot v \cdot \mu}{R^2} = \frac{8 \cdot L \cdot v \cdot \mu}{\left(D/2\right)^2} = \frac{32 \cdot L \cdot v \cdot \mu}{D^2}$$

حيث إنَّ:

v: سرعة السائل في الأنبوبة، (m/s).

(m) (2) المسافة بين نقطتي القياس (1) و(2)، (m)

(m): القطر الداخلي للأنبوب، (m)

. (  $pa\cdot s$  ) اللزوجة المطلقة عند درجة حرارة القياس،  $\mu$ 

. ( pa ) (2) و (1) لقطعين (1) هبوط الضغط بين المقطعين (2) هبوط :  $\Delta p = p_2 - p_1$ 

يقاس كلَّ من الضغط والسرع بواسطة مقياس الضغط ومقياس التدفق على التوالي وبقياس هاتين القيمتين ومعرفة كل من قيم قطر الأنبوب وطول مسافة القياس يمكن تحديد لزوجة السائل من المعادلة:

$$\mu == \frac{\Delta p \cdot D^2}{32 \cdot L \cdot v}$$