سـريان الموائـع اللانيـوتونيـة

سريان الموائع النيوتونية تعنى أنها يتحكم فى تدفقها أو سريانها قانون نيوتن ، وعامة سلوك أى مادة يتبع إحدى الحالات الثلاثة التالية:

المرونة Elasticity – اللدونة Plasticity – اللزوجة Viscosity

ففى حالة السلوك المرن المثالى يكون الإجهاد (τ) الواقع على جسم ما يتناسب تناسباً طردياً مع الانفعال (γ) والذى يحكمه قانون هوك Hook's Law.

$$\tau = E\gamma \qquad (5\text{-}1)$$

حيث E هو معامل المرونة أو معامل يانج Young Modulus وإذا أثرت قوة ما على مادة صلبة لا ينتج عنها حركة حتى نصل إلى إجهاد الخضوع Yield Stress حيث تكون الحركة لا حدود لها تحت تأثير هذه القوة فيكون ذلك ممثلاً للدونة.

ومعظم المنتجات الغذائية تسلك سلوكاً مختلطاً بين المواد المرنة واللزجة وتختلف فى ذلك عن سلوك المواد (الموائع) النيوتونية بمعنى أن العلاقة التى تحكم تناسب إجهاد القص مع معدل القص علاقة غير خطية تعتمد على كل من الزمن ومعدل التناقص فى سرعة الطبقات على بعضها.

وفى محاولات عديدة وجد أن أنسب علاقة لتمثيل السلوك الغير نيوتونى رياضياً هو استخدام ما يسمى قانون الأس Power Law.

$$\tau = K\gamma^n \qquad (5\text{-}2)$$

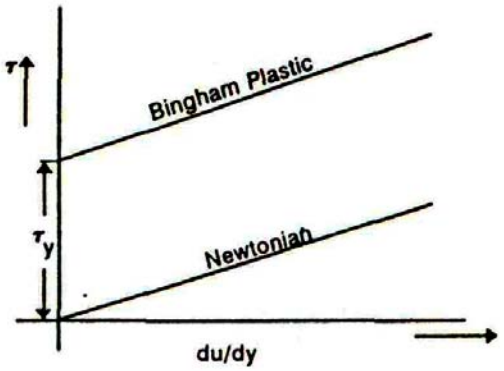
حيث:

K = معامل القوام وهو ما يعادل معامل اللزوجة فى حالة الموائع النيوتونية

n = الأس ويساوى الواحد الصحيح فى حالة الموائع النيوتونية

ويمكن تقسيم الموائع غير النيوتونية إلى ما يأتى:

١- موائع بنجهام بلاستيك Bingham Plastic Fluids

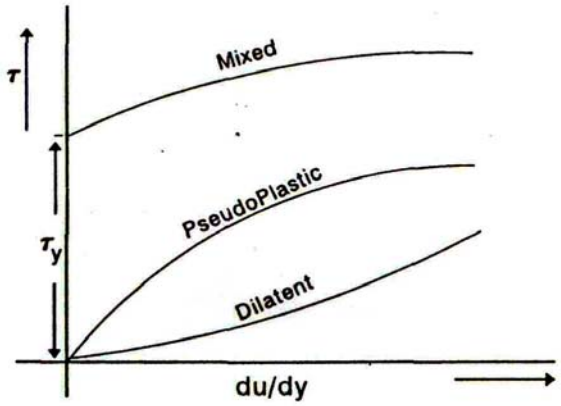


شكل (٥-١) العلاقة بين إجهاد القص ومعدل القص.

وهى مواد لها خاصية عدم البدء فى السريان أو التدفق قبل الوصول إلى إجهاد خضوع Yield Stress وبعدها يكون السريان لزج عادى (شكل ٥-١).

$$\tau = K\left(-\frac{du}{dy}\right) + \tau_y \qquad (5\text{-}3)$$

٢- موائع شبيهة البلاستيك Pseudo Plastic Fluids



شكل (٥-٢) الموائع المختلفة.

وهى تمثل أغلبية السوائل الغير نيوتونية حيث يكون هناك تناقص فى إجهاد القص كلما زاد معدل القص وبذلك تكون قيمة n أقل من الواحد الصحيح ويكون منحنى السريان مقعراً إلى أسفل (شكل ٥-٢).

٣- موائع ديلاتينية Dilatent Fluids

وفيها يكون هناك زيادة فى إجهاد القص كلما زاد معدل القص وتكون قيمة n أكبر من الواحد الصحيح وبذلك يكون منحنى السريان مقعراً إلى أعلى (شكل ٥-٢).

٤- موائع مختلطة Mixed Fluids

وفيها يكون هناك إجهاد خضوع قبل السريان الشبه بلاستيكى كما هو مبين فى الشكل (٢-٥).

ويمكن تمثيلها بالمعادلة الآتية:

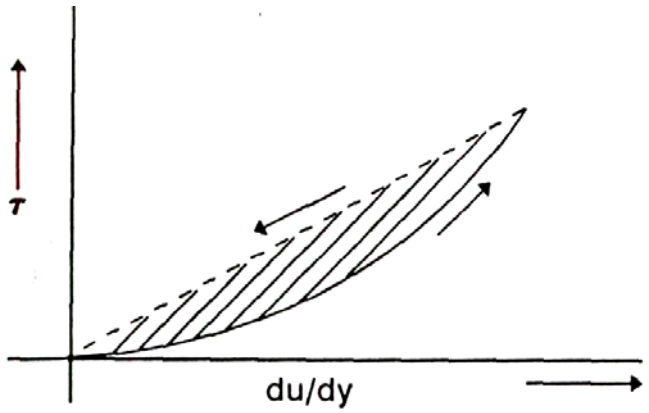
$$\tau = K\left(-\frac{du}{dy}\right)^n + \tau_y \qquad (5\text{-}4)$$

وهى الحالة العامة للموائع المختلطة.

وتكون $n > 1$ ، τ_y = صفر فى حالة المواد شبه بلاستيكية.

وتكون $n < 1$ ، τ_y = صفر فى حالة المواد الديلاتينية.

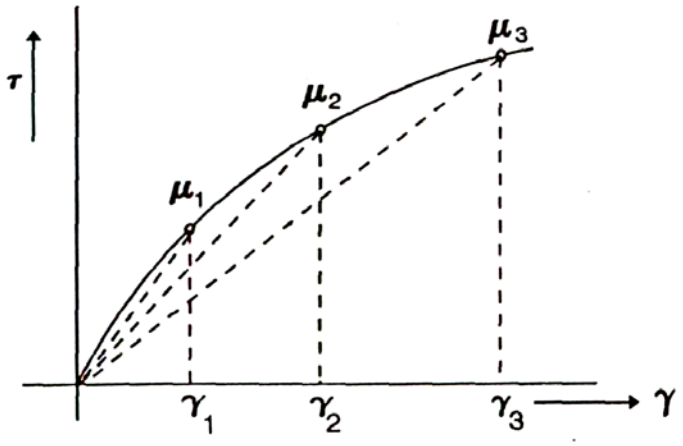
وتنقسم المواد الديلاتينية Dilatent إلى نوعين طبقاً لتغير إجهاد القص بالنسبة للزمن مع معدل القص. فإذا ما زاد إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها موائع متزايدة القوام Rheopectic ، وإذا ما نقص إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها مواد متناقصة القوام Thixotropic وينتج عن ذلك قصور فى طاقة الاحتكاك بين الطبقات Hystresis كما هو مبين فى الشكل (٣-٥).



شكل (٥-٣) طاقة الاحتكاك بين طبقات المائع.

وتتأثر كل من اللزوجة والقوام إلى حد كبير بدرجة الحرارة ويعتبر استخدام معادلة أرهينيوس Arrhenius Equation على نطاق واسع معبراً عن هذه العلاقة حيث يتناسب معامل اللزوجة أو معامل القوام تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة للمائع.

وفى كثير من تطبيقات صناعة الأغذية نجد أن هناك محاولات لقياس اللزوجة النيوتونية دون الحاجة إلى معرفة خصائص انسياب السائل وينتج عن ذلك قياس اللزوجة الظاهرية Apparent Viscosity وهى التى تعبر عن اللزوجة لسائل نيوتونى له مقاومة للسريان عند قص محدد Shear Rate (شكل ٥-٤) وفى أغلب حالات الموائع الشبه بلاستيكية تتناقص اللزوجة الظاهرية عند زيادة معدل القص.



شكل (٤-٥) اللزوجة الظاهرية للمائع.

μA = Apparent Viscosity

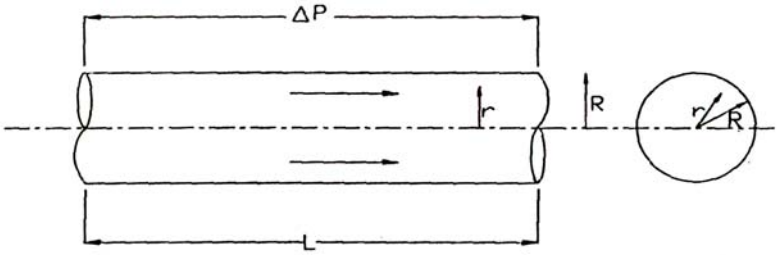
$\mu A = \left(\frac{\tau}{\gamma}\right)$ at a given shcar rate

أجهزة قياس اللزوجة أو القوام:

لقياس اللزوجة أو القوام لأى موائع غذائية يمكن استخدام أجهزة خاصة تسمى فيسكومترات Viscometers أو ريومترات Rheometers . ويوجد عادة جهازين أو طريقتين رئيسيتين: جهاز يعتمد على سريان المائع داخل الأنابيب ويسمى Tube Viscometer ، وجهاز يعتمد على دوران المائع حول اسطوانة ومن خلال فراغ ضيق ويسمى Rotational or Coaxial Viscometer .

النوع الأول:

ريومترات الأنبوبة الشعرية Capillary Tube Rheometers



شكل (٥-٥) ريومترات الأنبوبة الشعرية.

بصفة عامة تتضمن ريومترات الأنبوبة الشعرية عدداً من أجهزة القياس التى تدفع السائل خلال أنبوبة معلوم قياساتها الهندسية شكل (٥-٥). نستطيع الحصول على علاقة بين معدل القص وإجهاد القص وذلك بقياس تدرج الضغط ومعدل السريان الحجمى للمائع خلال الأنبوبة الشعرية.

ويمكن الحصول على العلاقة بين معدل القص وإجهاد القص اللازمة لدفع المائع خلال الأنبوبة الشعرية عن طريق عمل ميزان للقوى على المقطع العرضى للأنبوبة الشعرية.

القوة المسببة للسريان هى فرق الضغط بين طرفى الأنبوبة ΔP

$$\tau = \frac{\Delta P.\pi r^2}{2\pi rL} \qquad (5\text{-}5)$$

حيث: πr^2 = المساحة المقطعية.

$2\pi\, r\, L$ = المساحة السطحية للشريحة.

$$\therefore \tau = \frac{\Delta P.r}{2L}$$

$$\tau = K\gamma^n$$

$$\tau = -K\left(\frac{du}{dr}\right)^n$$

$$\frac{\Delta P.r}{2L} = -K\left(\frac{du}{dr}\right)^n$$

$$-\int_u^o du = \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} . \int_o^r r^{\frac{1}{n}} dr$$

$$\int_o^u du = \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{\frac{n+1}{n}}}{\frac{n+1}{n}}\right]_o^R$$

$$\therefore u = \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1+n}{n}}}{\left(\frac{1+n}{n}\right)}$$

ومعدل السريان الحجمى Q

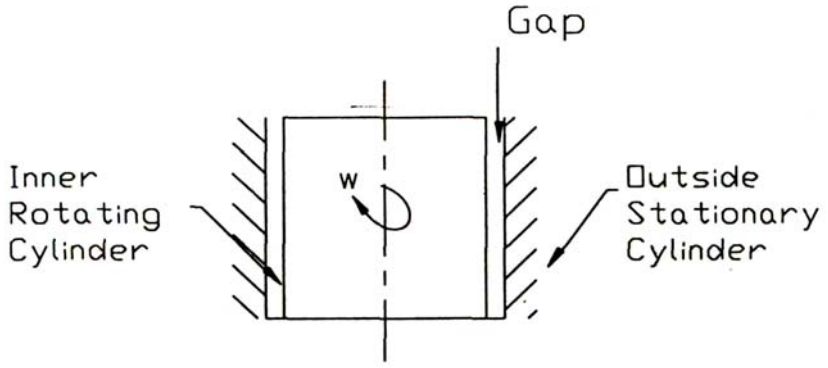
$$Q = \pi R^2 . u$$

$$Q = \pi\left(\frac{n}{n+1}\right) R^{\frac{3n+1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad (5\text{-}7)$$

ويمكن حساب كل من معامل القوام K والأس n وذلك برسم معدل السريان الحجمى Q مع قيمة $\left(\frac{\Delta P}{2L}\right)$ على ورق بيانى لوغاريتمى فيكون ميل الخط المستقيم الناتج هو قيمة الأس n ومقدار الجزء المقطوع مع المحور الرأسى يمكن حساب قيمة معامل القوام K منه.

النوع الثانى:

الريومترات الدورانية المتمركزة Rotational Coaxial Rheometers



شكل (٥-٦) ريومترات الاسطوانة الدورانية.

تستخدم الريومترات الدورانية شكل (٦-٥) لقياس إجهاد القص حيث تتعرض العينة فيها إلى معدل قص منتظم ، وتتم عملية القياس على أساس قياس عزم الدوران اللازم لإدارة الاسطوانة الداخلية عند عدد معلوم من الدوران لكل وحدة زمن ويكون:

$$\Omega = (2\pi.rL).\tau.r \qquad (5\text{-}8)$$

$$\gamma = -r\frac{d\omega}{dr} \qquad (5\text{-}9)$$

ويمكن التعويض فى المعادلة السابقة لأى قيمة log μA والمناظرة لها قيمة log (4π N) ومنها يمكن حساب قيمة معامل القوام K.

$K = 15.5\ Pa.s^n$