

## ویسکوزیته

ویسکوزیته یک سیال ، نشان دهنده اصطکاک داخلی ( بین مولکولی ) آن سیال است . هرچه ویسکوزیته سیال بیشتر باشد ، حرکت دورانی لایه های آن سیال نسبت به هم کند تر است . ویسکوزیته سیال را به طرق مختلف تعریف و بیان میکنند . ویسکوزیته مطلق یا دینامیک و ویسکوزیته سینماتیک یا کینماتیک ( Kinematic Viscosity ) دو بیان بسیار متداول برای ویسکوزیته سیالها میباشند . رابطه این دو، عبارت است از :

ویسکوزیته دینامیک

$$\text{(همگی در دماهای یکسان)} = \frac{\text{ویسکوزیته سینماتیک}}{\text{دانسیته}}$$

ویسکوزیته مطلق یا دینامیک به شرح زیر تعریف میشود :

فرض می کنیم دو لایه مایع به مساحت  $A$  و فاصله  $L$  ، نسبت به هم با اختلاف سرعت  $V$  در یک ثانیه و به طول یک سانتیمتر حرکت کنند . نیروی ( $F$ ) لازم برای این حرکت ، عبارت است از :

$$F = \mu \frac{A \times V}{L} \quad (1)$$

$\mu$  که ضریب تناسب است و به جنس سیال بستگی دارد ، ضریب ویسکوزیته یا به طور خلاصه ویسکوزیته دینامیک

$$\mu = \frac{F \times L}{A \times V} \quad (2) \quad \text{(مطلق) نامیده میشود. از رابطه (1) داریم.}$$

به کمک معادله (2) ، واحدهای ویسکوزیته تعریف میشود. بسته به این که متغیرهای رابطه (2) را تماماً یا فقط بخشی از آنها را به صورت معادلات ابعادی نوشته و واحد های مختلف به کار بریم ، واحد های متفاوتی نیز برای ویسکوزیته به دست می آید .

$$\mu = \frac{F \times L}{L^2 \times LT^{-1}} = \frac{F}{L^2} \times T = \text{زمان} \times \text{فشار}$$

در سیستم SI ، واحد فشار ، پاسکال (Pa) و واحد زمان ، ثانیه (S) است . لذا ، واحد گرانیوی دینامیک : پاسکال - ثانیه ( Pa . S ) میباشد . در عمل ، یک دهم Pa.S را پواز ( Poise ) نامیده و به کار میبرند.

$$(P = \frac{1}{10} \text{ pa} . S)$$

و چون  $P$  واحد بزرگی است ، یکصدم آن را سنتی پواز نامیده و به صورت ، CP نشان میدهند . پس بطور خلاصه واحدهای ویسکوزیته مطلق یا دینامیک عبارتند از :

پاسکال - ثانیه ( Pa.S )

$$P = 0.1 \text{ pa} . S \quad \text{پواز ( یکدهم پاسکال - ثانیه )}$$

$$CP = 0.01 \text{ Pa} . S = 0.001 \text{ m pa} . S$$

سنتی پواز = یکصدم پواز = یک هزارم ( پاسکال - ثانیه ) یا میلی ( پاسکال - ثانیه )

واحد گرانیوی سینماتیک از تقسیم واحد های ویسکوزیته دینامیک بر واحد دانسیته بدست می آیند :

$$\text{Kin. Vis} = \frac{\mu}{d} = \frac{F.L}{A.V.d} = \frac{MLT^{-2}L}{L^2LT^{-1}ML^{-3}} = \frac{L^2}{T}$$

در سیستم SI، واحد طول، متر و واحد زمان، ثانیه است. لذا واحد ویسکوزیته سینماتیک  $m^2/S$  است. در عمل معمولاً واحدی کوچکتر، یعنی  $mm^2 / S$  (که  $1/10^6 m^2/S$  است) را به کار برده و آن را سنتی استوک CST مینامند.

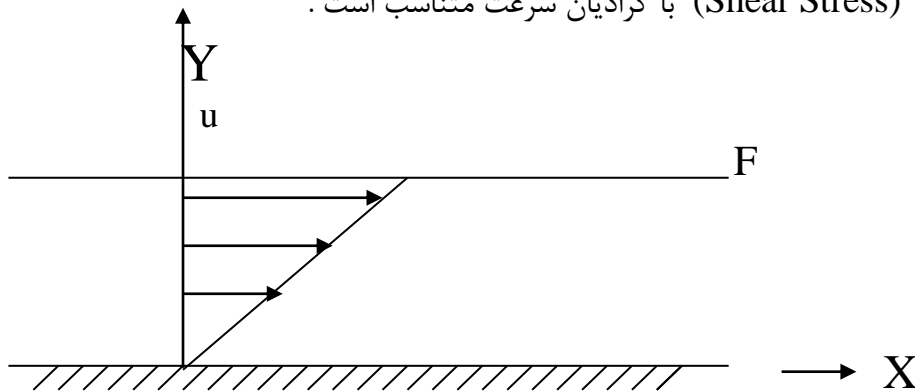
$$1 \text{ CST} = \frac{1CP}{1g/cm^3} \quad (\text{تعیین شده در دمای یکسان})$$

چون اندازه گیری گرانیوی کینماتیک آسانتر و دقیق تر است، بیشتر از این نوع ویسکوزیته استفاده میشود، مگر اینکه نتوان آن را اندازه گرفت. ویسکوزیته کینماتیک معمولاً در لوله های موئینه ای که ویسکومتر نامیده میشوند اندازه گیری میشود. بدین صورت که زمان عبور حجم معینی از سیال بین دو علامت تحت نیروی ثقل زمین، بر حسب ثانیه معین شده و این زمان در ثابت ویسکومتر ضرب شده و ویسکوزیته سینماتیک مستقیماً بر حسب CST در درجه حرارت معین حاصل میشود.

ویسکوزیته مطلق عموماً برای درجات حرارت پایین تر و توسط دیسکهائی که در سیال می چرخند، اندازه گیری میشود. از انواع ویسکومترهایی که میتوان ویسکوزیته مطلق را اندازه گیری کنند میتوان به ویسکومتر رئومات و ویسکومتر بروکفیلد اشاره کرد.

### سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی:

یک لایه از سیال را بین دو صفحه یکی متحرک و دیگری ساکن در نظر میگیریم. نیروی وارده بر صفحه متحرک برابر با  $F$  میباشد. در شرایط پایدار نیروی  $F$  توسط نیروی ویسکوز خنثی میگردد. برای سیال نیوتونی در جریان آرام، تنش برشی  $\tau$  (Shear Stress) با گرادیان سرعت متناسب است.



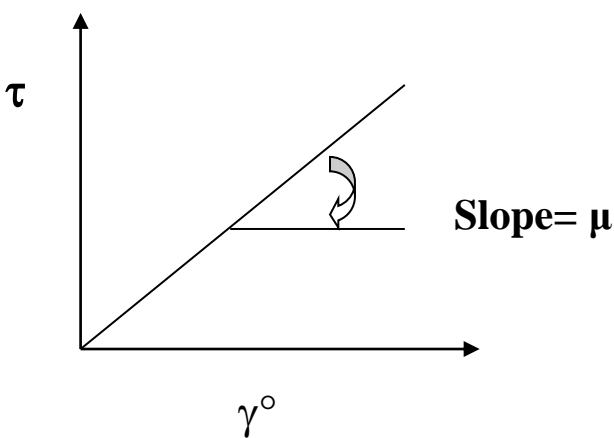
$$\text{Shear Stress} = \frac{F}{A} = \tau \propto \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d}{dy} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \mu \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dy} \right)$$

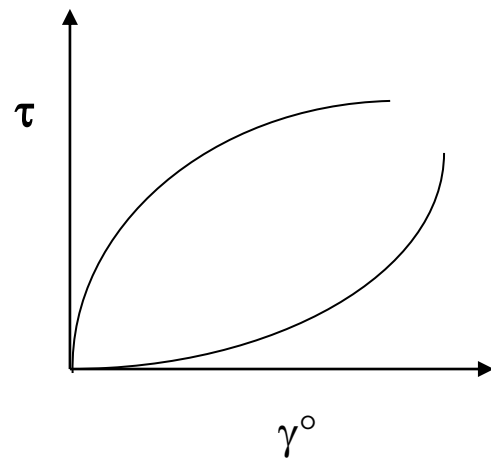
$$\tau = \mu \frac{d}{dt} (\gamma) = \mu \frac{d\gamma}{dt} = \mu \dot{\gamma}$$

که  $\gamma$  کرنش (Strain) و  $\dot{\gamma}$  میزان برش (Shear Rate) نامیده میشوند .  
 در سیالات نیوتونی  $\mu$  ثابت میباشد بدین معنی که اگر تنش برشی  $\tau$  بر حسب میزان برش  $\dot{\gamma}$  رسم گردد  
 یک خط مستقیم بدست می آید که شیب آن  $\mu$  میباشد .

سیالات غیر نیوتونی سیالاتی هستند که منحنی  $\tau$  بر حسب  $\dot{\gamma}$  آنها بصورت غیر خطی است یعنی در واقع ضریب  
 ویسکوزیته  $\mu$  متغیر میباشد . ضریب ویسکوزیته  $\mu$  در یک درجه حرارت و فشار معین به عوامل دیگری همچون  
 میزان برش و در بعضی از سیالات غیر نیوتونی به مدت زمانی که سیال تحت عمل برش قرار گرفته نیز بستگی دارد.



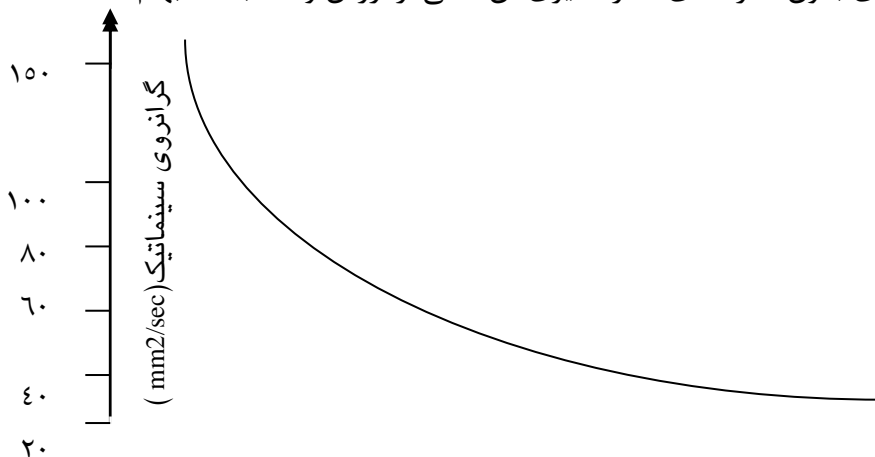
منحنی جریان برای سیالات نیوتونی

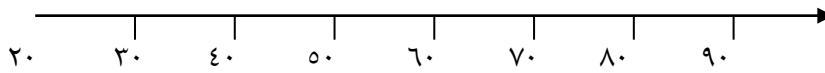


منحنی جریان برای سیالات غیر نیوتونی

### تغییرات ویسکوزیته با درجه حرارت

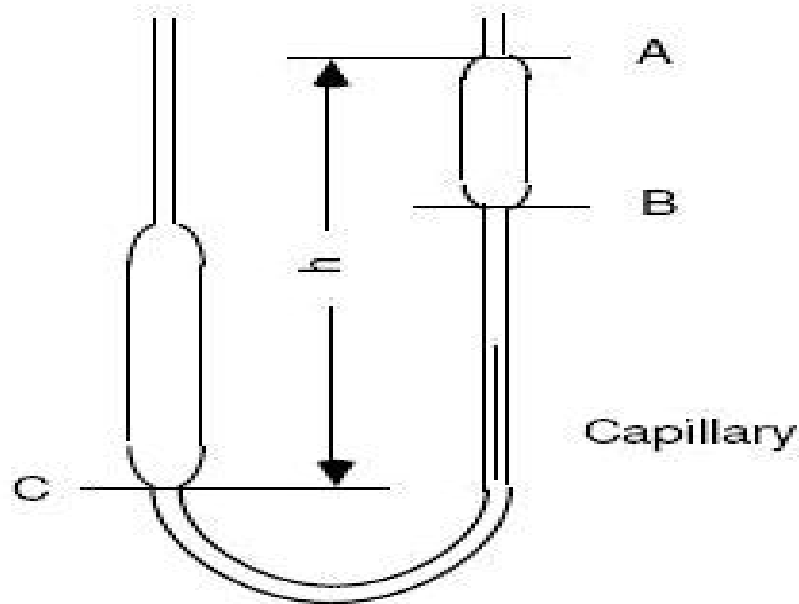
هنگامی که دمای سیال بالا برده میشود و یا فشار وارد بر آنها کاهش داده میشود، کشش بین مولکولی سیال و  
 نتیجتاً گرانشی آنها تقلیل می یابد . این تغییرات گرانشی با دما بر خلاف تغییرات سایر مشخصه های فیزیکی سیال  
 که نسبتاً جزئی و غیر محسوس است کاملاً مشخص و قابل توجه است. به عنوان مثال افزایش دمای روغن از بیست  
 به یکصد درجه سانتیگراد میتواند قدر مطلق گرانشی سینماتیک روغن را به حدود یک سی ام تقلیل دهد . با این  
 لحاظ ذکر قدر مطلق گرانشی بدون ذکر دمای اندازه گیری آن خالی از ارزش و کلاً باعث ابهام است .





### اندازه گیری ویسکوزیته:

برای اندازه گیری ویسکوزیته از یک وسیله شیشه ای که ویسکومتر نامیده میشود ( شکل ۱ ) استفاده میگردد ویسکومتر را از سیال پر میکنند. (حد فاصل نقاط A تا C) به دلیل اختلاف ارتفاعی که بین نقاط C,A وجود دارد سیال از درون لوله موئینه ای که درون ویسکومتر قرار دارد جاری میشود . مدت زمانی که طول میکشد تا سیال از نقطه A به B برسد مبنای اندازه گیری ویسکوزیته میباشد.



اگر فرض شود که انرژی سینتیکی سیال ناچیز بوده ، در این صورت زمان عبور سیال از درون لوله موئینه ، طبق رابطه زیر متناسب با ویسکوزیته محلول میباشد (ویسکوزیته را می توان با دو نماد  $\mu$  و  $\eta$  نشان داد. در روابط زیر از نماد  $\eta$  استفاده شده است )

$$\eta = \frac{\pi r_c \Delta P}{8 V_f L} t = A. \rho . t$$

$r_c$  ، شعاع لوله موئینه،  $V_f$  حجم سیال (حجم بین نقاط A,B)  $\Delta P$  اختلاف فشار و  $L$  طول لوله موئینه میباشد . اگر جاری شدن سیال فقط به واسطه نیروی وزن باشد در این صورت اختلاف فشار در یک لوله به طول  $h$  برابر خواهد بود با  $\Delta P = \rho gh$  و  $\rho$  برابر با دانسیته محلول میباشد . تمام ثابتهای فیزیکی ویسکومتر را به طور خلاصه بصورت یک ثابت ( A ) در نظر گرفته و آن را ثابت ویسکومتر مینامند . با داشتن مقدار ثابت ویسکومتر

( A ) و اندازه گیری زمان جاری شدن محلول و دانسیته آن میتوان مقدار ویسکوزیته محلول را محاسبه کرد . برای بدست آوردن فاکتور ویسکومتر از روغنهای استاندارد با ویسکوزیته مشخص طبق رابطه زیر استفاده میگردد .

$$A = \frac{V}{T}$$

V = ویسکوزیته روغن استاندارد بر حسب سانتی استوک

T = زمان عبور روغن بر حسب ثانیه

برای محاسبه دقیق ویسکوزیته لازم است که اثر انرژی سینتیکی محلول نیز در نظر گرفته شود . در این صورت رابطه ویسکوزیته بصورت زیر تغییر خواهد کرد .

$$\eta = A \rho \left( t - \frac{E}{At^2} \right)$$

که E مقداری ثابت بوده و تابع حجم سیال، طول و قطر لوله موئینه می باشد برای سیالاتی که زمان عبوری بیش از ۱۰۰ ثانیه داشته باشند مقدار انرژی سینتیکی ناچیز بوده و میتوان از آن صرفه نظر کرد .

### انواع ویسکوزیته :

فرض کنید  $\eta$  ویسکوزیته حلال خالص و  $\eta$  ویسکوزیته محلولی شامل حلال ذکر شده و C غلظت حل شونده ( بر حسب  $g dl^{-1}$  ) در محلول باشد .

چند روش مختلف برای مشخص کردن ویسکوزیته محلول وجود دارد این روشها عبارتند از :

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_o} \quad \text{۱- ویسکوزیته نسبی (Relative Viscosity)}$$

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_o}{\eta_o} = \eta_r - 1 \quad \text{۲- ویسکوزیته ویژه (Specific Viscosity)}$$

$$\eta_{red} = \frac{\eta - \eta_o}{\eta_o} \cdot \frac{1}{C} = \frac{\eta_{sp}}{C} \quad \text{۳- ویسکوزیته کاهش یافته (Reduced Viscosity)}$$

$$\eta_i = \frac{\ln \eta_r}{C} \quad \text{۴- ویسکوزیته اینهرنت (Inherent Viscosity)}$$

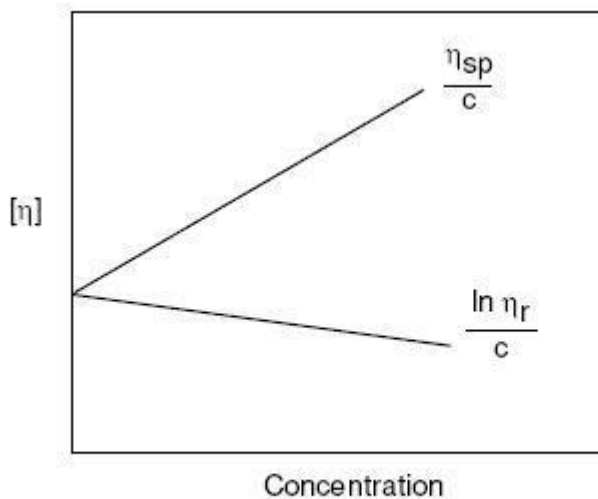
$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{C} \quad \text{۵- ویسکوزیته اینترینزیک (Intrinsic Viscosity)}$$

پارامتر ویسکوزیته ویژه بیان میکند که افزایش ویسکوزیته بواسطه حضور پلیمر در محلول میباشد. نرمالایز کردن  $\eta_{sp}$  با غلظت یعنی  $\eta_{sp}/C$  بیان کننده افزایش ویسکوزیته محلول بر واحد غلظت پلیمر میباشد. با توجه به دیگر خواص محلول پلیمر معمولاً محلولهایی که برای اندازه گیری ویسکوزیته مورد استفاده قرار میگیرند غیر ایده آل بوده و در نتیجه  $\eta_{sp}/C$  به غلظت وابسته خواهد بود. بنا براین تحت شرایط فشار اتمسفر برون یابی  $\eta_{sp}/C$  تا غلظت صفر پارامتر مفیدی خواهد بود. برون یابی  $\eta_{sp}/C$  در غلظت صفر بعنوان ویسکوزیته اینترنیزیک شناخته میشود که در مباحث بعدی از این پارامتر جهت تعیین وزن مولکولی پلیمر استفاده میشود.

همانند  $\eta_{sp}$ ،  $\ln \eta_r$  برای حلال خالص برای صفر بوده و با افزایش غلظت حل شونده افزایش می یابد. بنا بر این  $\ln \eta_r$  دلالت دارد بر این مطلب که افزایش ویسکوزیته بواسطه حضور پلیمر در محلول میباشد. نرمالایز کردن  $\ln \eta_r$  با غلظت یا  $\ln \eta_r / C$  همان ویسکوزیته اینهرنت میباشد. در محدوده غلظت صفر  $\eta_r$  با  $\eta_{sp}/C$  برابر بوده و با برون یابی معادل با ویسکوزیته اینترنیزیک میباشد.

$$\lim_{c \rightarrow 0} \frac{\ln \eta_r}{c} = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\ln (1 + \eta_{sp})}{c} = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta]$$

بنا بر این میتوان ویسکوزیته اینترنیزیک را هم از برون یابی  $\eta_{sp}/C$  و هم از برون یابی  $\eta_i$  تا غلظت صفر بدست آورد.



وقتی که  $c$  برابر صفر نباشد حتی برای محلولهای ایده آل ویسکوزیته ویژه و ویسکوزیته اینهرنت با هم متفاوت خواهند بود. در محلولهای ایده آل  $\eta_{sp}/C$  مستقل از غلظت بوده ولیکن  $\eta_i$  وابسته به غلظت میباشد.

برای بدست آوردن ویسکوزیته اینترینزیک باید  $\eta_{sp}/C$  را تا غلظت صفر برون یابی کرد . ساده ترین روش این است که از یک رابطه خطی برای این منظور استفاده شود یعنی :

$$\eta_{sp}/C = [\eta] + KC$$

آزمایشات نشان می دهد که این رابطه خطی زمانی درست خواهد بود که  $\eta_r$  کمتر از ۲ باشد یا عبارت دیگر برای استفاده از این رابطه باید ویسکوزیته نسبی کمتر از ۲ باشد .

نتایج آزمایشات بیان میکند که شیب منحنی  $\eta_{sp}/C$  بر حسب  $C$  یعنی  $k$  ، به وزن مولکولی پلیمر وابسته میباشد . هوگنس مشخص کرد منحنی تغییرات  $k$  بر حسب  $[\eta]^2$  خطی خواهد بود عبارت دیگر ،

$$k = \frac{\eta_{sp}}{d \left( \frac{\eta_{sp}}{C} \right)} = k' [\eta]^2$$

با جایگزین در رابطه اول ، معادله هوگنس برای محاسبه ویسکوزیته اینترینزیک بدست می آید .

$$\frac{\eta_{sp}}{C} = [\eta] + k'[\eta]^2 C \Rightarrow \eta_{sp} = [\eta]C + k'C^2 [\eta]^2$$

این ثابت جدید ،  $k'$  ، تابعی از نوع پلیمر ، حلال و دمای سیستم بوده ولیکن مستقل از وزن مولکولی پلیمر میباشد . بنابر این با داشتن مقدار  $k'$  و اندازه گیری ویسکوزیته نسبی در یک غلظت مشخص میتوان ویسکوزیته اینترینزیک را محاسبه کرده و از آن متوسط وزن مولکولی را بدست آورد.

اگر  $k'$  مشخص نباشد . با اندازه گیری  $\eta_{sp}/C$  در چندین غلظت و برون یابی خطی تا غلظت صفر مقدار ویسکوزیته اینترینزیک ، محاسبه میشود . روش دیگر برای اندازه گیری ویسکوزیته اینترینزیک برون یابی ویسکوزیته اینپرنرت تا غلظت صفر میباشد . در محدوده غلظت صفر مقدار  $\eta_{sp}$  خیلی کوچک میشود . بنابر این با استفاده از تقریب  $\ln(1+x) \approx x - \frac{x^2}{2}$  (وقتی  $x$  کوچک می باشد ) خواهیم داشت :

$$\frac{\ln \eta_r}{C} \approx \frac{\eta_{sp}}{C} - \frac{\eta_{sp}^2}{2C}$$

با استفاده از معادله هوگنس خواهیم داشت :

$$\frac{\ln \eta_r}{C} \approx [\eta] + k' [\eta]^2 C - \frac{[\eta]^2 C^2}{2} - \frac{K' [\eta]^2 C}{2} - \frac{K'^2 [\eta]^4 C^3}{4}$$

عبارتی با درجه ۲ یا بزرگتر ( برای غلظت) را ناچیز فرض کرده و در نتیجه رابطه بصورت زیر در می آید :

$$\frac{\text{Ln } \eta_r}{C} \approx [\eta] + \left( k' - \frac{1}{2} \right) [\eta]^2 C = [\eta] + k'' [\eta]^2 C$$

بنا بر این منحنی  $\text{Ln } \eta_r / C$  بر حسب  $C$  خطی بوده و شیب آن  $k'' [\eta]^2$  و عرض از مبدا آن  $[\eta]$  میباشد. ثابت جدید ،  $k''$  ، با  $k'$  ، طبق رابطه  $k'' = k' - 1/2$  مرتبط میشود .

پارامترهای  $\eta_{sp}/C$  و  $\text{Ln } \eta_r / C$  و  $[\eta]$  همگی دارای واحد یک بر غلظت میباشند . به دلیل اینکه  $[\eta]^2 C$  دارای واحد  $1/c$  میباشد بنابر این  $k''$  و  $k'$  بدون واحد میباشند . برای اکثر پلیمرها  $k' \approx 1/3$  و  $k'' \approx 1/6$  میباشد . علاوه بر معادله هوگنس برای محاسبه ویسکوزیته اینترنیزیک از معادله بیل مایر ( BILL MEYER ) نیز استفاده میشود .

$$[\eta] = \left( \frac{1}{4} \right) \frac{\eta_{sp}}{C} + \left( \frac{3}{4} \right) \eta_i = \left( \frac{1}{4} \right) \frac{\eta_r - 1}{C} + \left( \frac{3}{4} \right) \left[ \frac{\text{Ln } \eta_r}{C} \right]$$

به مانند معادله هوگنس غلظت  $C$  باید بر حسب  $g/100 \text{ ml}$  بیان شود در این روش غلظت مناسب برای بدست آوردن نتیجه مطلوب در حدود  $0.65 - 0.5 \text{ gr}$  میباشد .

روشی که برای محاسبه ویسکوزیته اینترنیزیک اکریلیک I ارائه گردیده از معادله هوگنس اقتباس شده که در آن  $C=0.2$  و  $k=0.37$  (  $0.2$  گرم پلیمر در  $100$  میلی لیتر حلال DMF )

با جایگذاری مقدار  $C, K$  در معادله هوگنس و حل معادله درجه دوم بر حسب  $[\eta]$  به رابطه زیر میرسیم .

$$[\eta] = \frac{\sqrt{.04 + .0592 (\eta_r - 1.0)} - 0.2}{0.0296}$$

ویسکوزیته اکریلیک ۲ بصورت ویسکوزیته نسبی گزارش می شود . (  $0.5$  گرم پلیمر در  $100$  میلی لیتر حلال DMF ) . برای اندازه گیری ویسکوزیته اینترنیزیک پلی استر میتوان از مخلوط فنل و تترا کلرور اتان بعنوان حلال استفاده کرد. با توجه به معادله هوگنس که در آن  $K=0.35$  و  $C=0.23$  ( برای این حلال ) رابطه زیر برای محاسبه ویسکوزیته اینترنیزیک پلی استر بدست می آید .

$$[\eta] = \frac{\sqrt{1.0 + 1.4 (\eta_r - 1.0)} - 1.0}{0.161}$$



## تعیین وزن مولکولی پلیمر از طریق ویسکوزیته

بسیاری از خصوصیات مهم مکانیکی پلیمرها در ارتباط با وزن مولکولی آنها میباشد. مثلاً قابلیت پلیمر برای تبدیل شدن به نخ تنها در محدوده بسیار معینی از وزن مولکولی آن مسیر خواهد بود و بس. هنگامیکه نخ از مایع یا محلول غلیظی ریسیده میشود، سرعت ریسندگی بستگی خواهد داشت به غلظت محلول یا مایع که آن نیز مرتبط است با غلظت و وزن مولکولی پلیمر. بنابر این توانایی اندازه گیری وزن مولکولی پلیمر در حین فعل و انفعال ضروری و حائز اهمیت میباشد.

ابتدا تصور بر آن بود که ویسکوزیته نسبی یک محلول بسیار رقیق مستقیماً متناسب و مرتبط خواهد بود با وزن مولکولی آن یعنی  $\eta_r = K \cdot M$  بعدها نتیجه دیگری حاصل گردید یعنی  $[\eta] = K \cdot M^X$  نتیجه کارهای دقیق سایر محققان در نهایت منجر به آن گردید که رابطه صحیحتری در این ارتباط بدست آید

$$[\eta] = K \cdot M^X$$

که X مقدار است ثابت بین صفر و یک

مقدار K برای پلیمر و حلال معین مقدار است ثابت

مقدار X مربوط خواهد بود به شکل فضایی مولکول که برای ساختمانهای کروی بزرگ برابر صفر برای مولکولهای پیچ خورده نامنظم خطی بین ۰.۵ تا ۰.۸ و برای مولکولهای سخت خطی ۲ میباشد.

X	$k \cdot 10^5$	حرارت	حلال	پلی مر	ردیف
۰.۹۰	۸.۹۷	۲۵	استون	استات سلولز	۱
۰.۶۶	۵۴	۲۵	بنزن	لاستیک	۲
۰.۷۵	۲۴.۳	۲۵	دی متیل فرم آمید	پلی اکریل نیتریل	۳
۰.۷۰	۶۲	۱۳۵	دکالین	پلی اتیلن	۴
۰.۷۳	۱.۷	۲۵	تولون	پلی متیل متا اکریلیت	۵
۰.۷۲۵	۱۱.۵	۳۰	تولون	پلی استرین	۶
۰.۹۲	۳.۶۲	۲۰	تتراهیدروفوران	پلی وینیل کلرید	۷

بعنوان مثال: برای پلیمر اکریلیک با ویسکوزیته اینترینزیک  $1/45$  جرم مولکولی برابر است با  $108000$

$$[\eta] = 2.43 \cdot 10^{-6} \cdot MW^{0.75} \rightarrow M.W = 108000$$

$$[\eta] = 0.032N^{0.682}$$

برای پلیمر پلی استر ابتدا از رابطه

(درجه پلیمریزاسیون) را محاسبه کرده و سپس از رابطه زیر جرم مولکولی را محاسبه میکنیم.

$$MW = 192.1 N + 62.1$$

## LRV

برای بیان ویسکوزیته محصول پلی استر از پارامتر بنام ویسکوزیته نسبی آزمایشگاهی (Laboratory Relative Viscosity) یا بطور ساده LRV استفاده میشود. این نوع ویسکوزیته همانطور که از نامش مشخص است همان ویسکوزیته نسبی میباشد که در ذیل نحوه بدست آوردن رابطه مربوط به محاسبه LRV تشریح میشود.

$$LRV = \frac{\eta_1 \text{ (محلول)}}{\eta_2 \text{ (حلال)}}$$

طبق تعریف ویسکوزیته نسبی

در این آزمایش منظور از محلول، محلولی شامل ۸ گرم پلیمر محصول پلی استر به همراه ۱۰۰ میلی لیتر HFIP با دانسیته ۱.۶۰۴، میباشد. (ترکیب درصد وزنی - وزنی محلول ۴.۷۵ میباشد) و منظور از حلال، HFIP خالص که ۱۰۰  $\mu\text{ml}$  اسید سولفوریک غلیظ به یک لیتر آن افزوده شده است، میباشد.

$$\eta_1 = A_1 \cdot T_1 \cdot \rho_1 \quad (\rho_1 \text{ دانسیته محلول})$$
$$\eta_2 = A_2 \cdot T_2 \cdot \rho_2 \quad (\rho_2 \text{ دانسیته حلال})$$

چون از دو نوع ویسکومتر مختلف جهت اندازه گیری ویسکوزیته محلول و حلال استفاده میشود پس ثابت ویسکومترها با هم متفاوت بوده و از رابطه حذف نمی شود.

$$LRV = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{A_1 \cdot t_1 \cdot \rho_1}{A_2 \cdot t_1 \cdot \rho_2} = A_1 \cdot T_1 \cdot \frac{\rho_1}{A_2 \cdot T_2 \cdot \rho_2}$$

شرط صحیح بودن مقدار دانسیته محلول این است که درصد وزنی - وزنی محلول ساخته شده جهت اندازه گیری دانسیته برابر ۴.۷۵ باشد. در غیر اینصورت باید از ضریب تصحیح جهت حذف خطاهای موجود (خطا در توزین و انتقال حجم مورد نظر) استفاده گردد. ضریب تصحیح از فرمول زیر محاسبه میشود.

$$Y = -0.3781 (X - 4.75275) + 0.1442 (X - 4.75275)^2 - 0.0655 (X - 4.75275)^3 + 0.99913$$

X = درصد وزنی - وزنی محلول تهیه شده

Y = ضریب تصحیح

$$LRV = A_1 \cdot T_1 \cdot \frac{\rho_1}{A_2 \cdot T_2 \cdot \rho_2} \cdot Y$$

در دستورالعمل تهیه شده جهت محاسبه LRV، A<sub>1</sub> را بعنوان فاکتور ویسکومتر تعریف کرده و آن را با F<sub>0</sub> نشان می‌دهند.

$$\frac{\rho_1}{A_2 \cdot T_2 \cdot \rho_2}$$

را فاکتور حلال تعریف کرده و با F<sub>solvent</sub> نشان می‌دهند. Y را فاکتور غلظت تعریف کرده و آن را با C نشان می‌دهند. بنا بر این خواهیم داشت

$$LRV = T \times F \times C \times F_{SO LVENT}$$

رابطه LRV و ویسکوزیته اینترنیزیک :

-۱

$$1.28 \quad LRV=RV$$

$$\text{Log IV} = -1.1404 + S \text{ Log}$$

Range

	RV	IV
S= 0.6580	15-32	0.-0.43
S= 0.8157- 0.1048 LogRV	32-67.5	0.70-100

-۲

$$\left[ \log \frac{RV}{0.4} \right]^{2.45} = 7.0 [\eta]$$

مقدار ویسکوزیته اینترنیزیک بسته به نوع حلالی که استفاده میشود متفاوت خواهد بود بعنوان مثال اگر از دی کلرواستیک اسید بعنوان حلال استفاده کنیم مقدار IV با زمانی که از HFIP استفاده میکنیم متفاوت است.

$$IV = \eta_{sp} \times 0.667 + 0.1178$$

برای دی کلرو استیک اسید

( برای تهیه محلول پلیمر ، حدود 0.7 گرم از پلیمر را در حجمی معادل ۱۰۰ برابر وزن پلیمر حل میکنند .)