

VİSKOZİTE

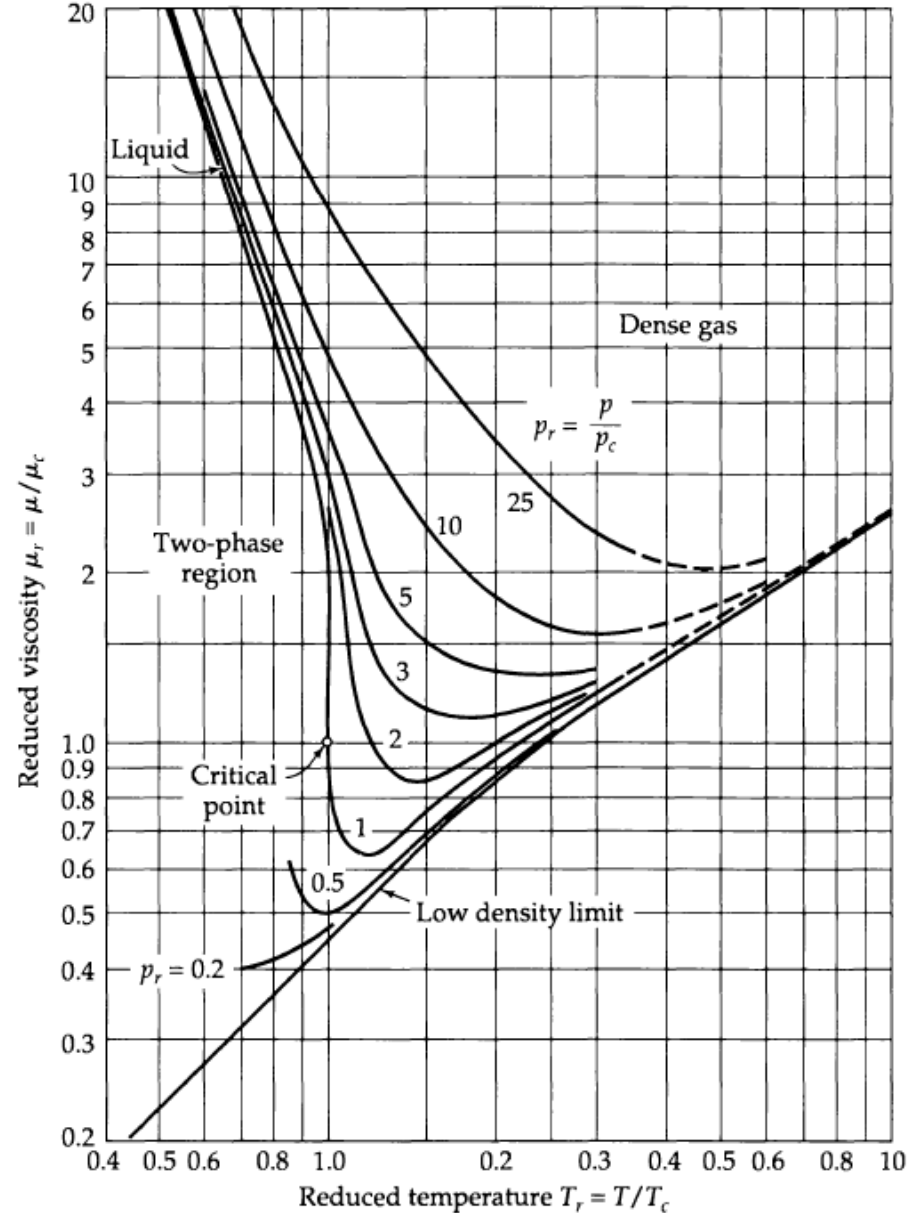
- Malzemelerin viskoziteleri, basit bir sabit olmanın ötesinde çeşitli parametrelerin kompleks bir fonksiyonudur.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

- Malzeme viskozitelerine ihtiyaç duyulduğunda ilk olarak literatürdeki kaynaklardan (*handbooks*) deneysel değerlere bakılır.
 - İhtiyaç duyulan sıcaklık, basınç, kompozisyonda gerçekleştirilmiş deneylerden elde edilmiş olmalıdır.
- Deneysel veri mevcut değilse ve deneysel olarak viskoziteyi ölçmek mümkün değilse viskozite çeşitli teorik ve empirik denklemlerden elde edilebilir.
- Bu denklemler, viskozite değerinin hesaplanmasının yanında, viskozitenin çeşitli parametreler ile nasıl değiştiğini de göstermesi açısından oldukça önemlidir.

VİSKOZİTE

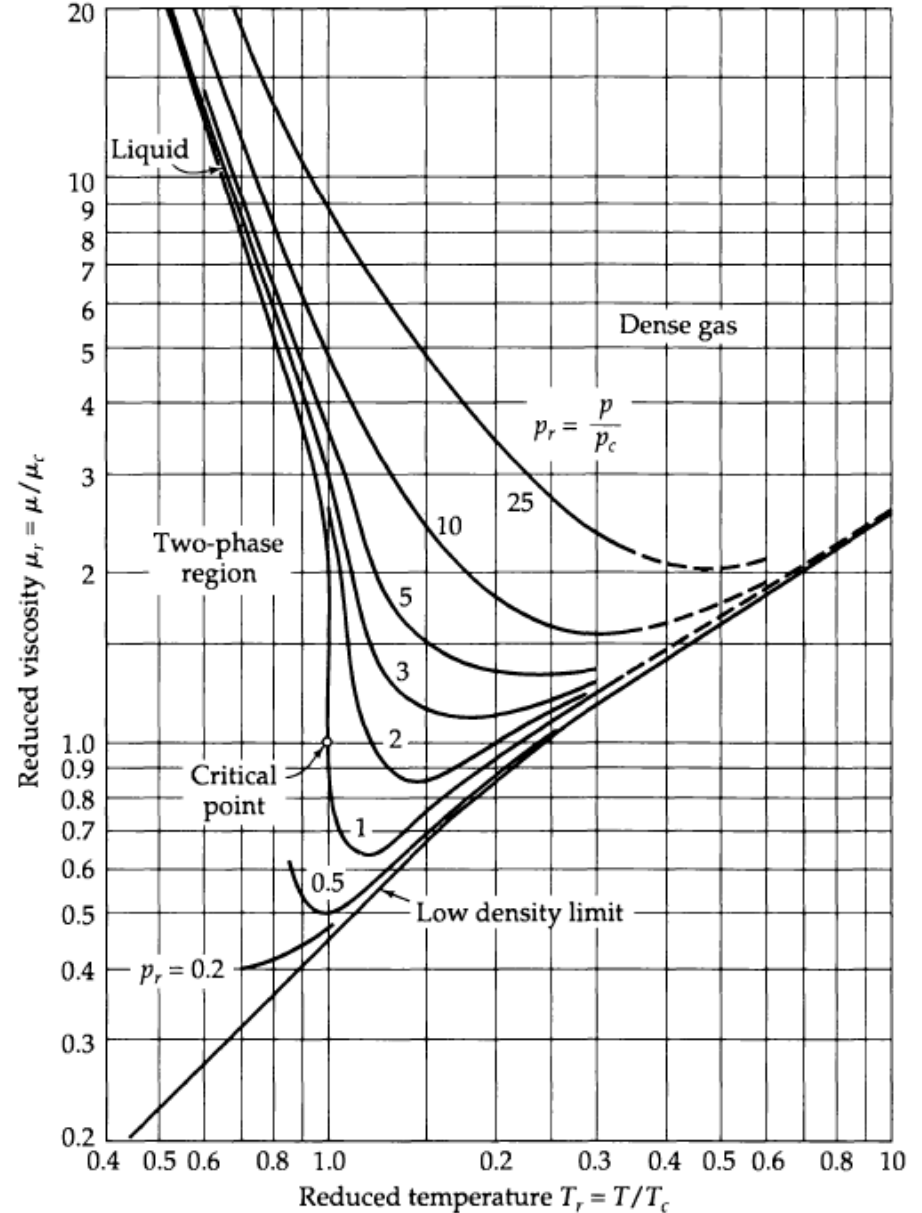
- İndirgenmiş viskoziteler
- İndirgenmiş değerler, ilgili parametrenin değerinin, kritik koşullardaki değerine bölünmesiyle elde edilmektedir.
- $\mu_r = \mu / \mu_c$,
- İndirgenmiş değerler boyutsuzdur.
- Viskozitenin sıcaklık ve basınca göre değişimi hakkında genel bir bakış imkanı tanımaktadır.
- Gazların viskoziteleri, basınç azaldıkça bir limite ulaşmaktadır. Düşük yoğunluk limiti genellikle 1 atm civarında bir basınçta elde edilir.
- Düşük yoğunluktaki bir gazın viskozitesi artan sıcaklıkla artmaktadır.
- Sıvıların viskozitesi ise artan sıcaklıkla azalmaktadır.



VİSKOZİTE

- Bu grafikten viskozitenin bulunması için kritik viskozite, basınç ve sıcaklığın bilinmesi gerekmektedir.
- Kritik viskozite değeri genellikle mevcut değildir. Bu durumda:
- Başka bir koşuldaki viskozite biliniyorsa, kritik viskozite $\mu_c = \mu / \mu_r$ eşitliğinden hesaplanabilir.
- Bu koşulun, aranan viskozitenin bulunduğu koşullara yakın olması tercih edilir.
- Böyle bir viskozite değeri mevcut değilse empirik birtakım ifadeler kullanılır.

$$\mu_c = 61.6(MT_c)^{1/2}(\tilde{V}_c)^{-2/3} \quad \text{and} \quad \mu_c = 7.70M^{1/2}p_c^{2/3}T_c^{-1/6}$$



GAZLARIN VİSKOZİTELERİ

Gazlarda momentum taşınımı , gazların kinetik teorisi kullanılarak açıklanabilir.

- Moleküller arası mesafenin molekül çapında çok daha büyük olduğu (gaz konsantrasyonunun çok düşük olduğu) varsayılır.
- Moleküllerin bilardo topu gibi birbirleri ile sürekli çarpışarak hareket etikleri varsayılır.
- Çarpışma dışında moleküller , herhangi bir kuvvetle birbirlerini etkilemezler .
- Moleküller , birim hacimde eşit olarak dağılmışlardır ve sürekli hareket durumundadırlar
- Molekülleri hızı , bütün doğrultularda , eşittir ve sıfırdan sonsuza kadar değişebilir.
- Buna göre gazların viskozitesi (Leonard-Jones empirik ifadesinden yararlanarak)

M :moleküler ağırlık (g / mol)

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}}$$

η viskozite poises (p)

T sıcaklık $^{\circ}\text{K}$

Ω_n Çarpışma integrali

σ ; Enerjinin sıfır olduğu karakteristik değer , $^{\circ}\text{A}$

Ω_n Gazın atomlarının rijit bir küre olmamasını hesaba katar.

GAZLARIN VİSKOZİTELERİ

Gazlarda momentum taşınımı , gazların kinetik teorisi kullanılarak açıklanabilir.

- Moleküller arası mesafenin molekül çapında çok daha büyük olduğu (gaz konsantrasyonunun çok düşük olduğu) varsayılır.
- Moleküllerin bilardo topu gibi birbirleri ile sürekli çarpışarak hareket etikleri varsayılır.
- Çarpışma dışında moleküller , herhangi bir kuvvetle birbirlerini etkilemezler .
- Moleküller , birim hacimde eşit olarak dağılmışlardır ve sürekli hareket durumundadırlar
- Molekülleri hızı , bütün doğrultularda , eşittir ve sıfırdan sonsuza kadar değişebilir.
- Buna göre gazların viskozitesi (Leonard-Jones empirik ifadesinden yararlanarak)

M :moleküler ağırlık (g / mol)

μ viskozite poises (p)

T sıcaklık $^{\circ}\text{K}$

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}}$$

Ω_{μ} Çarpışma integrali

σ ; Enerjinin sıfır olduğu karakteristik değer , $^{\circ}\text{A}$

Tablolardan moleküle göre elde edilecek parametreler



GAZLARIN VİSKOZİTELERİ

Ör: 200 K ve 1 atm'de CO₂ viskozitesini hesaplayınız.

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

$$M = 44,01 \text{ g/mol}$$

$$\sigma = 3,996 \text{ Å}$$

$$\varepsilon/K = 190 \text{ K}$$

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{44.01T}}{(3.996)^2 \Omega_\mu} = 1.109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

Table E.1 Lennard-Jones (6-12) Potential Parameters and Cr

		Lennard-Jones parameters		
Substance	Molecular Weight <i>M</i>	σ (Å)	ε/k (K)	Ref.
Light elements:				
H ₂	2.016	2.915	38.0	<i>a</i>
He	4.003	2.576	10.2	<i>a</i>
Noble gases:				
Ne	20.183	2.789	35.7	<i>a</i>
Ar	39.948	3.432	122.4	<i>b</i>
Kr	83.80	3.675	170.0	<i>b</i>
Xe	131.30	4.009	234.7	<i>b</i>
Simple polyatomic gases:				
Air	28.97 ⁱ	3.617	97.0	<i>a</i>
N ₂	28.01	3.667	99.8	<i>b</i>
O ₂	32.00	3.433	113.	<i>a</i>
CO	28.01	3.590	110.	<i>a</i>
CO ₂	44.01	3.996	190.	<i>a</i>
NO	30.01	3.470	119.	<i>a</i>
N ₂ O	44.01	3.879	220.	<i>a</i>
SO ₂	64.06	4.026	363.	<i>c</i>
F ₂	38.00	3.653	112.	<i>a</i>
Cl ₂	70.91	4.115	357.	<i>a</i>
Br ₂	159.82	4.268	520.	<i>a</i>
I ₂	253.81	4.982	550.	<i>a</i>

Table E.2 Collision Integrals for Use with the Lennard-Jones (6-12) Potential

$$\begin{aligned} KT/\varepsilon &= T \times (\varepsilon/K)^{-1} \\ &= 200/190 \\ &= 1,053 \\ &= \sim 1,05 \end{aligned}$$

$$\Omega_\mu = 1,554$$

$$\mu = 1,109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

$$\mu = 1,109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{200}}{1,554}$$

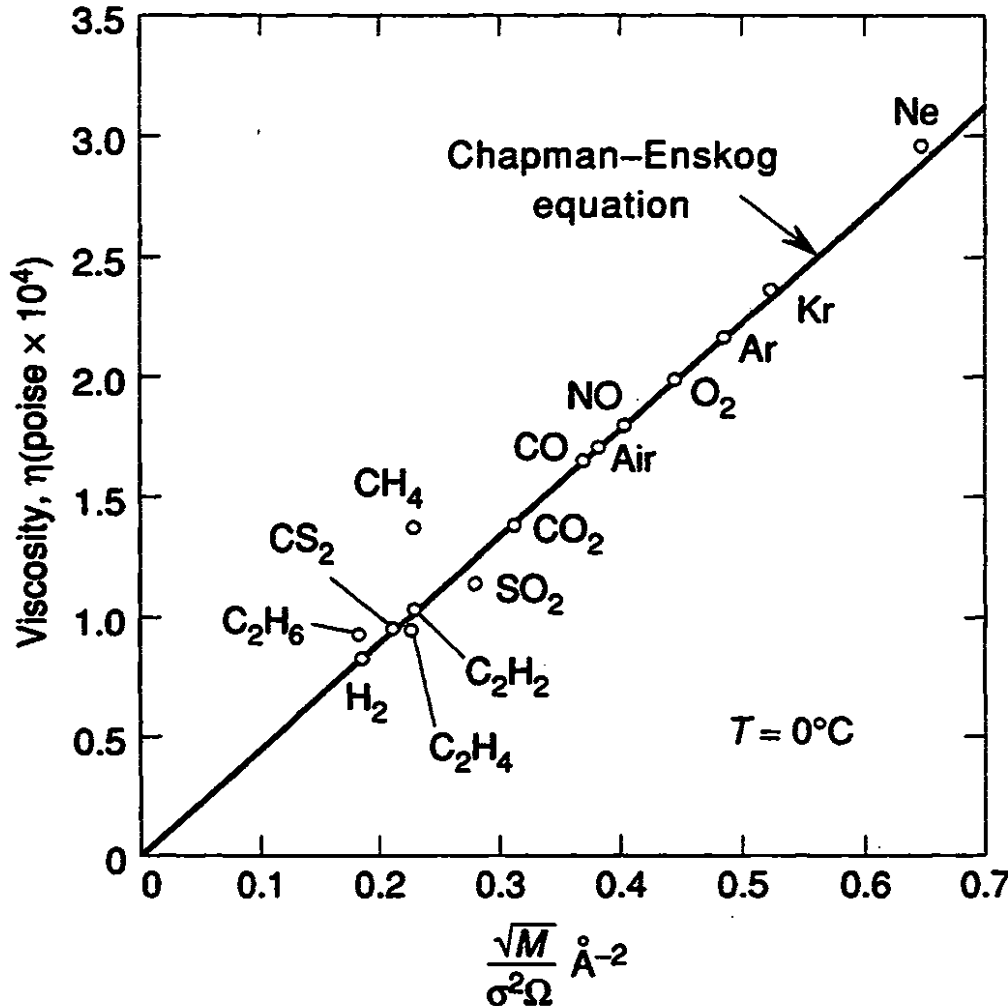
$$\mu = 1,010 \times 10^{-4} \text{ g / cm.s}$$

poises (p)

$\kappa T/\varepsilon$ or $\kappa T/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)
0.30	2.840
0.35	2.676
0.40	2.531
0.45	2.401
0.50	2.284
0.55	2.178
0.60	2.084
0.65	1.999
0.70	1.922
0.75	1.853
0.80	1.790
0.85	1.734
0.90	1.682
0.95	1.636
1.00	1.593
1.05	1.554
1.10	1.518
1.15	1.485
1.20	1.455
1.25	1.427
1.30	1.401
1.35	1.377

GAZLARIN VİSKOZİTELERİ

Deneysel değerler ile kıyas



- Eşitlik tek atomlu gazlar için türetilmiş olmasına rağmen, küresel çok atomlu gazlara da başarıyla uygulanabilmektedir.

FIGURE 2.29. Comparison between the measured and calculated viscosities of several gases.

GAZLARIN VİSKOZİTELERİ

Bazı gazlar için viskozitenin sıcaklık ile değişimi

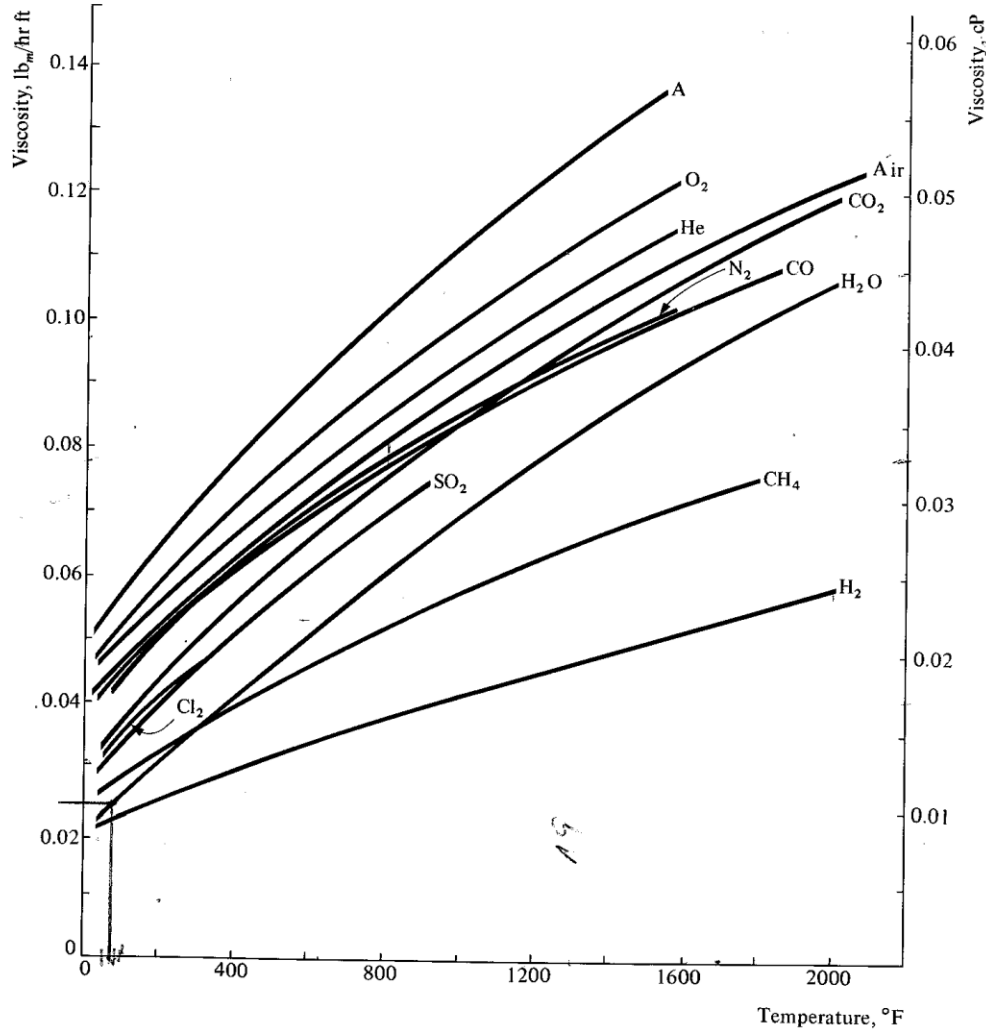


Fig. 1.7 The viscosity of common gases at 1 atm. (Curves drawn from data given in A. Schack, *Industrial Heat Transfer*, sixth edition, Wiley, New York, 1965, and *Handbook of Chemistry and Physics*, 52nd edition, The Chemical Rubber Co., Cleveland, 1971.)

- Veriler 1 atm'de alınmıştır.
- Veriler ~10 atm'e kadar kullanılabilir.
- Gazların viskozitesi sadece gazın molekül ağırlığına bağlı değildir.

SIVILARIN VİSKOZİTELERİ

- Sıvıların viskozitesi ise artan sıcaklıkla azalmaktadır.
- Sıvıların viskozitesi farklı empirik yollarla tahmin edilebilir.
- Bunlardan biri aşağıdaki abak'ın kullanılmasıdır.

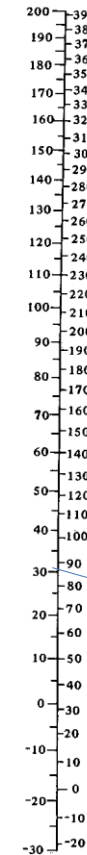
Viscosities of liquids (coordinates for use with Fig. 1.8)

Liquid	x	y	Liquid	x	y
Acetone	14.5	7.2	Nitric acid, 95%	12.8	13.8
Brine, 25% NaCl	10.2	16.6	Nitric acid, 60%	10.8	17.0
Carbon tetrachloride	12.7	13.1	Sodium hydroxide, 50%	3.2	25.8
Fuel oil	6.0	33.7	Sulfuric acid, 100%	8.0	25.1
Hydrochloric acid, 31.5%	13.0	16.6	Titanium tetrachloride	14.4	12.3
Kerosene	10.2	16.9	Water	10.2	13.0
Linseed oil, raw	7.5	27.2			

Ör: Aseton için bu x ve y değerleri; 14.5 ve 7.2 dir.
Abak'ta içi boş daire olarak görülmektedir. 30 °C için viskozite değeri ; 30 °C ile x ,y noktasını birleştirip viskozite eksenini kestirerek bulunur.
Bu değer aseton için $\mu = 0,3$ cP

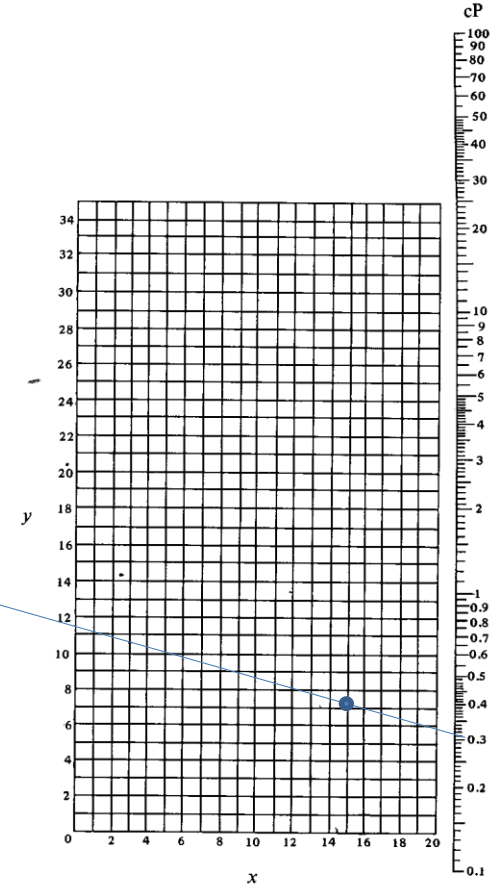
Sıcaklık

°C °F



Viskozite

cP



SIVI METALLERİN VİSKOZİTELERİ

- Ergime sıcaklıklarının üstünde, metallerin birçoğu düşük viskoziteye (<100 cpoise) sahiptir.
- Bu tip sıvılara su gibi akışkan (inviscid) denilmektedir
- Sıvı metallerin viskozitelerini ; Chapman tarafından verilen, viskozite (η) , enerji parametresi (ϵ) , atomlar arası mesafe (δ) arasında geliştirilen aşağıdaki denklemlere göre teorik olarak hesaplamak mümkündür.

$$\eta = \frac{\eta^* (M R T)^{\frac{1}{2}}}{\delta^2 N_0} \quad (1.17)$$

$$T^* = \frac{K_B T}{\epsilon} \quad (1.18)$$

$$V^* = \frac{1}{n \delta^3} \quad (1.19)$$

δ : Atomlar arası mesafe

ϵ : Metale ait enerji parametresi

η : viskozite

N_0 : Avagadro sayısı

M : Moleküler ağırlık

R : Gaz sabiti

T : sıcaklık $^{\circ}\text{K}$

K_B : Boltzman sabiti

n : birim hacimdeki atom sayısı

SIVI METALLERİN VİSKOZİTELERİ

- Önce T^* (indirgenmiş T) hesaplanır

$$T^* = \frac{K_B T}{\epsilon} \quad (1.18)$$

- ϵ/K_B ya tablolardan ya da aşağıdaki denklemden bulunur

$$\frac{\epsilon}{K_B} = 5.20 T_{ergime} \text{ } ^\circ K \quad (1.20)$$

- T^* değerinden yandaki grafikten

$\eta^*(V^*)^2$ değeri bulunur ve buradan

- Ardından V^* hesaplanır

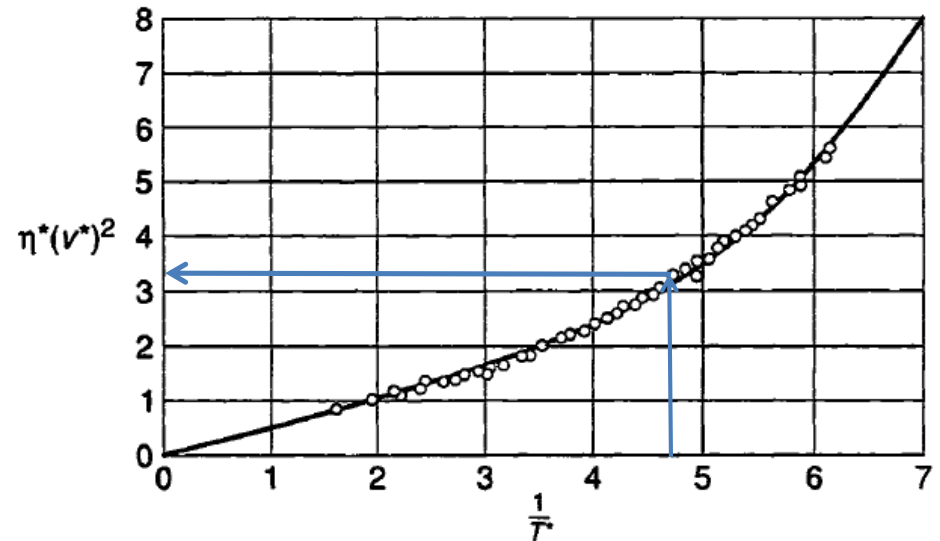
$$V^* = \frac{1}{n \delta^3} \quad (1.19)$$

- $\eta^*(V^*)^2$ ve V^* kullanılarak μ^* hesaplanır

- η aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\eta = \frac{\eta^* (M R T)^{\frac{1}{2}}}{\delta^2 N_0} \quad (1.17)$$

Metal	δ (Å)	ϵ/K_B (K)	Metal	δ (Å)	ϵ/K_B
Na	3.84	1,970 ^a	Rb	5.04	1,600
K	4.76	1,760 ^a	Ag	2.88	6,400
Li	3.14	2,350	Cd	3.04	3,300
Mg	3.20	4,300	In	3.14	2,500
Al	2.86	4,250	Sn	3.16	2,650
Ca	4.02	5,250	Cs	5.40	1,550
Fe	2.52	10,900	Au	2.88	6,750
Co	2.32	9,550	Hg	3.10	1,250
Ni	2.50	9,750	Pb	3.50	2,800
Cu	2.56	6,600	Pu	3.1	5,550
Zn	2.74	4,700			



SIVI METALLERİN VİSKOZİTELERİ

- Örnek: Titanyumun 1850 °C deki viskozitesini tahmin ediniz.

$$T_m = 1941 \text{ } ^\circ\text{K} ; M = 47.9 \text{ g mol}^{-1} ; \text{öz.ağ} = 4.50 \text{ g cm}^{-3} ; \delta = 2.89 \text{ Å}$$

$$\frac{\epsilon}{K_B} = 5.20 T_{\text{ergime}} \text{ } ^\circ\text{K} \quad (1.20)$$

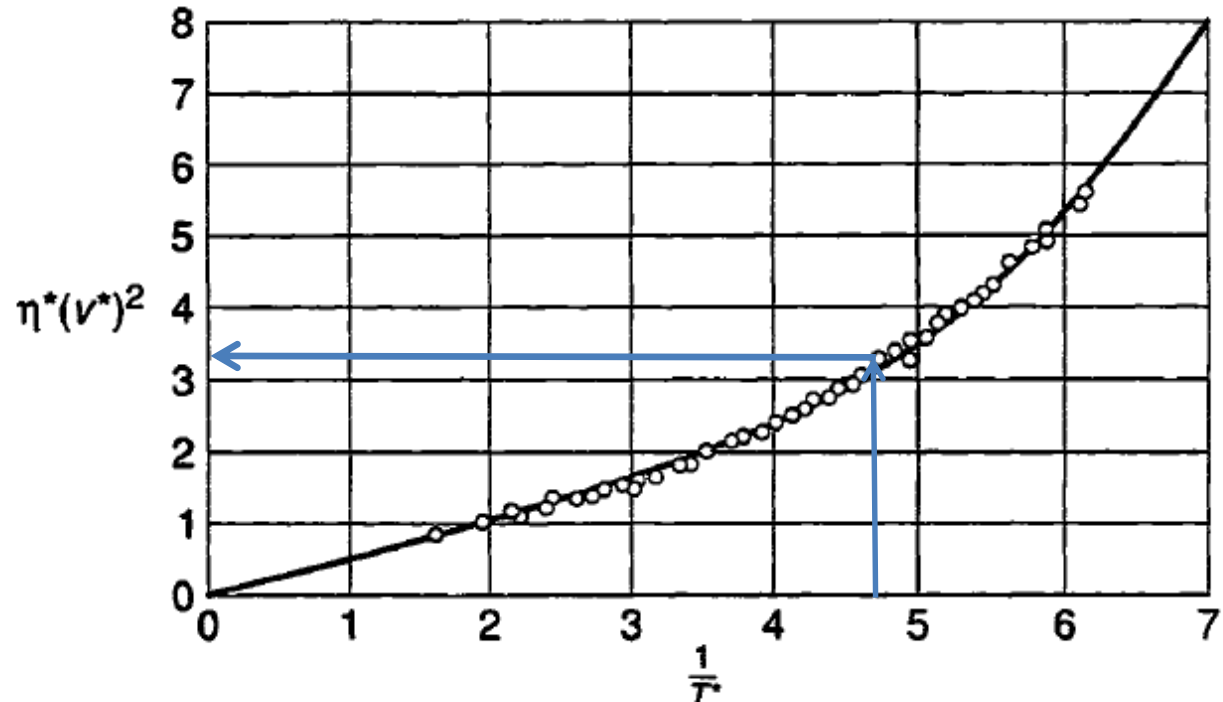
$$\epsilon / K_B = 5,20 \times 1941 = 10093 K$$

$$T^* = \frac{K_B T}{\epsilon}$$

$$T^* = \left(\frac{1}{10093} \right) \times 2123 = 0,210$$

$$1/T^* = 4,76$$

(1.18)



- Grafikten $\eta^*(V^*)^2 = 3,30$ bulunur

SIVI METALLERİN VİSKOZİTELERİ

- Ardından V^* hesaplanır

$$V^* = \frac{1}{n \delta^3} \quad (1.19)$$

n : birim hacimdeki atom sayısı

δ : Atomlar arası mesafe $2,89 \text{ \AA}$

$$V^* = \frac{1}{\left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ atom}}{47.9}\right) \left(\frac{4.5 \text{ g}}{\text{cm}^3}\right) (2.89 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 0.733$$

- $M = 47.9 \text{ g mol}^{-1}$;
- $\rho = 4.50 \text{ g cm}^{-3}$

- $\eta^*(V^*)^2 = 3,30$ ve V^* kullanılarak μ^* hesaplanır

$$\eta^* = \frac{3,3}{0,733^2} = 6,14$$

- η aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

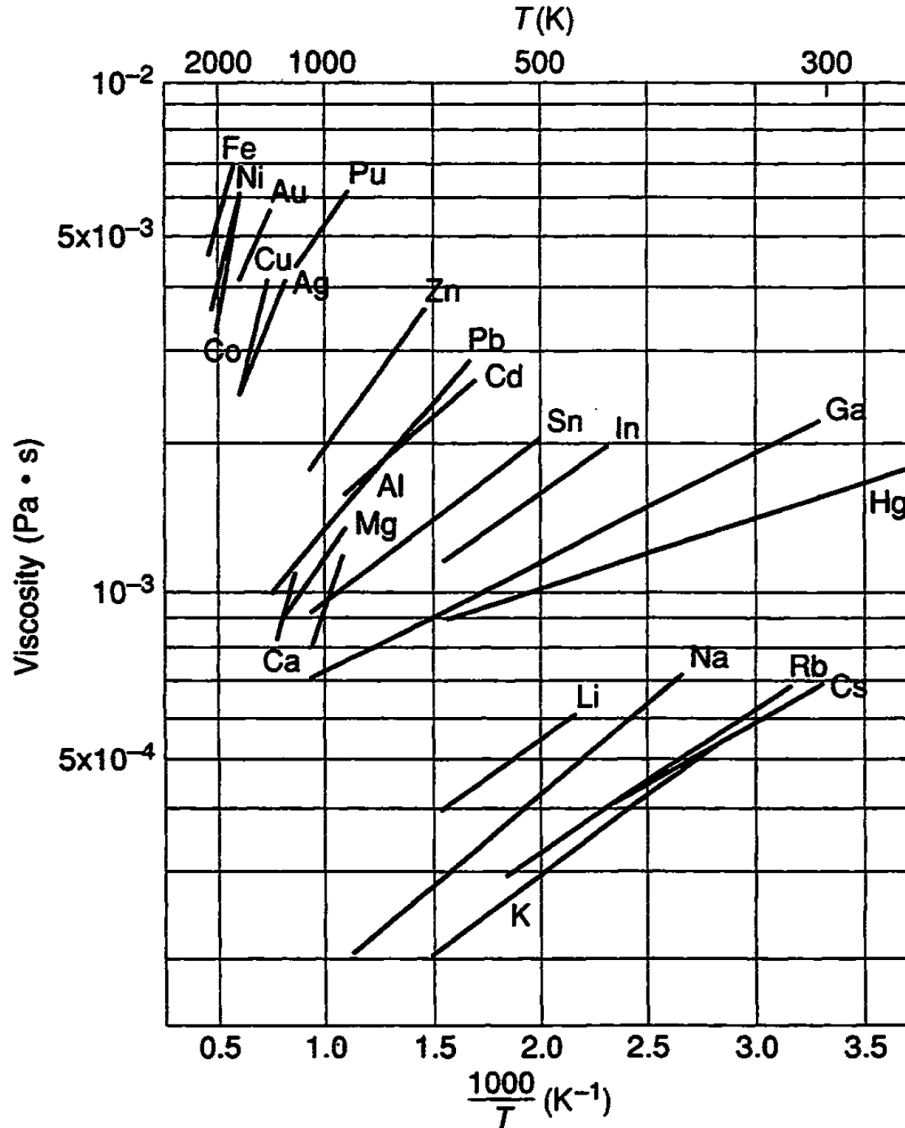
$$\eta = \frac{\eta^* (M R T)^{\frac{1}{2}}}{\delta^2 N_0} \quad (1.17)$$

$$R = 8,314 \text{ J / K.mol}$$

$$\eta = \frac{6,14 \times ((47,9 \text{ g / mol}) \times (8,314 \times 10^7 \text{ g cm}^2 / \text{K mol s}^2) \times (2123 \text{ K}))^{1/2}}{(2,89 \times 10^{-8} \text{ cm})^2 (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})} = 0,0355 \text{ g / cm.s} = 0,0355 \text{ poise} = 3,5 \text{ cP}$$

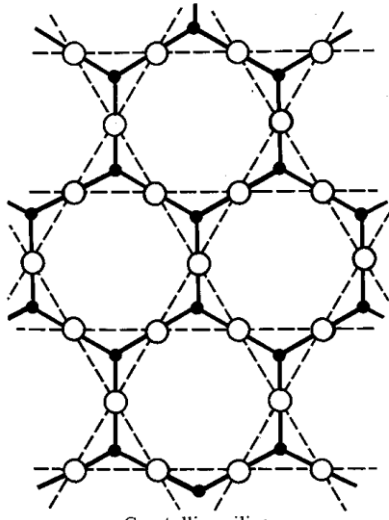
SIVI METALLERİN VİSKOZİTELERİ

- Sıvı Metallerin viskoziteleri aşağıdaki grafikten de yaklaşık olarak tahmin edilebilir

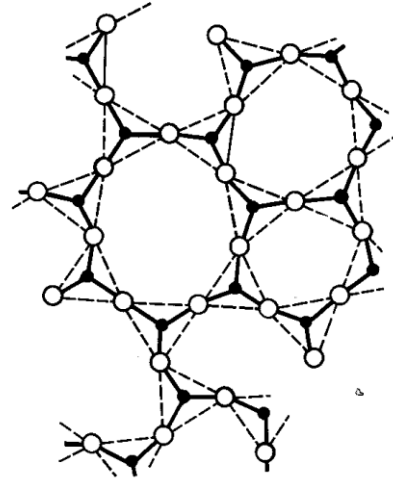


Ergimiş curuf ve tuzların viskoziteleri

- Curuf: metal ayrıldıktan sonra kalan yan ürün
- Cüruflar genel olarak ergimiş oksit çözeltisinde bulunan bazik ve asidik bileşenlerin iyonizasyonu ile oluşmuş katyon ve anyonlardan oluşur.
- En sıklıkla karşılaşılan asidik bileşenler SiO_2 ve Al_2O_3 olup, cüruf içerisinde ilave bir oksijen edinerek anyonik bir bileşik oluşturmaktadır.
- Cürufların viskozitelerinde belirleyici olan bu oksit bileşiklerinin bağ durumlarıdır.

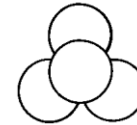
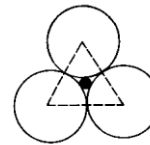


(a)



(b)

- Katı silikada Si^{4+} 4 tane O^{2-} ile birer elektron paylaşarak tetrahedra şeklinde bir yapıya sahiptir.
- Bu madde eritildiğinde, yapıdaki düzen bozulmakla birlikte bazı Si-O bağları hala mevcuttur. Bu nedenle viskozite yüksektir.



Si-O tetrahedra

Ergimiş curuf ve tuzların viskoziteleri

- CaO gibi bazik bir oksitin eklenmesiyle, Ca^{2+} iyonları silikat yapısının arasında yer alır ve O^{2-} iyonları ağı dahil olur
- Böylece tetrahedra yapıları birbirinden ayrılır.
- Bunun sonucu olarak viskozitede hızlı bir düşüş gözlemlenir

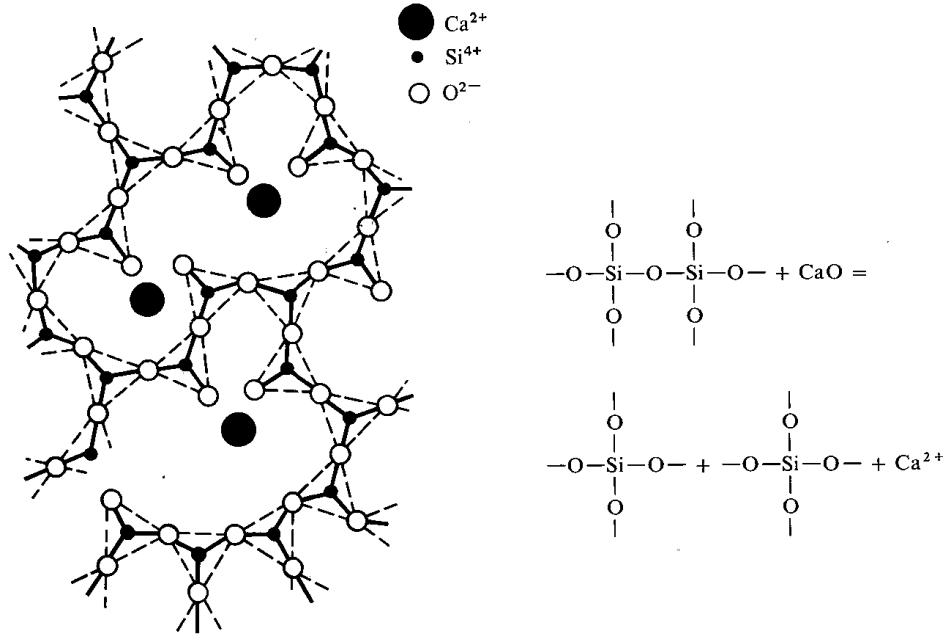
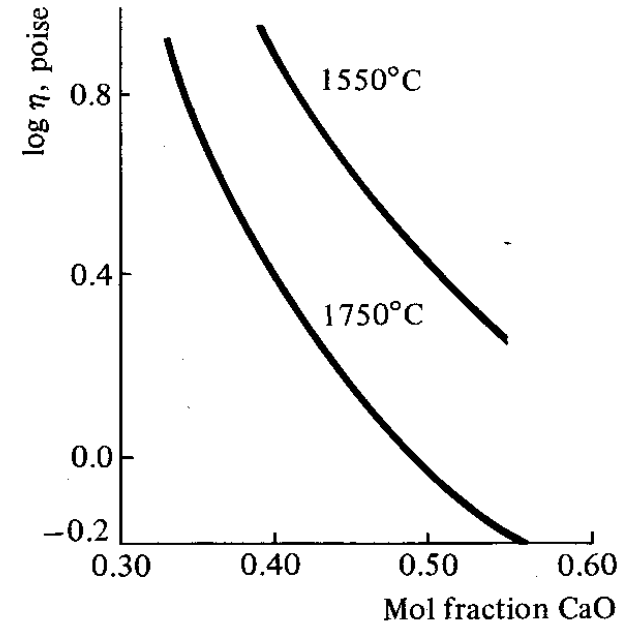
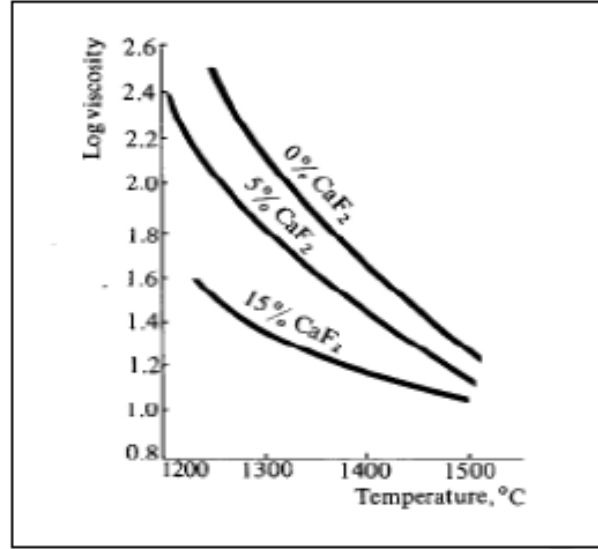


Fig. 1.14 The solution of a divalent metal oxide in molten silica.



Ergimiş curuf ve tuzların viskoziteleri

- Curuf viskozitesine CaF_2 katkısının etkileri

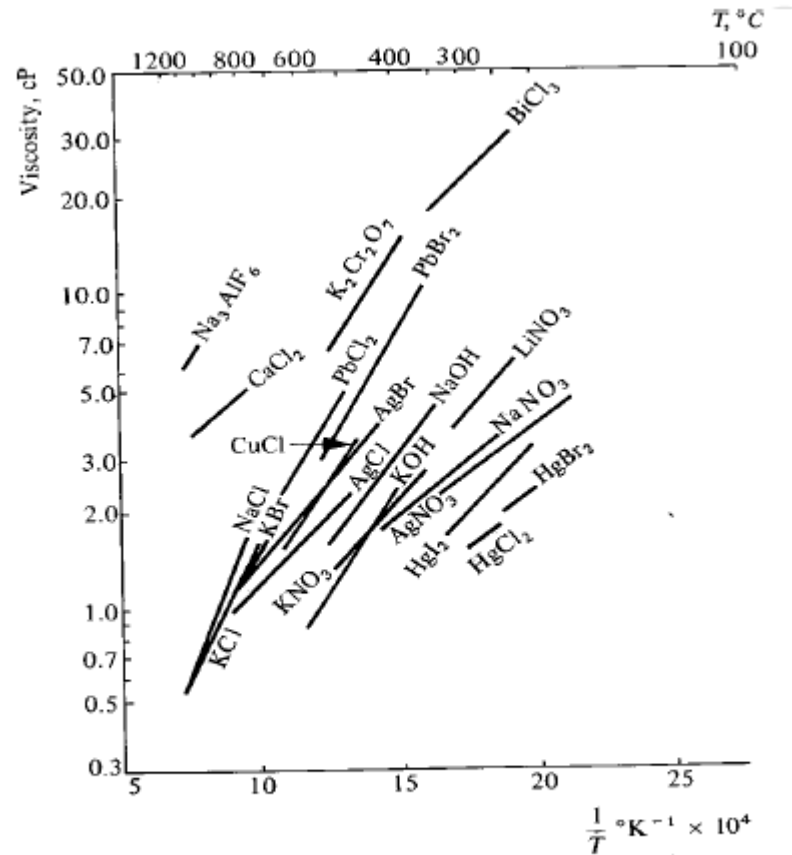


Şekil : 18 Asidik curuflara CaF_2 katkısının etkileri : % 50 SiO_2 , % 15 Al_2O_3 , % 35 CaO

- Genel olarak asidik ve bazik karakterdeki demir çelik curuflarına florür bileşiklerinin katılması ve sıcaklığın artırılması viskoziteyi düşürmektedir.
- Bunun nedeni CaF^+ katyonlarının silikat anyonlarının arasına girerek elektrostatik bağı zayıflatmasıyla açıklanabilir.

Ergimiş curuf ve tuzların viskoziteleri

- Ergimiş tuzların sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri
- NaCl gibi tuzlarda bağlar büyük ölçüde elektrostatik olduğu için ergimiş oksitlere göre viskozite daha düşüktür.



Şekil : 1.20 Ergimiş tuzların sıcaklığa bağlı viskozite değişimleri

Camların Viskozitesi

- Erimiş camlarla erimiş metallerin viskozite davranışları farklıdır.
- Genel bir cam olan SiO_2 'yu ele alırsak
- Silkatlarda yapısal birim *tetrahedro*
- *Sisteme ısı verildikçe* Si-O bağları kırılmaya ve bazı birimler hareketli olmaya başlar.
- Erime noktasına ulaşıldığında bağların belirli bir kısmı kırılmıştır ve kaymaya göre bir akış sağlanabilir.
- Ama tüm bağlar kırılmamış olduğu için SiO_2 eriyiğinin viskozitesi yüksektir.
- Sıcaklık arttıkça daha çok bağ kırılır ve viskozite daha da düşer.
- Silikat camları için bu viskozite değişimleri birkaç merteye farklı olabilir.
- Bu nedenle grafikler yarı logaritmik olarak verilir.

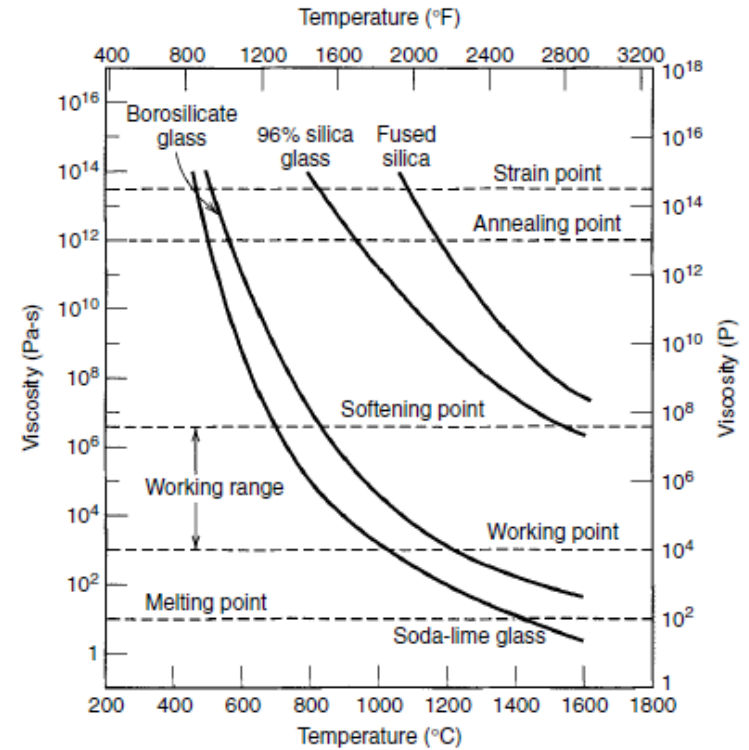


Figure 4.2 Dependence of viscosity on temperature for several silica-based glasses. Reprinted, by permission, from W. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 5th ed., p. 425. Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc.

Camların Viskozitesi

- Camların viskozitelerinin geniş bir aralıkta değişmesi yapısıyla ilgilidir.
- Örneğin, hareketli bir sıvı olan suya göre camların rahatlama (relaxation) süresi çok daha uzundur.
- Rahatlama süresi: yapısal birimlerin akış nedeniyle oluşan kuvvetlerin etkisi altında kendilerini ayarlamaları için gerekli süredir.
- Bu süre yaklaşık olarak bir yapısal birimin kendi çapında bir mesafeyi kat etmesi için gerekli süredir.
- Bu süre yapısal birim büyüdükçe artmaktadır.
- Su için bu süre 10^{-12} s iken cam için 10^2 s kadar yüksek olabilir.

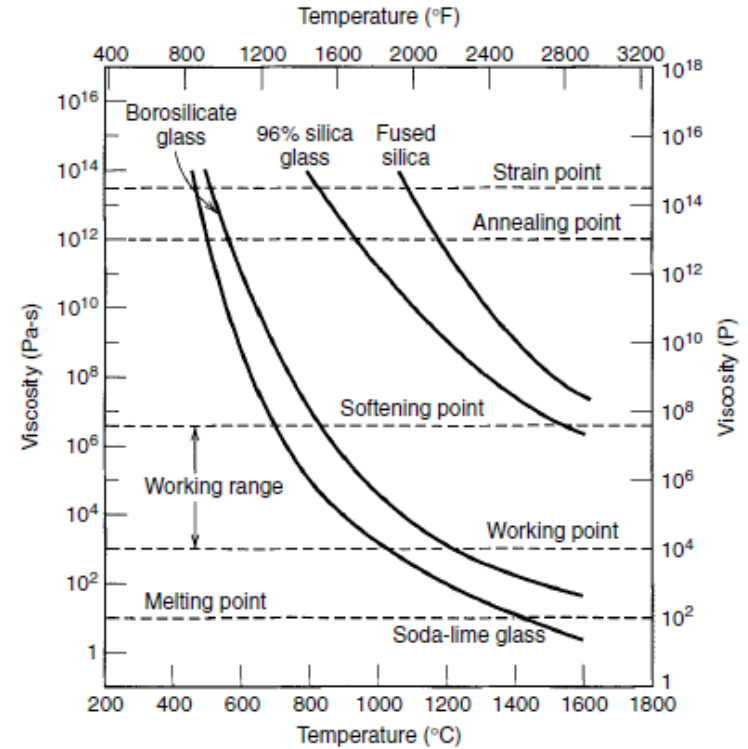
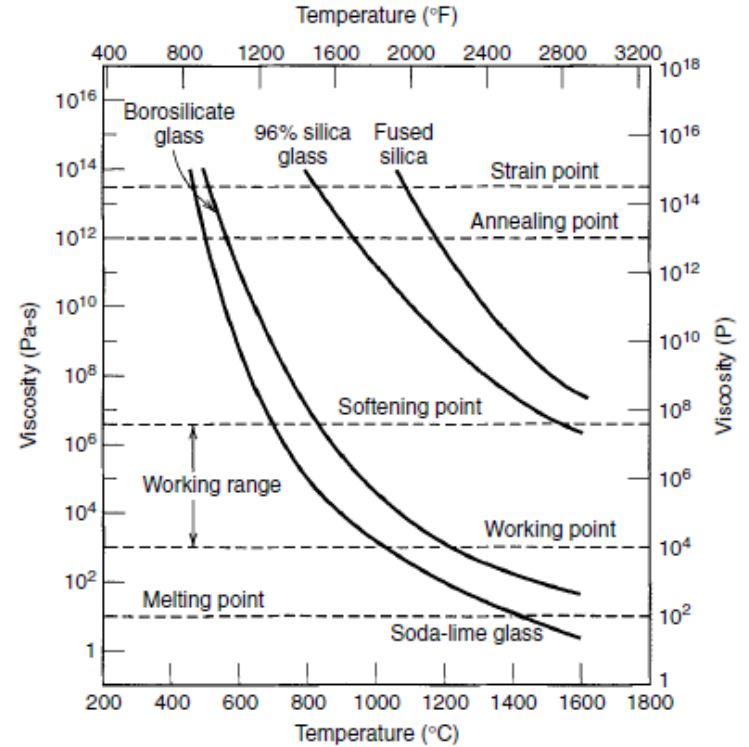


Figure 4.2 Dependence of viscosity on temperature for several silica-based glasses. Reprinted by permission, from W. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 5th ed. p. 425. Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc.

Camların Viskozitesi

- Farklı sıcaklık rejimleri mevcut
- Erime noktası (melting point): cam sıvı sayılabilecek kadar akışkan
- Çalışma noktası (working point): cam kolayca deforme olabilir
- Yumuşama noktası (softening point): cam parça boyutlarında ciddi bir değişiklik olmadan işlenebilir.
- Tavlama noktası (annealing point): rahatlama süresi 10^3 s civarında
- Şekil değiştirme noktası (strain point): uygulanan kuvvet neticesinde plastik deformasyondan önce kırılma meydana gelir
- Camların sıcaklık viskozite ilişkisi Arrhenius tipi bir denklem ile ifade edilebilir



Dependence of viscosity on temperature for several silica-based glasses. Reprinted on, from W. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 5th ed. Copyright © 2000 by John Wiley & Sons, Inc.

$$\mu(T) = A \exp \left[\frac{E_\mu}{R(T - T_0)} \right]$$

Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi

- İnorganik malzemelerin (oksitler, boritler, karbitler gibi) erime noktası arttıkça, eritme proseslerinin uygulanabilirliği azalmaktadır.
 - Artan enerji ihtiyacı
 - Dış koruma kabı
 - Oluşabilirliğin azalması
- Bunun sonucu olarak, yüksek erime noktasına sahip seramikler sıklıkla hamur, bulamaç veya süspansiyon halinde işlenmektedir.
- Hamur, bulamaç veya süspansiyon arasındaki fark çeşitli faktörlere bağlıdır.
 - Seramik partiküller, sıvı faz ve tutulmuş gazların sürekli veya süreksiz olmasına
 - Paketlenme fraksiyonu (PF) (kürelerin kapladığı yığın hacim fraksiyonu), boşluk doygunluk derecesi (DPS) ve mekanik sıkıştırılabilirlik (X) gibi partikülle ilgili

Table 4.3 Characteristics of Ceramic/Liquid Mixture Consistency States^a

Consistency	Particle Structure	Gas	Liquid	PF	DPS	X
Powder	C	C	D	L	<1	H
Granules	C	C	D	L-M	<1	M
Plastic	C	D	C	M-H	<1	L
Paste	C	D	C	M-L	=1	0
Slurry	D	D	C	M-L	>1	0
Suspension	D	D	C	L	>1	0

^aC = continuous; D = discontinuous; H = high; M = moderate; L = low.

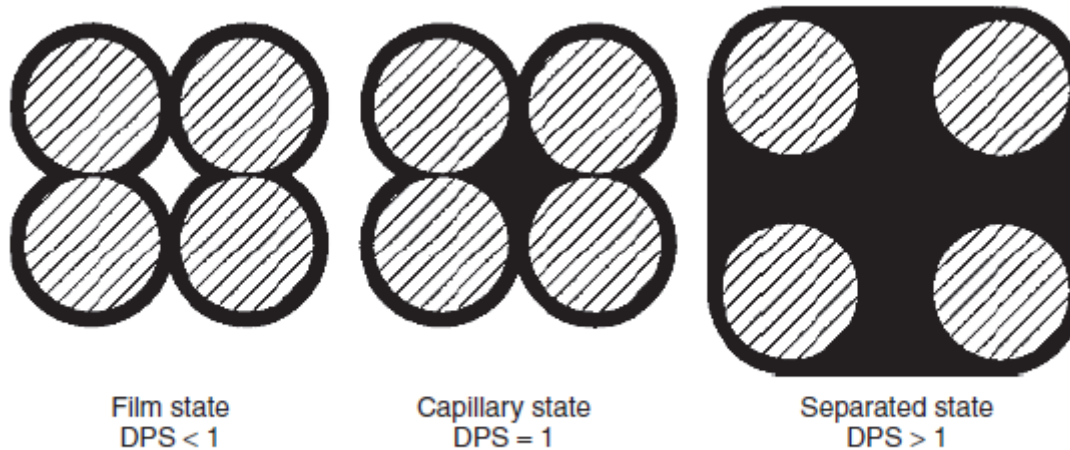
Source: J. S. Reed, *Principles of Ceramics Processing*, 2nd ed. Copyright © 1995 by John Wiley & Sons, Inc.

PF: packing fraction

DPS: degree of pore saturation

X: mechanical compressibility

Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi



- DPS: boşlukların doygunluğu
- Askıda duran sıvının toplam boşluk hacmine oranı
- Mekanik sıkıştırılabilirlik: basınçtaki bir değişime karşılık hacimsel değişim
- Sıvı eklendikçe karışım sıkıştırılmaz hale gelir.

Figure 4.3 Liquid distribution in a powder leading to varying degree of pore saturation (DPS).

Table 4.3 Characteristics of Ceramic/Liquid Mixture Consistency States^a

Consistency	Particle Structure	Gas	Liquid	PF	DPS	X
Powder	C	C	D	L	<1	H
Granules	C	C	D	L-M	<1	M
Plastic	C	D	C	M-H	<1	L
Paste	C	D	C	M-L	=1	0
Slurry	D	D	C	M-L	>1	0
Suspension	D	D	C	L	>1	0

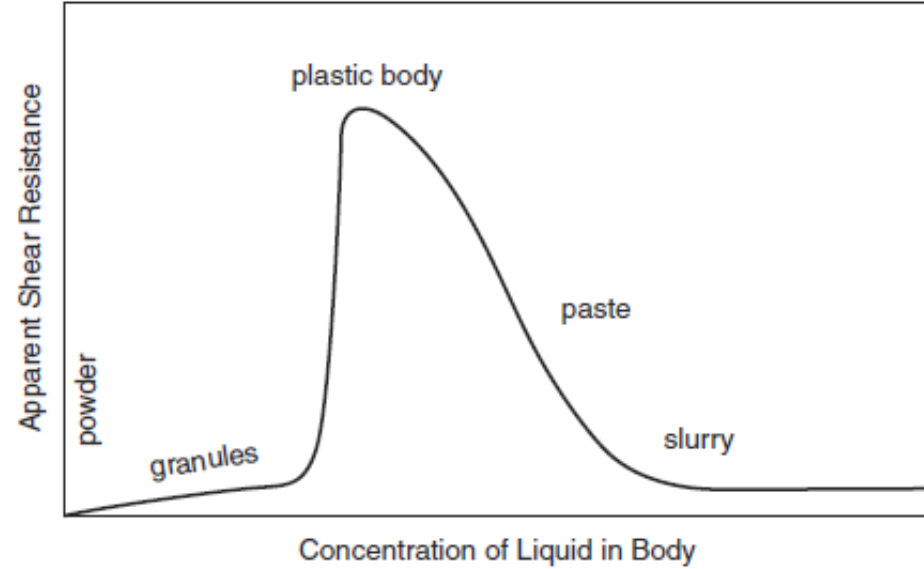
^aC = continuous; D = discontinuous; H = high; M = moderate; L = low.

Source: J. S. Reed, *Principles of Ceramics Processing*, 2nd ed. Copyright © 1995 by John Wiley & Sons, Inc.

PF: packing fraction
DPS: degree of pore saturation
X: mechanical compressibility

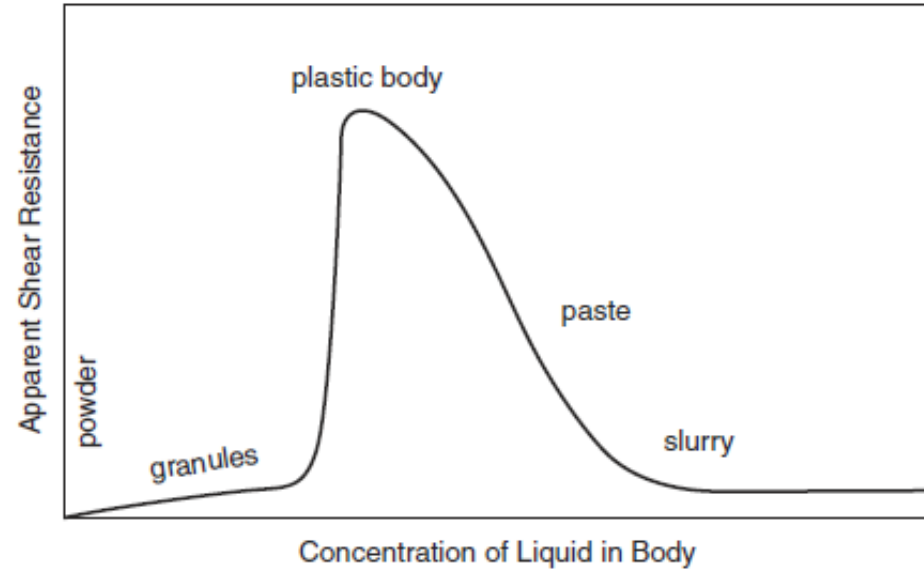
Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi

- Bu sınıflandırmalar proses açısından önemlidir, çünkü kesme kuvvetlerinin karışım içerisindeki iletimi buna bağlı olarak kayda değer bir şekilde değişmektedir.
- Kuru bir toz yığını ayrı partiküllerden ve van der Waals, elektrostatik veya manyetik partiküller arası kuvvetlerle oluşmuş yığınlardan oluşmaktadır.
- Burada akışa direnç rastgele partikül çekimine bağlıdır ve azalan partikül boyutuyla azalmaktadır (yüzey kuvvetlerinin yer çekimi kuvvetlerine nazaran artması)
- Düşük viskoziteye sahip bir sıvı eklendiğinde, granül olarak adlandırılan yığınlar (aglomeralar) oluşur.
- Bu karışımlarda kesme akışına karşı direnç hala düşüktür.
- Sıvı miktarının artması ile bütün toz granüle dönüşür. Bu noktada yüzeyler hala **kurudur**.



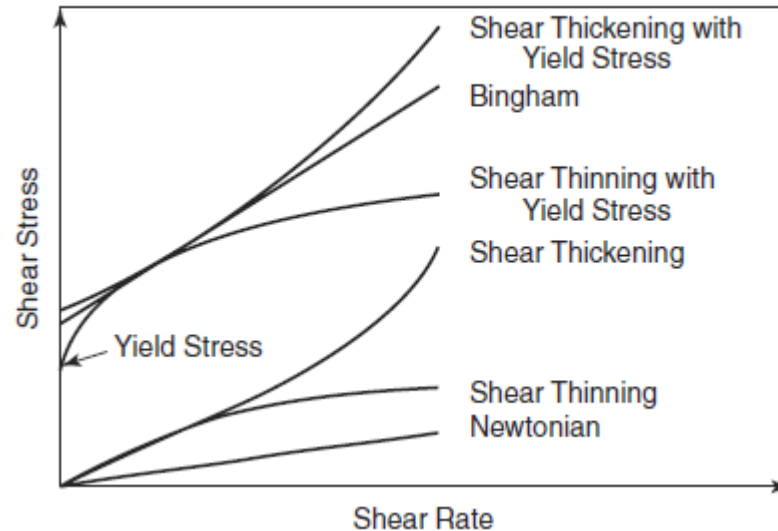
Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi

- Bu noktada çok az miktarda bir sıvı daha eklenmesi, tüm yığın halinden kohezif (yapışkan) bir kütleye geçişe neden olur.
- Kohezif kütle kesmeye karşı çok dirençlidir. Kesmeye karşı cevabı plastik gibi olduğu için genellikle plastik gövde (plastic body) olarak adlandırılır.
- Granül, plastik ve hamur durumlarında, kesme gerilmesi partiküllerin birbirleriyle teması ile iletilebilir.
- Bu noktadan sonra akışa direnç daha fazla sıvı eklenmesiyle azalmaktadır ve sıvı faz sürekli hale gelmektedir.
- Hamurun akış davranışı kolloidal partikül konsantrasyonu ve koagülasyon kuvvetlerine bağlıdır.
- Daha fazla sıvı eklenmesiyle hamur bulamaç haline gelir. Malzeme artık kendi ağırlığı ile akabilmektedir.
- Seyretilik bulamaça süspansiyon denilir.



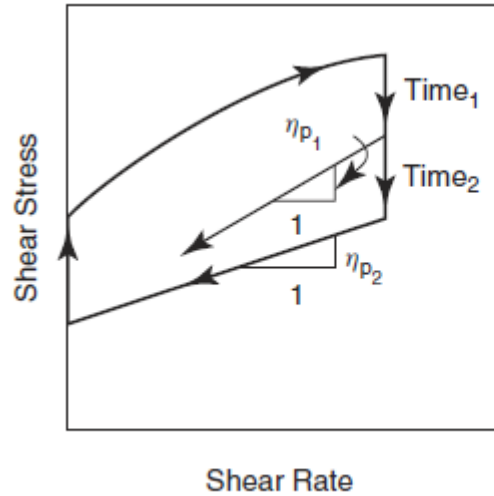
Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi

- Sıcaklığa bağımlılıkların yanında, bu karışımların viskoziteleri
 - Zaman içinde değişiklik gösterebilir
 - Uygulanan kesme gerilmesine göre değişiklik gösterebilir.
- Bu tip sıvı veya çözeltilere non-newtonyan denilir.
- Non-newtonyan sıvılar için viskozite kesme gerilmesi ile kesme hızı (dV_x/dy) arasında bir sabit olarak düşünülemez
- Bu tip büyük molekül içeren çözelti ve süspansiyonlarda, akış partiküllerin oryantasyonlarını değiştirebilir.
- Bu oryantasyon değişimi, kesmeye karşı direnci azaltabilir.



Seramik Bulamaç ve Süspansiyonların non-newtonyan viskozitesi

- Non-newtonyan akışkanların viskozitesi zamanla değişebilir.
- Sabit bir hızda kesme uygulanırken viskozitesi zamanla azalan akışkanlara tiksotropik denir.
- Sabit bir hızda kesme uygulanırken viskozitesi zamanla artan akışkanlara reopektik denir.



- Tiksotropik davranış
- İki farklı (η_{p1} ve η_{p2}) viskozite: kesme gerilmesi vs. kesme hızı eğimleri

Polimerlerin viskozitesi

- Polimerler bir çözücü içerisinde çözülmüş yada eriyik halde bulunabilir.
- Genellikle non-newtonyan özellik gösterirler

Polimer çözeltilerinin viskozitesi

- Polimer çözeltileri oldukça yaygındır.
- Yapıştırıcılar, boyalar ticari olarak mevcut polimer çözeltilerine örnek teşkil eder.
- Polimer çözücülerini önce çözücüyü absorbe ederek kabararak (swell) bir jel meydana getirir
- Ardından ise jelin çözelti içerisinde çözülmesiyle elde edilirler.
- Polimer çözeltisinin viskozitesi rölatif viskozite ile tanımlanabilir.

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_s}$$

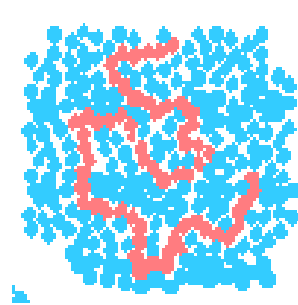
- η_r : Rölatif viskozite
 - η_s : Saf çözücü viskozitesi
 - η : polimer çözeltisinin gerçek viskozitesi
- Rölatif viskozite de içsel (intrinsic) viskozite $[\eta]$ ve polimer konsantrasyonuna bağlı olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir. k' Huggins katsayısıdır

$$\eta_r = 1 + [\eta]c + k'[\eta]^2c^2 + \dots$$

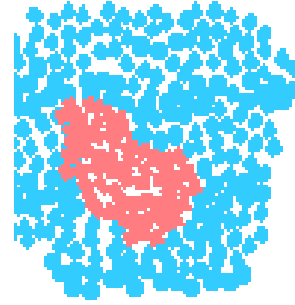
Polimer çözeltilerinin viskozitesi

- İçsel viskozitesinin tanımlanma sebebi, birçok önemli parametre (polimer molekül ağırlığı ve çözücü tipi) ile korelasyon kurulabilir olmasıdır.
- Polimer çözücüleri genel olarak iyi (good) çözücü veya zayıf (poor) çözücü olarak sınıflandırılabilir.
- İyi çözücüde**; polimerle çözücü arasındaki etkileşimler polimer polimer etkileşimlerinden daha güçlüdür.
- Zayıf çözücüde**; polimer-polimer etkileşimleri polimer çözücü etkileşimlerinden daha güçlüdür.
- İyi çözücüde polimer zincirleri birbirlerinden ayrılarak çözücü ile etkileşime girecektir. Daha etkin bir çözünme söz konusudur. İyi çözücüler için Huggins katsayısı 0,3-0,4 arasındadır, zayıf çözücüler için bu değer daha yüksektir.

İyi çözücü



Zayıf çözücü



Polimer çözeltilerinin viskozitesi

- İçsel viskozite molekül ağırlığına aşağıdaki ilişki ile bağlıdır.

$$[\eta] = K' \overline{M}_v^a$$

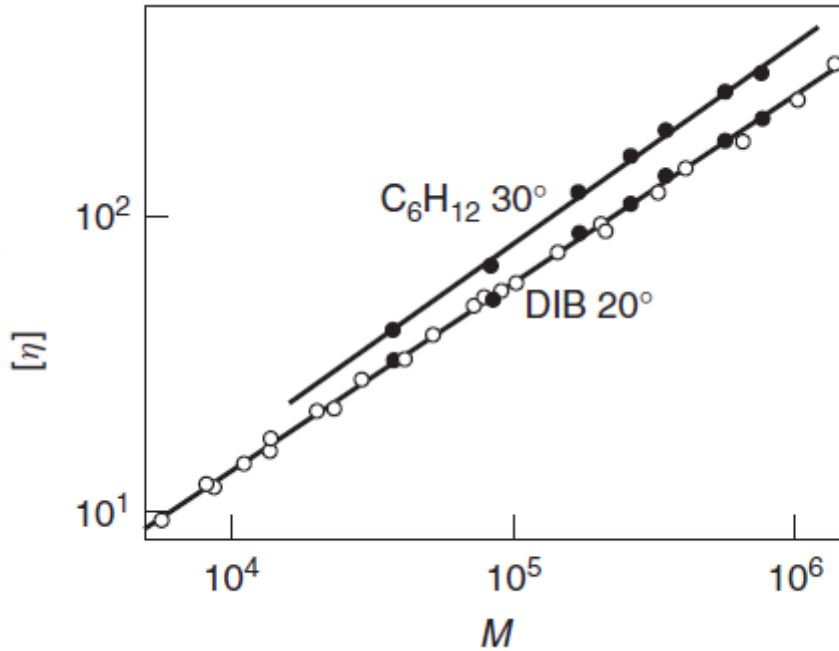


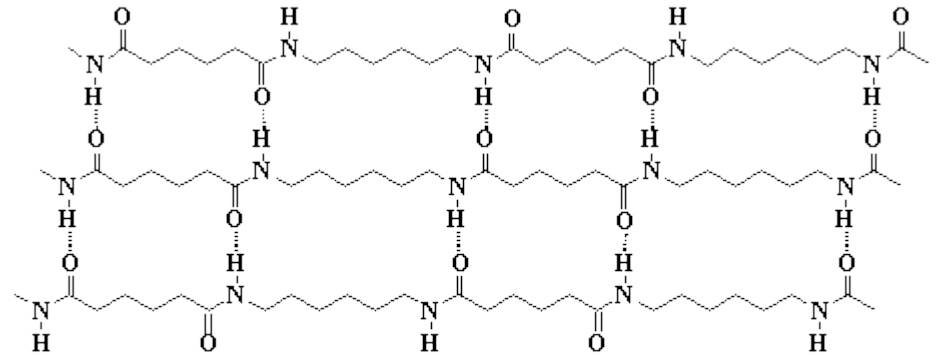
Table 4.6 Selected Values of Parameters for Mark–Houwink Equation

Polymer	Solvent	Temperature (°C)	$K' \times 10^5$	a
Cellulose triacetate	Acetone	25	8.97	0.90
SBR rubber	Benzene	25	54	0.66
Natural rubber	Benzene	30	18.5	0.74
Polyacrylamide	<i>n</i> -Propyl ketone	14.5	119	0.50
	Water	30	68	0.66
Polyacrylonitrile	Dimethyl formamide	25	23.3	0.75
Poly(dimethylsiloxane)	Toluene	20	20.0	0.66
Polyethylene	Decalin	135	62	0.70
Polyisobutylene	Benzene	24	107	0.50
	Benzene	40	43	0.60
	Cyclohexane	30	27.6	0.69
Poly(methyl methacrylate)	Toluene	25	7.1	0.73
Polystyrene				
Atactic	Toluene	30	11.0	0.725
Isotactic	Toluene	30	10.6	0.725
Poly(vinyl acetate)	Benzene	30	22	0.65
Poly(vinyl chloride)	Ethyl <i>n</i> -butyl ketone	29	92.9	0.50
	Tetrahydrofuran	20	3.63	0.92

- K' ve a polimer çözücü sistemine bağlı katsayılar

Polimer eriyiklerinin viskozitesi

- Kismeye bağlı olarak polimer eriyiklerinin viskozitesi seramik bulamalarının davranışlarıyla benzerlik göstermektedir.
- Polimerik malzemelerin işlenmesinde önemli iki unsur:
 - Polimer eriyikte zincirlerin birbirlerine dolanmasının (entanglement) viskozite üzerindeki etkisi
 - Polimer eriyik karışımlarının etkisi
- Polimer eriyiklerinin yüksek viskoziteleri polimer zincirleri arasındaki moleküller arası bağlar ile açıklanabilir.
- Zincirler arası bağlar zincir içerisindeki ana bağlardan daha güçlü olabilmektedir.
- Bu durum zincir uzunluğına bağlıdır: zincir uzunluğu arttıkça moleküller arası bağların sayısı artar.
- Hidrojen bağı ve dipoller gibi güçlü moleküller arası bağlar daha da güçlüdür.
- Moleküller arası bağların zayıf olduğu durumlarda bu etkiler daha yüksek molekül ağırlıkta görölmektedir.

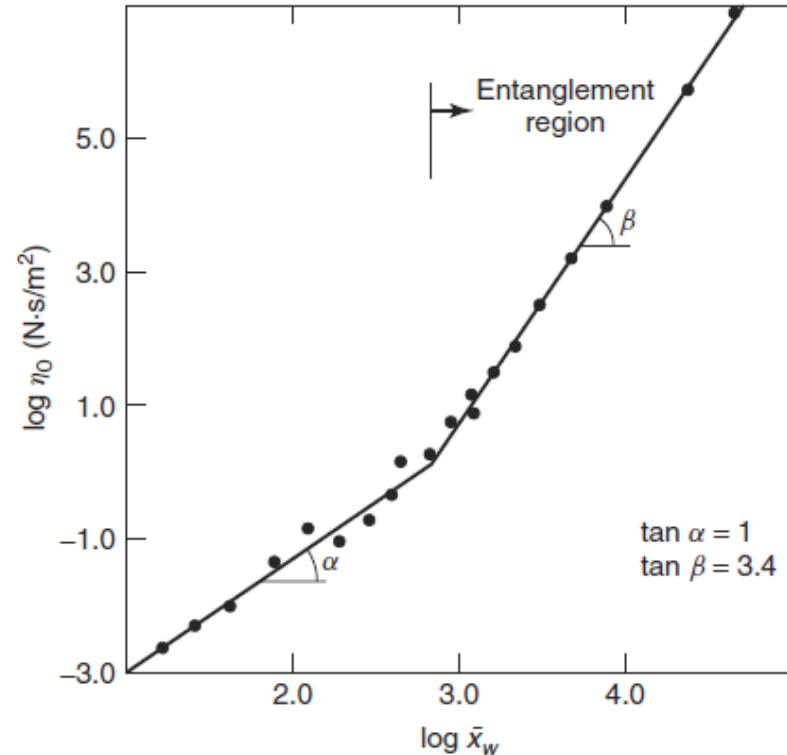
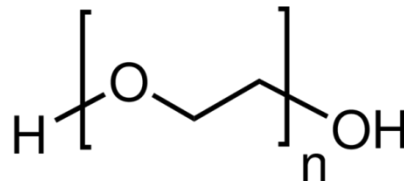


In nylon 6,6, the carbonyl oxygens and amide hydrogens can hydrogen bond with each other. This allows the chains to line up in an orderly fashion to form fibers.

Polimer eriyiklerinin viskozitesi

- Zincirlerin birbirlerine dolanması (entanglement) da polimer eriyiklerinin viskozitesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır.
- Belirli bir kritik zincir uzunluğunun (ortalama polimerizasyon derecesi) üstünde zincir dolanmaları akışı yavaşlatmakta ve eriyik viskozitesini arttırmaktadır.
- Bu kritik uzunluğun altındaki zincir boyutlarında, kayda değer bir viskozite artışı görülmemektedir.
- Tipik kritik zincir uzunlukları
 - Poliisobutilen 610
 - Polistiren 730
 - Poli(metil metakrilat) 208
- Genellikle kritik zincir uzunluğu polar polimerlerde polar olmayan (nonpolar) polimerlere göre daha düşüktür. Moleküller arası kuvvetlerin etkisi

Poli(etilen glikol)



Polimer eriyiklerinin viskozitesi

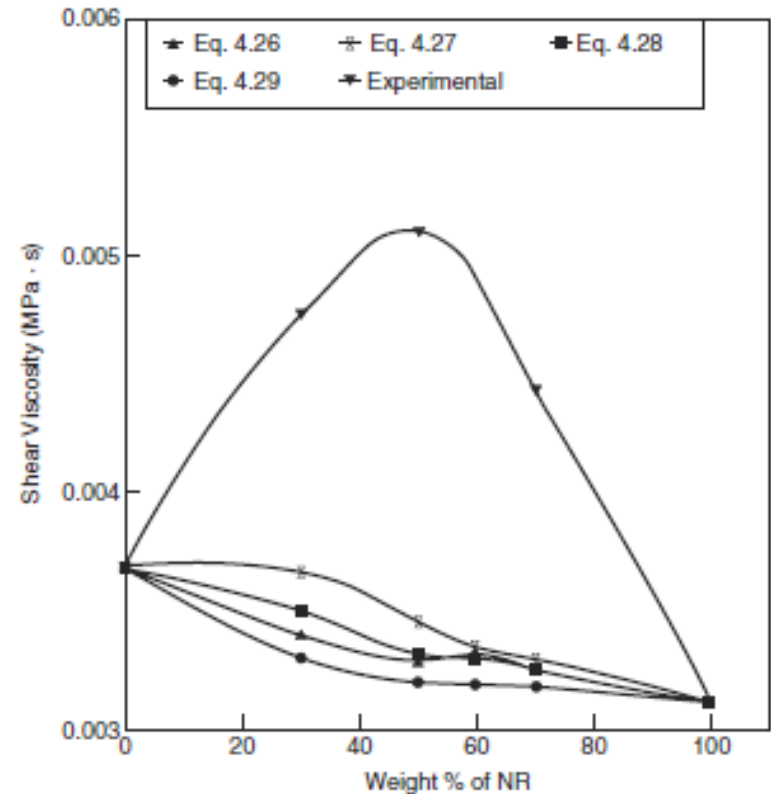
- Moleküller arası kuvvetler *polimer karışımlarındaki (blends)* iki veya daha fazla polimerin birbiriyle uyumunun belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır.
- Polimer karışımlarının reolojik özellikleri komplekstir ve tahmin etmesi güçtür.
- Karışımların viskozitesinin tahmin edilmesinde kullanılan 4 denklem aşağıdaki gibidir.
- Hacim fraksiyonuna bağlı olarak

$$\eta_{\text{mix}} = \eta_1\phi_1 + \eta_2\phi_2 \quad (4.26)$$

$$\eta_{\text{mix}} = \eta_2 + \frac{\phi_1}{1/(\eta_1 - \eta_2) + \phi_2/2\eta_2} \quad (4.27)$$

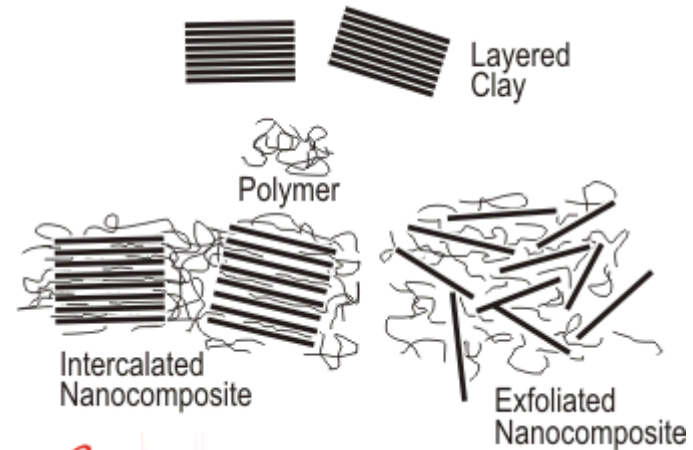
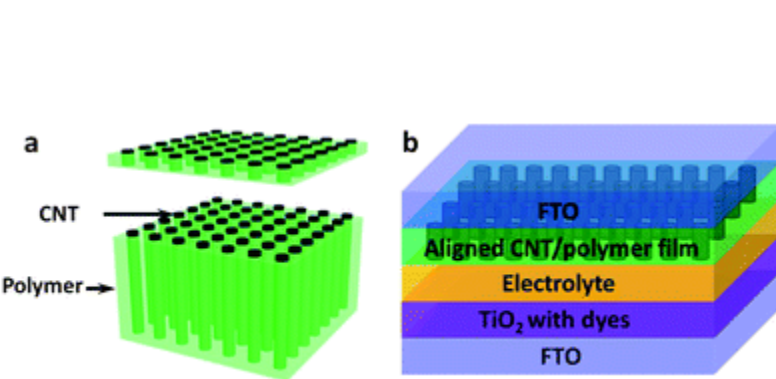
$$\eta_{\text{mix}} = \eta_1 + \frac{\phi_2}{1/(\eta_2 - \eta_1) + \phi_1/2\eta_1} \quad (4.28)$$

$$\ln \eta_{\text{mix}} = \frac{\phi_1(\alpha - 1 - \gamma\phi_2) \ln \eta_1 + \alpha\phi_2(\alpha - 1 + \gamma\phi_1) \ln \eta_2}{\phi_1(\alpha - 1 - \gamma\phi_2) + \alpha\phi_2(\alpha - 1 + \gamma\phi_1)} \quad (4.29)$$



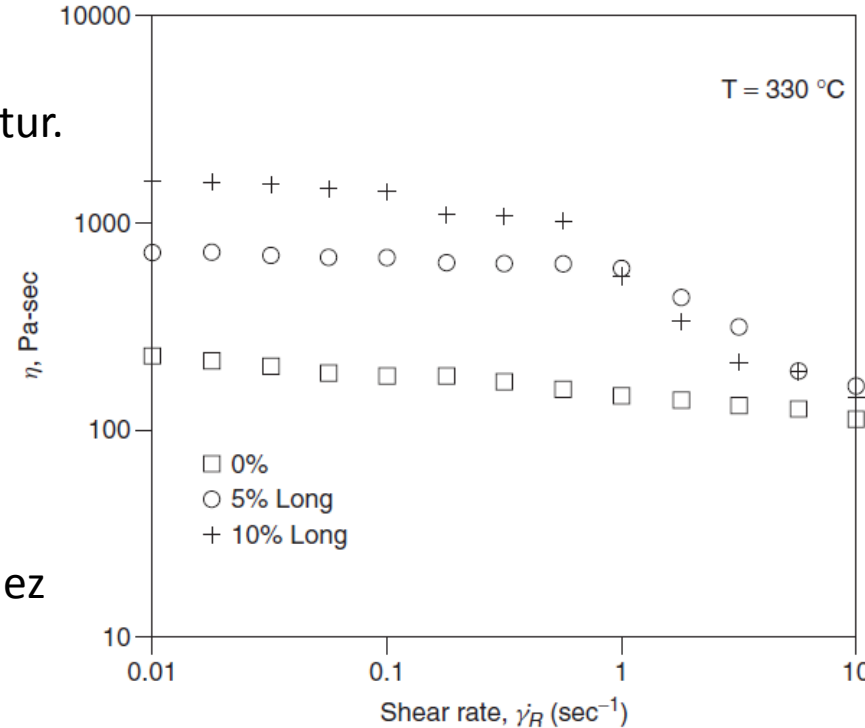
Kompozit malzemelerin viskozitesi

- Matriks ve takviye edici malzemelerin çok çeşitli olması ve teorik olarak kompozisyon yönünden basit süspansiyon ve çözeltilerin bile tarifindeki yetersizlik nedeniyle, kompozitlerin momentum iletim özelliklerinin genel bir tarifini yapmak çok güçtür.
- Bununla beraber iki başlık altında kompozitlerin akış davranışlarından bahsedilebilir.
 - Matriks-takviye edici karışımları
 - Matriks ön maddelerinin takviye edici malzemelerin arasından akışı
- Yüksek performanslı kompozitlerin birçoğu polimer esaslı olduğu için, her iki durumda da erimiş polimerik malzeme veya ön maddeleri incelenecektir.
- Bununla birlikte buradaki prensipler, diğer metal ve seramik esaslı kompozitlerin akış esaslı işlemlerine de uygulanabilir.



Polimer-fiber eriyiklerinin viskozitesi

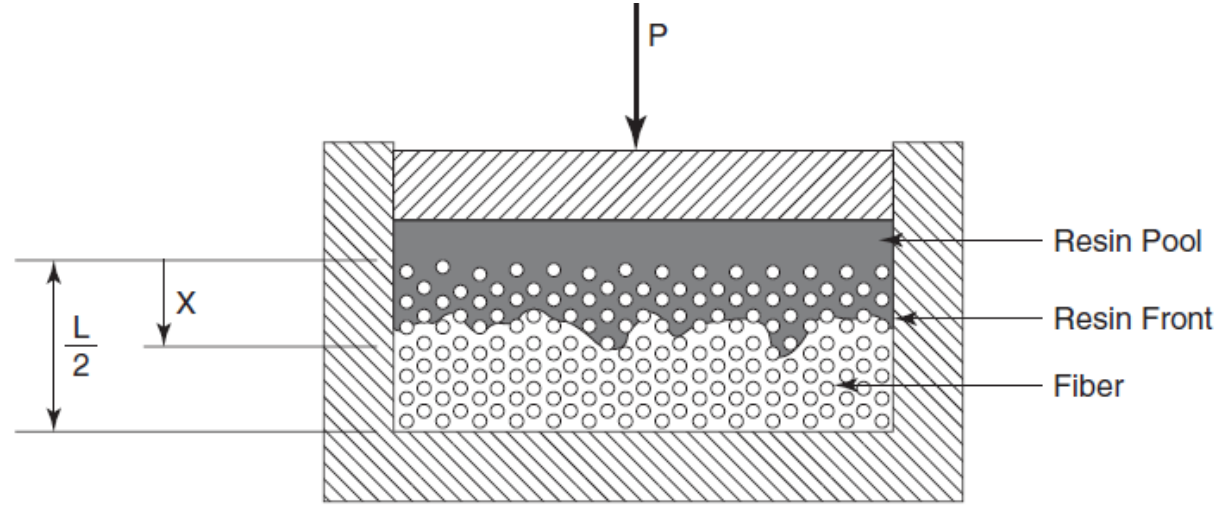
- Fiber takviyeli polimerlerin yaygınlıklarından dolayı, çeşitli empirik çalışmalar mevcuttur
 - Ör: Karbon, cam ve polyester fiberlerin polietilen, polipropilen, polikarbonat ve poliamid ve poliüretan matriksleriyle oluşturduğu kompozitlerle ilgili çalışmalar mevcuttur.
- Kompozisyonun dışında, fiberler boy ve çaplarına göre de sınıflandırılabilirler
 - Uzun fiberler ($> \sim 5$ mm)
 - Kısa fiberler ($< \sim 5$ mm, $L/D = 500-800$)
- Genellikle fiberlerin viskoziteye etkisi, kesme incilmesi etkisinin, fibersiz duruma (%0) göre artması şeklindedir.
 - Viskozitenin artan kesme hızı ile azalması
- Düşük ve yüksek kesme hızlarında platolar mevcuttur.
- Bunun nedeni, fiberlerin akış yönünde, özellikle yüksek kesme hızlarında hizalanmasıdır.
- Kesme incilmesinin miktarı ve düşük kesme hızı platosunun varlığı, en-boy oranı, fiber konsantrasyonu gibi parametrelere bağlıdır.
- Düşük kesme hızı platosu, düşük en-boy oranına sahip fiberlerin yüksek konsantrasyonda ve düşük viskoziteli matriks akışkanlarında genellikle görülmez



Fiber önkalıplıları içerisinde akan polimerlerin viskozitesi

- Polimer eriyiklerinin fiber önkalıplıları (preform) arasından akışı bazı kompozit prosesleri için oldukça önemlidir.
 - Nonreaktif (eriyik infiltrasyonu), reaktif (reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama)
- Bu uygulamalarda, polimer ön maddeleri fiber yapıları arasından akmakta ve bu akış sırasında yerinde (in-situ) polimerize olmaktadır.

- Genellikle polimer, fiberlerle doldurulmuş bir kalıp içerisine akmaktadır
- Akışkan akışı boşluklu (porous) yapılar arasındaki akışa eşdeğerdir.
- Bu durum Darcy kanunu ile açıklanabilir.



- Newtoneyen akışkanlar için akış debisi (Q)
 - Kesit alanı (A), basınç farkı (ΔP) ve geçirgenlik (K_D) ile orantılı
 - Kanal uzunluğu (L) ve viskozite (μ) ile ters orantılıdır.
- Bu denklem silindirik bir boru içerisindeki akışı tarif eden Hagen–Poiseuille denklemiyle aynı formdadır.

$$Q = K_D \frac{A}{\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$$

Biyolojik akışkanların viskozitesi

- Biyolojik akışkanlar su bazlı partikül süspansiyonlarıdır.
- En önemli biyolojik akışkan olan kan, kırmızı kan hücrelerinin plazmadaki bir süspansiyonudur.
- Kırmızı kan hücrelerinin kan içerisindeki yüzdesine hematokrit adı verilir
- İnsan kanının viskozitesi hematokrit yüzdesiyle artmaktadır.
- Tüp çapı burada önemli bir faktördür.
- Bunun nedeni, kırmızı kan hücrelerinin, orta akımda yer almalarıdır.
- Diğer bir deyişle, tüp duvarları kenarında (~3 mm) civarındaki bir kısım tamamıyla düşük viskoziteli plazmadan oluşur.
- Büyük tüplerde, bu tabakanın tüm akışa etkisi düşük olduğu için kayda değer bir viskozite değişimine yol açamaz.
- Kalp büyük tüp viskozitelerine sahip kanı pompalamak durumunda olsaydı, boyutunun çok daha büyük olması gerekirdi.

