

2. AKIŞKANLARIN ÖZELLİKLERİ

Bir sistemin herhangi bir karakteristiğine **özellik** denir. Bilinen bazı özellikler, Basınç, P, sıcaklık, T, hacim, V ve kütle m, daha az biliniyor olmakla birlikte, viskozite, ısı iletkenlik, elastiklik modülü, ısı 1 genleşme katsayısı, buhar basıncı, yüzey gerilimi de sistemin özellikleri olarak bilinir. Sistemin özellikleri yoğun özellikler ve yaygın özellikler olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Yoğun (intensif, şiddet) özellikler, sistemin kütesinden bağımsızdırlar, sıcaklık, basınç ve yoğunluk. **Yaygın (ekstensif, kapasite) özellikler**, değerleri sistemin büyüklüğüne bağı 1 olan özelliklerdir. Toplam kütle, toplam hacim ve toplam momentum, vs. Birim kütle başına verilen özellikler **özlü özellikler** olarak adlandırılır.

Özlü hacim, $v = V/m$ ve özlü toplam enerji, $e = E/m$, vs.

V hız alanı, en önemli akış özelliğı olduğı için, akışkanın termodinamik özellikleri ile doğrudan ilişki içindedir

- ❖ Basınç, p
- ❖ Yoğunluk, ρ
- ❖ Sıcaklık, T

İş, ısı ve enerji dengeleri ele alındığında diğ er dört termodinamik özellik önemli hale gelir:

- ❖ İç enerji, u
- ❖ Entalpi $h = u + p/\rho$ (Entalpi, maddenin yapısında depoladığı her türden enerjilerin toplamıdır)
- ❖ Entropi, s
- ❖ Özlü ısılar, c_p ve c_v

Bunlara ek olarak, sürtünme ve ısı iletimi etkileri transport (iletim) özellikleri denilen iki özellik ile ifade edilir:

- ❖ Dinamik viskozite, μ
- ❖ Isı iletkenlik, k

Tüm bu dokuz büyüklük, akışkanın termodinamik durumu veya hali ile belirlenen termodinamik özelliklerdir. Örneğ in, su veya oksijen gibi tek fazlı bir madde için, basınç ve sıcaklık gibi iki temel özellik, diğ er tüm özelliklerin değerini belirlemek için yeterlidir.

Basınç

Katı cisimlerden farklı olarak akışkanlar bulundukları ortamı katı cidara kadar veya diğ er bir akışkan kütesine kadar doldururlar. Temas yüzeylerinde “*akışkanların molekül hareketleri*” yolu ile ilettikleri kinetik enerjinin zamana göre ortalamasının birim alana düş en miktarı” akışkan basıncını oluşturur. Sakin (durağan) akışkan kütleleri halinde bu basınç **statik basınç** adını alır ve kaynağı yerçekimidir. Bu büyüklük **deniz seviyesi** referans alınarak

ölçülür. Basınç, bir akışkan tarafından birim alana uygulanan *normal kuvvet* olarak tanımlanır. Akışkanlardaki basıncın katılardaki karşılığı, *normal gerilmedir*. Deniz seviyesinde serbest yüzeyli bütün akışkanların basıncı hava basıncına (atmosferik basınca, **Po**) eşittir ve **25 °C** sıcaklıkta **Po = 760 mmHg** dir. Basınç, duran bir akışkanın bir noktasındaki basma gerilmesidir (Şekil 1.1). Akışkanlar mekaniğinde basınç **p**, hızdan sonra en dinamik değişkendir. Basınç farkı ya da gradyeni, özellikle borularda, akışı oluşturan en önemli etkidir. Basınç birim alana düşen kuvvet olarak tanımlanır.

$$p = \frac{F}{A}$$

Biz basıncı kuvvet yoğunluğu olarak bilinen Paskal (Pa), (N/m²) birimi ile ölçmekteyiz. 1 Pa basınç, 1 m² yüzeyi etkileyen 1 N kuvvetin sonucudur. Paskal küçük birim olduğundan kPa (10³ Pa) veya MPa (10⁶ Pa) daha sıklıkla kullanılır.

Yaygın olarak kullanılan diğer basınç birimleri ise, bar ve atmosferdir.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bar}$$

Gösterge Basıncı (etkin basınç, efektif basınç) ve Mutlak Basınç

Yerküreyi çevreleyen atmosfer basıncı 101,325 kPa'dır. Gösterge ve manometre gibi basınç ölçme cihazları atmosferik basıncın üstünde veya altında olmadıkça sıfıra kalibre edildiğinden atmosfer basıncını göstermezler. Bu okuma (atmosferik basıncın üstünde veya altında) “*gösterge basıncı*” olarak adlandırılır. Şayet gösterge basıncı atmosfer basıncının üstünde ise pozitif, altında ise negatif olur.

Şayet basınç göstergesi uzayda kalibre edilseydi sonra yeryüzüne indirilseydi o “*mutlak basıncı*” gösterecektir ve mutlak basınç daima mutlak sıfırın üzerinde pozitif olacaktır.

Akışkanlar mekaniğinde mutlak basınç nadiren kullanılır. Böylece bu derste “*basınç*” daima gösterge basıncını gösterecektir ve basınç içeren “*p*” sembolü bütün formüller gösterge basıncına sahiptir. Mutlak basınç hesaplanmak istenirse, gösterge basıncına atmosfer basıncını (101,325 kPa) eklemek gerekir.

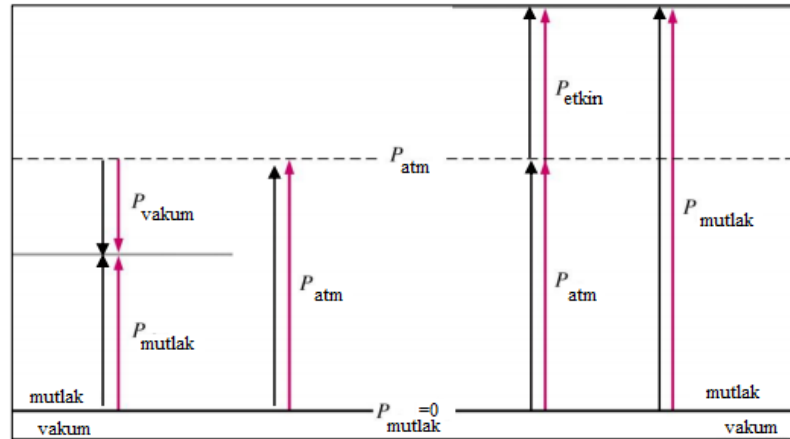
Bir sıvının buhar basıncı

Bir sıvının yüzeyinde, bazı moleküller gaz haline gelir ve sıvının üzerine çıkar. Bu buharlaşma olarak bilinir ve derecesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

1. Sıvı moleküllerinin enerjisi onlardaki sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm başlar. Yüksek sıcaklıklar buharlaşma seviyesini artırır.
2. Cıva gibi bazı sıvılar oda sıcaklığında oldukça yavaş buharlaşırlar. Su cıvadan daha hızlı buharlaşır. Fakat açık ağızlı bir şişeden suyun oda sıcaklığında tamamen buharlaşması günlerce sürer. Eter, alkol, soğutucu akışkan gibi diğer sıvılar şayet açık bir tankı içinde bulunuyorsa gayet hızlı buharlaşır ve tankı terk eder. Bu sıvılar “*uçucu*” sıvılar olarak bilinir.

3. Kapalı bir kaptaki buharlaşma olursa, buhar moleküllerinin oluşturduğu kısmi basınç buhar basıncı olarak adlandırılır. Sıcaklık yükseldikçe molekül hareketliliği arttığından doymuş buhar basıncı artar. Buharlaşma sırasında sıvı moleküllerinin bir kısmı sıvıya geri döner. Belirli bir zamanda eğer buharlaşma miktarı ile geri dönüş miktarı aynı ise denge haline ulaşılmış olur. Bu durumdaki buhar basıncı “**doymuş buhar basıncı (buharlaşma, kaynama basıncı)**” olarak adlandırılır. Düşük basınçlar buharlaşma hızını artırır. Şayet basınç yeterli olarak azaltılırsa verilen bir sıcaklıkta kaynama noktasına gelir. Bu basınç “**doymuş buhar basıncı**” olarak bilinir. Daha uçucu bileşikler verilen bir sıcaklıktan daha yüksek doyma basıncına sahiptirler. Örnek olarak 20°C civarındaki buhar doyma basıncı 0,173 kPa, su 2,34 kPa ve amonyak 857 kPa’dır.

- **Doyma Sıcaklığı T_{doyma} :** Verilen bir basınçta bir saf maddenin faz değiştirdiği sıcaklığa denir.
- **Doyma Basıncı P_{doyma} :** Verilen bir sıcaklıkta bir saf maddenin faz değiştirdiği basınca denir.
- **Buhar basıncı (P_v):** Bir saf maddenin verilen bir sıcaklıkta sıvıyla faz dengesi halinde olan buharının yaptığı basınçtır. ($P_v = P_{doyma}$).
- **Kısmi Basınç:** Başka gazlarla karışım halinde bulunan bir gaz veya buharın basıncıdır. Örneğin atmosferik hava, kuru hava ile su buharının bir karışımıdır ve atmosferik basınç, kuru hava ile su buharının kısmi basınçlarının toplamıdır.
- **Kaynama:** belirli bir sıcaklıkta sıvı üstündeki basınç buharlaşma veya doymuş buhar basıncının altına düşerse **kaynama** adı verilen çabuk buharlaşma olayı başlar.



$$P_{mutlak} = P_{gösterge} + P_{atm}$$

$$P_{vakum} = P_{atm} - P_{mutlak}$$

Sıcaklık

Sıcaklık, T , akışkanın enerji seviyesinin bir ölçüsüdür. Mühendislikte kolaylık amacıyla Celcius ölçeği kullanılmasına rağmen, dersteki birçok uygulama Kelvin mutlak sıcaklık ölçeğinin kullanılmasını gerektirir.

$$K = ^\circ C + 273.15$$

Sıcaklık farklarının büyük olması durumunda ısı geçişi önemli olabilir.

Yoğunluk

Yoğunluk, ρ , birim hacimdeki kütle miktarıdır. Yoğunluk gazlarda oldukça değişkendir ve basınçla hemen hemen orantılı olarak artar. Yoğunluk sıvılarda hemen hemen sabittir. Suyun yoğunluğunu (yaklaşık olarak 1000 kg/m^3) yüzde 1 değerinde arttırabilmek için basıncını 220 kat arttırmak gerekir. Bu nedenle çoğu sıvı akışları sıkıştırılmaz kabul edilir.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Burada ρ (ro) Yunan sembolü olup yoğunluk için kullanılır. Yoğunluğun birimi kg/m^3 'tür. Yoğunluk, bir madde molekül paketlerinin birbiriyle ne kadar yakın olduklarının göstergesidir. Bir gazın yoğunluğu, molekülleri daha geniş bir alana yayıldığından, sıvı veya katıdan daha düşüktür. Örnek olarak saf su $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ (1 kg/L) iken atmosferik hava $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$ civarındadır.

Katılar ve sıvılar kesin olarak sıkıştırılmaz olduğundan, onların yoğunluğu bir çok uygulamalarda sabit olarak kabul edilir. Buna rağmen, gazlar yüksek oranda sıkıştırılabilirler ve onların yoğunluğu basınç ve sıcaklık değişimleri çok küçük olmadıkça sabit kabul edilemez.

Gazların yoğunluğu ise mükemmel gaz kanunu kullanılarak hesaplanır.

$$P = \rho \cdot R \cdot T$$

P: Mutlak basınç R: Gaz sabiti T: Mutlak sıcaklık

Not: Gazlarda moleküllerin hacmi gazın hacmine göre çok az olduğu için moleküllerin hacmi ve aralarındaki çekim kuvveti yok sayılabilir. Böyle gazlara *mükemmel (ideal) gaz* denir.

Sıvılarda yoğunluğun sıcaklığa bağımlılığı aynen katı cisimlerde olduğu gibi hacimsel genleşme katsayısı (β) yardımıyla bulunur.

$$\frac{\Delta V}{V_o} = \beta \cdot \Delta T$$

$$V = V_o + \Delta V$$

$$V = V_o \cdot [1 + \beta \cdot \Delta T]$$

$$\frac{m}{V_o} = \rho_o$$

$$\rho = \frac{\rho_o}{1 + \beta \cdot \Delta T}$$

Aynı şekilde katı cisimlerde olduğu gibi HOOK kanunundan yararlanılarak hacim ve basınç değişimi arasındaki ilgiden sıkışma modülü bilinen sıvıların yoğunluğu:

$$\Delta V = \frac{1}{\kappa} V_o \cdot \Delta P$$

$$\frac{m}{V} = \rho$$

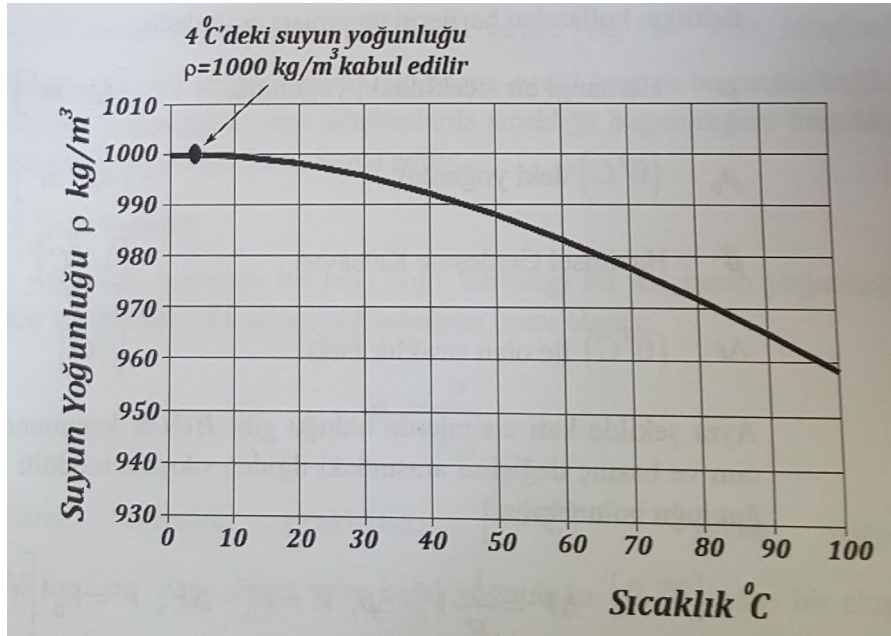
$$V = V_o - \Delta V$$

$$\rho = \frac{m}{V_o \left[1 - \frac{\Delta P}{\kappa} \right]}$$

$$V = V_o \cdot \left[1 - \frac{\Delta P}{\kappa} \right]$$

$$\frac{m}{V_o} = \rho_o$$

$$\rho = \frac{\rho_o}{1 - \frac{\Delta P}{\kappa}}$$



Şekil 2.1 Sıcaklığa bağlı olarak değişen suyun yoğunluğu

Ağırlık

Kuvvetin kullanıldığı önemli bir konu yerçekimi etkisiyle ortaya çıkan ve ağırlık olarak adlandırılan bir etkidir. Yeryüzündeki yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2 olduğundan bir cismin ağırlığı Newton eşitliği yardımıyla kütle ile ivme çarpılarak bulunur.

$$W = m \cdot g$$

$g=9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ dir.

Özgül Ağırlık

Özgül ağırlık γ , akışkanın birim hacminin ağırlığıdır. Kütle ile ağırlık arasında $W=m \cdot g$ bağıntısı olduğu gibi, yoğunluk ve özgül ağırlıkta yerçekimi ivmesi ile birbirine bağlıdır:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

Birimi N/m^3 tür. Standart yerçekimi ivmesi 9.807 m/s^2 dir. 20°C sıcaklık ve 1 atm basınç altında, havanın ve suyun özgül ağırlıkları:

$$\gamma_{\text{hava}} = 11.8 \text{ N/m}^3,$$
$$\gamma_{\text{su}} = 9790 \text{ N/m}^3 \text{ tür.}$$

Özgöl Hacim

Gazlarda, yoğunluğa kıyasla özgül hacim daha kullanışlıdır. Özgül hacim (v) kütle başına düşen hacimdir.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Özgöl hacim birimi $[m^3/kg]$ olup yoğunluğun tersine eşittir.

Kuvvet

Kuvvet, bizlerin konuşurken “itme” veya “çekme” olarak anladığımız bir kavramdır. Kuvvet bir cismin hareketinde değişikliğe yol açar ve Newton eşitliği ile açıklanır:

$$F = m \cdot a$$

a , cismin m/s^2 olarak ivmesidir.

Kuvveti $kg \cdot m/s^2$ birimi olarak görmekteyiz. Bunu basitleştirip Newton $[N]$ olarak adlandırmaktayız.

Bağıl Yoğunluk

ρ_b ile gösterilen bağıl yoğunluk, bir akışkanın yoğunluğunun, standart referans kabul edilen bir akışkanın yoğunluğuna, (sıvılar için su, gazlar için hava) oranıdır:

$$\rho_{bGAZ} = \frac{\rho_{GAZ}}{\rho_{HAVA}} = \frac{\rho_{GAZ}}{1.205 \text{ kg/m}^3} \quad \rho_{bSIVI} = \frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{SU}} = \frac{\rho_{SIVI}}{998 \text{ kg/m}^3}$$

Bir sıvının bağıl yoğunluğu birden küçük ise suda yüzer, birden büyük ise suda batacaktır. Bağıl yoğunluk oranları benzer birimlerden oluştuğunda birimler sadeleşir ve bağıl yoğunluk birimsiz sade rakam haline gelir.

Potansiyel ve Kinetik Enerjiler

Termostatikte, maddenin içindeki tek enerji moleküllerin hareketleri ve bağ kuvvetlerinden oluşan ve sistem içinde depolanmış **iç enerjidir (u)**. Hareket halinde iki enerji terimi daha eklenir. **Potansiyel enerji**, **m** kütledeki bir sistemi **r** yer değiştirme vektörü ile tanımlanan bir noktadan başka bir noktaya, **g** yerçekimi ivmesine karşı koyarak hareket ettirmek için gereken işe eşittir. **Kinetik enerji**, akışkanın hızını sıfır değerinden **V** değerine çıkarmak için gerekli olan iştir. Bu durumda akışkanlar mekaniğinde, **birim kütle başına depolanmış toplam enerji, e**, üç terimin toplamı olarak,

$$e = u + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad \text{şeklini alır.}$$

Örnek 2.1

Bir silindirik tankın iç çapı 560mm ve uzunluğu 1200mm'dir. Sıvı ile doldurulduğunda 520kg olmaktadır. Sıvının yoğunluğunu ve bağıl yoğunluğunu hesaplayınız.

Çözüm:

$$V = \pi \frac{d^2}{4} h = \pi \frac{0,560^2}{4} \times 1,2 = 0,296 \text{m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{520}{0,296} = 1760 \text{kg/m}^3$$

$$\rho_b = \frac{\rho}{1000} = 1,76$$

Örnek 2.2

Önceki örnekteki tank gaz ile doldurulduğunda özgül hacim 0,35 m³/kg olmaktadır. Tanktaki gaz kütleini hesaplayınız.

Çözüm:

$$\nu = \frac{V}{m} \Rightarrow m = \frac{V}{\nu} = \frac{0,296}{0,35} = 0,846 \text{ kg}$$

Örnek 2.3

Bir fuel-oil tankının tabanı 500 mm x 2000 mm'dir. Tanktaki fuel-oilin derinliği 1200 mm ve fuel-oilin bağıl yoğunluğu 0.97'dir. Fuel-oilin tank tabanına uyguladığı kuvveti hesaplayınız.

Çözüm:

$$V_{(\text{fuel-oil})} = 0,5 \times 2 \times 1,2 = 1,2 \text{ m}^3$$

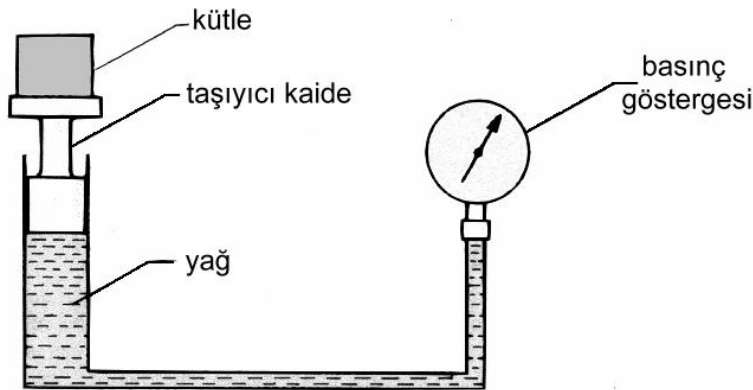
$$m_{(\text{fuel-oil})} = 1,2 \times 0,97 \times 1000 = 1164 \text{ kg}$$

$$W_{(\text{fuel-oil})} = 1164 \times 9,81 = 11,42 \times 10^3 \text{ N}$$

Böylelikle fuel-oilin tank tabanına yaptığı kuvvet 11,42 kN olarak bulunur.

Örnek 2.4

Bir basınç kalibratörü Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi 30 cm piston çapına sahiptir. Piston ve tabanın birleşik kütlesi 0,5 kg'dır. Tablanın üzerine 1,5 kg yerleştirildiğinde doğru gösterge basıncını belirleyiniz.



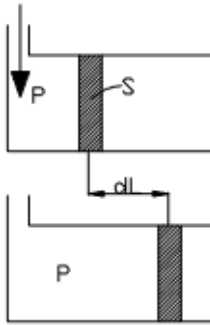
$$p = \frac{F}{A} = \frac{(1,5 + 0,5) \times 9,81}{\pi \frac{0,3^2}{4}} = 277,9 \text{ kPa}$$

Enerji ve özgül ısılar

- Toplam enerji E farklı formlardan oluşmaktadır: Isıl, mekanik, kinetik, potansiyel, elektrik, manyetik, kimyasal, ve nükleer.
- Enerji birimi *joule* (J)'dür.
- Mikroskobik enerji
 - İç enerji u , durgun (akmayan) akışkanlar için tanımlanır ve moleküler aktivitenin bir sonucu olarak gösterilir.
 - Entalpi $h=u+Pv$ akan bir akışkan için tanımlanır ve akış enerjisi (Pv)'yi içerir.
- Makroskobik enerji
 - Kinetik enerji $ke=V^2/2$
 - Potansiyel enerji $pe=gz$
- Elektrik, manyetik, kimyasal ve nükleer enerjinin olmadığı durumlar için toplam enerji: $e_{akan}=h+V^2/2+gz$.

BASINÇ ENERJİSİ

Basıncından dolayı kazandığı enerji ise;



$$\begin{aligned}\dot{W}_s &= PSdl \\ \frac{Pdsdl}{\rho dsdl} &= \frac{P}{\rho} \\ \text{Özgül enerji} &= \frac{P}{\rho}\end{aligned}$$

$$\text{Akışkanın Toplam Özgül Enerjisi} = \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz$$

P/ρ : akışkanı hareket ettirmek ve akışı sürdürmek için birim kütle başına gerekli enerji olan **akış enerjisi veya akış işidir**.

Örnek 2.5

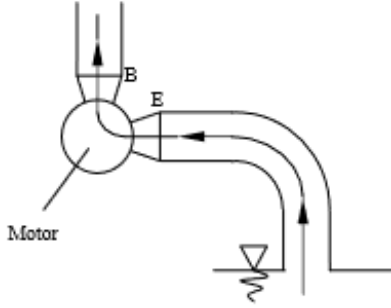
Bir boru içerisinde su akmaktadır. Belirli bir noktadaki basınç $P=22,4\text{kN/m}^2=0,224\text{Bar}$ hızı ise $2,1\text{ m/s}$ olup yüksekliği $3,2\text{m}$ olduğuna göre akışkanın bu noktadaki özgül enerjisini bulunuz?

$$Y = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \frac{0,224 \times 10^5}{1000} + \frac{2,1^2}{2} + 9,81 \times 3,2$$

$$Y = 56\text{J} / \text{kg} = 56\text{m}^2 / \text{sn}^2$$

Örnek 2.6

Bir su pompasının giriş kesitinde suyun basıncı $P_1=0,2\text{Bar}$ hızı $V_1=3,4\text{m/s}$, çıkış kesitindeki basınç ise $P_2=3,2\text{Bar}$, $V_2=5,1\text{m/s}$. Çıkış ve giriş kesitleri arasındaki yükseklik farkı $e=0,46\text{m}$ olduğuna göre pompanın özgül enerjisini bulunuz?



$$Y = Y_B - Y_E$$

$$Y_B = \frac{P_B}{\rho} + \frac{V_B^2}{2} + gz_B$$

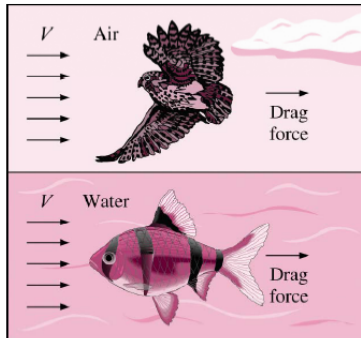
$$Y_E = \frac{P_E}{\rho} + \frac{V_E^2}{2} + gz_E$$

$$Y_{pom} = \frac{P_B - P_E}{\rho} + \frac{V_B^2 - V_E^2}{2} + g(z_B - z_E)$$

$$Y_{pom} = \frac{3,2 \times 10^5 - 0,2 \times 10^5}{1000} + \frac{5,1^2 - 3,4^2}{2} + 9,81(0,46)$$

$$Y_{pom} = 311,74 \text{ J / kg}$$

Viskozite ve Diğer İkincil Özellikler



- **Viskozite** bir akışkanın harekete karşı gösterdiği iç direnci temsil eder.
- Akan bir akışkanın bir cisim üzerine akış yönünde uyguladığı kuvvete **sürüklenme kuvveti** denir ve bu kuvvetin büyüklüğü bir oranda viskoziteye bağlıdır.

Katıların kayma gerilmesine karşı gösterdikleri direnç oldukça büyük olmasına rağmen akışkanların direnci oldukça küçüktür. En küçük kayma gerilmesi altında dahi akışkan sürekli şekil değiştirir. Durgun bir akışkana bir teğetsel kuvvet uygulanırsa bu akışkanın deforme olmasına neden olur. **Deformasyon, akışkanın içinde birbirleri üzerinde farklı hızlarda kaymasıdır.** Doğadaki tüm akışkanlarda akışkan tabakalarının birbiri üzerinde hareket etmesine karşın dirençleri söz konusudur. Bu direnç akışkanın viskozitesi olarak isimlendirilir. Bunun için viskozite birbirine komşu tabakaların birbirlerine göre hareketlerinde içsel direncin ölçümü olan bir akışkan özelliğidir. Normal şartlarda bal ve gliserin gibi akışkanlar su ve alkol gibi akışkanlara göre daha büyük direnç gösterirler.

Bazı kaynaklarda ise viskozite, bir sıvının akmaya gösterdiği direnç veya akışkanın akabilme özelliği olarak tanımlanır.

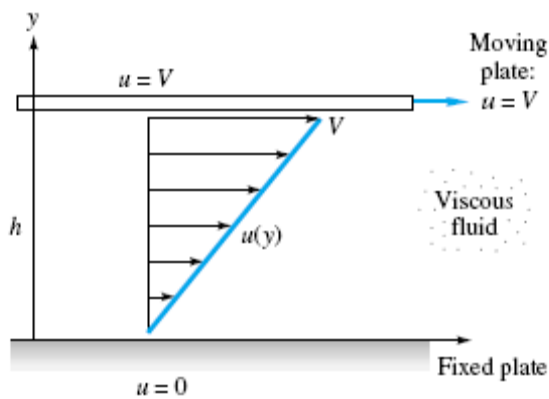
Bir sıvının sıcaklığı yükseldiği zaman viskozitesi düşer yani sıvı incelir. Sıcaklık düştüğü zaman sıvının viskozitesi yükselir. Sıcaklık karşısında sıvı ve gazların viskozite değişimleri birbirinin tersidir. Ayrıca akma noktası düşük olan ürünlerin viskozitesi düşük, akma noktası yüksek olan ürünlerin viskozitesi daha yüksektir.



Resim 2.2 Sıvının akışkanlığı ve viskozite ölçüm cihazları

Viskozite ölçümlerinde değişik birimler kullanılır. Rafineride kullanılan en önemli birimler: SSU (saybolt saniye universal), SSF (saybolt saniye furol) ve CP (centi poise)'dir. Sıvıların viskozitesi **viskozimetre** denilen bir aletle ölçülür.

Klasik bir problem, Şekil 2.3 de gösterildiği gibi, sabit bir levha ile V hızında daimi olarak hareket eden bir üst levha arasında oluşan akıştır.



Şekil 2.3 Levhalar Arasında Sürtünmeli Akış

Akışkan newton tipi bir akışkandır ve her iki levha üzerinde de kayamaz. Levhalar arası uzaklığın h küçük olması durumunda $u(y)$ hız dağılımı doğrusaldır:

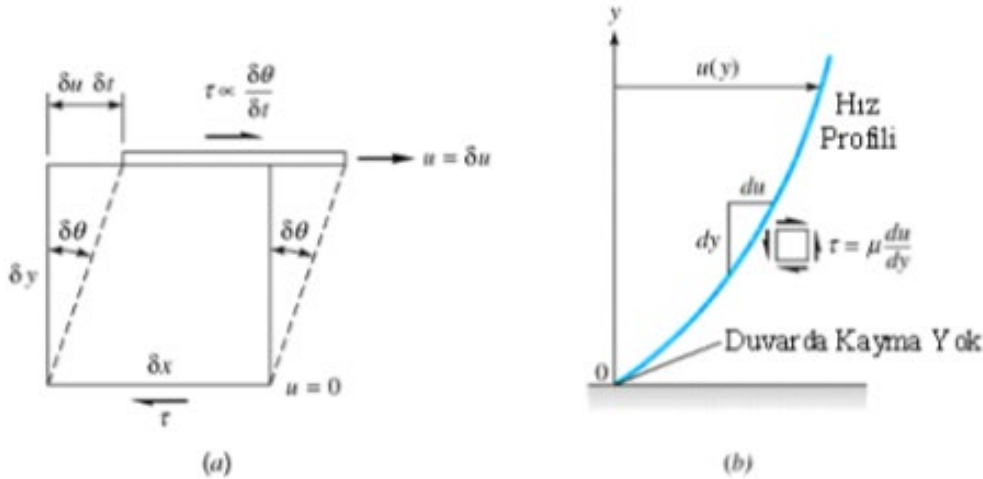
$$u(y) = V \frac{y}{h}$$

Akışkan ivmesi her yerde sıfırdır ve akış yönünde basınç değişimi olmamaktadır. Küçük bir akışkan elemanı için ifade edilen kuvvet dengesi kayma gerilmesinin akışkan içinde her noktada sabit olduğunu gösterir:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{V}{h}$$

Viskozitenin akışkan üzerinde önemli bir etkisi olmasına rağmen, gerçek viskoz gerilmeler oldukça küçüktür.

Bir akışkana kayma gerilmesi uygulandığında, akışkan viskozitesi ile ters orantılı bir şekil değiştirme hızında hareket eder (Şekil 1.3).



Şekil 2.4 Kayma Gerilmesi Etkisindeki Akışkan

Su, yağ ve hava gibi akışkanlar için uygulanan gerilme ile şekil değiştirme hızı arasındaki ilişki doğrusaldır. Orantı sabiti **μ dinamik viskozitedir (mutlak viskozite), θ deformasyon açısıdır:**

$$\tan \delta\theta \approx \delta\theta = \frac{\delta u}{y}$$

$$\delta u = V \cdot \delta t$$

$$\delta\theta = \frac{V \delta t}{y}$$

Bu durumda $\delta\theta$ nin sadece F kuvvetinin fonksiyonu (V hızına sebep olan) olmadığı, aynı zamanda zamanın da fonksiyonu olduğuna dikkat ediniz. $\delta\theta$ nin birim zamanda değişimi göz önüne alınırsa ve birim zamandaki gerinimi τ tanımlanırsa

$$\tau = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \theta}{\delta t}$$

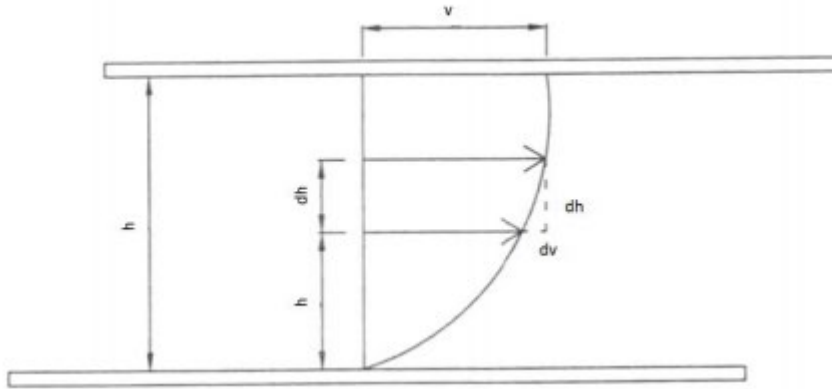
$$\tau = \frac{V}{y} = \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy}$$

Denklem boyutsal olarak uyumludur. Bu nedenle μ , gerilme-zaman boyutuna sahiptir: $\{M/LT\}$ veya $\{FT/L^2\}$. SI birim sisteminde bu boyutun birimi $[kg/ms]$ veya $[Pas]$ dir. Denkleme uyan doğrusal karakterdeki akışkanlara, yani kayma gerilmesi, birim zamandaki kayma gerinimi ile lineer olarak değişen akışkanlar **newton tipi (newtonyan) akışkanlar** denilmektedir.

Gerçekte levhalar arasındaki akışkan hızında Şekil 2.3 deki gibi lineere bir değişim olmaz. Şekil 2.5 deki gibi non-lineer bir değişim söz konusudur. Dolayısıyla kayma gerilmesi:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dh}$$



Şekil 2.5 Akışkanın lineer olmayan hız gradyeni

Akışkanlar mekaniğinde $\Theta(t)$ şekil değiştirme açısı ile ilgilenmek yerine Şekil 2.4b de gösterildiği gibi $u(y)$ hız dağılımı daha genel ifade ile $V(x,y,z,t)$ hız alanı ile ilgilenilir. Şekil 2.4b de katı çepere bitişik kayma tabakası ya da sınır tabaka gösterilmektedir. Çeper üzerindeki akışkanın hızı, çepere göre sıfırdır. Bu durum **kaymama koşulu (kaymazlık şartı)** olarak adlandırılır ve tüm sürtünmeli akışların karakteristik bir özelliğidir. Diğer bir anlatımla sabit bir boru içerisindeki ya da gözeneksiz (yani akışkanı geçirmeyen) katı bir yüzeyin üzerindeki akışı göz önüne alalım. Bütün deneysel gözlemler hareket halindeki bir akışkanın yüzey üzerine geldiğinde tamamen durduğunu ve böylece yüzeye göre akışkanın hızının sıfır olduğunu göstermiştir. Diğer bir anlatımla katıya doğrudan temas eden bir akışkan viskoz etkiler nedeniyle yüzeye yapışır ve onun üzerinde kayamaz. Bu durum **kaymama koşulu (kaymazlık şartı)** olarak bilinir. Akışkanın katı yüzeyler üzerinde kaymamasına ve bu

yüzden sınır tabaka gelişimine yol açan akışkan özelliği **viskozitedir**. Newton tipi akışkanların viskozitesi gerçek bir termodinamik özelliktir ve sıcaklık ve basınçla değişir. Tablo 2.1 de sekiz akışkanın standart basınç ve sıcaklıktaki viskoziteleri sıralanmıştır.

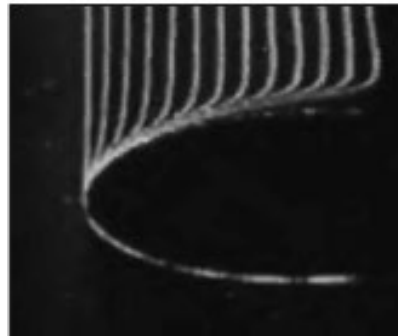
Tablo 2.1 Akışkanların 1 atm basınç ve 20°C sıcaklıktaki viskozite ve kinematik viskozite değerleri

Akışkan	μ [Pas]	ρ [kg/m ³]	ν [m ² /s]
Hidrojen	8.8E-6	0.084	1.05E-4
Hava	1.8E-5	1.2	1.51E-5
Petrol	2.9E-4	680	4.22E-7
Su	1.0E-3	998	1.01E-6
Etil Alkol	1.2E-3	789	1.52E-6
Civa	1.5E-3	13580	1.16E-7
SAE 30 yağ	0.29	891	3.25E-4
Gliserin	1,5	1264	1.18E-3

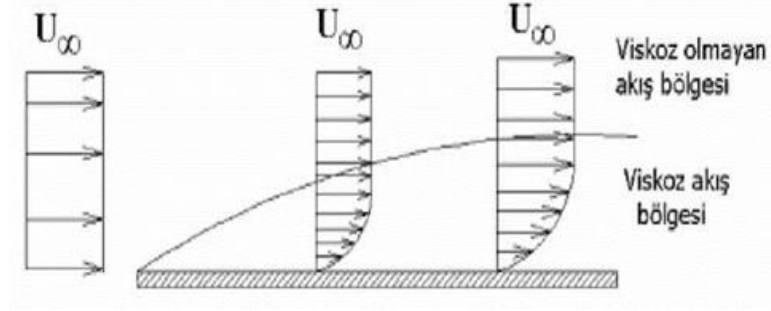
Genel olarak, **akışkanın viskozitesi basınçla çok az artar**. Basınç değişiminin etkisi mühendislik problemlerinin çoğunda ihmal edilir. Buna karşılık sıcaklığın viskozite üzerinde kuvvetli etkisi vardır. **Sıcaklığın artması gazlarda viskozitenin artmasına, sıvılarda ise azalmasına yol açar**.

Kinematik viskozite: Herhangi bir akışkanın mutlak viskozitesinin o akışkanın yoğunluğuna bölümüdür.

Şekil 2.6 da akışkanın küt burunlu bir cismin yüzeyine yapışması sonucu bir hız gradyeninin gelişimi açıkça görülmektedir. Yüzeye yapışan akışkan tabakası, tabakalar arasındaki viskoz kuvvetlerin etkisi ile kendisine bitişik tabakayı yavaşlatır ve bu etkileşim yüzeyden uzaklaştıkça azalarak devam eder. Kaymazlık şartının bir sonucu, katı ile akışkan arasındaki temas noktalarında tüm hız profillerinin katı yüzeye göre sıfır olmasıdır (Şekil 2.6). Dolayısıyla kaymazlık şartı hız profilinin oluşmasına neden olur. Viskoz etkilerin (dolaylı olarak hız profilinin) önemli olduğu yüzeye yakın akış bölgesine **sınır tabaka** adı verilir. Kaymazlık şartının diğer bir sonucu da, akışkanın bir yüzey üzerine akış yönünde uyguladığı kuvvet olan **yüzey direnci veya yüzey sürtüne direncidir**.

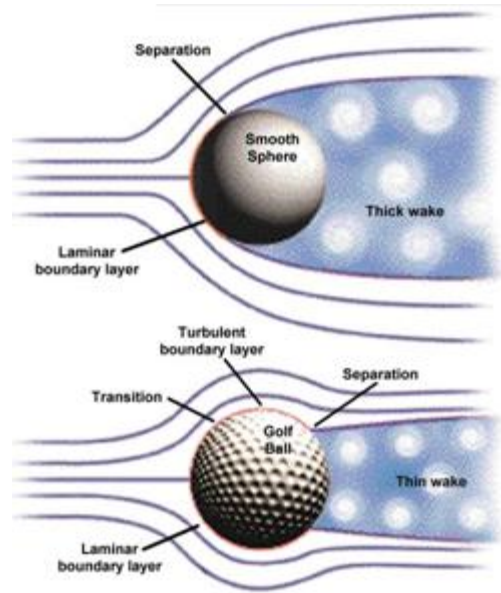


Şekil 2.6 Küt burunlu yüzey üzerinden akış



Şekil 2.7 Hız sınır tabaka kalınlığı

Akışkan yeterince yüksek bir hızla bir silindirin arka tarafı gibi eğri bir yüzey üzerinden akmaya zorlandığında, sınır tabaka yüzey üzerinde tutunamaz ve bir noktada yüzeyden ayrılır. Bu olaya **akış ayrılması** denir (Şekil 2.8). kaymazlık şartının ayrılma noktasından sonraki bölgede dahil olmak üzere yüzey boyunca her yerde gerçekleşeceği unutulmamalıdır.



Şekil 2.8 Akış ayrılması

Kaymazlık şartına benzer bir olay ısı geçişinde de görülür. Sıcaklıkları farklı iki cisim temas ettirildiğinde, her iki cisim temas noktasında sıcaklıkları eşitleninceye kadar ısı geçişi olur. Bu nedenle temas noktasında katı yüzey ve akışkan aynı sıcaklıktadır. Bu olaya **sıcaklıkta sıçramazlık şartı** denir.

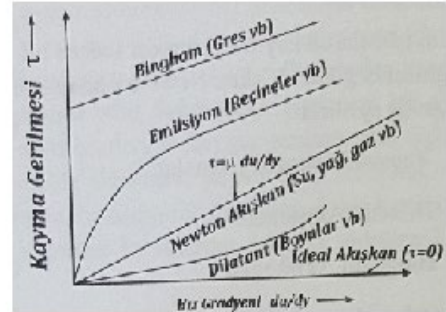
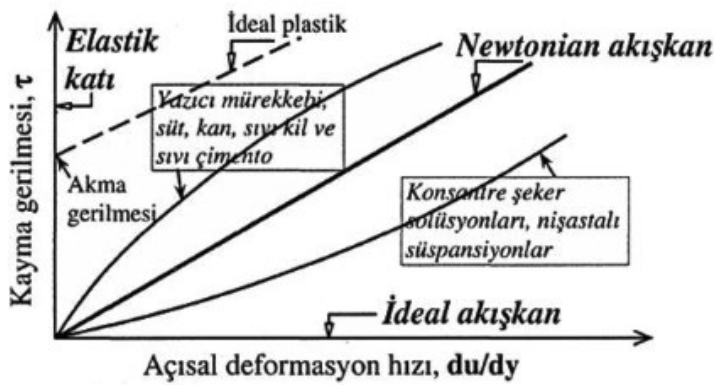
Newton Tipi Olmayan Akışkanlar

Yukarıdaki denklem ile ifade edilen doğrusal değişime uymayan akışkanlar **Newton tipi olmayan** olarak adlandırılır. Viskoz Newton olmayan akışkanlarda aralarında genel olarak üç gruba ayrılırlar.

1. Yapısal Viskoz Akışkanlar
2. Dilatant Akışkanlar
3. Bingham Akışkanlar

Yapısal viskoz akışkanlarda akma kabiliyeti artan hız gradyeni ile yükselir. Dilatant akışkanlardaki akma kabiliyeti ise artan hız gradyeni ile azalır. Yani viskozitesi artar. Bingham akışkanlarda durum biraz farklıdır. Bu akışkanların akmaya başlaması belli bir kayma gerilmesi değerine gelindikten sonra olmaktadır. Bingham akışkanına örnek kullandığımız dış macunu ve mayonezdır. Dolu tüpe belli bir basınçla bastıktan sonra tüpün ağzından dış macunu akmaya başlayacaktır.

Kayma gerilmesinin açılmal deformasyon hızı ile değişimi



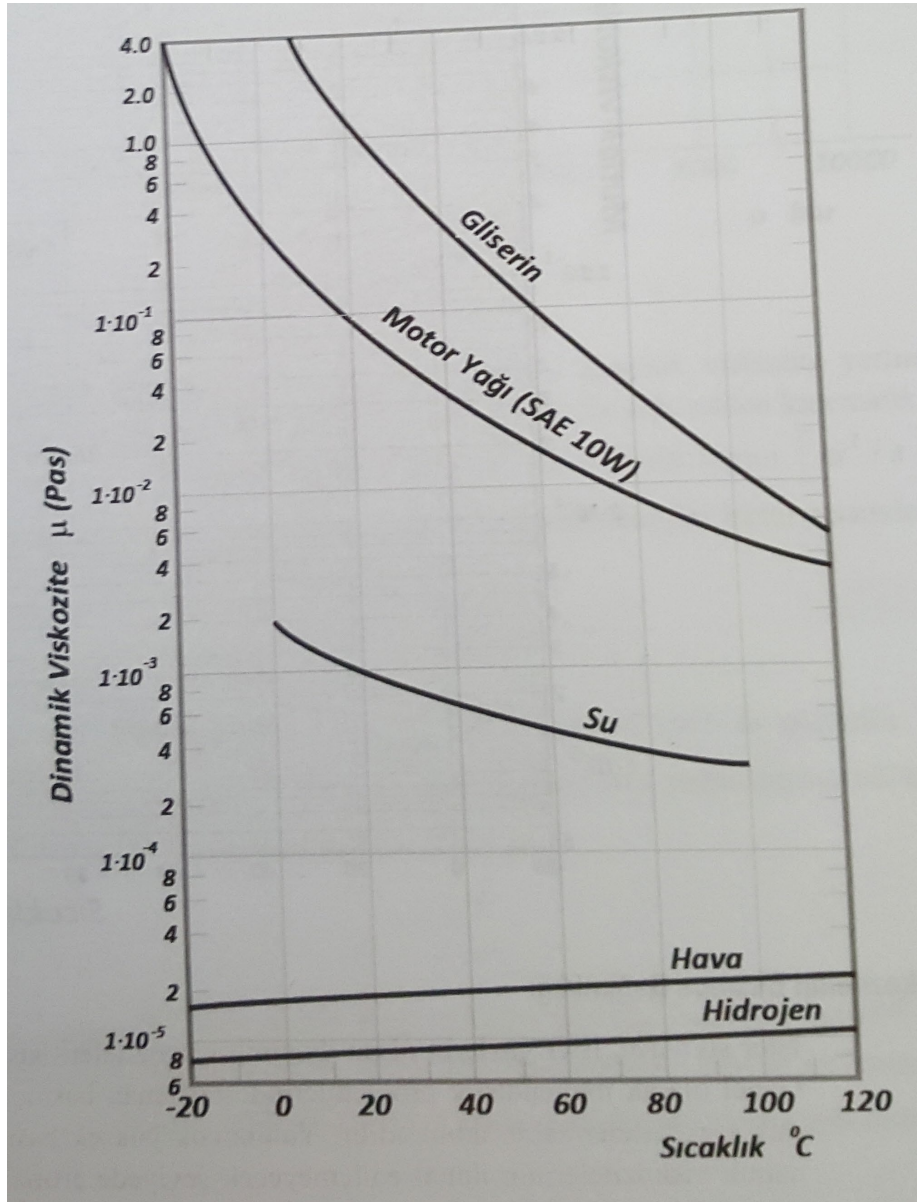
- Newtonian olmayan akışkanların mekaniğini de kapsayan bilimdalına **Rheology (Reoloji)** denir.

Şekil 2.9 Değişik Viskoz Malzemelerin Reolojik Davranışları

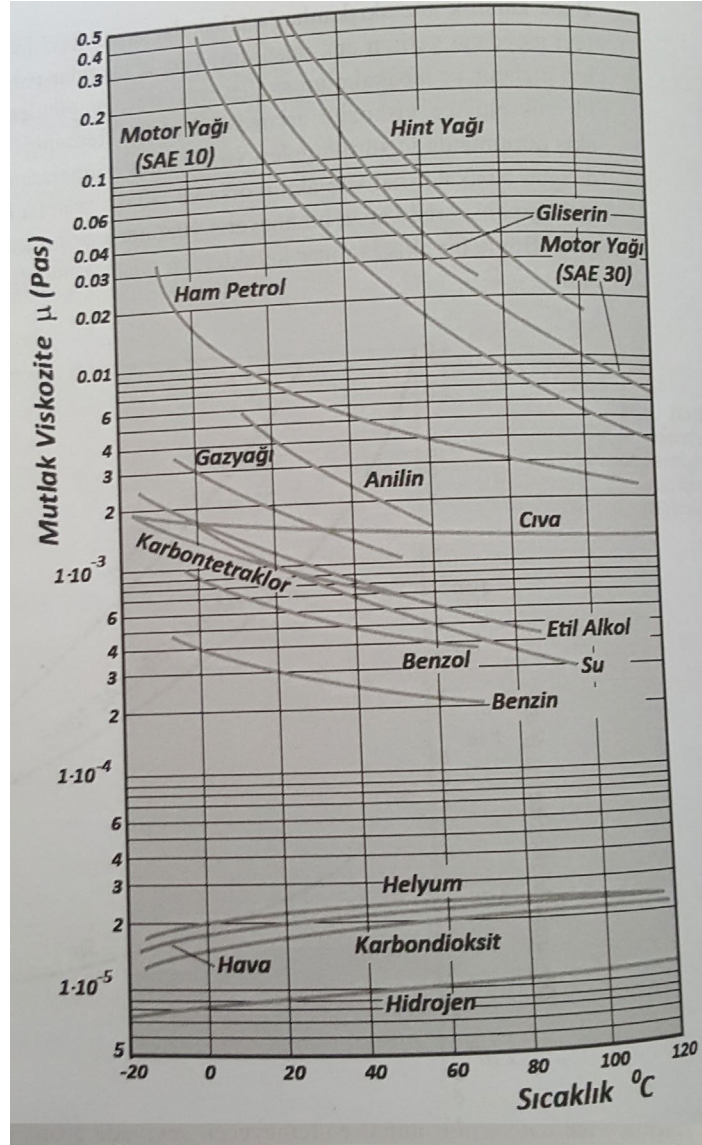
Reoloji, cisimlerin yük, şekil değiştirme ve zaman faktörleri altındaki davranışlarını inceleyen özel bir bilim dalı.

Viskozitenin sıcaklığa bağımlılığı

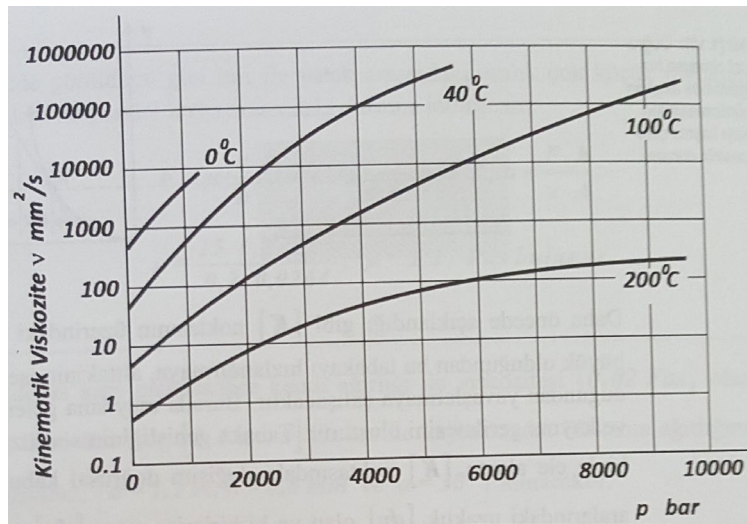
Viskozite akışkan moleküllerinin birbirlerine göre hareketlerinin ve moleküller arasındaki bağılılığın meydana getirdiği bir özelliktir. Sıvı akışkanlarda viskoziteyi meydana getiren ana unsur moleküller arası bağlayıcı kuvvettir. Buna kohezyon veya iç çekim adı verilir. Sıvı akışkanlarda sıcaklık arttıkça bu kuvvet küçülecek ve dolayısıyla viskozite artan sıcaklığa göre azalacaktır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Çeşitli akışkanların dinamik viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi



Şekil 2.12 Çeşitli gaz ve sıvıların dinamik viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi



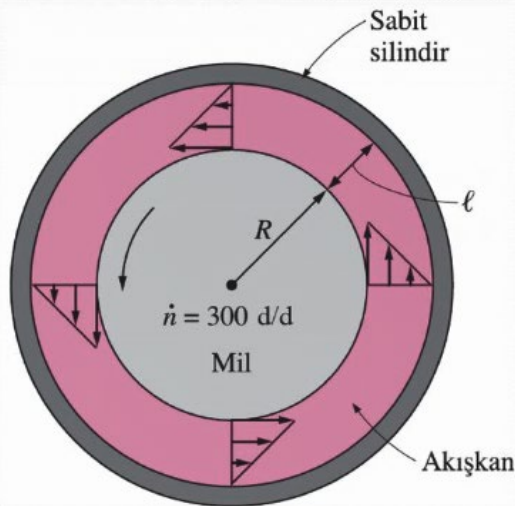
Şekil 2.13 Hidrolik yağların dinamik viskozitelerinin basınca bağlılığı

Tablo 2.2 Bazı akışkanların yoğunluk ve viskozite değerleri

Akışkan	Yoğunluk	Kinematik Viskozite (cst= mm ² /s)
Freon	1,37-149 (21 °C)	0,27-0,32 (21 °C)
Propilen	1,038 (20 °C)	52 (21 °C)
Trietilen	1,125 (20 °C)	40 (21 °C)
Dietilen	1,12 (16 °C)	32 (21 °C)
Etilen	1,125 (16 °C)	17,8 (21 °C)
Hidroklorik asit (% 100)	1,05 (20 °C)	1,9 (20 °C)
Karbolik asit	0,95-1,08 (16 °C)	11,7 (18 °C)
Kemik yağı	0,918 (16 °C)	47,5 (54 °C) 11,6 (100 °C)
Balık yağı	0,928 (16 °C)	32,1 (38 °C) 19,4 (54 °C)
Domuz yağı	0,912-0,925 (16 °C)	41-47,5 (38 °C) 23,4-27,1 (54 °C)
Ringa balık yağı	0,933 (16 °C)	29,8 (38 °C) 18,2 (54 °C)
Sığır parçasından alınan kösele için kullanılan yağ	0,917 (16 °C)	49,7 (38 °C) 27,5 (54 °C)
Ispermeçet yağı	0,883 (16 °C)	23,0 (38 °C) 15,2 (54 °C)
Balina yağı	0,925 (16 °C)	35-39,6 (38 °C) 19,9-23,4 (54 °C)
SAE 10 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	35,4-51,9 (38 °C) 18,2-25,3 (54 °C)
SAE 20 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	51,9-86,6 (38 °C) 25,3-39,9 (54 °C)
SAE 30 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	86,6-125,5 (38 °C) 39,9-55,1 (54 °C)
SAE 40 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	125,5-205,6 (38 °C) 55,1 (54 °C)
SAE 50 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	205,6-352 (38 °C) 15,6-21,6 (99 °C)
SAE 60 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	352-507 (38 °C) 21,6-26,2 (99 °C)
SAE 70 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	507-682 (38 °C) 26,2-31,8 (99 °C)
SAE 80 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	22,000 (0 °C)
SAE 90 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	173,2-324,7 (38 °C) 64,5-108,2 (54 °C)
SAE 140 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	205,6-507 (54 °C) 25,1-42,9 (99 °C)
SAE 250 yağı	0,880-0,935 (16 °C)	>507 (54 °C) >42,9 (99 °C)
Benzin	0,68-0,74 (16 °C)	0,46-0,88 (16 °C) 0,40-0,71 (38 °C)

Hint yağı	0,96 (20 °C)	259,8-324,7 (38 °C) 97,4-129,9 (54 °C)
Cin ahşap yağı	0,943 (20 °C)	308,5 (21 °C) 125,5 (38 °C)
Hindistan cevizi yağı	0,925 (20 °C)	29,8-31,6 (38 °C) 14,69-15,7 (54 °C)
Mısır yağı	0,924 (20 °C)	28,7 (54 °C) 8,59 (100 °C)
Pamuk tohumu yağı	0,88-0,925 (20 °C)	37,9 (38 °C) 20,6 (54 °C)
Keten tohumu yağı	0,925-0,939 (20 °C)	30,5 (38 °C) 18,94 (54 °C)
Zeytin yağı	0,912-0,918 (20 °C)	43,2 (38 °C) 24,1 (54 °C)
Hurma yağı	0,924 (20 °C)	47,8 (38 °C) 26,4 (54 °C)
Yerfıstığı yağı	0,920 (20 °C)	42 (38 °C) 23,4 (54 °C)
Kolza tohumu yağı	0,919 (20 °C)	54,1 (38 °C) 31 (54 °C)
Reçine yağı	0,980 (16 °C)	324,7 (38 °C) 129,9 (54 °C)
Reçine	1,09 (16 °C)	108,2-4400 (93 °C) 216,4-11000 (88 °C)
Susam yağı	0,923 (16 °C)	39,6 (38 °C) 23 (54 °C)
Soya yağı	0,927-0,98 (16 °C)	35,4 (38 °C) 19,64 (54 °C)
Terebentin	0,86-0,87 (16 °C)	2,11 (16 °C) 2,0 (38 °C)
Mısır şurubu	1,4-1,47 (16 °C)	1100-110000 (38 °C) 324,7-13200 (54 °C)
Glikoz	1,35-1,44 (16 °C)	7700-22000 (38 °C) 880-2420 (66 °C)
Bal (İşlenmemiş)	-	73,6 (38 °C)
Yazıcı mürekkebi	1,00-1,38 (16 °C)	550-2200 (38 °C) 238,1-660 (54 °C)
Mum yağı	0,918 (16 °C)	9,07 (100 °C)
Süt	1,02-1,05 (16 °C)	1,13 (20 °C)

Viskozimetre



- Viskozite nasıl ölçülür? Dönen bir viskozimetre ile ölçülebilir:
 - Aralarında ℓ mesafe bulunan iki eş merkezli silindir göz önüne alınız.
 - İçteki silindir döndürülürken dıştaki sabit tutuluyor.
- Kayma gerilmesinin tanımından faydalanarak:

$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy}$$
- $\ell/R \ll 1$ olması durumunda silindirler iki düz plaka olarak düşünülebilir.
- Tork T (dönme momenti) = FR ve teğetsel hız $V = \omega R$
- İç silindirin ıslak yüzey alanı $A = 2\pi RL$. (L , silindir uzunluğu)
- T ve ω ölçülerek, μ hesaplanır.

$$\mu = \frac{Tl}{4\pi^2 R^3 \dot{n} L}$$

n =devir/dakika
(dakikadaki
dönme sayısı)
 $\omega = 2\pi n$

İççe girmiş biri dönel ve diğeri sabit olan piston ve silindir durumunda hız ve kayma gerilmesi Şekil 2.14 de olduğu gibi gösterilir. Burada, kayma gerilmesi, sürtünme kuvveti, sürtünme momenti ve sürtünme gücü eşitlikleri;

