

Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie



**WYDZIAŁ  
CHEMII**  
Uniwersytet Łódzki



**UNIC**



Uniwersytet Łódzki  
Wydział Chemii  
Katedra Chemii Fizycznej

**ADAM BUCZKOWSKI**

**Co trze w cieczy  
– poznajemy lepkość**



**AKADEMIA CIEKAWEJ CHEMII**  
**22.11.2023 r.**



e-mail: [adam.buczowski@chemia.uni.lodz.pl](mailto:adam.buczowski@chemia.uni.lodz.pl)

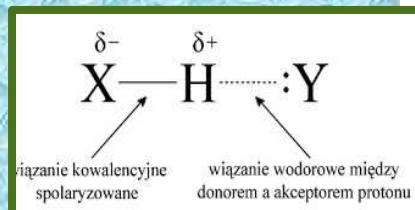
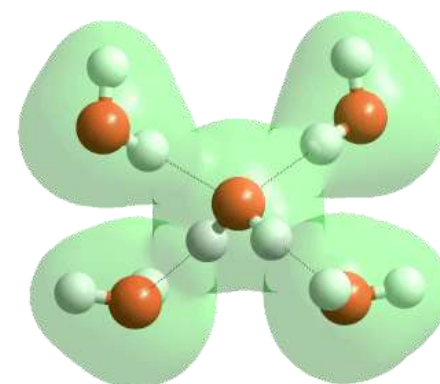
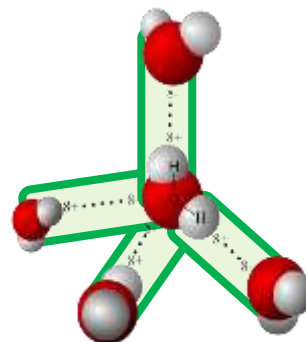
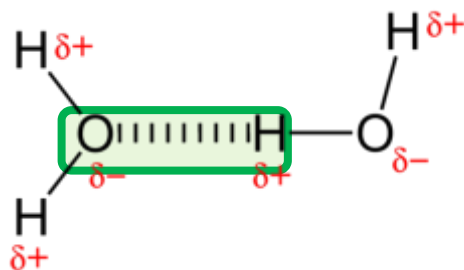
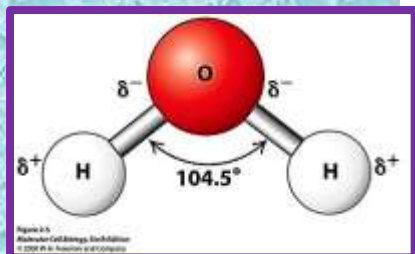
# Wiązanie wodorowe jako przykład oddziaływań niekowalencyjnych

## Oddziaływania

Kowalencyjne  
(wiązania atomowe)

Niekowalencyjne  
(np. międzycząsteczkowe)

- **Oddziaływania międzycząsteczkowe** – inne niż wiązania kowalencyjne siły wiążące atomy i cząsteczki
- Przykładem oddziaływań niekowalencyjnych jest
  - **wiązania wodorowe** zazwyczaj ok.  $20 \text{ kJ mol}^{-1}$  ( $4\text{-}60 \text{ kJ mol}^{-1}$ )



Tworzone jest między atomem wodoru i atomem elektroujemnym zawierającym wolne pary elektronowe

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

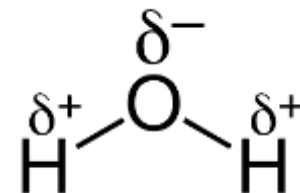
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

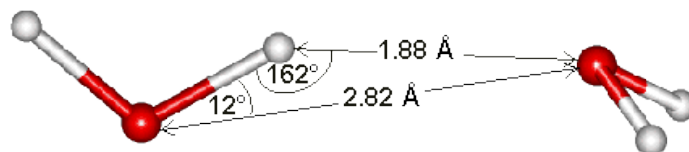
Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

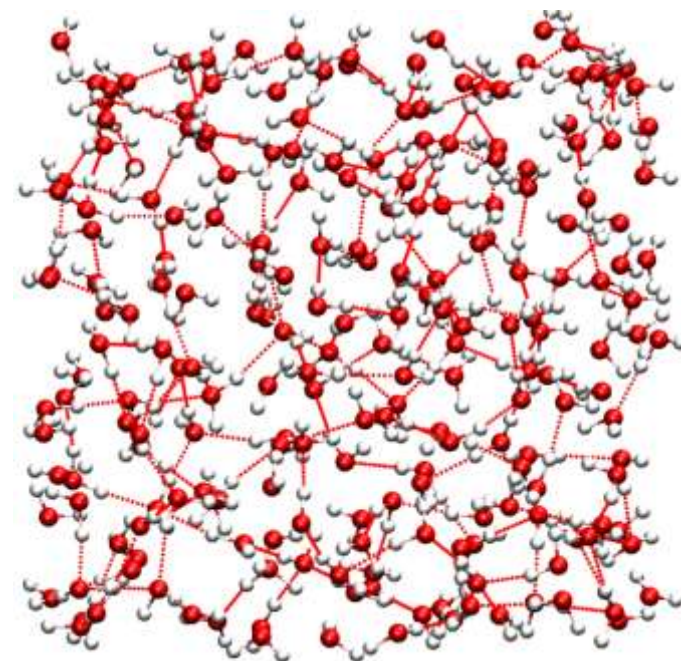
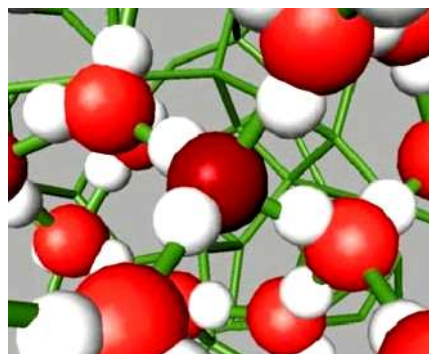
# Struktura ciekłej wody



- **Ciekła woda** – nie jest całkowicie chaotycznym zbiorem molekuł, **zachowuje częściowe uporządkowanie** swej struktury w najbliższym otoczeniu rozpatrywanej molekuly
- Woda może być uważana za szczególnego rodzaju **ciecz zasocjowaną**, w której asocjacja odbywa się **w całej objętości** tworząc sieć trójwymiarową, przy czym jednocześnie **może współistnieć kilka różnych konfiguracji**



[https://water.lsbu.ac.uk/water/water\\_hydrogen\\_bonding.html](https://water.lsbu.ac.uk/water/water_hydrogen_bonding.html)



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

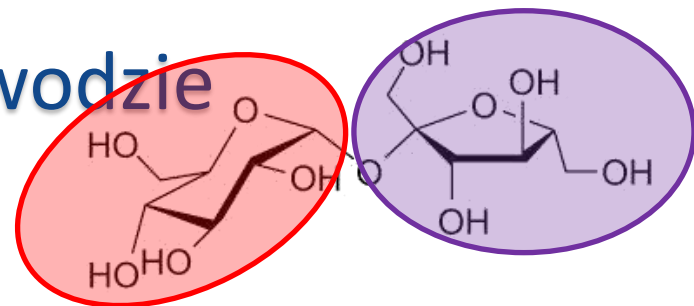
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Roztwór sacharozy w wodzie

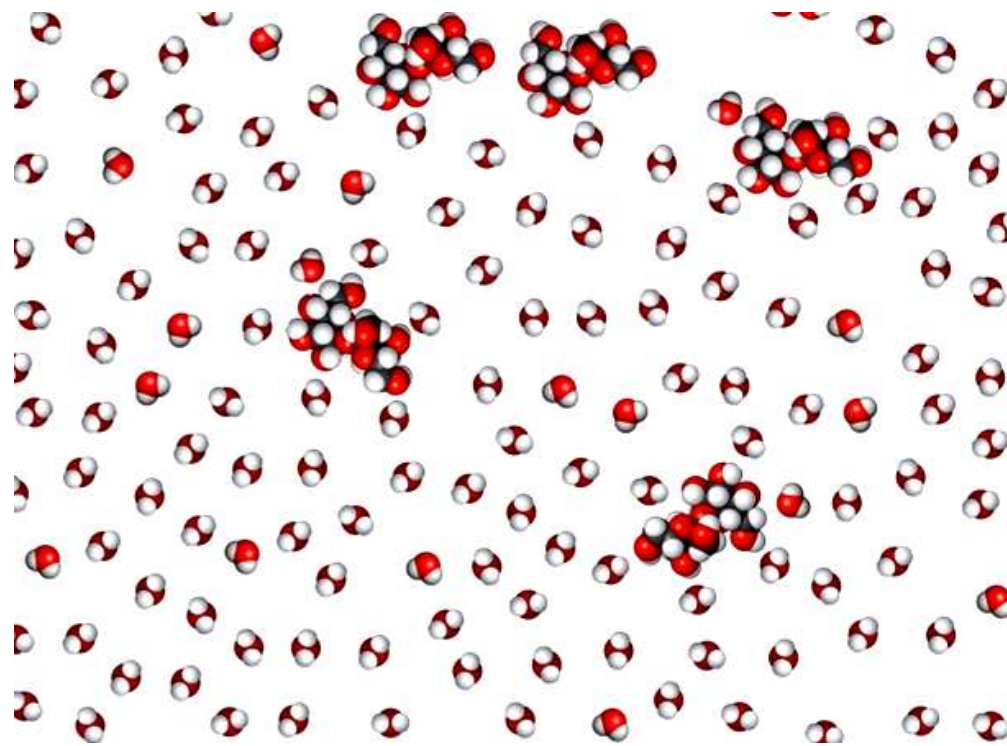


## ■ Częsteczki sacharozy

■ zbudowane są z reszt **glukozy i fraktozy**

■ **liczne grupy hydroksylowe tworzą wiązania wodorowe z cząsteczkami wody**

■ **są dobrze rozpuszczalne w wodzie**



Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie

# Miód pszczeli

- **Miód pszczeli**
  - **Wytwarzany przez pszczoły poprzez przetwarzanie głównie nektaru kwiatowego roślin miododajnych jako pokarm dla rodzin pszczelich**
  - **konsystencja wodnista (tzw. nakrop), bardziej gęsta (tzw. patoka); przechowywany może ulec zestaleniu (tzw. krupiec)**
  - **zawiera:**
    - **20% wody,**
    - **ponad 70% glukozy i fruktozy,**
    - **do 5% sacharozy,**
    - **sole mineralne, kwasy organiczne (np. glukonowy), enzymy, barwniki (karotenoidy), olejki eteryczne, witaminy**



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Miód

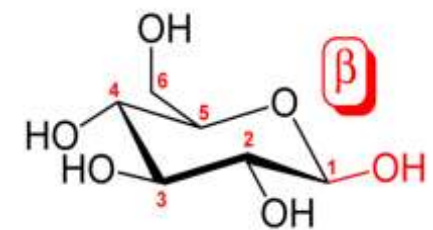
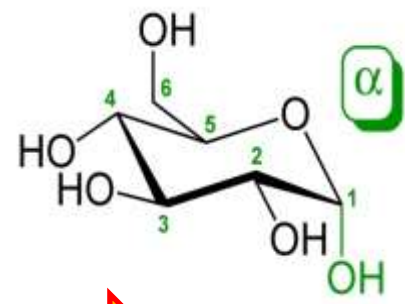


■ zawiera m.in. cukry proste

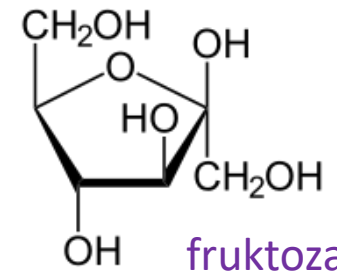
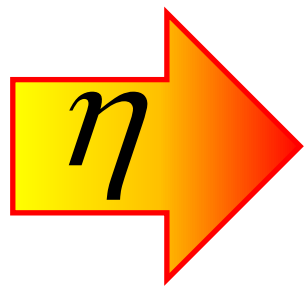
■ **glukozę i fruktozę**

■ **liczne grupy hydroksylowe cząsteczek cukrów mogą tworzyć wiązania wodorowe**

■ **dobrze rozpuszcza się w wodzie**



glukoza



fruktoza

Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

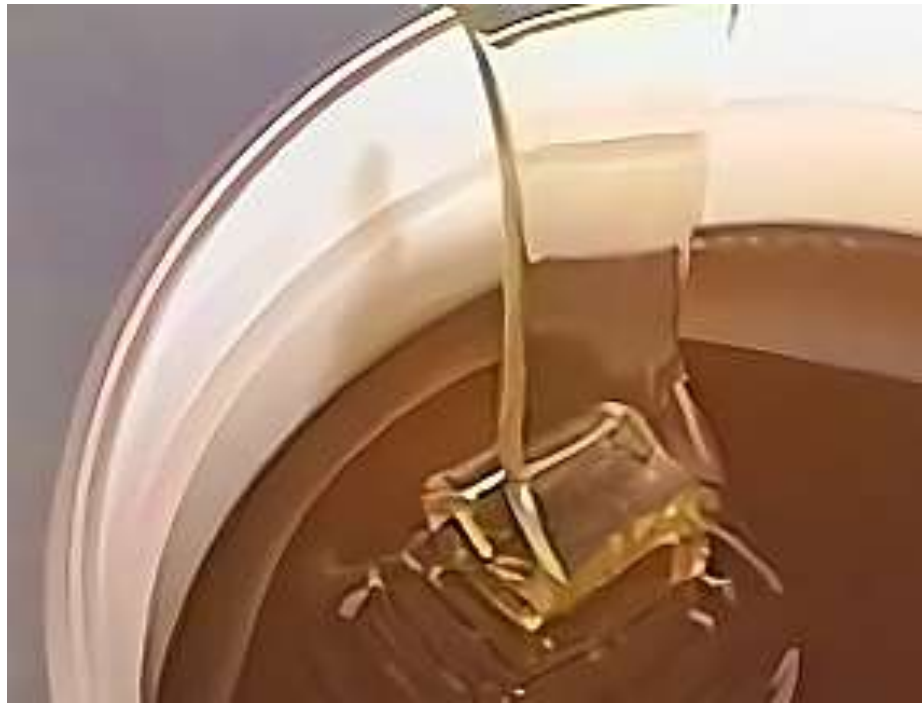
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie

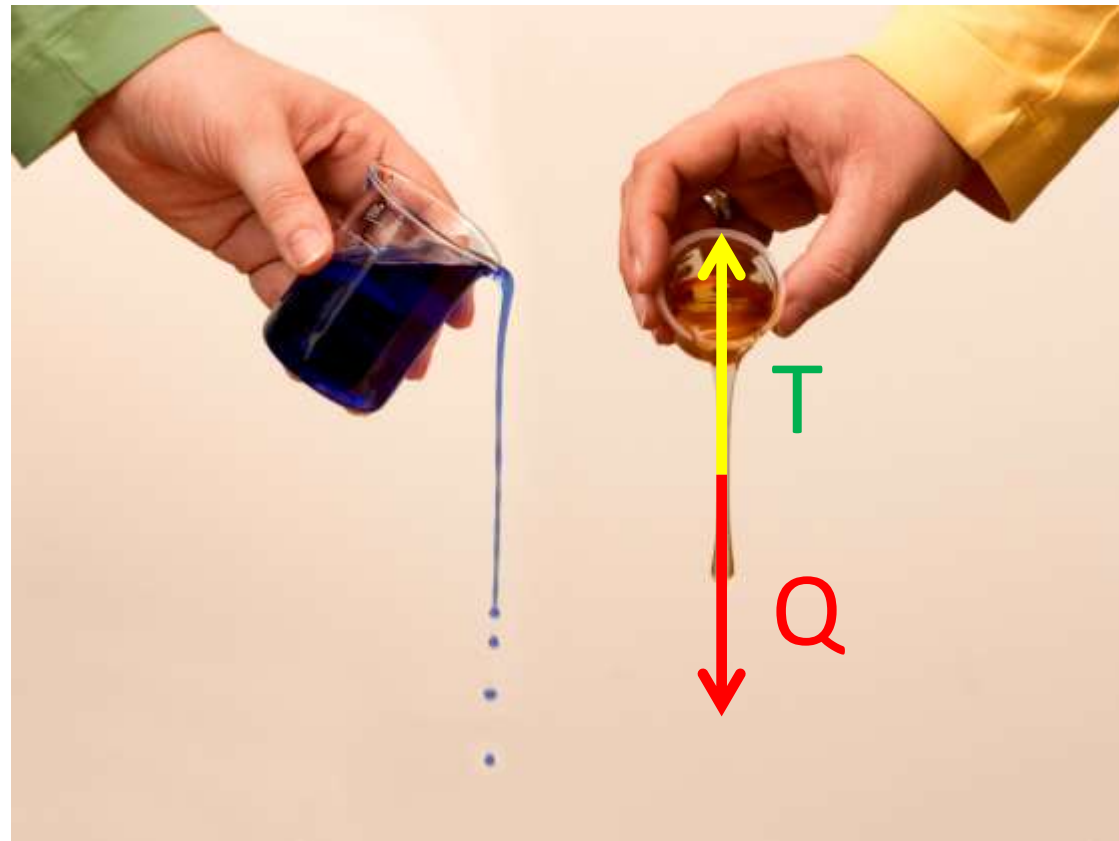
# Świeży miód





# Np. woda i miód

- Wykazują różną zdolność do płynięcia (płynność)
- Siłą powodującą przepływ może być ciężar przepływającej cieczy, której przeciwstawia się siła tarcia wewnętrznego
- Co trze w przepływającej cieczy?



- Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych
- Struktura ciekłej wody i roztworów cukru
- Tarcie
- Przepływ
- Rodzaje przepływu
- Płyny niutonowskie i ich lepkość
- Metoda Stokesa
- Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych
- Płyny nieniutonowskie i ich właściwości
- Podsumowanie



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

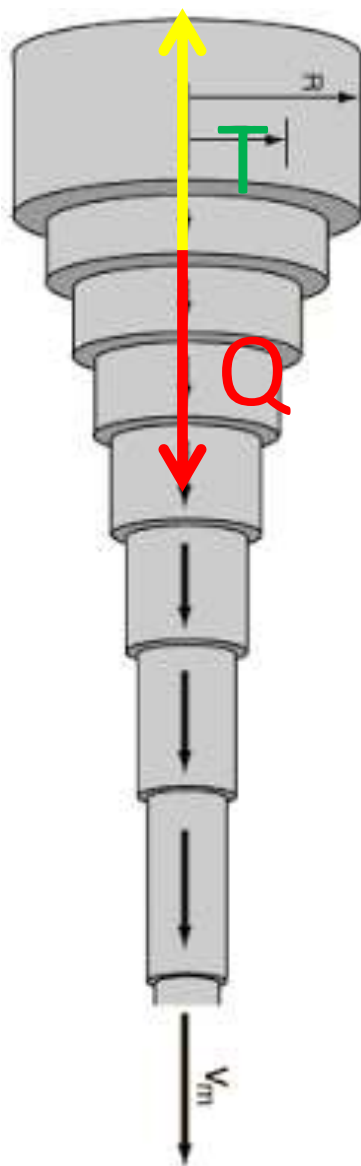
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Woda i miód



- Rozważmy przepływ ciecży przez wąską cylindryczną rurkę (kapilarę)
- Prędkość przepływu ciecży w kapilarze wzrasta od ścianek do środka rurki
- Dla ustalonej odległości od środka prędkość przepływu ciecży jest stała
- Ciecz zachowuje się jakby była zbudowana z warstw wzajemnie przesuwających się względem siebie
- Tarcie tych warstw o siebie determinuje zjawisko lepkiego przepływu ciecży

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

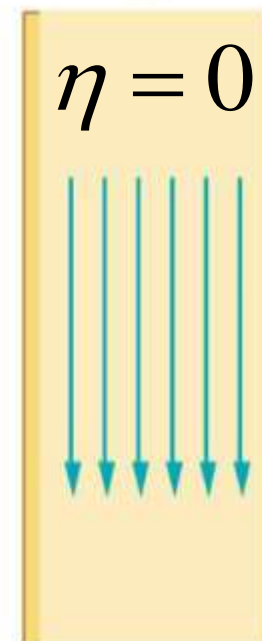
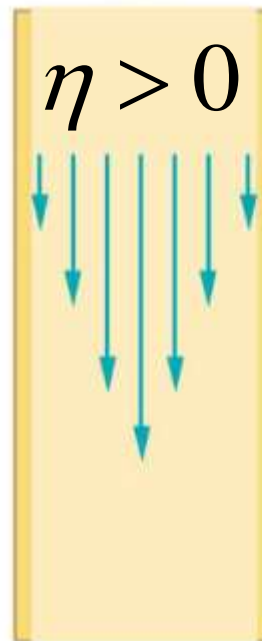
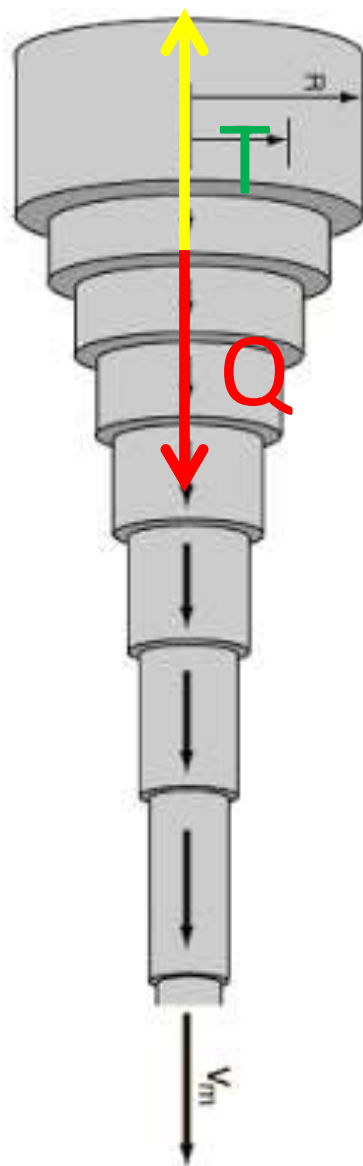
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

## Woda i miód



- Ciecz zachowuje się jakby była zbudowana z warstw wzajemnie przesuwających się względem siebie
- Tarcie tych warstw o siebie determinuje zjawisko lepkiego przepływu cieczy
- Gdyby ciecz wykazywała zerową lepkość, prędkość przepływu byłaby jednakowa w każdym punkcie strugi cieczy

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

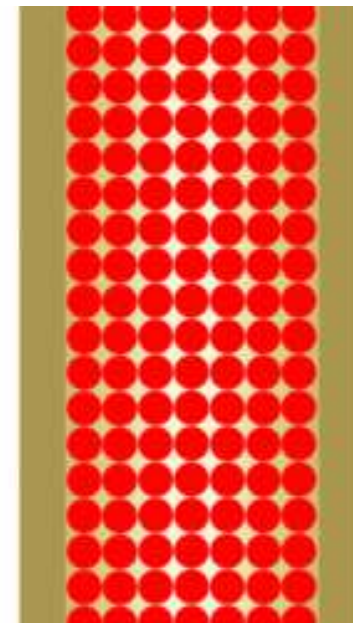
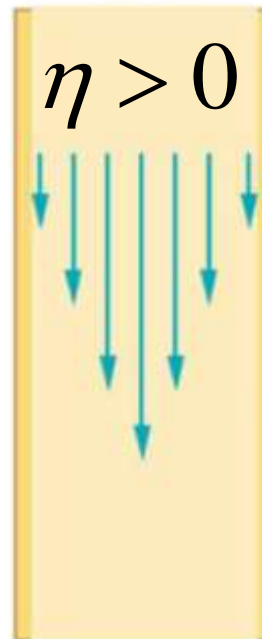
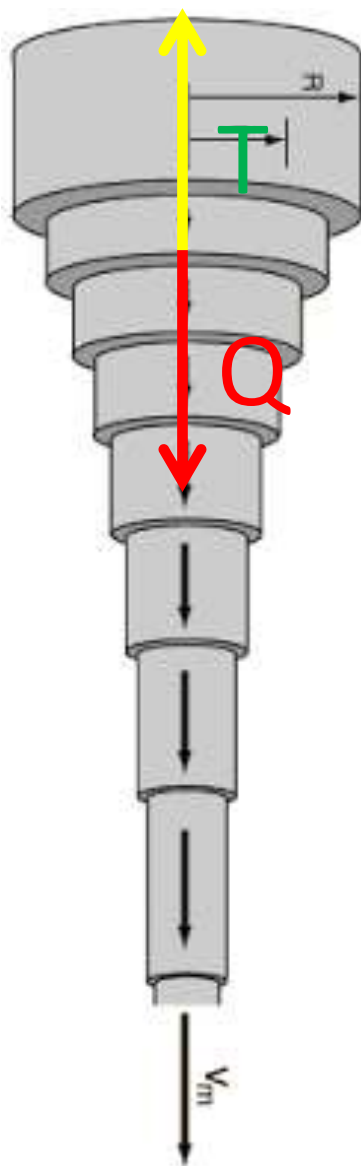
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

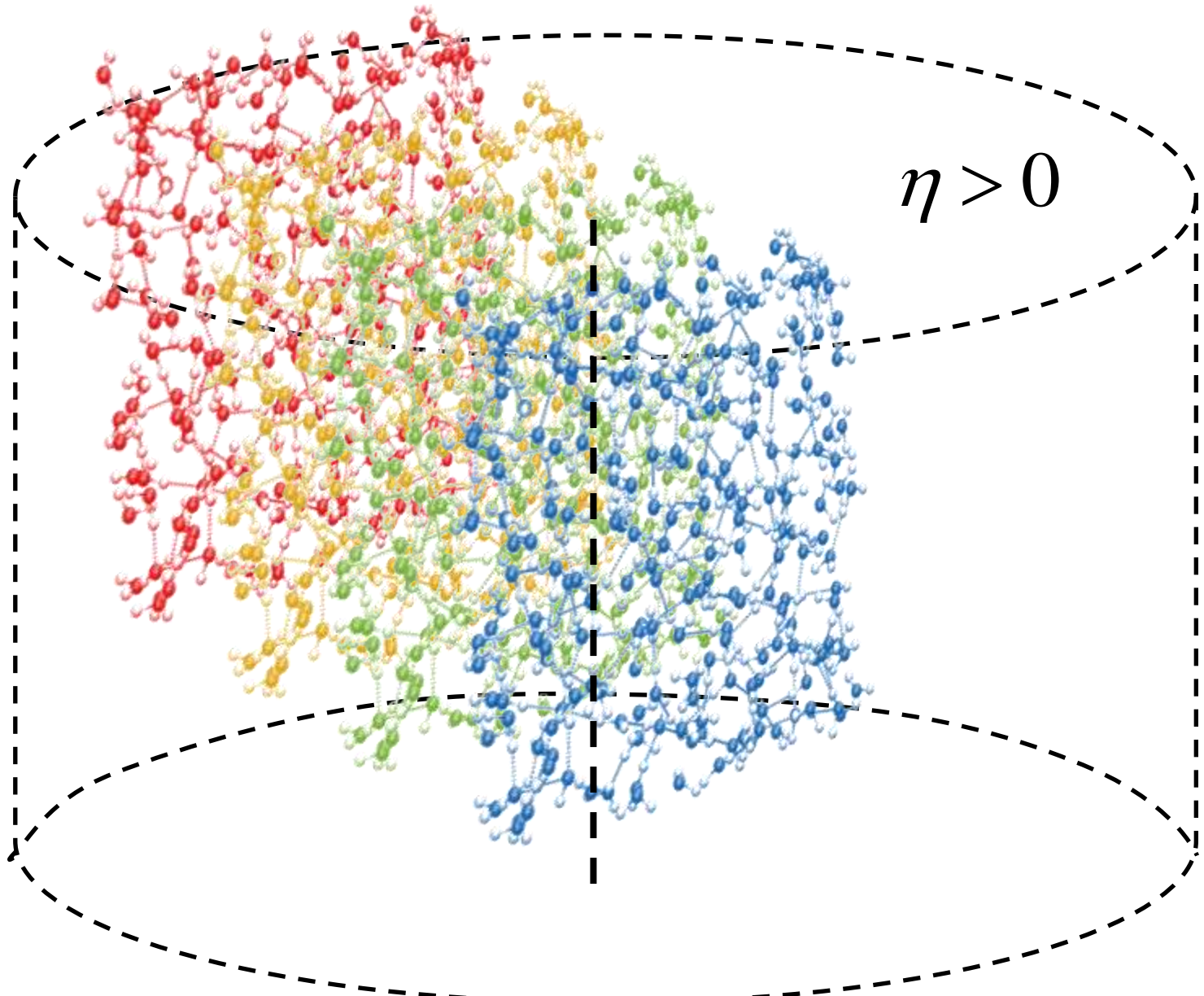
Podsumowanie

## Woda i miód



- Ciecz zachowuje się jakby była zbudowana z warstw wzajemnie przesuwających się względem siebie
- Tarcie tych warstw o siebie determinuje zjawisko lepkiego przepływu ciecży

# Warstwowe (laminarne) elementy cieczy



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

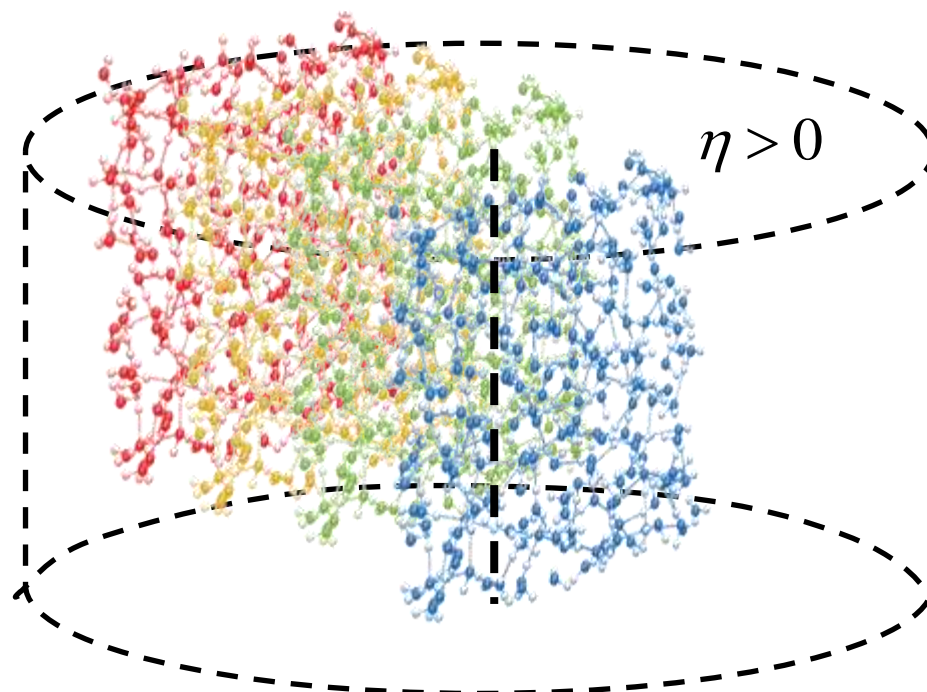
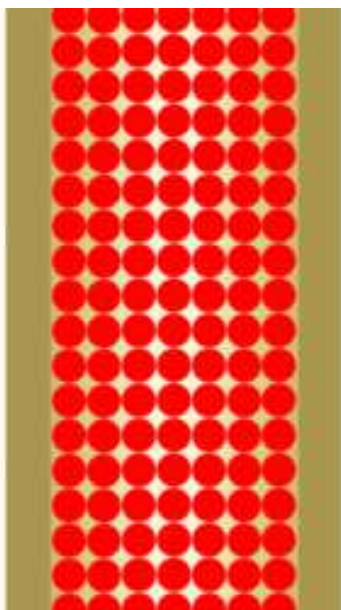
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Warstwowe (laminarne) elementy cieczy



- Aby przesunąć warstwę cieczy, trzeba przewyciężyć wzajemne przyciąganie cząsteczek (związane z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi)

- Lepkość można zinterpretować jako miarę oddziaływań międzycząsteczkowych w cieczy

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

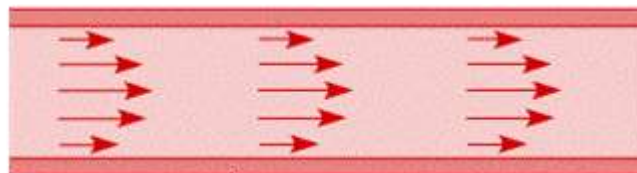
Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Rodzaje przepływu – liczba Reynoldsa



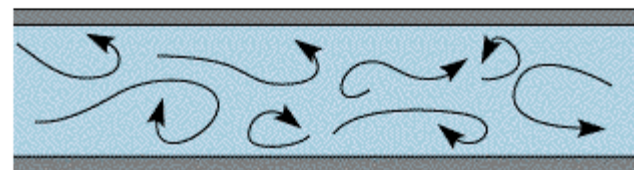
**Laminarny (uwarstwiony)**



- przepływ w równoległych warstwach,
- zachodzi przy niewielkiej prędkości przepływu



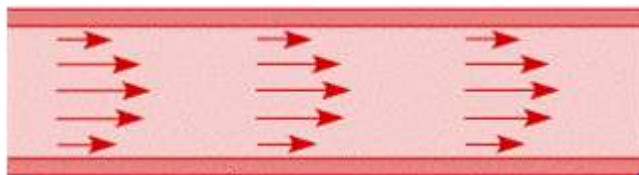
**Turbulentny (burzliwy)**



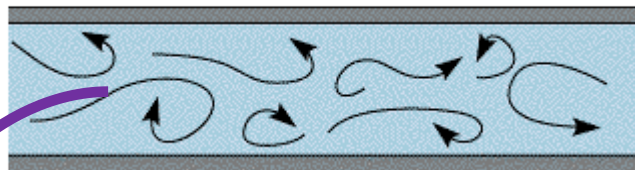
- cząsteczki płynu przemieszczają się po torach kolizyjnych, często kolistych (wirowych).
- wykonują one zarówno ruch postępowy, jak i wsteczny,
- doprowadza to do ich zderzania się i mieszania

# Skutki przepływu: erozyjna działalność rzek

**Laminarny  
(uwarstwiony)**

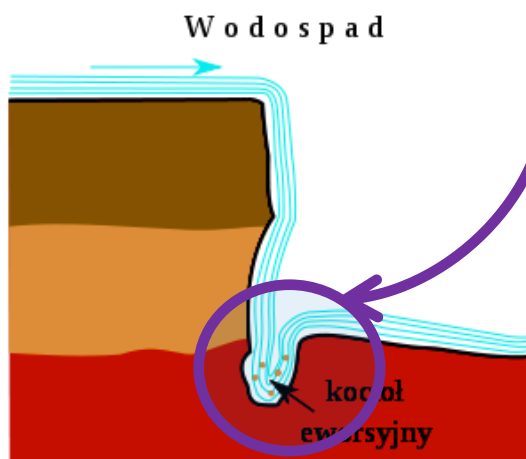


**Turbulentny  
(burzliwy)**



W ciekach wodnych, na skutek ruchu turbulentnego wody, mogą powstawać:

- kotły
- rynny
- misy eworsyjne



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

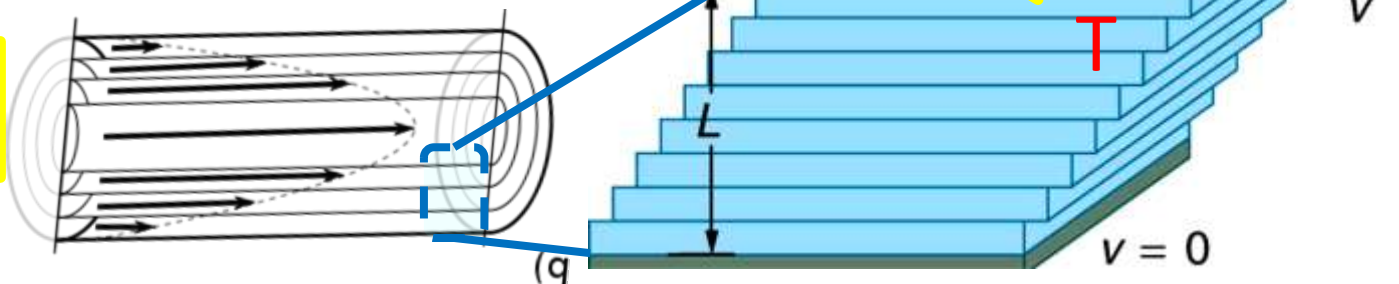
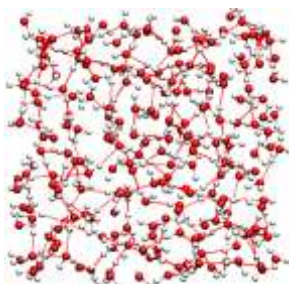
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Warstwowe (laminarne) elementy ciecchy



- Przesuwanie warstewek ciecchy względem siebie napotyka **opór** (tarcie wewnętrzne) wskutek istnienia międzycząsteczkowych sił przyciągania
- Aby przesunąć warstewkę ciecchy, trzeba działać siłą **F** konieczną do pokonania tego oporu
- Siłą tę definiuje równanie Newtona...
  - Jest wprost proporcjonalna do powierzchni **S** i różnicy prędkości warstw **dv**
  - Odwrotnie proporcjonalna do odległości między nimi **dr**



Sir Isaac Newton



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

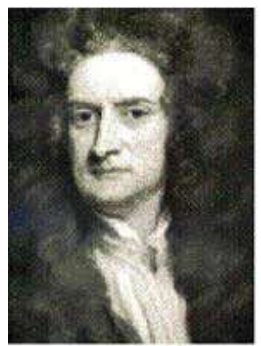
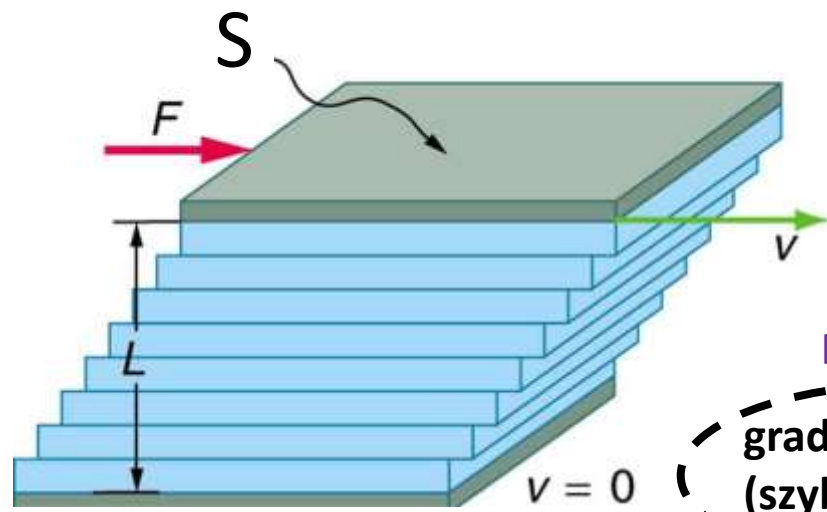
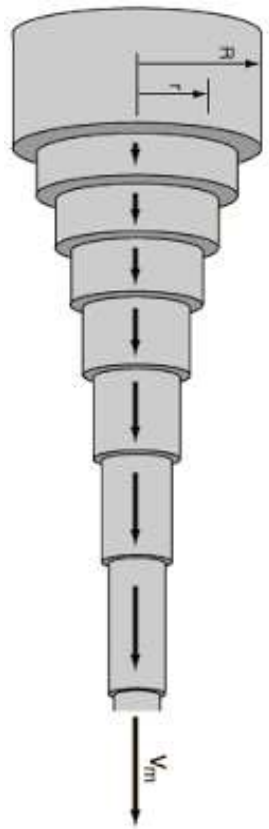
Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Warstwowe (laminarne) elementy cieczy

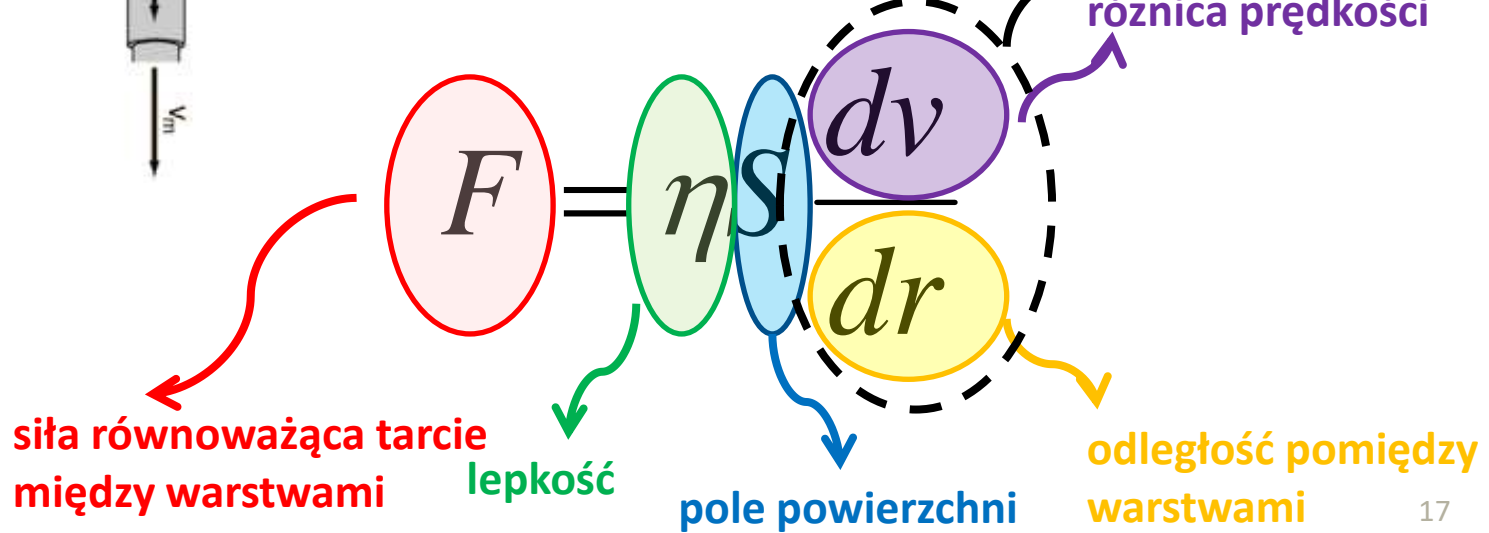
(Hydrodynamiczne prawo Newtona)



Isaac Newton

gradient prędkości (szybkość ścinania)

## Równanie Newtona



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



- Rozważmy kulkę opadającą w cylindrze wypełnionym badaną cieczą (np. miodem)



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



Isaac Newton



- Rozważmy kulkę opadającą w cylindrze wypełnionym badaną cieczą
- Na opadającą kulkę działają trzy siły:
  - ciężar kulki ( $\downarrow$ )

$$(\downarrow) Q = m_k g$$

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k}$$

$$(\downarrow) Q = (V_k \rho_k) g$$

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

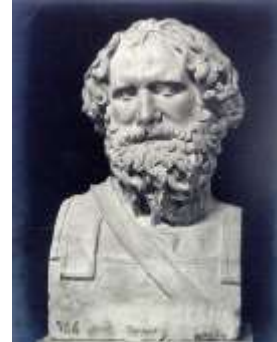
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



Archimedes



■ Na opadającą kulkę działają trzy siły:

■ ciężar kulki (↓)

■ siła wyporu (↑)

■ Prawo Archimedesesa

■ Siła wyporu działająca na ciało zanurzone w płynie jest skierowana pionowo do góry – przeciwie do ciężaru

■ Wartość siły wyporu jest równa ciężarowi płynu wypartego przez to ciało

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

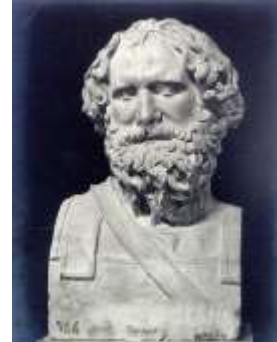
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



Archimedes



- Na opadającą kulkę działają trzy siły:

- ciężar kulki (↓)

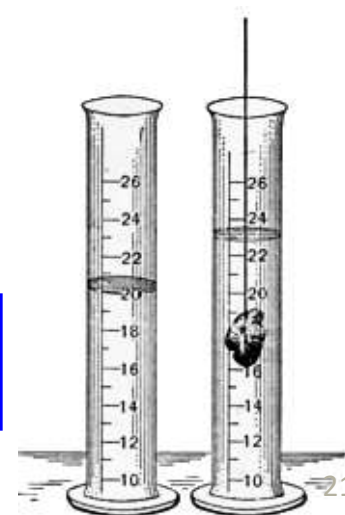
- siła wyporu (↑)

- Prawo Archimedesesa:

Wartość siły wyporu jest równa ciężarowi płynu wypartego przez to ciało

$$(\uparrow) W = m_c g$$

$$(\uparrow) W = (V_k \rho_c) g$$



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



George Stokes



■ Na opadającą kulkę działają trzy siły:

■ ciężar kulki ( $\downarrow$ )

■ siła wyporu ( $\uparrow$ )

■ siła oporu lepkiego ( $\uparrow$ )

## Prawo Stokesa (1851 r.)

■ Siła oporu której doznaje niewielka kulka poruszająca się w cieczy zależy od lepkości cieczy

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



## Prawo Stokesa (1851 r.)



George Stokes

- Siła oporu której doznaje niewielka kulka poruszająca się w cieczy zależy od lepkości cieczy

$$F = 6\pi \eta r v$$

siła oporu      lepkość      promień kulki      prędkość kulki (względem płynu)

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

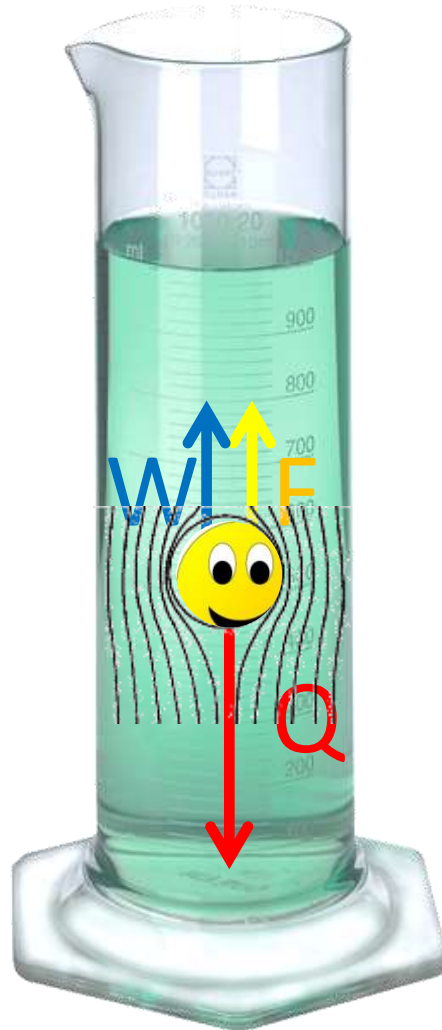
Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

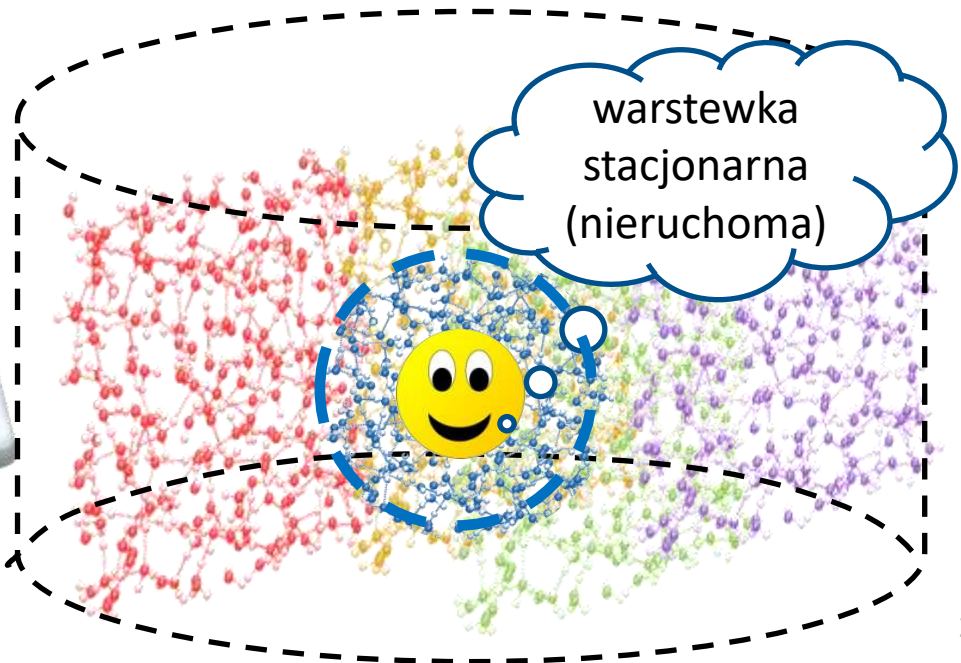
George Stokes



# Jak zmierzyć lepkość?



To tylko opadająca kulka...  
Gdzie tu trą laminarne elementy objętości ?





Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

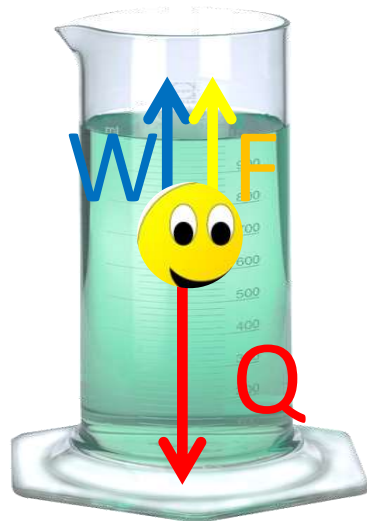
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

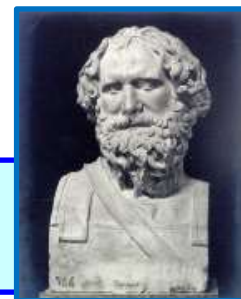
Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

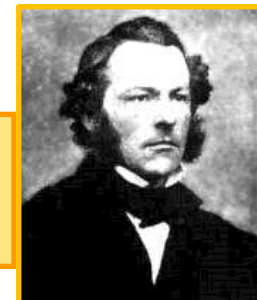
# Jak zmierzyć lepkość? antyk



$$(\uparrow)W = (V_k \rho_c)g$$



pozytywizm



$$(\uparrow) F = 6\pi\eta r v$$

$$(\downarrow) Q = (V_k \rho_k)g$$

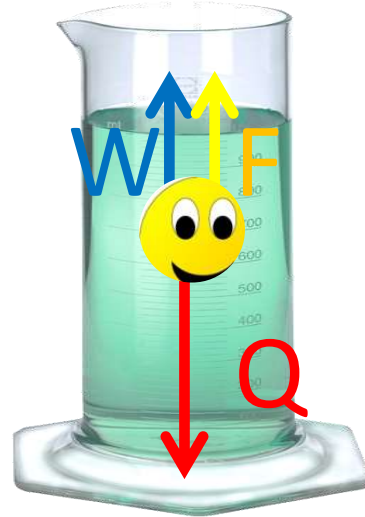


barok

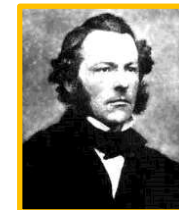
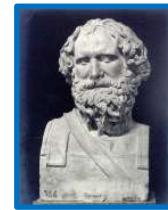
- Siła oporu której doznaje niewielka kulka poruszająca się w cieczy zależy od jej lepkości
- Na opadającą kulkę działają trzy siły:
  - ciężar kulki ( $\downarrow$ )
  - siła wyporu ( $\uparrow$ )
  - siła oporu lepkiego ( $\uparrow$ )

# Jak zmierzyć lepkość?

- Kulka opada ruchem jednostajnym
- Zgodnie z I zasadą dynamiki działające siły muszą się równoważyć:



$$W(\uparrow) + F(\uparrow) = Q(\downarrow)$$



$$(\uparrow)W = (V_k \rho_c)g$$

$$(\uparrow)F = 6\pi\eta r v$$

$$(\downarrow)Q = (V_k) \rho_k g$$

$$(V_k \rho_c)g + 6\pi\eta r v = (V_k) \rho_k g$$

warunek  
równowagi

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

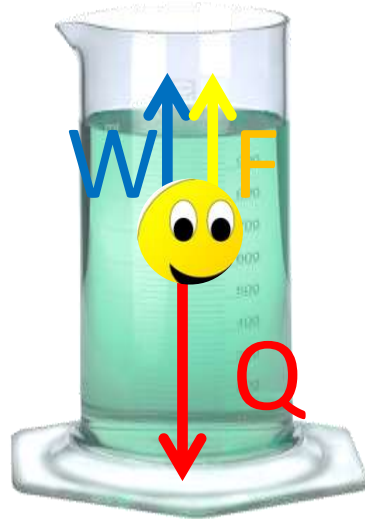
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



$$(V_k \rho_c)g + 6\pi\eta r v = (V_k) \rho_k g$$



$$V_k = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \rho_c g + 6\pi\eta r v = \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \rho_k g$$

$$\eta = \frac{2g}{9} \cdot \frac{r^2 (\rho_k - \rho_c)}{v}$$

Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

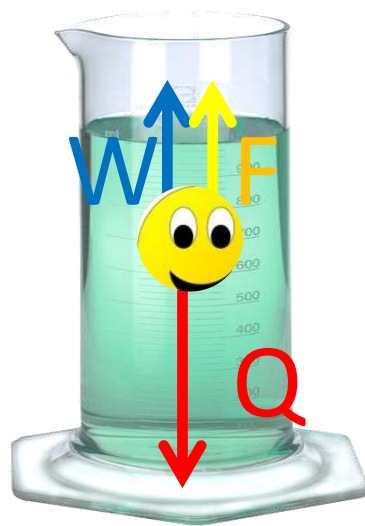
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



$$(V_k \rho_c)g + 6\pi\eta r v = (V_k) \rho_k g$$

$$\eta = \frac{2g}{9} \cdot \frac{r^2 (\rho_k - \rho_c)}{v}$$

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

$$\eta = \left( \frac{2g}{9} \cdot \frac{r^2}{L} \right) (\rho_k - \rho_c) t$$

$$C = \frac{2g}{9} \cdot \frac{r^2}{L}$$

$$\eta = C \cdot (\rho_k - \rho_c) t$$

**Wielkości stałe**

Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

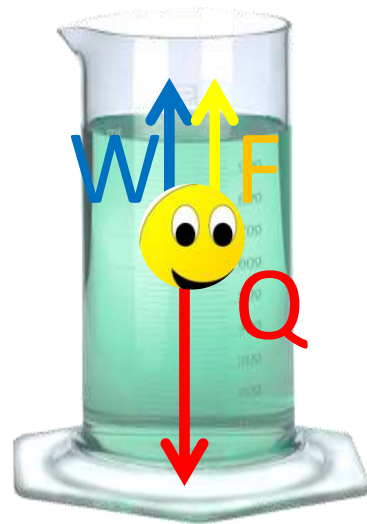
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?



$$(V_k \rho_c)g + 6\pi\eta r v = (V_k) \rho_k g$$

$$\eta = C \cdot (\rho_k - \rho_c) t$$

Wielkości stałe

$$\Delta \rho_c \ll \Delta t$$

$$\eta(\rho_c, t) \rightarrow \eta(t)$$

$$\eta \propto t$$

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Wiskozymetr kulkowy Hopplera

- pomiar czasu opadania kulki w cieczy

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

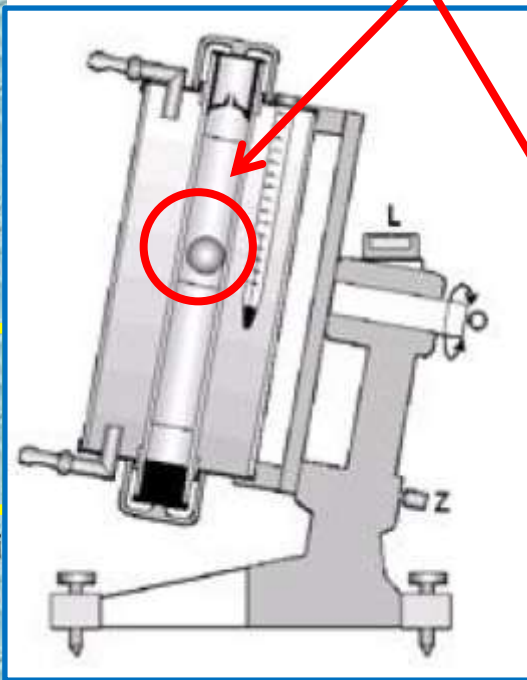
Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

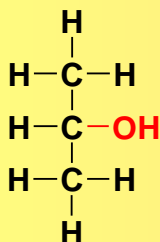
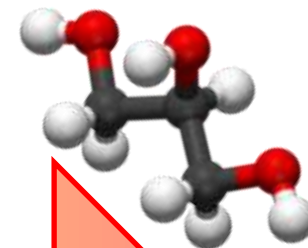
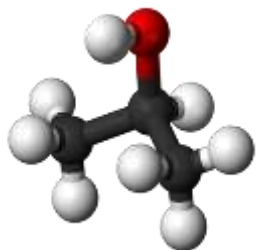
Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

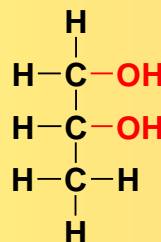
Podsumowanie

# Jak zmierzyć lepkość?

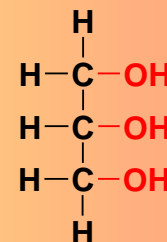
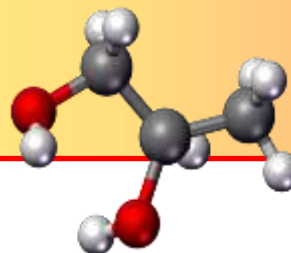
- Czas opadania kulki jest proporcjonalny do lepkości cieczy
- W cylindrze wypełnionym cieczą o większej lepkości kulka opada dłużej na dno naczynia dłużej
- Badając czas opadania kulki w cylindrach wypełnionych badanymi cieczami możemy porównać lepkość tych cieczy



izopropanol



glikol propylenowy



gliceryna

$\eta$

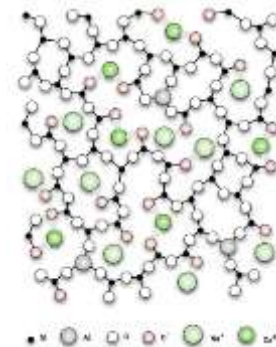
# Woda i miód i inne płyny



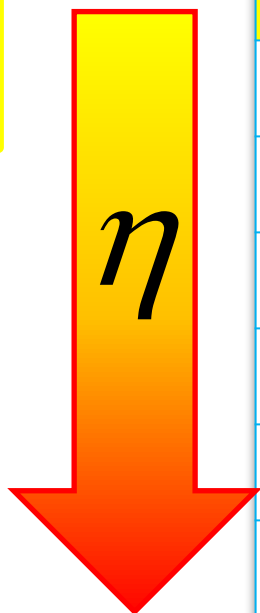
$$\eta \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$



$$\eta \approx 1 \cdot 10^1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$



Płyn	Lepkość [Pa·s]
Powietrze	$1.983 \times 10^{-5}$
Woda	$1 \times 10^{-3}$
Oliwa	$1 \times 10^{-1}$
Glicerol	$1 \times 10^0$
Miód	$1 \times 10^1$
Szkło	$1 \times 10^{40}$



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie





Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Miód

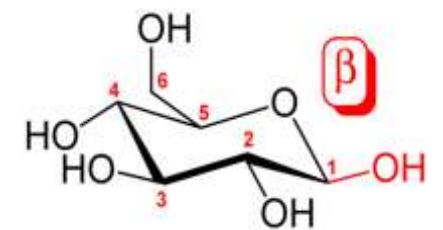
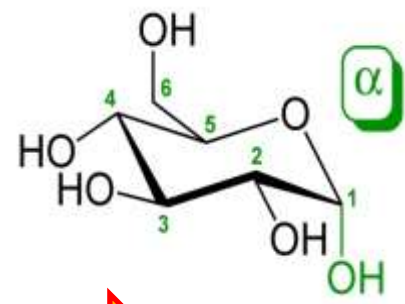


■ zawiera m.in. cukry proste

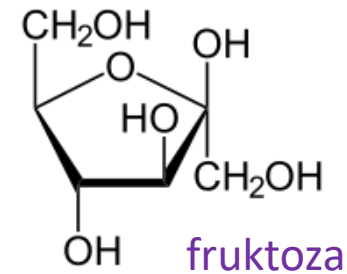
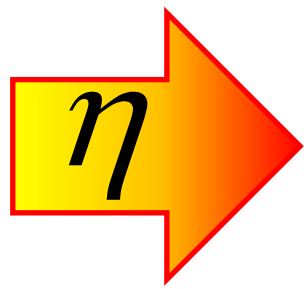
■ **glukozę i fruktozę**

■ **liczne grupy hydroksylowe cząsteczek cukrów mogą tworzyć wiązania wodorowe**

■ **dobrze rozpuszcza się w wodzie**



glukoza



fruktoza

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

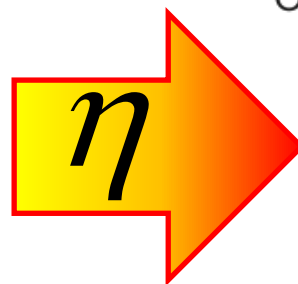
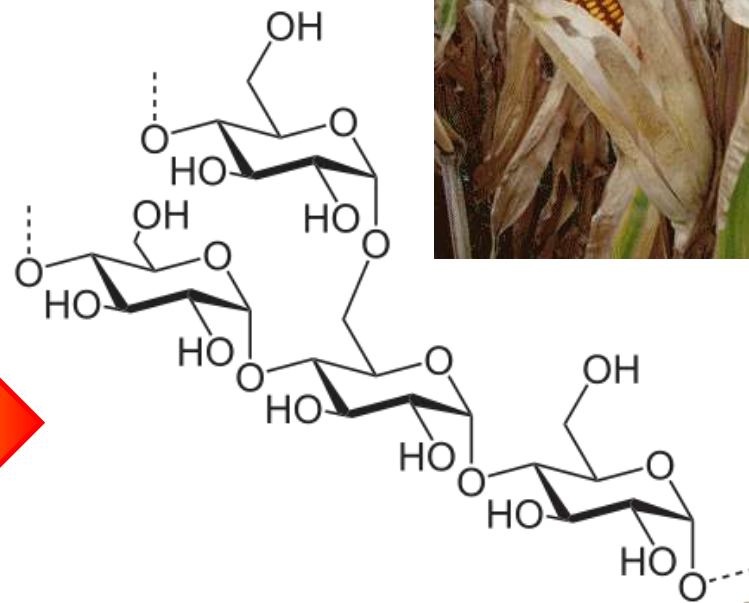
Podsumowanie

# Skrobia



## ■ wielocukier

- Zbudowany z reszt glukozy
- liczne grupy hydroksylowe cząsteczek cukrów mogą tworzyć wiązania wodorowe
- miesza się w wodzie tworząc zawiesinę...



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

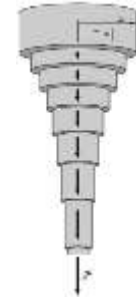
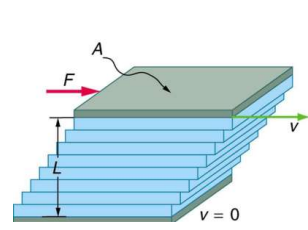
Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nienitonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz niutonowska

## Równanie Newtona



Isaac Newton

$$F = \eta S \frac{dv}{dx}$$

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dx}$$

**napężenie styczne (ścinające)**

$$\tau = \frac{F}{S}$$

**szybkość ścinania**

$$\gamma = \frac{dv}{dx}$$

$$\tau = \eta \gamma$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \text{const}$$

lepkość jako stały współczynnik  
→ płyn niutonowski

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

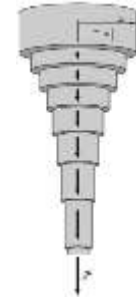
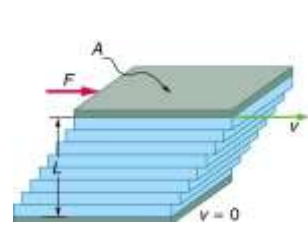
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nienitonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz niutonowska



Isaac Newton

$$\tau = \frac{F}{S} \quad \text{naprężenie styczne (ścinające)}$$

$$\gamma = \frac{dv}{dx} \quad \text{szybkość ścinania}$$

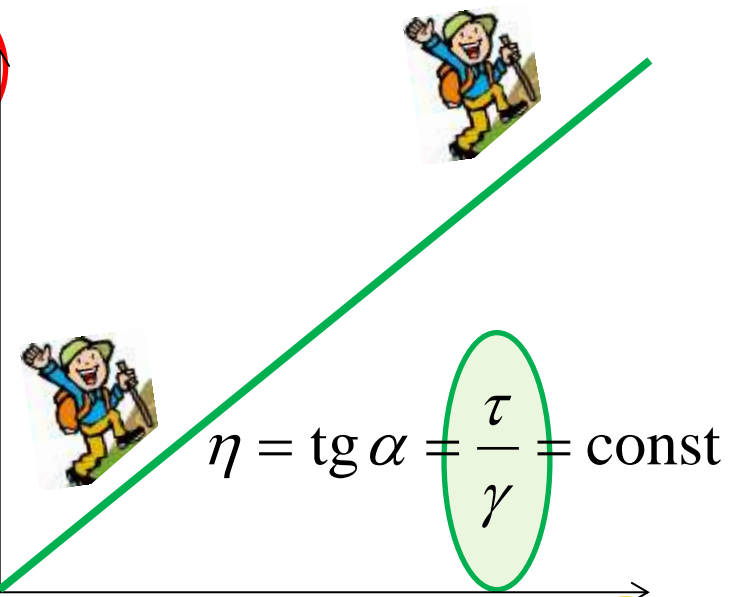
$\tau$

## Równanie Newtona

(Hydrodynamiczne prawo Newtona)

$$\tau = \eta \gamma$$

lepkość jako stały współczynnik



Naprężenie ścinające w płynie jest wprost proporcjonalne do występującej w nim szybkości ścinania.

$\gamma$

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz nieniuonowska

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dx} \Rightarrow \eta = \frac{\tau}{\gamma} \neq \text{const}$$

napężenie styczne (ścinające)  $\tau$   
 szybkość ścinania  $\gamma$   
 Ciecz nieniuonowska

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\gamma = \frac{dv}{dx}$$

$$\tau = \eta \gamma$$

$$\eta \neq \text{const}$$

Ciecz nieniuonowska

- Przyłożona siła wpływa na szybkość przepływu
- Ciecz płynie inaczej w zależności od siły jaką przyłożymy

Wraz ze wzrostem szybkości ścinania



Lepkość wzrasta



Lepkość maleje

- Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych
- Struktura ciekłej wody i roztworów cukru
- Tarcie
- Przepływ
- Rodzaje przepływu
- Płyny niutonowskie i ich lepkość
- Metoda Stokesa
- Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych
- Płyny nieniutonowskie i ich właściwości**
- Podsumowanie

# Ciecz nieniutonowska

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\gamma = \frac{dv}{dx}$$

$$\tau = \eta \gamma \quad \eta \neq \text{const}$$

Wraz ze wzrostem szybkości ścinania



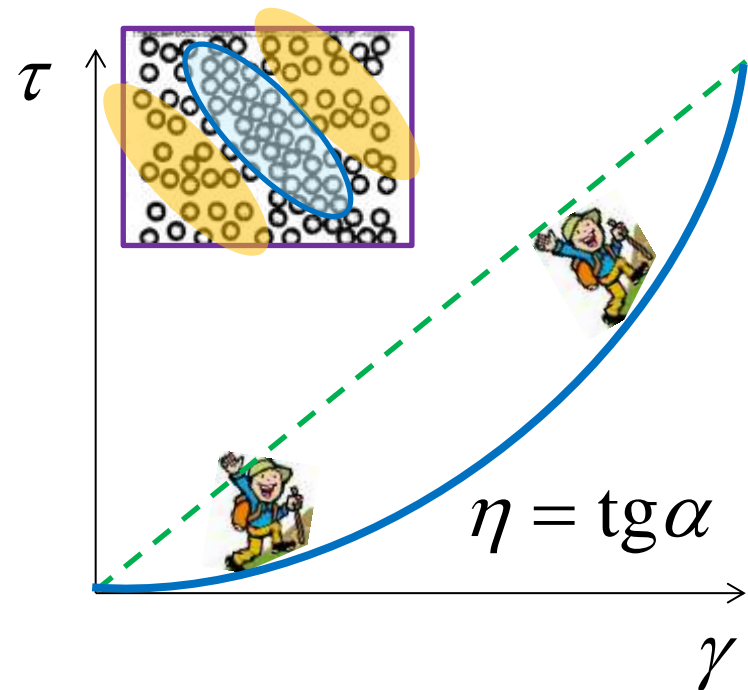
Lepkość wzrasta

Lepkość maleje



Ciecz dylatacyjna  
(zagęszczana ścinaniem)

- Zawiesina skrobi w wodzie, mokry piasek
- zawiesiny o dużym stężeniu ciała stałego
- Zawiesina koloidalna w stanie stabilnym ulega flokulacji i dylatacji



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

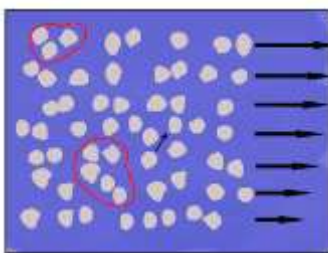
Podsumowanie

# Ciecz dylatacyjna

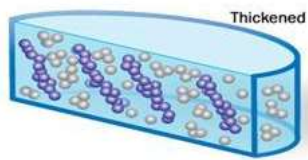
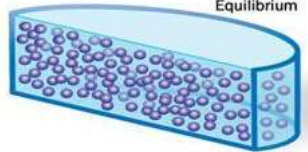
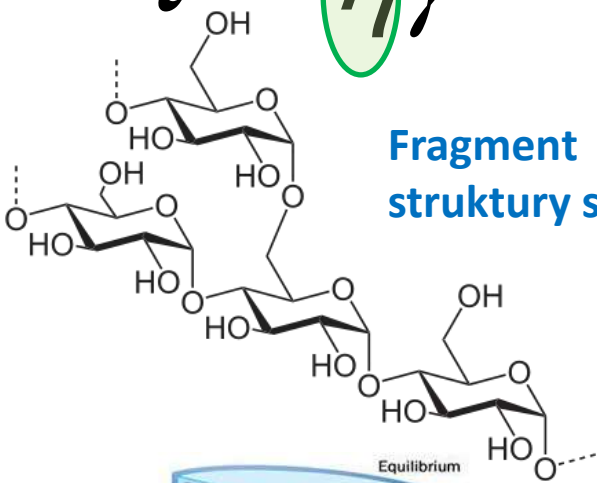
$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \neq \text{const}$$

napężenie styczne (ścinające)  $\tau$

szybkość ścinania  $\gamma$



$$\tau = \eta \gamma$$



- Przyłożona siła wpływa na szybkość przepływu
- Ciecz płynie inaczej w zależności od siły jaką przyłożymy



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz dylatacyjna

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq \text{const}$$

napężenie styczne (ścinające)  $\tau$

szybkość ścinania  $\dot{\gamma}$



$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$



[https://pl.wikipedia.org/wiki/P%C5%82yn\\_nienewtonowski](https://pl.wikipedia.org/wiki/P%C5%82yn_nienewtonowski)

- Przyłożona siła wpływa na szybkość przepływu
- Ciecz płynie inaczej w zależności od siły jaką przyłożymy



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz dylatacyjna

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \neq \text{const}$$

napężenie styczne (ścinające)  $\tau$

szybkość ścinania  $\gamma$



$$\tau = \eta \gamma$$



- Przyłożona siła wpływa na szybkość przepływu
- Ciecz płynie inaczej w zależności od siły jaką przyłożymy



# Ciecz dylatacyjna



- Po niektórych płynach dylatacyjnych można chodzić...

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz dylatacyjna



Warstwa wzmacniająca zbroi...

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych



- Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych
- Struktura ciekłej wody i roztworów cukru
- Tarcie
- Przepływ
- Rodzaje przepływu
- Płyny niutonowskie i ich lepkość
- Metoda Stokesa
- Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych
- Płyny nieniutonowskie i ich właściwości**
- Podsumowanie

# Ciecz nieniutonowska

$$\tau = \frac{F}{S}$$

$$\gamma = \frac{dv}{dx}$$

$$\tau = \eta \gamma \quad \eta \neq \text{const}$$

Wraz ze wzrostem szybkości ścinania



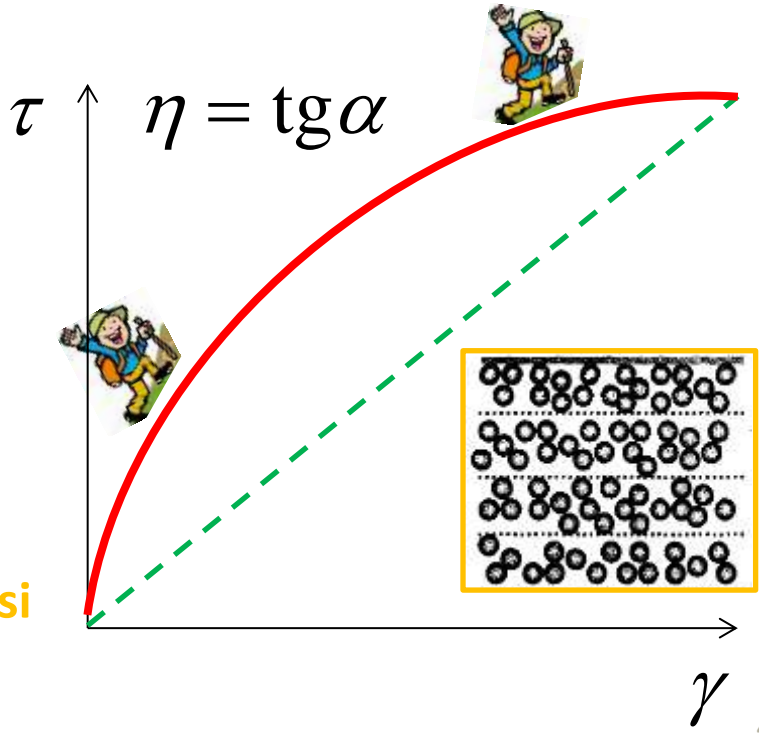
Lepkość wzrasta



Lepkość maleje

## Ciecz pseudoplastyczna (rozrzedzana ścinaniem)

- pulpa papierowa, szampon, farba, krew, lawa, lakier do paznokci
- asymetryczne cząsteczki podlegają stopniowemu uporządkowaniu
- układanie się dłuższych osi cząsteczek wzdłuż linii płynięcia



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

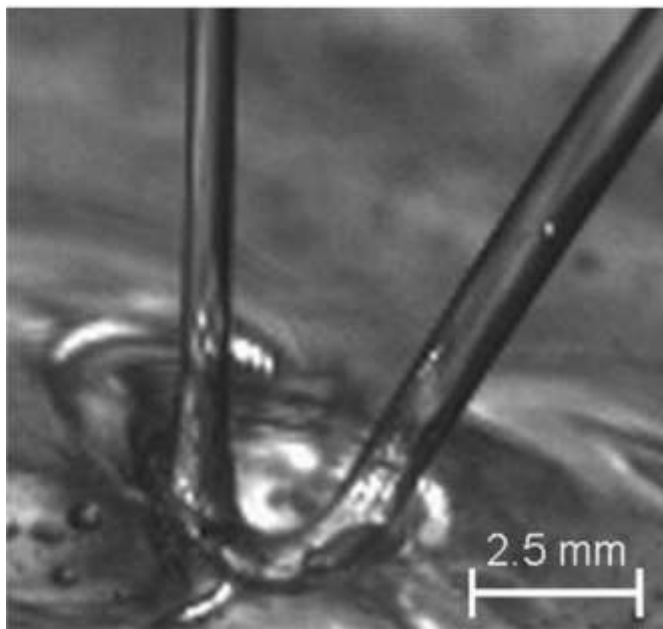
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniutonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz pseudoplastyczna



10.1088/1742-5468/2006/07/P07007

■ Szampon wykazujący efekt Kaye...



Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniutonowskie i  
ich właściwości

Podsumowanie

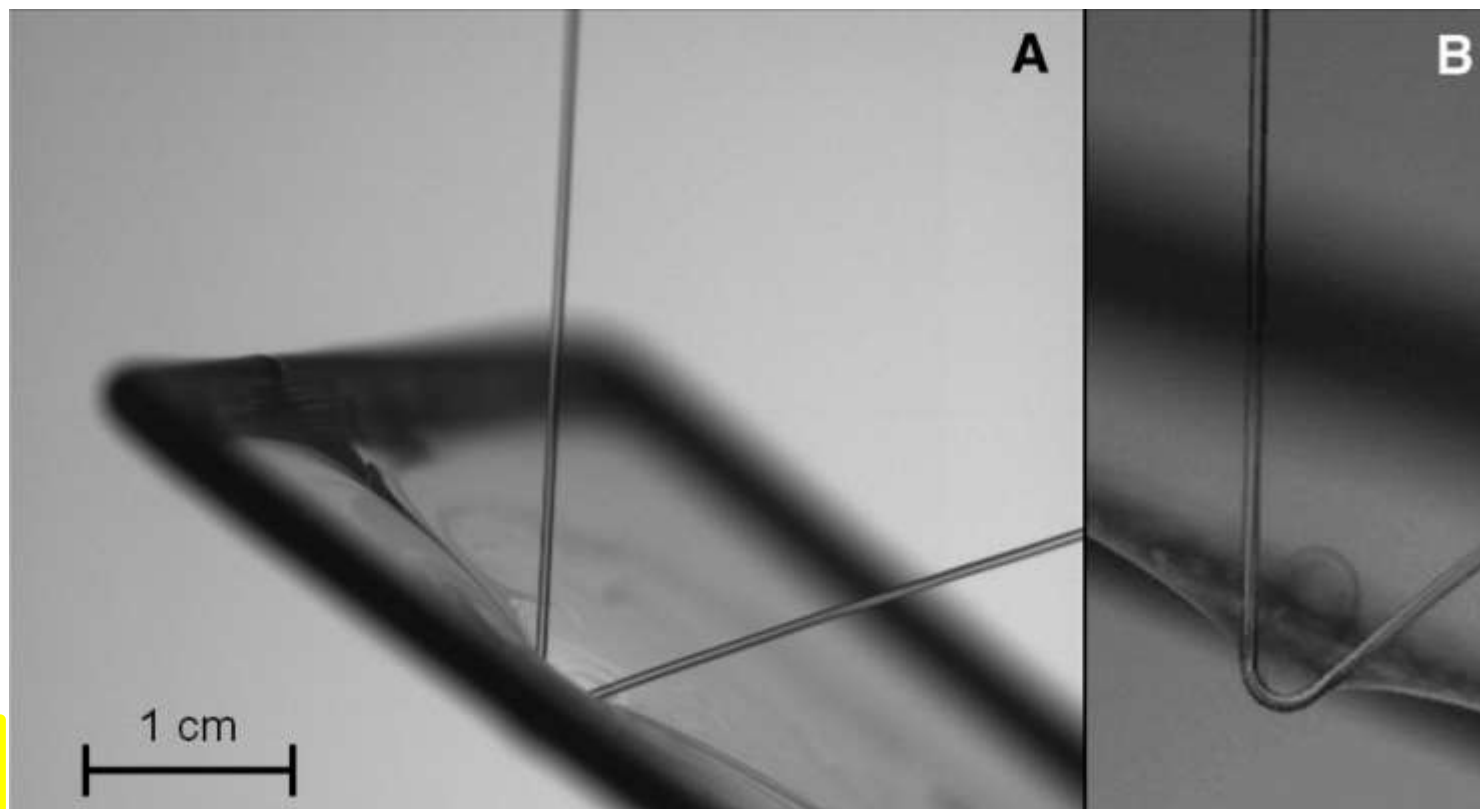
# Ciecz pseudoplastyczna



■ Szampon wykazujący efekt Kaye...



# Ciecz pseudoplastyczna – efekt Kaye



- Mydło w płynie wykazujące efekt Kaye...

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

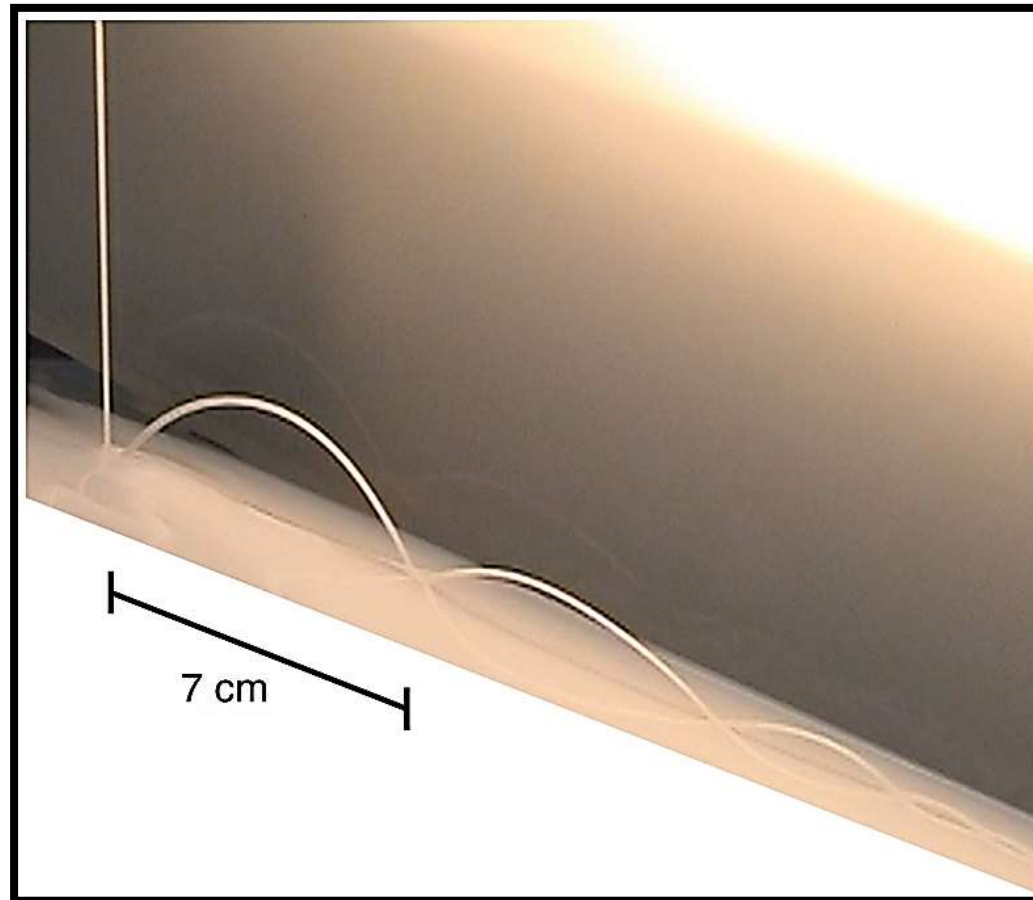
Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz pseudoplastyczna – stabilny efekt Kaye



doi:10.1088/1742-5468/2006/07/P07007

- Nachylona powierzchnia pokryta mydłem w płynie ze stróżką odbijającej się cieczy

Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie



Rodzaje oddziaływań międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i ich lepkość

Metoda Stokesa

Lepkość jako miara oddziaływań międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i ich właściwości

Podsumowanie

# Ciecz nieniuonowska

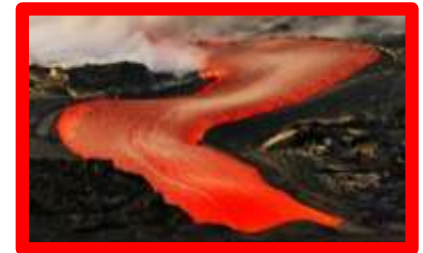
$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

naprężenie styczne (ścinające)

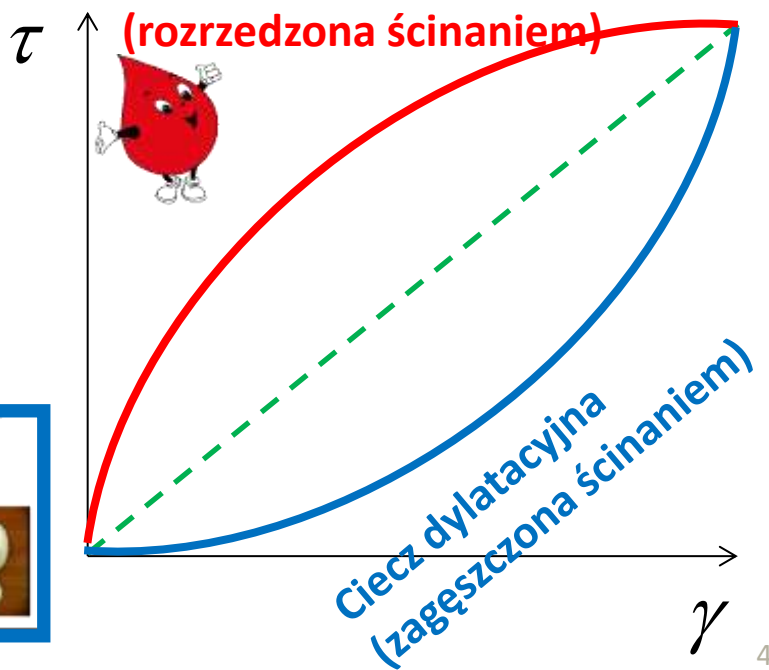
szybkość ścinania

$$\eta \neq \text{const}$$

Ciecz nieniuonowska



Ciecz pseudoplastyczna (rozrzedzona ścinaniem)



Rodzaje oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Struktura ciekłej wody i  
roztworów cukru

Tarcie

Przepływ

Rodzaje przepływu

Płyny niutonowskie i  
ich lepkość

Metoda Stokesa

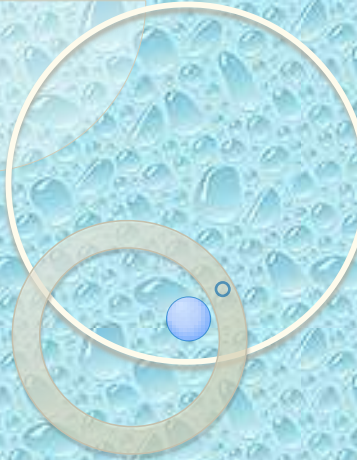
Lepkość jako miara  
oddziaływań  
międzycząsteczkowych

Płyny nieniuonowskie i  
ich właściwości

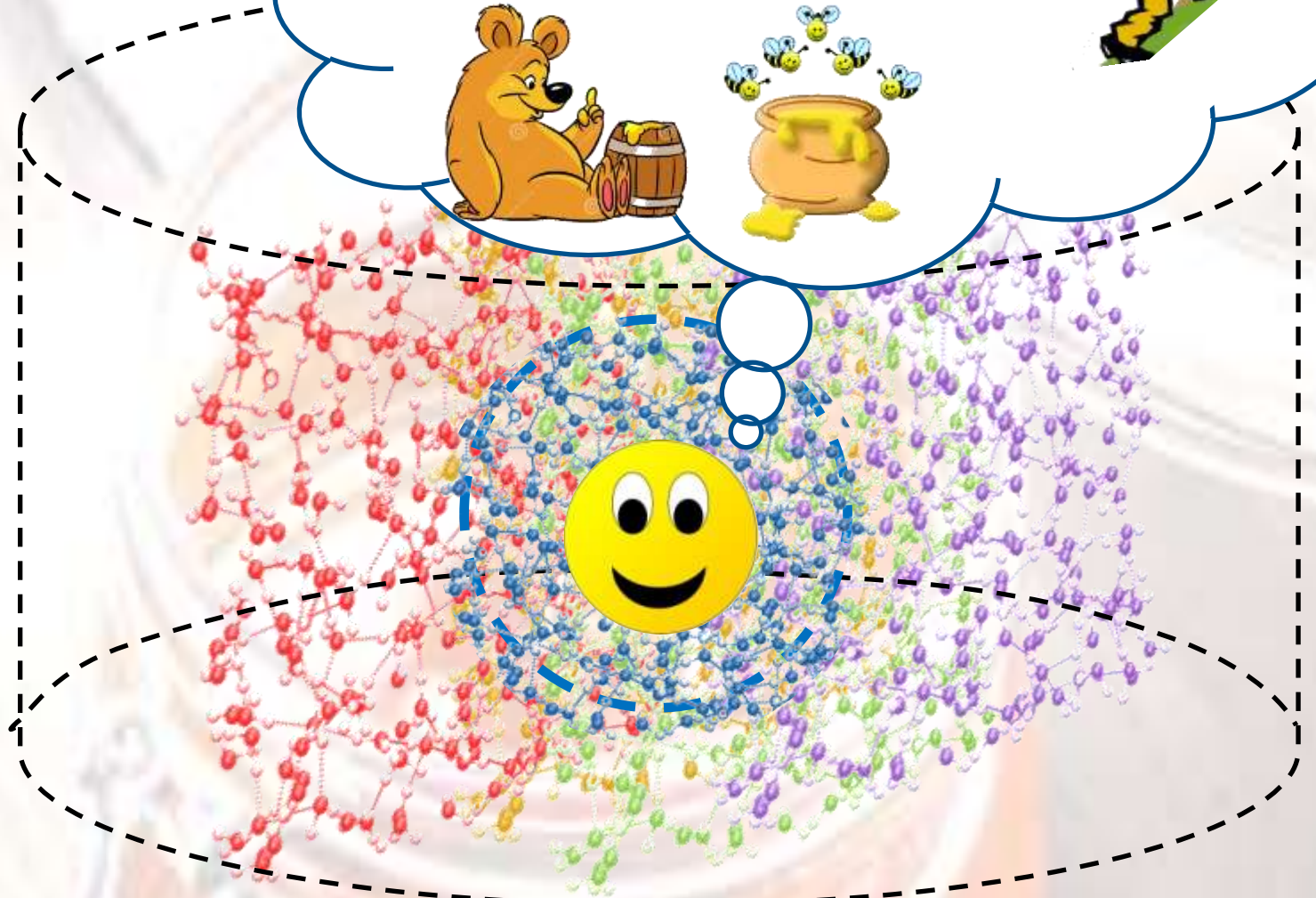
Podsumowanie

# Podsumowanie

- **Wzajemne tarcie laminarnych elementów cieczy determinuje zjawisko lepkiego przepływu**
- **Wraz ze wzrostem lepkości maleje płynność**
- **Lepkość można wyznaczyć m.in. mierząc:**
  - **Czas opadania kulki w cieczy (i gęstość cieczy...)**
- **Lepkość jest miarą oddziaływań międzycząsteczkowych i zmienia się wraz ze zmianą struktury cieczy**
- **Lepkość płynu niutonowskiego jest stała,**
- **Lepkość płynu nieniuonowskiego rośnie lub maleje wraz ze wzrostem prędkości ścinania**



Dziękuję za uwagę



e-mail: [adam.buczowski@chemia.uni.lodz.pl](mailto:adam.buczowski@chemia.uni.lodz.pl)