



Fluidna dinamika

Reologija

Reologija in reometrija

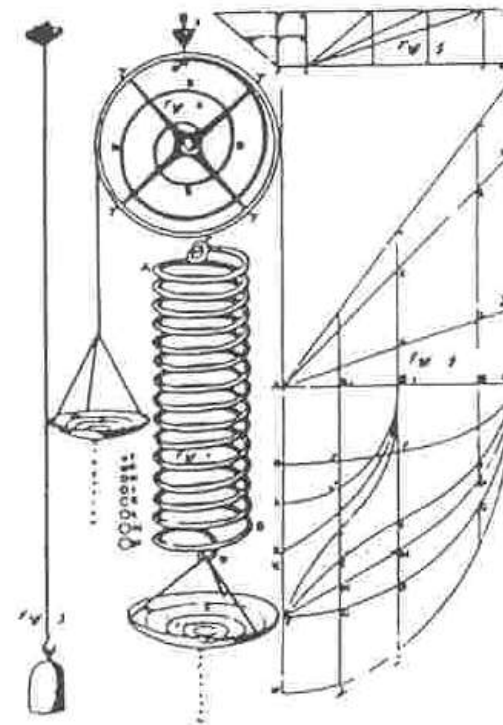
OSNOVNE DEFINICIJE

REOLOŠKA KLASIFIKACIJA TEKOČIN

STRIŽNO ODVISNO OBNAŠANJE NE-NEWTONSKIH TEKOČIN

ČASOVNO ODVISNE NE-NEWTONIJSKE TEKOČINE

VISKOELASTIČNE LASTNOSTI SNOVI



Reologija

ime izhaja iz grške besede $\rho\epsilon\iota\nu$, ki pomeni teči.

»Rheology is the study of the deformation and flow of matter«

E. C. Bingham (1929)

Reologija je interdisciplinarna veda o tokovnem obnašanju in deformaciji materiala, ki združuje znanja mnogih znanstvenih disciplin.

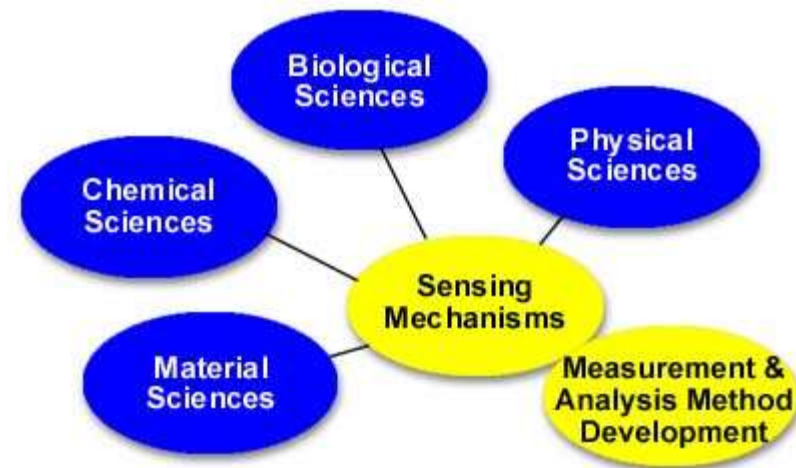
Omogoča ovrednotiti mehanske lastnosti tekočin in poltrdnih snovi.

S poznavanjem reoloških lastnosti snovi lahko:

- sledimo različnim kemijskim reakcijam,
- dobimo vpogled v strukturo različnih polimerov,
- razlagamo različne pojave koloidnih sistemov,
- napovemo transportne koeficientov v termodinamiki.

Reološke lastnosti snovi so pomembne v vseh fazah industrijskih procesov:

- omogočajo ovrednotenje kvalitete vstopnih surovin in izstopnih produktov,
- omogočajo razvoj novih produktov,
- so pomembni dejavniki pri napovedi padca tlaka pri pretakanju tekočin po ceveh ali pri določanju vnosa moči pri različnih procesih mešanja,
- vplivajo na način predelave procesnih materialov: mešanje, ekstrudiranje, brizganje itd.

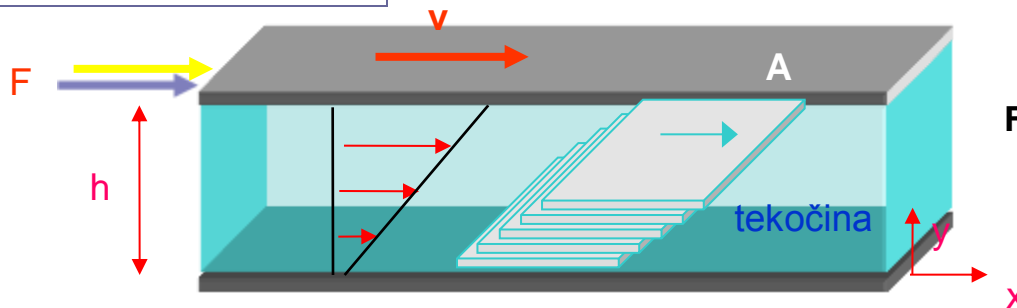


Reologija je torej veda o tokovnem obnašanju in deformaciji materiala in združuje znanja mnogih znanstvenih disciplin: kot so biologija, kemija, matematika, fizika, genetsko in kemijsko inženirstvo, medicina ter mnoge druge

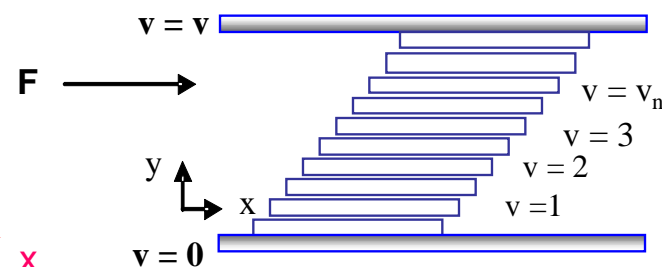
KAJ JE REOLOGIJA

Definicije osnovnih pojmov

Strižni tok - enostavni strig:



$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

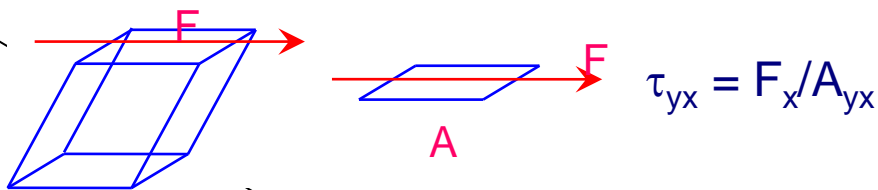


Strižna hitrost:

$$\frac{\Delta v_x}{\Delta y} = \dot{\gamma}, \quad \Delta \rightarrow 0 \quad \frac{dv_x}{dy} = \dot{\gamma}_{yx}$$

$\dot{\gamma}$ ima enoto: m / s m = s⁻¹

Strižna napetost:



τ ima enoto: N/m² = Pa

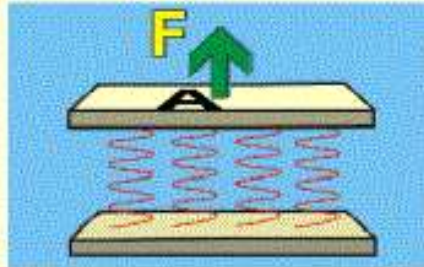
Viskoznost:

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

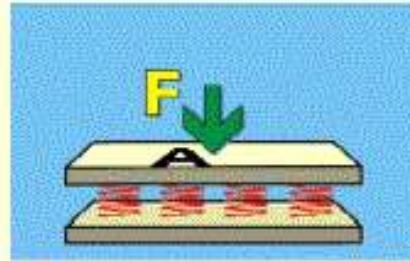
η ima enoto: Pa.s

Primeri strižnega toka tekočin:

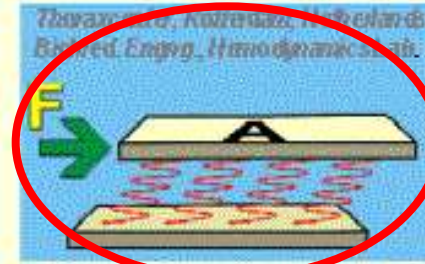
Stress is defined as Force normalized to Area: F/A (N/m^2 or Pa)



Tensile stress is a pulling stress acting perpendicularly to area A



Compressive stress is a pushing stress acting perpendicularly to A



Shear stress is a shearing stress acting tangentially to area A

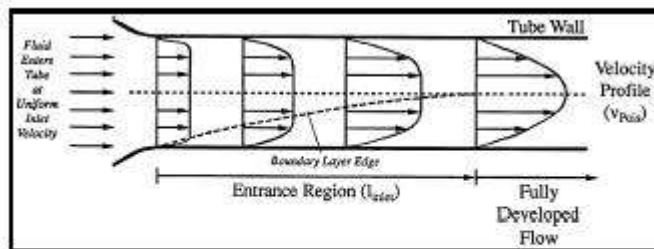
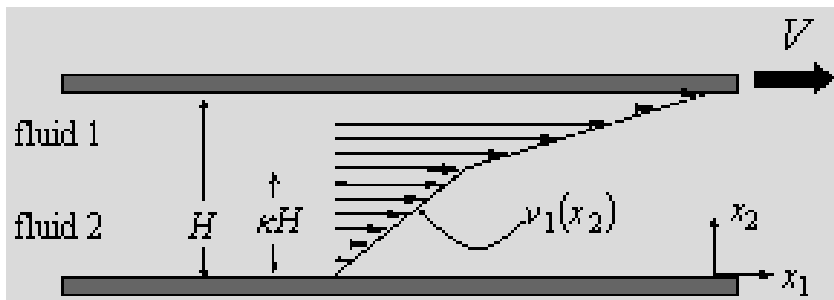
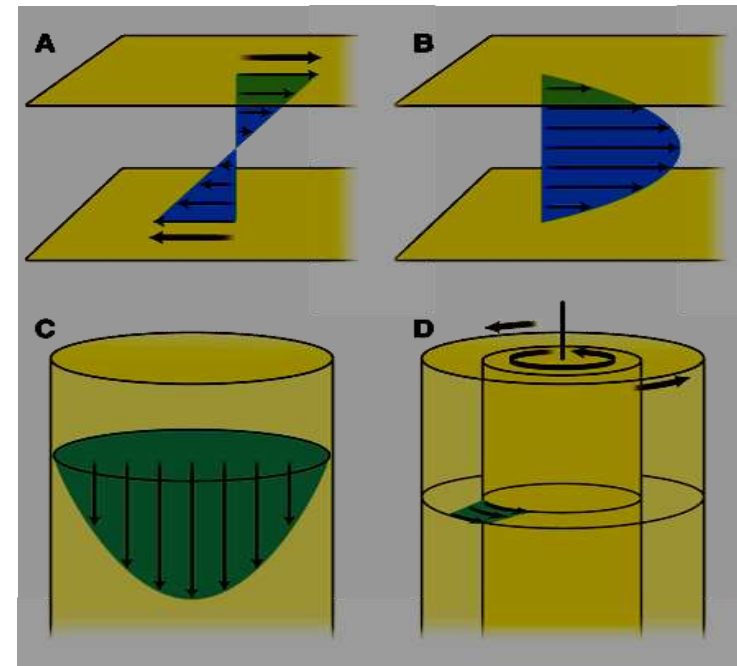


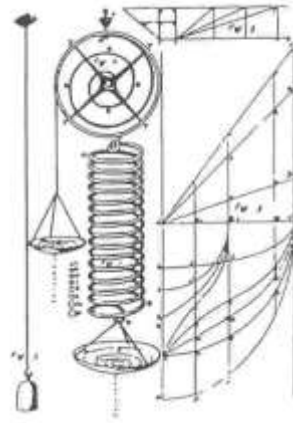
Fig. 9.14. Establishment of parabolic velocity profile in Poiseuille tube flow (redrawn from Goldsmith and Turitto^{38b}).



Idealna tekočina : newtonska tekočina

V primeru strižnega toka med paralelnimi ploščami predstavlja viskoznost odpor proti drsenju tekočine, ali z drugimi besedami, 'notranje trenje' tekočine.

Viskoznost idealnih tekočin je po Newtonovem zakonu določena kot proporcionalnostni faktor med strižno napetostjo in strižno hitrostjo:



1678 Newtonov zakon:

Odpor tekočine proti toku je pri enostavnem strigu linearno sorazmeren hitrosti strižnega toka oziroma hitrosti strižne deformacije. Proporcionalnostni faktor je **viskoznost (η)**.

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Idealna tekočina: strižna napetost je premosorazmerna strižni hitrosti

Tekočina se deformira ireverzibilno, potrošena energija v obliki toplote je potrebna za deformacijo tekočine in je ni mogoče povrniti po prenehanju delovanja strižnih sil.

Viskoznost newtonskih tekočin je pri danem tlaku in temperaturi lastnost tekočine, ki je neodvisna od smeri, jakosti in časa delovanja striga.

$$\eta = f(T) = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)$$

Tekočine z newtonskim obnašanjem:

voda, olje, med, organska topila, glicerin, polimerne raztopine, polimerne taline linearnih polimerov, suspenzije z nizko vsebnostjo trdnih delcev, bitumni

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

Notranja struktura tekočin

Realne snovi se na vneseno strižno deformacijo ali na strižni tok različno odzivajo.

Realne tekočine in trdne snovi: odziv na strižno silo ni vedno linearen

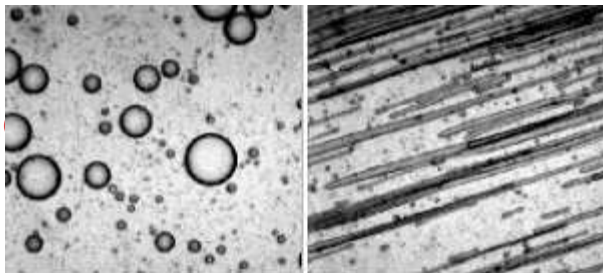


lastnosti strukturnih elementov realnih tekočin

tvorba in lastnosti struktur pod vplivom striga

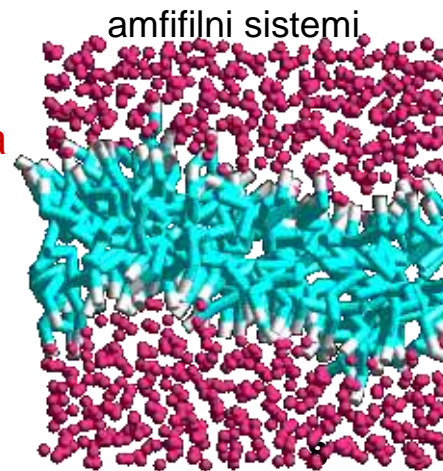
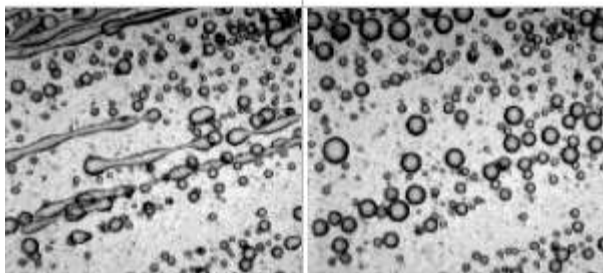
trdni delci, kapljice tekočine, polimerne verige

orientacija delcev, agregacija in/ali
povezovanje delcev – elementov, ki tvorijo
strukturo pod vplivom striga,



orientacija in deformacija kapljic
pod vplivom strižnega toka

lahko spreminja glede na jakost in smer
pa je odvisna tudi od časa delovanja striga



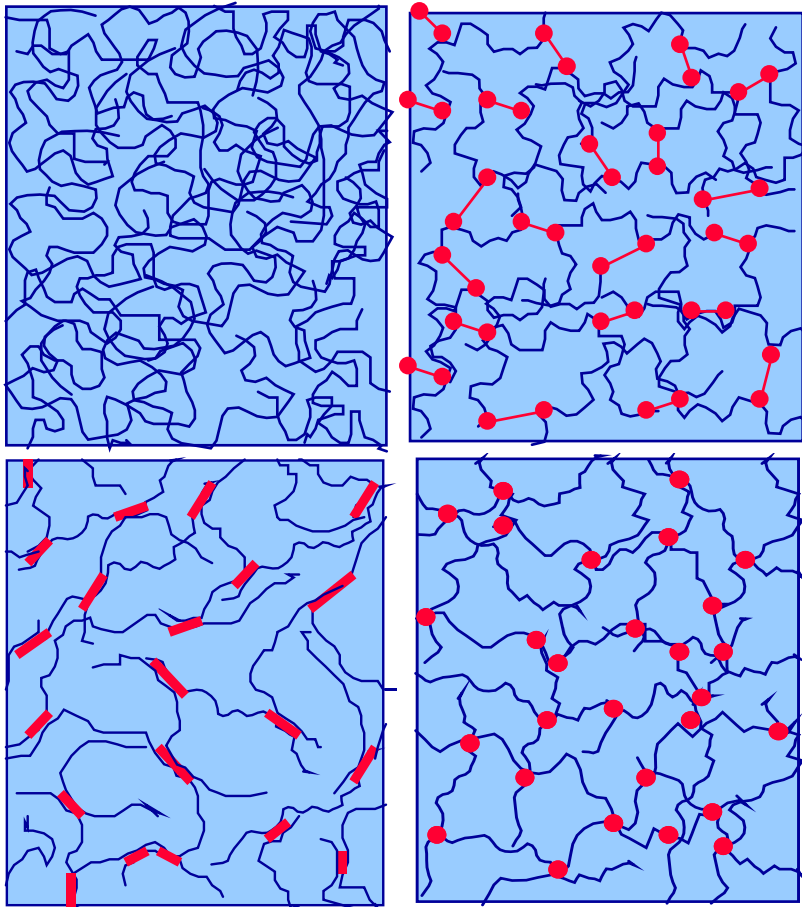
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau, t)$$

odvisnega obnašanja tekočin si je mogoče
tekočine neko notranjo strukturo.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau, t)$$

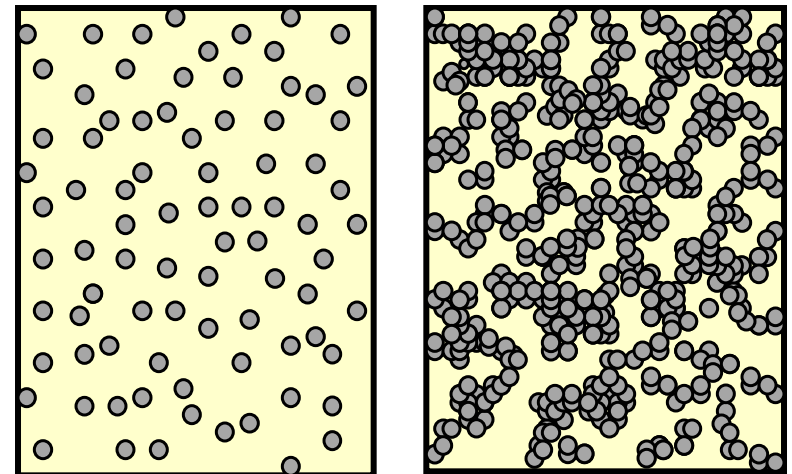
NOTRANJA STRUKTURA TEKOČIN

Strukture v polimernih sistemih



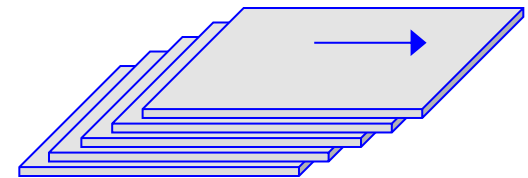
različne povezave verig (prepletenost, premreženost, fizikalna asociacija...)

Strukture v suspenzijah



dispergirani delci

agregirani delci



Random coil

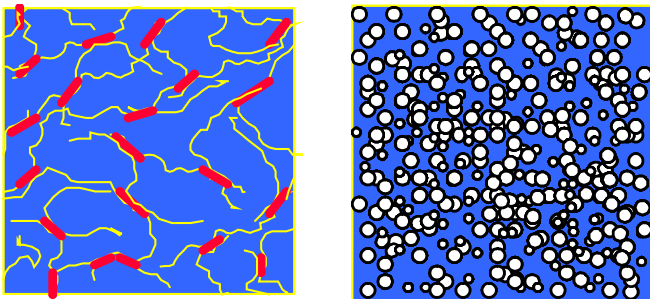


Shear

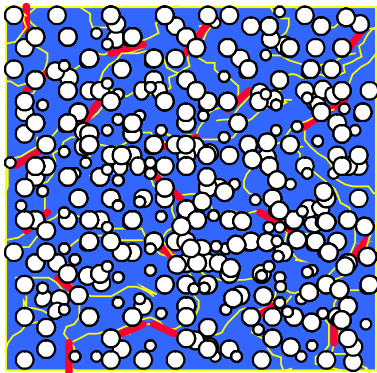


Flow

NOTRANJA STRUKTURA TEKOČIN



suspenzije v raztopini polimera



Nelinearno obnašanje pod vplivom striga

- ⇒ urejanje notranje strukture pod vplivom striga.
- ⇒ lastnosti osnovnih elementov strukture
- ⇒ stopnja strukturiranosti.

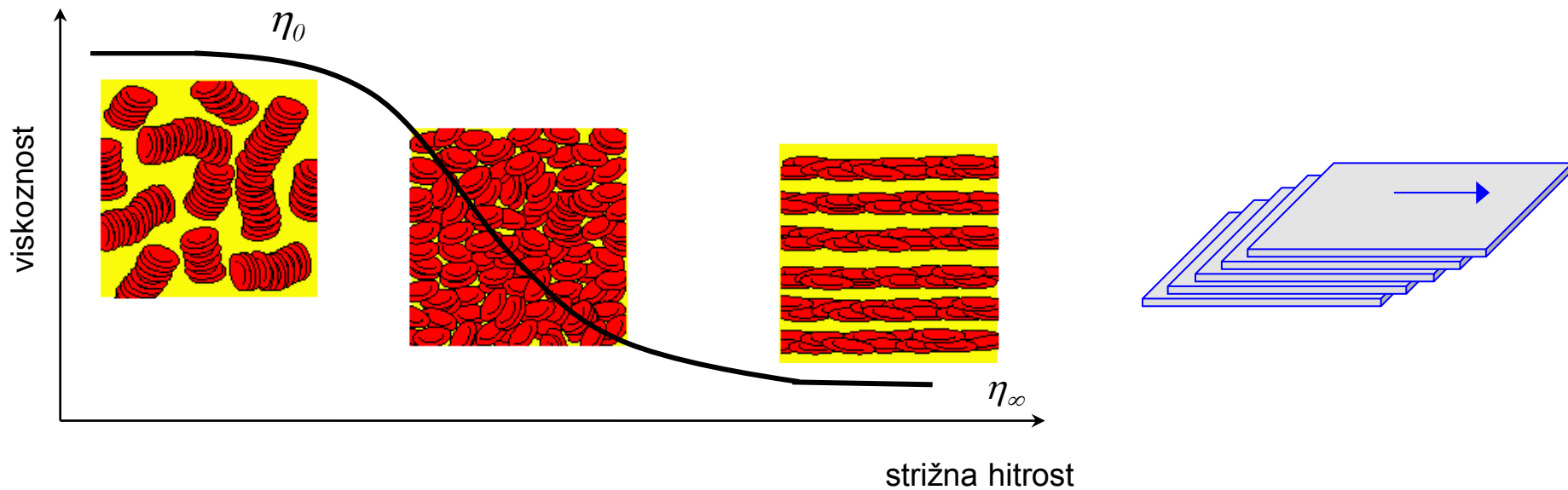
Viskoznost nenevtonskih tekočin se lahko spreminja glede na

- ⇒ jakost in smer delovanja strižne sile,
- ⇒ lahko pa je odvisna tudi od časa delovanja striga

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau, t)$$

Pseudoplastično obnašanje

Realne tekočine lahko izkazujejo strižno odvisno upadanje viskoznosti (shear thinning)



Urejanje rdečih krvničk vzorca krvi pod vplivom strižne sile.

- (a) nizkie strižne hitrosti (η_0), rdeče krvničke v agregatih, deformabilnost agregatov,
- (b) srednje strižne hitrosti, agregati postopoma razpadajo, viskoznost upada z naraščanjem strižne sile,
- (c) visoke strižne hitrosti, krvna telesca se plastovito uredijo v smeri strižnega toka, viskoznost se ne spreminja (η_∞).

REOLOŠKA KLASIFIKACIJA TEKOČIN

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau, t)$$

Glede na strižno odvisno obnašanje tekočin: $\eta = f(\tau)$

psevdoplastične

plastične \Rightarrow mejna napetost τ_0

dilatantne

Glede na časovno odvisno obnašanje: $\eta = f(\tau, t)$

tiksotropne

anti-tiksotropne ali reopektične

Viskoelastične lastnosti: viskozne in elastične lastnosti

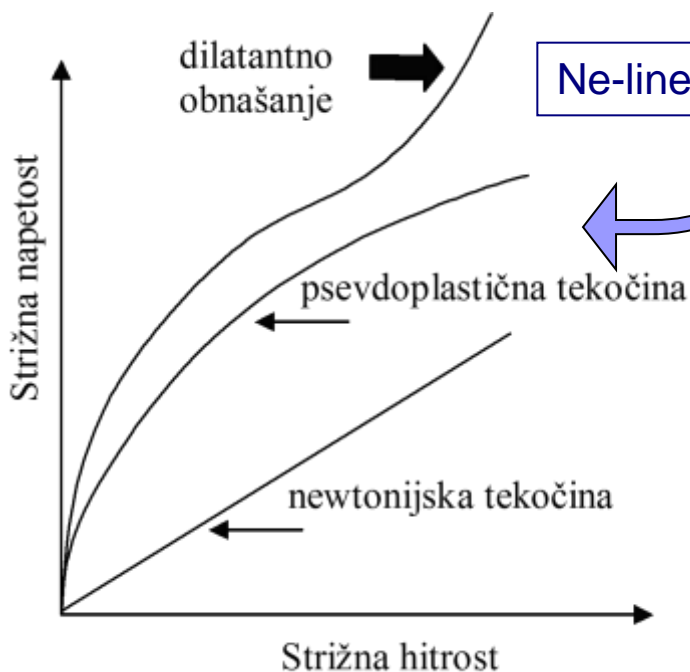


REOLOŠKA KLASIFIKACIJA TEKOČIN

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau, t)$$

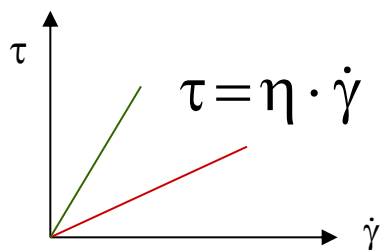
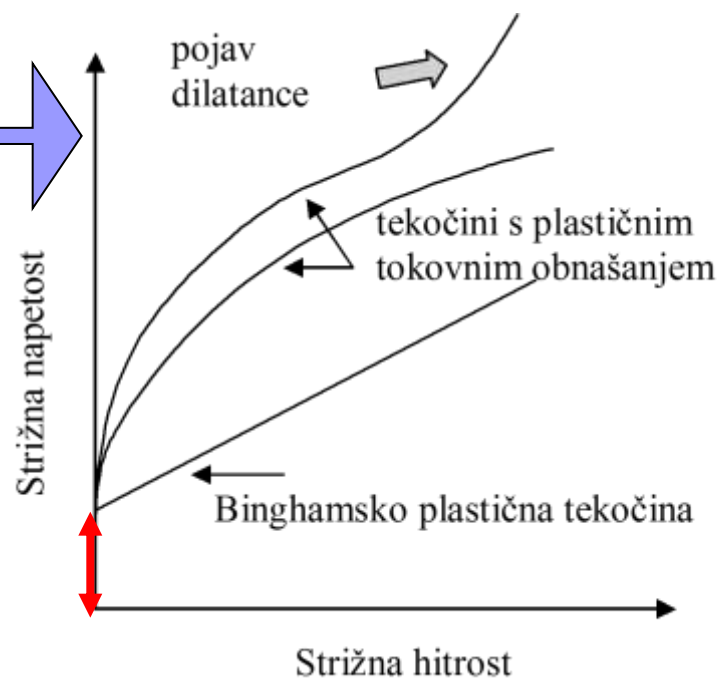
V splošnem viskoznost realnih tekočin odvisna od strižnih pogojev pogosto pa tudi do časa delovanja striga in predhodne strižne zgodovine

Strižno odvisno obnašanje tekočin: $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = f(\tau)$



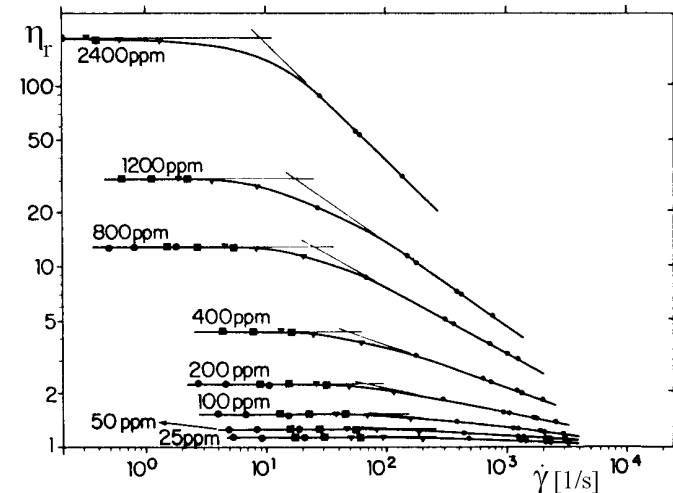
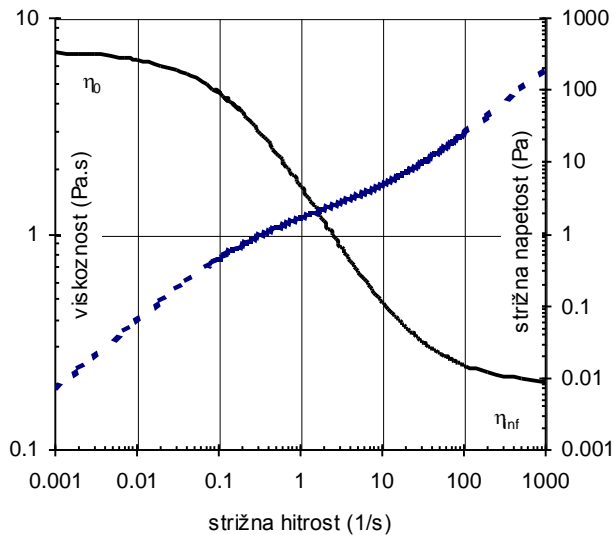
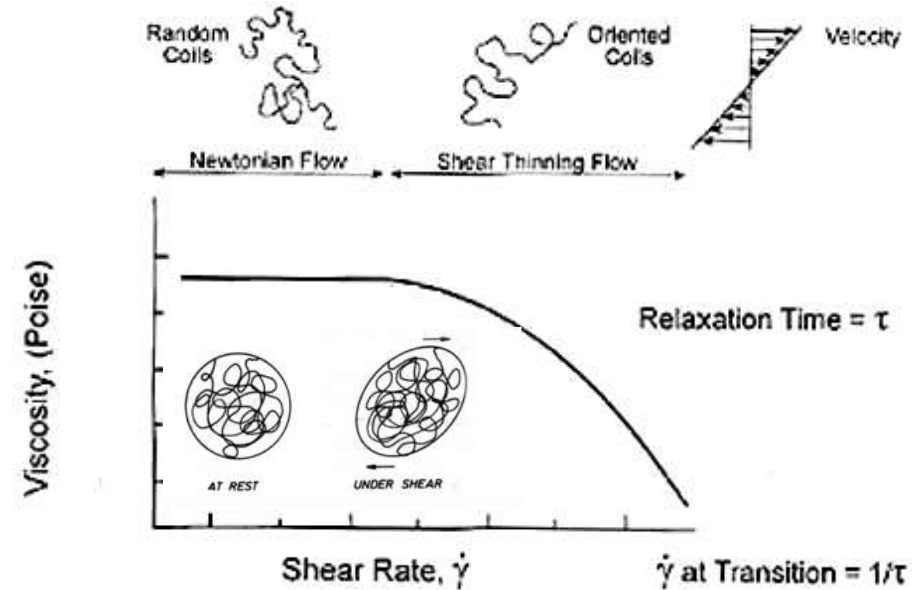
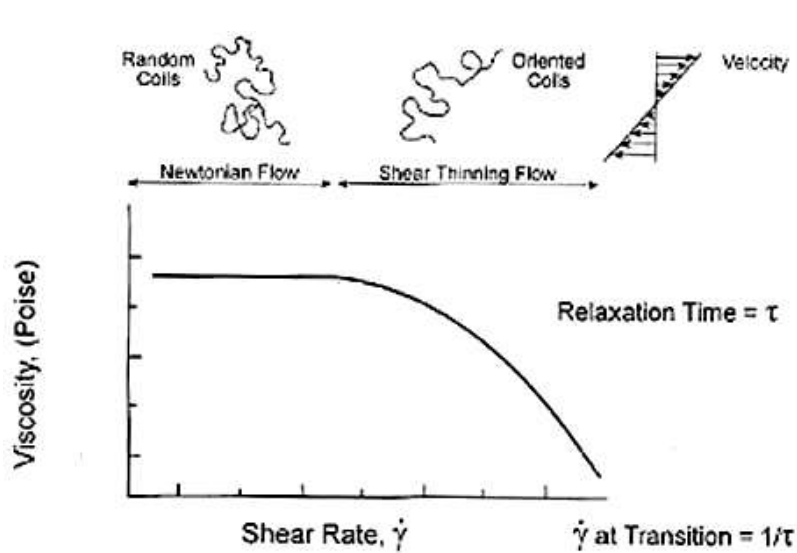
Ne-linearna odvisnost

tekočine z mejno napetostjo



Linearna odvisnost

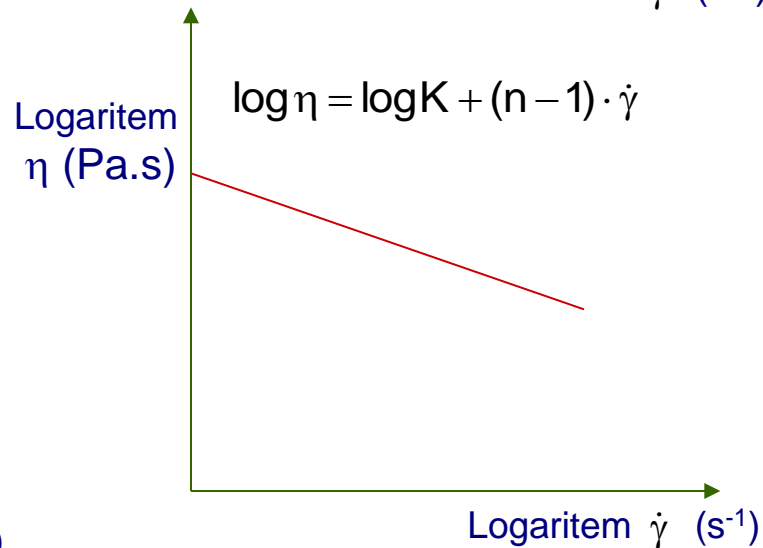
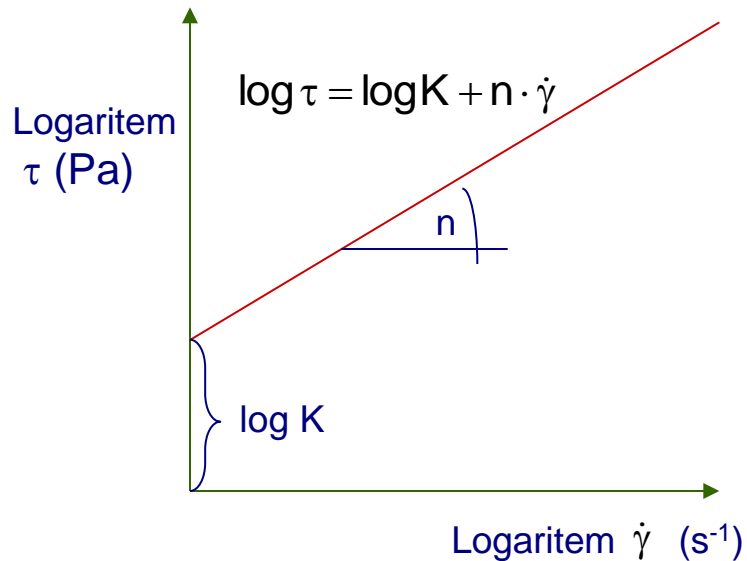
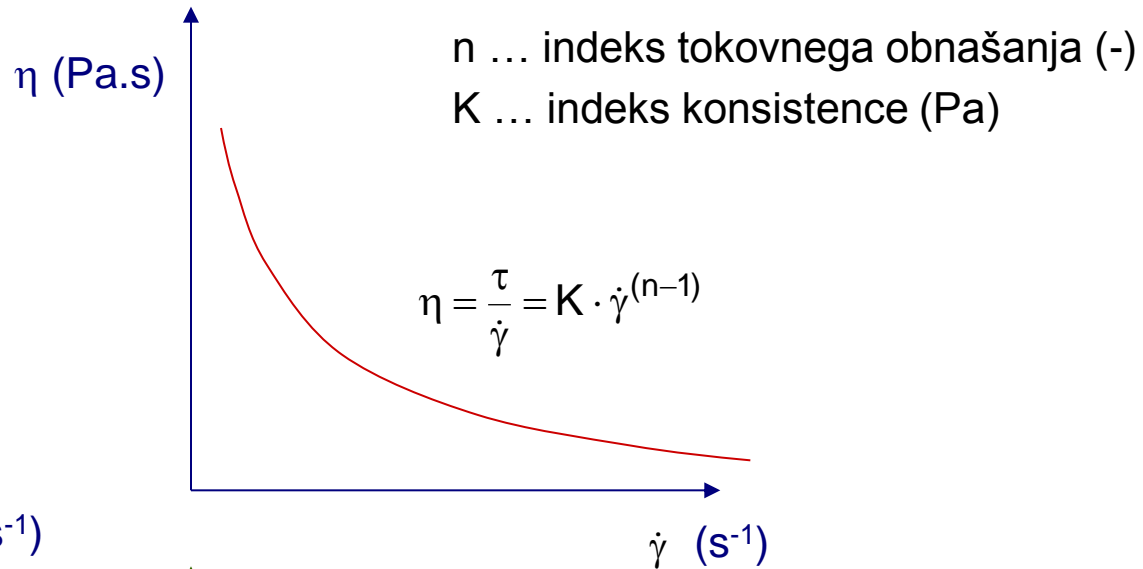
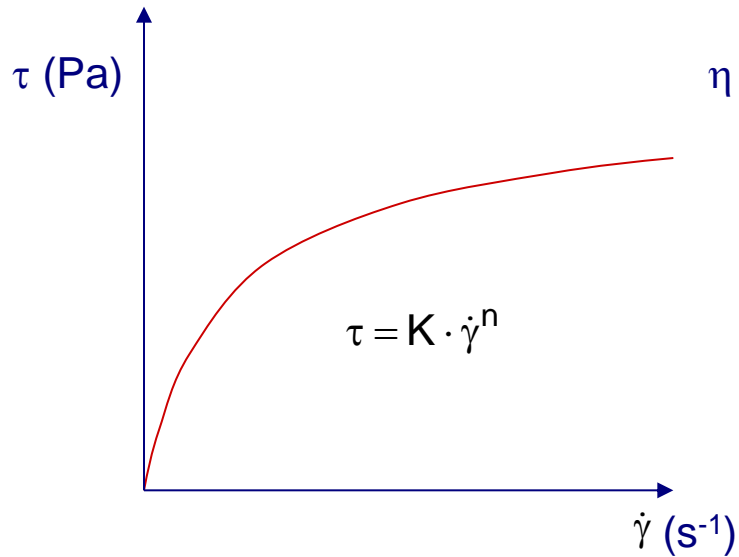
Pseudoplastično obnašanje (široko območje strižnih hitrosti) :



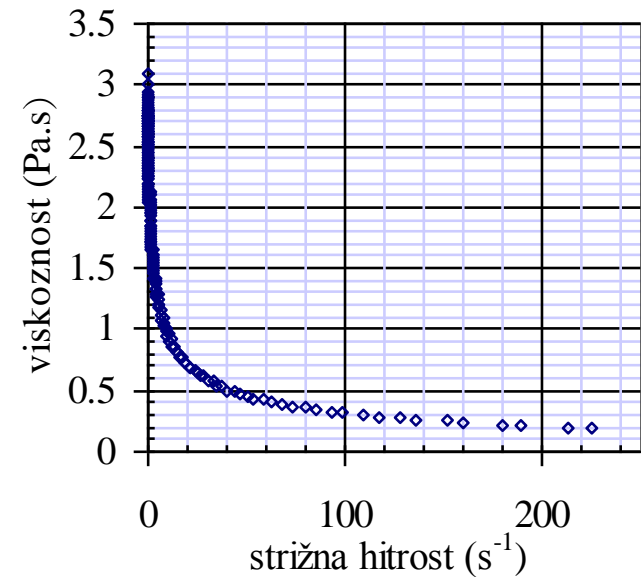
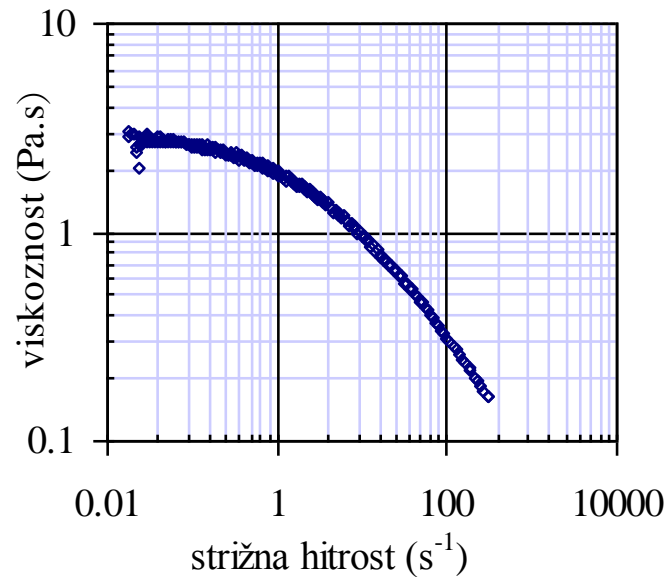
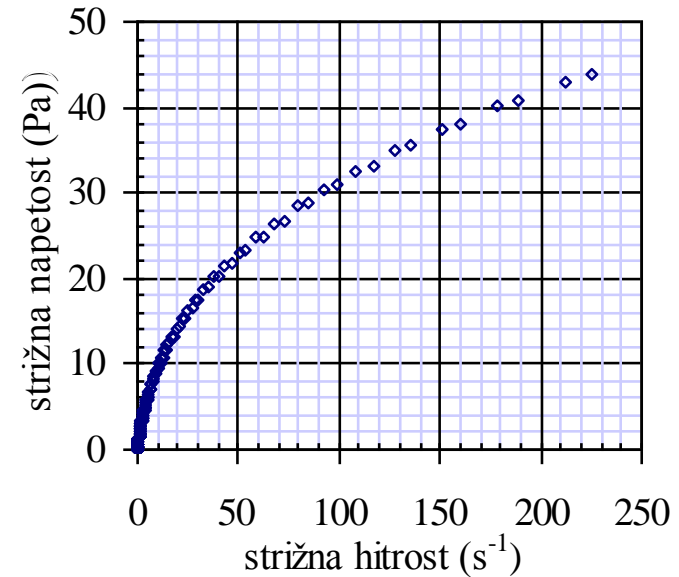
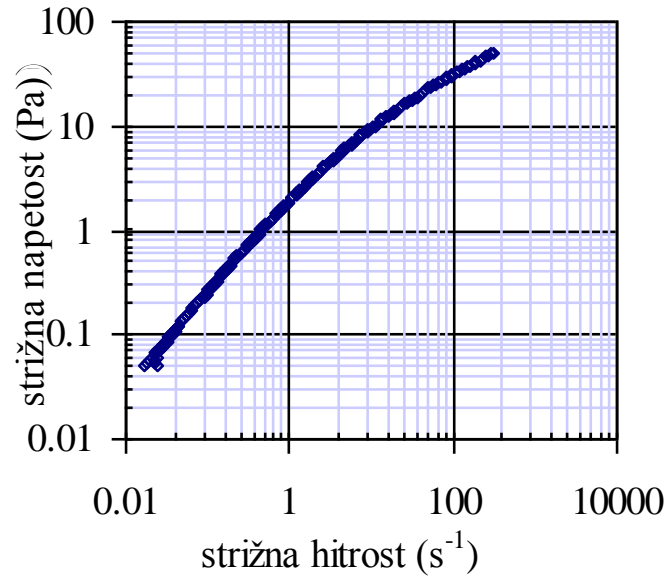
Pseudoplastično obnašanje je odvisno od koncentracije polimera (xanthan) v vodni raztopini

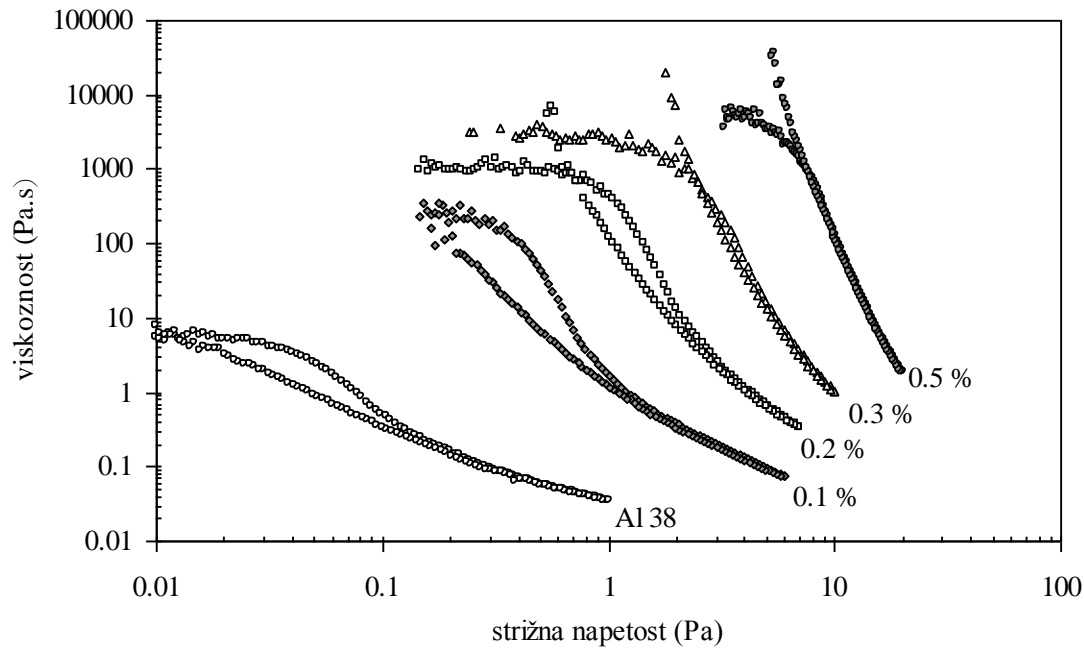
Pseudoplastično obnašanje

Reološki modeli: potenčna zveza (power law - Ostwald de Weale)

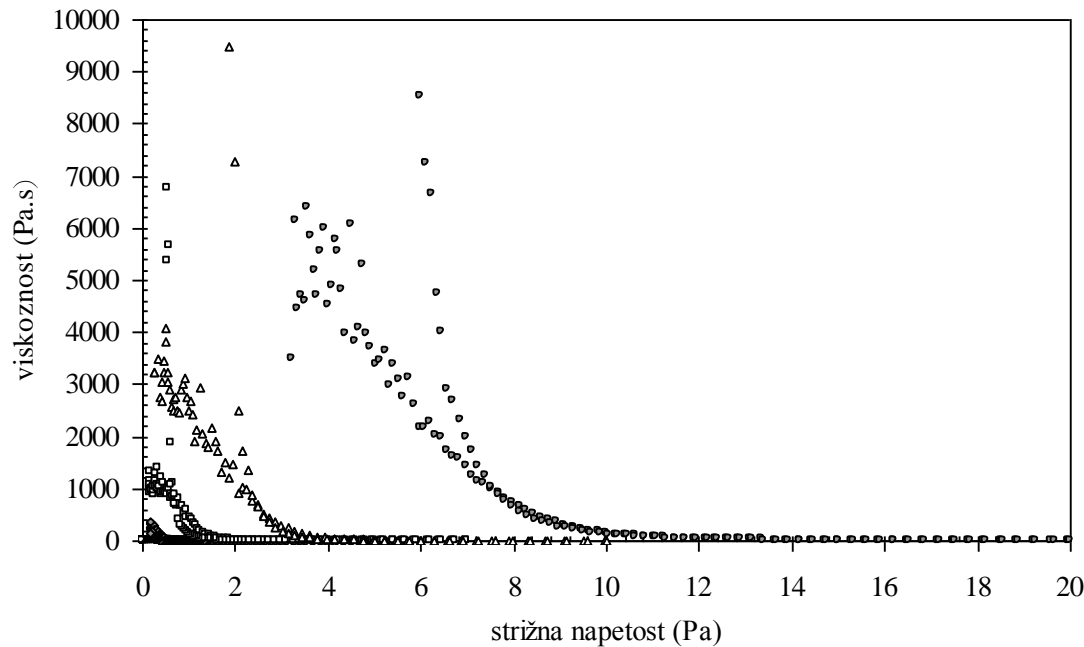


Tokovne krivulje:risanje reoloških grafov





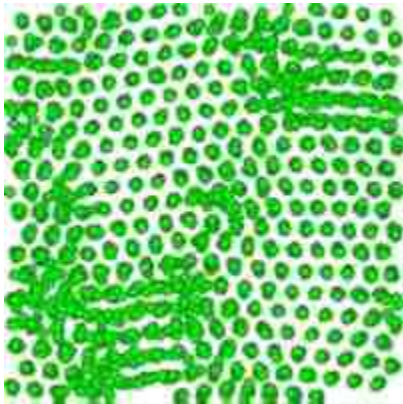
Tokovne krivulje:
risanje reoloških grafov



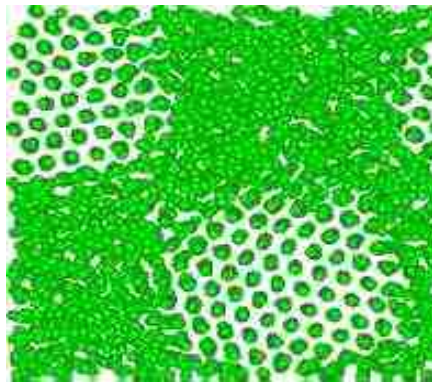
Dilatantno obnašanje: order – disorder transition

Pojav strižno odvisnega naraščanja viskoznosti pri visoko koncentriranih suspenzijah

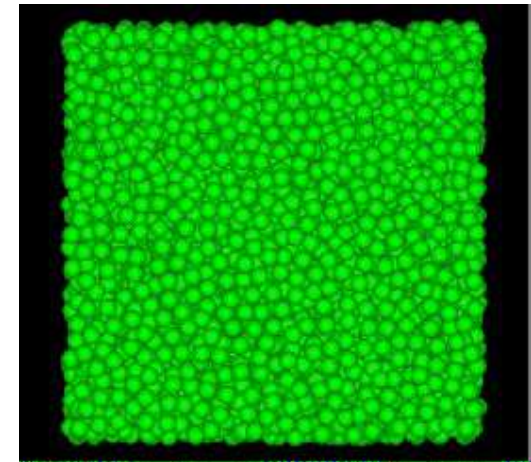
Prikaz kako se koncentrirani trdni koloidni delci, volumska koncentracija je **0.48** obnašajo v suspenziji pri različnih strižnih pogojih. Levo: na dnu območja pseudoplastičnosti(h) desno po prehodu v “blago” dilatantno obnašanja pri visokih strižnih hitrostih.



nižje strižne hitrosti

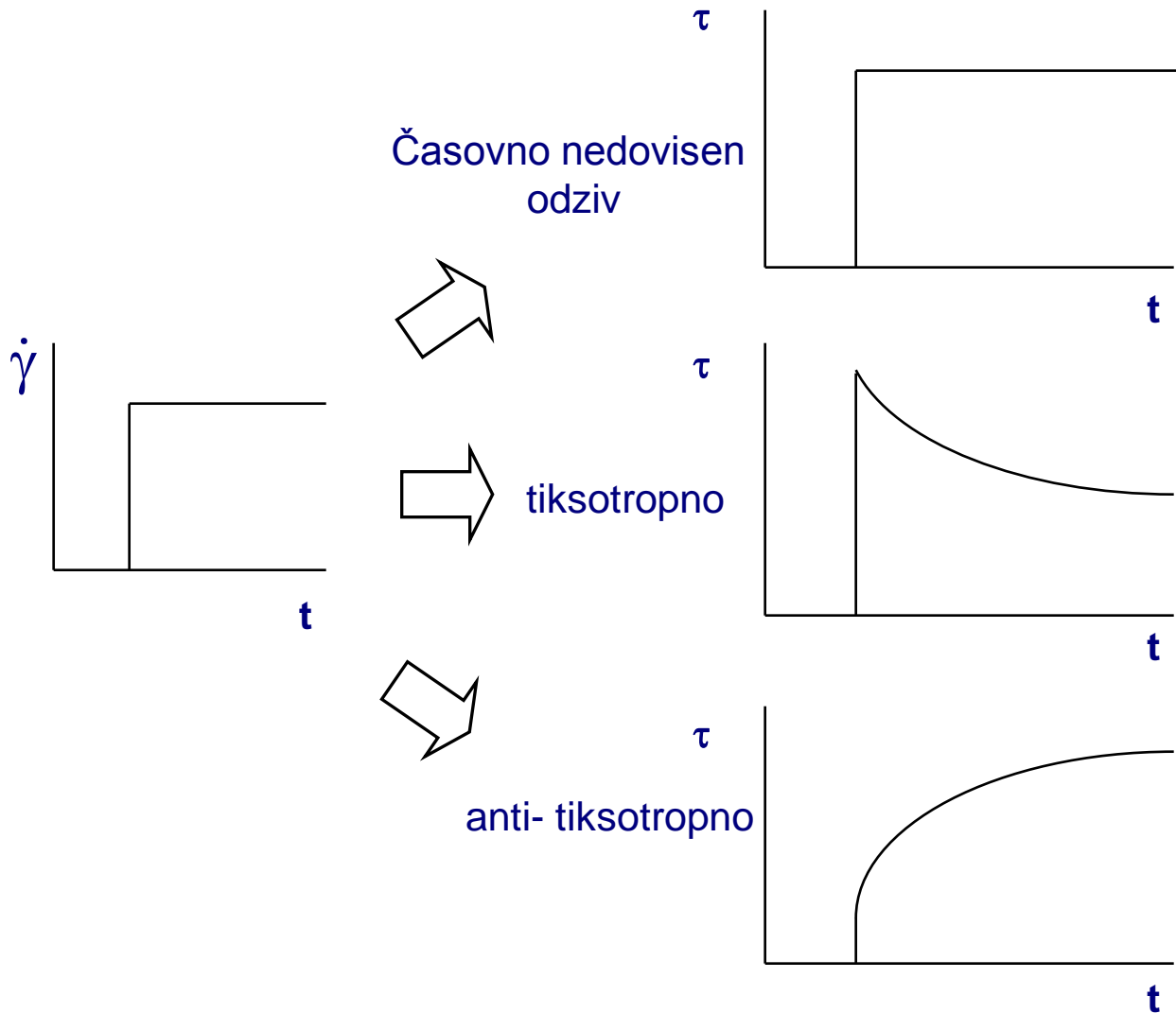


visoke strižne hitrosti



Simulation of polymer coated colloid particles at volume fraction **0.54** and at high shear rate in the shear thickening regime

ČASOVNO ODVISNO OBNAŠANJE NE-NEWTONSKIH TEKOČIN



Viskoelastične lastnosti snovi

snov obnaša se viskoelastično: pomeni, da del v snov vnešene energije ohrani in jo po prenehanju delovanja strižne sile vrne v obliki elastičnega povratka (elastično), del pa porabi v obliki toplote (viskozno).



Večina strukturiranih tekočin (polimerni materiali) izkazuje izrazite viskoelastične lastnosti.

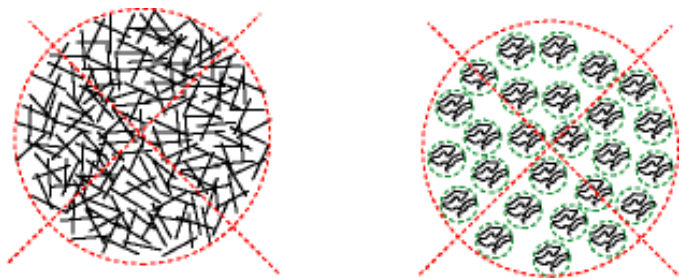
Ko na strukturirano tekočino delujemo s silo se **deformira**.

majhne deformacije: deformacija tekočine linearno narašča z vneseno silo njihova reološka karakterizacija omogoča sklepati na fizikalno stanje mikrostrukture tekočine

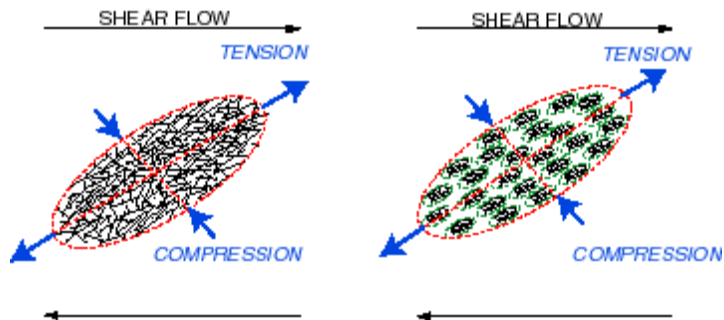
velike deformacije: primer pri stacionarnem strižnem toku mikrostruktura tekočine se močno spremeni, zato se lahko odzove neizotropno, deformacija ni več linearno odvisna od vnesene sile.

Realne tekočine in trdne snovi: odziv na strižno silo ni linearen

Naključno porazdeljeni delci



GLOBAL ANISOTROPY DUE TO SHEAR FLOW



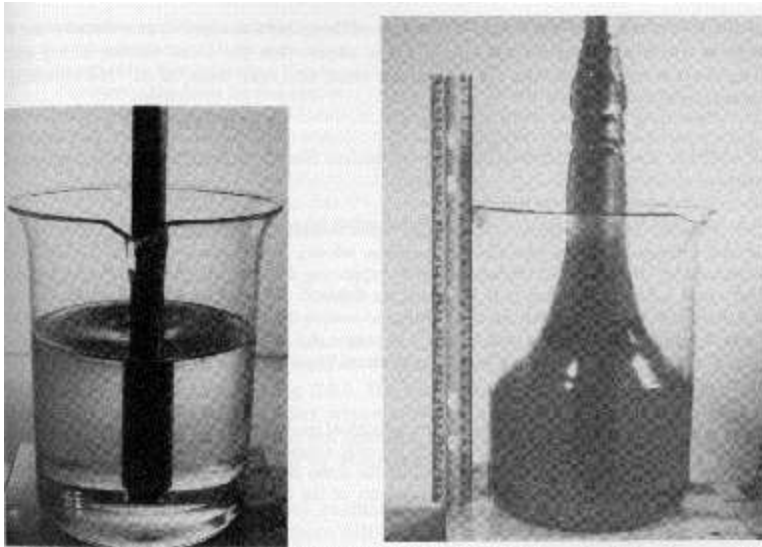
Sferični izrez dveh tipov suspendiranih delcev v tekočini. V obeh primerih, paličasti delci in prepletene verige polimera so naključno orientirani tako da je suspenzija izotropna.

Strižni tok povzroči napetost in zgostitev delcev oz. polimernih molekul. Rezultat je urejanje delcev ali razrezanje in usmerjanje polimernih molekul v tekočini v smeri toka, tekočina postane neizotropna.

Napetostno stanje izrazimo tridimenzionalno.

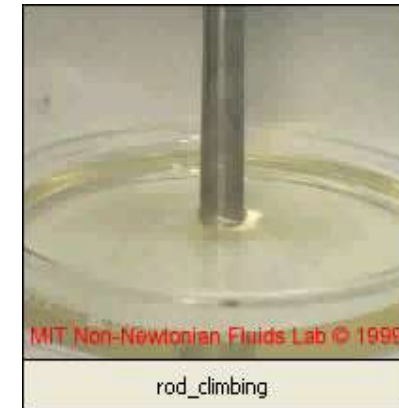
Pojav razlik v normalnih napetostih

Weissenbergov efekt



newtonska tekočina

viskoelastična tekočina



V mnogih primerih pomeni elastično obnašanje zavirajoč faktor k višji produkciji

Merjenje reoloških lastnosti

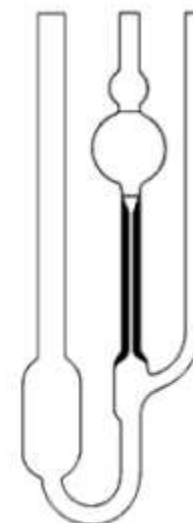
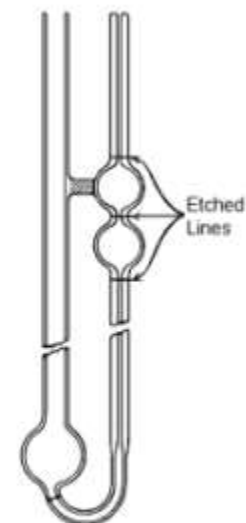
Inštrumente, namenjene proučevanju reološkega obnašanja tekočin, v splošnem delimo v dve skupini: absolutni inštrumenti in relativni inštrumenti

absolutni inštrumenti (rotacijski ter kapilarni reometri in viskozimetri): vrednosti strižnih hitrosti oz. strižnih napetosti lahko izračunamo s pomočjo merljivih in nastavljivih količin ter s pomočjo geometrijskih karakteristik izbranega senzorskega sistema.

Rotacijski viskozimetri:



Kapilarni viskozimetri:



η = time for sample to pass through tube
 $\eta_{\text{relative}} = \eta_s / \eta_0 = t_s / t_0$ (dimensionless)

Fig 1 - Standard Glass Capillary Tubes

Rotacijski reometri

Poleg viskoznosti z njimi merimo še druge reološke lastnosti časovno odvisnost viskoznosti in viskoelastičnost.: delež viskozne in elastične komponente



Merjenje reoloških lastnosti

relativni inštrumenti (viskozimeter s padajočo kroglico, viskozimeter s turbinskimi mešali, penetrometer, Fordova čaša, itd)

viskoznost določimo s primerjanjem glede na standard.



