



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

Zavod za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo

Procesi prijenosa i separacija

I. PREDAVANJE

Transport Phenomena and Separation Processes

Ak. god. 2019./2020.

Zagreb, 27. veljače 2020.

Predmetni nastavnici

Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Žižek

kzizek@fkit.hr

Prof. dr. sc. Aleksandra Sander

asander@fkit.hr

Preddiplomski studijski program

Primijenjena kemija

Satnica: 30P+15S+15L (semestralno opterećenje)
 2P+1S+1L (tjedno opterećenje)

Bodovna vrijednost (ECTS): 4

Izvedba nastavnih sadržaja

Predavanja

Seminari

Laboratorijske vježbe

Provjera znanja

2 parcijalna kolokvija

Pismeni ispit

Usmeni ispit

i. Fenomen prijenosa količine gibanja & Mehanički makroprocesi

- ✓ Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Žižek
- ✓ 6 tjedana
- ✓ 1 parcijalni pismeni kolokvij
- ✓ 1 laboratorijska vježba

ii. Fenomeni prijenosa topline i tvari & Toplinski i ravnotežni separacijski procesi

- ✓ Prof. dr. sc. Aleksandra Sander
- ✓ 7 tjedana
- ✓ 1 parcijalni pismeni kolokvij
- ✓ 3 laboratorijske vježbe

Četvrtkom, 12¹⁵–14⁰⁰ h, S-1

1. tjedan

*Upoznavanje studenata s izvođenjem nastave i provjerom znanja;
Upoznavanje s osnovnim terminima: kemijsko inženjerstvo, fenomeni
prijenosa (transporta), jedinične operacije,...
Glavne značajke mehaničkih makroprocesa, toplinskih i ravnotežnih
separacijskih procesa (razlike među navedenima)

Opći zakon očuvanja; Stacionarni i nestacionarni procesi; Gustoća toka
količine gibanja, tvari i energije; Mehanizmi prijenosa; Viskoznost;
Reologija (reološka karakterizacija fluida)
Zakoni očuvanja pri gibanju fluida/u hidrodinamskim sustavima
(mase, količine gibanja i energije)
(27. veljače)*

2. tjedan

*Vrste strujanja; Analiza laminarnog i turbulentnog strujanja u cijevi
(raspodjela brzina i gustoće toka količine gibanja, te procjena gubitka
energije/pada tlaka); Moodyev dijagram; Protjecanje kroz cjevovod;
Određivanje snage pumpe
(5. ožujka)*

3. tjedan

*Optjecanje
Strujanje kroz sloj čestica/poroznu sredinu
(12. ožujka)*

Fenomen prijenosa količine gibanja

Četvrtkom, 12¹⁵–14⁰⁰ h, S-1

4. tjedan *Karakterizacija grubodisperznih sustava
(19. ožujka)*
5. tjedan *Osnove mehaničke separacije u sustavima čvrsto–kapljevito;
Sedimentacija u polju gravitacijske i centrifugalne sile
Filtracija; Tipovi makrofiltracije
(26. ožujka)*
6. tjedan *Strujanje u miješalici;
Miješanje u jednofaznim sustavima te sustavima čvrsto–kapljevito;
Dimenzioniranje procesnog sustava za miješanje
(2. travnja)**

Mehanički makroprocesi

7. tjedan *Ne izvodi se nastava.
Provodi se I. parcijalni kolokvij.
(9. travnja); 12¹⁵–14⁰⁰ h, S-1, u redovitom terminu predavanja*

Četvrtkom, 12¹⁵–14⁰⁰ h, S-1

8. tjedan (16. travnja)** – 15. tjedan

Predavanja prof. dr. sc. Aleksandre Sander

Prijenos topline kondukcijom kroz jednoslojni i višeslojni zid

Prijenos topline konvekcijom

Prolaz topline; prijenos topline zračenjem

Prijenos tvari difuzijom i vrtložnim mehanizmom

Osnove toplinskih separacijskih procesa

Isparavanje; Kristalizacija

Sušenje

Destilacija

Osnove ravnotežnih separacijskih procesa; Apsorpcija; Ekstrakcija

II. parcijalni kolokvij

Seminari

Četvrtkom, 14¹⁵–15⁰⁰ h, S-1

Odgovarajućom dinamikom prate gradivo predavanja.
Započinju u drugom tjednu nastave, 5. ožujka.

Laboratorijske vježbe

Četvrtkom 15–18 h, petkom 11–14 h & 14–17 h

Prijave laboratorijskih vježbi: 28. veljače 2020., petak, 11.15 h, MKV-20

Filtracija (2. & 3. travnja)

Prijenos topline

Prijenos tvari

Ekstrakcija

Provjera znanja tijekom semestra

*pismenim putem primjenom 2 parcijalna kolokvija &
usmenim putem primjenom 4 ulaznih kolokvija na lab vježbama*

*Svaki parcijalni kolokvij ima 4 zadatka:
2 pitanja teoretske problematike,
2 zadatka računske problematike.*

Minimum za pozitivnu ocjenu: 50 % bodova

Ispravka kolokvija nema!

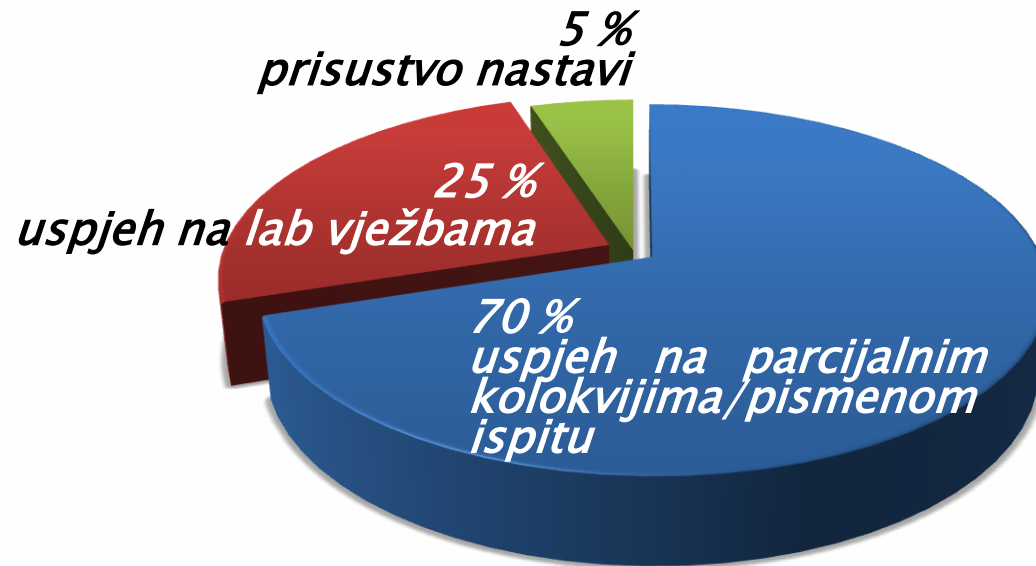
*Ukoliko student/ica ne zadovolji na ulaznom kolokviju
ne može raditi laboratorijsku vježbu.*

*Svakom studentu/ici dozvoljena je max. jedna nadoknada lab vježbe
(izuzev opravdanog izostanka – zdravstvene devijacije).*

*Student/ica mora završiti lab vježbe
(položeni svi ulazni kolokviji, svi referati predani i priznati)
kako bi pristupio/la ispitu te dobio/la zasluženu ocjenu u indeks.*

*Polaznici kolegija dužni su prisustvovati
izvođenju 75 % nastavnih sadržaja.*

*U slučaju izostanka takovog prisustva predavanjima i seminarima
student/ica ne stiče pravo pristupa ispitu.*



Nastavni materijali

PDF dokumentacija izv. prof. dr. sc. Krunoslava Žižeka te prof. dr. sc. Aleksandre Sander objavljena na mrežnim stranicama Fakulteta i Merlin sustava za e-učenje.

Literatura

Interne skripte:

Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Žižek, *Fenomen prijenosa količine gibanja, Mehanički makroprocesi* (dostupno na mrežnim stranicama FKITa i Merlin sustava za e-učenje),

Prof. dr. sc. Aleksandra Sander, *Toplinski separacijski procesi* (dostupno na mrežnim stranicama FKITa),

Prof. dr. sc. Antun Glasnović, *Prijenos tvari i energije* (dostupno na mrežnim stranicama FKITa),

Prof. dr. sc. Aleksandra Sander, *Priručnik za vježbe iz Toplinskih separacijskih procesa* (dostupno na mrežnim stranicama FKITa),

Izv. prof. dr. sc. Gordana Matijašić, *Priručnik za vježbe iz Mehaničkih separacijskih procesa* dostupno na mrežnim stranicama FKITa).

Knjige:

Richard G. Griskey, *Transport Phenomena and Unit Operations*, John Wiley & Sons, Inc., 2006.

R. Byron Bird, *Transport Phenomena*, Revised 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2006.

R.W. Fahrien, *Fundamentals of Transport Phenomena*, Mc Graw-Hill, New York, 1983.

J.D. Seader, E.J. Henley, *Separation Process Principles*, John Wiley & Sons, Inc. 2006.

M. Rhodes, *Introduction to Particle Technology*, John Wiley, London 1998.

M. Hraste, *Mehaničko procesno inženjerstvo*, Hinus, Zagreb 2003.

Prenijeti polaznicima kolegija znanja o:

- i. fenomenima prijenosa količine gibanja, topline i tvari,*
- ii. metodama karakterizacije grubodisperznih sustava,*
- iii. mehaničkim makroprocesima (sedimentacija, filtracija i miješanje),*
- iv. toplinskim i ravnotežnim separacijskim procesima.*

Kao i ostali inženjeri mi također rješavamo znanstvene i praktične probleme djelujući time na pojedine aspekte naših života.

*Kemijsko inženjerstvo jest posebna primijenjena struka koja se postupno razvila na spoju između kemije i strojarstva, a koja je danas uz elektrotehniku, građevinarstvo i strojarstvo jedna od četiriju klasičnih inženjerskih disciplina (**BIG 4**) u industrijski razvijenim zemljama.*

Kemijsko inženjerska disciplina bavi se procesom pretvorbe (kemijska & fizička) te separacije tvari u vrijedne i korisne proizvode.

Proces pretvorbe/separacije tvari zbiva se u omeđenoj prostornoj cjelini koju nazivamo procesnim prostorom (kontrolnim volumenom).

Kemijski inženjer koristi znanja iz prirodnih znanosti (kemija, fizika,...) te poznaje i koristi matematiku i osnove ekonomije kako bi pretvorio sirovi materijal u vrijedan i koristan proizvod.

Zadaća kemijskih inženjera podrazumijeva:

Istraživanje & razvoj,

Scale-up odnosno uvećanje procesa,

Projektiranje procesa,

Optimizacija procesa,

Kontrola kvalitete.

Krajnji cilj kemijskih inženjera jest primijeniti znanstveno razumijevanje promatranog fenomena na različitim razinama u svrhu poboljšanja kvalitete konačnog proizvoda omogućujući time nove industrijske primjene.

Jezgru obrazovanja kemijskih inženjera čine

*fenomeni transporta odnosno prijenos količine gibanja, prijenos topline i prijenos tvari.**

*Ono što dodatno čini ovu znanstvenu disciplinu drugačijom od drugih jest dijeljenje procesa u niz diskretnih jedinica tzv. operacija.***

Sve te jedinične operacije počivaju na zajedničkim znanstvenim načelima: prijenos količine gibanja, prijenos topline i tvari.

* Bird, Stewart i Leightfoot, 1960. "Druga paradigma kemijskog inženjerstva – Transport Phenomena"

** Arthur D. Little, 1915. "Prva paradigma kemijskog inženjerstva"

Podjela jediničnih operacija

Mehaničke operacije

- temelje se na pojavama prijenosa količine gibanja*
- usitnjavanje, miješanje, fluidizacija, filtracija...*

Toplinske operacije

- temelje se na pojavama prijenosa topline*
- isparavanje, kristalizacija, destilacija, sušenje*

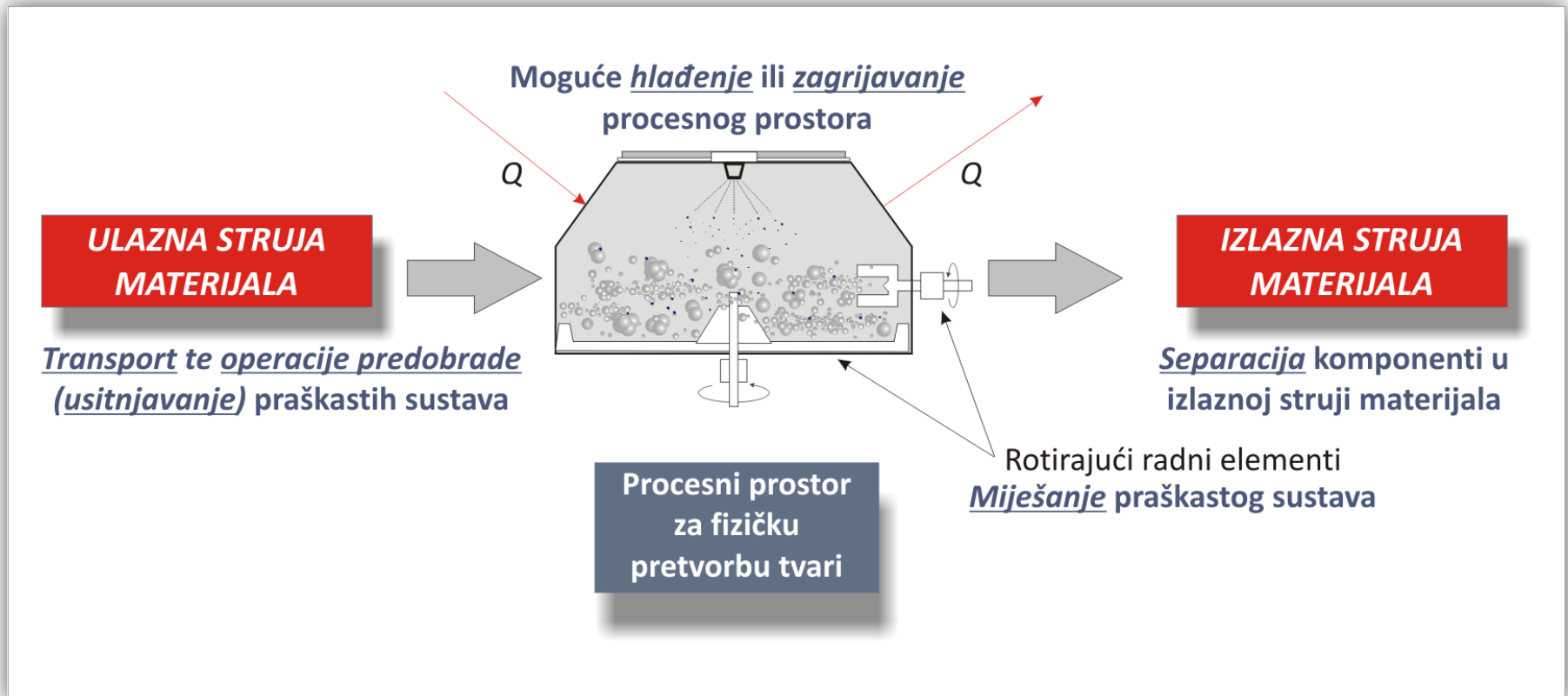
Difuzijske operacije

- temelje se na pojavama prijenosa tvari*
- destilacija, sušenje, ekstrakcija, apsorpcija*

Nerijetko, više fenomena prijenosa egzistira unutar jednog procesa.

Primjerice, tijekom procesa konvekcijskog sušenja prisutna su sva tri fenomena prijenosa:

- i. prijenos kol. gibanja –
zagrijani zrak struji iznad površine vlažnog materijala,*
- ii. prijenos topline –
zrak predaje toplinsku energiju vlažnom materijalu,*
- iii. prijenos tvari –
vlaga se kreće prema površini isparavanja.*



Slika 1. Shematski prikaz tehnološkog procesa.

Mehanički proces

Sadržan fenomen *prijenosa količine gibanja*.

Svojstvene su *pretvorbe (fizičke)* i *separacije tvari* uslijed mehaničkog djelovanja u *grubodisperznim sustavima*.

Pokretačka sila procesa: *razlika gustoća*, lokalnih smičnih naprezanja, te razlika tlaka (“*pressure driven processes*”).

Toplinski proces

Sadržan fenomen *prijenosa topline te izmjene tvari*.

Procesi su to vođeni molekularnim silama tijekom kojih dolazi do izmjene topline te tvari između dvije ili više faza promatranog sustava.

Pokretačka sila procesa: *temperaturni i koncentracijski gradijent*.

Toplinski separacijski procesi: isparavanje, kristalizacija, destilacija, sušenje.

Ravnotežni separacijski procesi: ekstrakcija, apsorpcija.

*“The key is
driving force of the operation.”*

Mehanički makroproces

Svaki proces kojim se ostvaruje promjena(e) u grubodisperznim sustavima (dakle na makrorazini).

Mehaničkim makroprocesom mijenja se *stanje izmiješanosti* (proces i mehaničke separacije/odvajanja i procesi kontaktiranja) i *stanje disperznosti/granulometrijsko stanje* (proces i usitnjavanja i procesi aglomeriranja) promatranog grubodisperznog sustava.

Procesi
separacije
u sustavima
čvrsto-čvrsto
(S/S partikulskim sustavima)
- klasifikacija

Mehanički makroprocesi

Procesi kojima se mijenja
stanje izmiješanosti

Procesi kojima se mijenja
stanje disperznosti

Procesi meh. separacije

Procesi kontaktiranja

Procesi usitnjavanja

Procesi aglomeriranja

Procesi
separacije
u sustavima
čvrsto-kapljevito

Procesi
separacije
u sustavima
čvrsto-plinovito

Fluidizacija

Mehaničko miješanje

Drobljenje

Mljevenje

Granuliranje

Aglomeriranje
tlačenjem

(S/L partikulskim sustavima)

Otprašivanje

Cikloni

Elektrofiltri

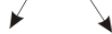
Filtracija

Flitri za plinove

Sedimentacija

Flotacija

Odavanje
sitom



Fizikalna veličina

- svako mjerljivo svojstvo (atribut) pojave, procesa, stvari*
- svojstvo koje se može kvantificirati mjerenjem*

Svojstva koja se ne mogu mjeriti, tj. ne mogu se kvantitativno iskazati dio su duhovne kulture čovjeka i nisu fizikalne veličine (okus, ljepota, miris).

Fizikalno svojstvo

- svojstvo (atribut) koje se može mjeriti/detektirati bez promjene identiteta promatrane tvari/sustava*
- tvar zadržava svoj identitet pri mjerenju danog svojstva*
- temperatura, veličina, oblik, naboj, moment, viskoznost, koncentracija, itd.*

Kemijsko svojstvo

- svako svojstvo čije mjerenje/detekcija nužno podrazumijeva promjenu u identitetu tvari/sustava*
- plamište, koordinacijski broj, entalpija, itd.*

Intenzivno svojstvo

- svojstvo (atribut) koje ne ovisi o količini tvari odnosno o veličini promatranog sustava*
- temperatura, viskoznost, gustoća, toplinska i el. vodljivost*

Ekstenzivno svojstvo

- svojstvo (atribut) koje ovisi o količini tvari odnosno o veličini promatranog sustava*
- duljina, obujam, masa, doseg reakcije, itd.*

Specifične veličine

- svojstvo iskazano po jedinici mase tvari/sustava*
- specifični toplinski kapacitet, specifična površina*

Molarne (množinske) veličine

- ekstenzivne fizikalne veličine podijeljene s množinom (količinom) tvari*
- molarna masa, molarni volumen, molarna Gibbsova energija*

Istorodne veličine

- one veličine koje se mogu međusobno zbrajati i oduzimati*
- pot. energija, kin. energija, un. energija, toplina, rad...*
- atm. tlak, podtlak, pretlak, pad tlaka...*

Faktori

- nemaju mjernu jedinicu*
- ako su A i B istorodne*

$$A = k \cdot B$$

k nazivamo faktorom

- faktor otpora, faktor trenja, Fanningov faktor trenja, faktor sferičnosti*

Koeficijent

- imaju mjernu jedinicu*
- svaki koeficijent ima fizikalni smisao, odnosno u njemu se razabire određeno fizikalno značenje*
- koeficijent difuzije, koeficijent toplinske vodljivosti,...*

Bezdimenzijska značajka

- skup fizikalnih veličina, grupiranih u bezdimenzijsko svojstvo sustava poradi lakšeg razmatranja fenomena prijenosa i međusobnih analogija*
- nemaju jedinicu*
- Reynoldsova značajka, Prandtlova značajka...*

Simpleksi

- bezdimenzijski odnosi istorodnih veličina*
- l/d , ϵ/d , D/d_m*

Procesni parametar

- karakteristično odnosno intrinzičko svojstvo sustava koje je za dani vremenski period nepromjenjivo*
- konstanta brzine reakcije, konstanta brzine koalescencije*

Procesne varijable

- su ona procesna svojstva koja se u okviru danog istraživanja mijenjaju i čiji utjecaj pratimo na odziv/vladanje procesa*

Prisustvujte predavanjima i seminarima
jer i to utječe na vašu ocjenu.

Dolazite na konzultacije.
Petkom, 8–9 h

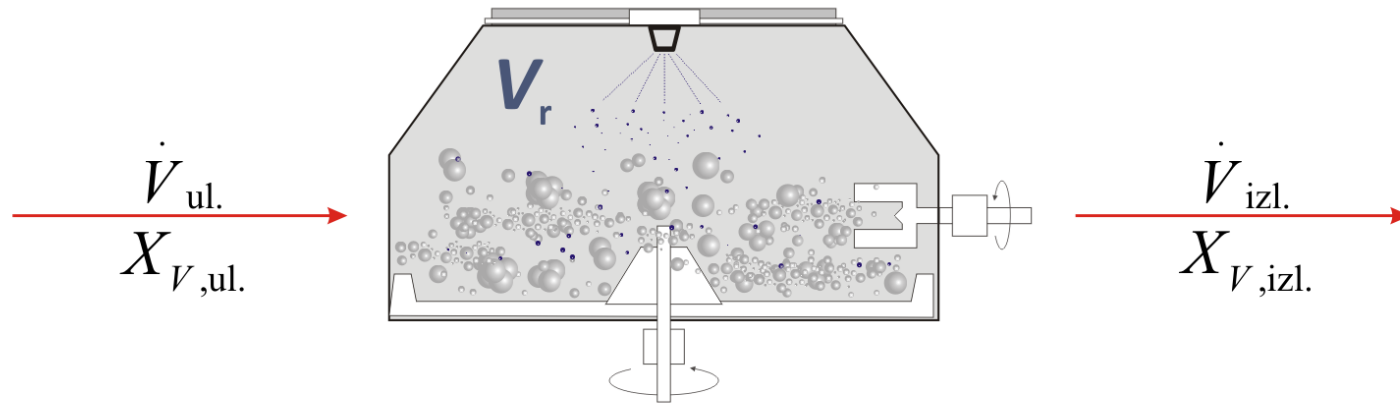
Ne prepisujte na parcijalnim kolokvijima i pismenim ispitima.

Svi fenomenološki opisi/zapisi promjena u stvarnom svijetu temelje se na

Općem zakonu očuvanja:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Akumulacija } X & & \text{Ulaz } X \\
 \text{u promatranom sustavu} & = & \text{u promatrani sustav po} \\
 \text{po jedinici vremena} & & \text{jedinici vremena} \\
 & & - \\
 & & \text{Izlaz } X \\
 & & \text{iz promatranog sustava} \\
 & & \text{po jedinici vremena} \\
 & & + \\
 & & \text{Nastajanje/nestajanje } X \\
 & & \text{u promatranom sustavu} \\
 & & \text{po jedinici vremena} \\
 & & \text{Generirana količina } X \\
 & & \text{u promatranom sustavu} \\
 & & \text{po jedinici vremena}
 \end{array}$$

X – količina gibanja, tvari i energije,
 količina novaca,
 količina jedinki (čvrstih čestica, kapljica, mjehurića, granula, peleta, virusa, bakterija,...),
 itd.



Procesni prostor

Procesni prostor ili kontrolni volumen jest omeđeni dio prostora kroz koji tijekom određenog vremena prolazi neka količina gibanja, tvari ili topline.

\dot{V} volumni protok, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

X_V količina gibanja, tvari ili energije po jedinici volumena procesnog prostora

Npr: $X = m \cdot v$ (količina gibanja)

$$X_V = \frac{m \cdot v}{V} = \rho \cdot v$$

V_r generirana količina gibanja, tvari ili energije X u kontrolnom volumenu/procesnom prostoru (nastajanje ili nestajanje količine X)

Makroskopska bilanca

$$V \cdot \frac{dX_V}{dt} = \dot{V}_{ul.} \cdot X_{V,ul.} - \dot{V}_{izl.} \cdot X_{V,izl.} + V_r$$

AKUMULACIJA

ULAZ

IZLAZ

GENERACIJA

Fizikalno značenje umnoška $\dot{V} \cdot X_v$

$$\dot{V} \cdot X_v = \frac{\cancel{V}}{t} \cdot \frac{X}{\cancel{V}} = \frac{X}{t} \quad \text{Tok}$$

Maseni protok (tok) $\dot{m} = \frac{m}{t}$ [kg s⁻¹]

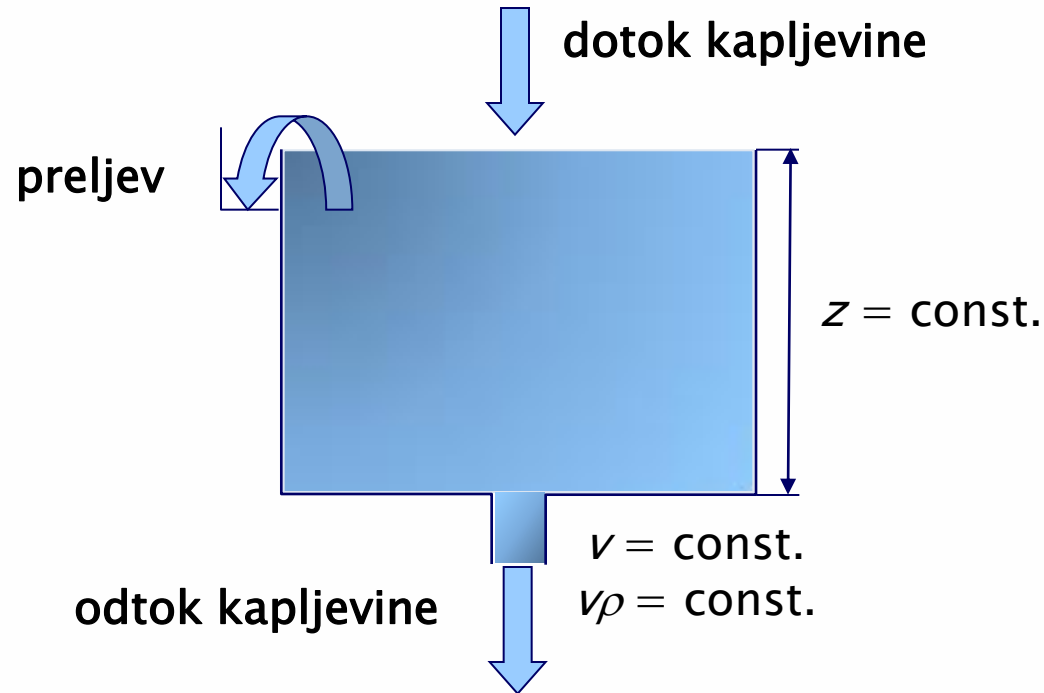
Volumni protok (tok) $\dot{V} = \frac{V}{t}$ [m³ s⁻¹]

Toplinski tok $\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ [J s⁻¹ = W]

Ovisno o promjeni karakteristične veličine sustava s vremenom razlikujemo *stacionarne & nestacionarne procese*.

$$\textit{Stacionaran proces} \quad \frac{dX_v}{dt} = 0$$

$$\textit{Nestacionaran proces} \quad \frac{dX_v}{dt} \neq 0$$



Kapljevina se dovodi u spremnik.
Preljev osigurava stalnu razinu kapljevine u spremniku.

TORRICELLIJEV ZAKON
– izvedenica **BERNOULLIJEVA TEOREMA***Toricellijev zakon*

Brzina istjecanja kapljevine jednaka je brzini slobodnog pada s visine koja odgovara stupcu kapljevine u spremniku.

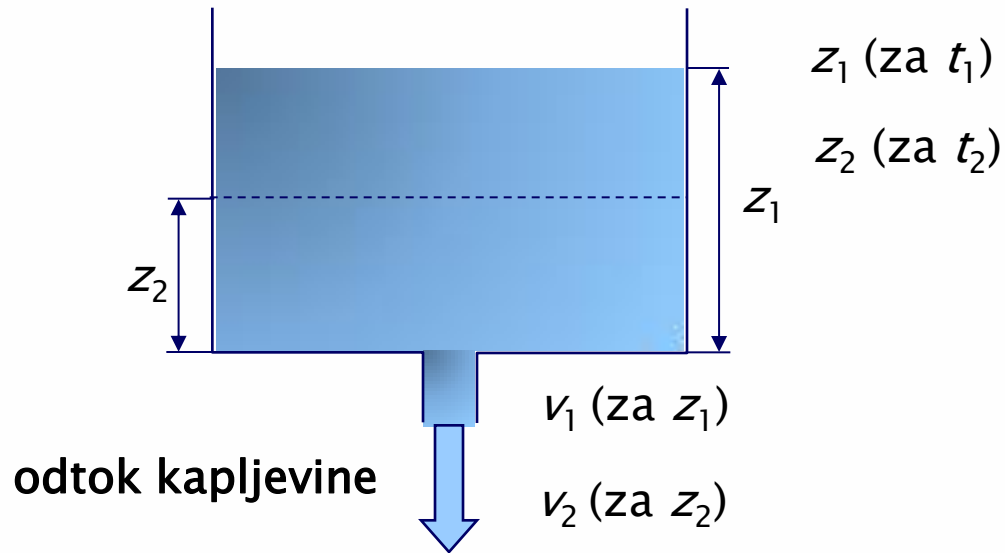
$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot z}$$

$$z = \text{const.} \Rightarrow v = \text{const.} \Rightarrow v\rho = \text{const.}$$

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

$$\frac{d(v \cdot \rho)}{dt} = 0$$

$$\frac{dX_V}{dt} = 0$$



Kapljevina se ne dovodi u spremnik.
 Razina kapljevine odnosno visina stupca kapljevine se mijenja s vremenom.

U vremenu istjecanja t_1 :

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot z_1}$$

U vremenu istjecanja t_2 :

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot z_2}$$

$$v = f(t) \qquad v \cdot \rho = f(t)$$

$$\frac{dv}{dt} \neq 0 \longrightarrow \frac{d(v \cdot \rho)}{dt} \neq 0$$

Gustoća toka (fluks)

$$\phi = \frac{X}{A \cdot t}$$

Fluks predstavlja količinu *prenesene* tvari ili količinu *prenesene* topline ili *prenesenu* količinu gibanja iskazanu po jedinici površine i vremena.

GUSTOĆA TOKA (FLUKS) JEST SVOJSTVO PROMATRANOG SUSTAVA U KOJEM SE ODVIJA FENOMEN PRIJENOSA S ODREĐENIM FIZIKALNIM ZNAČENJEM.

Gustoća toka (fluks) količine gibanja

Gustoća toka topline (gustoća topl. toka) toplinski fluks)

Gustoća toka (fluks) tvari – molna ili masena

$$\phi = \kappa \cdot \frac{\Delta}{y}$$

- Δ pokretačka sila procesa prijenosa
- y otpor prijenosu definiran kao udaljenost točaka u prostoru između kojih se odvija prijenos
- κ transportni koeficijent – ovisi o prirodi tvari

Primjetna sličnost s *Ohmovim zakonom*:

$$I = \frac{U}{R}$$

Mehanizmi prijenosa

Molekularni mehanizam prijenosa

Prijenos koji se zasniva na slučajnom *Brownovom* gibanju molekula (statistički prijenos)

Prijenos s molekule na molekulu

Vrtložni mehanizam prijenosa

Prijenos grupama molekula

Vrijednosti fluksa znatno veće

**PEDESIS – NASUMIČNO,
STOHAŠTIČKO KRETANJE JEDINKI
U FLUIDU**



Molekularni mehanizam prijenosa

$$\text{Fluks} = \text{Transportni koeficijent} \cdot \frac{\text{Pokretačka sila}}{\text{Otpor prijenosu}}$$

Transportni koeficijenti:

- kinematička difuzivnost (ν),
- temperaturna difuzivnost (a) ili (λ),
- masena difuzivnost (D).

Otpor prijenosu:

- udaljenost točaka između kojih se odvija prijenos

Pokretačka sila fenomena:

i. Razlika količine gibanja

(iskazane po V),

$$v \cdot \rho = \frac{m \cdot v}{V} \quad [\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$$

ii. razlika sadržaja (količine) topline

(iskazane po V),

$$\rho \cdot c_p \cdot T = \frac{m \cdot c_p \cdot T}{V} \quad [\text{J m}^{-3}]$$

iii. razlika masene koncentracije.

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad [\text{kg m}^{-3}]$$

$$\phi = K \cdot \frac{\Delta}{y}$$

| <u>FENOMEN</u> | PRIJENOS KOLIČINE GIBANJA | PRIJENOS TOPLINE | PRIJENOS TVARI |
|--|---|---|--|
| TRANSPORTNI KOEFIČIJENT | Kinematička difuzivnost ν | Temperaturna difuzivnost α, λ | Masena difuzivnost D |
| POKRETAČKA SILA FENOMENA | Razlika količine gibanja iskazane po V $d(\rho v)$ | Razlika količine topline iskazane po V $d(\rho c_p T)$ | Razlika masene koncentracije $d\gamma$ |
| GUSTOĆA TOKA (FLUKS), ϕ | Fluks količine gibanja τ NEWTON | Toplinski fluks q FOURIER | Maseni fluks n_A, j_A FICK Molni fluks N_A, J_A |

Vrtložni mehanizam prijenosa

$$\phi = \frac{\kappa}{y} \cdot \Delta = \kappa' \cdot \Delta$$

KOEFICIJENT PRIJENOSA
- OVISI O PRIRODI TVARI,
GEOMETRIJI SUSTAVA,
HIDRODINAMIČKIM UVJETIMA U
SUSTAVU (BRZINI STRUJANJA)
ODNOSNO O OKOLINI
(OKRUŽENJU)
- U NJEGA JE UGRAĐEN DOPRINOS
OTPORA PRIJENOSU

Gustoća toka količine gibanja

$$\phi = \frac{\kappa}{y} \cdot \Delta = \kappa' \cdot \Delta$$

$$\tau = f \cdot \frac{v^2 \cdot \rho - v_s^2 \cdot \rho}{2} = f \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

$$\frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

– dinamički tlak (kinetička energija fluida po jedinici volumena procesnog prostora, J m⁻³ (Pa))

f

– koeficijent proporcionalnosti (trenja)

v

– brzina gibanja u masi fluida, m s⁻¹

v_s

– brzina gibanja fluida uz stjenku, m s⁻¹

Gustoća toka topline

$$q = \alpha \cdot (T - T_s)$$

$$\phi = \frac{\kappa}{y} \cdot \Delta = \kappa' \cdot \Delta$$

- α – koeficijent prijelaza topline, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
 T – temperatura u masi fluida, K
 T_s – temperatura fluida uz stjenke, K

Gustoća toka tvari

$$\dot{m}_A = k \cdot (\gamma - \gamma_s)$$

$$\phi = \frac{\kappa}{y} \cdot \Delta = \kappa' \cdot \Delta$$

- k – koeficijent prijenosa tvari, m s^{-1}
- γ – masena koncentracija tvari, kg m^{-3}
- γ_s – masena koncentracija tvari tik uz stjenku, kg m^{-3}

VAŽNO

| <u>FENOMEN PRIJENOSA</u> | <u>MOLEKULARNI MEHANIZAM PRIJENOSA</u> | <u>MOLEKULARNI & VRTLOŽNI MEHANIZAM PRIJENOSA</u> | <u>VRTLOŽNI MEHANIZAM PRIJENOSA</u> |
|--|--|---|---|
| PRIJENOS KOLIČINE GIBANJA | Laminarno strujanje (laminarni hidrodinamički režim) | Prijelazno i turbulentno strujanje | Izrazito turbulentno strujanje (razvijena turbulencija) |
| PRIJENOS TOPLINE | Kondukcija | Prolaz topline | Konvekcija |
| PRIJENOS TVARI | Difuzija | - | Konvekcija |

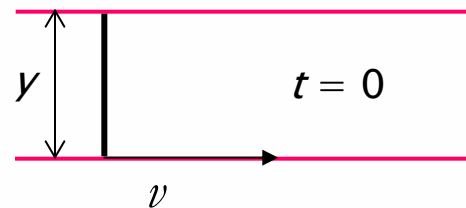
Fluid ili tekućina je tvar koja se pod djelovanjem smičnog naprezanja, koliko god malenog, neprekidno deformira.

Viskoznost jest svojstvo otpornosti fluida prema smičnoj deformaciji.

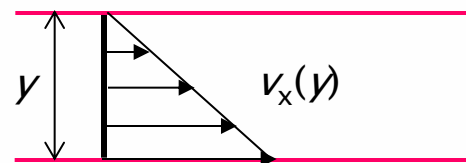
Zamislimo fluid između dvije čvrste plohe od kojih je jedna fiksna, a donja se giba brzinom v jer na nju djeluje sila inercije F .



**FLUID U MIROVANJU IZMEĐU
DVIJU PLOČA**



**DONJA PLOČA SE POČINJE GIBATI
BRZINOM v**



**KONAČNA RASPODJELA BRZINA U
STACIONARNOM STANJU (za
dovoljno veliki t)**

Uspostavlja se određeni profil brzine – pojedini elementi fluida gibaju se različitim brzinama.

Newtonov zakon viskoznosti

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dy}$$

$$F_{tr} = -\eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dy}$$

$$\phi = \kappa \cdot \frac{\Delta}{y}$$

$$\frac{F}{S} = \tau = -\eta \cdot \frac{dv}{dy}$$

$$\tau = -\nu \cdot \frac{d(v \cdot \rho)}{dy}$$

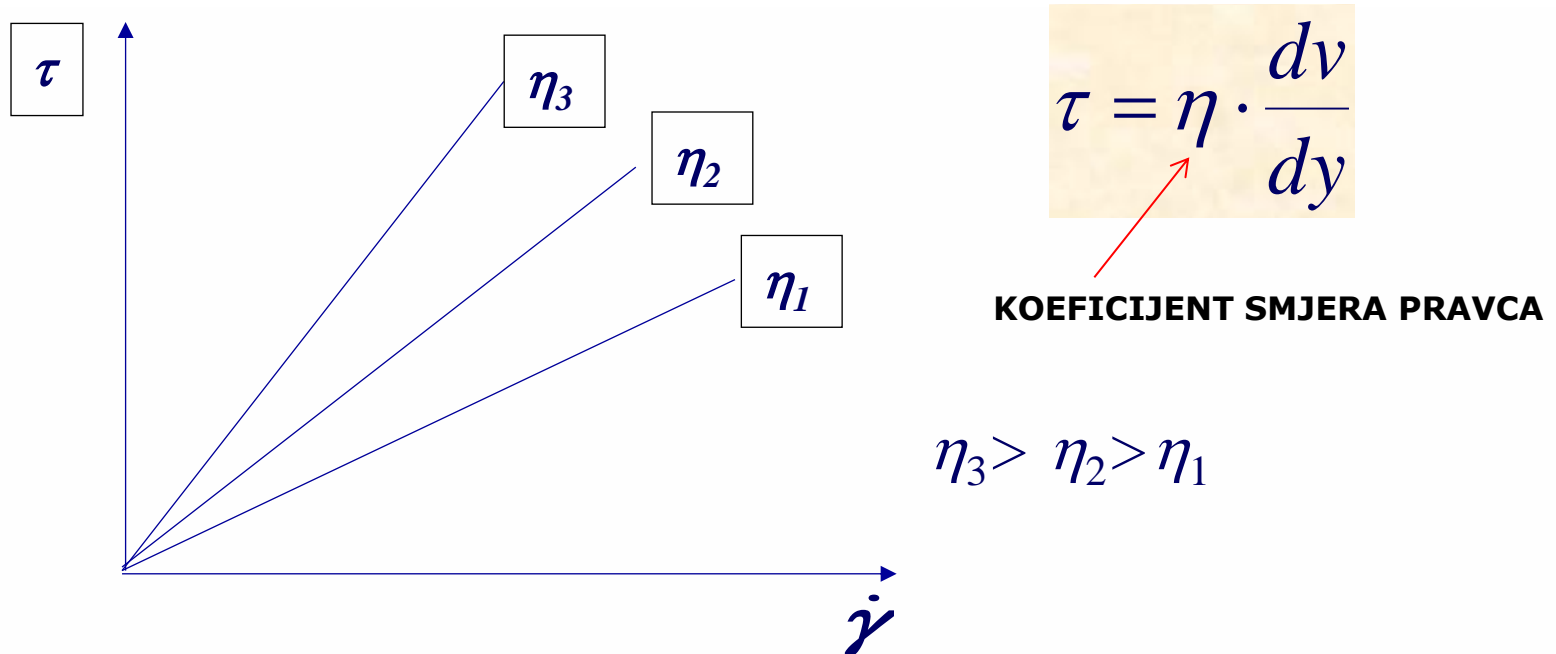
VRIJEDI ZA LAMINARNO (SLOJEVITO) STRUJANJE

DINAMIČKA VISKOZNOST FLUIDA [Pa s]

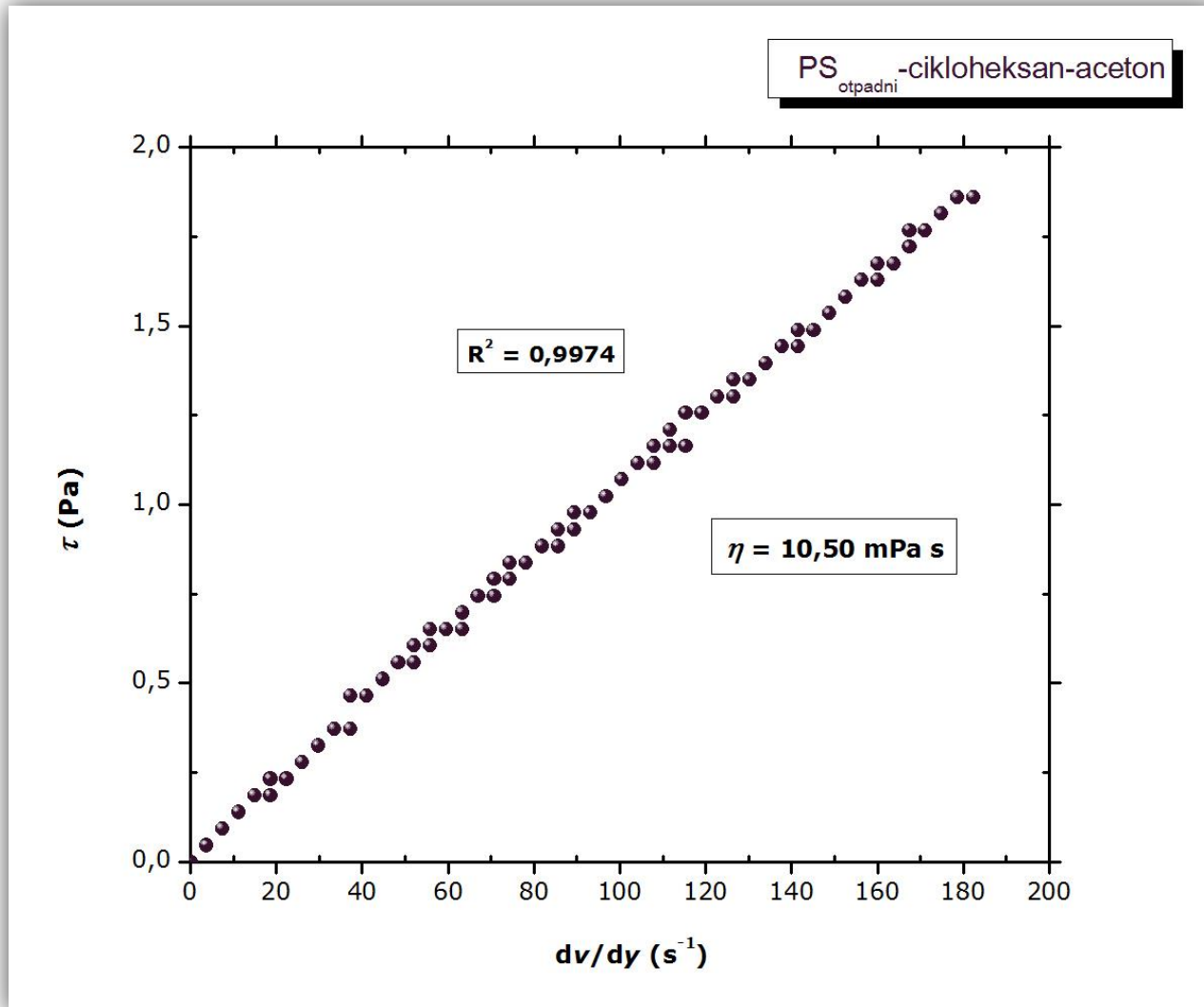
SMIČNO NAPREZANJE [Pa]

$$\frac{dv}{dy} = \dot{\gamma} \quad \text{GRADIJENT BRZINE (SMIČNA BRZINA) [s⁻¹]}$$

Svi fluidi koji se ponašaju po navedenoj zakonitosti nazivaju se **Newtonovi fluidi**.



Kod takovih fluida viskoznost jest nezavisna o smičnoj brzini za čitavu domenu primjenjivih smičnih brzina.



No, kod mnogih fluida viskoznost jest zavisna o smičnoj brzini.

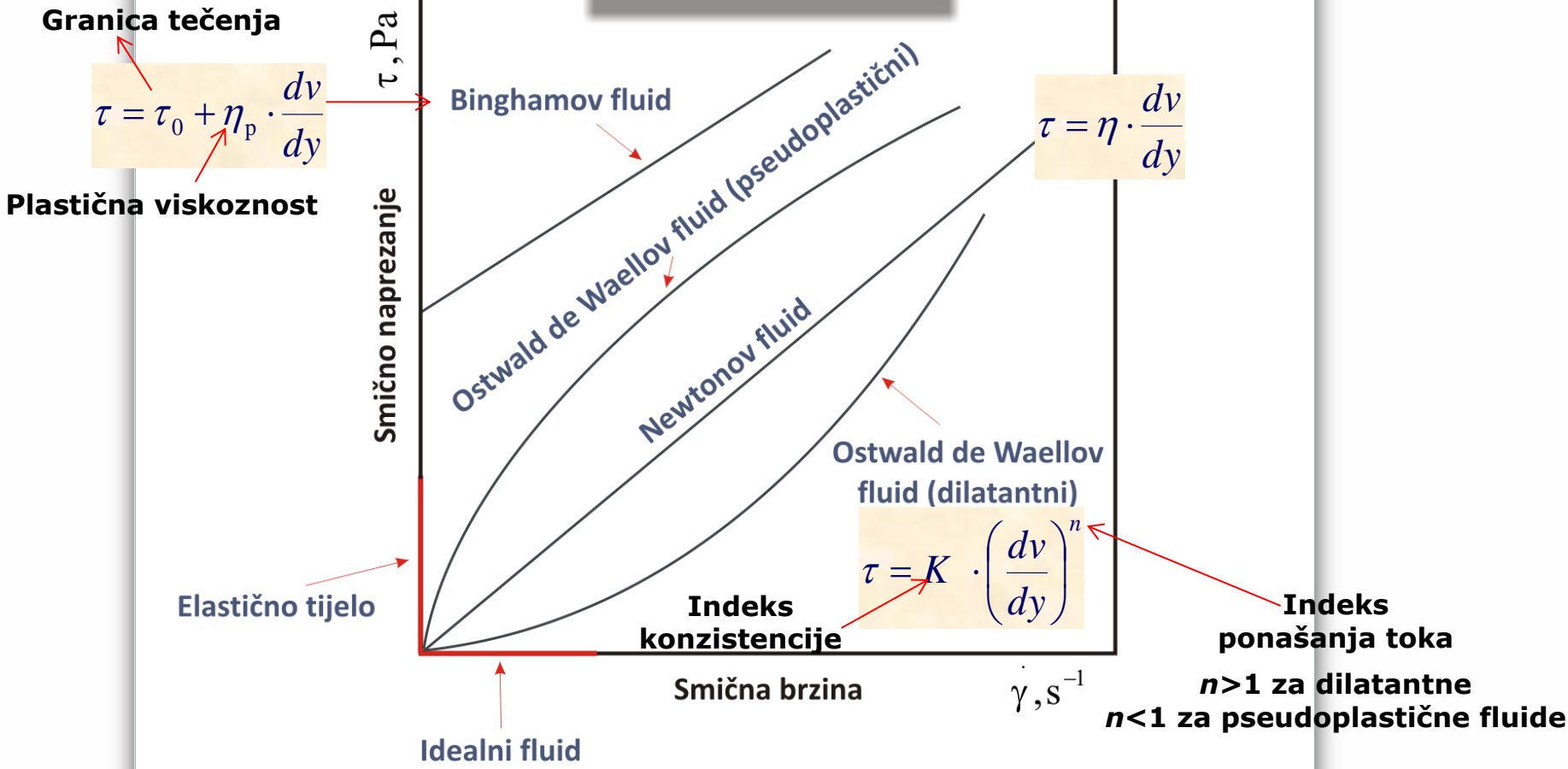
$$\eta = f(\dot{\gamma})$$

Upravo ta zavisnost se očituje reološkim dijagramima kojima se iskazuju reološka svojstva fluida.

**GRAFIČKI PRIKAZI OVISNOSTI
SMIČNOG NAPREZANJA I SMIČNE
BRZINE**



Reološki dijagram



Fenomen prijenosa količine gibanja



Newtonovo njihalo

U okviru ovog kolegija
bit će sagledana
isključivo tematika

prijenosa količine gibanja u fluidima
odnosno pri gibanju fluida
(u *hidrodinamskim sustavima*).

Mehanika fluida

Kada se govori o prijenosu količine gibanja u *hidrodinamskim sustavima* uobičajeno jest razmatrati četiri karakteristična slučaja gibanja fluida:

- i. PROTJECANJE,
- ii. OPTJECANJE,
- iii. STRUJANJE U MIJEŠALICI,
- iv. STRUJANJE KROZ POROZNU SREDINU (STRUKTURU) ODNOSNO KROZ SLOJ ČVRSTOGA.

Protjecanje

Protjecanje jest strujanje fluida kroz cijev ili uređaj uslijed razlike tlakova.
Svakom strujanju fluida protive se određeni otpori.

**SVEPRISUTNOST ODREĐENIH
OTPORA U HIDRODINAMSKIM
SUSTAVIMA!!!**

Zakoni očuvanja u hidrodinamskim sustavima

Zakon očuvanja mase/Bilanca tvari

Zakon očuvanja količine gibanja

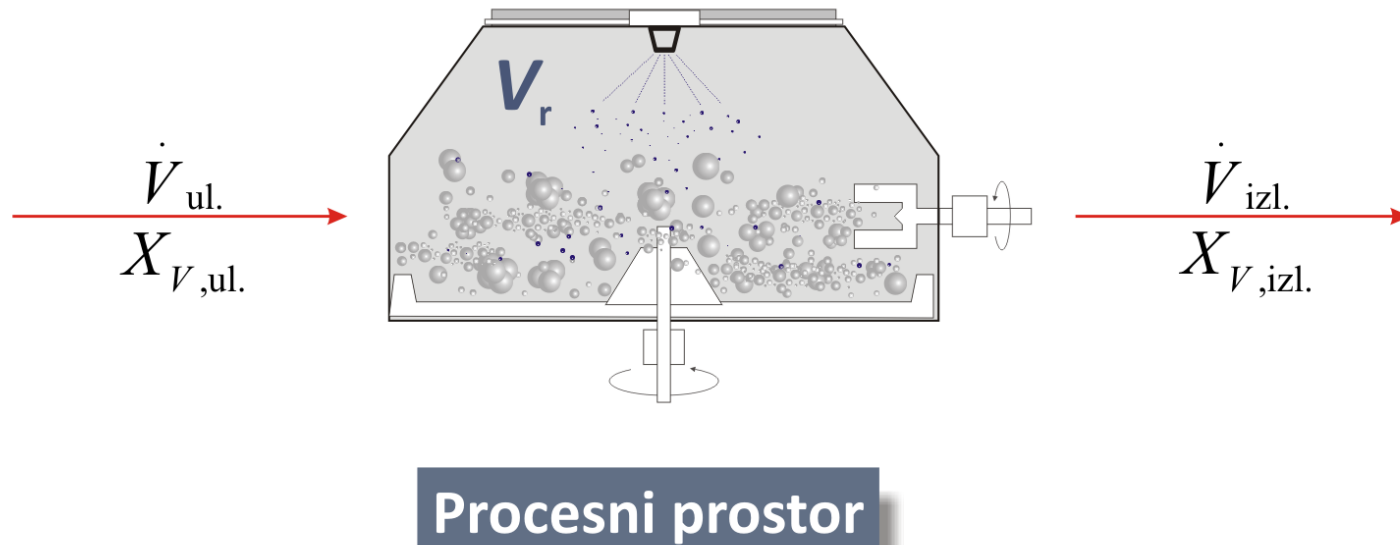
Zakon očuvanja energije

Polazište gore navedenih zakona jest
Opći zakon očuvanja.

Opći zakon očuvanja:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Akumulacija } X & & \text{Ulaz } X \\
 \text{u promatranom sustavu} & = & \text{u promatrani sustav po} \\
 \text{po jedinici vremena} & & \text{jedinici vremena} \\
 & & - \text{ Izlaz } X \\
 & & \text{iz promatranog sustava} \\
 & & \text{po jedinici vremena} \\
 & & + \text{ Nastajanje/nestajanje } X \\
 & & \text{u promatranom sustavu} \\
 & & \text{po jedinici vremena}
 \end{array}$$

X – količina gibanja, tvari i energije,
količina novaca,
količina jedinki (čvrstih čestica, kapljica, mjehurića, granula, peleta, virusa, bakterija,...),
itd.

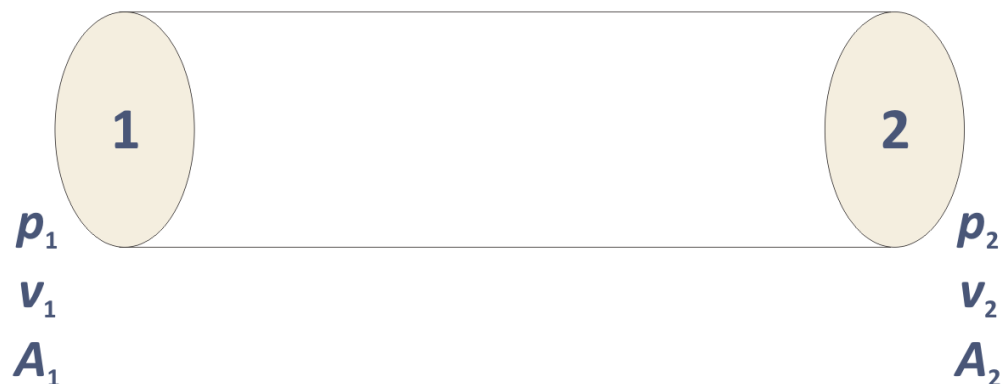


Makroskopska bilanca

$$V \cdot \frac{dX_v}{dt} = \dot{V}_{ul.} \cdot X_{V,ul.} - \dot{V}_{izl.} \cdot X_{V,izl.} + V_r$$

AKUMULACIJA
ULAZ
IZLAZ
GENERACIJA

Zakon očuvanja mase/Bilanca tvari/Jednadžba kontinuiteta



Procesni prostor
Cijev određenog volumena ili segment cijevi
definiranog volumena

AKUMULACIJA = ULAZ - IZLAZ + GENERACIJA

$$V \cdot \frac{dX_v}{dt} = \dot{V}_{ul} \cdot X_{v,ul} - \dot{V}_{izl} \cdot X_{v,izl} + V_r$$

X_v – izražava masu jediničnog volumena (gustoća)

$$\frac{dX_v}{dt} = 0$$

STACIONARAN PROCES

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

$$V \frac{d\rho}{dt} = \dot{V}_{ul} \cdot \rho_{ul} - \dot{V}_{izl} \cdot \rho_{izl} + V_r$$

NEMA GENERACIJSKOG
ČLANA

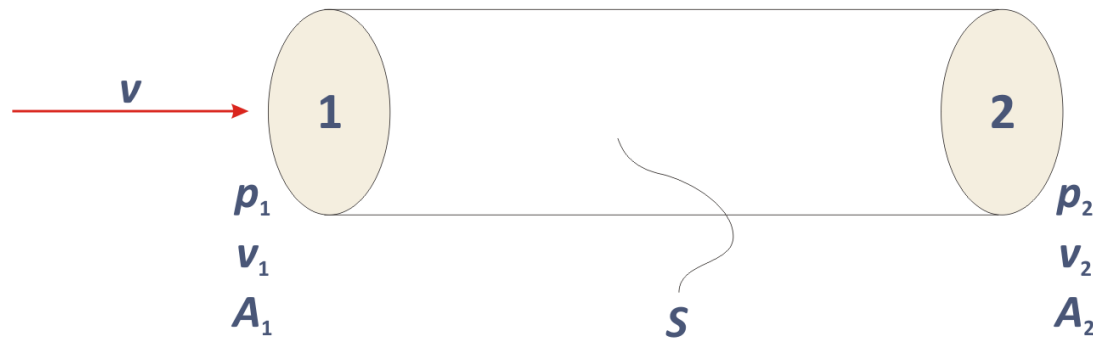
NEMA NASTAJANJA NI
NESTAJANJA MASE

Za izotermno strujanje nekompresibilnih fluida vrijedi:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \dots = v_i \cdot A_i$$

**KROZ PRESJEKE RAZLIČITIH
POVRŠINA U JEDNOM ZATVORENOM
SUSTAVU PROTJEČE FLUID ISTOG
MASENOG (VOLUMNOG U SLUČAJU
NEPROMJENJIVE GUSTOĆE FLUIDA)
TOKA, ALI RAZLIČITIM BRZINAMA**

Zakon očuvanja količine gibanja



Procesni prostor
Cijev određenog volumena ili segment cijevi
definiranog volumena

$$X_V = \frac{m \cdot v}{V} = \rho \cdot v$$

STACIONARAN PROCES

$$V \cdot \frac{d(v \cdot \rho)}{dt} = \dot{V}_{ul.} \cdot (v \cdot \rho)_{ul.} - \dot{V}_{izl.} \cdot (v \cdot \rho)_{izl.} + \dot{V}_r$$

**NEMA GENERACIJSKOG
ČLANA**

**NEMA NASTAJANJA NI
NESTAJANJA KOLIČINE
GIBANJA**

$$\dot{V}_{ul.} \cdot (v \rho)_{ul.} = \dot{V}_{izl.} \cdot (v \rho)_{izl.}$$

SMISAO PRODUKTA

$$\dot{V} \cdot (v \rho) = \frac{V}{t} \cdot \frac{v \cdot m}{V} = \frac{v \cdot m}{t} = m \cdot a = F$$

Zakon očuvanja količine gibanja kaže da je suma svih sila koje djeluju u sustavu jednaka nuli:

$$\sum_{i=0}^N F_i = 0$$

Karakteristične sile koje se javljaju pri gibanju fluida:

Sila tlaka koja uzrokuje gibanje fluida brzinom v ,

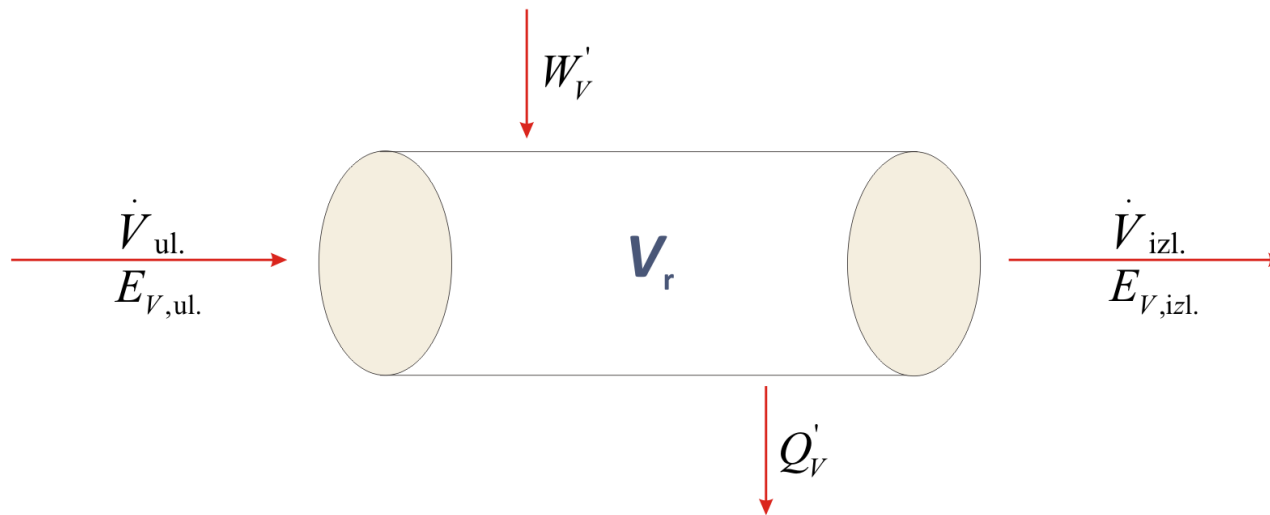
Sila trenja koja se protivi strujanju fluida i uzrokuje gubitak energije koji ima za posljedicu (se manifestira) određenim padom tlaka u hidrodinamskom sustavu.

$$F_{p_1} = F_{p_2} + F_{tr}$$

$$p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2 + \underbrace{\tau \cdot S}_{\text{trenje}}$$

$$\Delta p \cdot A = \tau \cdot S$$

Zakon očuvanja energije (Bernoullijeva jednadžba)



Procesni prostor
Cijev određenog volumena ili segment cijevi
definiranog volumena

$$E_V = p + \rho \cdot c_p \cdot T + \sum \Delta H_V + \frac{1}{2} v^2 \cdot \rho + \rho \cdot g \cdot z \quad [\text{J m}^{-3} = \text{Pa}]$$

STACIONARAN PROCES

NEMA GENERACIJSKOG ČLANA

SASTAVNICE GEN. ČLANA U HIDRODINAMSKIM
SUSTAVIMA SU JEDNAKIH IZNOSA

$$V \cdot \frac{dE_V}{dt} = \dot{V}_{ul} \cdot E_{V,ul} - \dot{V}_{iz} \cdot E_{V,iz} + W_V - Q_V$$

Dio dovedenog
mehaničkog rada koji
se pretvara u toplinu

Odvedena toplina

$$\dot{V}_{ul} = \dot{V}_{izl.}$$

$$\dot{T}_{ul} = \dot{T}_{izl.} \quad \rho_{ul} = \rho_{izl.}$$

$$(\rho \cdot c_p \cdot T)_{ul} = (\rho \cdot c_p \cdot T)_{izl.}$$

$$\sum \Delta H_V = 0$$

NEMA PROMJENE AGREGATNOG STANJA

$$E_V = \rho \cdot g \cdot z + p + \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

$$E_{V,ul.} = E_{V,izl.}$$

$$\left(\rho \cdot g \cdot z + p + \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \right)_{ul.} = \left(\rho \cdot g \cdot z + p + \frac{v^2 \cdot \rho}{2} \right)_{izl.}$$

**ZAKON OČUVANJA ENERGIJE ZA IDEALIZIRANE
HIDRODINAMSKE SUSTAVE (ZA STRUJANJE
IDEALNIH FLUIDA)**

**PRI STRUJANJU REALNIH FLUIDA DOLAZI DO NEPOVRATNOG
GUBITKA ENERGIJE USLIJED SVOJSTVA VISKOZNOSTI**

$$\rho_1 \cdot g \cdot z_1 + p_1 + \frac{v_1^2 \cdot \rho}{2} = \rho_2 \cdot g \cdot z_2 + p_2 + \frac{v_2^2 \cdot \rho}{2} + V_r \quad [\text{J m}^{-3} = \text{Pa}]$$

$$V_r = E_{\text{gub.}} = \rho \cdot g \cdot h_w$$

**Gubitak energije
iskazan visinom
stupca kapljevine**

$$z_1 \cdot g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = z_2 \cdot g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + h_w \cdot g \quad [\text{kg}^{-1}]$$

Pogodno je pojedine energetske članove iskazivati pripadajućim visinama:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_W \quad [\text{m}]$$

Geometrijska (geodetska) visina

Tlačna visina

Brzinska visina

Visina čiji iznos upućuje na nepovratni gubitak energije fluida zbog prisutnosti otpora u danom hidrodinamičkom sustavu

