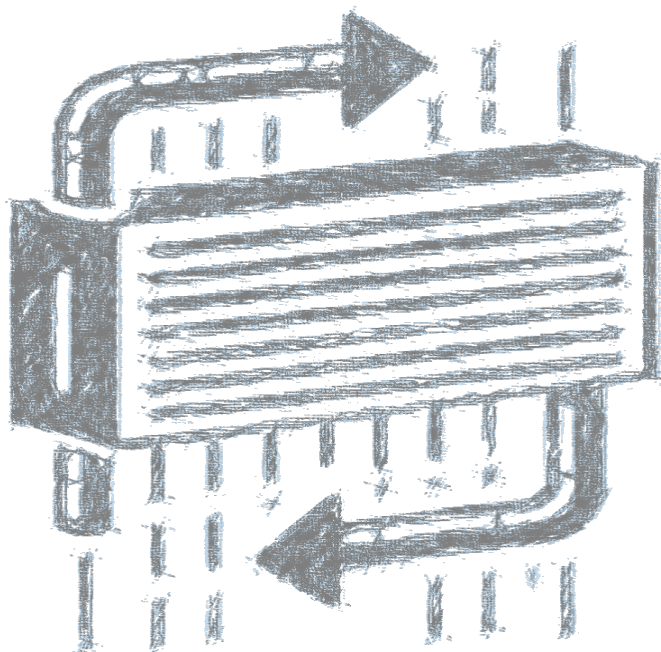


LABORATORIJSKE VAJE IZ TEHNOLOŠKEGA PROCESNIŠTVA



Blaž Jug, Nik Mahnič, Ilja Gasan Osojnik Črnivec, Maja Paš, Tomaž
Polak, Iztok Prislan, Meta Sterniša, Emil Zlatič, Zala Zorenč

LABORATORIJSKE VAJE IZ TEHNOLOŠKEGA PROCESNIŠTVA

Blaž Jug, Nik Mahnič, Ilja Gasan Osojnik Črnivec, Maja Paš, Tomaž
Polak, Iztok Prislan, Meta Sterniša, Emil Zlatič, Zala Zorenč

Ljubljana, 2024

Laboratorijske vaje iz Tehnološkega procesništva

Avtorji: Blaž Jug, Nik Mahnič, Ilja Gasan Osojnik Črnivec, Maja Paš, Tomaž Polak, Iztok Prislan, Meta Sterniša, Emil Zlatič, Zala Zorenč

Oblikovanje in prelom: Iztok Prislan

Naslovnica: Iztok Prislan (pri izdelavi slike je bila uporabljena umetna inteligenca)

Založila: Založba Univerze v Ljubljani

Za založbo: Gregor Majdič, rektor Univerze v Ljubljani

Izdala: Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani

Za izdajatelja: Marina Pintar, dekanja Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Ljubljana, 2024

Prva e-izdaja

Publikacija je v digitalni obliki prosto dostopna na: <https://ebooks.uni-lj.si>

Publikacija je brezplačna.

DOI: 10.14720/9789612974978



To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna licenca. / This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v
Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI](https://cobiss.si)-ID [218427139](https://cobiss.si/218427139)

ISBN 978-961-297-497-8 (PDF)

PREDGOVOR

Spoštovani študenti in študentke.

Pred vami so skripta za Laboratorijske vaje iz Tehnološkega procesništva, ki jih boste potrebovali za opravljanje vaj pri predmetu Tehnološko procesništvo. Gradivo smo avtorji pripravili v okviru ukrepa RSF A.II.1: Uporaba in razvoj odprtih učnih gradiv na UL v luči spodbujanja njihovega soustvarjanja s študenti.

Prosim vas, da na laboratorijske vaje prihajate pripravljeni, z zaščitno opremo (laboratorijska halja in očala), da sledite navodilom pedagoškega osebja in upoštevate varnostne predpise in pravila za delo v laboratoriju.

Želimo vam uspešno eksperimentiranje.

Avtorji

KAZALO

1	PRENOS TOPLOTE.....	1
1.1	OSNOVE.....	1
1.1.1	Segrevanje vode v posodi na ploščnem grelcu	4
1.1.2	Hlajenje v ploščnem izmenjevalcu toplote	5
1.1.3	Temperatura	6
1.2	EKSPERIMENTALNI DEL	12
1.2.1	Prenos toplote v posodi na ploščnem grelcu.....	12
1.2.2	Prenos toplote v toplotnem menjalniku	13
1.2.3	Izračuni.....	15
2	TOPLOTNA OBDELAVA ŽIVIL	17
2.1	OSNOVE.....	17
2.2	EKSPERIMENTALNI DEL	18
2.2.1	Spremljanje temperaturnega profila segrevanja	18
2.2.2	Meritve in izračuni	19
2.2.3	Merjenje specifične toplotne kapacitete olja	21
2.2.4	Meritve in izračuni	22
3	DIFERENCIALNA DESTILACIJA.....	23
3.1	OSNOVE.....	23
3.2	EKSPERIMENTALNI DEL	25
3.2.1	Izvedba diferencialne destilacije	25
3.2.2	Meritve in izračuni	26
4	REOLOGIJA ŽIVIL.....	34
4.1	OSNOVE.....	34
4.1.1	Viskoznost	34
4.1.2	Vrste tekočin	35
4.1.3	Metode merjenja viskoznosti.....	37
4.1.4	Določanje kinematične viskoznosti s pretočnimi posodicami	37
4.1.5	Določanje dinamične viskoznosti z viskozimetrom s padajočo kroglico.....	38
4.2	EKSPERIMENTALNI DEL	39
4.2.1	Meritve in izračuni (pretočne posodice).....	40
4.2.2	Meritve in izračuni (viskozimeter s padajočo kroglico).....	43
4.2.3	Meritve in izračuni (rotacijski viskozimeter).....	46

5	DOLOČANJE ČASA POMEŠANJA V MEŠALNIH POSODAH.....	49
5.1	OSNOVE.....	49
5.2	EKSPERIMENTALNI DEL	52
5.2.1	pH-metrična metoda.....	52
5.2.2	Termična metoda.....	53
5.2.3	Metoda razbarvanja.....	53
5.2.4	Meritve in izračuni	54
6	TOPLOTNA ODPORNOST MIKROORGANIZMOV	57
6.1	OSNOVE.....	57
6.1.1	Primer problematike v živilstvu	61
6.2	EKSPERIMENTALNI DEL	63
7	SIMULACIJA PRETAKANJA TEKOČIN	67
7.1	OSNOVE.....	67
7.2	EKSPERIMENTALNI DEL	69
7.2.1	Izračun faktorja trenja.....	69
7.2.2	Izračun volumskega pretoka	70
7.2.3	Izračun premera cevi.....	71
7.2.4	Načrtovanje sklenjenega sistema	72

1 PRENOS TOPLOTE

Vaja je namenjena spoznavanju osnov prenosa toplote, ki ima pomembno vlogo v številnih tehnoloških procesih. Spoznali se bomo z načinom ogrevanja vode na ploščnem grelcu do temperatur, ki so pomembne za ogrevanje sladice ali za pasterizacijo. Prav tako bomo uporabili ploščni toplotni izmenjevalnik in ponazorili, kako ga lahko v procesni tehniki uporabimo za učinkovito hlajenje in ponovno uporabo odpadne toplote. Spoznali se bomo z načini računskega opisa in dimenzioniranja naprav ter se naučili, kako ocenimo njihovo potrebno nazivno moč.

1.1 OSNOVE

Toplota (Q) je energija v prehodu, ki brez dodatno vloženega dela spontano prehaja iz toplejšega telesa na hladnejše telo. Po mednarodnem sistemu enot (SI) za toploto uporabljamo enoto Joule (J). V inženirskih sistemih se za toploto prav tako pogosto uporabljata starejši enoti kilokalorija (kcal) in britanske toplotne enote (British Thermal Units - BTU), pri čemer velja:

1 J	=	$2,390 \times 10^{-4}$ kcal	=	$9,478 \times 10^{-4}$ BTU	* Navedena je termokemijska kalorija, ki velja tudi v prehrani, po mednarodni parni tabeli pa velja 1 kcal = 4186,8 J; ker je enota definirana na podlagi specifične toplote vode, poznamo tudi druge definicije kalorije.
1 kcal	=	4184,0 J*	=	3,966 BTU	
1 BTU	=	1055,1 J	=	0,2522 kcal	

Pri načrtovanju in vodenju tehnoloških procesov upoštevamo načela termičnega inženirstva, ki zajemajo termodinamiko in prenos toplote. **Termodinamika** se ukvarja s prehajanjem energije iz ene oblike v drugo ter z možnimi doseženimi ravnotežnimi stanju. V grobem kontekstu opisuje količino prenesene toplote, količino opravljena dela med začetnimi in končnimi ravnotežnimi stanji sistema. Pri tem termodinamika ne podaja informacije o trajanju procesa. **Prenos toplote** je podrejen zakonom termodinamike in opisuje načine, s katerimi se toplota prenaša, hitrost, s katero se toplota prenaša, in temperaturno porazdelitev v telesu ob danem času.

Pri načrtovanju vseh procesov v živilski industriji se srečujemo s prenosom toplote, na primer za namen toplotne obdelave (pasterizacija, kuhanje, pečenje, itd.) ali ohlajanje (hlajenje ali zamrzovanje). Pri tem lahko snovne in/ ali strukturne spremembe živil toploto sprejemajo ali pa oddajajo, kot je to prikazano v preglednici 1.1.

Preglednica 1.1: Sproščanje/poraba toplote v posameznih procesih

Toplota	Tekočine	Mikro organizmi	Ogljikovi hidrati	Polisaharidi	Beljakovine	Maščobe	Encimi
sprošča	kondenzacija	rast, fermentacija	kristalizacija, razgradnja	retrogradacija, oksidacija	agregacija, kristalizacija	kristalizacija, oksidacija	agregacija, encimske reakcije
se porablja	uparjanje	-	taljenje, steklasti prehod	želiranje, steklasti prehod	denaturacija	denaturacija	denaturacija

Toplota se prenaša iz toplejšega območja v hladnejše območje. Kadar se temperaturne razlike s časom ne spreminjajo, govorimo o **stacionarnem prenosu toplote** (na primer – prenos toplote skozi okno pri konstantni zunanji in konstantni notranji temperaturi, temperaturna porazdelitev v preseku okna je stacionarna). Kadar temperaturne razlike s časom variirajo, govorimo o **nestacionarnem prenosu toplote** (hitrost prenosa se spreminja).

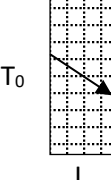
Hitrost prenosa toplote imenujemo toplotni tok ($\dot{Q}$ [W]). Ta nam pove, koliko toplote (sprememba toplote - ΔQ) se prenese v določenem času (sprememba časa – Δt). Gostota toplotnega toka ali toplotni flux (q [W/m²]) pa nam izrazi toplotni tok ($\dot{Q}$) skozi določeno površino (A), ki je pravokotna na smer prenosa.

$$\text{Toplotni tok } \dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{Gostota toplotnega toka } q = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1.1)$$

Načini prenosa toplote so:

- **Prevod (kondukcija)** - prenos toplote v snovi ali preko neposrednega stika dveh snovi brez gibanja mase snovi.
- **Prestop (konvekcija)** - prenos toplote preko gibanja plinov ali tekočin.
- **Sevanje (radiacija)** - prenos toplote preko elektromagnetnega valovanja v območju infrardeče, vidne in ultravijolične svetlobe ($\lambda = 100 \text{ nm} - 100 \mu\text{m}$), pomembno predvsem pri visokih temperaturah in za delovanje IR termometrov.

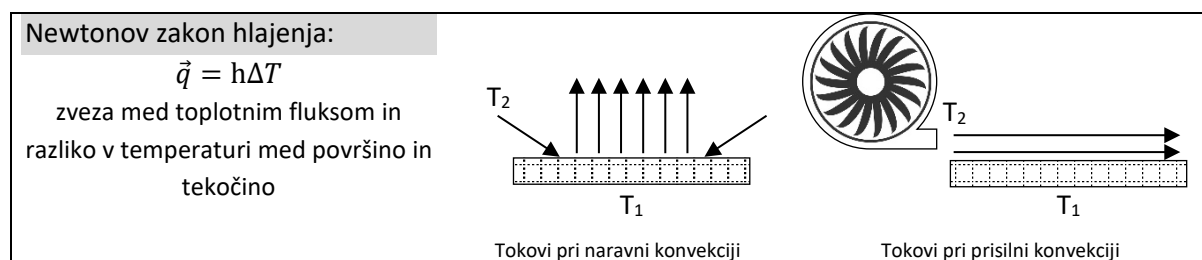
Pri **prevajanju** toplote skozi snov je hitrost prenosa odvisna od **toplotne prevodnosti snovi** (k [W/mK]), kar obravnava Fourierjev zakon (slika 1.1) Trdne snovi imajo mnogo višjo toplotno prevodnost kot tekočine ali plini. Toplotna prevodnost trdnih snovi se prav tako v manjši meri spreminja s temperaturo in tlakom, v primerjavi s tekočinami in plini kjer so lahko razlike v toplotni prevodnosti velike.

Fourierjev zakon: $q = \frac{\dot{Q}}{A} = k \frac{T_0 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = -k \frac{\Delta T}{\Delta r}$ zapis za spreminjanje temperature v smeri x (v eni smeri) oziroma zapis za cilindričen sistem v radialni (r) smeri $\vec{q} = -k \nabla T$ zapis za poljuben koordinatni sistem (∇T je temperaturni gradient v eni ali več smereh)	 Prevod toplote skozi snov. Toplota se prenaša v smeri padanja temperature.
---	--

Slika 1.1: Razlaga Fourierjevega zakona

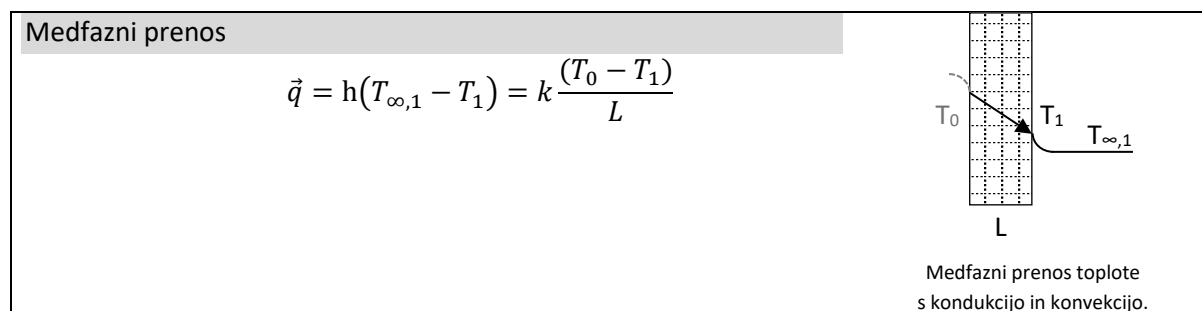
S **prestopom** se toplota prenaša iz gibajočih tekočin (ali plinov). Kadar je tekoča snov v stiku s toplejšo površino, se segreje, posledično se zmanjša njena gostota, tekočina se dvigne, na njeno mesto pa ponovno priteče nova neogreta tekočina. Ta način prenosa toplote imenujemo **naravna konvekcija**. Kadar pa prisilimo tekočino, da se giblje ob trdi površini, pa govorimo o **prisilni konvekciji**. Temperaturna razlika med različnimi deli tekočine sicer povzroči, da se del toplote prenaša s prevajanjem, vendar je konvekcija bolj učinkovita in v tem primeru prevajanje lahko zanemarimo. Prevajanje pa upoštevamo v neposredni bližini trdne površine, kjer je tok tekočine nič – v teh **mejnih slojih** tekočine je prevladujoči mehanizem prenosa **prevod**.

Prestop toplote je odvisen od **toplotne prestopnosti snovi** (h [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]), kar obravnava Newtonov zakon (slika 1.2). Toplotna prestopnost je odvisna od geometrije površine, vrste konvekcije, lastnosti tekočine in temperaturne razlike. Toplotna prestopnost tekočin je večja od plinskih. Pri izbiri koeficienta toplotne prestopnosti moramo upoštevati stanje konvekcijskega medija (npr. vrela voda, kondenzirajoča para, ...) in ali je sistem v sistemu naravne ali prisilne konvekcije. Geometrija površin prav tako vpliva na toplotno prestopnost, saj imajo neenakomerne površine večjo površino za izmenjavo toplote kot gladke površine ipd.



Slika 1.2: Razlaga Newtonovega zakona hlajenja

Količina toplote, ki s površine telesa prestopa v tekočino s konvekcijo, mora biti enaka količini toplote, ki k površini telesa pride s prevodom iz njegove notranjosti s kondukcijo. Ta izraz, ki je opisan na sliki 1.3, je mnogokrat koristen pri projektiranju.



Slika 1.3: Razlaga medfaznega prenosa toplote

Toplotno energijo, ki jo telo oddaja v okolico s **sevanjem**, podaja Stefan-Boltzmannov zakon (slika 1.4). Prenesena toplota je sorazmerna temperaturi (v K) na četrto potenco, zato je sevalni prenos toplote potrebno upoštevati šele pri visokih temperaturah. Količino sevanja zaznavajo tudi IR termometri, ki jo ob poznavanju ali nepoznavanju ϵ površine telesa bolj ali manj natančno pretvorijo v meritev površinske temperature.

Stefan-Boltzmannov zakon: $q = \sigma \epsilon T^4$ zapis za toplotni flux, ki ga telo emitira v okolico	ϵ je emisivnost površine telesa $(\epsilon = 1$ za črno telo, $\epsilon < 1$ za realna telesa) σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$
---	---

Slika 1.4: Razlaga Stefan-Boltzmannovega zakona

1.1.1 Segrevanje vode v posodi na ploščnem grelcu

Prenos toplote s ploščnega grelca preko posode v vodo je posledica kondukcije (prevoda skozi snov) in konvekcije (prenosa toplote z gibanjem tekočin). Zaradi nizke emisivnosti gladkih kovinskih površin in relativno nizkih temperatur, ki jih uporabljamo za segrevanje z električnim grelcem, lahko prenos toplote s sevanjem v tem primeru zanemarimo.

Količino potrebne toplote za segrevanje vode v posodi izračunamo iz toplotne kapacitete (C) in razlike v temperaturi:

$$\Delta Q = C(T_1 - T_0) \quad (1.2)$$

Toplotna kapaciteta mase, ki jo segrevamo, nam pove, koliko se ogrevano telo segreje pri dani dovedeni temperaturi. Izračunamo jo s pomočjo celokupne ogrevane mase (m) in specifične toplote (c). Specifična toplota nam pove, koliko energije je potrebne, da se 1 kg snovi segreje za 1 °C. V primeru ogrevanja lonca z vodo, je m masa lonca in vode, c pa skupna specifična toplota lonca in vode, kar lahko izrazimo tudi s posameznimi masami in specifičnimi toplotami lonca (m_L , c_{pL} in vode (m_V , c_{pV}):

$$C = m \times c_p = m_L \times c_{pL} + m_V \times c_{pV} \quad (1.3)$$

Ker pa je C posode znatno manjša od C vode, jo pri našem izračunu lahko zanemarimo in tako dobimo:

$$\Delta Q = m_V \times c_{pV} \times (T_1 - T_0) \quad (1.4)$$

Specifična toplota snovi je odvisna od temperature, zato pri izračunu uporabljamo aritmetično ali pa še boljje temperaturno uteženo povprečje specifičnih toplot v temperaturnem območju segrevanja. Prav tako je potrebno v primeru prehoda preko vrelišča upoštevati še energijo, ki se porablja ob vretju vode (pri 100 °C, -2260 kJ/kg), oziroma energijo, ki se sprosti ob kondenzaciji pare (pri 100 °C, +2260 kJ/kg).

Za razliko od tlačne posode (zaprt sistem) se specifična toplota vode v odprtem sistemu (posoda brez zatesnenega pokrova) znatno ne spreminja v območju od 20 °C do 75 °C, zato lahko za naše izračune uporabimo kar standardno specifično toploto vode, ki je določena pri 15 °C ($c_{pV} = 4,187$ kJ/kg K):

$$\Delta Q = m_V \times 4,187 \text{ kJ/kgK} \times (T_1 - T_0) \quad (1.5)$$

Iz te toplote lahko nato izračunamo povprečno moč grelca (P_G [W=J/s]), ki je bila potrebna za izmerjeno spremembo v temperaturi v opazovanem času (Δt [s])). Pazimo na uporabo pravih enot:

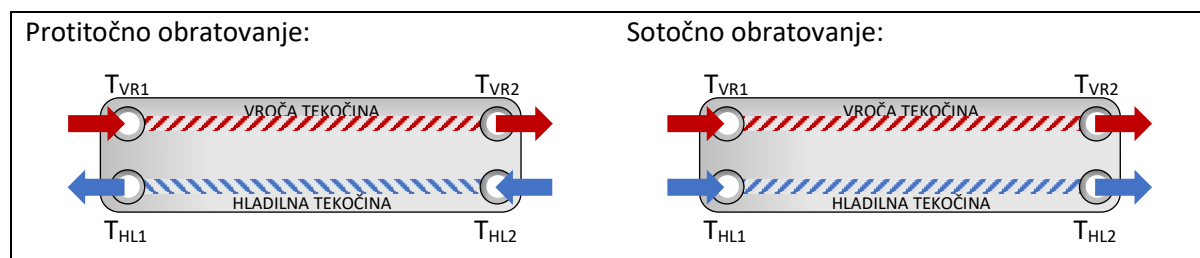
$$P_G = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.6)$$

V primeru da poznamo porabo energije v kWh (npr. če imamo nameščen števec porabe električne energije), lahko nato izračunamo še učinkovitost našega grelnega sistema. Pazimo na uporabo pravih enot:

$$\eta[\%] = \frac{P_G \times \Delta t}{[kWh_{el}]} \times 100 \quad (1.7)$$

1.1.2 Hlajenje v ploščnem izmenjevalcu toplote

Konvencionalni ploščni toplotni izmenjevalec obratuje v **protitočni** ali **sotočni** konfiguraciji (slika 1.5).



Slika 1.5: Protitočna in sotočna konfiguracija ploščnega toplotnega izmenjevalca

Toplotno bilanco v sistemu zapišemo kot produkt masnega pretoka ($\Phi[\text{kg/s}]$), specifične toplotne kapacitete ($c_p[\text{kJ/kg K}]$) in razlike v vstopni in izstopni temperaturi vroče in hladilne tekočine:

$$\Phi_{VR} \times c_{pVR} \times (T_{VR1} - T_{VR2}) = \Phi_{HL} \times c_{pHL} \times |T_{HL1} - T_{HL2}| \quad (1.8)$$

Enačbo lahko uporabimo, da ocenimo nepoznano temperaturo na enem izmed priključkov, na primer:

$$T_{HL1} = T_{HL2} + \frac{\Phi_{VR} \times c_{pVR}}{\Phi_{HL} \times c_{pHL}} \times (T_{VR1} - T_{VR2}) \quad (1.9)$$

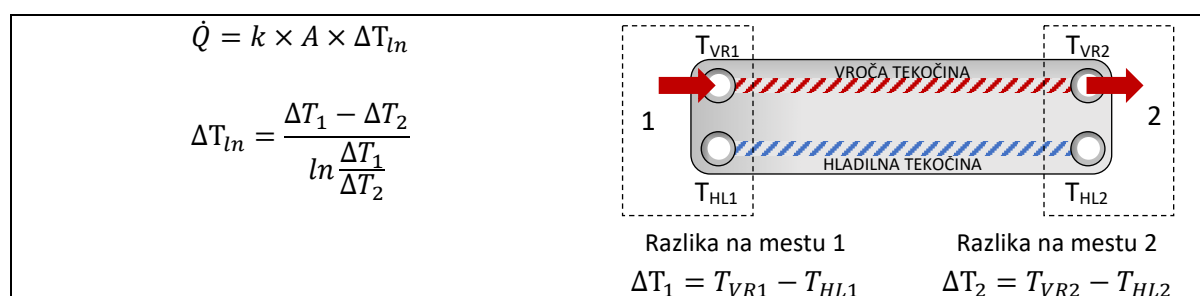
Kadar imamo poznane vse štiri temperature, pa lahko ocenimo učinkovitost izmenjevalca:

$$\eta[\%] = \frac{\Phi_{HL} \times c_{pHL} \times |T_{HL1} - T_{HL2}|}{\Phi_{VR} \times c_{pVR} \times (T_{VR1} - T_{VR2})} \quad (1.10)$$

Toplotni tok v toplotnem izmenjevalcu lahko zapišemo na podlagi spremembe temperatur v vroči tekočini:

$$\dot{Q} = \Phi_{VR} \times c_{pVR} \times (T_{VR1} - T_{VR2}) \quad (1.11)$$

Za toplotni tok v toplotnem izmenjevalcu prav tako velja, da je ta odvisen od povprečne toplotne prehodnosti ($k[\text{W/m}^2 \text{K}]$), površine, ki je na voljo za izmenjavo med toplim in hladilnim medijem ($A[\text{m}^2]$) in celokupne temperature razlike, ki jo izrazimo kot srednjo logaritemsko temperaturo (ΔT_{ln}), poznamo tudi kot parameter LMTD (*Logarithmic mean temperature difference*) (slika 1.6).



Slika 1.6: Izračuna parametra LMTD (*Logarithmic mean temperature difference*).

Toplotna prehodnost med tekočinami v ploščnem toplotnem izmenjevalcu znaša 1000 – 4000 W/m² K, v cevnem izmenjevalcu pa precej manj, za vodo okoli 850 –1700 W/m² K. Pri poznavanju vrednosti k lahko ocenimo minimalno površino, ki je potrebna za izmenjavo za doseganje želene temperature.

$$A = \frac{\dot{Q}}{k \times \Delta T_{ln}} \quad (1.12)$$

1.1.3 Temperatura

Temperatura je merilo za količino notranje energije v določenem telesu. Po mednarodnem sistemu enot za temperaturo uporabljamo enoti kelvin (K), oziroma stopinje Celzija (°C). Pogosto naletimo tudi na enoto stopinje Fahrenheita (°F). Pretvarjanje enot podaja preglednica 1.2.

Preglednica 1.2: Pretvorba med enotami, ki jih uporabljamo za merjenje temperature.

$[^{\circ}\text{C}] = [\text{K}] - 273,15$	$[\text{K}] = [^{\circ}\text{C}] + 273,15$
0 K = -273,15 °C	0 °C = 273,15 K
100 K = -173,15 °C	100 °C = 373,15 K
$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{F}] - 32) \times \frac{5}{9}$	$[^{\circ}\text{F}] = ([^{\circ}\text{C}] \times \frac{9}{5}) + 32$
0 °F = -17,8 °C	0 °C = 32 °F
100 °F = 37,8 °C	100 °C = 212 °F

Za merjenje temperature uporabljamo različne vrste termometrov (preglednica 1.3). Termometer sestoji iz temperaturnega tipala in pretvornika odziva tipala v številčno vrednost (temperaturo). Tipalo deluje na principu spreminjanja temperaturno pogojenih lastnosti trdnih, tekočih ali plinastih snovi. Glede na tip tipala se tako lahko spreminjajo fizikalne lastnosti (raztezek, prostornina), kemična stanja, geometrija, električne lastnosti (napetost, upor), akustične lastnosti. Termometre delimo na:

- mehanske kontaktne termometre
- električne kontaktne termometre
- sevalne termometre

Mehanski kontaktni termometri (slika 1.7) delujejo na principu temperaturno pogojenega raztezanja materiala oziroma na osnovi različnih raztezkov kompozitnih (sestavljenih) tipal:

- Termometri s tekočim polnilom: Termometer sestoji iz zbirnega cilindra s tekočino in na njega povezano kapilaro za katero je nameščena merilna skala. Ohišje tovrstnega termometra je navadno stekleno. Pri povečani temperaturi se prostornina tekočine poveča in gladina tekočine v kapilari se pomakne na ustrezno označeno temperaturo. Nad gladino tekočine je vakuum, ali plin, ki se pri povečani prostornini tekočine stisne. Območje delovanja termometra določata geometrija/ dimenzije ohišja in vrsta polnila. Najbolj poznani polnili sta živo srebro in alkohol, pri čemur živo srebro omogoča enostavno odčitavanje, alkoholno polnilo pa je zato rdeče obarvan. V procesni tehniki se uporablja tudi posebna različica termometra s tekočim polnilom s kovinskim cilindrom in vzmetno kapilaro, ki se lahko odčitava na ločenem prikazovalniku.

- Bimetalni termometri: Trak iz dveh spojenih kovin z različnim temperaturnim raztezkom je fiksiran na eni strani, na drugi pa pritrjen na prikazni mehanizem. Bimetalni trak je v termometru pogosto nameščen v obliki vijačnice, s čimer se poveča dolžina traku in s tem odzivnost ter natančnost inštrumenta. Bimetalni termometri obstajajo v številnih izvedbah. Termometri niso primerni za točkasto merjenje, saj mora biti celotna merilna tuljava izpostavljena enotni temperaturi. Takšne merilci so pogosto trajno nameščeni na mestu merjenja in jih uporabljamo za merjenje temperature tekočine v termoakumulacijskih posodah, kotlih ipd. Termometri so srednje počasi odzivni.
- Drugi kontaktni termometri zajemajo termometre s plinastim polnilom (podobna zasnova kot pri termometrih s tekočim polnilom), termometre z raztežno palico, »barvne« termometer na tekoče kristale, idr.

Preglednica 1.3: Vrste termometrov z delovnim območjem in natančnostjo.

Skupina	Tip	Možno merilno območje (°C)	Natančnost
Mehanski kontaktni termometri	z raztežno palico	0 – 1000	±1 – ±3%
	bimetalni	0 – 500	±1 – ±3%
	tekočinski stekleni	-195 – 1000	0,01 – 0,2 °C (do 200 °C)
	tekočinski stekleni Hg	-30 – 150 (do 1000 @ 100 bar)	
	tekočinski stekleni	-110 – 210	do ±2%
	alkoholni		
	tekočinski v raztezni kapilari	-150 – 550	0,005 – 0,1 °C
	plinski	-150 – 550	
Električni kontaktni termometri	uporovni RTD Pt100	-200 – 850	0,01 – 1 °C
	uporovni RTD Ni100	-60 – 180	
	uporovni termistorji NTC	-50 – 350	0,05 – 1,5 °C
	uporovni termistorji PTC	-40 – 180	
	termočleni	-270 – 2300	0,5 – 5 °C, do 1%
Sevalni termometri		-70 – 3000	širok razpon



Alkoholni termometer.



Bimetalni cevni termometer.



In line termometer na raztežno palico.

Slika 1.7: Prikaz nekaterih mehanskih kontaktnih termometrov

Električni kontaktni termometri omogočajo praktično neomejen prenos signala tipala. Delimo jih na uporovne na osnovi kovin, uporovne na os novi polprevodnikov in na termometre s termoelementi, t.j. s termočleni na osnovi spoja dveh kovin.

- Uporovni termometri na osnovi kovin/ RTD - resistance temperature device: Pri uporovnih termometrih na osnovi kovin izkoriščamo poznane uporovne lastnosti čistih kovin oziroma njihovih zlitin. Zaradi linearnega odziva najpogosteje uporabljamo platino (standardno tipalo Pt100 ima pri temperaturi 0 °C nazivno upornost 100 Ω). Cenejše različice RTD tipal temeljijo na niklju in njegovih zlitinah (npr. 70 % Ni, 30 % Fe), vendar imajo ožje merilno območje. Konstrukcijsko so RTD tipala navadno zasnovani kot dolga navitja, vgrajena v anorganski izolator (glinica ali steklo) ter ovita v korozijsko odporno kovinsko plast (inconel ali nerjaveče jeklo). Tipala so primerna tudi za merjenje točkovnih sprememb temperature in so srednje hitro odzivni. Zaradi možnosti segrevanja tipala pri napajanju z visokim tokom niso najbolj primerni za natančne meritve. Pri uporabi senzorjev z majhno upornostjo lahko na natančnost meritve vpliva tudi sama dolžina povezovalnega kabla.
- Uporovni termometri na osnovi polprevodnikov/ termistorji: Princip merjenja temperature s polprevodniki je podoben tipalom RTD. Polprevodniki so cenejši kot kovinska tipala in imajo večjo občutljivost, hkrati pa jih lahko uporabljamo v ožjem temperaturnem območju kot RTD. Materiali iz katerih so izdelani ti polprevodniki so kovinski oksidi (kovin Mg, Ni, Cr, Co). Termistorji so nelinearni upori, katerih upornost se spreminja v odvisnosti od temperature, zato jih ne moremo kalibrirati samo z enim koeficientom, temveč s polinomske funkcije ali pa z integracijo v analogna vezje. V uporovnih termometrih na osnovi kovin (RTD) upornost narašča z naraščanjem temperature. V uporovnih termometrih na osnovi polprevodnikov (termistorjev) pa poznamo dva tipa odziva tipala:
 - Temperaturno odvisni upori s pozitivnim temperaturnim koeficientom/ PTC - positive temperature coefficient kjer je odziv tak, kot pri RTD. PTC tipala uporabljamo v sistemih za regulacijo električnega toka (na primer v avtomatskih varovalkah).
 - Temperaturno odvisni upori z negativnim temperaturnim koeficientom/ NTC - negative temperature coefficient kjer upornost pada glede na naraščanje temperature. Za merjenje temperature pogosteje uporabljamo NTC tipala.
- Termoelementi: Termočleni so pari žic iz dveh različnih kovin, ki so sklenjene na enem koncu. V takšnem termoparu pri segrevanju merilnega spoja zaradi Peltierjevega in Thompsonovega efekta nastane napetost, ki je proporcionalna spremembi temperature. Zaradi termoelektričnih pojavov in številnih možnih območij merjenja so se za različne aplikacije razvili standardni tipi termoelementov ter materiali, ki jih uporabljamo za njihove stične elemente in podaljške. Vgradnja termočlena v ohišje je lahko: nesklenjena/ neozemljena (ungrounded) – spoj se ne dotika ohišja (električno izoliran stik, nekoliko počasnejša odzivnost), sklenjena/ ozemljena (grounded) – spoj je v stiku z ohišjem (stik ni električno izoliran, boljša odzivnost merjenja temperature), neizoliran (exposed junction) – stik gleda iz ohišja (najboljša odzivnost, primerno samo za nizkotlačno in nekorozivno okolje).

Preglednica 1.4: Razlaga NIST in IEC barvne lestvice

NIST barvna lestvica	Kovina 1 (+ pol)	Kovina 2 (- pol)	Uporabno T območje (°C)	Standardna napaka	Uporaba	IEC barvna lestvica
J	Fe	Cu-Ni	0 – 750	>2,2 °C oz. 0,75 %	Reduktivni, vakuumski, inertni pogoji. Omejena uporaba pri oksidativnih pogojih pri visoki T. Ni priporočeno za nizke T.	J
K	Ni-Cr	Ni-Al	-200 – 1250	>2,2 °C oz. 0,75 %	Oksidativni in inertni pogoji. Omejena uporaba pri reduktivnih in vakuumskih pogojih. Najpogostejša izbira.	K
T	Cu	Cu-Ni	-250 – 350	>1,0 °C oz. 0,75 %	Blagi oksidativni, reduktivni, vakuumski ali inertni pogoji. Primerno za prisotnost vlage. Kriogeni pogoji - nizke T.	T
E	Ni-Cr	Cu-Ni	-200 – 900	>1,7 °C oz. 0,75 %	Oksidativni ali inertni pogoji. Omejena uporaba pri reduktivnih in vakuumskih pogojih. Največja občutljivost/ °C.	E
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si-Mg	-270 – 1300	>2,2 °C oz. 0,75 %	Dobra alternativa termočlenu K z večjo odpornostjo na višje T.	N
R	Pt-13% Rh	Pt	0 – 1450	>1,5 °C oz. 0,75 %	Oksidativni ali inertni pogoji. Ni primerno v prisotnosti kovin. Možnost kontaminacije. Za visoke T. Uporabljati Cu/Cu-Ni	R
S	Pt-10% Rh	Pt	0 – 1400	>1,5 °C oz. 0,75 %	Oksidativni ali inertni pogoji. Ni primerno v prisotnosti kovin. Možnost kontaminacije. Za visoke T. Uporabljati Cu/Cu-Ni	S
B	Pt-30% Rh	Pt-6% Rh	0 – 1700	0,5 % preko 800 °C	Oksidativni ali inertni pogoji. Ni primerno v prisotnosti kovin. Možnost kontaminacije. Za visoke T, običajna izbira za steklarstvo.	B
G* (W)	W	W-26% Re	0 – 2320	>4,5 °C oz. 1,0 %	Vakuumska, inertna in vodikova atmosfera. Možnost vodikove korozije. Ni praktično za uporabo <399 °C. Ni za	G (W)
C* (W5)	W-5% Re	W-26% Re	0 – 2320	>4,5 °C oz. 1,0 %	Vakuumska, inertna in vodikova atmosfera. Možnost vodikove korozije. Ni praktično za uporabo <399 °C. Ni za	C (W5)
D* (W3)	W-3% Re	W-25% Re	0 – 2320	>4,5 °C oz. 1,0 %	Vakuumska, inertna in vodikova atmosfera. Možnost vodikove korozije. Ni praktično za uporabo <399 °C. Ni za	D (W5)

* - ni uradni simbol po NIST



Vbodno temperaturno uporovno (RTD) tipalo Pt100 v ročni izvedbi..



Temperaturno uporovno tipalo (RTD) v higienski izvedbi z mlekarskim procesnim priključkom.



Potopno nesklenjeno tipalo K tip z ustreznim merilnikom.

Slika 1.8: Prikaz nekaterih električnih kontaktnih termometrov

Sevalni termometri (pirometri) zaradi brezkontaktnega načina merjenja omogočajo merjenje premikajočih teles pri ekstremnih delovnih pogojih, do več tisoč °C. Sevalni termometri merijo toplotno sevanje na dva načina, ki ga oddaja površina merjenega telesa. Delovno področje sevalnih termometrov je običajno v bližnjem in srednjem IR območju ($\lambda = 0,5$ do $20 \mu\text{m}$). Sestavni deli sevalnega termometra so optični sistem (optične odprtine/ leče ali zrcala/ optično vlakno), detektor sevanja in elektronika za obdelavo signala. Za pravilno odčitavanje temperature s sevalnim termometrom je izredno pomembna njegova pravilna izbira, vgradnja in uporaba.

Merjenje s sevalnim termometrom temelji na principu pretvorbe izsevane energije telesa v temperaturo. Komercialni sevalni termometri v skladu z Stefan-Boltzmannovim zakonom predpostavljajo, da je vsa izsevana energija posledica temperature telesa (emisivnost, $\epsilon = 1,0$, kakor velja za črna telesa). Nadalje telesa, katerih emisivnost se ne spreminja z valovno dolžino, imenujemo siva telesa (večina organskih teles, $\epsilon = 0,9$ do $0,95$), medtem ko telesa, katerih emisivnost se spreminja z valovno svetlobo, imenujemo ne-siva telesa. Ker imajo različne površine dejansko različno emisivnost, pa se napaka meritve temperature povečuje z manjšanjem faktorja emisivnosti. Za telesa z nizko emisivnostjo je zato potrebno sevalne termometre posebej kalibrirati, ali pa na drug način prilagoditi površino za odčitavanje temperature (preglednica 1.5).

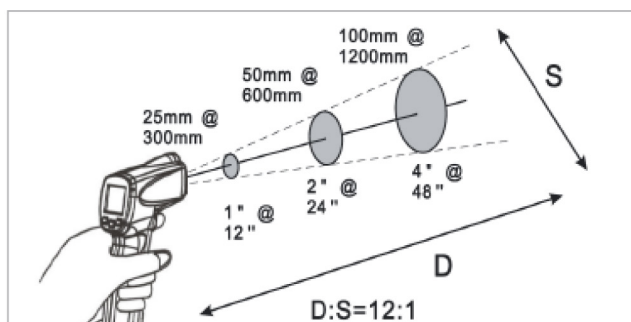
Preglednica 1.5: Emisivnost posameznih materialov oz. snovi.

Površina	Emisivnost, ϵ
Aluminij (anodiziran)	0,77
Aluminij (poliran)	0,05
Nerjaveče jeklo (polirano)	0,08
Asfalt	0,93
Steklo	0,93
Človeška koža	0,95
Globoka voda	0,95
Led	0,97

Različice sevalnih termometrov so:

- Enovalovni sevalni termometer: Vrsta najcenejšega termometra, ki deluje v ozkem pasu valovnih dolžin in določa gostoto oddane energije, v ozkem (delnem) spektru valovnih dolžin. Termometer imenujemo tudi monokromatski sevalni termometer. Primeren je za merjenje bolj ali manj izpostavljenih površin z relativno konstantno emisivnostjo površine.
- Dvo-valovni sevalni termometer primerja energije v dveh ozkih pasovih valovnih dolžin in izračuna temperaturi iz dobljenega razmerja med energijami. Glede na način meritve dvo-valovni sevalni termometri ocenijo točko z najvišjo površinsko temperaturo in so manj občutljivi na manjše spremembe v emisivnosti. Tovrstni termometri so uporabni v pogojih, kjer se merjenec nahaja za optično oviro, kot so zamazane opazovalne line, vodni kamen, para, pršenje vode, prah in podobno. Prav tako lahko z njimi merimo temperaturo površin z nizko emisivnostjo in predmete na katere je pogled delno zakrit.

- Sevalni termometer na popolno sevanje so opremljeni z zmogljivo elektroniko in detektorjem, ki omogočata določanje temperature površin z neenakomerno razporeditvijo temperatur in emisivnosti. Uporabljamo jih pri enakih pogojih kot dvo-valovne sevalne termometre, s to razliko, da lahko pri oceni popolnega sevanja merimo temperaturo ne-sivih teles, kot na primer površine kovin.



Slika 1.9: Eno valovni sevalni termometer z zaslonko. Odprtina zaslonke skupaj z aktivnim poljem detektorja določa vidni kot termometra in končno velikost merilne površine glede na oddaljenost od merjenca.

Različica sevalnega termometra je tudi optični termometer, ki za določanje temperature primerja sevanje merjene razbeljene snovi (ali celo plamena) z lastnim internim razbeljenim virom z znano temperaturo. Pristop se uporablja v steklarstvu in metalurgiji in je za živilstvo manj uporaben.

1.2 EKSPERIMENTALNI DEL

1.2.1 Prenos toplote v posodi na ploščnem grelcu

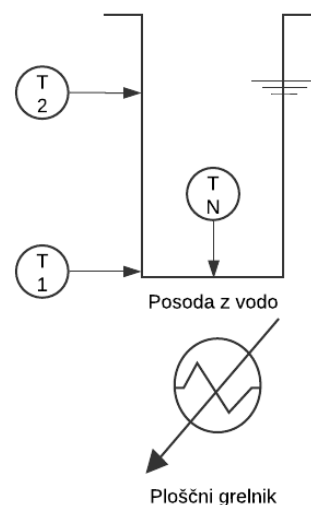
Material:

- posoda z grelcem,
- termometer (merilec, $2 \times K$ -tip)

Potek dela:

Eksperiment sestavimo po sliki 1.10. Posodo z grelcem nastavimo na $T_N = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = \infty$.

V preglednico 1.6 zabeležimo doseženo temperaturo na tipalih T_1 in T_2 ter na vgrajenem tipalu T_N . Prvih 10 min beležimo temperaturne meritve na 1 min. Nato beležimo temperaturo na 5 min, dokler temperatura v posodi ne doseže $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uporabljamo krožno štopanje in funkcijo [hold]. Ko temperatura v posodi doseže $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, ogrevanje nastavimo na $T_N = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = \infty$.



Slika 1.10: Shematski prikaz preskusne zasnove posode.

Preglednica 1.6: Temperaturne meritve pri ogrevanju posode z grelcem.

t (h:min)	t (min)	Δt (min)	T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	T_N ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{avg}1-2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
	0	0					-
	1	1					
	2	1					
	3	1					
	4	1					
	5	1					
	6	1					
	7	1					
	8	1					
	9	1					
	10	1					
	15	5					
	20	5					
	25	5					
	30	5					
	35	5					
	40	5					
	45	5					
	50	5					
Celokupno:							
$\Delta t =$		min =	s	$T_{\text{začetek}} =$		$^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{konec}} =$
						$^{\circ}\text{C}$	$\Delta T =$
						$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$

Preglednica 1.7: Temperaturne meritve pri uporabi ploščnega izmenjevalca na 12 plošč, $\Phi_{HL} \approx \Phi_{VR}$.

$t_{500 \text{ mL HL}} =$	s	$\Phi_{HL} =$	L/min	$T_{\text{izmenjevalnik}} =$	°C
		$\Phi_{HL} =$	L/s		

t (h:min)	t (s)	T_1 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	Celokupno:
	0				$\Delta T_{VR} = T_{1(120s)} - T_{3(120s)} =$
	30				$\Delta T_{HL} = T_{4(120s)} - T_{4(0s)} =$
	60				
	90				$\Delta T_1 = T_{1(120s)} - T_{4(120s)} =$
	120				$\Delta T_2 = T_{3(120s)} - T_{4(0s)} =$

Preglednica 1.8: Temperaturne meritve pri uporabi ploščnega izmenjevalca na 12 plošč, $\Phi_{HL} \approx 2 \times \Phi_{VR}$.

$t_{500 \text{ mL HL}} =$	s	$\Phi_{HL} =$	L/min	$T_{\text{izmenjevalnik}} =$	°C
		$\Phi_{HL} =$	L/s		

t (h:min)	t (min)	T_1 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	Celokupno:
	0				$\Delta T_{VR} = T_{1(120s)} - T_{3(120s)} =$
	30				$\Delta T_{HL} = T_{4(120s)} - T_{4(0s)} =$
	60				
	90				$\Delta T_1 = T_{1(120s)} - T_{4(120s)} =$
	120				$\Delta T_2 = T_{3(120s)} - T_{4(0s)} =$

Preglednica 1.9: Temperaturne meritve pri uporabi ploščnega izmenjevalca na 24 plošč, $\Phi_{HL} \approx \Phi_{VR}$.

$t_{500 \text{ mL HL}} =$	s	$\Phi_{HL} =$	L/min	$T_{\text{izmenjevalnik}} =$	°C
		$\Phi_{HL} =$	L/s		

t (h:min)	t (min)	T_1 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	Celokupno:
	0				$\Delta T_{VR} = T_{1(120s)} - T_{3(120s)} =$
	30				$\Delta T_{HL} = T_{4(120s)} - T_{4(0s)} =$
	60				
	90				$\Delta T_1 = T_{1(120s)} - T_{4(120s)} =$
	120				$\Delta T_2 = T_{3(120s)} - T_{4(0s)} =$

1.2.3 Izračuni

Prenos toplote v posodi na ploščnem grelcu

Izračunajte količino potrebne toplote za segrevanje vode v posodi od začetne temperature do 75 °C v doseženem času:

$$V_v = \quad m_v = \quad \Delta t = \quad \Delta T = \quad r_{\text{dno}} = \quad A_{\text{dno}} =$$

$$Q = m_v [\text{kg}] \times 4,187 \text{ kJ/kgK} \times (T_1 - T_0) \quad Q =$$

Izračunajte količino potrebne moči grelca za segrevanje vode v posodi od začetne temperature do 75 °C v doseženem času:

$$P_G = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad P_G =$$

Izračunajte toplotni tok in toplotni flux

$$\dot{Q} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \dot{Q} = \quad q = \frac{\dot{Q}}{A} \quad q =$$

Ugotovitve komentirajte (hitrost ogrevanja, navedena moč grelca s strani proizvajalca, učinkovitost):

Prenos toplote v toplotnem menjalniku

Izračunajte izkoristek, toplotni tok in funkcionalno površino uporabljenih toplotnih izmenjevalcev pri preskušenih različnih režimih obratovanja. Ker uporabljamo sistem voda-voda, lahko pri izračunu izkoristka c_p ($c_{pHL} = c_{pVBR}$) okrajšamo. Za naš sistem uporabimo toplotno prehodnost $3 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$.

Parametri	Protitočno delovanje		
	na 12 plošč	na 24 plošč	
Izkoristek	$\Phi_{HL} \approx \Phi_{VR}$	$\Phi_{HL} \approx 2 \times \Phi_{VR}$	$\Phi_{HL} \approx \Phi_{VR}$
$\eta[\%] = \frac{\Phi_{HL} \times \Delta T_{HL}}{\Phi_{VR} \times \Delta T_{VR}} \times 100$			
Toplotni tok			
$\dot{Q} = \Phi_{VR} [kg/s] \times 4,187 \text{ kJ/kgK} \times \Delta T_{VR}$			
Potrebna površina			
ΔT_1			
ΔT_2			
$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$			
$A = \frac{\dot{Q}}{3 \text{ kW/m}^2 \text{ K} \times \Delta T_{ln}}$			
Toplotni flux			
$q = \frac{\dot{Q}}{A}$			

Specifikacije uporabljenih ploščnih izmenjevalcev so:

Število plošč	Mere $d \times \dot{s} \times v$ (cm)	Delovna površina (m^2)	Nazivna moč hlajenja (kW)	Toplotni flux (kW/m^2)
12	$19 \times 8 \times 3,5$	0,12	8	67
24	$19 \times 8 \times 6$	0,26	16	62

Primerjajte specifikacije z vašimi meritvami in ugotovitve komentirajte:

2 TOPLOTNA OBDELAVA ŽIVIL

Vaja je namenjena spoznavanju kompleksnosti prenosa toplotne energije iz grelnega telesa (grelca) preko prevodnika (zraka) na živilo (trdna snov). Pri prenosu toplote v tovrstnih sistemih v industriji nikakor ne smemo zanemariti toplotne kapacitete samega objekta v katerem poteka toplotna obdelava živil (npr. avtoklav, duplikatorji, konvektometri, prekajevalne komore, komore za toplotno obdelavo, hladilni sistemi, zorilne komore...). Namen vaje je opredeliti in ovrednotiti nekatere parametre toplotne obdelave mesa (oblikovano meso) v treh različnih pečicah.

2.1 OSNOVE

Osnove toplote in prenosa toplote si pogledajte v navodilih vaje Prenos toplote.

Prenos toplote v pečici je bistveno drugačen kot prenos toplote v ploščnem izmenjevalcu, kjer gre predvsem za kondukcijo. Prenos toplote v pečici je kompleksnejši in je sestavljen iz sevanja, kondukcije in konvekcije ter izkoristkov pri vsakem prenosu. Poleg omenjenega pa je zelo pomembno tudi, kako živilo odreagira na spremembo temperature v svoji okolici. V samem živilu prihaja do temperaturnega gradienta med temperaturo tik pod površino (T_{pp}) in temperaturo središča (T_s) pri nastavljeni temperaturi pečice (T_p). Poleg naštetega prihaja na površini do evaporacije vode, prehajanje iz tekočega v plinasto agregatno stanje in posledično do spreminjanja same mase in površine živila. V živilu (mesu) poteka tudi denaturacija beljakovin, ki vpliva na porabo toplotne energije.

Količino dovedene toplote lahko v osnovi izračunamo iz toplotne kapacitete (C) in razlike v temperaturi (ΔT) celotnega heterogenega sistema.

$$\Delta Q = C(T_1 - T_0) \quad (2.1)$$

Toplotna kapaciteta nam pove za koliko se poveča toplota snovi, če jo segrejemo za 1 K in je zmnožek mase (m) in specifične toplotne kapacitete (c).

$$\Delta Q = m_p \times c_p \times (T_p - T_{sob}) + m_v \times c_v \times (T_{pov} - T_z) + vse\ izgube\ sistema \quad (2.2)$$

Kjer je:

m_p – masa pečice;

m_v – masa vzorca;

c_p – specifična toplotna kapaciteta pečice;

c_v – specifična toplotna kapaciteta vzorca (mleto sv. meso);

T_p – temperatura nastavljena v pečici (180 °C);

T_{sob} – sobna temperatura;

T_{pov} – povprečna temperatura vzorca;

T_z – začetna temperatura vzorca.

Kot je razvidno iz enačbe, je v praksi veliko neznanega in težko izmerljivega.

Specifična toplotna kapaciteta je količina toplotne energije, ki je potrebna za zvišanje temperature snovi na enoto mase oziroma energija potrebna za segretje enega kg snovi za en K oz. °C; izražena v J/kgK. Specifična toplotna kapaciteta vode je vsem znana (4186 J/kgK), medtem ko je specifična toplotna kapaciteta živila v osnovi odvisna od osnovne kemijske sestave in temperature.

Specifično toplotno kapaciteto živila lahko izračunamo z uporabo enačb, ki so podane v preglednici 2.1 in osnovne kemijske analize.

Preglednica 2.1: Toplotna kapaciteta posameznih komponent živil v odvisnosti od temperature.

Sestavina živila	Specifična toplotna kapaciteta v odvisnosti od temperature (c_p [kJ/kg]; T [°C])
Beljakovine	$2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3} \times T - 1,3129 \times 10^{-6} \times T^2$
Maščoba	$1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} \times T - 4,8008 \times 10^{-6} \times T^2$
Ogljikovi hidrati	$1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} \times T - 5,9399 \times 10^{-6} \times T^2$
Vlaknine	$1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} \times T - 4,6509 \times 10^{-6} \times T^2$
Minerali	$1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} \times T - 3,6817 \times 10^{-6} \times T^2$
Voda (> 0 °C)	$4,1289 - 9,0864 \times 10^{-5} \times T + 5,4731 \times 10^{-6} \times T^2$

Na povezavi https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html so podane nekatere specifične toplotne kapacitete za živila. Npr. za svinjsko pleče je 2,47 kJ/kgK, kar je bistveno nižje kot specifična toplotna kapaciteta vode!

2.2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.2.1 Spremljanje temperaturnega profila segrevanja

Izračun porabljene energije v praksi je kompleksen problem, zato se omejimo samo na spremljanje temperaturnega profila segrevanja, s katerim vplivamo na toplotno obdelavo živila. V industriji spremljamo različne temperature: pri nastavljeni temperaturi spremljamo dejansko temperaturo medija (zraka v našem primeru) in temperature merjene v samem živilu. Pomemben je tudi temperaturni gradient čez profil živila, ki vpliva na senzorično kakovost končnega produkta. Živilo ne smemo segrevati s preveliko temperaturo medija, da ne pride do neželenih sprememb v samem živilu (pirolize).

Material:

- Testna pečica
 - Pečica ima možnost regulacije osciliranja nastavljene temperature (od ± 1 do ± 20 °C)
- Data logger Almemo 710 (Ahlborn) s priklopljenimi kalibriranimi temperaturnimi sondami z majhno lastno maso (3 x Pt100 in 6 x K-tip).
- FoodScan (FOSS) – NIR spektrometer za določanje osnovne kemijske sestave
- Tehnica za določanja kala toplotne obdelave.
- Meso

Potek dela:

Vzorec mesa grobo zmeljemo in ga damo v posebne posodice, ki jih vstavimo v FoodScan, kjer dobimo osnovno kemijsko sestavo za izračun specifične toplotne kapacitete živila (pred toplotno obdelavo). Vzorec mesa stehtamo (masa pred toplotno obdelavo). Meso damo na pladenj, ki je opremljen z nosilci za temperaturne sonde in namestimo temperaturne sonde. Eno sondo zapičimo v geometrijsko središče vzorca (T_s), drugo nastavimo tako, da nam bo prikazovala temperaturo tik pod površino vzorca (T_{pp}). Eno temperaturno sondo damo tudi v pečico za spremljanje same temperature pečice (T_p).

Temperaturo pečice nastavimo na 180 °C in spremljamo temperaturni profil na treh temperaturnih sondah 60 minut.

2.2.2 Meritve in izračuni

Navadno se svinjsko meso pri suhih postopkih toplotne obdelave obdeluje do $T_s = 72$ °C, kar zadostimo, da je celotno živilo vsaj 10 minut na 60 °C ali več. Za to v naših razmerah potrebujemo malo manj kot 60 min.

Preglednica 2.2: Tabela za vnos rezultatov

VZOREC	
masa vzorca (g):	
masa po toplotni obdelavi (g):	
kalo TO (%)	
dosežena končna T_s :	
NIR – OSNOVNA KEMIJSKA SESTAVA	
voda (g/100 g):	
beljakovine (g/100 g):	
maščobe (g/100 g):	
Pepel (g/100 g):	
IZRAČUN specifične toplotne kapacitete:	
pri začetni T_s :	
pri končni T_s :	
količina toplote do končne $T_s = 72$ °C	
HITROST med $t = 300$ s in 900 s	
hitrost segrevanja pečice - vp (°C/s):	
hitrost segrevanje površine vpp (°C/s):	
hitrost segrevanja sredice vs (°C/s):	
PORABA ENERGIJE (J)	
Poraba prazne pečice (J)	
Poraba pečice z bremenom (J)	
Delež energije porabljene na živilu	

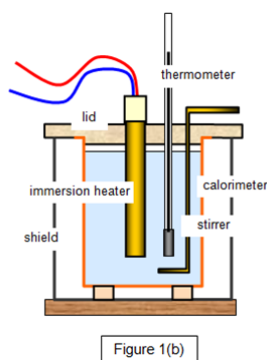
NARIŠITE GRAF POTEKA VSEH TREH TEMPERATUR V PEČICI V ODVISNOSTI OD ČASA

2.2.3 Merjenje specifične toplotne kapacitete olja

Namen je določiti specifično toplotno kapaciteto rastlinskega olja. Sistemu najprej določimo porabo toplotne energije s segrevanjem vode, saj za samo vodo poznamo specifično toplotno kapaciteto pri dani temperaturi.

Potek dela:

V izolirano posodo nalijemo vodo (izmerimo maso), posodo postavimo na magnetno mešalo in v posodo postavimo grelec (cca 40 W), ki ga priklopimo na elektriko preko ampermetra in volt metra. V posodo damo tudi senzor za merjenje temperature (slika 2.1).



Slika 2.1: Prikaz merilne celice za merjenje spremembe temperature olja tekom segrevanja.

Pri nalogi merimo spremembo temperature (ΔT); napetost (V) in tok (I) na grelcu, iz katerega lahko izračunamo moč grelca (P); in čas (t).

Moč grelca izračunamo:

$$P = I \times U \quad [AV = W] \quad (2.3)$$

Dovedeno energijo izračunamo:

$$\Delta Q = P \times t \quad [Ws = J] \quad (2.4)$$

Ali skupaj:

$$\Delta Q = \int_0^t U \times I \times dt \quad [J] \quad (2.5)$$

Torej lahko izračunamo porabo energije za gretje sistema:

$$\begin{aligned} \Delta Q_v &= c_v \times m_v \times (T_2 - T_1) + Q_{sistema} \\ Q_{sistema} &= \Delta Q_v - c_v \times m_v \times (T_2 - T_1) \\ Q_{sistema} &= \int_0^t U \times I \times dt - c_v \times m_v \times (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Sedaj imamo opisan sistem in lahko nadaljujemo z določanje drugih specifičnih toplotnih kapacitet, v našem primeru rastlinskega olja. V posodo nalijemo olje in postopamo enako kot pri segrevanju vode.

Iz pridobljenih rezultatov lahko izračunamo:

$$\begin{aligned}\Delta Q_o &= c_o \times m_o \times (T_{o2} - T_{o1}) + Q_{sistema} \\ c_o \times m_o \times (T_{o2} - T_{o1}) &= \Delta Q_o - Q_{sistema} \\ c_o &= \frac{\Delta Q_o - Q_{sistema}}{m_o \times (T_{o2} - T_{o1})}\end{aligned}\tag{2.7}$$

2.2.4 Meritve in izračuni

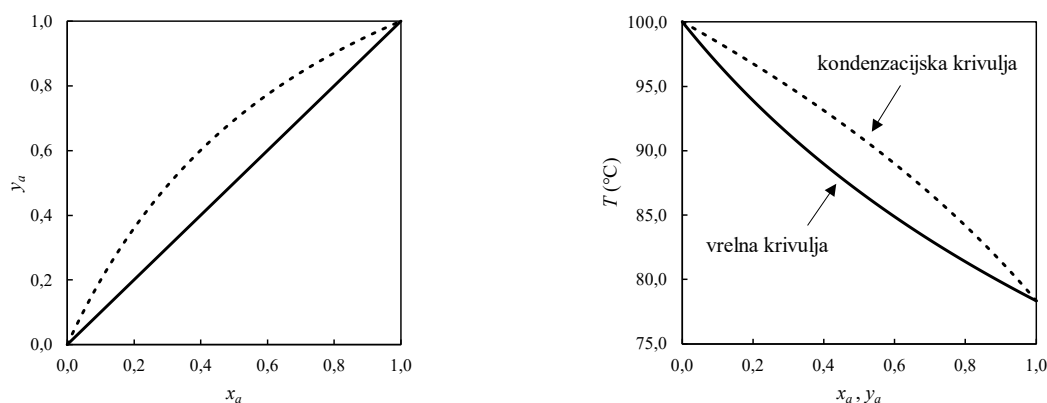
Izračunajte povprečno specifično toplotno kapaciteto rastlinskega olja!

3 DIFERENCIALNA DESTILACIJA

Destilacija je najenostavnejša metoda, s katero ločimo zmes različno hlapnih kapljevin. Osnova tehnološkega postopka je uparjanje dela zmesi, kjer imajo hlapi drugačno ravnotežno sestavo kot tekoča zmes v destilacijskem ostanku. Uporaba destilacije je zelo razširjena v kemični in naftni industriji, zelo pomembno vlogo pa ima tudi v živilstvu, predvsem pri proizvodnji močnih alkoholnih pijač oziroma destilatov. Namen vaje je praktični prikaz enostavne destilacije dvokomponentne zmesi etanol – voda. Skozi eksperimentalni del bomo spoznali osnovne podatke, ki so potrebni za računsko obdelavo procesa destilacije. Pri tem se bomo dotaknili prikaza vrelnega in porazdelitvenega diagrama, ki sta osnova za razumevanje postopka destilacije.

3.1 OSNOVE

Diferencialna destilacija je enostopenjski šaržni postopek, kjer del destilacijske zmesi z množino n_0 in sestavo lažje hlapne komponente x_0 odparimo in kondenziramo v posodo za zbiranje destilata. Po destilaciji dobimo dva produkta; destilacijski ostanek z množino n in sestavo lahko hlapne komponente x ter destilat z množino n_D in sestavo hlapnejše koponente x_D . Ločitev dvokomponentne zmesi z diferencialno destilacijo je tem boljša, čim večja je razlika v temperaturi vrelišča obeh komponent. Popolna ločitev je možna samo v primeru, če komponenti ne tvorita azeotropne zmesi. Potek destilacije lahko grafično prikažemo z vrelnim in ravnotežnim diagramom.



Slika 3.1: Ravnotežni diagram (levo) in vrelni diagram (desno).

Na sliki 3.1 vrelni diagram prikazuje vrelišče in kondenzacijsko temperaturo zmesi v odvisnosti od molske sestave komponent, pri konstantnem tlaku. Če zavre destilacijska zmes, lahko ugotovimo, da vsebujejo hlapi, ki izhajajo iz te zmesi, več molov hlapnejše komponente. Ravnotežni diagram prikazuje odvisnost sestave pare od tekočinske zmesi, kjer sta x_a in y_a ravnotežni sestavi glede na hlapnejšo komponento. Večja kot je razlika med koncentracijo hlapnejše komponente v pari in tekočinski zmesi, večja je relativna hlapnost (Modic, 1978, Wankat, 2017). Za izračun količine in sestave produktov destilacije je snovna bilanca procesa sledeča:

$$n_0 = n + n_D \quad (3.1)$$

Za izračun sestave hlapnejše komponente uporabimo enačbo:

$$n_0 x_0 = n x + n_D x_D \quad (3.2)$$

Med destilacijo je nasičena para vedno v ravnotežju z vrelo tekočino destilacijskega kotla. Če se s časom sestava tekočine spreminja, se seveda z njo spreminja tudi sestava lahko hlapne komponenti v pari y (Lakota in sod., 2017). Rayleighova enačba nam poveže začetne in končne količine destilacijske zmesi:

$$-\ln \frac{n}{n_0} = \int_x^{x_0} \frac{1}{y-x} dx \quad (3.3)$$

Ko je binarna zmes blizu idealne in se relativna hlapnost α s sestavo zelo malo spreminja, ima Rayleighova enačba sledečo obliko:

$$\ln \frac{n}{n_0} = \frac{1}{\alpha-1} \ln \frac{x(1-x_0)}{x_0(1-x)} + \ln \frac{1-x_0}{1-x} \quad (3.4)$$

Zveza med ravnotežno koncentracijo etanola v pari in koncentracijo v tekočini ni konstantna (Kunz, 2012), zato vpeljemo izraz:

$$\frac{1}{\alpha-1} = ax^2 + bx + c \quad (3.5)$$

Končna oblika Rayleighove enačbe se nato glasi:

$$\ln \frac{n}{n_0} = a(x_0 - x) + (1 + a + b + c) \ln \frac{(1-x_0)}{(1-x)} + c \ln \frac{x}{x_0} \quad (3.6)$$

V preglednici 3.1 so navedene konstante za izračun množine etanola v destilatu in destilacijskemu ostanku. Izbor konstant v ožjem intervalu x_0 omogoča bolj natančen izračun končne količine destilacijske zmesi.

Preglednica 3.1: Prikaz konstant za empirično vrednotenje produktov destilacije.

x_0	a	b	c
0-0,2	3,5716	-0,07977	0,136641
0,02-0,5	1,73317	0,511067	0,103302

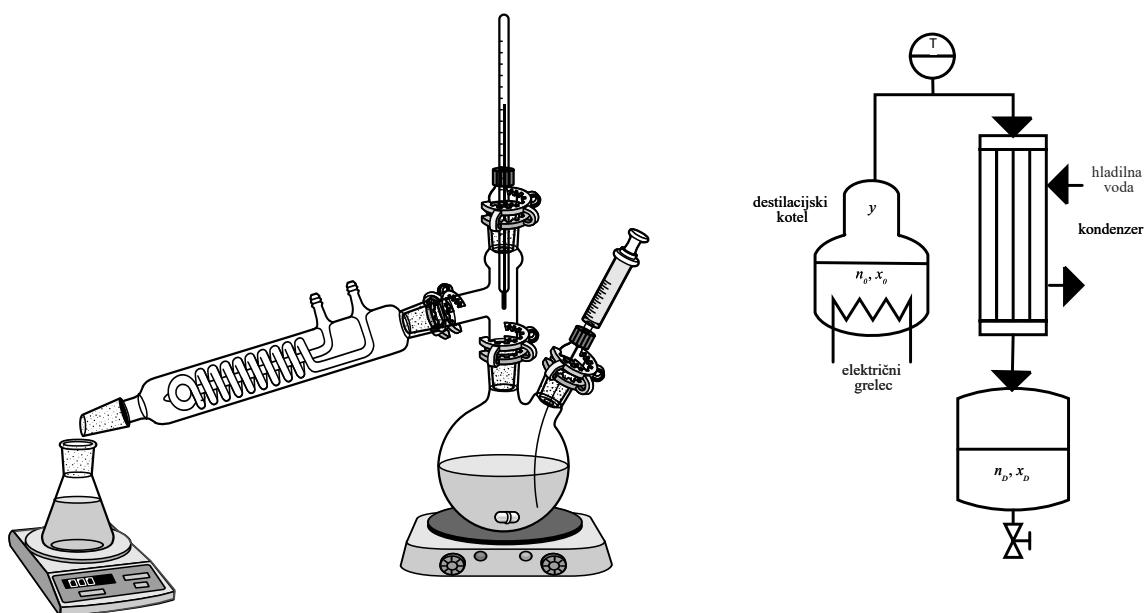
3.2 EKSPERIMENTALNI DEL

3.2.1 Izvedba diferencialne destilacije

Material in metode

Za izvedbo diferencialne destilacije bomo uporabili laboratorijsko napravo, ki je prikazana na sliki 3.2, sestavljena je iz sledečih elementov:

- destilacijska bučka,
- kondenzator,
- pretočni hladilnik za pripravo hladilne vode,
- električni grelec,
- temperaturno tipalo s prikazovalnikom temperature,
- čaša za zbiranje destilata.



Slika 3.2: Laboratorijska naprava za diferencialno destilacijo (levo) in procesna shema destilacijske naprave (desno).

V destilacijski bučki zmes etanola in vode zavre, pri tem nastaja mešanica par in kapljic tekočine, ki so ves čas v ravnotežju in se pomikajo skozi izoliran destilacijski razdelilnik, v katerem se nahaja temperaturno tipalo za merjenje temperature vrelišča. Na vrhu destilacijskega razdelilnika pare prehajajo v vodni hladilnik, kjer v celoti kondenzirajo, ohlajen destilat zbiramo v predložki, od koder vzorčimo za meritve lomnega količnika.

Potek dela

Na podlagi pridobljenih podatkov in z uporabo Rayleighove enačbe (3.6) ter snovnih bilanc procesa (3.1, 3.2) izračunaj količino destilata ter destilacijskega ostanka. Izračunane podatke o masi destilata vnesite v preglednico 3.2, kar nam bo služilo kot izhodišče za pripravo sheme vzorčenja v eksperimentalnem delu poskusa.

Potek praktičnega dela destilacije je sledeč:

- Pripravimo 195 g vodne raztopine etanola z določeno sestavo, v destilacijsko bučko vlijemo pripravljeno zmes ter jo namestimo na destilacijsko aparaturu. S plastično sponko zatesnimo vse steklene obruse destilacijske naprave. Na tehtnico namestimo stekleno čašo za zbiranje destilata in jo tariramo.
- Vključimo hladilnik za hlajenje hladilne tekočine in črpalko za obtok hladiva. Preverimo prehodnost cevi, da ne prihaja do zastoja hladilne tekočine.
- Vključimo električni grelnik in nastavimo temperaturo grelne plošče na 120 °C. Ko temperatura pare doseže 70 °C, temperaturo grelne plošče znižamo na 110 °C in uravnavamo hitrost destilacije na 20 kapljic na minuto. Tekom poskusa se hitrost destilacije počasi znižuje, zato je potrebno proti koncu destilacije, ko temperatura pare doseže 86 °C, temperaturo grelne plošče dvigniti na 130 °C. Med uravnavanjem hitrosti destilacije nastavljen temperatura grelne plošče ne sme presegati 140 °C.
- Čas vzorčenja je odvisen od mase destilata in je naveden v preglednici 3.2. V času vzorčenja najprej zabeležimo temperaturo pare, s kapalko nato odvzamemo 0,25 mL skupnega destilata (pred vzorčenjem vzorec dobro premešamo) in prenesemo v plastično centrifugirko, sledi odvzem 0,25 mL vzorca iz destilacijske bučke (destilacijski ostanek) in 0,25 mL destilata (zbiramo nekaj kapljic destilata na iztoku iz kondenzatorja). Na vseh vzorcih izmerimo lomni količnik pri temperaturi 20 °C, rezultate meritev sproti vnašamo v preglednico 3.2. Sestavo produktov destilacije (molski delež etanola) x_i , $x_{d,i}$ in y_i določimo iz priložene umeritvene krivulje.

3.2.2 Meritve in izračuni

Iz podatkov o sestavi destilacijske zmesi x_0 , molske mase etanola M_e in molske mase vode M_v najprej izračunamo utežni delež etanola w_0 .

$$w_0 = \frac{x_0 M_e}{x_0 M_e + (1 - x_0) M_v} \quad (3.7)$$

S pomočjo utežnega deleža in mase destilacijske zmesi m_z izračunamo začetno maso etanola m_e in vode m_v .

$$m_e = w_0 m_z$$

$$m_v = m_z - m_e$$

Za izračun množine destilacijske zmesi potrebujemo podatek o začetnem številu molov etanola n_e in vode n_v :

$$n_e = \frac{m_e}{M_e}$$

$$n_v = \frac{m_v}{M_v}$$

$$n_0 = n_e + n_v$$

Množino destilacijskega ostanka izračunamo s pomočjo enačbe (3.6), konstante a , b in c odčitamo iz preglednice 3.1.

$$\frac{n}{n_0} = e^{a(x_0-x) + (1+a+b+c) \ln \frac{(1-x_0)}{(1-x)} + c \ln \frac{x}{x_0}}$$

$$n = n_0 e^{a(x_0-x) + (1+a+b+c) \ln \frac{(1-x_0)}{(1-x)} + c \ln \frac{x}{x_0}} \quad (3.8)$$

Iz enačbe (3.1) in (3.2) izračunamo množino in sestavo destilata:

$$n_D = n_0 - n$$

$$n_0 x_0 = n x + n_D x_D$$

$$x_D = \frac{n_0 x_0 - n x}{n_D} \quad (3.9)$$

maso destilata m_D izračunamo sledeče:

$$m_D = x_D n_D M_e + (1 - x_D) n_D M_v \quad (3.10)$$

Za izračun $n_{eksp.}$ in $n_{Deksp.}$, ki smo jih pridobili tekom izvedbe eksperimentalne destilacije, upoštevamo odčitani molski delež destilacijskega ostanka x_i , molski delež destilata $x_{D,i}$ in izmerjeno maso destilata $m_{D,i}$ po zaključku destilacije.

$$n_{eksp.} = \frac{m_z - m_{D,i}}{x_i M_e + (1 - x_i) M_v} \quad (3.11)$$

$$n_{Deksp.} = \frac{m_{D,i}}{x_{D,i} M_e + (1 - x_{D,i}) M_v} \quad (3.12)$$

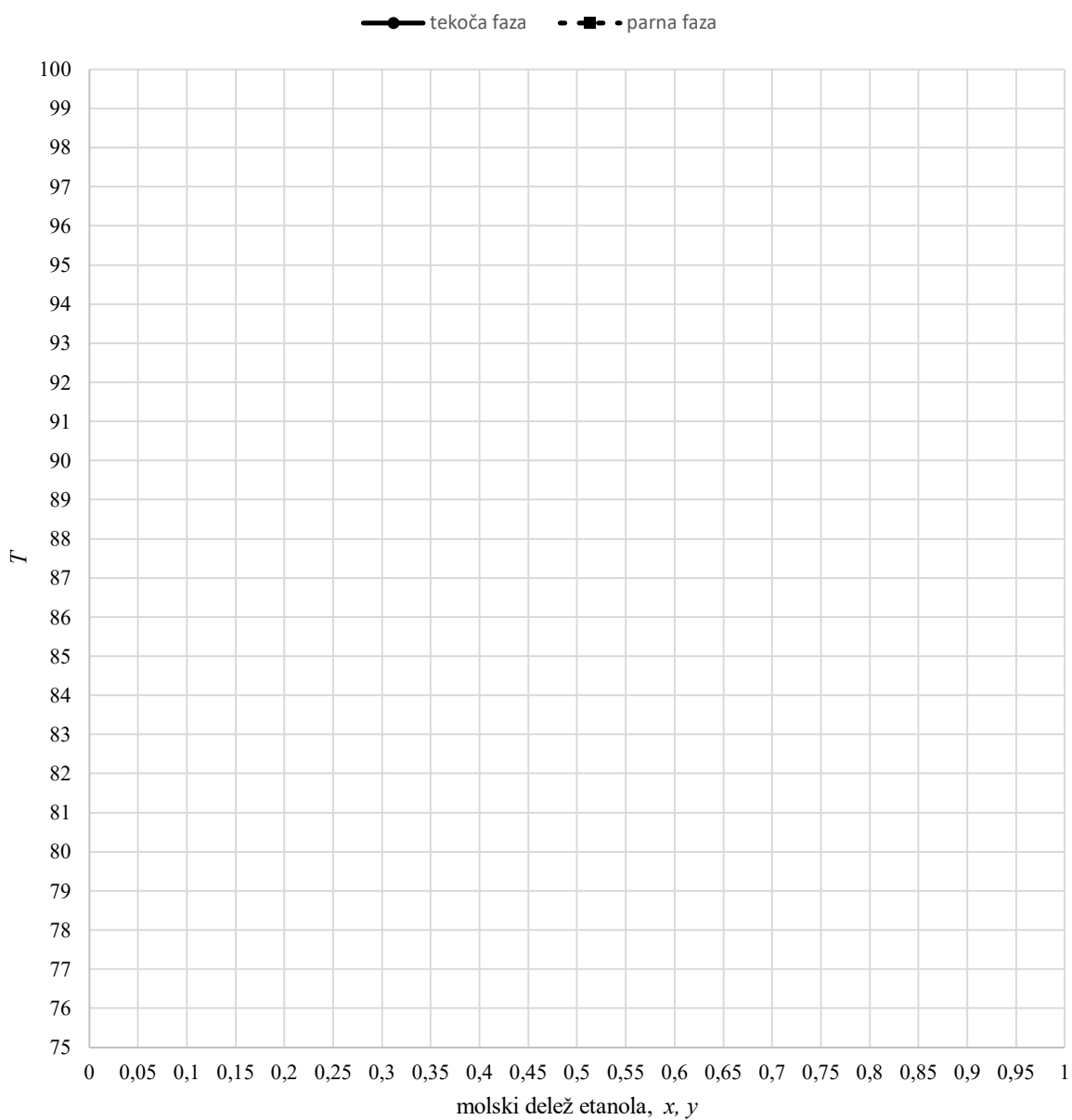
Preglednica 3.2: Načrt vzorčenja.

Vzorčenje	m_D (g)	T_{pare} (°C)	Produkt destilacije					
			ostanek v bučki		destilat		para	
			n^{20}	x_i	n^{20}	$x_{D,i}$	n^{20}	y_i
1.vzorčenje	0							
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	7							
	9							
1.vzorčenje	10							
2.vzorčenje	15							
	20							
3.vzorčenje	22							
	24							
	26							
	28							
	30							
4.vzorčenje	32							
	34							
	36							
	38							
	40							

Preglednica 3.3: Rezultati empiričnega modela in laboratorijskih meritev.

	Empirično	Eksperimentalno
n_0		
n		
x_0		
x		
x_D		
m_D		
n_e		-
n_v		-
w_0		-

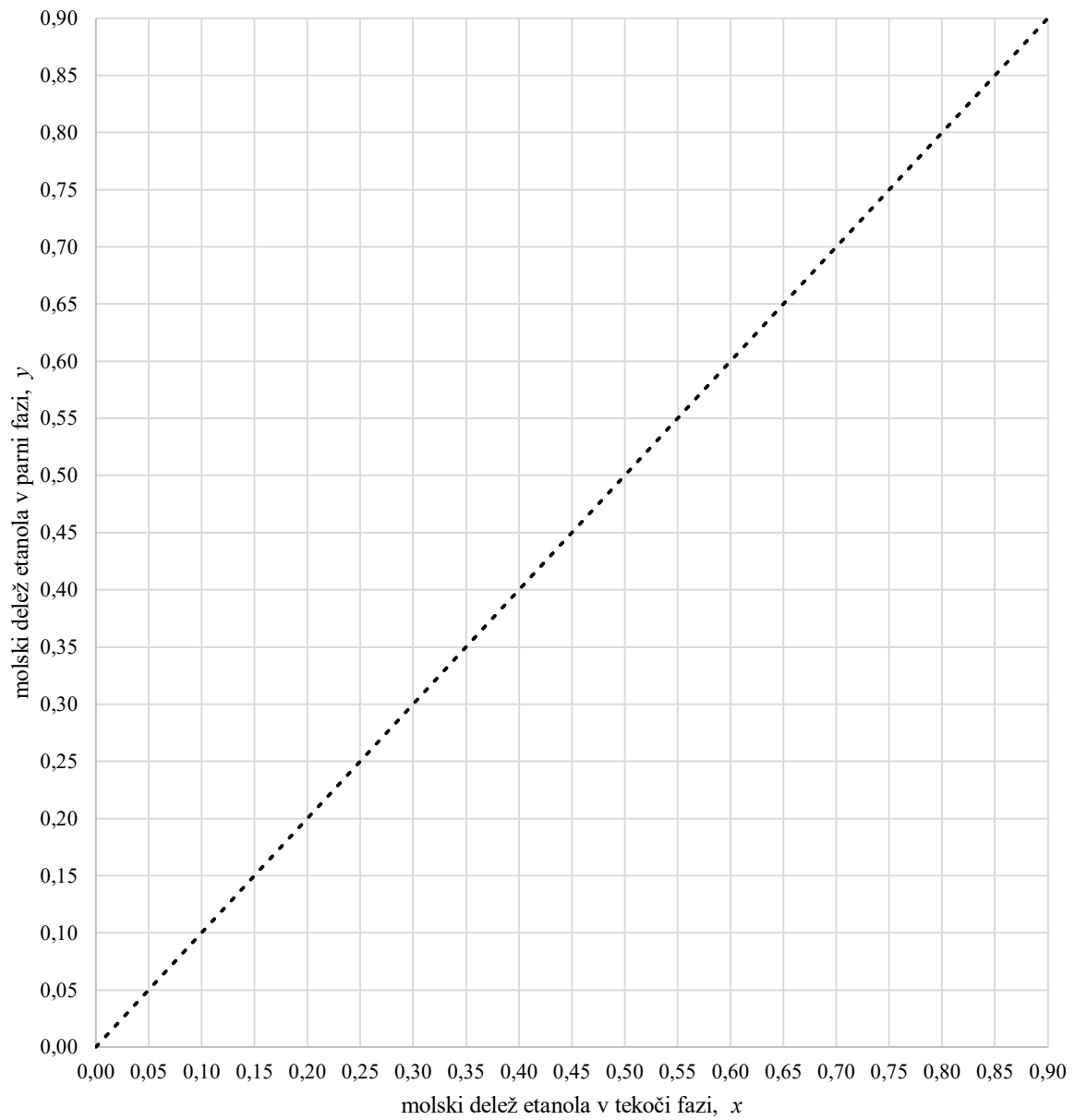
Vrelni diagram



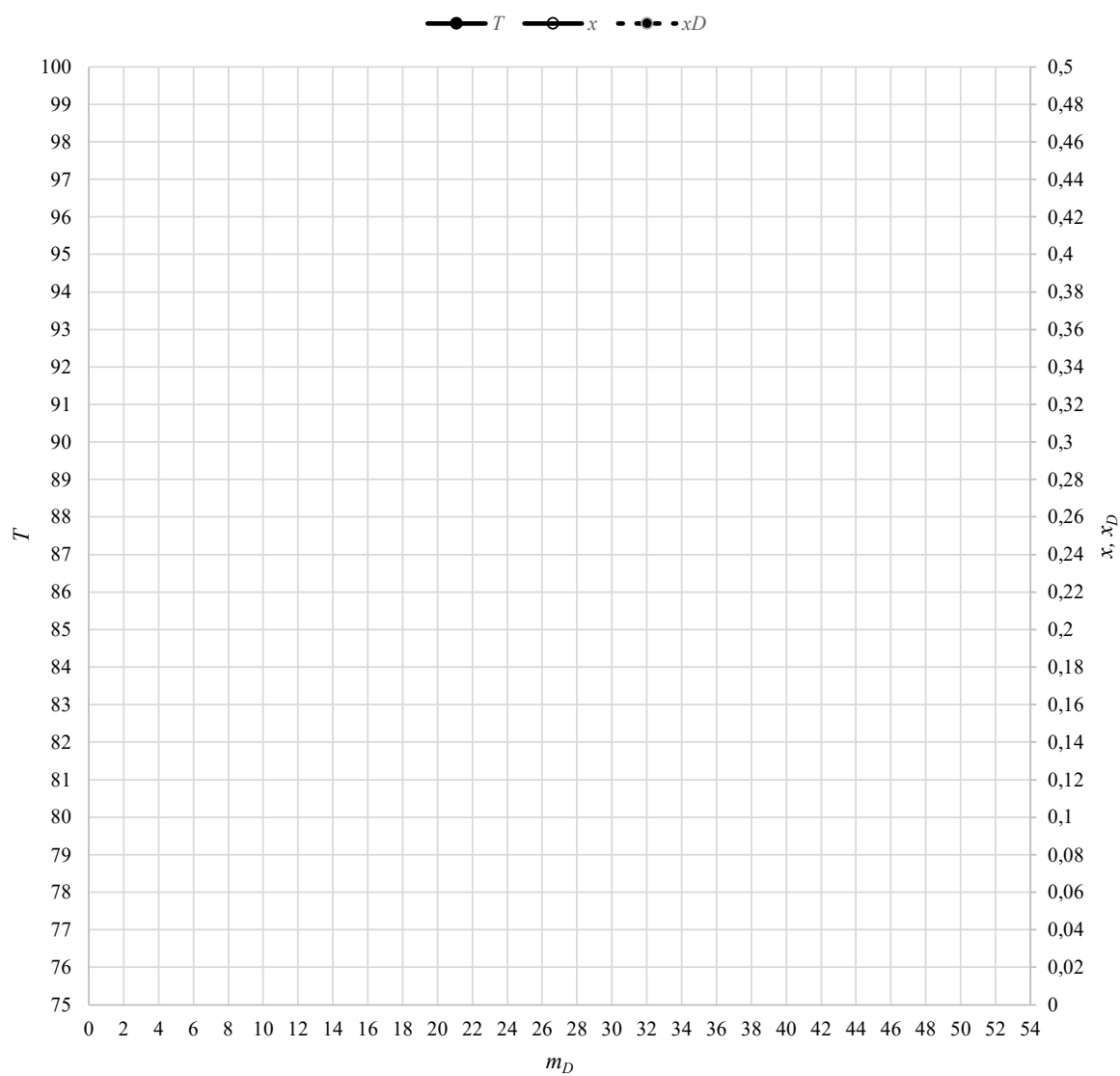
Preglednica 3.4: Prikaz temperature vrelišča destilacijske zmesi in kondenzacije.

x_D	y	T (°C)
0	0	100
0,3965	0,6122	80,7
0,8943	0,8943	78,1

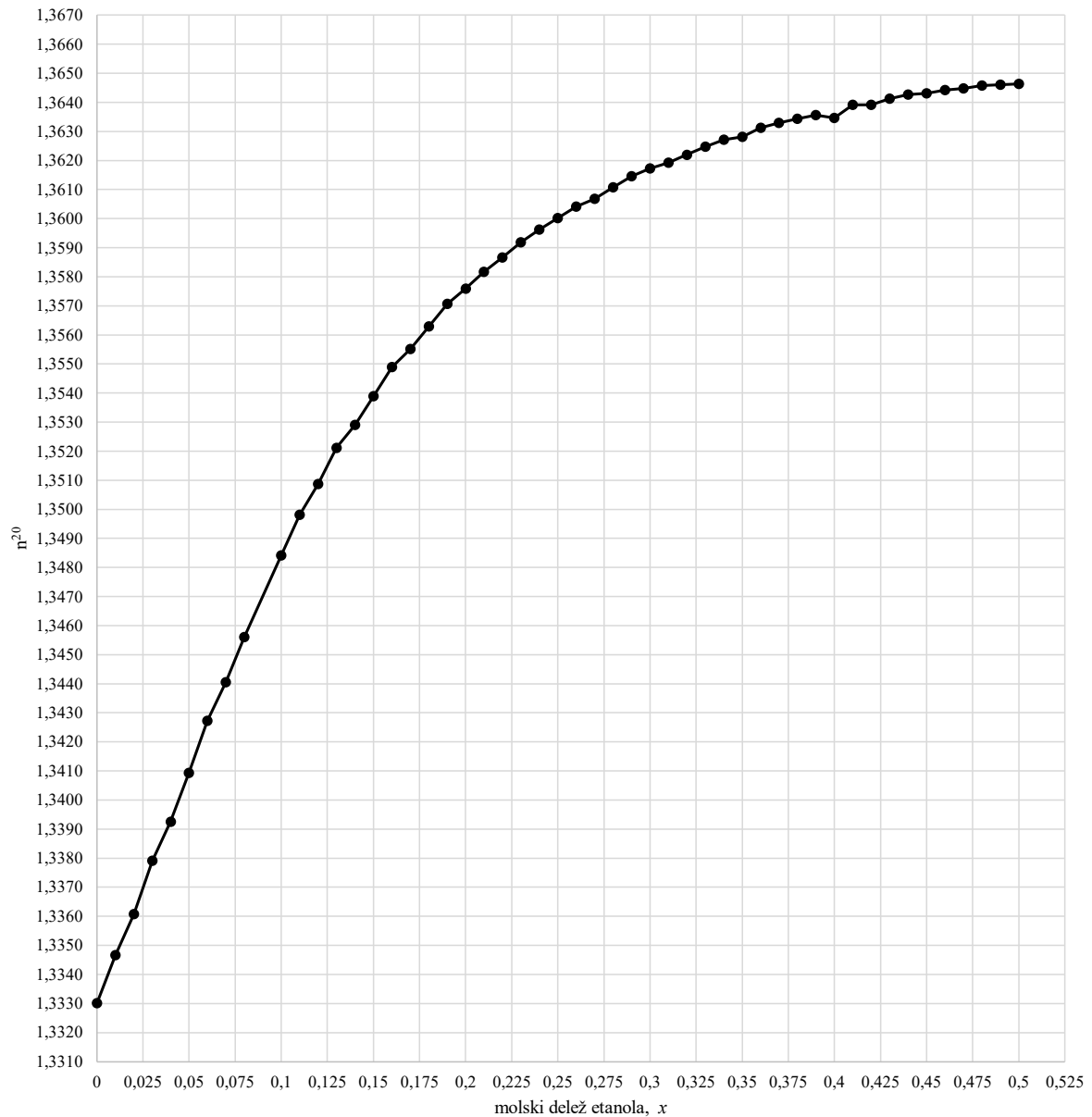
Ravnotežni diagram



Parametri destilacije



Lomni količnik zmesi etanola in vode



Rezultat in komentar

1. Izpolnjena tabela, kjer zabeležimo temperaturo destilacije, lomni količnik destilata in destilacijskega ostanka ter njihove pripadajoče molske deleže.
2. Grafično prikaži vrelni diagram, kjer je podana temperatura vrelišča destilacijske zmesi v odvisnosti sestave (molski delež) tekoče in parne faze (T - x - y diagram).
3. Grafično prikaži porazdelitveni diagram, kjer je podano razmerje med množinskim deležem etanola v parni in v tekoči fazi.
4. Prikaži empirične izračune in laboratorijske meritve produktov diferencialne destilacije.
5. Grafično prikaži dinamiko sprememb parametrov destilacije (T , x , x_D).

Viri:

Kunz, R. G., 2012. The Rayleigh Equation Revisited What to Do When Alpha (α) Isn't Constant. Houston, AIChE Spring Meeting, 36 str.

Lakota, A., Linec, M., Lubej, M., Pavko, A. 2017. Praktikum iz kemijskega inženirstva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 75 str.

Modic, R. 1978. Osnove kemijskega inženirstva - Termične in difuzijske operacije. Ljubljana, Dopolna delavska univerza, Univerzum, 148 str.

Wankat, P. C., 2017. Separation Process Engineering: Includes Mass Transfer Analysis, 4th Edition, 1109 str.

4 REOLOGIJA ŽIVIL

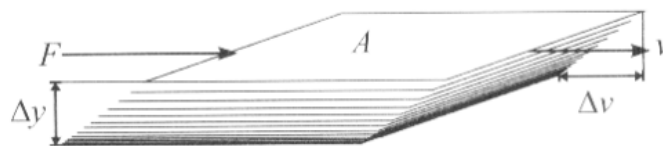
Reologija, kot veda, izvira iz študija toka, deformacije in preoblikovanja snovi pod vplivom sil. Njeno ime, ki izhaja iz grških besed "rheos" za tok in "logos" za vedo, nosi v sebi pomen proučevanja različnih oblik premikanja materialov. Čeprav se reologija ukvarja z različnimi tipi deformacij, kot so elastične, plastične in viskozne, se bomo v praktičnem okviru na vaji osredotočili predvsem na razumevanje viskoznosti tekočih živil.

4.1 OSNOVE

4.1.1 Viskoznost

Viskoznost je merilo za upor tekočine do pretoka. Upor nastane zaradi notranjih sil trenja. Notranjemu upor so vzrok premikanja plasti tekočine, ki se pojavljajo takrat, kadar delujemo na tekočino s silo (Rudan-Tasič in Klofutar, 2007).

Viskoznost je v živilski industriji zelo pomembna lastnost, saj vpliva na teksturo oziroma videz in okus živila. Prav tako pa je pomembna s stališča stabilnosti živil, zlasti pijač. Viskoznost imajo tako tekočine kot plini, vendar na vajah o viskoznosti plinov ne bomo govorili.



Slika 4.1: Pretok tekočine med vzporednima ploščama (Rudan-Tasič in Klofutar, 2007).

Viskoznost delimo na:

- *dinamično* (absolutno) (η): sorazmernostni faktor med strižno napetostjo in strižno hitrostjo in predstavlja notranjo upornost tekočin pri pretakanju

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (4.1)$$

Pri čemer je: F - strižna sila; A - enota površine; Δv - koeficient spremembe hitrosti, Δy - razdalja med sosednjima plastema $\rightarrow \Delta v / \Delta y$ - gradient hitrosti oz. strižna hitrost

enota: **Pa.s**, stara enota: P = Poise (cP = centipoise),

$$1 \text{ mPa.s} = 1 \text{ cP} = 0,001 \text{ Pa.s},$$

$$1 \text{ P} = 0,1 \text{ Pa.s}, \quad \text{Pa.s} = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{N s m}^{-2}$$

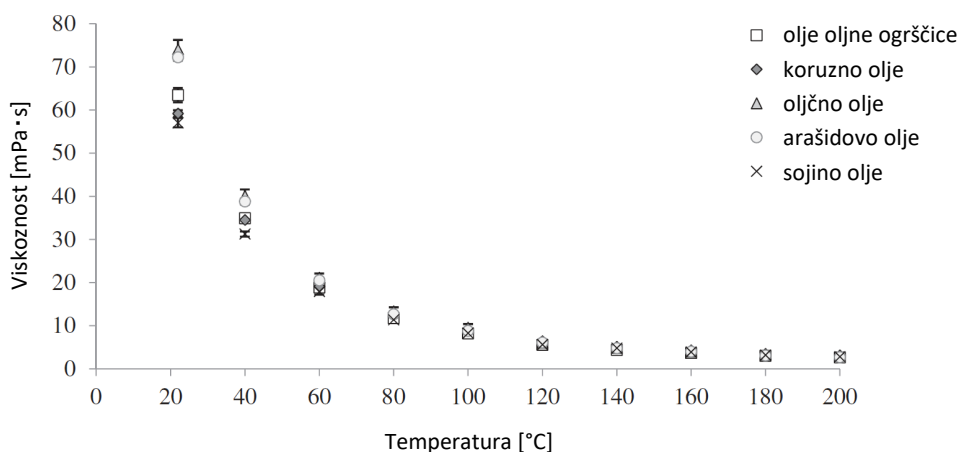
- *kinematično* (ν): razmerje med dinamično viskoznostjo (η) in gostoto tekočine (ρ) pri točno določeni temperaturi

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.2)$$

enota: m^2s^{-1} , stara enota: St = Stoke (cSt = centistoke),

$$\text{St} = \text{m}^2 \text{s}^{-1}, \quad 1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \text{s}^{-1}, \quad 1 \text{ cSt} = 0,01 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}$$

Med merjenjem viskoznosti tekočine mora biti njena temperatura konstantna. Zvišanje temperature tekočine povzroči zmanjšanje njene viskoznosti (Slika 4.2). Viskoznost tekočine navadno narašča s tlakom pri konstantni temperaturi. Pomemben je tudi vpliv strukture tekočine na njeno viskoznost, saj nanjo vplivajo oblika molekule, velikost molekule in medmolekulske privlačne sile tekočine (Rudan-Tasič in Klofutar, 2007).

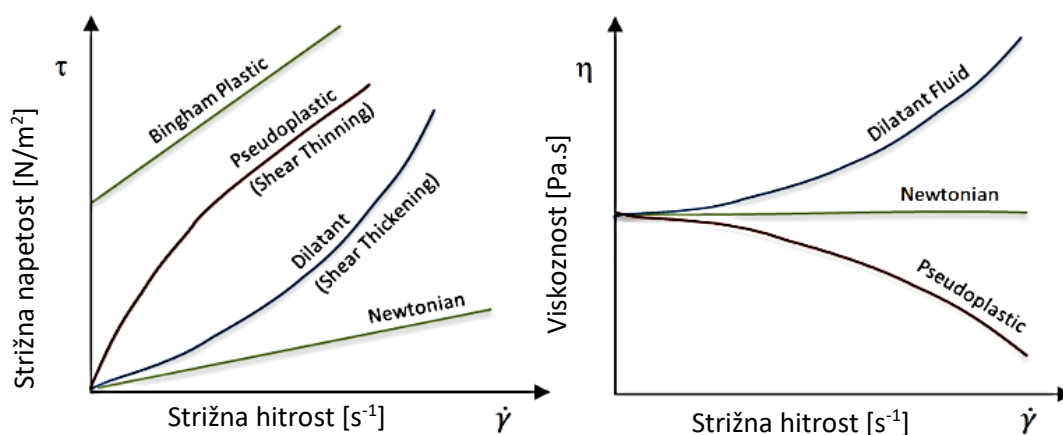


Slika 4.2: Odvisnost viskoznosti rastlinskih olj od temperature (Sahasrabudhe in sod., 2017).

4.1.2 Vrste tekočin

Newtonske (ali prave) tekočine so idealizirane tekočine, pri katerih je strižna napetost linearno povezana s hitrostjo strižne sile, saj mešanje ali črpanje pri konstantni temperaturi ne vpliva na njihovo viskoznost ali konsistenco. Najpogostejše tekočine in plini so kot so voda, olje in zrak so newtonske tekočine.

Ne-newtonske tekočine: njihova viskoznost je odvisna od delovanja strižne sile. Takšne tekočine se lahko obnašajo psevdoplastično (viskoznost z večanjem strižne sile pada), dilatantno (viskoznost z večanjem strižne sile narašča), plastično (tekočini je potrebno dovesti določeno silo, da steče), tiksotropno (viskoznost tekočine se spreminja s časom delovanja strižne sile) in reopektično (nasproten pojav tiksotropije).



Slika 4.3: Prikaz različnih vrst tekočin z reogramom – odvisnost strižne napetosti od strižne hitrosti (levo) in viskoznoznimi krivuljami – odvisnost viskoznosti od strižne hitrosti (desno)

Različne tekočine s pripadajočimi vrednostmi viskoznosti so prikazane v Preglednici 4.1.

Preglednica 4.1: Viskoznosti izbranih tekočin pri določeni temperaturi.

Živilo	Temperatura (°C)	Dinamična viskoznost (cP, mPa·s)	Kinematična viskoznost (cSt, mm^2s^{-1})
voda	0	1,79	
voda	20	1	1
voda	25	0,89	
voda	100	0,28	
mleko	20	3	4
čokoladno mleko	25	30-19	
pivo	4	1,1	
vino	20	1,6-1,9	
jabolčni sok (20 °Brix)	27	2,1	
jabolčni sok (60 °Brix)	27	300	
smetana (30 % maščobe)	16	14	
smetana (50 % maščobe)	32	55	
oljčno olje	30	84	
majoneza	20	5000	6250
jogurt		152	
paradižnikov sok	20	176	220
kečap		50000	
glicerol	0	12070	
glicerol	20	880-1410	1100
glicerol	30	612	
glicerol	100	14,8	
med	20	1760	2200

4.1.3 Metode merjenja viskoznosti

V laboratorijske namene merjenja viskoznosti tekočin in raztopin so primerni (Rudan-Tasič in Klofutar, 2007):

- viskozimeter s kapilaro (merimo pretok tekočine skozi kapilaro; *Ostwaldov*, *Canon-Fenskejev* ali *Ubbelodijev* viskozimeter),
- viskozimeter s padajočo kroglico (merimo hitrost kroglice, ki pada oziroma se vali po tekočini) (predstavljen v nadaljevanju),
- rotacijski viskozimeter (merimo navor valja pri rotaciji v tekočini) (Slika 4.4).
-

Za določanje viskoznosti lahko uporabljamo enostavne viskozimetre kot so npr. pretočni ali kroglični, pri bolj konsistentnih sistemih pa oscilacijske in rotacijske viskozimetre.

Dinamično viskoznost bomo na vajah merili z viskozimetrom s padajočo kroglico in rotacijskim viskozimetrom, kinematično viskoznost pa s pretočnimi posodicami.



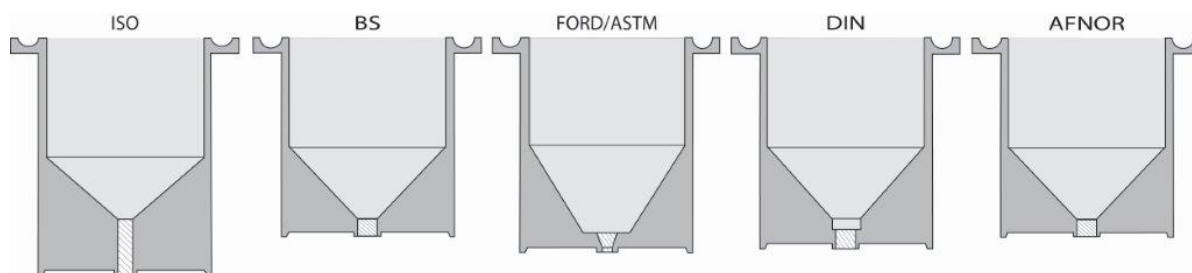
Slika 4.4: Primer viskozimetra s kapilaro (Ostwaldov viskozimeter, levo), primer viskozimetra s padajočo kroglico (Höpplerjev viskozimeter, sredina) in primer rotacijskega viskozimetra (desno).

4.1.4 Določanje kinematične viskoznosti s pretočnimi posodicami

Kinematično viskoznost lahko merimo z napravo, ki je sestavljena iz stojala in graduirane posodice z ozko odprtino na dnu (Slika 4.5). Tekočina se prelije v posodo in pusti, da odteče pod gravitacijsko silo. Večja kot je viskoznost, dlje traja, da steče skozi odprtino (t.j. tekočina z manj viskoznosti bo potrebovala manj časa kot tekočina z večjo viskoznostjo). Odprtine na dnu posodic (premeri) se med sabo razlikujejo glede na območje merjenja viskoznosti (Slika 4.6).



Slika 4.5: Prikaz stojala s pretočno skodelico (vir: Rhopoint instruments).



Slika 4.6: Prikaz različnih odprtih pretočnih skodelic (vir: Elcometer).

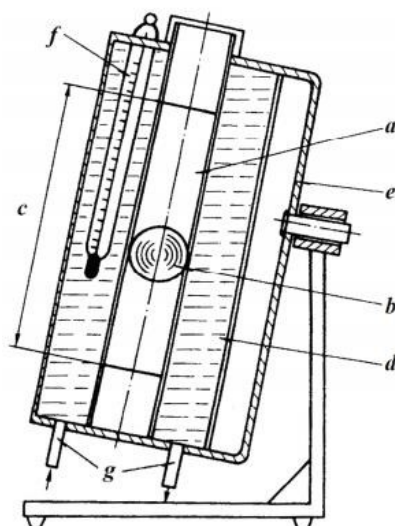
Na vaji boste imeli na razpolago spodnji dve pretočni posodici (Preglednica 4.2).

Preglednica 4.2: Podroben tehnični opis pretočnih posodic.

	Ime	Premjer odprtine (mm)	Čas pretoka (s)	Območje merjenja (cSt)	Standard
1.	AFNOR 2.5 (RL0118075)	2,46	30–100	5–140	NF T30-014
2.	AFNOR 4 (RL0919004)	4,00	30–100	50–1100	NF T30-014

4.1.5 Določanje dinamične viskoznosti z viskozimetrom s padajočo kroglico

Höpplerjev viskozimeter je primer viskozimetra s padajočo kroglico, ki omogoča določanje absolutne vrednosti dinamične viskoznosti. Viskoznost lahko določimo newtonovskim in nenewtonskim sistemom. Temelji na dejstvu, da viskoznost tekočine spreminja hitrost padajoče kroglice skozi tekočino. S spreminjanjem premera in mase kroglice ter nagiba cevke z vzorcem lahko določimo viskoznost v širokem intervalu. Viskozimeter odlikuje ponovljivost merjenja, možnost natančnega termostatiranja in zaprtost vzorca (preprečevanje odparevanja vzorca in prisotnosti zraka oz. vlage). Uporablja se v laboratorijske namene, za prozorne tekočine kot so laki, smole, olja oz. druga živila, kozmetiko, kemikalije itd.



Slika 4.6: Shematski prikaz Höpplerjevega viskozimetra (a - steklena merilna cev, b - kroglica; c - merilna dolžina (100 mm), d - ohišje cevi za nadzor temperature (napolnjeno z vodo), e - vrtljivi nosilec, f - termometer, g - priključek za nadzor temperature tekočine).

Padanje kroglice v vzorcu je povezano z njegovo viskoznostjo z naslednjo enačbo:

$$\eta = t(d_2 - d_1)k \quad (4.3)$$

Pri čemer je: η - viskoznost (mPa·s), t - čas, ki je potreben, da kroglica pade med oznakama na cevki z vzorcem (s), d_2 - gostota kroglice (g/cm³), d_1 - gostota vzorca (g/cm³), k – konstanta kroglice (mPa cm³/g)

Konstanto določimo za vsako kroglico s tekočino znane viskoznosti in gostote (pri določeni temperaturi). Za tekočine z majhno viskoznostjo uporabimo kroglice iz stekla, za tekočine s srednje viskoznostjo iz nikljevega jekla in za zelo viskozne tekočine iz navadnega jekla.

4.2 EKSPERIMENTALNI DEL

Material

Meritve se izvajajo na sobni temperaturi. Za meritev potrebujemo stojalo, posodico, vodno tehtnico (libelo), štoparico, termometer, kapalko in čašo.

Potek dela

- Izberite posodico s primernim premerom za izbrano tekočino oziroma živilo. Pod posodico postavite čašo (v katero bo odtekla tekočina).
- Pred vsako meritvijo z libelo preverite ali je stojalo s posodico postavljeno v pravilni legi.
- S termometrom izmerite in zabeležite temperaturo tekočine.
- Pazite, da je posodica in odprtina čista in brez umazanije.
- Preizkušena tekočina mora biti homogena (predhodno premešana) in ne sme vsebovati mehurčkov.
- S prstom zamašite spodnjo odprtino posodice. Izbrano tekočino prelijete v posodico tako, da je povsem polna. S petrijevko pokrijete in izravnate nivo tekočine v posodici. Ob tem ne smejo nastati zračni mehurčki.
- Ko odmaknete prst in odkrijete petrijevko, začnete istočasno meriti čas izteka tekočine s štoparico (v sekundah in stotinkah).
- Ob prvi prekinitvi toka tekočine ustavite meritev oz. štoparico (zapis časa pretoka). Za naslednjo meritev uporabite tekočino iz čaše.
- Ko zamenjate tekočino, posodice pomijte z vodo in obrišite s papirjem. Če ste za čiščenje uporabljali toplo vodo, pred meritvijo počakajte, da se posodica ohladi na sobno temperaturo. Za čiščenje se NE uporablja abrazivnih materialov!
- Iz Priloge A odčitajte kinematično viskoznost v enotah centistoke (cSt). S pomočjo gostote tekočine nato izračunate še dinamično viskoznost v enotah centipoise (cP) (enačba 4.4).

$$\text{centipoise (cP)} = \text{centistoke (cSt)} \times \text{gostota tekočine (d)} \quad (4.4)$$

4.2.1 Meritve in izračuni (pretočne posodice)

Izračunajte povprečno vrednost (4.5) ter standardni odklon (4.6) petih meritev.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4.6)$$

Pri čemer je: μ - povprečna vrednost populacije, n/N – število meritev, x_i – podatek posamezne meritve, σ - standardni odklon populacije.

Meritve s pretočno posodico AFNOR 2.5 (AF 2.5):

- Marelični sok (najmanj 43 % sadni delež, gostota: 1,062 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

- Čokoladno mleko (gostota: 1,051 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

- Sladka smetana (35 % mlečne maščobe, gostota: 0,997 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

Izračuni in komentar rezultatov:

Meritve s pretočno posodico AFNOR 4.0 (AF 4):

- Grozdni koncentrat (60–65 % suhe snovi, gostota: 1,325 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

- Sadni sirup (limona) (gostota: 1,318 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

- Tekoči sadni jogurt (gostota: 1,050 g/cm³)

Temperatura vzorca:

Št. meritve	Čas (s)	Kinematična viskoznost (cSt)	Dinamična viskoznost (cP)
1			
2			
3			
4			
5			
povprečje			
SD			

SD, standardni odklon

Izračuni in komentar rezultatov:

4.2.2 Meritve in izračuni (viskozimeter s padajočo kroglico)

Material

Na vajah bomo uporabili stekleno kroglico z maso 4,3841 g in gostoto $2,48 \text{ g/cm}^3$. Konstanta omenjene kroglice je $0,8322 \text{ mPa cm}^3/\text{g}$.

Potek dela

- V vzorcu ne smejo biti prisotni zračni mehurčki.
- Meritve bomo izvedli pri temperaturah vzorca 20, 25, 30 in 35 °C (vodo v viskozimetru bomo segrevali oz. ohlajali s pomočjo vodne kopeli).
- Po vsaki nastavitvi oz. dvigu temperature v vodni kopeli, bo potem, ko bo voda dosegla željeno temperaturo, potrebno počakati vsaj 10 min (termostatiranje vzorca)!
- Pred začetkom meritve moramo spustiti kroglico vsaj enkrat gor in nazaj dol, da kroglica homogenizira vzorec in njegovo temperaturo.
- Ko se celotno ohišje viskozimetra obrne okoli in prične kroglica padati, začnemo štopati čas, ko kroglica doseže prvo črtico na stekleni merilni cevi in končamo meritev, ko doseže spodnjo (tretjo) črto. Zapišemo si čas in meritev ponovimo tako, da ohišje ponovno obrnemo.

S pomočjo enačbe 4.3 boste izračunali dinamično viskoznost tekočine pri posamezni temperaturi. Izračunali boste povprečno vrednost (4.5) ter standardni odklon (4.6) petih meritev za vsako temperaturo posebej. Narišite graf odvisnosti dinamične viskoznosti od temperature in primerjajte ter komentirajte podatek o dinamični viskoznosti groznega koncentrata izmerjene s pretočnimi posodicami, pri isti temperaturi.

Grozdni koncentrat (60–65 % suhe snovi, gostota: 1,325 g/cm³)

Temperatura: 20 °C

Št. meritve	Čas (s)	Viskoznost (mPa·s)
1		
2		
3		
4		
5		
povprečje		
SD		

Temperatura: 25 °C

Št. meritve	Čas (s)	Viskoznost (mPa·s)
1		
2		
3		
4		
5		
povprečje		
SD		

Temperatura: 30 °C

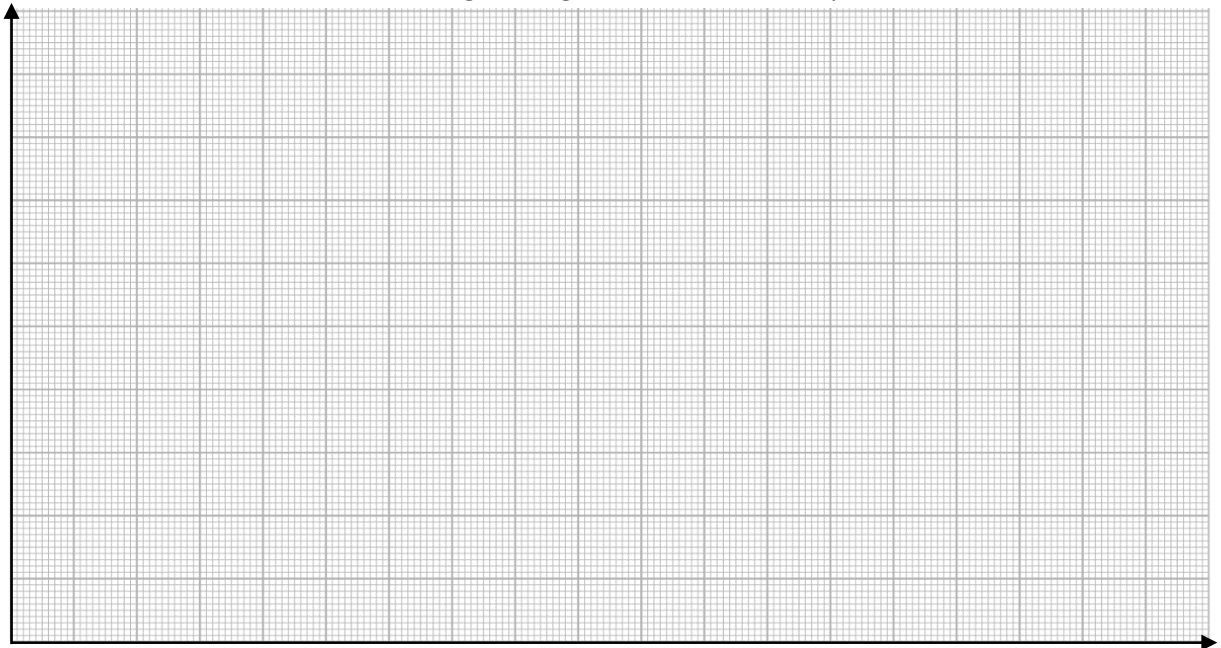
Št. meritve	Čas (s)	Viskoznost (mPa·s)
1		
2		
3		
4		
5		
povprečje		
SD		

Temperatura: 35 °C

Št. meritve	Čas (s)	Viskoznost (mPa·s)
1		
2		
3		
4		
5		
povprečje		
SD		

Izračuni in komentar rezultatov:

Graf odvisnosti dinamične viskoznosti grozdnega koncentrata od temperature:



4.2.3 Meritve in izračuni (rotacijski viskozimeter)

Za opredelitev sistema oz. vrste tekočin bomo izmerili viskoznost in strižno napetost vzorca pri različnih strižnih hitrostih.

Vzorec 1: sadni sirup (limona)

Temperatura vzorca:

Strižna hitrost (s^{-1})	Strižna napetost (Nm^{-2})	Dinamična viskoznost ($m Pa \cdot s$)
18,00		
22,67		
27,33		
32,00		
36,67		
41,33		
46,00		
50,67		
55,33		
60,00		

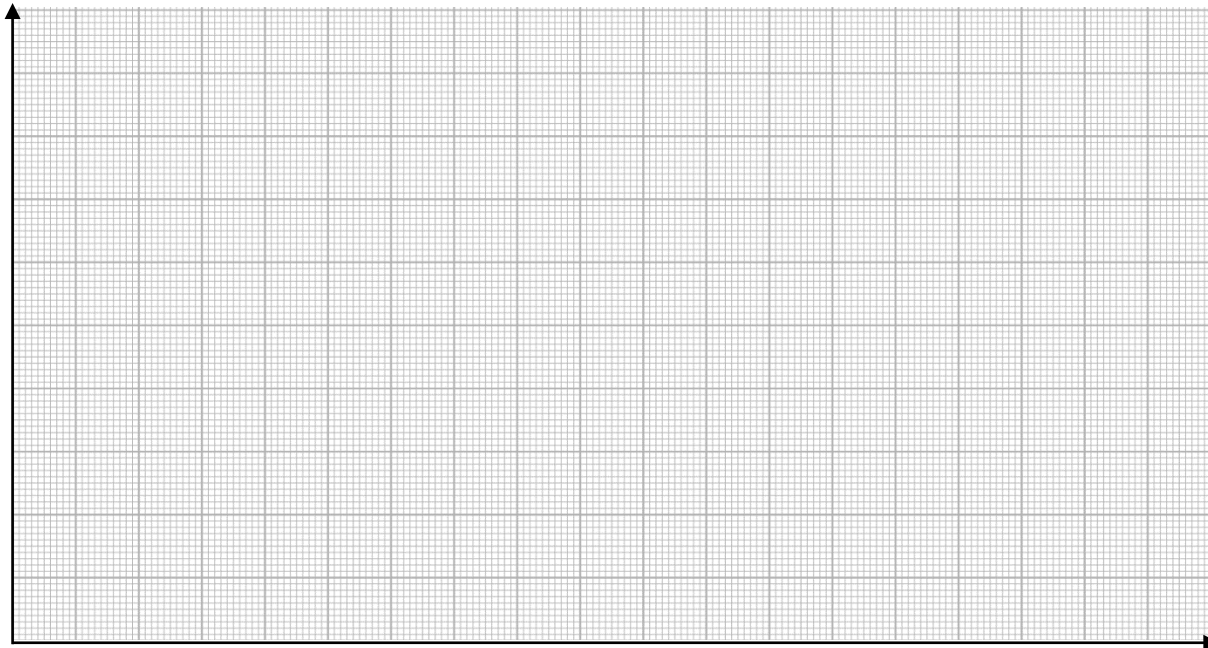
Vzorec 2: vodna raztopina zgoščevalca

Temperatura vzorca:

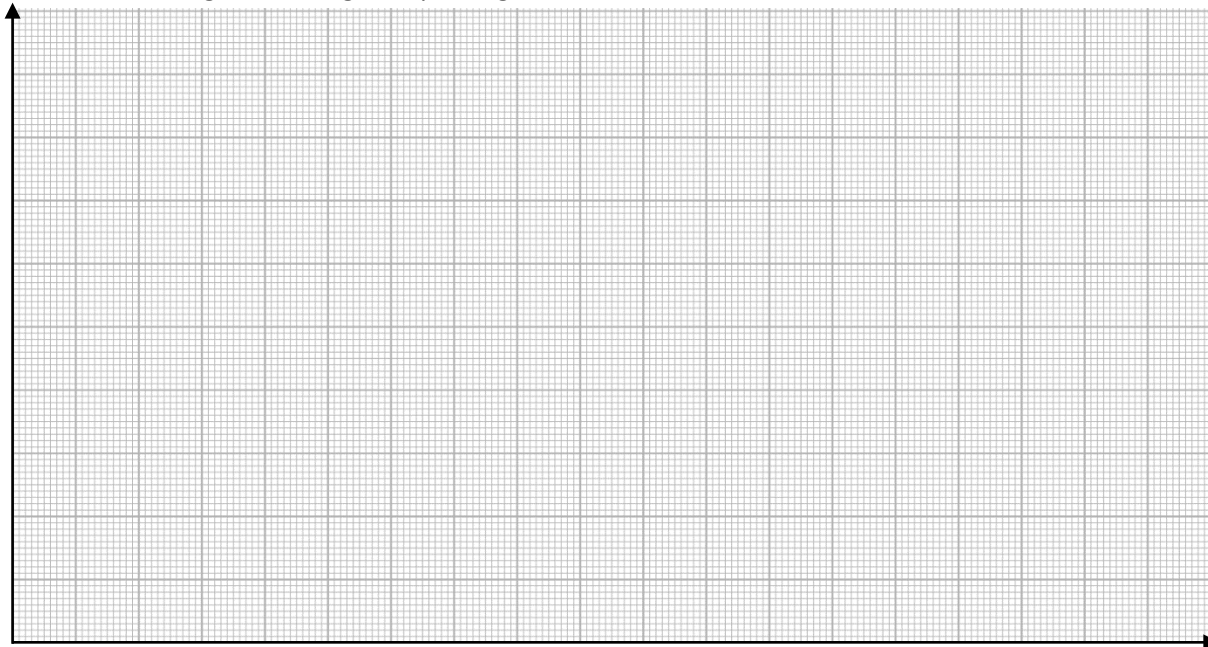
Strižna hitrost (s^{-1})	Strižna napetost (Nm^{-2})	Dinamična viskoznost ($m Pa \cdot s$)
7,00		
14,00		
21,00		
28,00		
35,00		
42,00		
49,00		
56,00		
63,00		
70,00		

Iz meritev dinamične viskoznosti in strižne napetosti narišite diagram viskoznosti (odvisnost dinamične viskoznosti od strižne hitrosti) in reogram (odvisnost strižne napetosti od strižne hitrosti). Na podlagi teh meritev določite vrsto tekočine (Newtonska, ne-Newtonska, psedovplastična, dilatantna...) in pojasnite, zakaj ste se tako odločili.

Reogram sadnega sirupa in zgoščevalca:



Viskoznostni diagram sadnega sirupa in zgoščevalca:



PRILOGA A: Pretvorba časa (s) izteka tekočine v enote centistoke (cSt) za posamezno pretočno posodico.

Čas (s)	AFNOR 2,5 (cSt)		AFNOR 4 (cSt)
20			50
21			55
22			60
23			65
24			70
25			75
26			80
27			85
28			90
29			95
30			100
31			105
32			110
33			115
34			120
35	11		125
36	11		130
37	15		135
38	15		140
39	15		145
40	15		150
41	18		154
42	19		158
43	20		163
44	21		167
45	22		171
46	22		175
47	22		181
48	22		188
49	22		194
50	25		200
51	26		204
52	26		208
53	27		213
54	27		217
55	28		221
56	28		225
57	28		230
58	28		235

Čas (s)	AFNOR 2,5 (cSt)		AFNOR 4 (cSt)
59	28		240
60	31		245
61	32		250
62	32		253
63	33		255
64	33		258
65	34		260
66	34		263
67	35		265
68	36		268
69	36		270
70	37		273
71	38		275
72	38		
73	39		
74	39		
75	40		
76	40		
77	41		
78	42		
79	42		
80	43		
87	45		
92	48		

5 DOLOČANJE ČASA POMEŠANJA V MEŠALNIH POSODAH

Mešanje je ena pomembnejših industrijskih operacij, ki jo uporabimo, kadar želimo v nekem mediju doseči enotno sestavo, temperaturo ali drugo lastnost, ali pa če želimo pospešiti snovni ali toplotni prenos. Gre za izmenjavo mase med različnimi lokacijami, kar vodi do pomešanja snovi. Pri vaji bomo mešali kapljevino v posodi z mešalom. Mehansko mešanje kapljevine z mešalom močno skrajša čas pomešanja. Z večanjem mehansko vložene moči prek rotirajočega mešala drobimo kapljevino v mešalni posodi v vedno manjše vrtince in tako ustvarimo intenzivnejšo turbulenco. Spreminjali bomo hitrost vrtenja mešala in s tem mehansko moč, ki jo vložimo preko mešala. S tremi različnimi metodami bomo določali čas pomešanja in ugotavljali, katera hitrost mešanja je optimalna za doseganje pomešanja oziroma stopnje homogenosti, ki jo želimo. Pri eni izmed metod bomo izračunali tudi vnos moči.

5.1 OSNOVE

V makroskopskem merilu je mešanje rezultat premikanja večjih mas kapljevine v laminarnem ali turbulentnem toku, mikroskopsko pa je mešanje kapljevin posledica gibanja drobnih delcev kapljevine (vrtincev) ali pa difuzije še manjših molekul.

Tok tekočine lahko predstavimo s tokovnicami, ki pa odražajo le celokupen učinek gibanja tekočine. Čeprav so tokovnice vzporedne in kažejo gladek kontinuiran tok, se lahko molekule v tekočini gibljejo neurejeno. Počasnejši je tok, realnejša je predstavitev dejanskega gibanja s tokovnicami. Imenujemo ga *laminarni tok*. V hitrem gibanju pa delci tekočine pogosto prekrizajo tokovnice, oblikujejo se vrtinci – takšen tok tekočine je *turbulenten*. Prehod iz laminarnega v turbulentni tok ni odvisen le od hitrosti tekočine, ampak tudi od njene viskoznosti in gostote ter od geometrije prostora, po katerem se giblje tekočina. Brezdimenzijski parameter, s katerim okarakteriziramo tok tekočine, imenujemo Reynoldsovo število (Re). Za mešalne posode (tudi bioreaktorje) izrazimo Reynoldsovo število kot *Reynoldsovo število mešala* Re_i (i... „impeler“, mešalo):

$$Re_i = \frac{N_i \cdot D_i^2 \cdot \rho}{\eta} \quad (5.1)$$

pri čemer je D_i premer mešala, N_i pa hitrost vrtenja mešala. Za mnoge mešalne sisteme velja, da je tok laminaren, če je $Re_i \leq 10$.

Mešanje v bioreaktorjih dosežemo z vgrajenim mešalom in na stenah posode nameščenimi pregradami. Mešalni bioreaktorji so navadno cilindrične oblike, dno je zaokroženo, kar preprečuje nastanek nepremešanih področij. Tok tekočine v bioreaktorju je odvisen od konstrukcijske izvedbe mešala, lastnosti tekočine in velikosti oziroma geometrijskih lastnosti bioreaktorske posode, pregrad, prezračevalnega sistema.

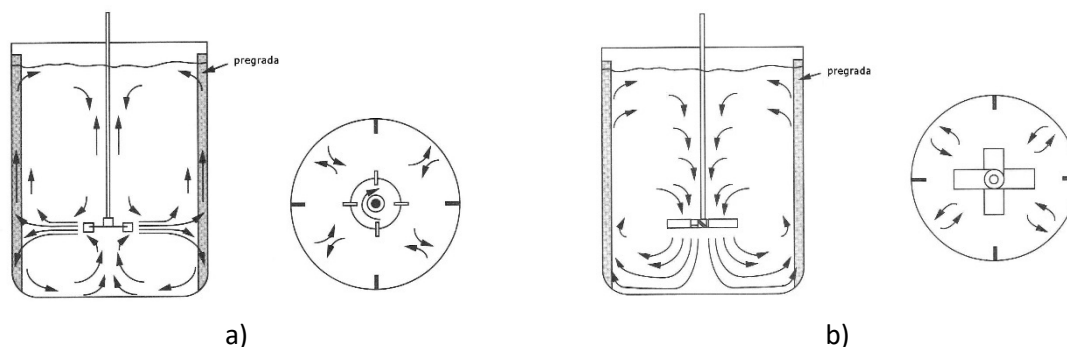
Pri uporabi Newtonskih tekočin (zanje velja, da je viskoznost neodvisna od tokovnih razmer) je razmerje med premerom bioreaktorja in premerom mešala 3 : 1. Tak bioreaktor imenujemo mešalni bioreaktor standardne konfiguracije oz. STC-reaktor („standard type configuration“). V sredini

bioreaktorja je os mešala, ki jo poganja motor, nameščen na vrhu ali na dnu bioreaktorske posode. Na osi je pritrjeno eno ali več mešal, ki so lahko različnih konstrukcijskih izvedb (slika 5.1).



Slika 5.1: Različni tipi mešal: a) Rushtonova turbina, b) propeler, c) veslo, d) sidro
(<http://www.postmixing.com/mixing%20forum/impellers/rt.htm>)

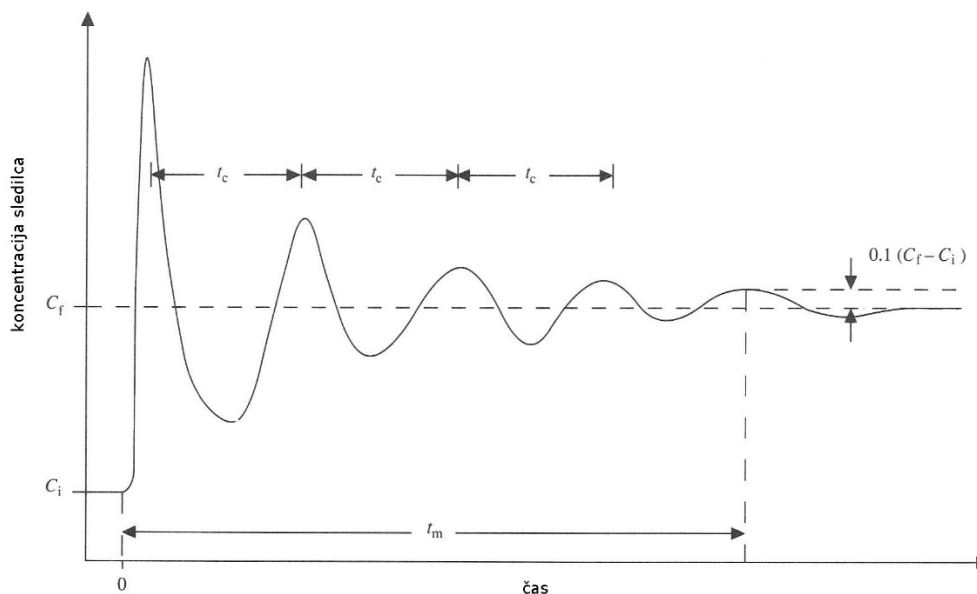
Izbira mešala je odvisna od viskoznosti medija in občutljivosti kulture na mehanski strig (strižne sile). Turbinska mešala pri vrtenju povzročajo visoke strižne sile in so učinkovita pri dispergiranju, medtem ko so propelerji primerni predvsem za homogeniziranje in suspendiranje trdnih delcev. Od turbinskih mešal se najpogosteje uporablja diskasta turbina s šestimi ravnimi lopaticami, t.j. Rushtonova turbina (slika 5.1a). Rushtonova turbina usmerja nizkoviskozne tekočine v radialni tok, medtem ko mešanje s propelerjem vodi v aksialno kroženje tekočine v bioreaktorju (slika 5.2).



Slika 5.2: Tokovna profila v mešalnem bioreaktorju s pregradami, ki jo povzročata Rushtonova turbina (a) in propeler (b) (prirejeno po Doran, 1995)

Izbira mešala in pogojev mešanja morata biti takšna, da dosežemo največjo učinkovitost mešanja in za to porabimo najmanj energije. Mešanje je učinkovito takrat, ko tekočina, ki jo meša mešalo, zajame celotno mešalno posodo v nekem sprejemljivem času. Poleg tega mora biti hitrost tekočine, ki zapuša mešalo, dovolj velika, da nosi vse snovi v najbolj oddaljen del mešalne posode.

Učinkovitost mešanja ugotavljamo z določitvijo časa pomešanja (t_m), ki je definiran kot čas, potreben za doseganje določene stopnje homogenosti. Navadno je to čas, v katerem se koncentracija sledilca razlikuje od končne koncentracije (c_f) za manj kot 10 % razlike med tema koncentracijama (slika 5.3). Da je mešanje hitro in učinkovito, mora biti čas pomešanja čim manjši. Čas kroženja oz. ciklizacije (t_c) je za enofazne tekočine v mešalni posodi s pregradami in majhnim mešalom običajno enak $\frac{1}{4} t_m$.



Slika 5.3: Prikaz gibanja koncentracije sledilca po vnosu v mešalno posodo (prirejeno po Doran, 1995)

Za določanje časa pomešanja so razvite številne metode, ki temeljijo na pulznem vnosu inertnega sledilca in spremljanju odziva sistema do dosežene enotne sestave medija. Sledilci so navadno kisline, baze, koncentrirane raztopine soli, topla tekočina, barva. Na določenem mestu v bioreaktorju tako merimo naslednje količine: pH, električno prevodnost, temperaturo, fluorescenco, magnetne lastnosti, radioaktivnost. Spremljamo lahko tudi obarvanje ali razbarvanje medija.

Čas pomešanja, ki ga določimo z eno izmed prej omenjenih metod, je odvisen od:

- naših zahtev pomešanja (stopnja homogenosti)
- natančnosti določitve homogenosti medija
- mesta vnosa sledilca
- lokacije senzorja.

Doseganje majhnih časov pomešanja je, še posebej v velikih mešalnih posodah, povezano z veliko porabo energije. Moč, ki jo vnesemo v tekočino preko mešanja, je običajno manjša od dejanske moči, potrebne za pogon motorja, saj prihaja do izgub energije na menjalnikih, ipd. V neprezračevanem sistemu jo lahko izračunamo iz enačbe:

$$P = P_0 \cdot \rho \cdot N_i^3 \cdot D_i^5 \quad (5.2)$$

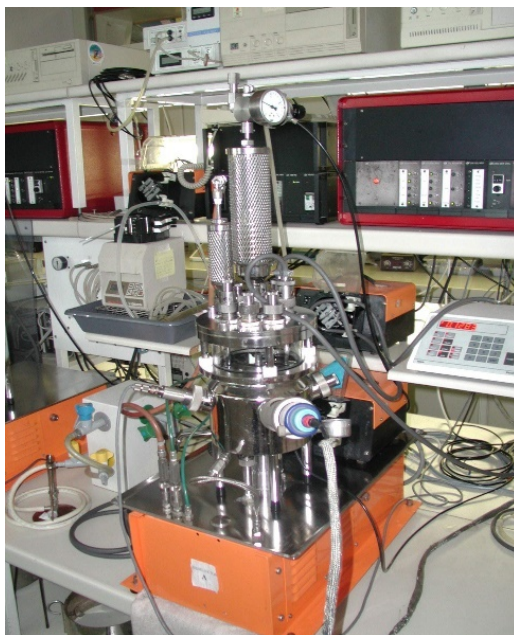
kjer je P_0 brezdimenzijsko število, imenovano število moči. Število moči za posamezno mešalo ima v turbulentnem območju konstantno vrednost, ki ni odvisna od Re_i , ampak le od geometrijske konfiguracije mešala. P_0 za Rushtonovo turbino je 5–6. V laminarnem območju je $P_0 \propto Re_i^{-1}$.

5.2 EKSPERIMENTALNI DEL

5.2.1 pH-metrična metoda

Material

- 1 M NaOH
- 1 M HCl
- laboratorijski mešalni bioreaktor ($V_d = 10$ L) z opremo (Rushtonova turbina, gumb za nastavitev hitrosti mešanja, pH-elektroda), napolnjen z vodo (Slika 5.4)



Slika 5.4: Laboratorijski bioreaktorski sistem (Podgornik in sod., 2013)

Potek dela

Bioreaktor z delovnim volumnom 5 L napolnimo z destilirano vodo. V bioreaktorju je umerjena pH elektroda (v dveh točkah z dvema referenčnima pufroma). Z dodatkom 1 M NaOH uravnamo začetno vrednost pH na 9. Hitrost mešanja nastavimo na 100 min^{-1} . Kot sledilec uporabimo 1 M HCl. Odpipetiramo $300 \mu\text{L}$ 1 M HCl in jo brizgnemo v vodo v bioreaktorju. Pazimo, da to naredimo vedno na istem mestu in s približno enako hitrostjo. Na monitorju spremljamo spreminjanje vrednosti pH . Ko se vrednost pH ustali, nastavimo drugo hitrost mešanja, t.j. 200 min^{-1} , in ponovno uravnamo začetno vrednost pH ($pH = 9$). Ponovimo postopek vnosa sledilca, ki smo ga izvedli pri prvi hitrosti mešanja. Isti poskus naredimo še za naslednje hitrosti mešanja: 300 min^{-1} , 400 min^{-1} , 500 min^{-1} .

5.2.2 Termična metoda

Material

- laboratorijski mešalni bioreaktor ($V_d = 2,5 \text{ L}$) z opremo (Rushtonova turbina, gumb za nastavitev hitrosti mešanja, temperaturni senzor) (Slika 5.4)
- vročo vodo ($T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- merilni valj.

Potek dela

V bioreaktor z delovnim volumnom 2,5 L nalijemo 1 L destilirane vode. V bioreaktorju je že vgrajen in umerjen temperaturni senzor. Temperaturo vode uravnamo na $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Hitrost mešanja nastavimo na 10 min^{-1} . Kot sledilec uporabimo vročo vodo ($T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Z merilnim valjem odmerimo 200 mL vroče vode in jo vlijemo v bioreaktor. Pazimo, da to naredimo vedno na istem mestu in s približno enako hitrostjo. Na monitorju spremljamo spreminjanje temperature. Ko se temperatura ustali, zamenjamo vodo v bioreaktorju ($V = 1 \text{ L}$, $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in nastavimo drugo hitrost mešanja, t.j. 50 min^{-1} . Ponovimo postopek vnosa sledilca, ki smo ga izvedli pri prvi hitrosti mešanja. Isti poskus naredimo še za hitrosti mešanja 100 min^{-1} in 200 min^{-1} .

Zaradi slabe občutljivosti temperaturnega senzorja in posledično velikega volumna sledilca so rezultati te metode le ocene časov pomešanja.

5.2.3 Metoda razbarvanja

Material

- stekleno čašo z 800 mL destilirane vode
- magnetno mešalo z mešalčkom
- 0,5 M HCl
- 0,5 M NaOH
- fenolftalein
- štoparico.

Potek dela

V stekleno čašo odmerimo 800 mL destilirane vode, vanjo prenesemo mešalček in čašo postavimo na magnetno mešalo. Dodamo 1 mL fenolftaleina in z 0,5 M NaOH uravnamo začetno vrednost pH na 9,3. Hitrost mešanja nastavimo na 100 min^{-1} . Kot sledilec uporabimo 0,5 M HCl. Odpipetiramo 0,2 mL 0,5 M HCl in jo brizgnemo v čašo. Pazimo, da to naredimo vedno na istem mestu in s približno enako hitrostjo. Merimo čas, v katerem vijolično obarvanje popolnoma izgine (čas pomešanja). Z dodatkom 0,2 mL 0,5 M NaOH ponovno uravnamo začetno vrednost pH na 9,3, spremenimo hitrost mešanja in ponovimo postopek vnosa sledilca ter beleženja časa pomešanja. Uporabimo še naslednje hitrosti mešanja: 200 min^{-1} , 300 min^{-1} , 400 min^{-1} , 500 min^{-1} , 600 min^{-1} . Pri vsaki hitrosti mešanja naredimo dva eksperimenta.

5.2.4 Meritve in izračuni

Iz meritev pri pH-metrični in termični metodi odčitajte čase pomešanja (t_m) in jih vpišite v preglednico 5.1, kamor vnesete tudi zabeležene meritve pri metodi razbarvanja.

Preglednica 5.1: Eksperimentalno določeni časi pomešanja (t_m) v odvisnosti od hitrosti mešanja (N_i) za vse metode.

pH-metrična metoda		Termična metoda		Metoda razbarvanja			
N_i / min^{-1}	t_m / s	N_i / min^{-1}	t_m / s	N_i / min^{-1}	t_m / s	N_i / min^{-1}	t_m / s

Rezultate v preglednici 5.1. predstavite tudi grafično z izrisom (skiciranjem) diagrama odvisnosti časa pomešanja (t_m) od hitrosti mešanja (N_i) za vse eksperimentalne metode.

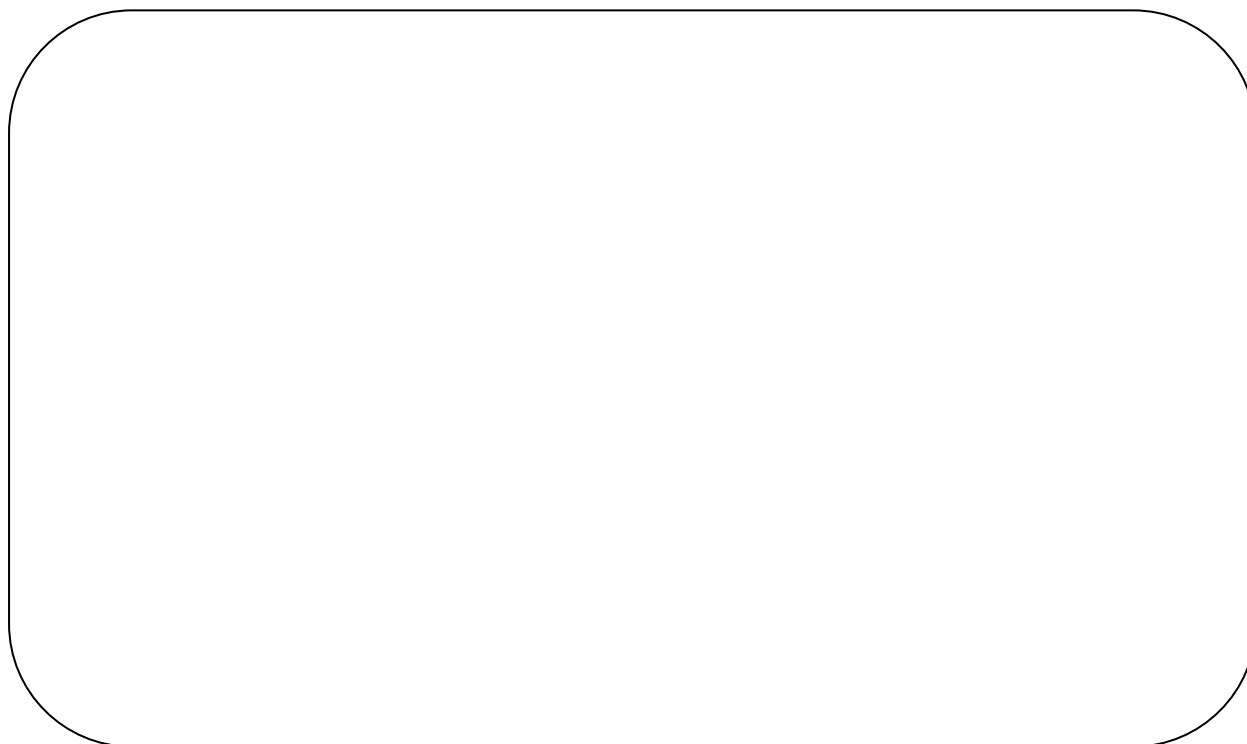


Diagram 5.1: Čas pomešanja (t_m) v odvisnosti od hitrosti mešanja (N_i) pri pH-metrični, termični in metodi razbarvanja

Vnos moči za mešanje izračunajte le pri pH-metrični metodi. Z uporabo enačbe (5.1) in izračunom Reynoldsovih števil mešala (Re_i) pri vseh uporabljenih hitrostih mešanja (N_i) ugotovite, ali so pogoji v mešalni posodi turbulentni. Nato z enačbo (5.2) izračunajte moč, potrebno za mešanje (P). Rezultate zapišite v preglednico 5.2.

Izračuni:

Preglednica 5.2: Izračunana Reynoldsova števila mešala (Re_i) in vnos moči (P) pri vseh uporabljenih hitrostih mešanja (N_i) pH-metrične metode.

N_i / min^{-1}	Re_i	P / mW

Komentar rezultatov vseh treh metod (vpliv N_i na t_m):

Komentar izračunanih Re_i in P pri pH-metrični metodi (vpliv N_i na P):

Prostor za dodaten komentar:

6 TOPLOTNA ODPORNOST MIKROORGANIZMOV

Toplotna obdelava živil je pomemben način konzerviranja živil, ki uniči mikroorganizme in inaktivira encime, ki so prisotni v živilih. Hkrati ustvari specifične fizikalne lastnosti, vpliva na komponente živila in ponudi ekonomičen visokokakovostni izdelek. A da pri izvedbi toplotne obdelave živila ne pride do nezaželenih in nezadovoljivih rezultatov, je potrebno upoštevati dejavnike, kot so toplotna odpornost tarčnih mikroorganizmov in encimov, pH in aktivnost vode živila, vsebnost soli v živilu, pogoji toplotne obdelave, termo-fizikalne lastnosti živila, oblika in velikost pakiranja živila ter pogoji skladiščenja po toplotni obdelavi.

6.1 OSNOVE

Kljub številnim novim načinom konzerviranja živil ostaja toplotna obdelava živil eden najpogosteje uporabljenih načinov podaljševanja roka uporabnosti živil, ki temelji na kombinaciji uporabe visoke temperature in zadostnega časa, ki uniči mikroorganizme ali inaktivira encime. Za toplotno obdelavo živil se uporabljajo različne metode, ki se delijo glede na uporabljen medij za prenos toplote. Mehanizmi prenosa toplote pa so prevod, prestop in sevanje toplote, ki se pogosto uporabijo tudi v kombinaciji. Najpogosteje uporabljene metode za konzerviranje živil so blanširanje, pasteriziranje in steriliziranje. Vse tri metode temeljijo na uporabi vroče vode oz. vodne pare, a se razlikujejo v izvedbi in doseženi stopnji uničenja mikroorganizmov oz. inaktivaciji encimov.

Toplotna obdelava živil velja za enostaven postopek konzerviranja, ki ga lahko dobro nadziramo. Ne glede na uporabljeno temperaturo in čas toplotna obdelava vpliva tudi na splošno kakovost živila, saj povzroči senzorične spremembe in razgradnjo hranil. Zato je potrebno pri optimizaciji postopka toplotne obdelave posameznega živila upoštevati tudi tržno sprejemljivost senzoričnih sprememb in razgradnjo hranil, ki so posledica izbrane toplotne obdelave, da dosežemo ciljno uničenje mikroorganizmov ali inaktivacijo encimov. Za zagotavljanje varnosti toplotno obdelanih živil je tako ključna verifikacija in validacija procesov, sploh če ti temeljijo na izračunih. Pri tem pa je ključno poznavanje toplotne odpornosti mikroorganizmov in encimov.

Vzpostavitev toplotnega procesa temelji na: (i) toplotni odpornosti tarčnih mikroorganizmov ali encimov v vsakem posameznem živilskem izdelku in (ii) sestavi in obliki živilskega izdelka s specifičnimi termo-fizikalnimi lastnostmi. Te podatke se pridobi na osnovi poskusov in matematičnem modeliranju eksperimentalnih podatkov.

Toplota deluje na različne tarče v mikroorganizmih, kot so zunanja in notranja membrana, peptidoglikanska celična stena, nukleotidi, RNA, ribosom in beljakovine, ki so ključne za preživetje in razmnoževanje celic. Poškodbe teh ključnih komponent mikroorganizmov se kažejo kot izguba membranske integritete, porušena celična homeostaza, denaturacija in agregacija beljakovin ter povečano število mutacij pri celicah, ki preživijo toplotno obdelavo. Ko je presežen kritični prag v poškodbi katere od teh tarč, celica odmre. Če izbrana temperatura in čas toplotne obdelave nista zadostni za smrt celic, se pojavijo subletalne poškodbe in povečan stresni odziv celic, kar poveča zmožnost za popravilo teh poškodb in doprinese k termostabilnosti različnih celičnih komponent. Ob ugodnih okoljskih pogojih se lahko te celice obnovijo in predstavljajo potencialno odporno

obliko v živilu. Poleg uničenja mikroorganizmov v živilih toplotna obdelava vpliva tudi na njihove encime, vključno s tistimi, ki povzročajo kvar (npr. proteaze in lipaze bakterij rodu *Pseudomonas*), ali toksine (npr. enterotoksini bakterij *Staphylococcus aureus* in *Bacillus cereus*). Ti encimi se delijo na termolabilne ali termostabilne, zaradi česar lahko predstavljajo tveganje tudi po toplotni obdelavi živil – tako za nadaljnje procese kvara kot tudi za zastrupitev.

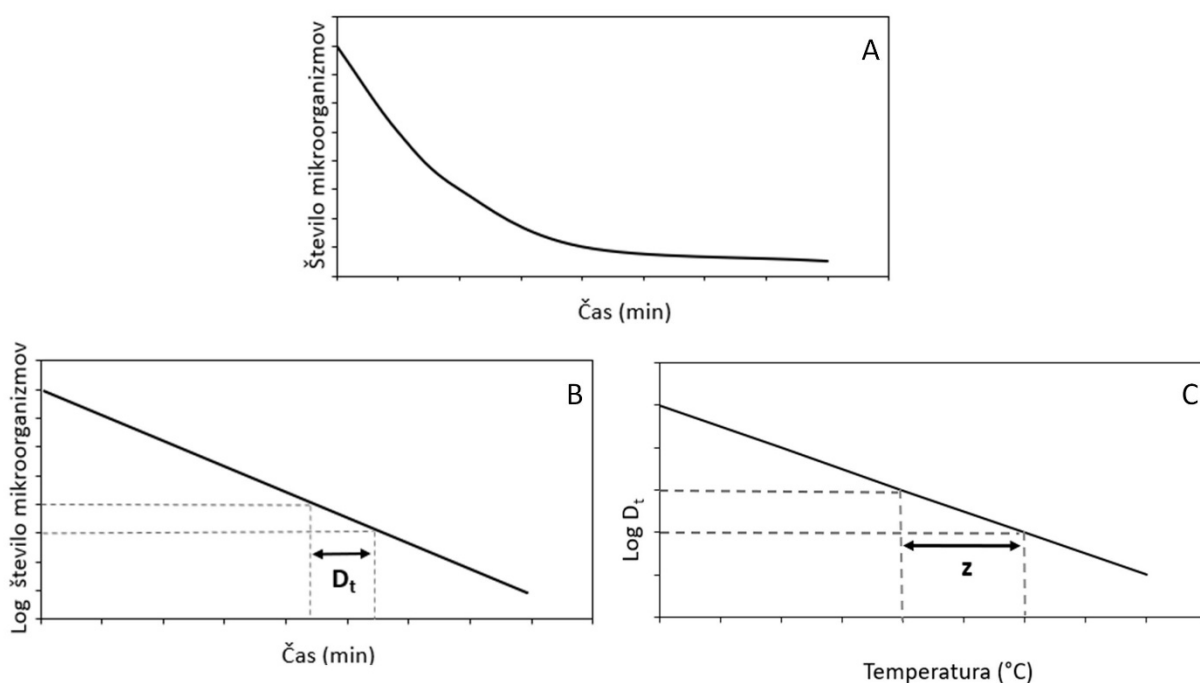
Toplotna odpornost mikroorganizmov – vegetativnih celic ali spor – je odvisna od lastnosti mikroorganizma in lastnosti živila (Preglednica 6.1). Spremembe teh lastnosti lahko izrazito vplivajo na toplo odpornost mikroorganizmov. Po toplotni obdelavi se živila shrani ob upoštevanju možne prisotnosti potencialno odpornih oblik mikroorganizmov. Pogoji skladiščenja, distribucije, prodaje in domače hrambe skupaj z intrinzičnimi dejavniki živila so pomembni dejavniki, ki lahko omogočijo boljšo obnovo preživelih celic toplotne obdelave (npr. nižja temperatura od optimalne za rast mikroorganizma) ali zmanjšajo to možnost (npr. prisotnost soli, nizek pH).

Preglednica 6.1: Pregled lastnosti mikroorganizmov in posameznih komponent živil, ki vplivajo na toplotno odpornost mikroorganizmov.

Lastnost mikroorganizmov	
Tip mikroorganizma	Bakterije so bolj toplotno odporne kot glive. Grampozitivne bakterije so bolj toplotno odporne kot gramnegativne. Bakterijske spore so bolj toplotno odporne kot spore gliv.
Oblika	Koki so bolj toplotno odporni kot bacili.
Število mikroorganizmov	Več kot je mikroorganizmov, večja je stopnja toplotne odpornosti.
Faza rasti	Mikroorganizmi v stacionarni fazi rasti so najbolj toplotno odporni. Toplotna odpornost je večja tudi na začetku lag faze. Največja toplotna občutljivost je v log fazi.
Temperatura rasti	Toplotna odpornost mikroorganizmov se poveča, če ti rastejo pri višji temperaturi. Z naraščajočo optimalno temperaturo rasti za mikroorganizme se večja njihova toplotna odpornost (psihrofili < mezofili < termofili).
Sporogenost	Spore so bolj toplotno odporne kot vegetativne celice. Sporogene vrste bakterij so bolj toplotno odporne kot nesporogene.
Vpliv posameznih komponent živil	
Voda	Toplotna odpornost mikroorganizmov se večja z nižanjem vsebnosti vode v živilu.
Maščobe	Dolgoverižne maščobne kisline zaščitijo mikroorganizme in povečajo njihovo toplotno odpornost.
Sol, sladkor	Z večanjem koncentracije soli ali sladkorja se niža aktivnost vode in večja toplotna odpornost mikroorganizmov.
Beljakovine	Beljakovine zaščitijo mikroorganizme in povečajo njihovo toplotno odpornost.
pH živila	Mikroorganizmi so najbolj toplotno odporni pri optimalni pH vrednosti za njihovo rast, ki je ponavadi okoli pH 7. V primeru višje ali nižje pH vrednosti se poveča toplotna občutljivost mikroorganizmov.
Koloidi	Koloidni delci zaščitijo mikroorganizme in povečajo njihovo toplotno odpornost.
Zaviralne snovi	Prisotnost zaviralnih snovi (npr. nitrit) v živilu zmanjša toplotno odpornost mikroorganizmov.

Za posamezni živilski izdelek in izbrani tarčni mikroorganizem se lahko v laboratorijskem poskusu določi čas, ki je pri določeni temperaturi potreben za uničenje mikroorganizma. Za izračun in prilagajanje toplotnih postopkov obdelave v živilski industriji so na razpolago številni primarni

modeli, ki opisujejo spremembe števila mikroorganizmov v odvisnosti od časa toplotne obdelave in sekundarni modeli, ki opisujejo dinamiko procesa ob spremembi pogojev, kot so segrevanje, ohlajanje, spremembe pH in a_w , ter vpeljava dodatnega fizikalnega, kemijskega ali biološkega postopka za zagotavljanje varnosti in stabilnosti živil. Kljub temu se v praksi še vedno uporablja predpostavka, da je razmerje med številom preživelih mikroorganizmov in časom izpostavljenosti stalni temperaturi eksponentno (Slika 6.1A). Tako se v laboratorijski poskusih določi parametra občutljivosti mikroorganizmov na toploto – vrednost D in z. Vrednost D oz. decimalni redukcijski čas je čas izpostavljenosti mikroorganizma pri določeni temperaturi, ki je potreben za zmanjšanje mikrobne populacije za eno logaritemsko enoto (Slika 6.1B, Enačba 6.1). Razmerje med logaritmirano vrednostjo D in temperaturo postopka omogoča izračun vrednosti z (Slika 6.1C, Enačba 6.2), ki predstavlja spremembo stopnje letalnosti glede na temperaturo. Ta ustreza stopinjam Celzija potrebnih za zvišanje toplotne obdelave, da se zmanjša vrednost D za eno logaritemsko enoto.



Slika 6.1: Eksponentna krivulja vpliva časa toplotne obdelave pri konstantni temperaturi na število mikroorganizmov (A), grafični prikaz vrednosti D (B) in grafični prikaz vrednosti z (C).

$$D = \frac{t}{(\log N_0 - \log N_t)} \quad (6.1)$$

D – decimalni redukcijski čas, t – čas, N_0 – začetno število mikroorganizmov, N_t – število mikroorganizmov ob času t

$$z = \frac{(T_2 - T_1)}{(\log D_1 - \log D_2)} \quad (6.2)$$

z – konstanta toplotne odpornosti, T_1 – nižja temperatura toplotne obdelave v °C, T_2 – višja temperatura toplotne obdelave v °C, D_1 – decimalni redukcijski čas pri nižji temperaturi toplotne obdelave v minutah, D_2 – decimalni redukcijski čas pri višji temperaturi toplotne obdelave v minutah

Za zagotavljanje varnosti določenih procesov toplotne obdelave (npr. pri konzervah, kjer je potrebno zagotoviti sterilnost) je pomembna tudi vrednost F. Ta predstavlja čas toplotne obdelave pri določeni temperaturi, potreben za uničenje vseh oblik mikroorganizmov (tako vegetativnih celic kot spor). Vrednost F je tako večkratnik vrednosti D (Enačba 6.3). Ta princip se uporablja tudi v živilski proizvodnji, kjer velja, da je za sterilizacijo potrebnih vsaj 12 decimalnih redukcij mikroorganizma, kar temelji na podatku za uničenje vegetativnih celic in spor bakterije *Clostridium botulinum*. Za izračun stopnje letalnosti, se uporabi temperatura 121,1 °C in konstanta toplotne odpornosti 10 °C (Enačba 6.4). Stopnja letalnosti je relativna vrednost, ki primerja učinek letalnosti za izbrani mikroorganizem pri 1-minutni toplotni obdelavi pri izbrani temperaturi z učinkom pri referenčni temperaturi 121,1 °C. Stopnjo letalnosti lahko uporabimo za izračun vrednosti F_0 , ki je ekvivalent časa izpostavljenosti pri 121,1 °C dejanskemu času izpostavljenosti pri spremenljivi temperaturi (Enačba 6.5). Vrednost F se načeloma uporablja za postopke sterilizacije. Pri postopkih pasterizacije bi se tehnično morali sklicevati na P vrednost, ki predstavlja čas celotnega procesa pasterizacije pri določeni temperaturi in uporabi izraza pasterizacijska enota (PU), ki je definirana z izpostavitvijo živila 60 °C 1 minuto.

$$F = n \times D \quad (6.3)$$

F – čas toplotne letalnosti, n – željeno logaritemsko zmanjšanje mikrobne populacije, D_{ref} – decimalni redukcijski čas

$$L = 10^{\frac{(T-T_{ref})}{z}} \quad (6.4)$$

F – stopnja letalnosti, T – temperatura toplotne obdelave, T_{ref} – referenčna temperatura 121,1 °C, z – konstanta toplotne odpornosti za referenčno temperaturo 10 °C

$$F_0 = 10^{\frac{(T-T_{ref})}{z}} \times \Delta t \quad (6.5)$$

F_0 – referenčni čas toplotne letalnosti, T – temperatura sterilizacije, T_{ref} – referenčna temperatura 121,1 °C, z – konstanta toplotne odpornosti za referenčno temperaturo 10 °C, Δt – časovni interval

V poskusih za določanje toplotne odpornosti mikroorganizmov v izbranih živilih se uporabi izbrani tarčni mikroorganizem znane koncentracije. Po toplotni obdelavi se vzorec ohladi in nacepi na optimalni rastni medij za izbrani tarčni mikroorganizem. Sledi inkubacija pri optimalnih pogojih, ki traja vsaj 24 ur, in štetje zrastle kolonij. Slabost metode je, da ne omogoča rasti subletalno poškodovanih celic. Te se lahko zazna v primeru spremljanja kinetike rasti mikroorganizmov v živilu po toplotni obdelavi, kar se pri subletalno poškodovanih celicah vidi kot podaljšana lag faza rasti. V tekočih živilih (kot je npr. mleko) lahko za hitrejšo oceno učinkovitosti toplotne obdelave uporabimo tudi metode, ki ne potrebujejo vsaj 24 urne inkubacije. Tak primer je določanje metabolne aktivnosti mikroorganizmov z uporabo resazurina, ki ga metabolno aktivne celice reducirajo v resorufin. Spremembo v barvi (prehod iz modre v roza barvo v primeru prisotnosti metabolno aktivnih celic) lahko zaznamo vizuelno, a z meritvijo fluorescence in uporabo standardne krivulje lahko odločimo koncentracijo celic, saj je redukcija sorazmerna s številom metabolno aktivnih celic.

Tudi pri določanju encimov so na voljo različne metode. Tako se npr. pri določanja aktivnosti proteaznih encimov lahko uporabi agarske plošče z različnimi substrati (npr. kazein, želatina), kjer se oceni cono zbistritve na agarju po inkubaciji. S spektrofotometričnimi metodami se čas ocene uspešnosti toplotne obdelave za inaktivacijo proteaznih encimov zmanjša. Primer je uporaba reagenta azokazein, ki je nespecifični proteazni substrat. Prisotne proteaze v vzorcu hidrolizirajo kazein in sprostijo azo barvilo, katerega intenziteto se ovrednoti z meritvijo pri 440 nm in izračunom proteazne aktivnosti (Enačba 6.6).

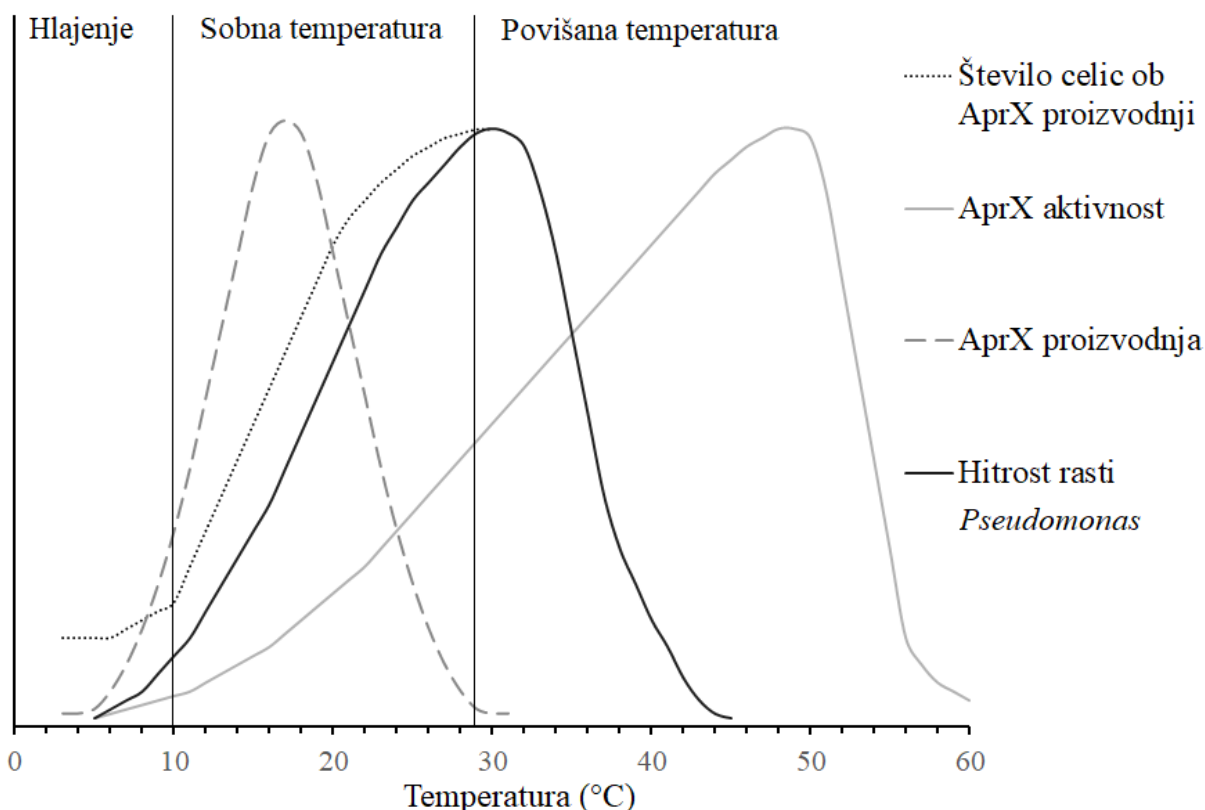
$$PA = \frac{(A_{vzorec} - A_{negativna\ kontrola}) \times F_V \times F_d}{t} \quad (6.6)$$

PA – proteazna aktivnost (U/(mL × min)), A_{vzorec} – absorbanca vzorca, $A_{negativna\ kontrola}$ – absorbanca negativne kontrole, F_V – faktor za uporabljeni volumen reakcije, F_d – faktor uporabljene redčitve, t – čas reakcije

6.1.1 Primer problematike v živilstvu

Surovo mleko je zelo hranljivo in pH-nevtravno, kar zagotavlja idealne pogoje za rast mikroorganizmov. Uživanje surovega mleka ni varno, saj so lahko v surovem mleku prisotne patogene bakterije. Najbolj odporen patogen v mleku je *Mycobacterium tuberculosis*, ki ga lahko inaktiviramo s segrevanjem mleka na 63 °C 30 minut (LTLT-low temperature long time). V mlekarški industriji se najpogosteje uporablja kratkotrajna visokotemperaturna pasterizacija (HTST- high temperature short time), izvedena pri 72 °C za vsaj 15 sekund, a je potrebno izdelek skladiščiti pri nizkih temperaturah. V izogib temu se je razvila sterilizacijska metoda UHT (ultra high temperature), ki segreva mleko na izjemno visoke temperature (135 °C do 150 °C) za nekaj sekund, kar podaljša njegovo obstojnost in omogoča shranjevanje pri sobni temperaturi ter podaljša rok uporabnosti za nekaj mesecev. Intenzivna toplotna obdelava mleka je z mikrobiološkega vidika zaželeno, vendar lahko pride do drugih neželenih učinkov, kot sta sprememba okusa in hranilne vrednosti.

Pred predelavo surovega mleka se ta hrani pri nizkih temperaturah (4 °C), kar pa ne omejuje razmnoževanja psihrotrofnih bakterij, ki h kvaru dodatno prispevajo z zunajceličnimi encimi, kot so proteaze in lipaze. V mlekarški industriji je tako izjemnega pomena proteaza AprX, ki jo proizvajajo bakterije rodu *Pseudomonas*. Pri nizkih temperaturah je hitrost rasti bakterij *Pseudomonas* nizka in začne naraščati pri temperaturah nad 10 °C (Slika 6.2). Prav tako je pri nizkih temperaturah nizka proizvodnja proteaze AprX, a ta začne naraščati hitreje kot sama hitrost rasti bakterij. Na tak način bakterije z intenzivnejšo proizvodnjo proteaze nadomestijo njeno nižjo aktivnost ter zagotovijo učinkovit izkoristek hranil. Z naraščajočo temperaturo se večja aktivnost proteaze, zaradi česar se zmanjša njena proizvodnja. Pri temperaturah nad 30 °C začne hitrost rasti bakterij *Pseudomonas* padati, aktivnost proteaze AprX pa narašča še do 45 °C., Pri 55 °C se aktivnost proteaze hitro zmanjša zaradi avtoproteolize, pri čemer se peptidna vez cepi v samokatalizirani intramolekularni reakciji.



Slika 6.2: Na shematskem prikazu (ni v merilu) je prikazana temperaturna aktivnost encima AprX (označena s sivo polno črto). Temperaturno območje proizvodnje encima AprX je prikazano s sivo črtkano črto in doseže svoj maksimum med 17 in 20 °C. Hitrost rasti bakterij rodu *Pseudomonas* (označeno s črno črto) ima optimalno rastno temperaturo pri 30 °C, število bakterij *Pseudomonas* ob proizvodnji encima AprX je označeno s črno točkasto črto.

Z različnimi tehnikami toplotne obdelave mleka lahko dosežemo njegovo sterilnost, vendar ta ne zagotavlja stabilnosti mleka znotraj roka uporabnosti. Rezidualna aktivnost zunajceličnih encimov po toplotni obdelavi (tudi po UHT) lahko povzroči tehnološke težave kot so sprememba organoleptičnih lastnosti (npr. siva barva, grenak okus) in fizikalno-kemijska nestabilnost (npr. želiranje, ločevanje maščob). Proteaza AprX bakterij *Pseudomonas* je dobro poznana po visoki toplotni stabilnosti. Vrednost D za inaktivacijo proteaze AprX v mleku je 124 sekund pri 140 °C, kar je veliko daljši čas kot pri UHT obdelavi mleka.

Potencialna rešitev za ohranjanje kakovosti mlečnih izdelkov bi lahko bila uvedba nizkotemperaturne inaktivacije (LTI-low temperature inactivation). Ta pristop izkorišča avtoproteolitične lastnosti encimov, za njihovo lastno deaktivirajo. Pri proteazi AprX se optimalno območje za tovrstno inaktivacijo nahaja med 50 in 60 °C. Kombinacija s postopkom dolgotrajne nizkotemperaturne pasterizacije (63 °C in 30 minut) bi lahko predstavljala inovativno rešitev za obvladovanje neželenega delovanja zunajceličnih encimov v mlečnih izdelkih.

6.2 EKSPERIMENTALNI DEL

Material:

- Vzorci mleka
- Trajno mleko (negativna kontrola)
- 0,03 % raztopina resazurina
- 3 % raztopina azokazeina
- 15 % trikloroocetna kislina
- 50 mM Tris HCl pufer
- 5 M NaOH
- Nastavki za pipete
- 2 mL mikrocentrifugirke
- Mikrotitrne ploščice
- Avtomatske pipete
- Termoblok/mešalec mikrotitrskih ploščic
- Centrifuga
- Čitalec mikrotitrskih ploščic

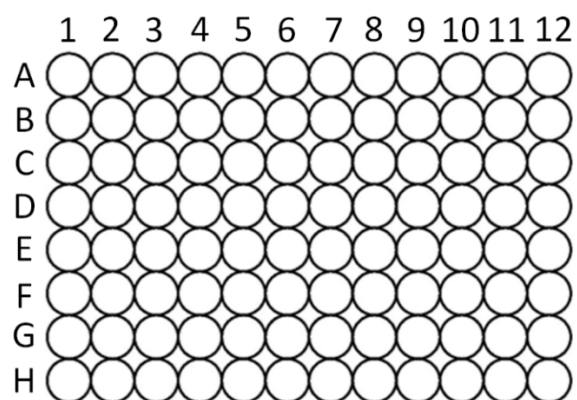
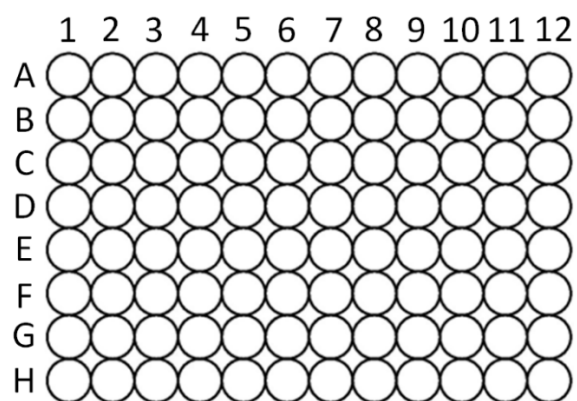
Potek dela:

- Vključite termoblok, da se segreje na 63 °C.
- Označite mikrocentrifugirke in v vsako aseptično odpipetirajte 1,5 mL vzorca mleka in negativno kontrolo (alpsko mleko).
- Mikrocentrifugirke z mlekom prestavite v termoblok segret na 63 °C za 30 minut.
- Pripravite načrt mikrotitrne ploščice za resazurinski test in načrt ploščice za azokazeinski test. Za vsak vzorec mleka boste izvedli oba testa pred in po toplotni obdelavi v dveh ponovitvah.
- Resazurinski test:
 - Odpipetirajte 100 µL začetnega vzorca mleka (oznaka M₀) in 100 µL toplotno obdelanega mleka (oznaka M_T) glede na načrt v luknjice mikrotitrne ploščice. Negativna kontrola je 100 µL trajnega mleka (pred/po toplotno obdelavo).
 - Dodajte 10 µL resazurina.
 - Premešajte na mešalcu mikrotitrskih ploščic 1 min, 650 rpm.
 - Inkubirajte 1 h pri 30 °C.
 - Izmerite fluorescenco (eksitacijska valovna dolžina 560 nm, emisijska valovna dolžina 590 nm).
- Azokazeinski test
 - Označite mikrocentrifugirke za vzorce mleka in negativno kontrolo (trajno mleko) in v njih odpipetirajte 1,3 mL mleka.
 - Mikrocentrifugirke centrifugirajte pri max obratih 10 min.
 - Označite mikrocentrifugirke za supernatant.
 - Odpipetirajte 50 µL supernatanta, dodajte 125 µL raztopine azokazeina in 125 µL pufra. Premešajte.
 - Inkubirajte 1 h pri 30 °C.
 - Dodajte 60 µL trikloroocetne kisline in inkubirajte 5 min.

- Centrifugirajte pri max obratih 5 min.
- Prenesite 200 μL supernatanta glede na načrt v luknjice mikrotitrne ploščice.
- V vsako dodajte 60 μL NaOH.
- Izmerite absorbanco pri 440 nm in izračunajte proteazno aktivnost.

Shema dela:

Načrt mikrotitrskih ploščic:



Rezultate preračunajte v excelovi datoteki (izpis meritev opravljenih z mikrotitrsko ploščico) in narišite grafe. Rezultate komentirajte ter ovrednotite metabolno in proteazno aktivnost v vzorcih mleka pred in po toplotni obdelavi.

Viri:

- Akterian S. G., Fernandez P. S., Hendrickx M. E., Tobback P. P., Periago P. M., Martinez A. 1999. Risk analysis on the thermal sterilization process. Analysis of factors affecting the thermal resistance of microorganisms. *International Journal of Food Microbiology*, 47: 51-57
- Awuah G. B., Ramaswamy H. S., Economides A. 2007. Thermal processing and quality: principles and overview. *Chemical Engineering and Processing*, 46: 584-602
- Bogo M., Lauer Cruz K., Gonzalez Revello Á., Folmer Corrêa A. P., randelli A., Guedes Frazzon A. P., de Souza da Motta A. 2017. Thermal resistance of proteolytic enzymes produced by psychrotrophic bacteria isolated from buffalo milk. *International Journal of Dairy Science*, 12: 339-347
- Cebrián G., Condón S., Mañas P. 2017. Physiology of the inactivation of vegetative bacteria by thermal treatments: mode of action, influence of environmental factors and inactivation kinetics. *Foods*, 6, 12: 107, doi: 10.3390/foods6120107: 21 str.
- Smelt J. P. P. M., Brul S. 2014. Thermal inactivation of microorganisms. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54, 10: 1371-1385
- Zhang C., Bijl E., Svensson B., Hettinga K. 2019. The extracellular protease AprX from *Pseudomonas* and its spoilage potential for UHT milk: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18: 834–852, doi:10.1111/1541-4337.12452
- Tadini C. C., Gut J. A. W. 2022. The importance of heating unit operations in the food industry to obtain safe and high-quality products. *Frontiers in Nutrition*. 9: 853638, doi: 10.3389/fnut.2022.853638

7 SIMULACIJA PRETAKANJA TEKOČIN

7.1 OSNOVE

Za opis stacionarnih procesov (ni akumulacije) lahko uporabimo energijsko bilanco, ki se glasi

$$\Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_g, \quad (7.1)$$

kjer je $\Delta\dot{H}$ sprememba entalpije med izstopnim in vstopnim tokom v nekem časovnem intervalu, $\Delta\dot{E}_k$ je sprememba kinetične energije v nekem časovnem intervalu, $\Delta\dot{E}_p$ je sprememba potencialne energije v nekem časovnem intervalu, $\dot{Q}$ je toplotni tok, $\dot{W}_g$ pa predstavlja delo gredi (delo črpalk, turbin itd.). Če sedaj spremembo entalpije zapišemo kot vsoto spremembe notranje energije ($\Delta\dot{U}$) in volumskega dela ($\Delta(p\dot{V})$):

$$\Delta\dot{U} + \Delta(p\dot{V}) + \Delta\dot{E}_k + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_g \quad (7.2)$$

Enačbo 7.2 lahko, ob predpostavki da imamo en vstopni in en izstopni tok, zapišemo tudi kot:

$$\dot{m}\Delta\hat{U} + \dot{m}\Delta(p\hat{V}) + \dot{m}\frac{\Delta v^2}{2} + \dot{m}g\Delta h = \dot{Q} - \dot{W}_g \quad (7.3)$$

Če enačbo 7.3 delimo z $\dot{m}$, dobimo:

$$\Delta\hat{U} + \Delta(p\hat{V}) + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_g}{\dot{m}} \quad (7.4)$$

Enačbo 7.4 nekoliko preuredimo in dobimo:

$$\Delta(p\hat{V}) + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h + \left(\Delta\hat{U} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}\right) = -\frac{\dot{W}_g}{\dot{m}} \quad (7.5)$$

Sedaj upoštevamo, da je $\hat{V} = 1/\rho$ in da je tekočina nestisljiva (gostota se ne spreminja):

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h + \left(\Delta\hat{U} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}\right) = -\frac{\dot{W}_g}{\dot{m}} \quad (7.6)$$

Če pri pretakanju tekočin ni faznih prehodov, kemijskih reakcij in spremembe temperature tekočine, lahko privzamemo, da je $\Delta\hat{U} \approx 0$ in dobimo:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h + \left(-\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}\right) = -\frac{\dot{W}_g}{\dot{m}} \quad (7.7)$$

Člen $-\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$ predstavlja izgube zaradi trenja in ovir pri pretoku. Zaradi trenja se greje stena cevi in zato je predznak $\dot{Q}$ negativen (prenos toplote iz sistema v okolico). Člen $-\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$ je tako pozitiven in enačbo 7.7 zapišemo kot:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta h + \hat{F} = -\frac{\dot{W}_g}{\dot{m}} \quad (7.8)$$

kjer je Δp razlika v tlaku med dvema točkama, Δv^2 je razlika v kvadratih hitrosti v dveh točkah, Δh je razlika v višini med dvema točkama in $\dot{W}_g$ je moč gredi. S parametrom $\hat{F}$ smo označili izgube na omrežju.

Izgube na omrežju lahko razdelimo na linijske in izgube na specifičnih elementih. Z enačbo jih zapišemo kot:

$$\hat{F} = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} + \sum K_r \frac{v^2}{2} \quad (7.9)$$

kjer prvi člen predstavlja vsoto vseh cevi z različnimi dolžinami, L , premeri, D , in faktorji trenja, f . Drugi člen predstavlja vsoto vseh specifičnih elementov z lastnimi koeficienti upora, K_r .

Faktor trenja, f , je funkcija Reynoldsovega števila $N_{Re} = \frac{\rho v D}{\eta}$ in relativne hrapavosti, $\frac{\varepsilon}{D}$, kjer ε predstavlja hrapavost materiala, iz katerega je zgrajena cev. Faktor trenja zapišemo kot:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (7.10)$$

Enačbo 7.9 lahko rešimo le s pomočjo iteracije. Skozi naslednje 4 primere se boš naučil, kako lahko z uporabo programa Excel rešuješ zahtevnejše primere, ki obravnavajo pretok po ceveh.

7.2 EKSPERIMENTALNI DEL

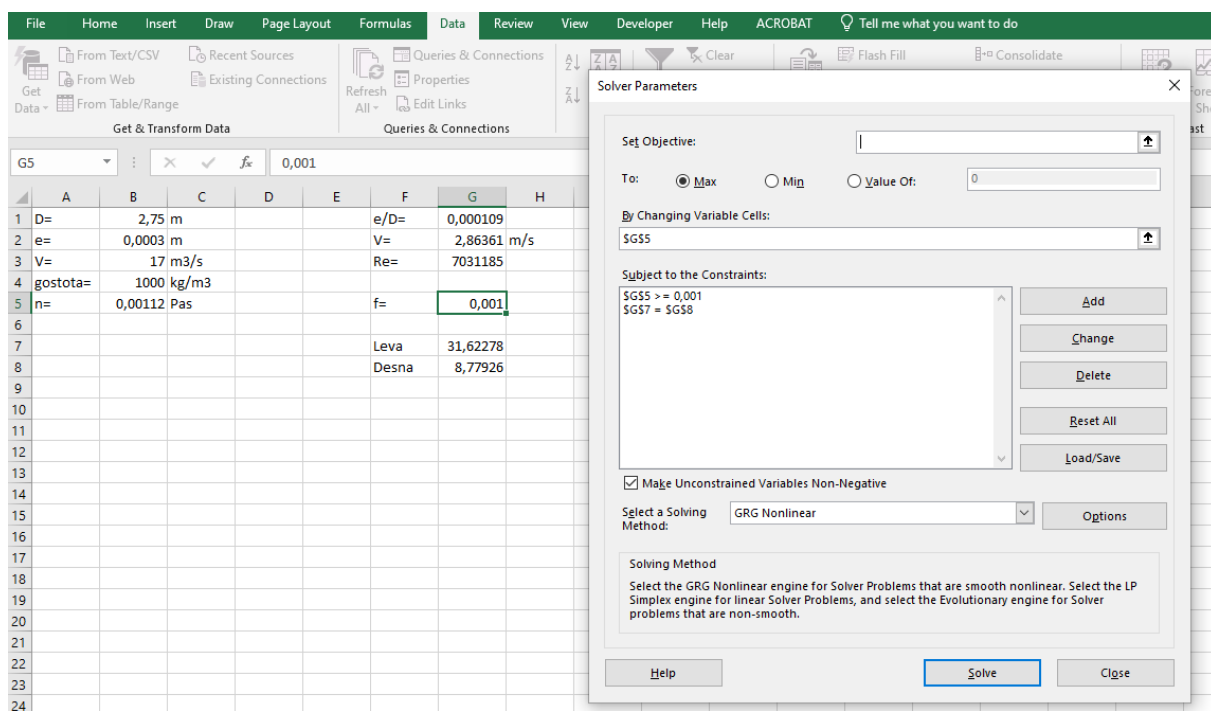
7.2.1 Izračun faktorja trenja

S pomočjo Excela izračunaj faktor trenja za vodo, ki teče s pretokom $17 \text{ m}^3/\text{s}$ skozi betonsko cev s premerom $2,75 \text{ m}$. Hrapavost betona znaša $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Nalogo lahko rešiš s pomočjo Reševalnika (Solver). V delovnem listu izračunaj relativno hrapavost, hitrost pretoka in Reynoldsovo število. Nato ustvari celico, kjer vpišeš približno vrednost za faktor trenja (npr. 0,001). Nato v eni celici izračunaš levo stran enačbe 7.10, v drugi celici pa desno stran enačbe 7.10. Opaziš, da sta rezultata različna, čeprav bi morala biti enaka. Sedaj uporabiš Reševalnik in z njegovo pomočjo izenačiš levo in desno stran enačbe 3. To storiš tako, da v Reševalniku nastaviš za spremenljivko vrednost faktorja trenja in dodaš dve omejitvi (glej sliko 7.1):

1. omejitev je, da je leva stran enačbe 7.10 enaka desni strani
2. omejitev pa je, da je faktor trenja večji ali enak 0,001.

Zaženeš reševalnik, ki izračuna vrednost faktorja trenja.



Slika 7.1: Uporaba Reševalnika za iskanje faktorja trenja s pomočjo iteracije.

7.2.2 Izračun volumskega pretoka

Poišči volumski pretok za vodo, ki teče po vodoravni železni cevi. Dolžina cevi je 300 m, premer znaša 0,6 m, padec tlaka na cevi pa 17,2 kPa. Hrapavost železa znaša $2,6 \cdot 10^{-4}$ m.

Za reševanje tega problema združi enačbi 7.8 in 7.9. Zanemari prispevka kinetične in potencialne energije ter upoštevaj samo izgubo zaradi dolžine cevi. Dobiš enačbo, ki jo bomo imenovali enačba 7.11, z dvema neznankama: hitrostjo pretoka, v in faktorjem trenja, f :

(7.11)

*zapiši izpeljano enačbo 7.11

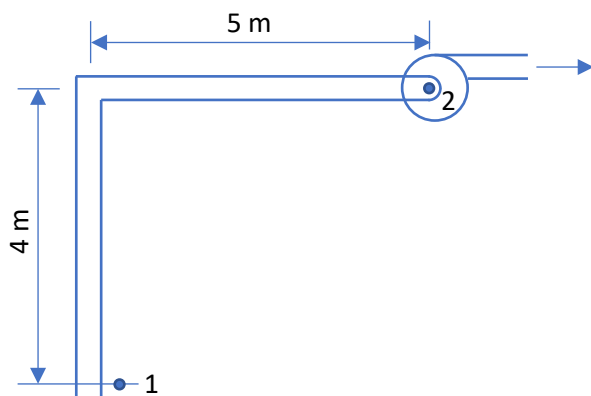
Sedaj si izbereš vrednosti za hitrost pretoka in faktor trenja (npr. $v = 1$ m/s in $f = 0,001$). Podobno kot v prejšnjem primeru izračunaš levo in desno stran enačbe 7.10. Dodatno moraš izračunati levo in desno stran enačbe 7.11. V Reševalniku sedaj definiraš dve spremenljivki (v in f) ter postaviš štiri omejitve:

1. omejitev je, da je leva stran enačbe 7.10 enaka desni strani,
2. omejitev je, da je leva stran enačbe 7.11 enaka desni strani,
3. omejitev je, da je faktor trenja večji ali enak 0,001,
4. omejitev je, da je hitrost pretoka večja ali enaka 0,001.

Zaženeš reševalnik, ki izračuna hitrost pretoka in vrednost faktorja trenja.

7.2.3 Izračun premera cevi

S črpalko želiš črpati vodo po jeklenih ceveh. Shema sistema je prikazana na sliki 7.2. Črpalka ima največji pretok 400 L/min. Poišči najmanjši premer cevi, če tlak na vходу v črpalko ne more biti manjši od 840 Pa. Hrapavost jekla znaša $4,6 \cdot 10^{-5}$ m.



Slika 7.2: Shema sistema cevi s črpalko.

Za reševanje tega problema ponovno združi enačbi 7.8 in 7.9. Prispevkov kinetične in potencialne energije tokrat ne moreš zanemariti, lahko pa privzameš, da je hitrost spreminjanja gladine v točki 1 zanemarljiva v primerjavi s hitrostjo pretoka vode v točki 2. Pri izpeljavi enačbe upoštevaj le izgubo zaradi dolžine cevi. Dobiš enačbo, ki jo bomo imenovali enačba 7.12, z dvema neznankama: premerom cevi, D in faktorjem trenja, f :

(7.12)

*zapiši izpeljano enačbo 7.12

Sedaj si izbereš vrednosti za premer cevi in faktor trenja (npr. $D = 2$ cm in $f = 0,001$). Podobno kot v prejšnjem primeru izračunaš levo in desno stran enačbe 7.10. Dodatno moraš izračunati levo in desno stran enačbe 7.12. V Reševalniku sedaj definiraš dve spremenljivki (D in f) ter postaviš štiri omejitve:

1. omejitev je, da je leva stran enačbe 3 enaka desni strani,
2. omejitev je, da je leva stran enačbe 4 enaka desni strani,
3. omejitev je, da je faktor trenja večji ali enak 0,001,
4. omejitev je, da je premer večji ali enak 0,001.

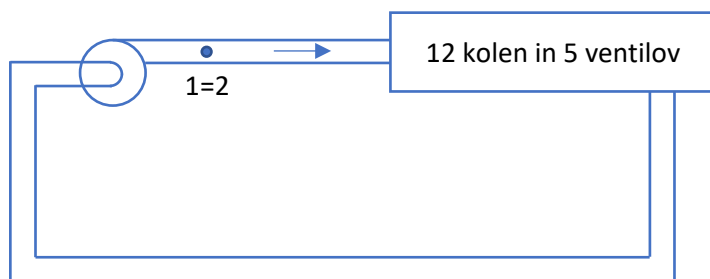
Zaženeš reševalnik, ki izračuna premer cevi in vrednost faktorja trenja.

7.2.4 Načrtovanje sklenjenega sistema

V tovarni morate postaviti sklenjen sistem, kjer bo črpalka poganjala vodo s pretokom 60 l/min po jeklenih ceveh skupne dolžine 150 m. Sistem bo imel 15 kolen s kotom 90° in 5 ventilov. Izračunaj premer cevi in moč črpalke, ki jih boš uporabil, da bo cena vgrajenega sistema čim nižja. Ceno črpalke izračunamo po enačbi: $\text{cena}_{\text{črpalka}} (\text{€}) = 0,29 \cdot P_{\text{črpalka}} + 150$, kjer je $P_{\text{črpalka}}$ moč črpalke v Wattih, ceno cevi pa izračunamo po enačbi: $\text{cena}_{\text{cevi}} (\text{€}) = 300 \cdot L_{\text{cevi}} \cdot D_{\text{cevi}}$, kjer sta L_{cevi} in D_{cevi} dolžina ter premer cevi. Hrapavost jekla znaša $4,6 \cdot 10^{-5}$ m. Lastni koeficienti upora za ventile in kolena pri različnih premerih cevi so zbrani v preglednici 7.1. Shema sistema je prikazana na sliki 7.3.

Preglednica 7.1: Lastni koeficienti upora za ventile in kolena pri različnih premerih cevi.

D /cm	1,3	2	2,5	3,2	3,8	5,1	7,6	10,2	15,2	25,4	40,6	61
Ventil	1,48	1,38	1,27	1,21	1,16	1,05	0,99	0,94	0,83	0,77	0,72	0,66
Koleno	0,81	0,75	0,69	0,66	0,63	0,57	0,54	0,51	0,45	0,42	0,39	0,36



Slika 7.3: Sklenjen sistem črpalke s cevmi, kolena in ventili.

Najprej opišete sistem na sliki 7.3 s pomočjo enačb 7.8 in 7.9. V pomoč imate na sliki označeni točki 1 in 2, ki ju uporabite za poenostavitev združenih enačb 7.8 in 7.9. Dobljeno enačbo bomo poimenovali enačba 7.13 in ima dve neznanki: premer cevi, D in faktor trenja, f :

(7.13)

*zapiši izpeljano enačbo 7.13

Lastne koeficiente upora za ventile in kolena pridobiš iz preglednice 7.1. Sedaj si izbereš vrednosti za premer cevi in faktor trenja ($D = 1$ cm in $f = 0,001$). Podobno kot pri nalogi 7.2.1 izračunaš levo in desno stran enačbe 7.10. V Reševalniku sedaj definiraš spremenljivko f ter postaviš dve omejitvi:

1. omejitev je, da je leva stran enačbe 7.10 enaka desni strani,
2. omejitev je, da je faktor trenja večji ali enak 0,001.

Zaženeš reševalnik, ki izračuna vrednost faktorja trenja in s pomočjo enačbe 7.13 tudi moč črpalke. Sedaj povečaj premer cevi za 0,5 cm in ponovno zaženi reševalnik. Izračunaj potrebno moč črpalke za vse premere cevi od 1 do 5 cm, s korakom po 0,5 cm. Ne pozabi, da se koeficienti upora za ventile in kolena z večanjem premera cevi spreminjajo. Vrednosti koeficientov upora lahko kličeš pomočjo funkcij INDEX in MATCH.

Zapiši tabelo, kjer bodo v prvem stolpcu zapisani premeri cevi, v drugem moč črpalke, v tretjem cena črpalke, v četrtem cena cevi in v petem skupna cena sistema (strošek kolen in ventilov zanemari). Nariši graf, kjer bo na x osi premer cevi, na y osi pa strošek. Na grafu naj bodo prikazane tri funkcije: strošek črpalke v odvisnosti od premera cevi, strošek cevi v odvisnosti od premera cevi in celokupni strošek sistema v odvisnosti od premera cevi. Ugotovi, katera kombinacija črpalke in cevi je najugodnejša.

Vir:

Vaja je prirejena na podlagi besedila »Solution of complex pipe flow problems using spreadsheets in an introductory fluid mechanics course«, katerega avtor je Mark Schumack, Department of Mechanical Engineering, University of Detroit Mercy.

(<https://peer.asee.org/solution-of-complex-pipe-flow-problems-using-spreadsheets-in-an-introductory-fluid-mechanics-course.pdf>)