



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Majda KRAJNC

SINTEZA PROCESOV

zbirka rešenih nalog
zbrano gradivo

Maribor, 2015

Copyright 2015. 1. izdaja 2015

Majda Krajnc, Sinteza procesov, zbirka rešenih nalog

Avtorica: doc. dr. Majda Krajnc

Vrsta publikacije: zbrano gradivo

Založnik: FKKT Univerze v Mariboru

Naklada: On-line

Dostopno na naslovu: <http://www.fkkt.um.si/egradiva/egradiva.php>

in na univerzitetnem učnem okolju Moodle pri predmetu Sinteza procesov.

Gradiva iz publikacije, brez dovoljenja avtorice, ni dovoljeno kopirati, reproducirati, objavljati ali prevajati v druge jezike.



CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

66.02(075.8)(076.2)

KRAJNC, Majda

Sinteza procesov [Elektronski vir] : zbirka rešenih nalog : zbrano gradivo / Majda Krajnc. –
1. izd. - Maribor : Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2015

ISBN 978-961-248-467-5

COBISS.SI-ID [80379393](#)

Predgovor

Zbirka rešenih nalog je nastajala 18 let, vse od časa, ko sem pričela predavati vsebino predmeta Sinteza procesov. Naloge so praktična uporaba teorije, ki je zajeta v zbranem gradivu Sinteza procesov in sem jih z leti dopolnjevala tako vsebinsko kot slikovno.

Leta 2004 mi je bila v veliko pomoč pri izdelavi gradiva študentka Tanja Rakovec, ki je naloge prenesla v elektronsko obliko. V tem letu je bila zbirka posredovana študentom tretjega letnika visoko strokovne smeri pri predmetu Sinteza procesov. Dosegljiva je bila v elektronskem učnem okolju ELEUM in kasneje v Moodle. Uporabljali so jo kot dopolnilo pri študiju in pripravah na pisni del izpita.

V študijskem letu 2013/2014 sem zbirko »modernizirala« in vključila v vsebino, kjer je bilo mogoče, numerične metode, ki jih lahko programiramo ali so dosegljive v MS Excelu. Prav tako so slike novelirane in izdelane s programom Excel. Na ta način sem hotela povezati vsebino predmetov Procesno računanje I in II, ki ju spoznavajo študentje v 1. letnika iste študijske smeri, z vsebino pri predmetu Sinteza procesov, ki je nadgradnja predmetov.

Študentom želim, da bi zbirka omogočila širši vpogled v vsebino predmeta, razširila znanje o načrtovanju kemijskih procesov ter vzbudila kreativno reševanje problemov.

doc. dr. Majda Krajnc

V Mariboru, 2015

Vsebina	stran
PREDGOVOR	
1. TEHNIKA PROCESNIH SISTEMOV	1
2. SINTEZA REAKCIJSKIH POTI	3
1. Naloga: Pridobivanje vinilklorida	3
2. Naloga: Leblancov postopek pridobivanja sode	5
3. Naloga: Proizvodnja fenola	7
4. Naloga: Pridobivanje NaOH	8
3. SNOVNE BILANCE IN RAZPOREJANJE KEMIJSKIH KOMPONENT	11
1. Naloga: Masa in prostornina raztopine	11
2. Naloga: Masa raztopine	12
3. Naloga: Masna bilanca procesa I	13
4. Naloga: Masna bilanca procesa II	14
5. Naloga: Proizvodnja fenola	17
6. Naloga: Separacija trdnih delcev	19
7. Naloga: Pridobivanje K-mila	20
8. Naloga: Pridobivanje fenola	23
4. IZBIRA SEPARACIJSKE NALOGE	27
1. Naloga: Separacijsko zaporedje I	27
2. Naloga: Separacijsko zaporedje II	29
3. Naloga: Separacijsko zaporedje III	31
4. Naloga: Separacijsko zaporedje IV	33
5. Naloga: Separacijsko zaporedje V	35
6. Naloga: Separacijsko zaporedje VI	36
5. KEMIJSKA REAKCIJSKA TEHNIKA	39
1. Naloga: Piroliza etana	39
2. Naloga: Hitrost reakcije	40
3. Naloga: Reakcijski čas	41
4. Naloga: Presnova reakcije	42
5. Naloga: Hitrost reakcije	45
6. Naloga: Enačba proizvodnosti	46

7. Naloga: Prostornina reaktorja	47
8. Naloga: Iztočna koncentracija	49
9. Naloga: Prostornina reaktorja	50
10. Naloga: Prostorninski vtok	52
11. Naloga: Enačba proizvodnosti	53
12. Naloga: Prostorninski vtok	55
6. INTEGRACIJSKA NALOGA	59
1. Naloga: Načrtovanje hladilnika	59
2. Naloga: Reakcijska entalpija	60
3. Naloga: Pridobivanje vodne pare	61
4. Naloga: Ploščina toplotnega prenosnika	62
5. Naloga: Načrtovanje toplotnega prenosnika	63
6. Naloga: Ohlajevanje destilata s propanom	65
7. Naloga: Določanje energetske ciljeve v VSK	66
8. Naloga: Sestavljeni krivulji	68
9. Naloga: Mrežni diagram I	70
10. Naloga: Energetski cilji v VSK	71
11. Naloga: Določanje energetske ciljeve v VSK	74
12. Naloga: Mrežni diagram II	77
7. OVREDNOTENJE INVESTICIJE IN OBRATOVALNIH STROŠKOV	79
1. Naloga: Nakupna cena TP	79
2. Naloga: Cena vgrajenega gorilnika	80

1. Tehnika procesnih sistemov

V tem delu bo prikazanih nekaj strokovnih izrazov, ki se pojavljajo v vsebini posameznih poglavij pri predmetu Sinteza procesov. Ker v Sloveniji ni veliko literature s tega področja, bodo uporabljeni tudi angleški izrazi, ki jih bomo prevedli v slovenščino in nato pojasnili njihov pomen oziroma uporabo. Izrazi so osnova in zgledi za izdelavo »e-strokovnega slovarja«, ki ga izdelujemo v učnem okolju Moodle.

1. Naloga: Tehnika procesnih sistemov

slanica

angl.: brine

Slanica je nasičena vodna raztopina soli npr. NaCl.

sinteza

angl.: synthesis

Spajanje, sestavljanje, združevanje v celoto, nastajanje kemijskih spojin iz prvin ali enostavnih spojin¹.

.
. .
.

2. Naloga: Sinteza reakcijskih poti

alkilacija

angl.: alkylation

Alkilacija je sekundarni postopek čiščenja nafte, s katerim dobimo bencin najvišje kakovosti.

.
. .
.

3. Naloga: Snovne bilance in razporejanje kemijskih komponent

piroliza

angl.: pyrolysis

Postopek razkroja snovi pri višjih temperaturah.

sito

angl.: sieve

Naprava sestavljena iz ogrodja z gosto mrežo.

.
. .
.

¹ Veliki slovar tujk, 2002.

4. Naloga: Izbira separacijske naloge

separacija

angl.: separation

Ločevanje snovi na frakcije.

.
. .
.

5. Naloga: Kemijska reakcijska tehnika

reaktor

angl.: reactor

Procesna naprava v kateri poteka kemijska sprememba snovi.

.
. .
.

6. Naloga: Integracijska naloga

hladilnik

angl.: cooler

Procesna naprava za hlajenje.

cevno-plaščni toplotni prenosnik

angl.: shell-and-tube heat exchanger

Procesna naprava za prenos toplote med dvema fluidoma: toplim in hladnim. Toplota se prenaša skozi stično površino od toplega k hladnemu fluidu.

.
. .
.

7. Naloga: Ovrednotenje investicije in obratovalnih stroškov

obratovalni stroški

angl.: operating costs

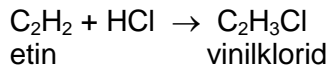
V procesni tehniki so to po navadi stroški porabe pare, hladilne vode, elektrike....

.
. .
.

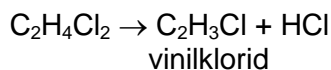
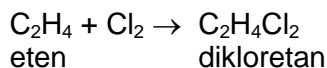
2. Sinteza reakcijskih poti

1. Naloga: Pridobivanje vinilklorida¹

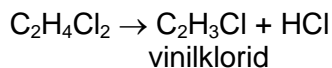
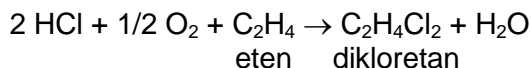
Polivinilklorid (PVC) pridobivamo s polimerizacijo vinilklorida. Vinilklorid lahko proizvedemo po različnih reakcijskih poteh iz etena, etina, klora in/ali HCl. Direktna reakcija je naslednja:



Indirektno lahko vinilklorid pridobimo z naslednjo reakcijsko potjo:



Direktna reakcija je manj zaželena kot indirektna, ker je eten cenejši od etina, manj škodljiv in nevaren. Vendar pa pri indirektni reakciji nastaja HCl, ki ga moramo primerno obdelati. V naslednji reakcijski poti je prikazana reakcija med HCl, kisikom in etenom, pri čemer proizvedemo še dodatni dikloreten.



Edini stranski produkt je voda. Vendar, če ne razpade zadostna količina dikloretena, moramo HCl kupiti. Predstavljene so štiri osnovne reakcije, ki jih lahko kombinirate in tvorite nove reakcijske poti.

Določite:

- reakcijsko pot, po kateri bi proizvedli z neto reakcijo 2 mol vinilklorida, pri čemer bi porabili 2 mol etena, 1 mol Cl₂ in 1/2 mol O₂. Stranski produkt je lahko samo voda.
- reakcijsko pot, po kateri bi proizvedli z neto reakcijo 2 mol vinilklorida pri čemer bi porabili 1 mol etena, 1 mol etina in 1 mol Cl₂. Stranski produkti niso dovoljeni.

Izračunajte ekonomski potencial vsake reakcijske poti in primerjajte ekonomsko učinkovitost! Ekonomski podatki so naslednji:

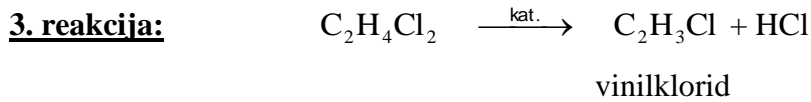
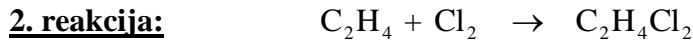
Komponenta	Cena / (USD/kg)
Eten	0,07
Etin	0,44
Klor	0,09
Vodikov klorid	0,9*
Vinilklorid	0,11

* nakupna cena in nima prodajne vrednosti.

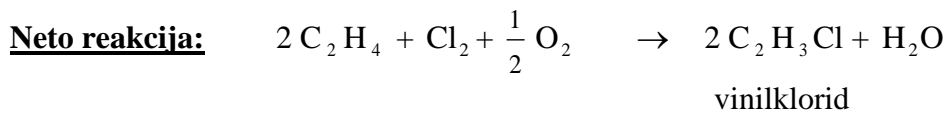
¹ Rudd, D. F., Powers, G. J., Sirola, J. J. Process Synthesis, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.

Potek reševanja:

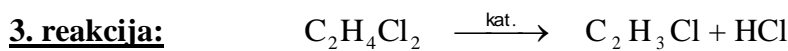
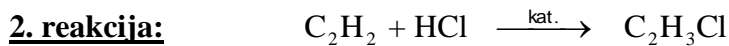
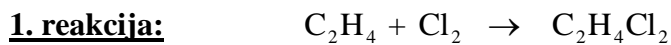
a)



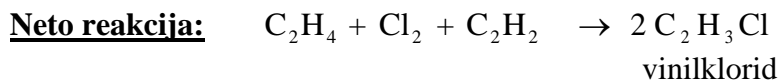
Reakcija	C_2H_4	Cl_2	$C_2H_4Cl_2$	C_2H_3Cl	HCl	O_2	H_2O
1	- 1		1		- 2	- 1/2	1
2	- 1	- 1	1				
3			- 1 /· 2	1 /· 2	1 /· 2		
Neto	- 2	- 1	0	2	0	- 1/2	1



b)



Reakcija	C_2H_4	Cl_2	$C_2H_4Cl_2$	C_2H_2	HCl	C_2H_3Cl
1	- 1	- 1	1			
2				- 1	- 1	1
3			- 1		1	1
Neto	- 1	- 1	0	- 1	0	2



Cene preračunamo na množinsko osnovo:

Komponenta	Cena/(USD/kg)	$M /(\text{kg/kmol})$	Cena/(USD/kmol)
C_2H_4	0,07	28	1,96
C_2H_2	0,44	26	11,44
Cl_2	0,09	71	6,39
HCl*	0,9*	36,5	32,85
C_2H_3Cl	0,11	62,5	6,88

* nakupna vrednost in nima prodajne vrednosti

Izračun ekonomskega potenciala:

a)

$$\begin{aligned}
 EP &= -2 \text{ kmol} \cdot 1,96 \text{ USD/kmol} + (-1 \text{ kmol} \cdot 6,39 \text{ USD/kmol}) + \left(-\frac{1}{2} \text{ kmol} \cdot 0 \text{ USD/kmol}\right) + \\
 &\quad + 2 \text{ kmol} \cdot 6,88 \text{ USD/kmol} + 1 \text{ kmol} \cdot 0 \text{ USD/kmol} = \\
 &= -3,92 - 6,39 + 13,76 = 3,45 \text{ USD/2 kmol vinilklorida} \\
 &= \mathbf{1,725 \text{ USD/ kmol vinilklorida}}
 \end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned}
 EP &= -1 \cdot 1,96 + (-1 \cdot 6,39) + (-1 \cdot 11,44) + 2 \cdot 6,88 = \\
 &= -1,96 - 6,39 - 11,44 + 13,76 = -6,03 \text{ USD/2 kmol } C_2H_3Cl \\
 &= \mathbf{-3,015 \text{ USD/kmol } C_2H_3Cl}
 \end{aligned}$$

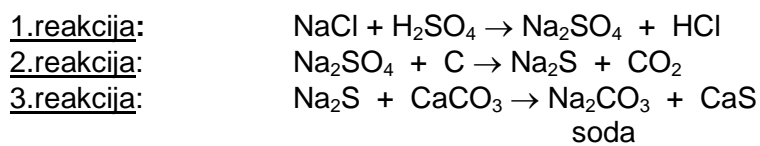
Direktna reakcija:

$$\begin{aligned}
 EP &= -1 \cdot 11,44 + (-1 \cdot 32,85) + 1 \cdot 6,88 = \\
 &= -11,44 - 32,85 + 6,88 = \mathbf{-37,41 \text{ USD/kmol } C_2H_3Cl}
 \end{aligned}$$

Komentar: Izračun EP kaže, da je potencialna reakcijska pot varianta a, saj nam edina da pozitiven rezultat. Varianta b in direktna reakcija sta ekonomsko neprivlačni.

2. Naloga: Leblancov postopek pridobivanja sode¹

Prvi komercialno izveden proces je bil proces pridobivanja sode, ki ga je razvil Leblanc leta 1773. Reakcijska pot, po kateri so pridobili sodo, je bila naslednja:

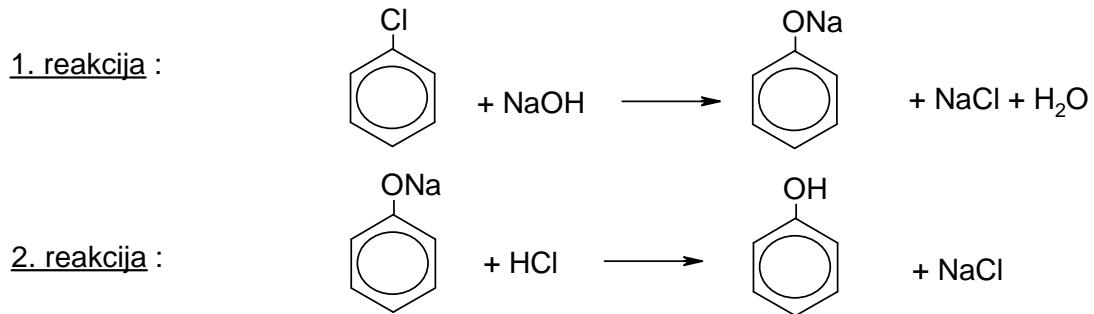


Izvedite proizvodno – porabno analizo in izračunajte ekonomski potencial za 1 t pridobljene sode po omenjenem postopku, če so znani naslednji ekonomski podatki:

Komponenta	Vrednost /(USD/t)
CaS	0
NaCl	14
H ₂ SO ₄	30
Na ₂ SO ₄	24
HCl	110
C	10
CO ₂	0
CaCO ₃	12
Na ₂ CO ₃	16

3. Naloga: Proizvodnja fenola

Izvedite proizvodno – porabno analizo pridobivanja fenola po naslednji reakcijski poti:

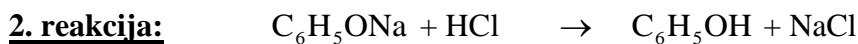
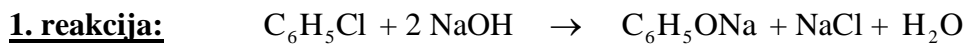


Izračunajte ekonomski potencial za 1 t pridobljenega fenola, če so znani naslednji ekonomski podatki:

Komponenta	Vrednost / (USD/kg)
Klorobenzen	20
NaOH	18
Na-fenoksid	169
NaCl	12
Fenol	25
H ₂ O	0
HCl	11

Potek reševanja:

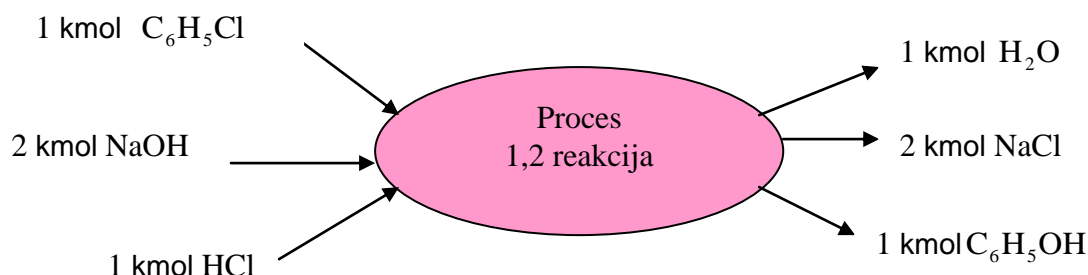
Najprej uredite reakcije:

**Proizvodno – porabna analiza:**

Osnova je 1 kmol snovi.

Reakcija	C ₆ H ₅ Cl	NaOH	C ₆ H ₅ ONa	NaCl	H ₂ O	HCl	C ₆ H ₅ OH
1	- 1	- 2	1	1	1		
2			- 1	1		- 1	1
Neto	- 1	- 2	0	2	1	- 1	1





Cene preračunajte na množinsko osnovo!

Komponenta	M/(kg/kmol)	Cena/(USD/kg)	Cena/(USD/kmol)
C ₆ H ₅ Cl	112,5	20	2250
NaOH	40	18	720
HCl	36,5	11	401,5
C ₆ H ₅ OH	94	25	2350
NaCl	58,5	12	702

Ekonomski potencial:

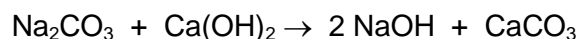
$$EP = \underbrace{(1 \text{ kmol} \cdot 2 \text{ 350 USD/kmol} + 2 \text{ kmol} \cdot 702 \text{ USD/kmol})}_{\text{produkti}} - \underbrace{(1 \cdot 2 \text{ 250} + 2 \cdot 720 + 1 \cdot 401,5)}_{\text{reaktanti}} =$$

$$= 3 \text{ 754} - 4 \text{ 091,5} = - 337,5 \text{ USD/kmol fenola}$$

$$\begin{array}{r}
 - 337,5 \text{ USD} \dots\dots\dots 1 \text{ kmol fenola} \dots\dots\dots 94 \text{ kg fenola} \\
 \quad x \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \quad 1 \text{ 000 kg fenola} \\
 \hline
 x = - 3 \text{ 590 USD/1 t fenola}
 \end{array}$$

4. Naloga: Pridobivanje NaOH

Soda v prahu in gašeno apno reagirata, pri čemer dobimo kaustično sodo (NaOH) in Ca-karbonat. Reakcija je naslednja:



Pri proizvodnji dejansko porabijo in pridobijo naslednje količine komponent:

Na ₂ CO ₃	21200 t/d,
NaOH	16000 t/d,
CaCO ₃	20000 t/d,
Ca(OH) ₂	14800 t/d.

Ali se navedene količine ujemajo s stehiometrijo gornje reakcije? Kakšen je ekonomski potencial procesa na tono proizvedenega NaOH? Na voljo imamo naslednje podatke o cenah surovin in produktov:

Na ₂ CO ₃	40 USD/t,
Ca(OH) ₂	18 USD/t,
NaOH	20 USD/t,
CaCO ₃	18 USD/t.

Potek reševanja:

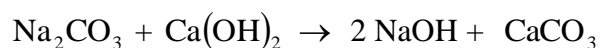
Ceno preračunajte na množino snovi:

Komponenta	Cena/(USD/t)	M/(t/Mmol)	Cena/(USD/Mmol)
Na ₂ CO ₃	40	106	4240
Ca(OH) ₂	18	74	1332
NaOH	20	40	800
CaCO ₃	18	100	1800

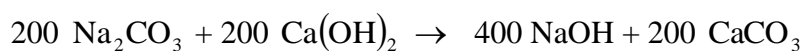
Preračun masnega pretoka snovi v množinski pretok:

$$\begin{aligned}
 21\,200 \text{ t/d} &\Rightarrow \frac{21\,200 \text{ t Mmol}}{\text{d } 106 \text{ t}} \text{ Na}_2\text{CO}_3 = 200 \text{ Mmol/d Na}_2\text{CO}_3 \\
 16\,000 \text{ t/d} &\Rightarrow = 400 \text{ Mmol/d NaOH} \\
 20\,000 \text{ t/d} &\Rightarrow = 200 \text{ Mmol/d CaCO}_3 \\
 14\,800 \text{ t/d} &\Rightarrow = 200 \text{ Mmol/d Ca(OH)}_2
 \end{aligned}$$

Reakcija:



ali



Stehiometrija se ujema s podano količino snovi!

Ekonomski potencial:

$$\begin{aligned} EP &= (400 \text{ Mmol/d} \cdot 800 \text{ USD/Mmol} + 200 \text{ Mmol/d} \cdot 1\,800 \text{ USD/Mmol}) - \\ &\quad - (200 \cdot 4\,240 + 200 \cdot 1\,332) = \\ &= (320\,000 + 360\,000) - (848\,000 + 266\,400) = \\ &= -434\,400 \text{ USD/d za } 400 \text{ Mmol NaOH} \\ &= -1\,086 \text{ USD/d za } 1 \text{ Mmol NaOH} \quad \text{ali } 40 \text{ t} \\ &= -\mathbf{27,15 \text{ USD/d za } 1 \text{ t NaOH}} \end{aligned}$$

3. Snovne bilance in razporejanje kemijskih komponent

1. Naloga: Masa in prostornina raztopine

Koliko kg raztopine dobimo, če zmešamo 1 L etanola in 1 L vode? Koliko litrov raztopine dobimo? Izračunajte masni delež alkohola v raztopini!

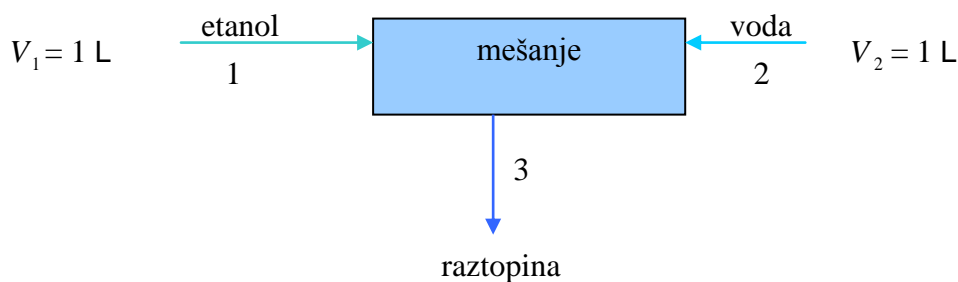
Podatki:

$$\rho_1(\text{etanol, } 20\text{ }^\circ\text{C}) = 0,789\text{ g/cm}^3$$

$$\rho_2(\text{vode, } 20\text{ }^\circ\text{C}) = 0,998\text{ g/cm}^3$$

$$\rho_3(\text{raztopine, } 20\text{ }^\circ\text{C}) = 0,929\text{ g/cm}^3$$

Potek reševanja:



Splošno: $m = \rho \cdot V$, $V = \frac{m}{\rho}$

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1$$

$$m_2 = \rho_2 \cdot V_2$$

$$m_1 = 0,789 \cdot 1000$$

$$m_1 = 789\text{ g}$$

$$m_2 = 998\text{ g}$$

$$m_2 = 0,998 \cdot 1000$$

$$m_3 = m_1 + m_2$$

$$m_3 = 789 + 1000 = \mathbf{1787\text{ g}}$$

$$V_3 = \frac{m_3}{\rho_3}$$

$$V_3 = \frac{1787 \text{ g}}{0,929 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$V_3 = 1924 \text{ cm}^3$$

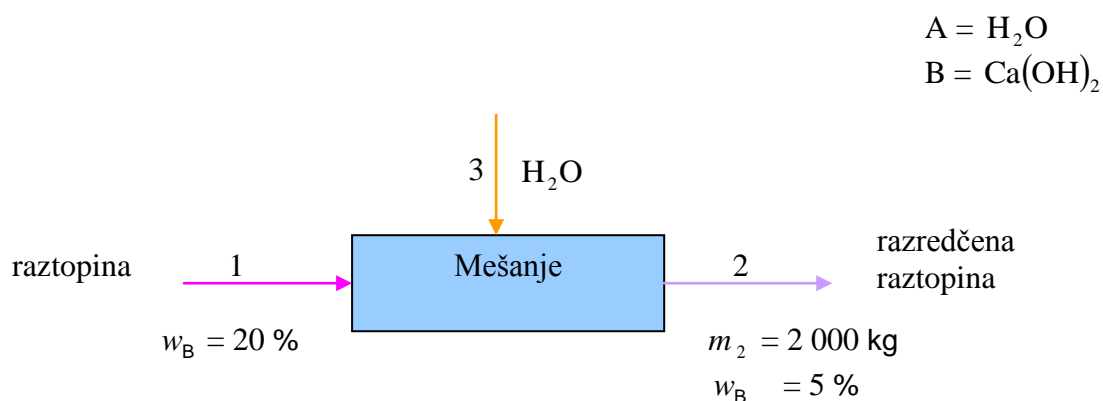
Masni delež alkohola v raztopini :

$$w_3 (\text{alkohol}) = \frac{789}{789 + 998} = 0,441 = 44,1 \%$$

2. Naloga: Masa raztopine

2000 kg raztopine z $w(\text{Ca(OH)}_2) = 5 \%$ pripravimo z razredčenjem raztopine z $w(\text{Ca(OH)}_2) = 20 \%$. Izračunajte, koliko vode moramo dodati k 20 %-ni raztopini, da dobimo želeno količino 5 %-ne raztopine!

Potek reševanja:



Masna bilanca celotnega procesa :

$$m_3 + m_1 = m_2$$

$$\text{komponenta A : } m_1 \cdot 0,8 + m_3 = m_2 \cdot 0,95$$

$$\text{komponenta B : } m_1 \cdot 0,2 + 0 = m_2 \cdot 0,05$$

$$m_1 \cdot 0,8 + m_3 = 2\,000 \cdot 0,95$$

$$m_1 \cdot 0,8 + m_3 = 1\,900$$

$$m_1 \cdot 0,2 = 2\,000 \cdot 0,05$$

$$m_1 \cdot 0,2 = 100$$

$$m_1 = 500 \text{ kg}$$

$$500 \cdot 0,8 + m_3 = 1\,900$$

$$400 + m_3 = 1\,900$$

$$m_3 = \mathbf{1\,500 \text{ kg}}$$

Rezultat :

Vtok : 500 kg raztopine z $w_B = 20\%$ + 1 500 kg H_2O

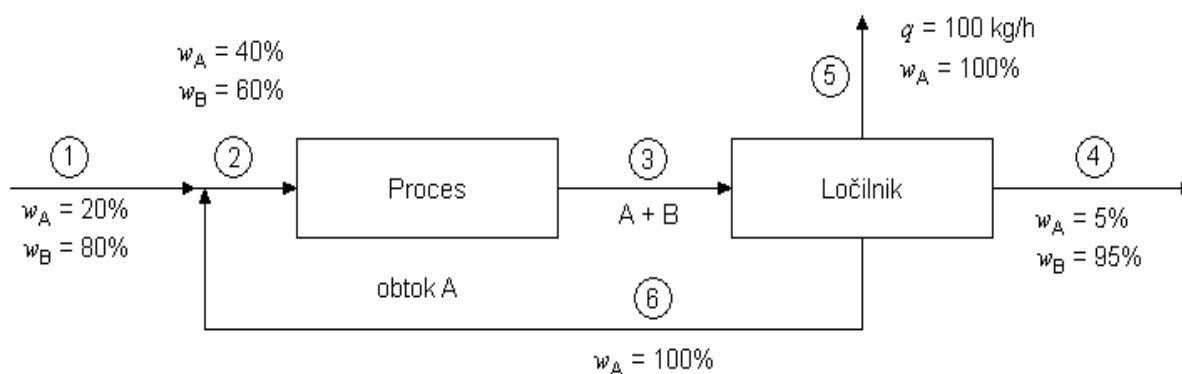
Iztok : 2 000 kg razredčene raztopine z $w_B = 5\%$

$$m_2 = m_3 + m_1$$

$$2\,000 = 1\,500 + 500$$

3. Naloga: Masna bilanca procesa I

Za prikazani proces določite sestavo in količine neznanih tokov. Predpostavimo, da proces obratuje v stacionarnem stanju. Osnova je 100 kg/h produkta A v toku 5. Ostali podatki so prikazani na sliki.



Potek reševanja:**Masna bilanca celotnega procesa:** $q_{m,1} = q_{m,5} + q_{m,4}$ komponenta A : $q_{m,1} \cdot 0,2 = q_{m,5} \cdot 1 + q_{m,4} \cdot 0,05$ komponenta B : $q_{m,1} \cdot 0,8 = q_{m,4} \cdot 0,95$

$$0,2 \cdot q_{m,5} + 0,2 \cdot q_{m,4} = q_{m,5} + 0,05 \cdot q_{m,4}$$

$$0,2 \cdot q_{m,4} - 0,05 \cdot q_{m,4} = q_{m,5} - 0,2 \cdot q_{m,5}$$

$$0,15 \cdot q_{m,4} = 0,8 \cdot q_{m,5}$$

$$q_{m,4} = \frac{0,8 \cdot q_{m,5}}{0,15}$$

Ker je $q_{m,5} = 100 \text{ kg/h}$:

$$q_{m,4} = 533 \text{ kg/h}$$

$$q_{m,1} = q_{m,5} + q_{m,4} = 100 + 533 = 633 \text{ kg/h}$$

Točka mešanja:

$$q_{m,2} = q_{m,1} + q_{m,6}$$

komponenta A : $q_{m,1} \cdot 0,2 + q_{m,6} \cdot 1 = q_{m,2} \cdot 0,4$ komponenta B : $q_{m,1} \cdot 0,8 = q_{m,2} \cdot 0,6$

$$0,2 \cdot q_{m,1} + q_{m,6} = 0,4 \cdot q_{m,1} + 0,4 \cdot q_{m,6}$$

$$q_{m,6} - 0,4 \cdot q_{m,6} = 0,4 \cdot q_{m,1} - 0,2 \cdot q_{m,1}$$

$$0,6 \cdot q_{m,6} = 0,2 \cdot q_{m,1}$$

$$q_{m,6} = \frac{0,2 \cdot q_{m,1}}{0,6} = 211 \text{ kg} \quad \text{ker je } q_{m,1} = 633 \text{ kg/h.}$$

$$q_{m,2} = 633 + 211 = 844 \text{ kg/h}$$

Ločilnik:

$$q_{m,3} = q_{m,4} + q_{m,5} + q_{m,6}$$

$$q_{m,3} = 533 + 100 + 211 = 844 \text{ kg/h}$$

Sestava toka 3 je enaka sestavi toka 2! Prav tako velja:

$$q_{m,2} = q_{m,3}$$

$$\text{komponenta A : } q_{m,2} \cdot 0,4 = q_{m,3} \cdot w_{3,A}$$

$$\text{komponenta B : } q_{m,2} \cdot 0,6 = q_{m,3} \cdot w_{3,B}$$

$$w_{3,A} = \frac{0,4 \cdot q_{m,2}}{q_{m,3}} = \frac{0,4 \cdot q_{m,2}}{q_{m,2}} = \mathbf{0,4}$$

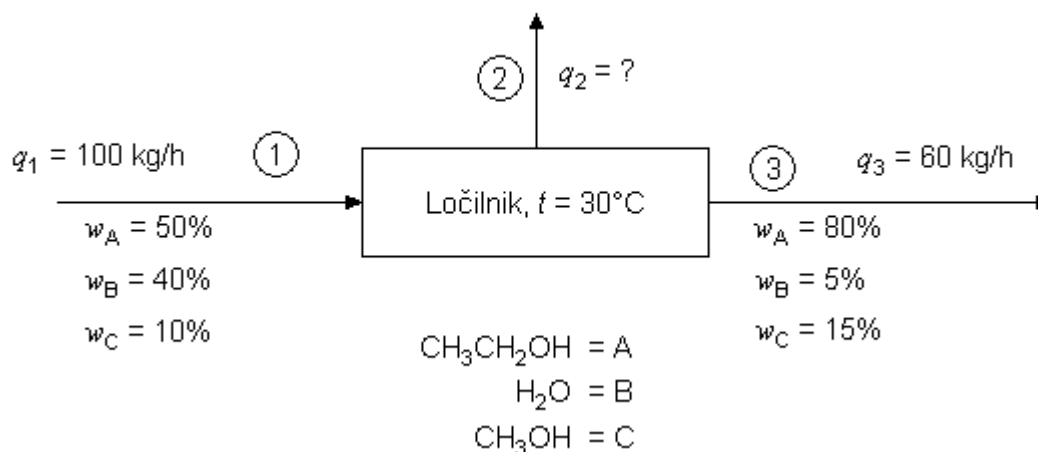
$$w_{3,B} = \frac{0,6 \cdot q_{m,2}}{q_{m,3}} = \frac{0,6 \cdot q_{m,2}}{q_{m,2}} = \mathbf{0,6}$$

4. Naloga: Masna bilanca procesa II

Na sliki je prikazan proces s trikomponentnim sistemom. Vsi tokovi so v tekoči fazi. Predpostavimo, da proces obratuje kontinuirano v stacionarnem stanju.

Rešite masno bilanco procesa pri čemer pomeni:

- določite masni pretok 2,
- določite masne deleže, w_i , vsake komponente v toku 2 in
- določite masne pretoke posameznih komponent v tokovih 2 in 3!



Potek reševanja:Celokupna masna bilanca :

$$q_{m,1} = q_{m,2} + q_{m,3} \rightarrow q_{m,2} = q_{m,1} - q_{m,3}$$

$$q_{m,2} = 100 - 60 = 40 \text{ kg/h}$$

komponenta A : $q_{m,1} \cdot w_{1A} = q_{m,2} \cdot w_{2A} + q_{m,3} \cdot w_{3A}$

komponenta B : $q_{m,1} \cdot w_{1B} = q_{m,2} \cdot w_{2B} + q_{m,3} \cdot w_{3B}$

komponenta C : $q_{m,1} \cdot w_{1C} = q_{m,2} \cdot w_{2C} + q_{m,3} \cdot w_{3C}$

$$100 \cdot 0,5 = 40 \cdot w_{2A} + 60 \cdot 0,8 \Rightarrow w_{2A} = \frac{50 - 48}{40} = \mathbf{0,05}$$

$$100 \cdot 0,4 = 40 \cdot w_{2B} + 60 \cdot 0,05 \Rightarrow w_{2B} = \frac{40 - 3}{40} = \mathbf{0,925}$$

$$100 \cdot 0,1 = 40 \cdot w_{2C} + 60 \cdot 0,15 \Rightarrow w_{2C} = \frac{10 - 9}{40} = \mathbf{0,025}$$

Masni pretoki komponent v tokovih 3 in 2 :

Tok 3 :

$q_{m,3A} = q_{m,3} \cdot w_{3A} = 60 \text{ kg/h} \cdot 0,8 = \mathbf{48 \text{ kg/h}}$

$q_{m,3B} = q_{m,3} \cdot w_{3B} = 60 \cdot 0,05 = \mathbf{3 \text{ kg/h}}$

$q_{m,3C} = q_{m,3} \cdot w_{3C} = 60 \cdot 0,15 = \mathbf{9 \text{ kg/h}}$

$$\underline{\sum 60 \text{ kg/h}}$$

Tok 2 :

$q_{m,2A} = q_{m,2} \cdot w_{2A} = 40 \cdot 0,05 = \mathbf{2 \text{ kg/h}}$

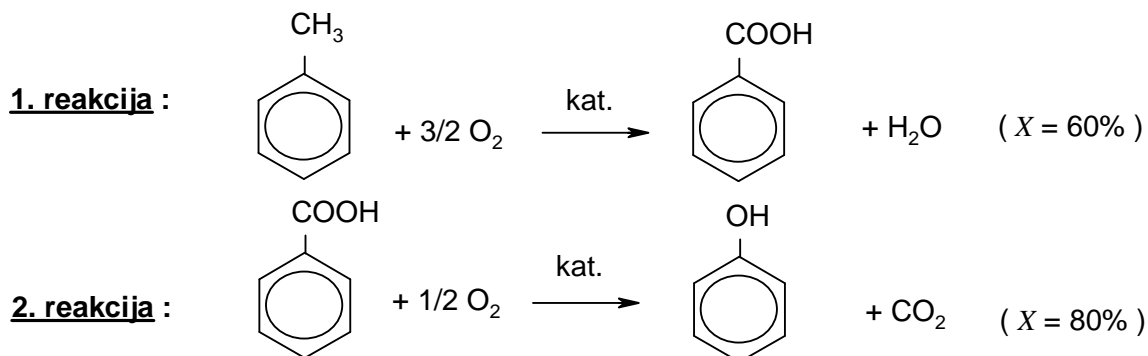
$q_{m,2B} = q_{m,2} \cdot w_{2B} = 40 \cdot 0,925 = \mathbf{37 \text{ kg/h}}$

$q_{m,2C} = q_{m,2} \cdot w_{2C} = 40 \cdot 0,025 = \mathbf{1 \text{ kg/h}}$

$$\underline{\sum 40 \text{ kg/h}}$$

5. Naloga: Proizvodnja fenola

Fenol proizvajajo iz toluena, v prisotnosti katalizatorja, s parcialno oksidacijo. Benzojeva kislina, ki pri tem nastane kot vmesni produkt, v prisotnosti katalizatorja naprej oksidira v fenol in ogljikov dioksid. Reakciji potekata v plinski fazi in sta naslednji:



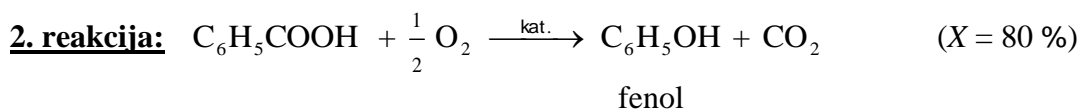
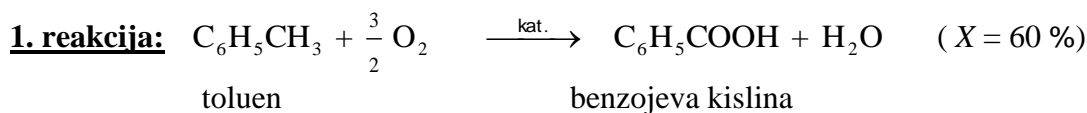
Pomembni podatki:

- a) V prvi reaktor lahko vtekata samo toluen in kisik.
 b) V drugi reaktor lahko vtekata samo benzojeva kislina in kisik.

Določite možno razporeditev kemijskih komponent! Predpostavite, da želite proizvesti 100 mol čistega fenola (npr. vsako uro) in da vračamo vse nezreagirane reaktante v obtok! Preverite, ali se končni rezultat ujema s proizvodno – porabno analizo!

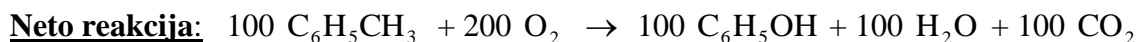
Potek reševanja:

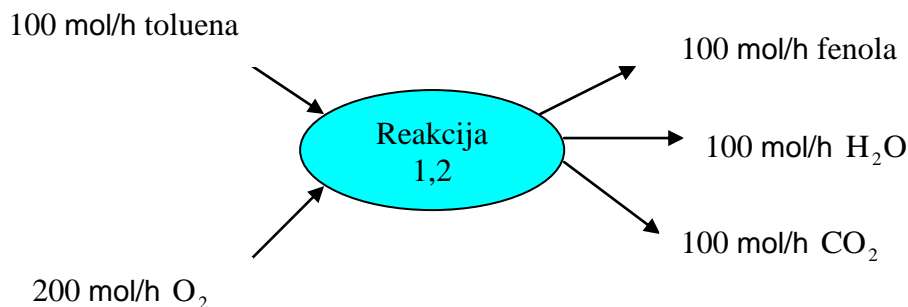
Reakcijska pot pridobivanja fenola:

**Proizvodno – porabna analiza:**

Osnova je 100 mol/h fenola.

Reakcija	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	O_2	benz. k.	H_2O	fenol	CO_2	Nezreagirani reaktanti		
							O_2	benz. k.	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$
1	-166	-250	100	100			100		66
2		-62,5	-125		100	100	12,5	25	
Obtok	66	112,5	25	0	0	0	-112,5	-25	-66
Neto	-100	-200	0	100	100	100	0	0	0



**Osrednji problem :**

2. reaktor: za 100 mol/h fenola in 100 mol/h CO_2 potrebujemo $\frac{100}{0,8} = 125$ mol/h benzojeve

kislina in $\frac{50}{0,8} = 62,5$ mol/h O_2 .

1. reaktor: za 100 mol/h benzojeve kisline in 100 mol/h H_2O potrebujemo $\frac{100}{0,6} = 166$ mol/h

toluena in $\frac{150}{0,6} = 250$ mol/h O_2 .

Sveži vtok v 1. reaktor:

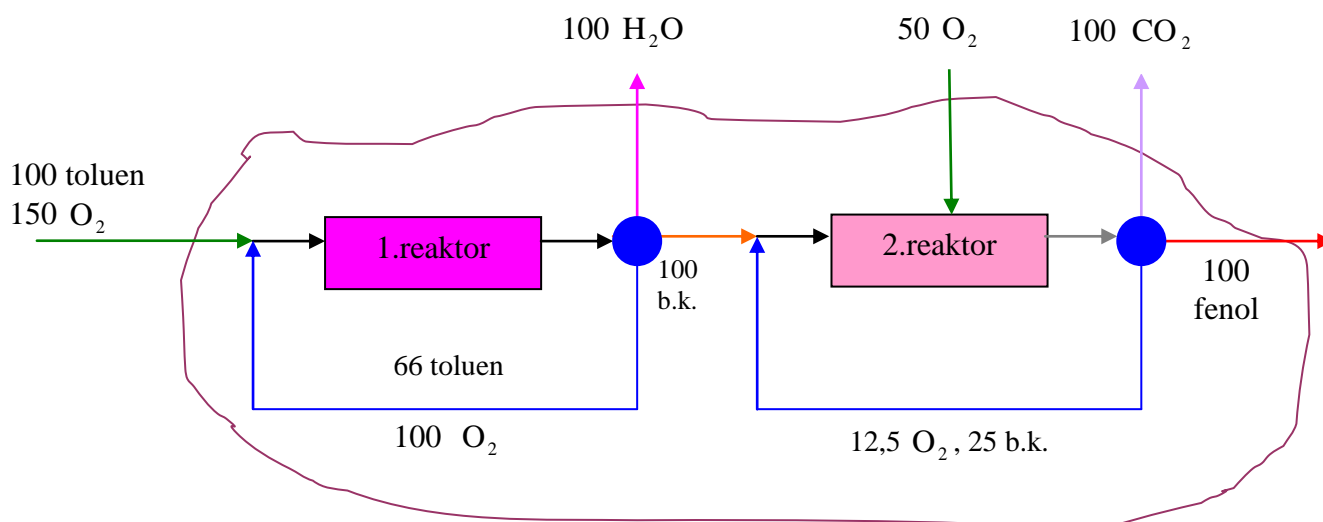
100 mol/h toluena
200 mol/h O_2

Iztok iz 1. reaktorja:

100 mol/h benz. k.	→	100 mol/h benz. k. (v 2. reaktor)
100 mol/h H_2O	→	100 mol/h H_2O (iztok, stranski produkt)
66 mol/h toluena	→	66 mol/h toluen (obtok v 1. reaktor)
100 mol/h O_2	→	100 mol/h O_2 (obtok v 1. reaktor)

Iztok iz 2. reaktorja:

100 mol/h fenola	→	100 mol/h fenola (iztok, želeni produkt)
100 mol/h CO_2	→	100 mol/h CO_2 (iztok, odpadni produkt)
25 mol/h benz.k.	→	25 mol/h benz. k. (obtok v 2. reaktor)
12,5 mol/h O_2	→	12,5 mol/h O_2 (obtok v 2. reaktor)

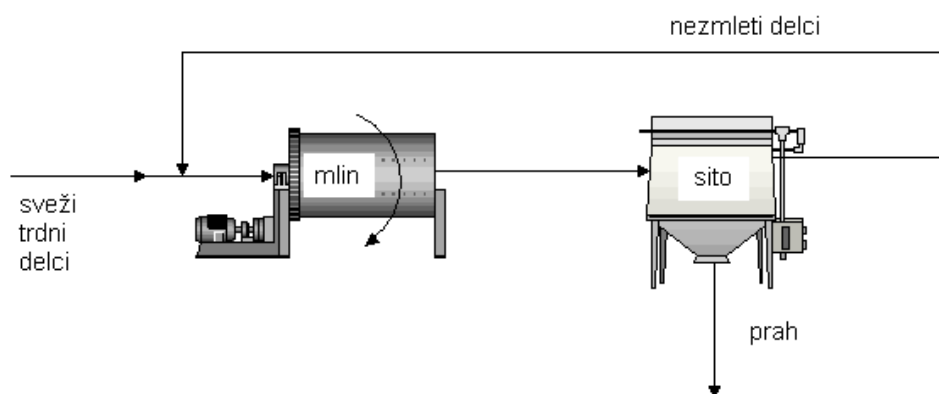


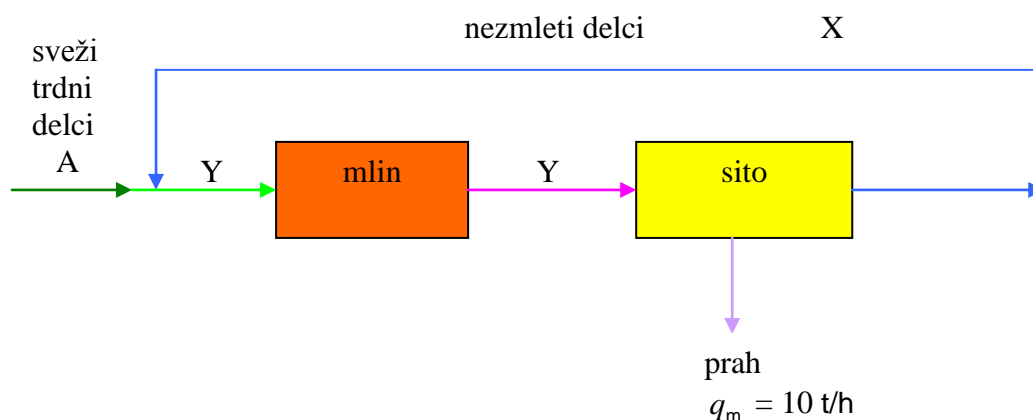
b.k. – benzojeva kislina

6. Naloga: Separacija trdnih delcev

Majhne delce trdne snovi bi radi zdrobili v prah v krogličnem mlinu. Kroglični mlin je naprava v obliki cilindra, nameščena v ležečem položaju in rotira. Delno je napolnjen s kovinskimi oziroma keramičnimi kroglicami, ki meljejo in drobijo trdne delce v prah. Delce doziramo na eni strani, na drugi strani izteka prah in nezdobljeni delci.

S testom smo ugotovili, da je 70 % delcev, pri enem prehodu skozi mlin, nezadovoljivo zmletih. Zato na iztoku namestimo sito, s katerim ločimo prah od nezmljetih delcev, ki jih vračamo nazaj v mlin. Določite kapaciteto mlina v t/h, če na uro presejemo 10 t prahu! Koliko svežih trdnih delcev dovajamo v sistem? Upoštevajte zakon o ohranitvi mase.



Potek reševanja:

$$Y = X + 10 \text{ t/h} \quad Y = A + X$$

$$X = 0,7 \cdot Y$$

$$Y = 0,7 \cdot Y + 10$$

$$0,3 \cdot Y = 10$$

$$Y = \frac{10}{0,3} = 33,3 \text{ t/h} \Rightarrow \text{vtok v mlin}$$

$$X = 0,7 \cdot 33,3 = 23,3 \text{ t/h} \Rightarrow \text{obtok nezmlelih delcev}$$

$$A = Y - X = 33,3 - 23,3 = 10 \text{ t/h} \Rightarrow \text{vtok svežih trdnih delcev}$$

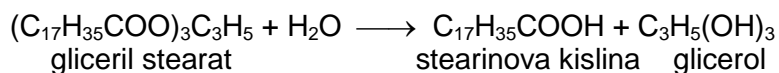
Celokupna snovna bilanca:

$$\text{vtok svežih trdnih delcev} = \text{iztok prahu}$$

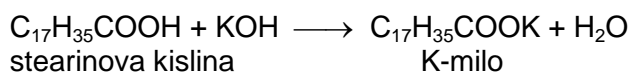
$$10 \text{ t/h} = 10 \text{ t/h}$$

7. Naloga: Pridobivanje K- mila

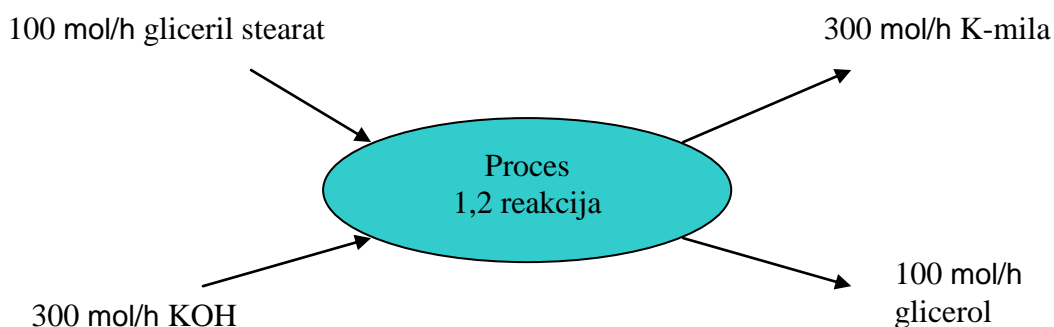
K-milo lahko pridobivamo kontinuirano po naslednji reakcijski poti:

1. reakcija:

(X = 90 %)

2. reakcija:

(X = 100 %)

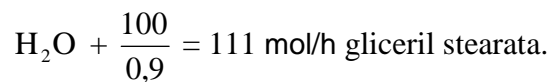


Osrednji problem:

Predpostavimo, da želimo proizvesti 300 mol/h K-mila.

2. reaktor: za 300 mol/h K- mila + 300 mol/h H₂O potrebujemo 300 mol/h stearinove k. + 300 mol/h KOH.

1. reaktor: za 300 mol/h stearinove k. + 100 mol/h glicerola potrebujemo $\frac{300}{0,9} = 333$ mol/h



Sveži vtok:

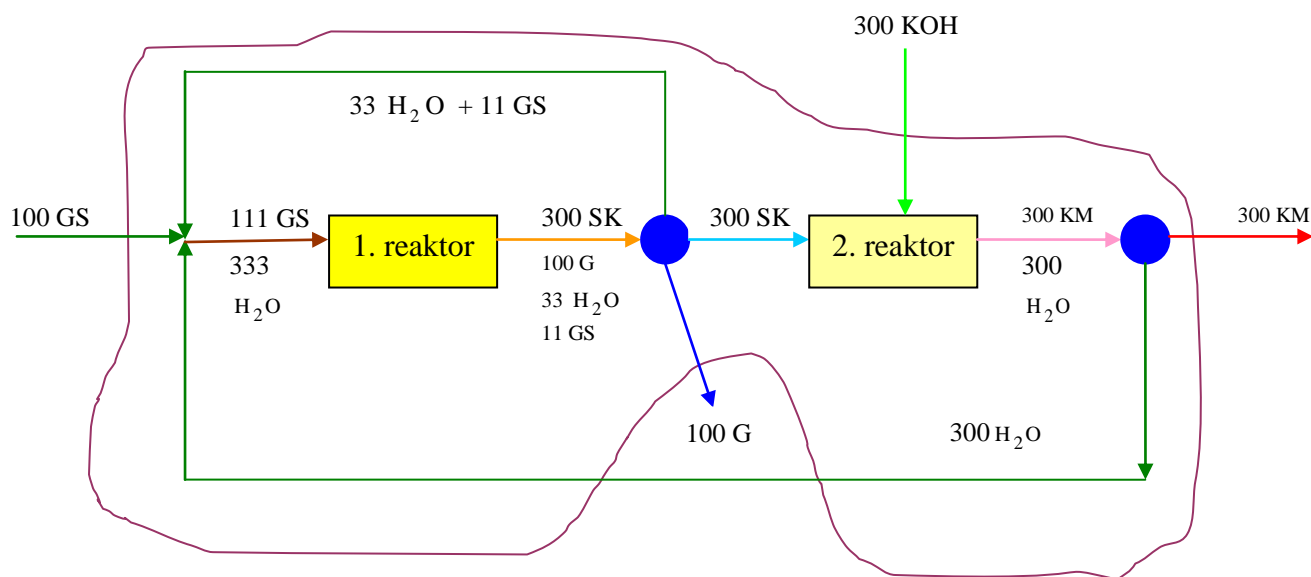
100 mol/h gliceril stearata
300 mol/h KOH

Iztok iz 1. reaktorja:

300 mol/h stearinove k.	→	300 mol/h stearinove kisline (v 2. reaktor)
100 mol/h glicerola	→	100 mol/h glicerola (iztok, stranski produkt)
33 mol/h H ₂ O	→	33 mol/h H ₂ O
11 mol/h gliceril stearata	→	11 mol/h gliceril stearata (oba v obtok v 1. reaktor)

Iztok iz 2. reaktora:

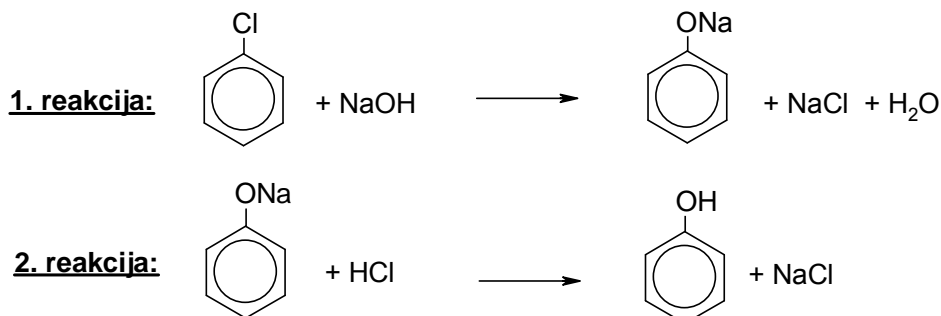
300 mol/h K- mila	→	300 mol/h K- mila (iztok, produkt)
300 mol/h H ₂ O	→	300 mol/h H ₂ O (obtok v 1. reaktor)



GS – gliceril sterat, SK – stearinova kislina, G – glicerol, KM – K-milo

8. Naloga: Pridobivanje fenola

Fenol lahko pridobivamo tudi po naslednji reakcijski poti:



Določite možno razporeditev kemijskih komponent! Predpostavite, da želite proizvesti 100 mol čistega fenola na uro. Preverite, če se končni rezultat ujema s proizvodno – porabno analizo!

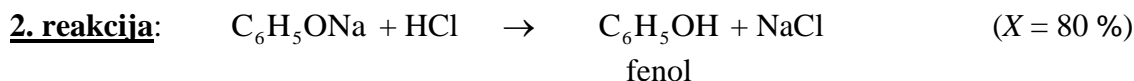
Pomembni podatki:

- v prvi reaktor lahko vtekata samo klorbenzen in NaOH ($X = 70\%$),
- v drugi reaktor lahko vtekata samo Na-fenoksid in HCl ($X = 80\%$).

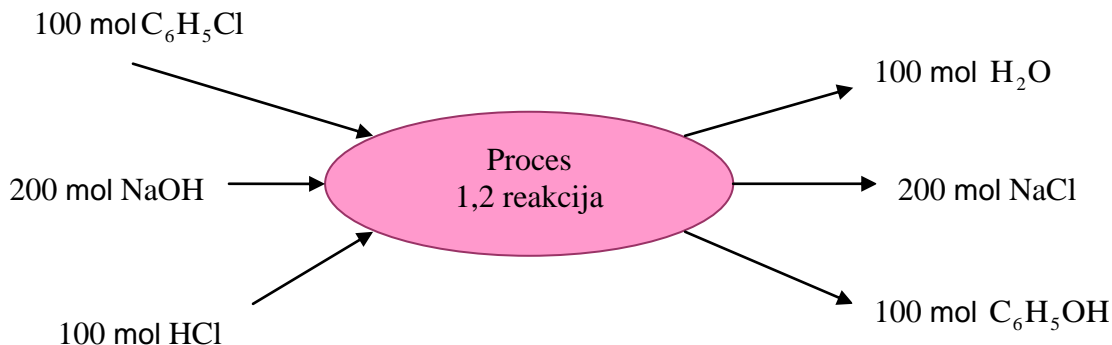
Predpostavimo, da vse nezreagirane reaktante obtakamo.

Potek reševanja:

Reakcijska pot pridobivanja fenola:

**Proizvodno – porabna analiza:**

Reakcija	kloro benz.	NaOH	Na-fenok.	NaCl	H ₂ O	HCl	fenol	nezreagirani reaktanti			
								Na-fenok.	HCl	Kloro benz.	NaOH
1	- 143	- 286	100	100	100					43	86
2			- 125	100		- 125	100	25	25		
Obtok	43	86	25	0	0	25	0	- 25	- 25	- 43	- 86
Neto	- 100	- 200	0	200	100	- 100	100	0	0	0	0



Ker gre za proces, ki obratuje v stacionarnem stanju, so množine dejansko množinski pretoki!

Osrednji problem:

1. reaktor: za $100 \text{ mol } C_6H_5ONa + 100 \text{ mol } NaCl + 100 \text{ mol } H_2O$ mora vtekati $\frac{100}{0,7} = 143$

$$\text{mol } C_6H_5Cl + \frac{200}{0,7} = 286 \text{ mol } NaOH.$$

2. reaktor: za 100 mol C_6H_5OH + 100 mol NaCl mora vtekati v drugi reaktor $\frac{100}{0,8} = 125$

$$\text{mol } C_6H_5ONa + \frac{100}{0,8} = 125 \text{ mol HCl.}$$

Vtok svežih surovin:

100 mol klorobenzena (v 1. reaktor)
 200 mol NaOH (v 1. reaktor)
 100 mol HCl (v 2. reaktor)

Vtok v 1. reaktor:

143 mol klorobenzena
 286 mol NaOH

Iztok iz 1. reaktorja:

100 mol Na - fenoksid → 100 mol Na-fenoksid (v 2. reaktor)
 100 mol NaCl → 100 mol NaCl (iztok, stranski produkt)
 100 mol H_2O → 100 mol H_2O (iztok, stranski produkt)
 43 mol klorobenz. → 43 mol klorobenz.
 86 mol HCl → 86 mol NaOH (oba v obtok v 1. reaktor)

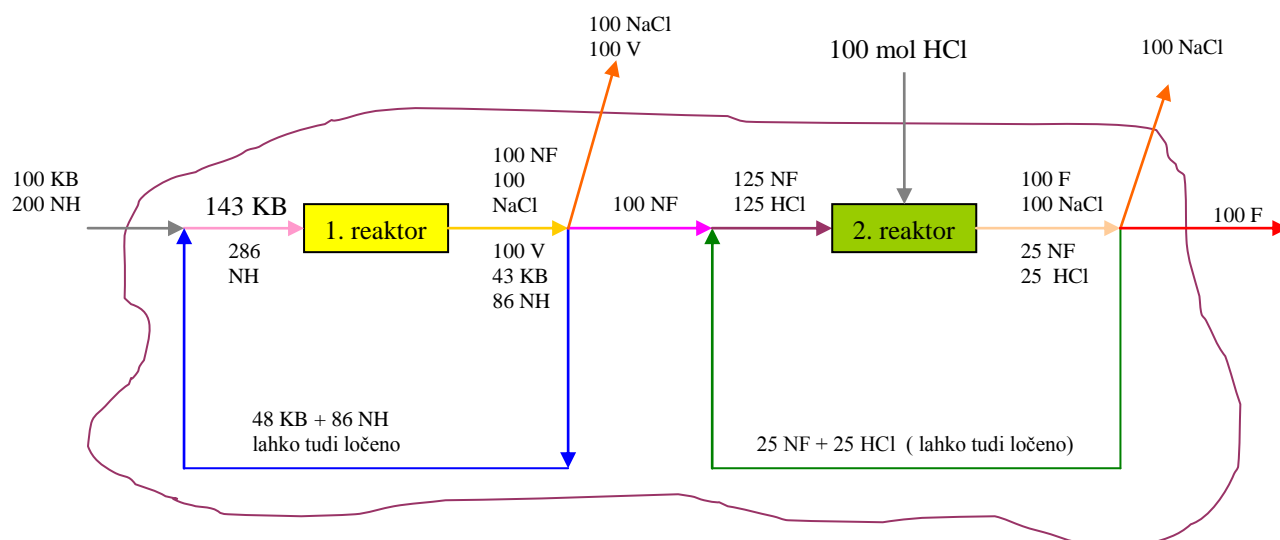
Vtok v 2. reaktor:

125 mol Na – fenoksid
 125 mol HCl

Iztok iz 2. reaktorja:

100 mol fenola → 100 mol fenola (iztok, produkt)
 100 mol NaCl → 100 mol NaCl (iztok, stranski produkt)
 25 mol Na- fenoksid → 25 mol Na-fenoksid
 25 mol HCl → 25 mol HCl (oba v obtok v 2. reaktor)

Prikaz možne razporeditve:



KB – klorobenzen, NF – Na-fenoksid, F – fenol, NH – NaOH, V- Voda
 Možnih razporeditev je seveda lahko več!

4. Izbira separacijske naloge

1. Naloga: Separacijsko zaporedje I

Določite optimalno separacijsko zaporedje sistema 5 komponent z naslednjimi lastnostmi:

Št. komp.	Komponenta	w/%	$t_v / ^\circ\text{C}$
1	C ₃ (propan)	5	- 42,2
2	i-C ₄ (i-butan)	15	- 10
3	C ₄ (butan)	25	- 0,6
4	i-C ₅ (i-pentan)	20	27,95
5	C ₅ (pentan)	35	36,3

Celotni pretok $q_m = 2000 \text{ kg/h}$. Pridobiti želimo čiste komponente. Pri načrtovanju upoštevajte ustrezna hevristična pravila! Za vsako zaporedje izračunajte celotno težavnost! Komentirajte rezultat!

Potek reševanja:

Komponente razvrstimo po rastočih vreliščih in izračunamo pretok posamezne komponente:

Št. komponente	Komponenta	$t_v / ^\circ\text{C}$	$q_m / (\text{kg/h})$
1	propan	- 42,2	100
2	i - butan	- 10,0	300
3	butan	- 0,6	500
4	i - pentan	27,95	400
5	pentan	36,3	700

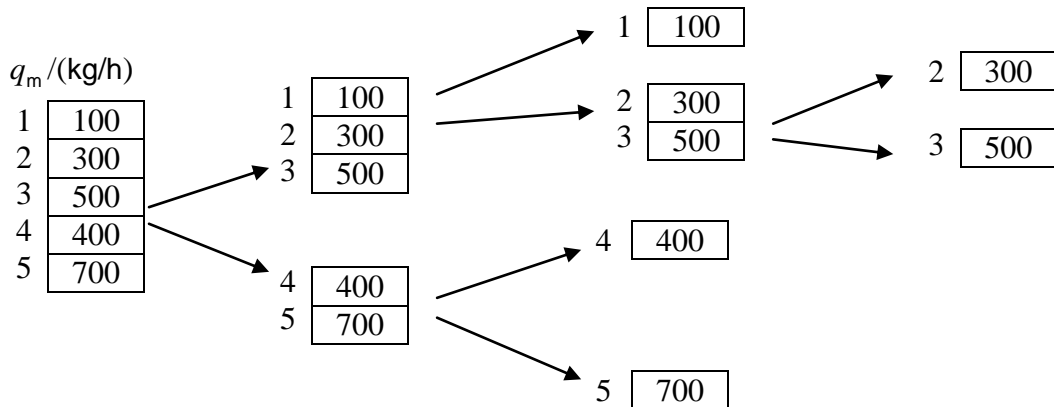
$$\sum 2000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Seznam lastnosti:

$t_v / ^\circ\text{C}$			
1	- 42,2		
-----		$\Delta_{12} = 32,2$	Potrebni bodo 4. separatorji!
2	- 10		
-----		$\Delta_{23} = 9,4$	← težavna separacija
3	- 0,6		
-----		$\Delta_{34} = 28,55$	
4	27,95		
-----		$\Delta_{45} = 8,35$	← težavna separacija
5	36,3		

1.varianta:

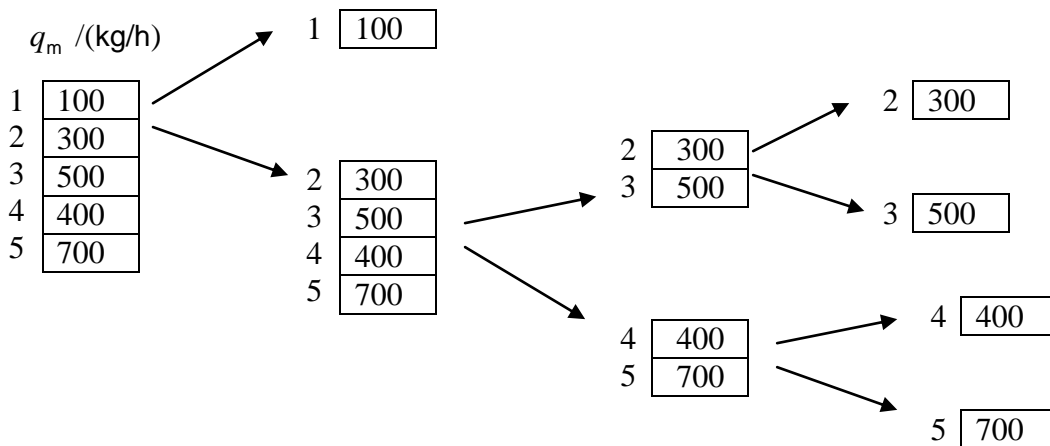
HP: težavno separacijo izvedemo na koncu!



$$\begin{aligned}
 \text{Celotna težavnost} &= \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{34}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} + \\
 &+ \frac{q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{45}} \\
 &= \frac{2000}{28,55} + \frac{900}{32,2} + \frac{800}{9,4} + \frac{1100}{8,35} = \mathbf{314,8}
 \end{aligned}$$

2. varianta:

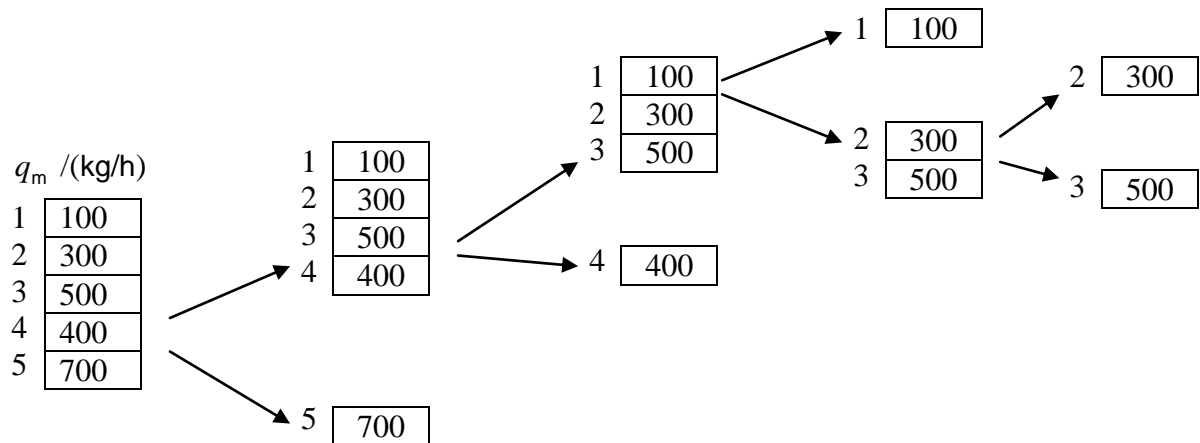
HP: komponente z nizkim vreliščem odstranimo čimprej!



$$\begin{aligned}
 \text{Celotna težavnost} &= \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{34}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} + \\
 &+ \frac{q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{45}} = \\
 &= \frac{2000}{32,2} + \frac{1900}{28,55} + \frac{800}{9,4} + \frac{1100}{8,35} = 62,1 + 66,5 + 85,1 + 131,7 = \mathbf{345,4}
 \end{aligned}$$

3. varianta:

HP: najobilnejšo komponento odstranimo najprej!



$$\text{Celotna težavnost} = \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4} + q_{m,5}}{\Delta_{45}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{34}} +$$

$$\frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} =$$

$$= \frac{2000}{8,35} + \frac{1300}{28,55} + \frac{900}{32,2} + \frac{800}{9,4} = 239,5 + 45,5 + 27,9 + 85,1 = \mathbf{398}$$

Rezultat:

Vidimo lahko, da dobimo najugodnejši rezultat, če izvedemo težavno separacijo na koncu, vendar pa nam lahko prisotnost komponente z nizkim vreliščem povzroča visoke stroške (uporaba dragih hladiv).

2. Naloga: Separacijsko zaporedje II

Kakšno separacijsko zaporedje priporočate za trikomponentni sistem dimetil eter, metanol in vodo, če so lastnosti in vsebnosti komponent naslednje:

Komp.	$t_v / ^\circ\text{C}$	$x/\%$	$M/(\text{g/mol})$
Dimetil eter	-23,7	40	46,07
Metanol	64,7	20	32,04
Voda	100	40	18,0

Celokupni pretok $q_m = 288 \text{ kg/h}$. Pri načrtovanju upoštevajte hevristična pravila!

Potek reševanja:Izračune vršimo na masni osnovi, zato preračunamo $x = \% \text{ v } w = \%.$

Št. komponente	Komponenta	$t_v / ^\circ\text{C}$	$x / \%$	$w / \%$	$q_m / (\text{kg/h})$	$M / (\text{g/mol})$
1	DME	-23,7	40	57,5	165	46,07
2	MeOH	64,7	20	20	58	32,04
3	H ₂ O	100	40	22,5	65	18,0

$$q_m = 288 \text{ kg/h}$$

$$w_i = \frac{x_i \cdot M_i}{\sum x_i \cdot M_i}$$

$$\sum x_i \cdot M_i = \bar{M} = 0,4 \cdot 46,07 + 0,2 \cdot 32,04 + 0,4 \cdot 18 = 32,036 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$q_n = \frac{q_m}{M} = \frac{288 \text{ kg} \cdot \text{kmol}}{\text{h} \cdot 32,036 \text{ kg}} = 9 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

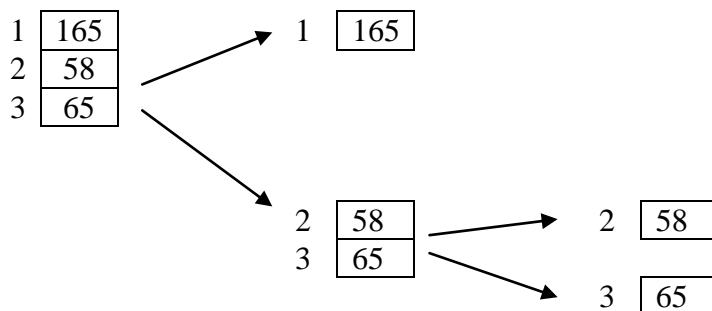
V našem primeru lahko hkrati veljata naslednji hevristični pravili:

- najhlapnejšo komponento odstranimo najprej, tj. DME in
- najobilnejšo komponento odstranimo najprej, tj. DME.

Seznam lastnosti:

	$t_v / ^\circ\text{C}$	
1	-23,7	
-----	-----	$\Delta_{12} = 88,4$
2	64,7	
-----	-----	$\Delta_{23} = 35,3$
3	100	

Dva separacijska potenciala nakazujeta potrebo po dveh ločilnikih!

 $q_m / (\text{kg/h})$ 

$$\text{Celotna težavnost} = \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} = \frac{288}{88,4} + \frac{123}{35,3} = 3,26 + 3,48 = \mathbf{6,74}$$

3. Naloga: Separacijsko zaporedje III

Z izračunom celotne težavnosti določite optimalno separacijsko zaporedje sistema 4 komponent z naslednjimi lastnostmi (želimo proizvesti čiste komponente):

Komponenta	$t_v / ^\circ\text{C}$	$q_m / (\text{t/d})$	Opomba
a	- 60	20	korozivna
b	10	50	
c	- 20	20	
d	20	10	

Potek reševanja:

Komponente najprej razvrstimo po rastočih vreliščih t_v :

Komponenta	$t_v / ^\circ\text{C}$	$q_m / (\text{t/d})$	Opombe
1	- 60	20	korozivna
2	- 20	20	
3	10	50	
4	20	10	

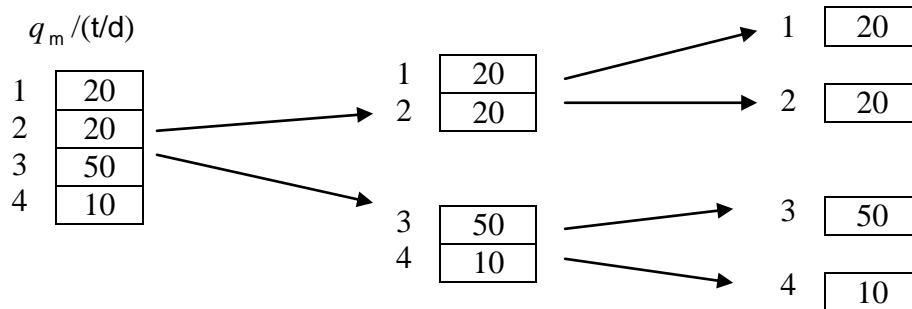
Seznam lastnosti:

$t_v / ^\circ\text{C}$		
1	- 60	
-----	-----	$\Delta_{12} = 40$
2	- 20	
-----	-----	$\Delta_{23} = 30$
3	10	
-----	-----	$\Delta_{34} = 10 \quad \leftarrow \text{težavna ločitev}$
4	20	

Trije separacijski potenciali nakazujejo uporabo treh ločilnikov.

1. varianta:

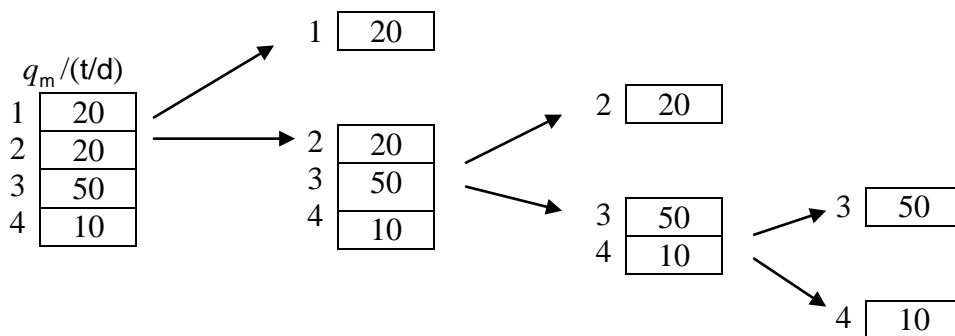
HP: najobilnejšo komponento odstranimo najprej, težavno ločitev izvedemo na koncu.



$$\begin{aligned} \text{Celotna težavnost} &= \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{23}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{34}} = \\ &= \frac{100}{30} + \frac{40}{40} + \frac{60}{10} = \mathbf{10,33} \end{aligned}$$

2. varianta:

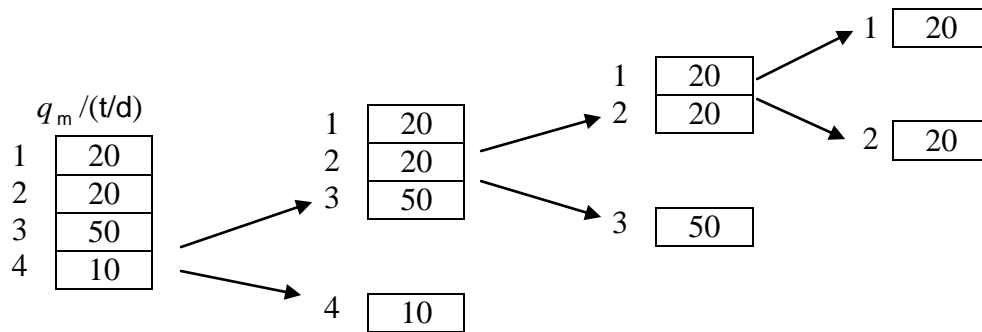
HP: korozivno komponento odstranimo najprej!



$$\begin{aligned} \text{Celotna težavnost} &= \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{23}} + \frac{q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{34}} = \\ &= \frac{100}{40} + \frac{80}{30} + \frac{60}{10} = \mathbf{11,17} \end{aligned}$$

3. varianta:

Za primerjavo pogledimo primer, ko izvedemo najprej ločitev med komponentama 3 in 4 (težavna ločitev).



$$\begin{aligned} \text{Celotna težavnost} &= \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}}{\Delta_{34}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2}}{\Delta_{12}} = \\ &= \frac{100}{10} + \frac{90}{30} + \frac{40}{40} = \mathbf{14} \end{aligned}$$

Predlog: Čeprav izračun celotne težavnosti daje prednost 1. varianti, priporočamo takojšnjo odstranitev korozivne komponente, ker s tem prihranimo investicijska sredstva za nakup drage opreme.

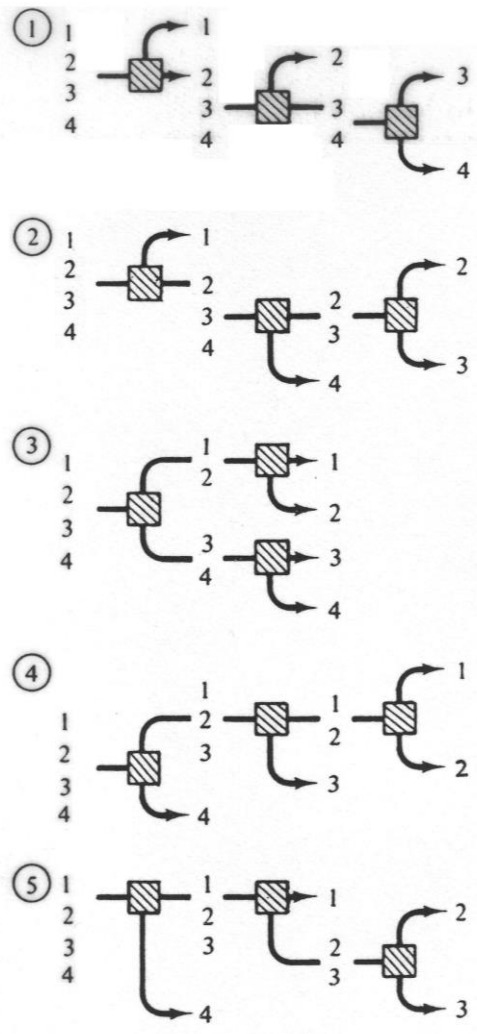
4. Naloga: Separacijsko zaporedje IV¹

Na sliki imate prikazanih pet možnih poti ločevanja štirikomponentne mešanice. Lastnosti komponent so naslednje:

Komponenta	$t_v / ^\circ\text{C}$	$q_m / (\text{t/h})$
1	-10	10
2	40	20
3	80	50
4	90	20

- katera ločitev je težavna?
- po kateri shemi, dobljeni s hevrstičnim pravilom, izvršimo težavno separacijo nazadnje?
- po kateri shemi ločimo zgodaj najobilnejšo komponento?
- katera shema je izvedena po pravilu: zgodaj odstranimo snovi z nizkim vreliščem?

¹ Rudd, D. F., Powers, G. J., Sirola, J. J. Process Synthesis, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.



Potek reševanja:

Seznam lastnosti:

	$t_v / ^\circ\text{C}$		$q_m / (\text{t/h})$
1	-10		10
2	40	$\Delta_{12} = 50$	20
3	80	$\Delta_{23} = 40$	50
4	90	$\Delta_{34} = 10$ ← težavna ločitev	20

- a) Težavna ločitev je med komponentama 3 in 4.
 b) Težavno ločitev izvršimo nazadnje v primeru 1 in 3.
 c) Najobilnejša je komponenta 3. Zgodaj jo odstranimo v primeru 3 in 4.
 d) Nizko vrelišče ima komponenta 1. Zgodaj jo odstranimo v primerih 1 in 2.

5. Naloga: Separacijsko zaporedje V¹

Imamo 3 komponentno mešanico benzena, toluena in ksilena, ki jih ločujemo z destilacijo. Pretoki in lastnosti posameznih komponent so prikazane v preglednici:

Komponenta	Relativna hlapnost, α	q_m /(kg/h)
benzen	2,5	30
toluen	1	20
ksilen	0,4	50

Prikažite separacijske potenciale v seznamu lastnosti in s tem možnost ločevanja komponent! Določite najboljše možno zaporedje, pri čemer uporabite znana hevrstična pravila. Katera so to?

Potek reševanja:

Št. komponente	Komponenta	Relativna hlapnost, α	q_m /(kg/h)
1	benzen	2,5	30
2	toluen	1	20
3	ksilen	0,4	50

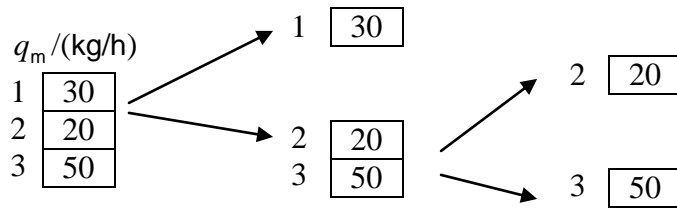
Lastnost, ki jo opazujemo, je relativna hlapnost. Zapišite seznam lastnosti:

α		
1	2,5	$\Delta_{12} = 1,5$
2	1	
3	0,4	$\Delta_{23} = 0,6$ ← težavna ločitev

Dva separacijska potenciala ponazarjata potrebo po dveh ločilnikih.

1. varianta:

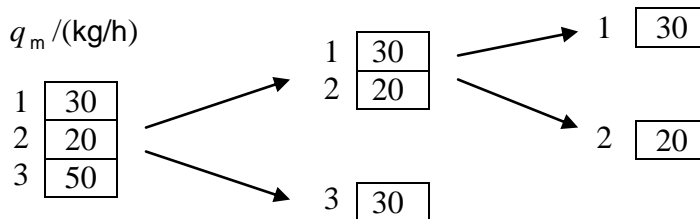
HP: najprej odstranimo najhlapnejšo komponento. Težavno ločitev izvedemo na koncu.



$$\text{Celotna težavnost} = \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{12}} + \frac{q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} = \frac{100}{1,5} + \frac{70}{0,6} = \mathbf{183,4}$$

2. varianta:

HP: najprej odločimo najobilnejšo komponento, tj. 3.



$$\text{Celotna težavnost} = \frac{q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}}{\Delta_{23}} + \frac{q_{m,1} + q_{m,2}}{\Delta_{12}} = \frac{100}{0,6} + \frac{50}{1,5} = \mathbf{200}$$

Komentar: Na osnovi dobljenih rezultatov se težko odločimo, katera varianta je primernejša. V takih primerih izvedemo na izdelani procesni shemi ekonomsko analizo, tj. ocenimo vrednost naložbe in obratovalne stroške.

6. Naloga: Separacijsko zaporedje VI

Neko rudo, ki jo potrebujemo za pridobivanje neke želene snovi, pred nadaljnjo obdelavo najprej zdrobimo na naslednjo velikost delcev:

- med 20 in 15 cm $w = 30 \%$,
- med 15 in 10 cm $w = 10 \%$,
- med 10 in 5 cm $w = 20 \%$ in
- pod 5 cm $w = 40 \%$.

V kakšnem zaporedju bi izvedli sejanje, da bi čim manj obremenjevali sita? Predpostavimo, da v eni uri presejemo 2000 t rude!

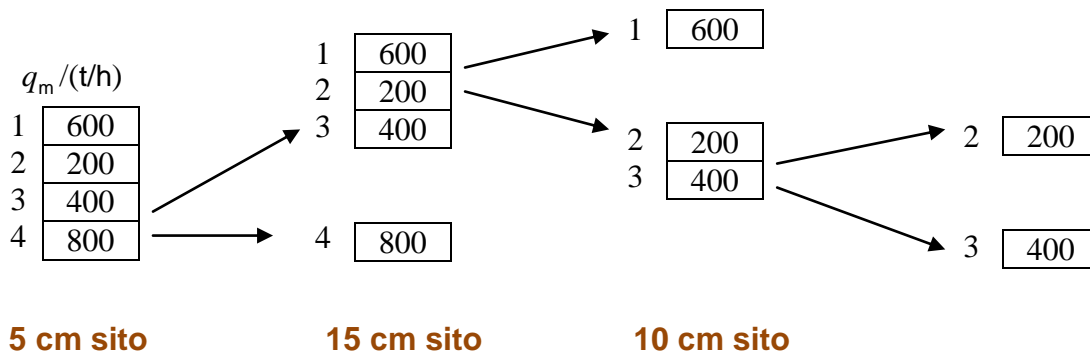
Potrebni podatki:

Št. komponente	Velikost delcev	w/%	$q_m/(t/h)$
1	med 20 in 15 cm	30	600
2	med 15 in 10 cm	10	200
3	med 10 in 5 cm	20	400
4	pod 5 cm	40	800

$$\sum 2000 \frac{t}{h}$$

1. varianta:

HP: najprej odstranimo komponento, ki je največ!



Celotna obremenitev:

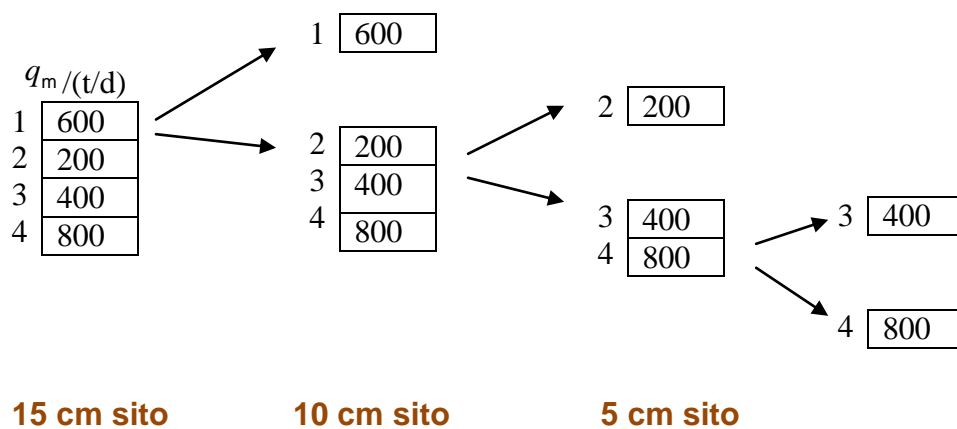
1. sito: $q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}$

2. sito: $q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3}$

3. sito: $q_{m,2} + q_{m,3}$

$$2q_{m,1} + 3q_{m,2} + 3q_{m,3} + q_{m,4} = 3800 \text{ t/h}$$

2. varianta: zaradi morebitnih poškodb sit odstranimo najprej največje delce.



15 cm sito

10 cm sito

5 cm sito

Celotna obremenitev:

1. sito: $q_{m,1} + q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}$

2. sito: $q_{m,2} + q_{m,3} + q_{m,4}$

3. sito: $q_{m,3} + q_{m,4}$

$$q_{m,1} + 2q_{m,2} + 3q_{m,3} + 3q_{m,4} = 600 + 400 + 1\,200 + 2\,400 = \mathbf{4\,600\ t/h}$$

5. Kemijska reakcijska tehnika

1. Naloga: Piroлиза etana¹

Piroлиза etana teče z aktivacijsko energijo okoli 314 kJ/mol. Koliko hitrejši je razkroj pri 650 °C v primerjavi s sedanjim, ki teče pri 500 °C?

Potek reševanja:

$$E = 314 \text{ kJ/mol}$$

$$t_2 = 650 \text{ °C} = 923 \text{ K}$$

$$t_1 = 500 \text{ °C} = 773 \text{ K}$$

Splošno velja:

$$-r = k \cdot c^n$$

$$-r = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \cdot c^n$$

$$\frac{-r_1}{-r_2} = ?$$

$$-r_1 = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}} \cdot c^n$$

$$-r_2 = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_2}} \cdot c^n$$

Poiščemo razmerje (k_0 , c^n pokrajšamo)!

$$\frac{-r_1}{-r_2} = \frac{e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}}}{e^{\frac{-E}{R \cdot T_2}}} = \frac{e^{\frac{-314000 \text{ J} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}}{\text{mol} \cdot 8,314 \text{ J} \cdot 773 \text{ K}}}}{e^{\frac{-314000}{8,314 \cdot 923}}} =$$

$$\frac{-r_1}{-r_2} = \frac{6,0398 \times 10^{-22}}{1,6959 \times 10^{-18}} = 3,56146 \times 10^{-4}$$

oziroma $\frac{-r_2}{-r_1} \doteq 2800$ Razkroj je pri $t = 650 \text{ °C}$ približno 2800 krat hitrejši.

¹ Levenspiel, O. (1999). Chemical Reaction Engineering, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, USA.

2. Naloga: Hitrost reakcije²

Če je reakcija 1000 krat hitrejša pri $T_2 = 500$ K kot pri $T_1 = 400$ K, kolikokrat hitrejša je pri $T_3 = 600$ K?

Potek reševanja:

$$-r = k \cdot c^n$$

$$-r_1 = k_1 \cdot c^n$$

$$-r_2 = k_2 \cdot c^n$$

$$-r_2 = 1000 \cdot (-r_1)$$

$$k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_2}} \cdot c^n = 1000 \cdot k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}} \cdot c^n \quad /: k_0 \cdot c^n$$

$$e^{\frac{-E}{R \cdot T_2}} = 1000 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}} \quad / \ln$$

$$-\frac{E}{R \cdot T_2} = \ln 1000 - \frac{E}{R \cdot T_1}$$

$$-\frac{E}{R \cdot T_2} + \frac{E}{R \cdot T_1} = \ln 1000$$

$$E \left(\frac{1}{R \cdot T_1} - \frac{1}{R \cdot T_2} \right) = 6,90775$$

$$E \left(\frac{1 \text{ mol} \cdot \text{K}}{8,314 \text{ J} \cdot 400 \text{ K}} - \frac{1 \text{ mol} \cdot \text{K}}{8,314 \text{ J} \cdot 500 \text{ K}} \right) = 6,90775$$

$$E (3,00698 \times 10^{-4} - 2,40558 \times 10^{-4}) = 6,90775$$

$$E (6,014 \times 10^{-5} \text{ mol/J}) = 6,90775$$

$$E = 114 861 \text{ J/mol}$$

Sedaj izračunajte kolikokrat je reakcija hitrejša pri $T_3 = 600$ K!

$$-r_3 = x \cdot (-r_1)$$

$$k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_3}} \cdot c^n = x \cdot k_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}} \cdot c^n \quad /: k_0 \cdot c^n$$

$$e^{\frac{-E}{R \cdot T_3}} = x \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}}$$

² Levenspiel, O., Park, D. (1984). Solutions to 555 Problems in the Chemical Reactor Omnibook +, Chemical Engineering Department, Oregon State University, Corvallis, USA.

$$x = \frac{e^{\frac{-E}{R \cdot T_3}}}{e^{\frac{-E}{R \cdot T_1}}} = \frac{e^{\frac{-114861 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}}{\text{mol} \cdot 8,314 \text{ J} \cdot 600 \text{ K}}}}{e^{\frac{-114861}{8,314 \cdot 400}}} =$$

$$x = \frac{e^{-23,025619}}{e^{-34,538429}} = \frac{1,00023152 \times 10^{-10}}{1,0003473 \times 10^{-15}} = 99\,988 \doteq 100\,000$$

$$x = \frac{-r_3}{-r_1} \text{ Reakcija pri } T_3 = 600 \text{ K je približno } 100\,000 \text{ krat hitrejša kot pri } T_1 = 400 \text{ K!}$$

Poglavje 5.3: Diskontinuirni ali šaržni reaktor

3. Naloga: Reakcijski čas

Ugotovite čas, ki je v diskontinuirnem reaktorju potreben za reakcijo $A \rightarrow P$, ki ima proizvodnost:

$$-r_A = 0,5 \cdot c_A \left[\frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{h}} \right], \text{ če je } c_{A0} = 1 \text{ mol/L in } X_A = 0,95, V = \text{konst.}$$

Potek reševanja:

1. red	$-r_A = 0,5 \cdot c_A \text{ /}(\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{h}))$
$k = 0,5 \text{ h}^{-1}$	$A \rightarrow P$
$c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$	
$X_A = 0,95$	
$t = ?$	

Za 1. red reakcije z $V = \text{konst.}$, velja:

$$k \cdot t = \ln \frac{1}{(1 - X_A)}$$

$$t = \frac{\ln \frac{1}{(1 - X_A)}}{k} = \frac{\left(\ln \frac{1}{0,05} \right) \cdot \text{h}}{0,5} = 6 \text{ h}$$

4. Naloga: Presnova reakcije

Načrtujemo presnovo A v P z diskontinuirnim mešalnim reaktorjem. Reakcija teče v tekoči fazi s stehiometrijo



in proizvodnostmi:

$c_A / (\text{mol/L})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,3
$-r_A / (\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{min}))$	0,1	0,3	0,5	0,6	0,5	0,25	0,1	0,06	0,05	0,045

Kako dolgo mora teči reakcija, da se bo koncentracija znižala od $c_{A0} = 1,3 \text{ mol/L}$ na $c_{Ak} = 0,3 \text{ mol/L}$?

Potek reševanja:

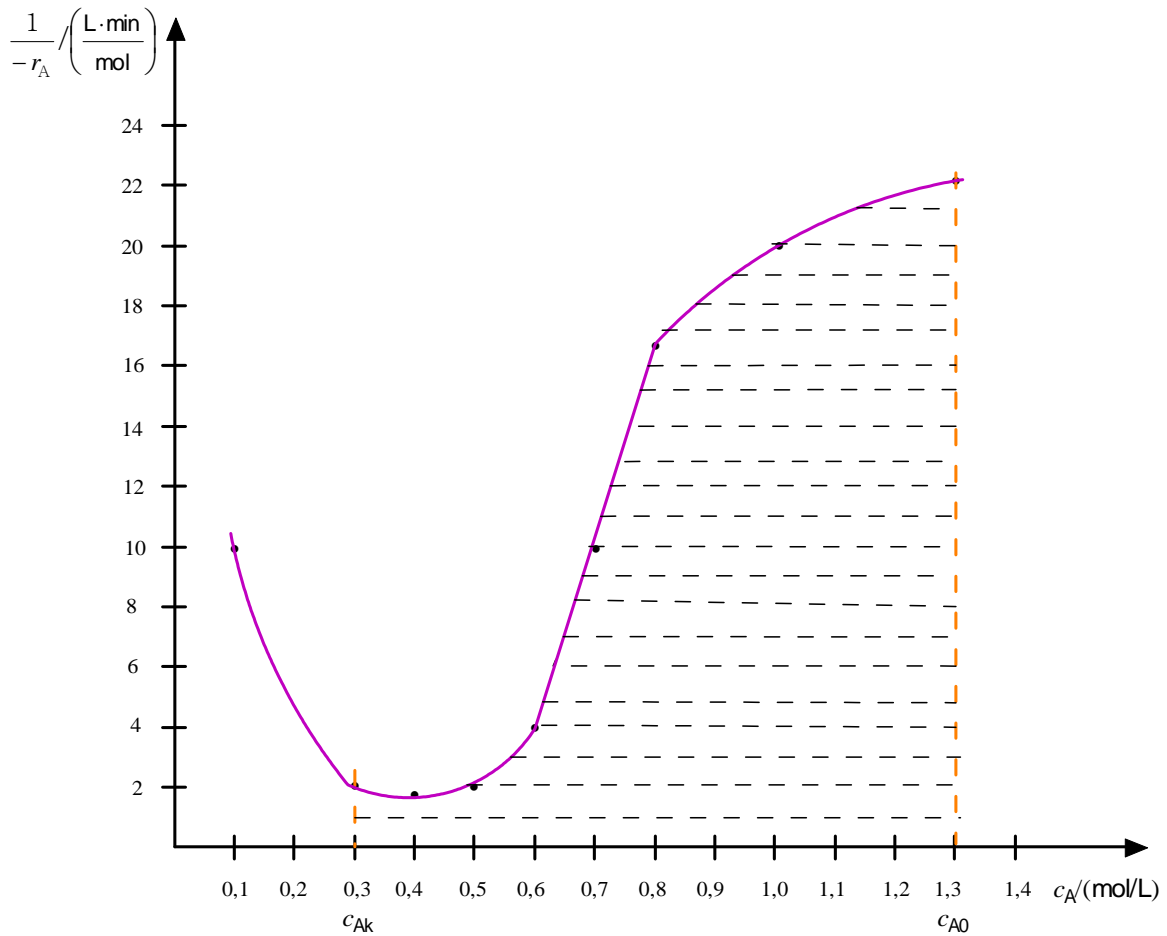
$$c_{A0} = 1,3 \text{ mol/L}$$

$$c_{Ak} = 0,3 \text{ mol/L}$$

$c_A / (\text{mol/L})$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,3
$1 / -r_A / (\text{L}\cdot\text{min}/\text{mol})$	10	3,3	2	1,67	2	4	10	16,67	20	22,2

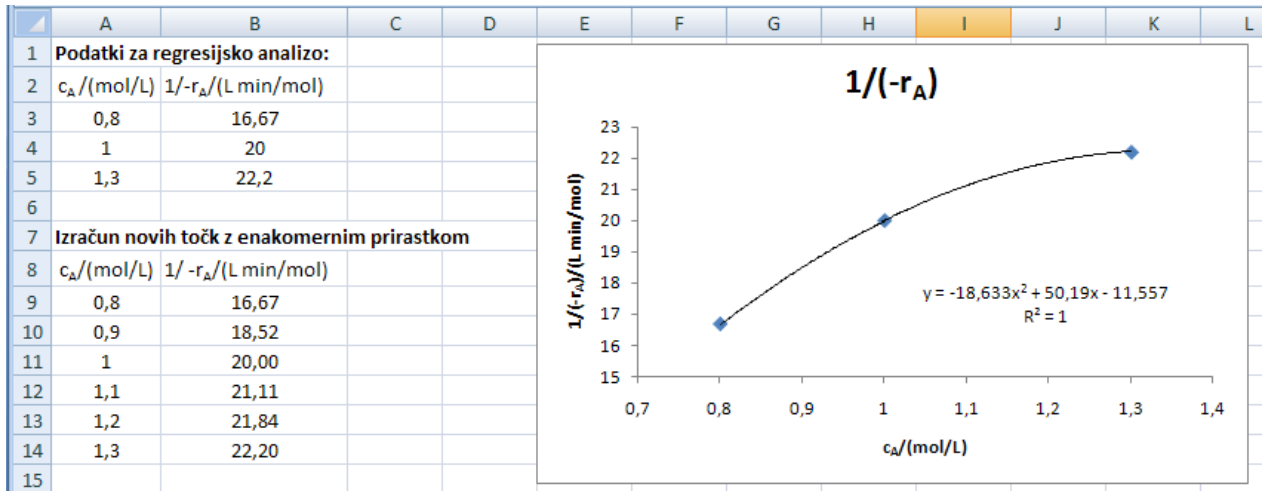
Narišite graf $\frac{1}{-r_A} = f(c_A)$!

Površina pod krivuljo je čas, v katerem se začetna koncentracija $c_{A0} = 1,3 \text{ mol/L}$ zniža na $c_{Ak} = 0,3 \text{ mol/L}$ (slika 5.1).



Slika 5.1: Prikaz izračuna reakcijskega časa v mešalnem šaržnem reaktorju.

Do rezultata lahko pridemo z numerično integracijo in pri tem uporabimo program Excel. Za izračun površine pod krivuljo uporabimo trapezno pravilo. Ker morajo biti prirastki neodvisne spremenljivke enakomerni, bomo v območju od $c_A = 0,8 \text{ mol/L}$ do $c_A = 1,3 \text{ mol/L}$ poiskali formulo funkcije in nato izračunali manjkajoče točke. Rezultate izračuna z Excelom prikazuje slika 5.2. Slika 5.3 prikazuje izračun reakcijskega časa s trapeznim pravilom v Excelu.



Slika 5.2: Izračun manjkajočih podatkov z Excelom.

F25		fx		=F24*SUMPRODUCT(C21:C31;B21:B31)			
	A	B	C	D	E	F	G
16							
17	Numerična integracija - vse točke						
18	$c_A/(mol/L)$	$1/-r_A/(L\ min/mol)$	koeficient				
19	0,1	10					
20	0,2	3,3					
21	0,3	2	0,5				
22	0,4	1,67	1				
23	0,5	2	1				
24	0,6	4	1		h=	0,1	
25	0,7	10	1		čas t =	12,8	min
26	0,8	16,67	1				
27	0,9	18,52	1				
28	1	20	1				
29	1,1	21,11	1				
30	1,2	21,84	1				
31	1,3	22,2	0,5				

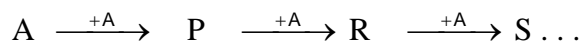
Slika 5.3: Izračun reakcijskega časa po trapeznem pravilu.

Poglavje 5.4: Mešalni pretočni reaktor**5. Naloga: Hitrost reakcije**

Tok vodne raztopine monomera s $c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$ in $\dot{v}_A = 4 \text{ L/min}$, teče v 2 L mešalni pretočni reaktor, kjer ga obsevamo in polimerizira po shemi:



V iztoku je $c_A = 0,01 \text{ mol/L}$, koncentracija nekega reakcijskega produkta W pa $c_W = 0,0002 \text{ mol/L}$. Poiščite proizvodnost Aja ter Wja !

Potek reševanja:

$$c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$$

$$\dot{v}_A = 4 \text{ L/min}$$

$$V = 2 \text{ L}$$

$$c_A = 0,01 \text{ mol/L}$$

$$c_W = 0,0002 \text{ mol/L}$$

$$\varepsilon_A = 0$$

$$c_{W0} = 0 \text{ mol/L}$$

$$-r_A = ?$$

$$-r_W = ?$$

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}} = \frac{c_{A0} - c_{Ak}}{(-r_A)_k} \Rightarrow (-r_A)_k = \frac{c_{A0} - c_{Ak}}{\frac{V}{\dot{v}}} =$$

$$(-r_A)_k = \frac{1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,01 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{\frac{2 \text{ L} \cdot \text{min}}{4 \text{ L}}} =$$

$$(-r_A)_k = 1,98 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{min})$$

$$(-r_W)_k = \frac{c_{W0} - c_{Wk}}{\frac{V}{\dot{v}}} = \frac{0 - 0,0002 \text{ mol}}{0,5 \cdot \text{min} \cdot \text{L}} = -0,0004 \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{min}) \quad / \cdot (-1)$$

$$r_W = 0,0004 \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{min}} \quad \text{W nastaja}$$

6. Naloga: Enačba proizvodnosti

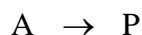
Mešalni pretočni reaktor uporabljamo za določanje kinetike reakcije s stehiometrijo:



V ta namen napravimo poizkus z različnimi vtoki vodne raztopine reaktanta A $c_{A0} = 100$ mmol/L. Za vsak poizkus izmerimo iztočno koncentracijo A. Na proizvodnost vpliva samo reaktant A. Ugotovite enačbo proizvodnosti iz naslednjih podatkov:

\dot{v} /(L/min)	1	6	24
c_A /(mmol/L)	4	20	50

Prostornina reaktorja je $V = 1$ L.

Potek reševanja:

$$c_{A0} = 100 \text{ mmol/L}$$

$$V = 1 \text{ L}$$

$$-r_A = ?$$

\dot{v} /(L/min)	1	6	24
c_A /(mmol/L)	4	20	50

$$-r_A = k \cdot c_A^n \quad / \cdot \ln$$

$$\ln(-r_A) = \ln k + n \ln c_A$$

Narišite graf $\ln(-r_A) = f(\ln c_A)$!

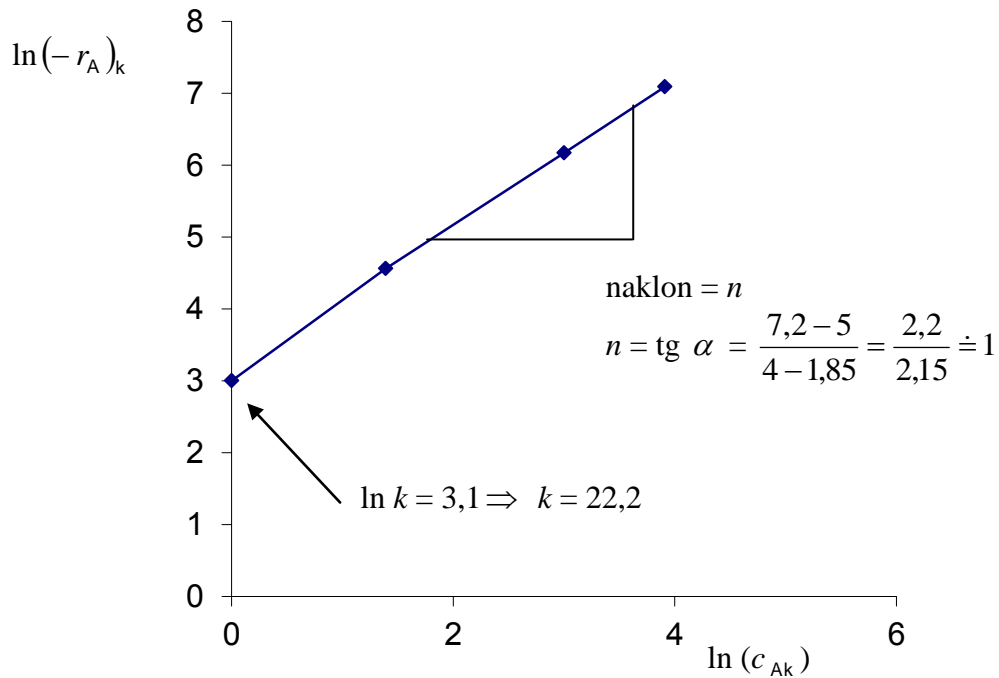
Proizvodnosti lahko izračunate iz naslednjega izraza:

$$\frac{V}{\dot{v}} = \frac{c_{A0} - c_{Ak}}{(-r_A)_k}$$

$$(-r_A)_k = \frac{(c_{A0} - c_{Ak}) \cdot \dot{v}}{V}$$

Št.	$\dot{v} / \frac{\text{L}}{\text{min}}$	$c_{Ak} / (\text{mmol} / \text{L})$	$(-r_A)_k / (\text{mmol} / (\text{min} \cdot \text{L}))$	$\ln(-r_A)_k$	$\ln c_{Ak}$
1	1	4	96	4,56	1,39
2	6	20	480	6,17	3
3	24	50	1200	7,09	3,91

Slika 5.4 prikazuje grafično določanje enačbe proizvodnosti.



Slika 5.4: Določanje enačbe proizvodnosti.

$$-r_A = k \cdot c_A^1 \rightarrow \text{enota za } k:$$

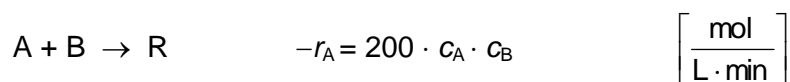
$$k = \frac{\text{mmol} \cdot \text{L}}{\text{min} \cdot \text{L} \cdot \text{mmol}} = \text{min}^{-1}$$

Končni izraz za proizvodnost je:

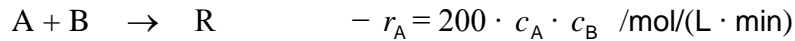
$$-r_A = 22,2 / \text{min}^{-1} \cdot c_A$$

7. Naloga: Prostornina reaktorja²

Tekoči vtok reaktantov A in B ($\dot{v} = 400 \text{ L/min}$, $c_{A0} = 10 \text{ mmol/L}$, $c_{B0} = 2 \text{ mol/L}$) se presnuje v produkt v mešalnem pretočnem reaktorju. Stehiometrija reakcije je:



Določite velikost reaktorja, če je presnova reaktanta A $X_A = 99,9 \%$.

Potek reševanja:

$$\dot{v} = 400 \text{ L/min} \quad \varepsilon_A = 0, \text{ 2. red}$$

$$c_{A0} = 10 \text{ mmol/L} = 0,1 \text{ mol/L}$$

$$c_{B0} = 2 \text{ mol/L}$$

$$X_A = 99,9 \%$$

$$V = ?$$

$$\text{Za drugi red velja: } k \cdot \tau = \frac{c_{A0} - c_A}{c_A \cdot c_B}$$

Konstanta proizvodnosti ima naslednjo enoto:

$$k = 200 = \frac{-r_A}{c_A \cdot c_B} = \frac{\text{mol} \cdot \text{L}^2}{\text{L} \cdot \text{min} \cdot \text{mol}^2} = \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{min}}$$

$$k = 200 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{min}}$$

Končna koncentracija Aja:

$$c_A = c_{A0} \cdot (1 - X_A)$$

$$c_A = 0,01 \cdot (1 - 0,999)$$

$$c_A = 1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$$

Končna koncentracija Bja:

- ker v reaktor ne vtekata v stehiometrijskem razmerju 1 : 1 presnovi reaktantov nista enaki.

Lahko pa trdimo:

- množina zreagiranega Aja:

$$c_{A0} - c_A = 0,01 - 1 \times 10^{-5} = 0,00999 \text{ mol/L}$$

↓

Takšna množina zreagira tudi Bja:

$$c_B = c_{B0} - (c_{A0} - c_A)$$

$$c_B = c_{B0} - 0,00999 = 2 - 0,00999$$

$$c_B = 1,99001 \text{ mol/L}$$

Sedaj lahko izračunate τ :

$$\tau = \frac{c_{A0} - c_A}{k} = \frac{c_{A0} - c_A}{k \cdot c_A \cdot c_B}$$

$$\tau = \frac{0,01 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{200 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{min}} \cdot 1 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 1,99001 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} = 2,51 \text{ min}$$

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}} \Rightarrow V = \tau \cdot \dot{v} = 2,51 \text{ min} \cdot 400 \text{ L/min} = 1004 \text{ L} \doteq 1 \text{ m}^3$$

Poglavje 5.5: Cevni reaktor

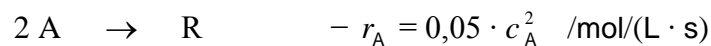
8. Naloga: Iztočna koncentracija

Vodna raztopina z reaktantom A, ki ima začetno koncentracijo $c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$, vteka v cevni pretočni reaktor s prostornino $V = 2 \text{ L}$. Stehiometrija reakcije je naslednja:



Določite iztočno koncentracijo A v mol/L, če je $\dot{v} = 0,5 \text{ L/min}$!

Potek reševanja:



$$c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$$

$$V = 2 \text{ L}$$

$$\dot{v} = 0,5 \text{ L/min}$$

$$\varepsilon_A = 0$$

2. red

$$c_A = ?$$

$$k = \frac{-r_A}{c_A^2} = \frac{\text{mol} \cdot \text{L}^2}{\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{mol}^2} = \frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{mol}}$$

$$k = 0,05 \frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{mol}}$$

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}} = \frac{2 \text{ L} \cdot \text{min}}{0,5 \cdot \text{L}} = 4 \text{ min}$$

Za drugi red reakcije velja:

$$k \cdot \tau \cdot c_{A0} = \frac{c_{A0} - c_A}{c_A} \quad \text{ali} \quad \frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_{A0}} = k \cdot \tau$$

↓

$$\frac{1}{c_A} = k \cdot \tau + \frac{1}{c_{A0}}$$

$$\frac{1}{c_A} = 0,05 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{s}} \cdot 4 \text{ min} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} + \frac{\text{L}}{1 \cdot \text{mol}}$$

$$\frac{1}{c_A} = 12 + 1 = 13 \text{ L/mol}$$

$$c_A = 0,077 \text{ mol/L}$$

9. Naloga: Prostornina reaktorja

Vodno raztopino reaktanta A presujemo v produkt v prisotnosti homogenega katalizatorja z določeno koncentracijo. Na proizvodnost vpliva samo c_A . Znani so naslednji praktični podatki:

c_A / (mol/L)	1	2	4	6	8	10
$-r_A$ / (mol/L·min)	0,05	0,1	0,2	0,33	0,25	0,125

Ugotovite prostornino cevne reaktorja, ki je potrebna za $X_A = 40\%$ z $\dot{v} = 10 \text{ L/min}$ in $c_{A0} = 10 \text{ mol/L}$!

Potek reševanja:

$$X_A = 40\%$$

$$\dot{v} = 10 \text{ L/min}$$

$$c_{A0} = 10 \text{ mol/L}$$

$$V = ?$$

Narišite graf $\left(\frac{1}{-r_A}\right) = f(c_A)$!

$c_A / \frac{\text{mol}}{\text{L}}$	1	2	4	6	8	10
$\frac{1}{-r_A} / \frac{\text{L} \cdot \text{min}}{\text{mol}}$	20	10	5	3	4	8

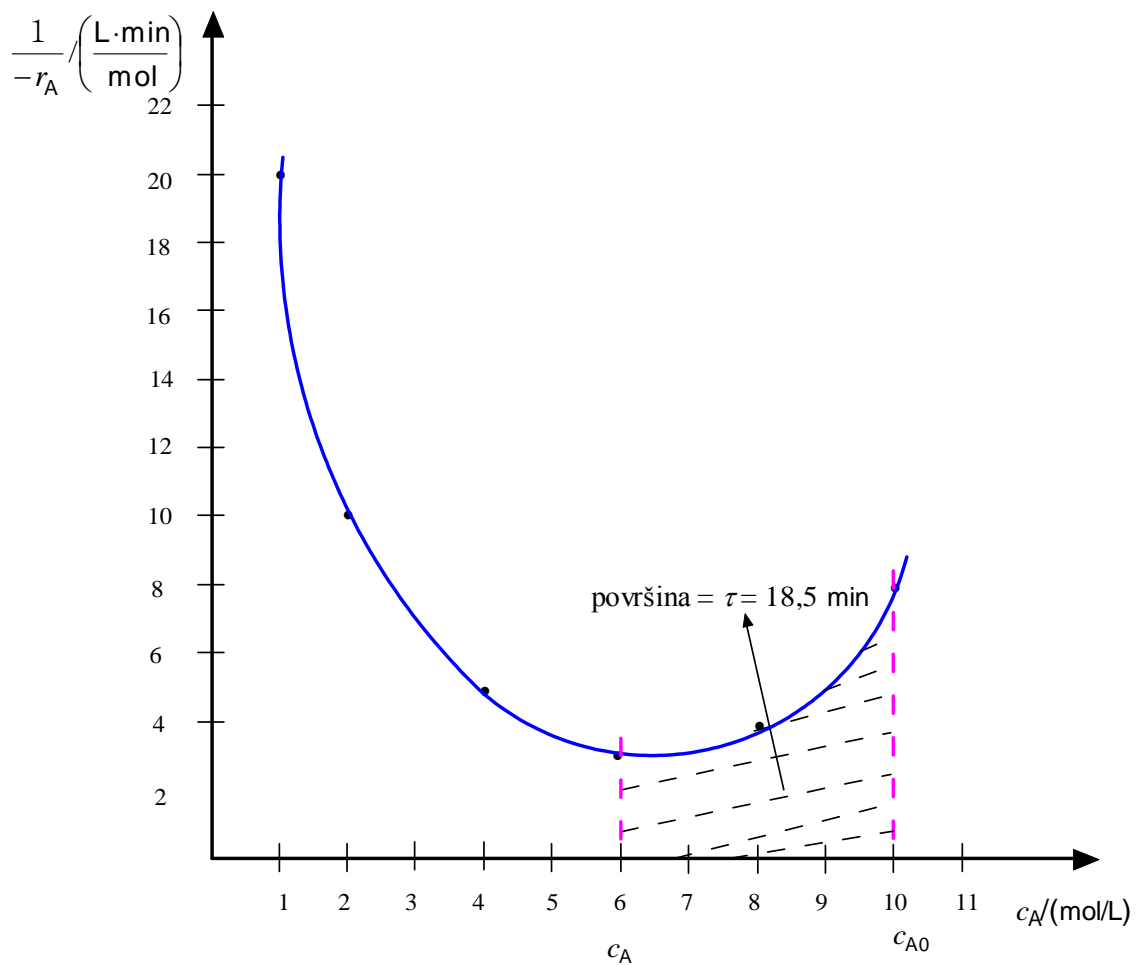
Ker je presnova $X_A = 40\%$, lahko izračunamo c_A :

$$c_A = c_{A0} \cdot (1 - X_A)$$

$$c_A = 10 (1 - 0,4)$$

$$c_A = 10 \cdot 0,6 = 6 \text{ mol/L}$$

Iz grafa (slika 5.5) določite τ :



Slika 5.5: Grafični prikaz določanja polnilnega časa v cevnem reaktorju.

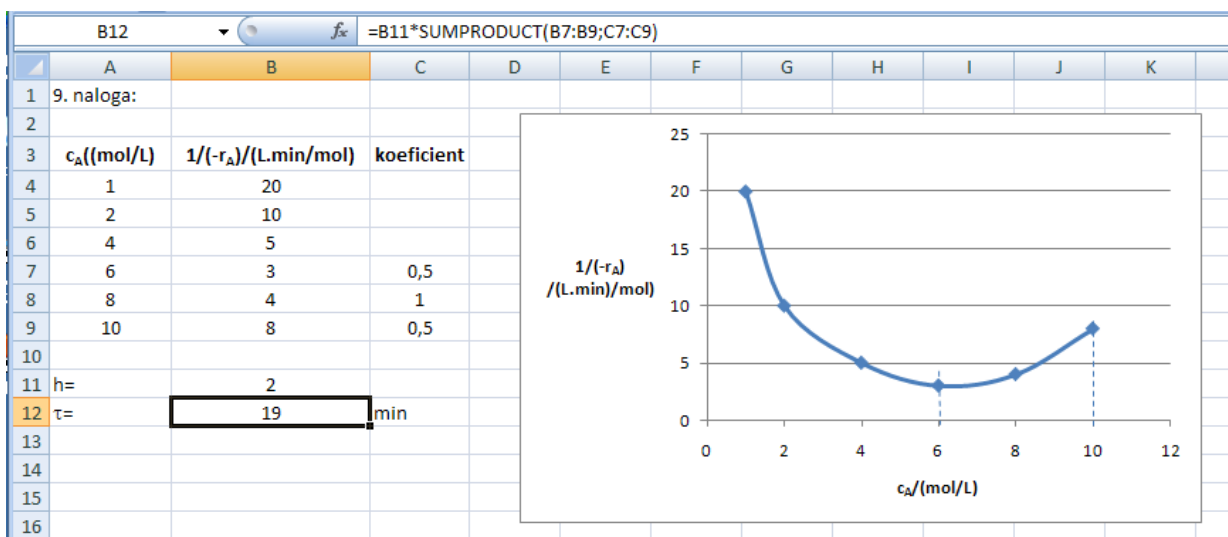
Sedaj lahko izračunate prostornino:

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}}$$

$$V = \tau \cdot \dot{v} = 18,5 \text{ min} \cdot 10 \text{ L/min}$$

$$V = 185 \text{ L}$$

Za izračun površine pod krivuljo (polnilni čas τ), uporabimo še trapezno pravilo in program Excel. Slika 5.6 prikazuje rezultate.



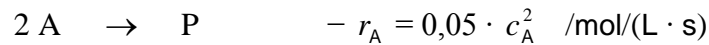
Slika 5.6: Izračun polnilnega časa τ s trapeznim pravilom.

10. Naloga: Prostorninski vtok

Vodna raztopina z reaktantom A, katerega začetna koncentracija je $c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$, vteka v 2 literski cevni reaktor in reagira po shemi:



Izračunajte prostorninski vtok, ki bo dal iztočno koncentracijo $c_A = 0,5 \text{ mol/L}$!

Potek reševanja:

$$c_{A0} = 1 \text{ mol/L}$$

$$c_A = 0,5 \text{ mol/L}$$

$$V = 2 \text{ L}$$

$$\varepsilon_A = 0$$

$$2. \text{ red}$$

$$\dot{v} = ?$$

$$k = \frac{-r_A}{c_A^2} = \frac{\text{mol} \cdot \text{L}^2}{\text{L} \cdot \text{s} \cdot \text{mol}^2} = \frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{mol}}$$

$$k = 0,05 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$$

Za drugi red reakcije velja:

$$k \cdot \tau \cdot c_{A0} = \frac{c_{A0} - c_A}{c_A} \quad \text{ali} \quad \frac{1}{c_A} - \frac{1}{c_{A0}} = k \cdot \tau$$

$$k \cdot \tau = \left(\frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right) \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

$$k \cdot \tau = 1 \text{ L/mol}$$

$$\tau = \frac{1 \text{ L} \cdot \text{mol} \cdot \text{s}}{\text{mol} \cdot 0,05 \text{ L}} = 20 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}} \Rightarrow \dot{v} = \frac{V}{\tau} = \frac{2 \text{ L}}{20 \text{ s}} = 0,1 \text{ L/s} = 6 \text{ L/min}$$

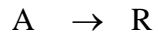
11. Naloga: Enačba proizvodnosti

Plinski reaktant A vteka pri visokem tlaku v cevni pretočni reaktor. Začetna koncentracija $c_{A0} = 500 \text{ mmol/L}$, prostornina reaktorja $V = 10 \text{ L}$. Stehiometrija reakcije je naslednja:



Iztočno koncentracijo merimo pri različnih pretokih. Najdite enačbo proizvodnosti pri $c_A = 150 \text{ mmol/L}$. Podatki so naslednji:

τ/s	2	5	9	14
$c_A/(\text{mmol/L})$	250	100	25	5

Potek reševanja:

$$c_{A0} = 500 \text{ mmol/L}$$

$$c_A = 150 \text{ mmol/L}$$

$$V = 10 \text{ L}$$

$$-r_A = ?$$

Reakcija je v plinastem stanju!

Relativna sprememba prostornine:

$$X_A = 0 \quad V = 1 A + 0 R = 1$$

$$X_A = 1 \quad V = 0 A + 1 R = 1$$

$$\varepsilon_A = \frac{V_{X_A=1} - V_{X_A=0}}{V_{X_A=0}} = \frac{1-1}{1} = \frac{0}{1} = 0$$

Poizkusimo 1. red reakcije:

– za 1. red velja:

$$k \cdot \tau = (1 + \varepsilon_A) \ln \frac{1}{1 - X_A} - \varepsilon_A \cdot X_A$$

$$k \cdot \tau = (1 + 0) \ln \frac{1}{1 - X_A} - 0 \cdot X_A$$

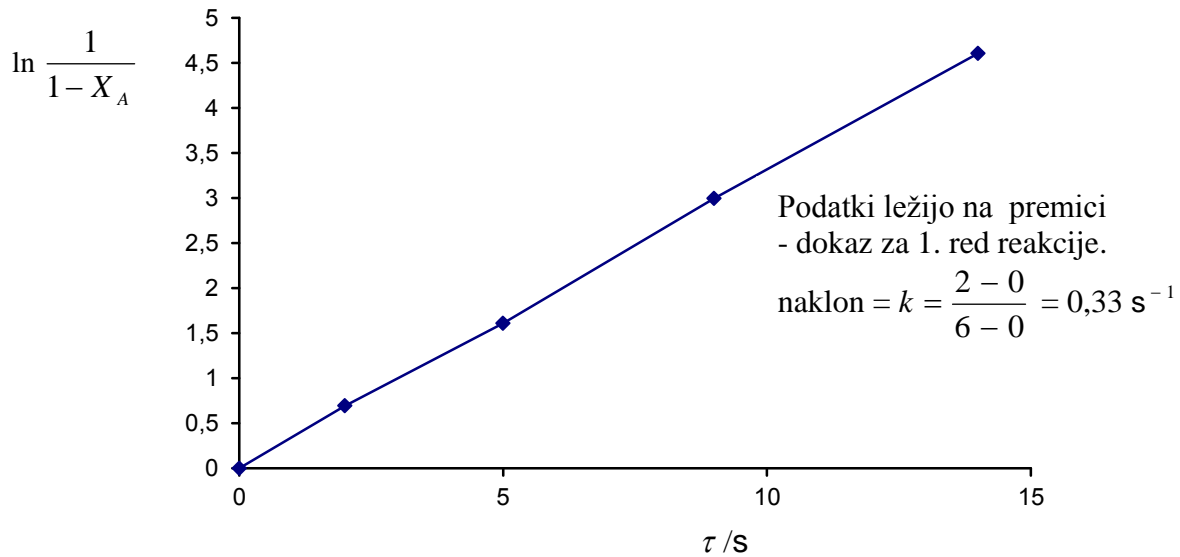
$$k \cdot \tau = \ln \frac{1}{1 - X_A}$$

Narišite graf $\ln \frac{1}{1 - X_A} = f(\tau) \rightarrow$ če je premica, iz naklona določite k !

Potrebni podatki:

τ / s	2	5	9	14
$c_A / \frac{\text{mmol}}{\text{L}}$	250	100	25	5
$X_A = 1 - \frac{c_A}{c_{A0}} *$	0,5	0,8	0,95	0,99
$\ln \frac{1}{1 - X_A}$	0,6931	1,6094	2,9957	4,6052

* $\varepsilon_A = 0$



Slika 5.7: Grafični prikaz določanja enačbe proizvodnosti.

Velja:

- $r_A = k \cdot c_A$
- $r_A = 0,33 \text{ /s}^{-1} \cdot c_A$

Pri $c_A = 0,15 \text{ mol/L}$ je proizvodnost:

$$- r_A = 0,33 \text{ /s}^{-1} \cdot 0,15 \text{ /mol/L} = 0,0495 \text{ mol/(L} \cdot \text{s)}$$

12. Naloga: Prostorninski vtok

Vodno raztopino reaktanta A presujemo v produkt v prisotnosti homogenega katalizatorja z določeno koncentracijo. Na proizvodnost vpliva samo c_A . Znani so naslednji podatki:

c_A / (mol/L)	1	2	4	6	8	10
$-r_A$ / (mol/L·min)	0,05	0,1	0,2	0,33	0,25	0,125

Ugotovite vtok, \dot{v} , v cevni reaktor, s prostornino $V = 66 \text{ L}$, ki je potreben za $X_A = 66,7 \%$, če je $c_{A0} = 6 \text{ mol/L}$!

Potek reševanja:

$$X_A = 66,7 \%$$

$$V = 66 \text{ L} \quad \varepsilon_A = 0$$

$$c_{A0} = 6 \text{ mol/L}$$

$$\dot{v} = ?$$

Narišite graf: $\left(\frac{1}{-r_A}\right) = f(c_A)$

$c_A / \frac{\text{mol}}{\text{L}}$	1	2	4	6	8	10
$-r_A / \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{min}}$	0,05	0,1	0,2	0,33	0,25	0,125
$\frac{1}{-r_A} / \frac{\text{L} \cdot \text{min}}{\text{mol}}$	20	10	5	3	4	8

$$c_{Ak} = c_{A0} \cdot (1 - X_A)$$

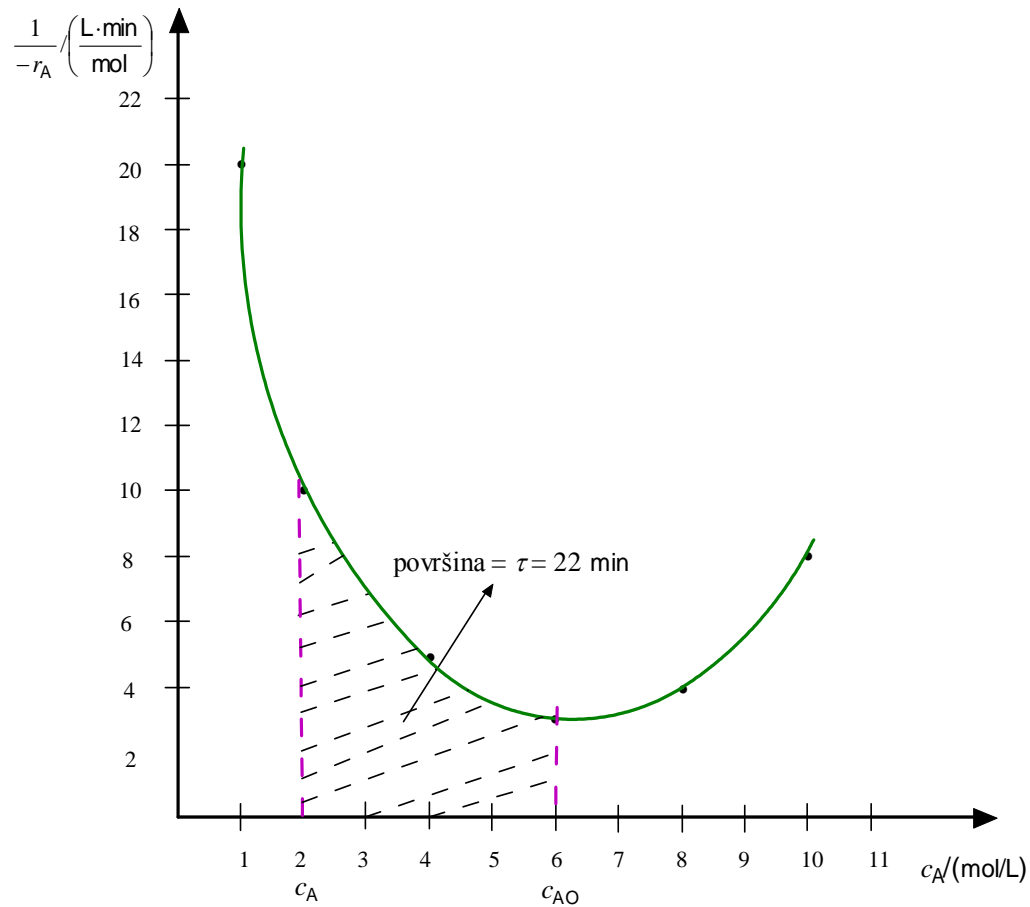
$$c_{Ak} = 6 \cdot (1 - 0,667)$$

$$c_{Ak} = 2 \text{ mol/L}$$

Iz grafa (slika 5.8) določimo $\tau = 22 \text{ min}$.

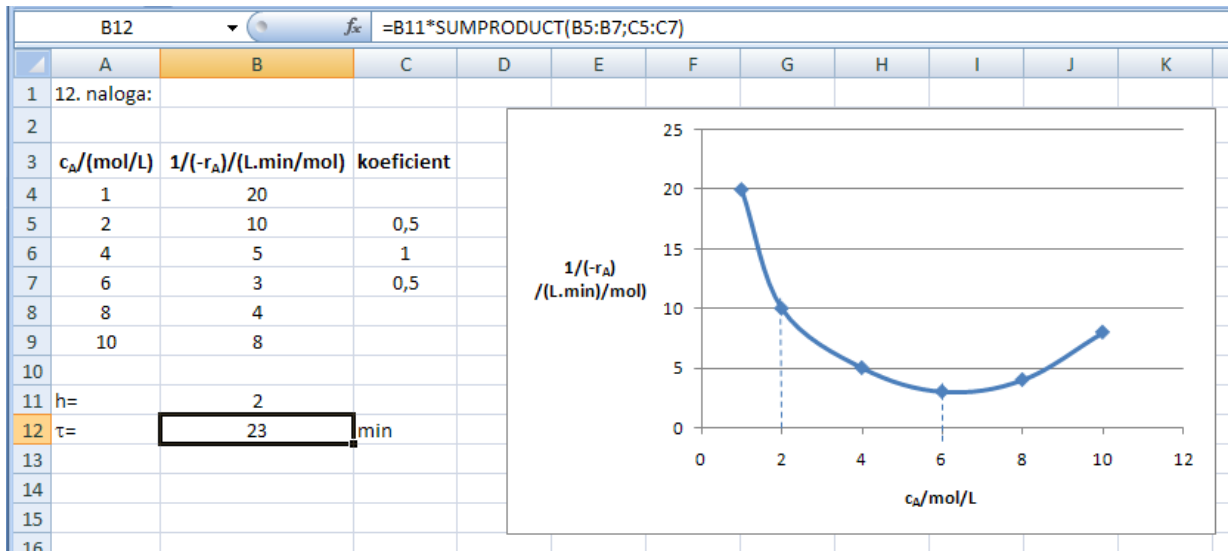
Velja :

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}} \Rightarrow \dot{v} = \frac{V}{\tau} = \frac{66 \text{ L}}{22 \text{ min}} = 3 \text{ L/min}$$



Slika 5.8: Grafični prikaz določanja τ .

Slika 5.9 prikazuje izračun polnilnega časa τ s trapeznim pravilom v Excelu.



Slika 5.9: Izračun polnilnega časa τ z Excelom.

6. Integracijska naloga

1. Naloga: Načrtovanje hladilnika

Določite ploščino hladilnika v katerem hladimo in kondenziramo hlape metanola in nato tekoči metanol še ohlajamo. Hlapi imajo temperaturo 95 °C, ohlajen tekoči metanol pa 40 °C. Pretok metanola je 100 000 kg/h. Kot hladivo uporabimo vodo s temperaturo 25 °C. Voda se lahko segreje na 40 °C.

$$\Delta H_{\text{izp}} (\text{metanol}) = 1102 \text{ J/g}$$

$$\bar{c}_p (\text{metanol, hlapi}) = 1,5373 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

$$\bar{c}_p (\text{metanol, tekočina}) = 2,457 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

$$\bar{c}_p (\text{H}_2\text{O}) = 4,2 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

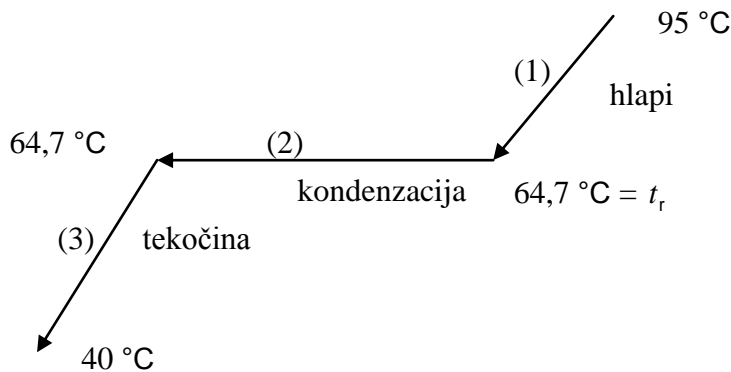
$$t_v (\text{metanol}) = 64,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K = 600 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Potek reševanja:

Ohlajanje metanola poteka v treh stopnjah:

- 1) ohlajanje hlapov do rosišča,
- 2) kondenzacija hlapov in
- 3) ohlajanje tekočega metanola.



Vrednost ima nasprotni predznak kot ΔH_{izp} !

$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p (\text{plin}) \cdot \Delta T + q_m \cdot \Delta H_{\text{kond}} + q_m \cdot \bar{c}_p (\text{tek.}) \cdot \Delta T$$

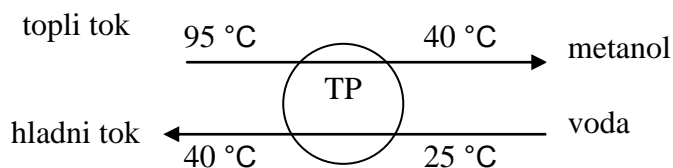
$$\Phi = 1 \times 10^8 \text{ g/h} \cdot 1,5373 \text{ J/(g} \cdot \text{K)} \cdot (64,7 - 95) \text{ K} + 1 \times 10^8 \text{ g/h} \cdot (-1102) \text{ J/g} + 1 \times 10^8 \text{ g/h} \cdot 2,457 \text{ J/(g} \cdot \text{K)} \cdot (40 - 64,7) \text{ K} =$$

$$\Delta T \rightarrow \text{v } ^\circ\text{C ali K (razlika na skali)}$$

$\Phi = -33\,680 \text{ kW} \rightarrow$ toplotni tok, ki se sprosti pri ohlajanju!

Ploščina:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{\text{povp.}}}$$



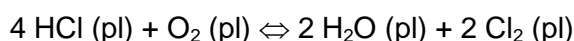
$$\Delta T_{\text{povp.}} = \frac{(T_{\text{d,t}} - T_{\text{c,h}}) + (T_{\text{c,t}} - T_{\text{d,h}})}{2}$$

$$\Delta T_{\text{povp.}} = \frac{(95 - 40) + (40 - 25)}{2} = 35 \text{ K}$$

$$A = \frac{33\,680 \text{ kW} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}}{0,6 \text{ kW} \cdot 35 \text{ K}} = 1604 \text{ m}^2$$

2. Naloga: Reakcijska entalpija

Izračunajte spremembo entalpije zaradi kemijske reakcije (ΔH_r) iz entalpij nastajanja, ΔH_n , pri standardnih pogojih ($t = 25 \text{ °C}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$) za 1 mol HCl (plin) za naslednjo reakcijo:



Entalpiji nastajanja, ΔH_n , za Cl_2 in O_2 sta nič!

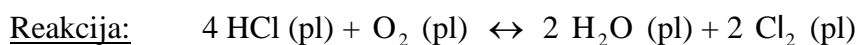
Potek reševanja:

Iz literature poiščite podatke o ΔH_n za HCl in H_2O v plinastem stanju:

$$\Delta H_n (\text{HCl, plin}) = -92,05 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_n (\text{H}_2\text{O, plin}) = -242 \text{ kJ/mol}$$

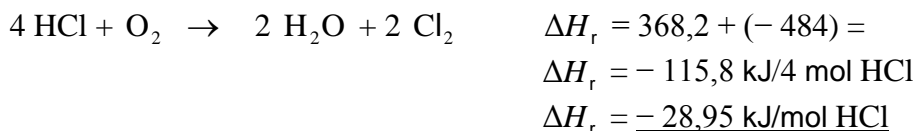
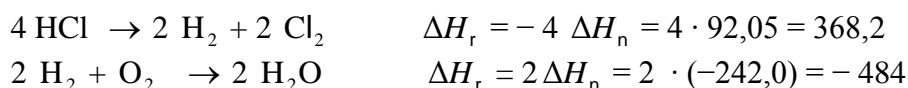
$$\Delta H_r = \sum \Delta H_n (\text{produktov}) - \sum \Delta H_n (\text{reaktantov})$$



$$\Delta H_r = 2 \cdot (-242,0) - 4 \cdot (-92,05) = -115,8 \text{ kJ/4 mol HCl}$$

$$\Delta H_r = -28,95 \text{ kJ/mol HCl (pl)}$$

ali:

**3. Naloga: Pridobivanje vodne pare**

Koliko toplotnega toka (v kW) moramo dovesti v sistem, da pridobimo 1000 kg/h pregrete vodne pare pri temperaturi 120° C (obratovalni tlak je ≈ 1 bar)? Voda, ki jo uporabimo za pridobivanje pare, ima na izvoru 20° C!

Potek reševanja:

$$q_m (\text{H}_2\text{O}) = 1000 \text{ kg/h}$$

$$t_d (\text{H}_2\text{O}) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_c (\text{H}_2\text{O}) = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Phi = ?$$

Potrebni podatki iz literature:

$$\Delta H_{\text{izp}} (\text{H}_2\text{O}) = 2260 \text{ J/g}$$

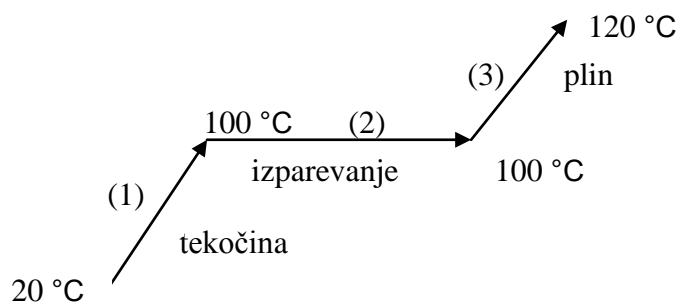
$$\bar{c}_p (\text{H}_2\text{O}, \text{ tekoč.}) = 4,2 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

$$\bar{c}_p (\text{H}_2\text{O}, \text{ plin}) = 1,911 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T \quad (\text{če ni prisotne fazne spremembe})$$

Segrevanje vode poteka v treh stopnjah:

- 1) segrevanje tekočine do vrelišča,
- 2) izparevanje tekočine in
- 3) segrevanje hlapov.



$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p(\text{tek.}) \cdot \Delta T + q_m \cdot \Delta H_{\text{izp}} + q_m \cdot \bar{c}_p(\text{pl.}) \cdot \Delta T$$

$$\Phi = 1000 \text{ kg/h} \cdot 4,2 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 80 \text{ K} + 1000 \text{ kg/h} \cdot 2260 \text{ kJ/kg} + 1000 \text{ kg/h} \cdot$$

$$\cdot 1,911 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 20 \text{ K} = 2\,634\,220 \text{ kJ/h}$$

$$\Phi = 732 \text{ kW}$$

4. Naloga: Ploščina toplotnega prenosnika

Določite ploščino toplotnega prenosnika v katerem ohlajamo kerozen (42 °API) od 200 °C na 90 °C. Pretok kerozena je 20 000 kg/h. Ohlajamo ga z lahkim organskim oljem (34 °API), katerega pretok je 70 000 kg/h in temperatura 40°C.

$$K = 400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

$$\bar{c}_p (\text{kerozen}) = 2,47 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$$

$$\bar{c}_p (\text{lahko organsko olje}) = 2,01 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K}).$$

Potek reševanja:

kerozen (topli tok)

$$t_{d,t} = 200 \text{ °C}$$

$$t_{c,t} = 90 \text{ °C}$$

$$q_m = 20\,000 \text{ kg/h}$$

$$\bar{c}_p = 2,47 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$$

lahko organsko olje (hladni tok)

$$t_{d,h} = 40 \text{ °C}$$

$$q_m = 70\,000 \text{ kg/h}$$

$$\bar{c}_p = 2,01 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$$

$$t_{c,h} = ?$$

$$K = 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Toplotni tok, ki se sprosti pri ohlajanju kerozena:

$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{c,t} - t_{d,t}) = 20\,000 \text{ kg/h} \cdot 2,47 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (90 - 200) \text{ K} =$$

$$\Phi = -1509 \text{ kW}$$

Topli tok, ki se porabi za segrevanje lahkega organskega olja:

$$\Phi = +1509 \text{ kW}$$

Iz podatkov lahko izračunamo končno oziroma ciljno temperaturo lahkega organskega olja:

$$\Phi (\text{olja}) = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{c,h} - t_{d,h})$$

$$1509 \text{ kW} = 70\,000 \text{ kg/h} \cdot 2,01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C}) (t_{c,h} - 40) \text{ °C}$$

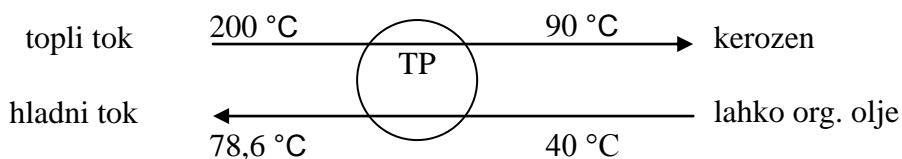
$$t_{c,h} = 78,6 \text{ °C}$$

ali:

$$(t_{c,h} - t_{d,h}) = \frac{\Phi}{q_m \cdot \bar{c}_p} = \frac{1509 \text{ kJ} \cdot \text{h} \cdot \text{kg} \cdot \text{K} \cdot 3600 \text{ s}}{\text{s} \cdot 70\,000 \text{ kg} \cdot 2,01 \text{ kJ} \cdot \text{h}} = 38,6 \text{ K} = 38,6 \text{ °C}$$

$$t_{c,h} - 40 \text{ °C} = 38,6 \text{ °C}$$

$$t_{c,h} = 38,6 \text{ °C} + 40 \text{ °C} = 78,6 \text{ °C}$$



$$\Delta T_{\text{povp.}} = \frac{(200 - 78,6) + (90 - 40)}{2} = 85,7 \text{ K}$$

$$\text{oziroma } \Delta_{\text{ln}} T = 81 \text{ K}$$

Ploščina prenosnika:

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{\text{povp.}}} = \frac{1509 \text{ kW m}^2 \text{ K}}{0,4 \text{ kW} \cdot 85,7 \text{ K}} = \mathbf{44 \text{ m}^2}$$

5. Naloga: Načrtovanje toplotnega prenosnika

Pri ločevanju večkomponentne mešanice v čiste komponente smo v eni destilacijski koloni v destilatu proizvedli čisti benzen v hlapih pri temperaturi rosišča $t_r = 80,1 \text{ °C}$ in normalnem tlaku. Za skladiščenje moramo benzen ohladiti vsaj na 20 °C . Za kondenzacijo in ohlajanje benzena bi v toplotnem prenosniku uporabili kot hladivo hladilno vodo z dobavno temperaturo $t_d = 15 \text{ °C}$ in bi jo segreli na maksimalno 30 °C .

- Koliko toplotnega toka moramo odvesti v hladilno vodo, če pridobimo na uro 100 kg benzena?
- Koliko hladilne vode potrebujemo?
- Kakšna bo ploščina toplotnega prenosnika?

Predpostavimo, da znaša toplotna prehodnost $K = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ in izparilna entalpija benzena $\Delta H_{\text{izp}} = 393 \text{ J/g}$!

Potek reševanja:

Benzen

$$t_{\text{d,t}} = 80,1 \text{ °C}$$

$$t_{\text{c,t}} = 20 \text{ °C}$$

$$q_m = 100 \text{ kg/h}$$

$$\Delta H_{\text{izp}} = 393 \text{ J/g}$$

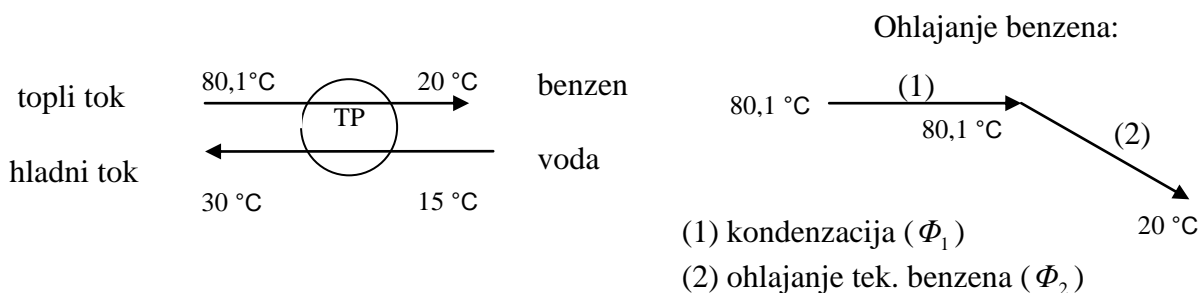
Voda:

$$t_{\text{d,h}} = 15 \text{ °C}$$

$$t_{\text{c,h}} = 30 \text{ °C}$$

$$K = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$q_m = ?$$



$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \rightarrow$ toplotni tok, ki se sprosti pri ohlajanju benzena.

$$\Phi = q_m \cdot \Delta H_{\text{kond}} + q_m \cdot \bar{c}_p(\text{tek.}) \cdot (T_{\text{c,t}} - T_{\text{d,t}}) = q_m \cdot \Delta H_{\text{kond}} + q_m \cdot \Delta H$$

Iz literature poiščite (Perry, 6th edition) podatek za \bar{c}_p :

$$c_p(20^{\circ}\text{C}) = 1,68 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$c_p(80,1^{\circ}\text{C}) = 1,953 \text{ J}/(\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

$$\bar{c}_p(\text{H}_2\text{O}) = 4,2 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$$

Na osnovi dveh eksperimentalnih točk po trapeznem pravilu izračunamo ΔH :

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = (T_2 - T_1) \cdot \frac{(c_{p1} + c_{p2})}{2} = (293 - 353,1) \text{ K} \cdot \frac{(1,68 + 1,953) \text{ J}}{\text{g} \cdot \text{K} \cdot 2}$$

$$\Delta H = -60,1 \cdot 1,817 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

$$\Delta H = -109,2 \frac{\text{J}}{\text{g}} = -109,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Sedaj lahko izračunate sproščen toplotni tok:

$$\Phi = 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (-393) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (-109,2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Phi = -39\,300 + (-10\,920) = -50\,220 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = -14 \text{ kW}$$

Toplotni tok se prenese v hladilno vodo:

$$q_m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{\Phi}{c_p(\text{H}_2\text{O}) \cdot \Delta T} = \frac{14\,000 \text{ J} \cdot \text{g} \cdot \text{K}}{\text{s} \cdot 4,2 \text{ J} \cdot 15 \text{ K}} = 223 \frac{\text{g}}{\text{s}} \rightarrow \text{masni pretok vode}$$

$$\Delta T_{\text{povp.}} = \frac{(80,1 - 30) + (20 - 15)}{2} = 27,55 \text{ K}$$

$$A = \frac{\Phi}{K \cdot \Delta T_{\text{povp.}}} = \frac{14\,000 \cdot \text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{s} \cdot 500 \cdot \text{J} \cdot 27,55 \text{K}} = 1 \text{ m}^2$$

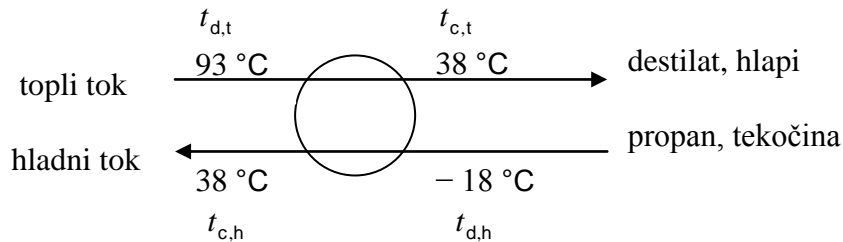
6. Naloga: Ohlajevanje destilata s propanom¹.

Hlape destilata (35° API) hladimo od 93 °C na 38 °C, pri čemer uporabljamo tekoči propan kot hladivo. Pri tem se propan segreje od -18 °C na 38 °C. Koliko kg/h destilata lahko ohladimo, če segrejemo 100 kg/h propana?

$$\bar{c}_p \text{ (35° API, hlapi)} = 2,142 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

$$\bar{c}_p \text{ (propan, tekočina)} = 2,604 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$$

Potek reševanja:



Potrební toplotni tok za segrevanje propana:

$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{c,h} - t_{d,h})$$

$$\Phi = 100 \text{ kg/h} \cdot 2,604 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \cdot (38 + 18) \text{ K} = 14\,582 \text{ kJ/h}$$

$$\Phi = 4\,050 \text{ W}$$

Pretok destilata, ki da ohladimo:

$$\Phi = q_m \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{c,t} - t_{d,t}) \Rightarrow q_m = \frac{\Phi}{\bar{c}_p \cdot (t_{c,t} - t_{d,t})} = \frac{-4050 \text{ J} \cdot \text{g} \cdot \text{K}}{\text{s} \cdot 2,142 \text{ J} \cdot (-55) \text{K}}$$

$$q_m = 34,4 \text{ g/s} = \mathbf{124 \text{ kg/h}}$$

¹ Rudd, D. F., Powers, G. J., Sirola, J. J. Process Synthesis, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.

7. Naloga: Določanje energetskih ciljev v VSK²

Določite energetske cilje v procesu z dvema toplima in dvema hladnima procesnima tokovoma. Prepostavimo, da je $\Delta_{\min}T = 10$ K. Narišite veliko sestavljeno krivuljo (VSK) in vršite pogonska sredstva!

Potrebni podatki:

t_d (hladilne vode) = 30 °C

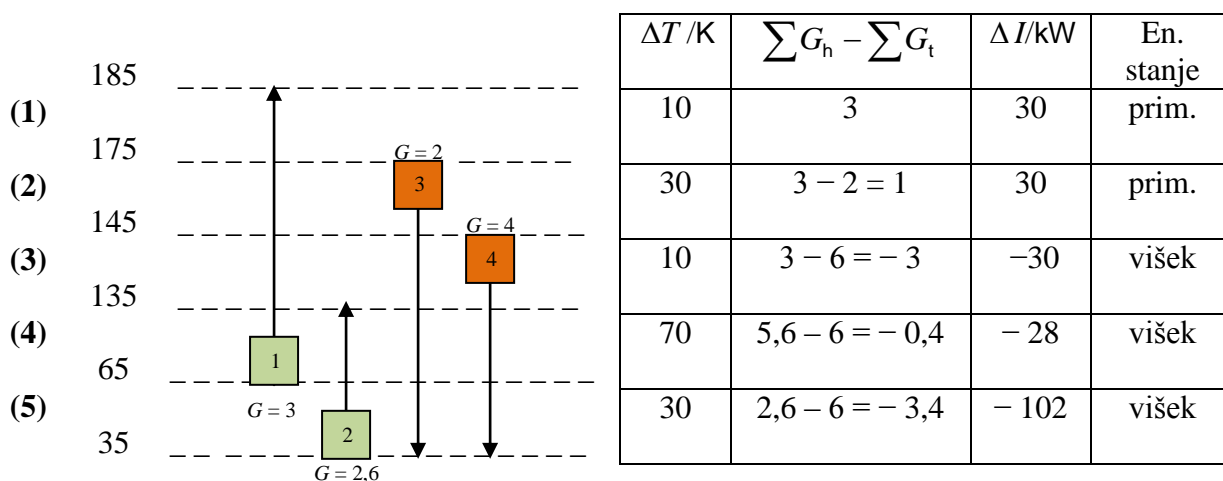
t_c (hladilne vode) = 50 °C

t (nasičene pare) = 258 °C

Štev. toka	Tip toka	t_d /°C	t_c /°C	G /(kW/K)
1	hladni	60	180	3,0
2	hladni	30	130	2,6
3	topli	180	40	2,0
4	topli	150	40	4,0

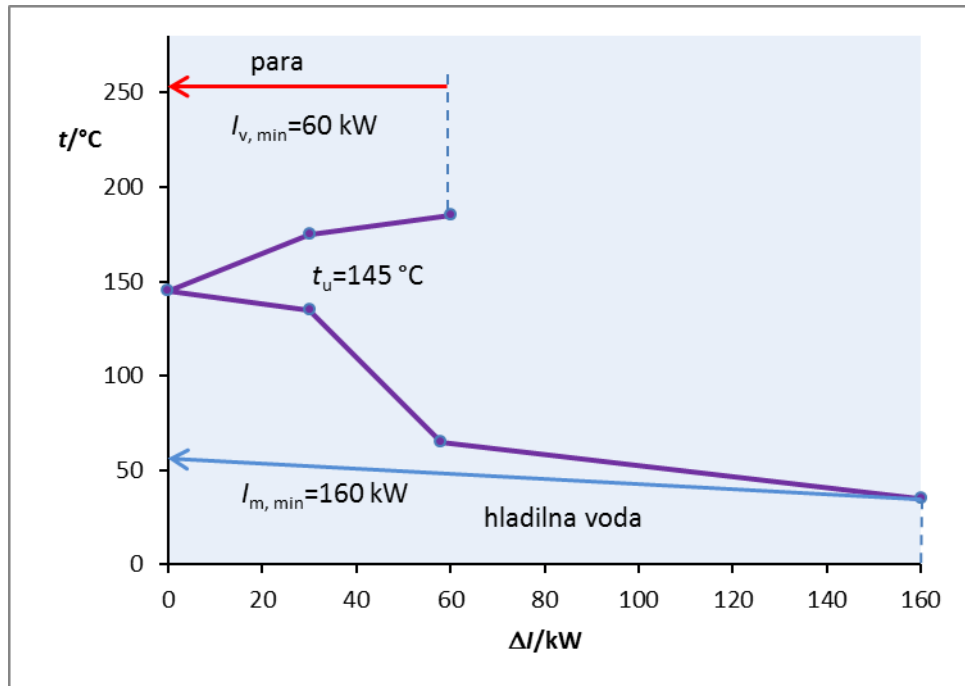
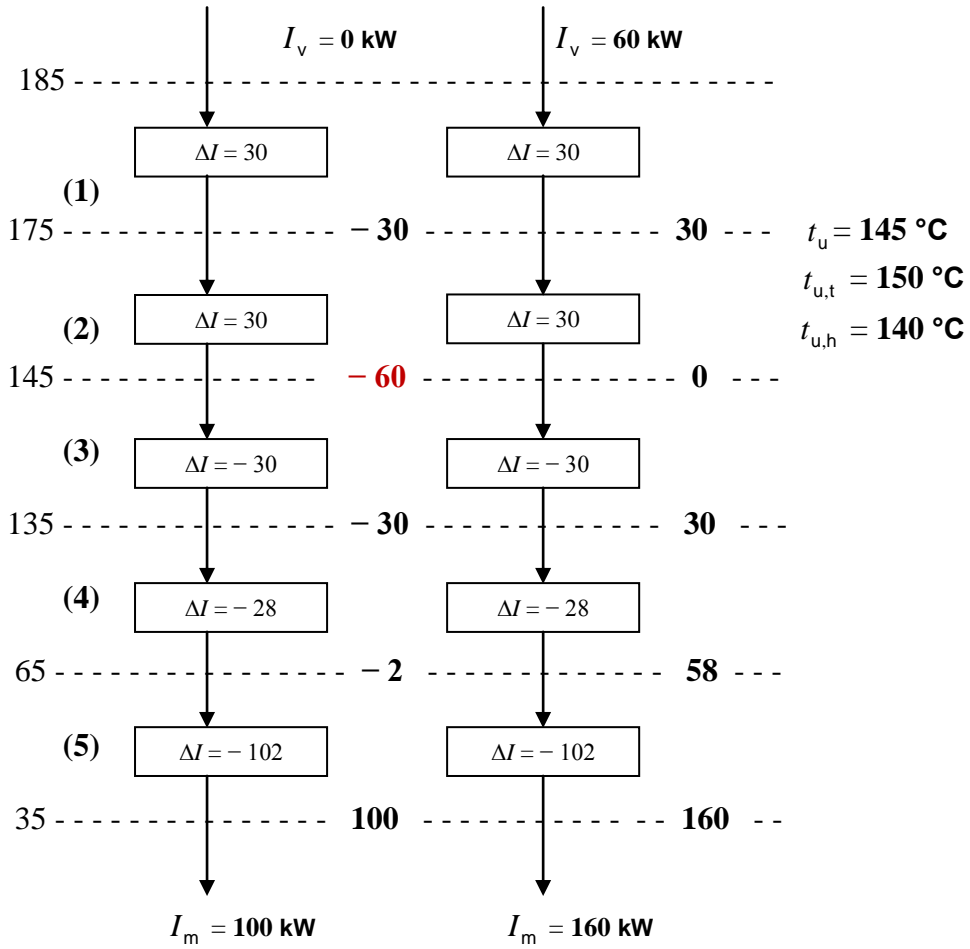
Potek reševanja:

Najprej pri hladnih tokovih prištejemo k dobavnim in ciljnim temperaturam $\frac{\Delta_{\min}T}{2}$, pri toplih tokovih te vrednosti odštejemo. Nato kreiramo temperaturno skalo, vršimo tople in hladne tokove, ter izračunamo neto energetsko stanje po temperaturnih intervalih.



Slika 6.1 prikazuje veliko sestavljeno krivuljo (VSK) z energetskimi cilji $I_{v,\min} = 60$ kW, $I_{m,\min} = 160$ kW ter $t_u = 145$ °C.

² Linnhoff, B. Townsend, D. W., Boland, D., Hewitt, G. F., Thomas, B. E. A., Guy, A. R., Marsland, R. H., A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, The Institution of Chemical Engineers, Rugby, 1982.



Slika 6.1: VSK z vrisanimi PS.

8. Naloga: Sestavljeni krivulji²

V procesu z dvema hladnima in dvema toplima procesnima tokovoma smo določili naslednje energetske cilje: $I_{\min,v} = 60 \text{ kW}$, $I_{\min,m} = 160 \text{ kW}$.

Narišite sestavljeni krivulji toplih in hladnih procesnih tokov in določite:

- $\Delta_{\min} T$ pri omenjenih energetskih ciljih,
- temperaturo uščipa, t_u in
- število teoretičnih toplotnih prenosnikov, ki jih določite iz sestavljenih krivulj hladnih in toplih procesnih tokov.

Podatki:

$t_d(\text{vode}) = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_c(\text{vode}) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t(\text{pare}) = 258 \text{ }^\circ\text{C}$.

Št. toka	Tip toka	$t_d / ^\circ\text{C}$	$t_c / ^\circ\text{C}$	$G / (\text{kW/K})$
1	hladni	60	180	3,0
2	hladni	30	130	2,6
3	topli	180	40	2,0
4	topli	150	40	4,0

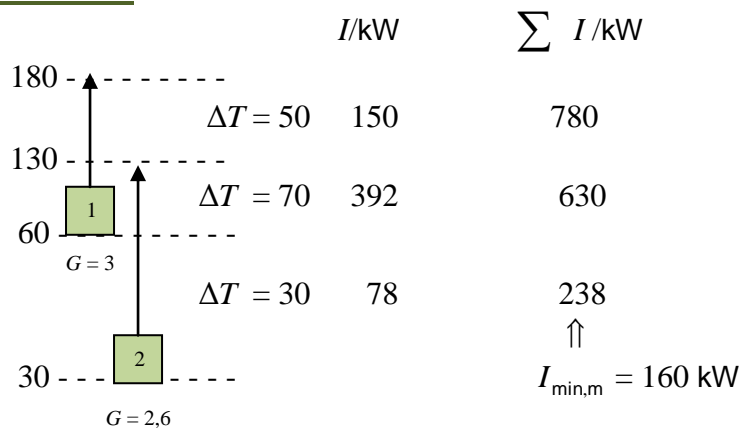
Potek reševanja:Podatki:

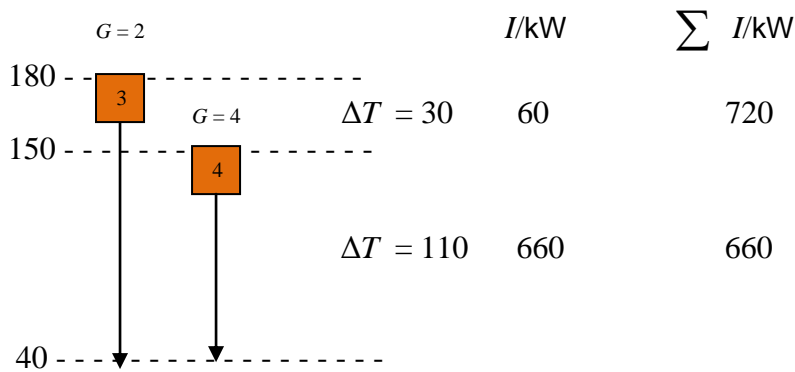
$I_{\min,v} = 60 \text{ kW}$ $t_d(\text{h.v.}) = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 $I_{\min,m} = 160 \text{ kW}$ $t_c(\text{h.v.}) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
 $t(\text{pare}) = 258 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta_{\min} T = ?$$

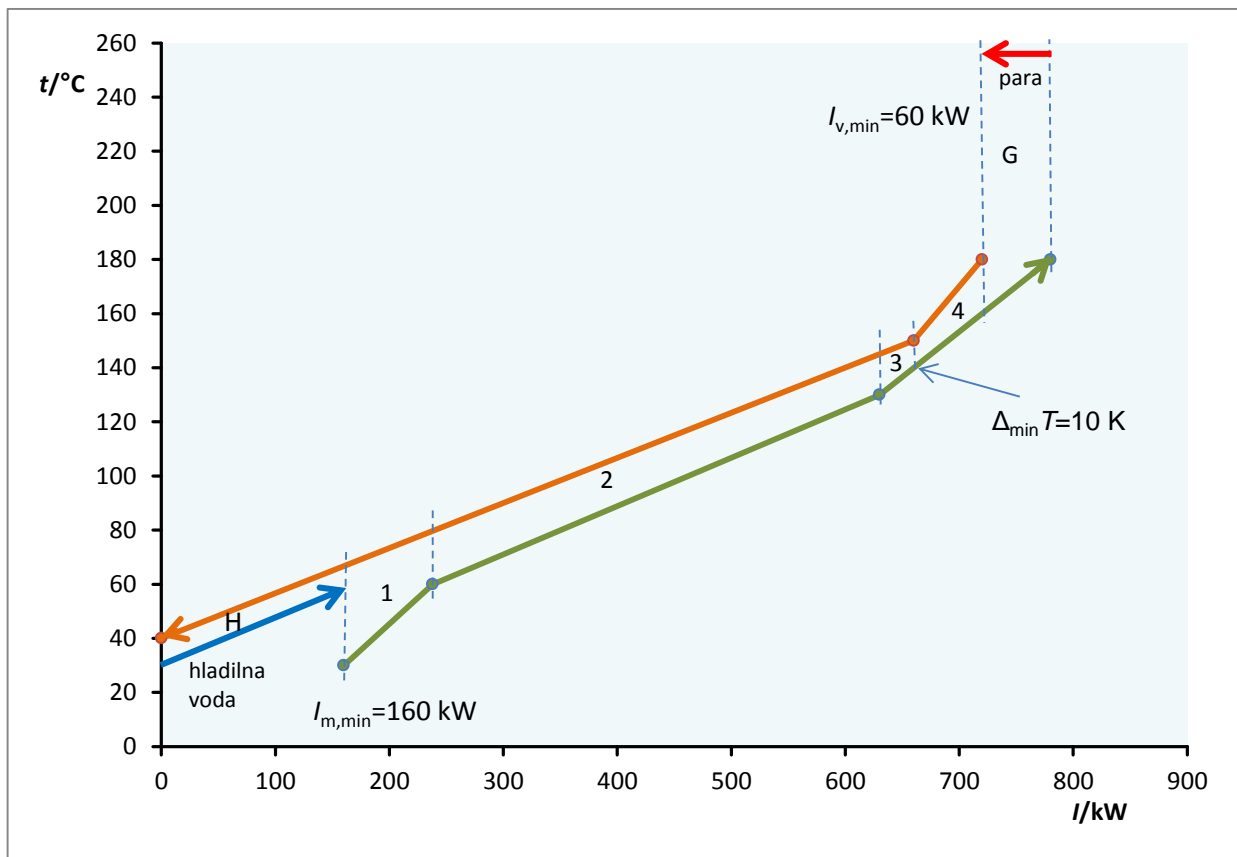
$$t_u = ?$$

$$N_{\min} = ?$$

Hladni tokovi

Topli tokovi

Narišemo sestavljene krivulje, SK toplih in hladnih tokov ter določimo teoretično število TP (slika 6.2).



Slika 6.2: Sestavljene krivulje s teoretičnim številom TP.

Teoretično število procesnih enot:

- 4 TP
- 1 grelnik, 1 hladilnik

$$t_u = 145 \text{ °C}$$

$$t_{u,t} = 150 \text{ °C}$$

$$t_{u,h} = 140 \text{ °C}$$

9. Naloga: Mrežni diagram I²

Z uščipno analizo smo ugotovili, da ima proces z dvema toplima in dvema hladnima procesnima tokovoma pri $\Delta_{\min}T = 10$ K, uščip pri $t_u = 145$ °C. Podatki za tokove so naslednji:

Št. toka	Tip toka	t_d /°C	t_c /°C	G /(kW/K)
1	hladni	60	180	3,0
2	hladni	30	130	2,6
3	topli	180	40	2,0
4	topli	150	40	4,0

Za hlajenje v hladilnikih uporabimo hladilno vodo s $t_{d,H_2O} = 30$ °C. Voda se lahko segreje maksimalno na 50 °C. Za segrevanje v grelnikih (če so potrebni uporabimo nasičeno paro pri $t = 258$ °C. Narišite mrežni diagram in določite možne stike med procesnimi tokovi in pogonskimi sredstvi, če pri tem upoštevate pravila ob uščipu!

Potek reševanja:**Podatki:**

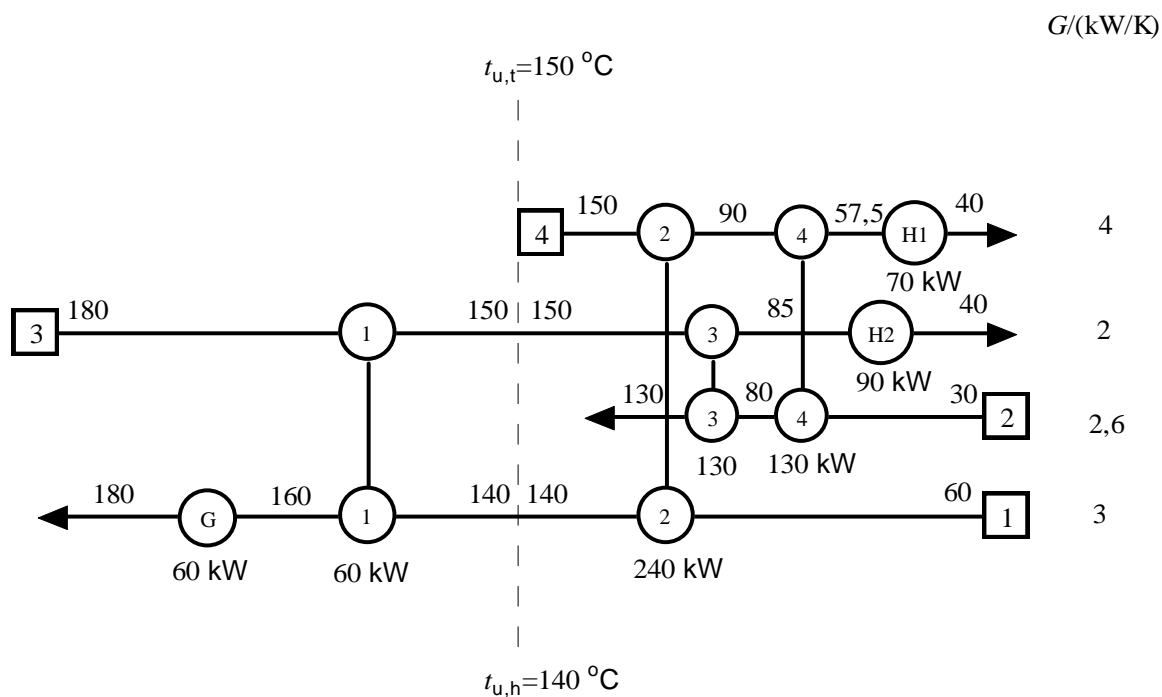
$$\Delta_{\min} T = 10 \text{ K}$$

$$t_u = 145 \text{ °C}$$

$$t_d \text{ (h.v.)} = 30 \text{ °C}$$

$$t_c \text{ (h.v.)} = 50 \text{ °C}$$

$$t \text{ (pare)} = 258 \text{ °C}$$

Mrežni diagram:

10. Naloga: Energetski cilji v VSK

V procesu pridobivanja benzena so v OTP prisotni 3 hladni in 4 topli procesni tokovi. Podatki za te tokove so naslednji:

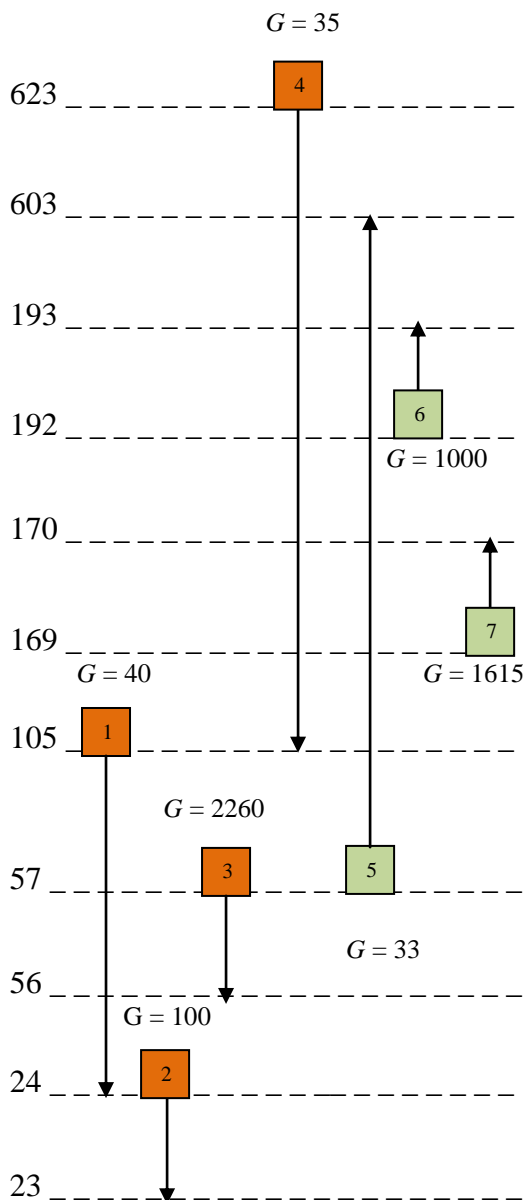
Št. toka	Tip	t_d /°C	t_c /°C	G /(kW/K)
1	topli	115	34	40
2	topli	34	33	100
3	topli	67	66	2260
4	topli	633	115	35
5	hladni	47	593	33
6	hladni	182	183	1000
7	hladni	159	160	1615

Določite energetske cilje pri $\Delta_{\min}T = 20$ K ! Določite temperaturo uščipa! Narišite veliko sestavljeno krivuljo in označite področje, kjer proces sam pokriva energetske potrebe!

Potek reševanja:

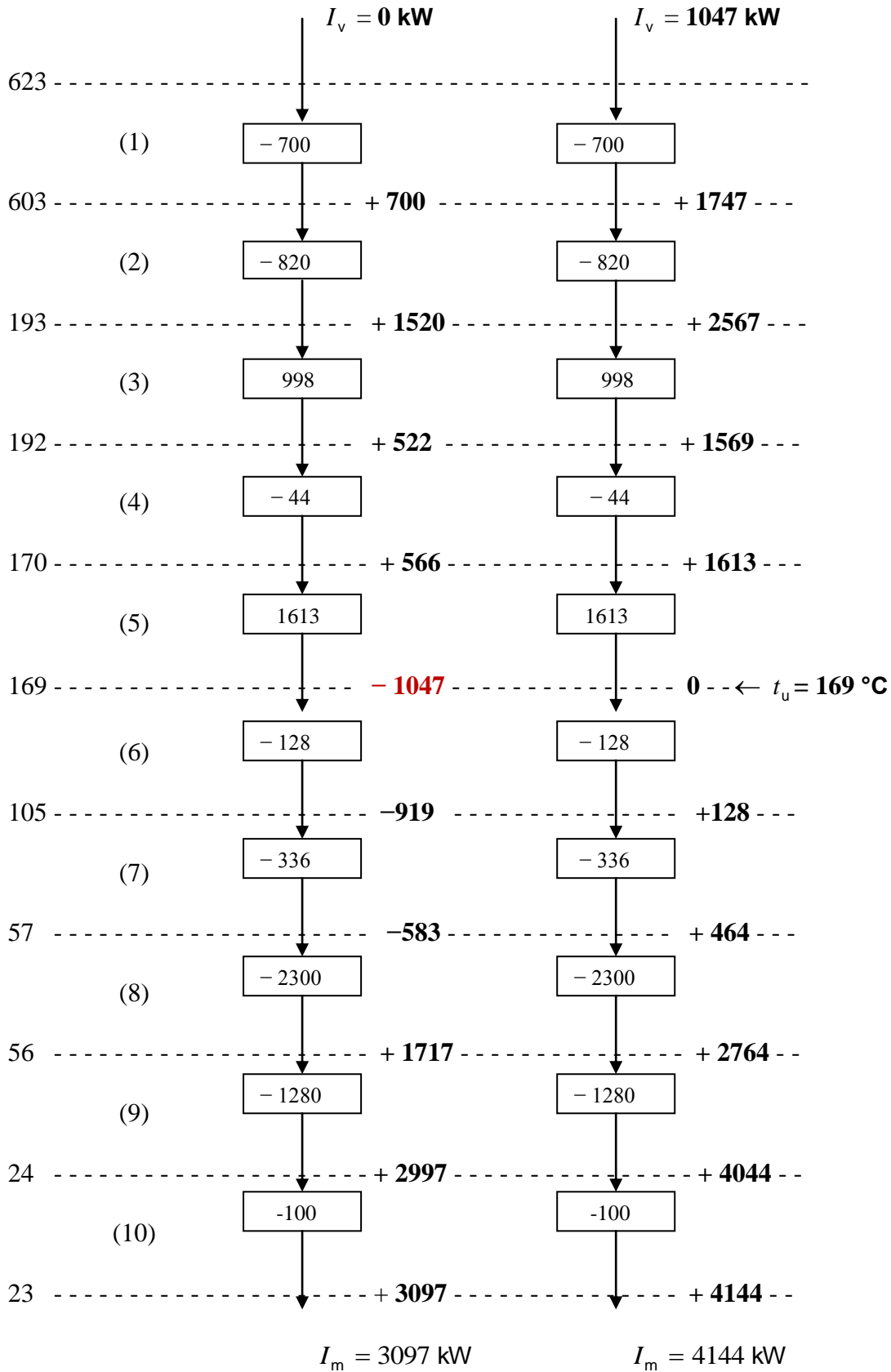
Najprej kreiramo problemsko tabelo.

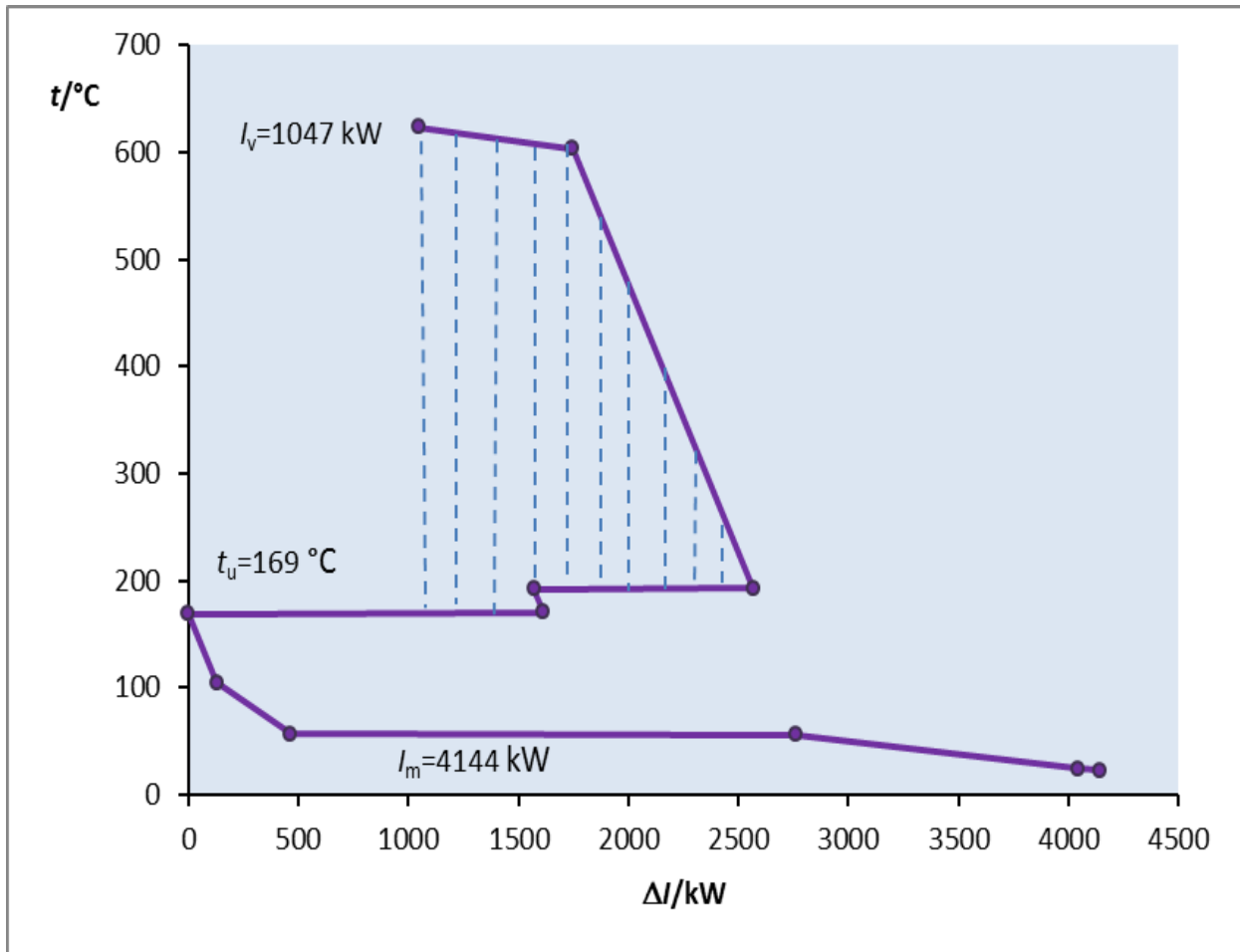
- Pri hladnih tokovih prištejemo k dobavnim in ciljnim temperaturam $\frac{\Delta_{\min}T}{2}$, pri toplih tokovih te vrednosti odštejemo.
- Nato kreiramo temperaturno skalo,
- vrišemo tople in hladne tokove ter
- izračunamo neto energetske stanje po temperaturnih intervalih.
- Določimo ničelni toplotni tok,
- določimo energetske cilje in
- temperature uščipa.
- Narišemo VSK (slika 6.3).



Int.	$\Delta T/K$	$\sum G_h - \sum G_t$	$\Delta I/kW$	Stanje
1	20	- 35	- 700	V
2	410	- 2	- 820	V
3	1	998	998	P
4	22	- 2	- 44	V
5	1	1613	1613	P
6	64	- 2	- 128	V
7	48	- 7	- 336	V
8	1	- 2300	- 2300	V
9	32	- 40	- 1280	V
10	1	-100	-100	V

V – višek
P – primankljaj





Slika 6.3: Prikaz velike sestavljene krivulje VSK.

11. Naloga: Določanje energetskih ciljev v VSK

Za problem z dvema hladnima in dvema toplima procesnima tokovima določite:

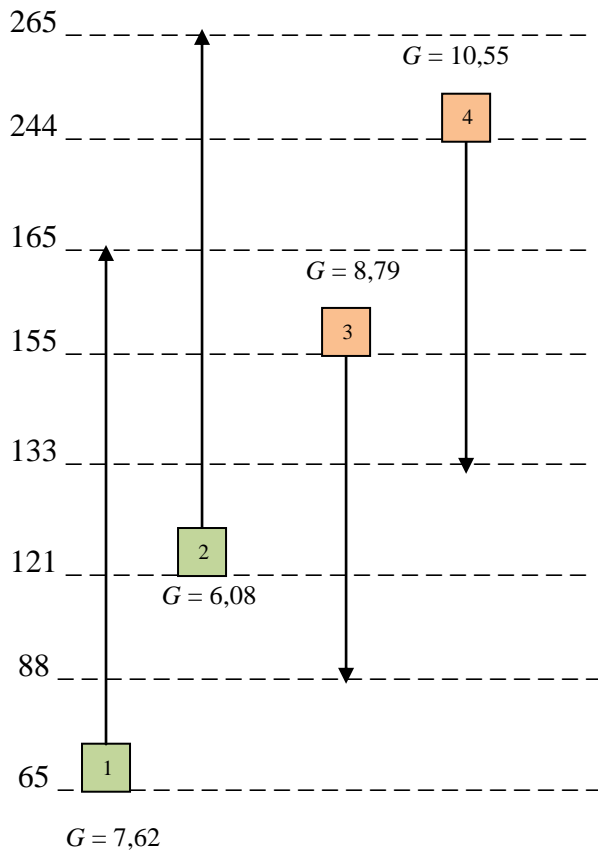
- energetske cilje pri $\Delta_{\min} T = 10 \text{ K}$ in $t_u!$
- narišite VSK in locirajte mrzlo pogonsko sredstvo in predvidite najnižji možni nivo vročega pogonskega sredstva!

Št. toka	$G / (\text{kW/K})$	$t_d / ^\circ\text{C}$	$t_c / ^\circ\text{C}$	tip toka
1	7,62	60	160	hladni
2	6,08	116	260	hladni
3	8,79	160	93	topli
4	10,55	249	138	topli

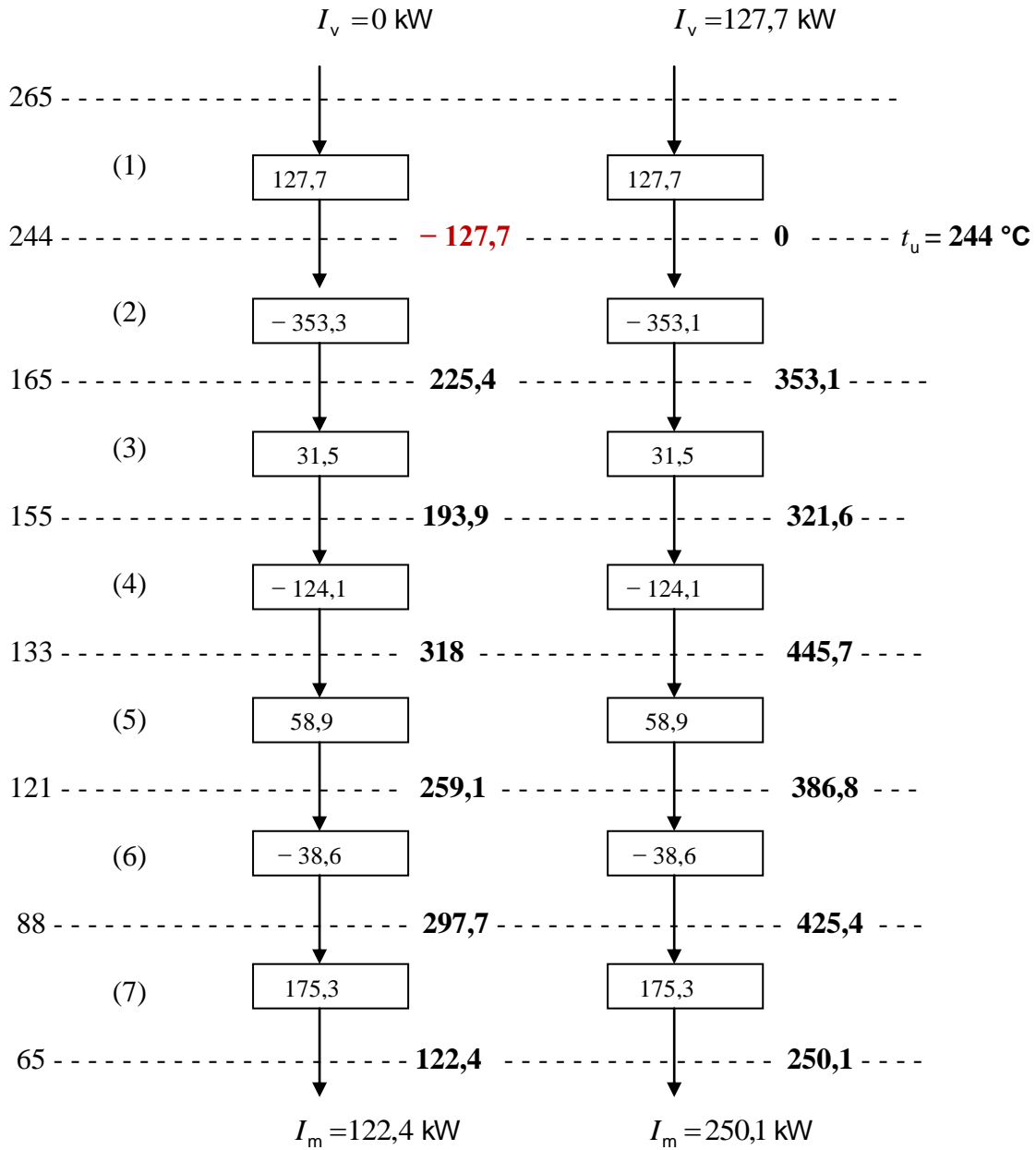
$$t_d(\text{H}_2\text{O}) = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

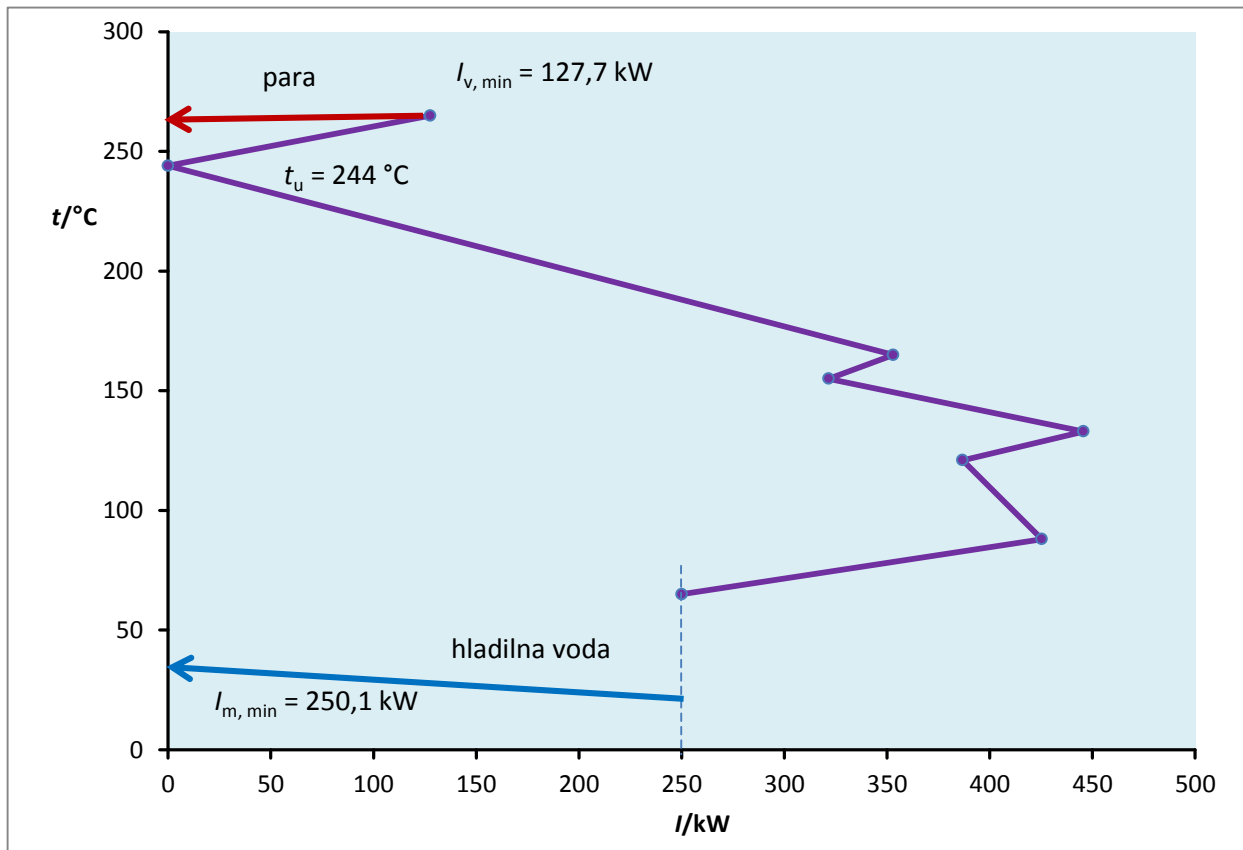
$$t_c(\text{H}_2\text{O}) = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kreirajte problemsko tabelo:



Int.	$\Delta T/K$	$\sum G_h - \sum G_t$	$\Delta I/kW$	Stanje
1	21	6,08	127,7	P
2	79	- 4,47	- 353,1	V
3	10	3,15	31,5	P
4	22	- 5,64	- 124,1	V
5	12	4,91	58,9	P
6	33	- 1,17	- 38,6	V
7	23	7,62	175,3	P





Slika 6.4: VSK z energetskimi cilji in vrisanimi PS.

Najnižji nivo pare je $t_{\text{pare}} = 270 \text{ °C}$.

12. Naloga: Mrežni diagram II

Imamo proces z dvema toplima in dvema hladnima procesnima tokovima. Osnovne podatke prikazuje preglednica. Pri analizi tokov z uščipno metodo je bilo ugotovljeno, da dobimo pri izbrani $\Delta_{\min} T = 10 \text{ K}$ uščip $t_u = 244 \text{ °C}$ (t_u hladnega dela $t_{u,h} = 239 \text{ °C}$ in t_u toplega dela $t_{u,t} = 249 \text{ °C}$). Energetski cilji so: $I_v = 127,7 \text{ kW}$ in $I_m = 250,1 \text{ kW}$. Iz znanih podatkov narišite mrežni diagram in poiščite stike med tokovnicami po pravilih uščipa tako, da zadostite izračunanim energetskim ciljem!

Št. toka	$G \text{ / (kW/K)}$	$t_d \text{ / °C}$	$t_c \text{ / °C}$	tip toka
1	7,62	60	160	hladni
2	6,08	116	260	hladni
3	8,79	160	93	topli
4	10,55	249	138	topli

Potek reševanja:

Podatki:

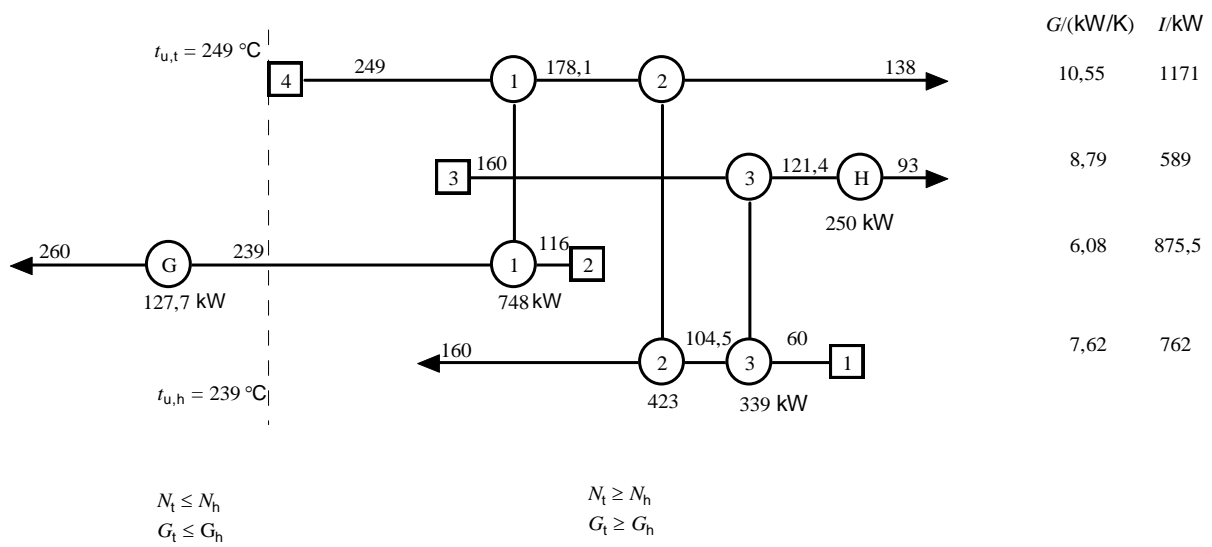
$$\Delta_{\min} T = 10 \text{ K}$$

$$t_u = 244 \text{ }^\circ\text{C}, t_{u,t} = 249 \text{ }^\circ\text{C}, t_{u,h} = 239 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_v = 127,7 \text{ kW}$$

$$I_m = 250,1 \text{ kW}$$

Mrežni diagram:



7. Ovrednotenje investicije in obratovalnih stroškov

1. Naloga: Nakupna cena TP

Določite nakupno ceno toplotnega prenosnika v letu 1995 z nameščenimi cevmi v U-obliki. Ploščina prenosnika je 840 m^2 , delovni tlak je 27,6 bar. Tako plašč kot cevi morajo biti iz nerjavečega jekla.

Potek reševanja:

Podatki:

TP, nerjaveče jeklo, U – cevi

$$A = 840 \text{ m}^2$$
$$p = 27,6 \text{ bar}$$
$$C_n ?$$

Podatki za korekcijske faktorje:

$$F_d = 0,85$$

$$F_m = 4,5$$

$$F_p = 0,25$$

Izračun skupnega korekcijskega faktorja:

$$F_c = (F_d + F_p) \cdot F_m = 4,95$$

$$M \& S (1995) = 1027,5$$

Ker je $A > 470 \text{ m}^2$, osnovno ceno odčitamo iz grafa:

$$C_0 = 39\,000 \text{ USD}$$

$$C_n = 39\,000 \cdot 4,95 \cdot \frac{1027,5}{280} = 708\,400 \text{ USD}$$

2. Naloga: Cena vgrajenega gorilnika

Določite ceno vgrajenega cilindričnega grelnika z direktnim segrevanjem (gorilnik) v letu 1990. Postavitev v procesu je vertikalna, med obratovanjem se sprošča 3520 kW toplotnega toka. Cevi so iz kroma, obratovalni tlak je 69 bar.

Potek reševanja:

Podatki:

gorilnik, vertikalni, kromirane cevi, cilindrični

$$\Phi = 3520 \text{ kW}$$

$$p = 69 \text{ bar}$$

$$M \& S (1990) = 915,1$$

$$C_i = ?$$

Podatki za korekcijske faktorje:

$$F_p = 0,15$$

$$F_m = 0,45$$

$$F_d = 1,0$$

$$F_g = 2,23$$

Izračun skupnega korekcijskega faktorja:

$$F_c = F_d + F_m + F_p = 1,0 + 0,45 + 0,15 = 1,6$$

Izračun osnovne cene:

$$C_0 = 14\,400 \cdot \Phi^{0,85} = 42\,000 \text{ USD}$$

Cena vgrajenega gorilnika:

$$C_i = C_0 \cdot R(M \& S) \cdot (F_g + F_c - 1)$$

$$C_i = 42\,000 \cdot \frac{915,1}{280} \cdot (2,23 + 1,6 - 1) = 388\,500 \text{ USD}$$