

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za kemijo in kemijsko tehnologijo*



ZBIRKA NALOG

ZA ŠTUDENTE KEMIJSKE TEHNOLOGIJE

Tina SKALAR in Boštjan GENORIO

Ljubljana, 2022

## **OSNOVE INDUSTRIJSKE KEMIJE — Zbirka nalog**

*Avtorja:* doc. dr. Tina Skalar, izr. prof. dr. Boštjan Genorio

*Strokovni pregled:* prof. dr. Marjan Marinšek, izr. prof. dr. Aleš Ručigaj

*Oblikovanje in prelom:* doc. dr. Tina Skalar, izr. prof. dr. Boštjan Genorio

*Slike in risbe:* doc. dr. Tina Skalar, izr. prof. dr. Boštjan Genorio

*Naslovnica:* doc. dr. Tina Skalar

*Jezikovni pregled:* Alenka Klemenc

*Urednica založbe:* dr. Barbara Modec

© (2022) Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

*Založila:* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

*Za založbo:* prof. dr. Andreja Žgajnar Gotvajn

1. spletna izdaja

Ljubljana, 2022

Vse pravice pridržane.

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

COBISS.SI-ID 103082243

Način dostopa (URL): [https://www.fkkt.uni-lj.si/fileadmin/datoteke/1-O\\_fakulteti/7-Založba/Knjigarna/Zbirka\\_nalog-kem\\_tehnologija-2022-Skalar-Genorio.pdf](https://www.fkkt.uni-lj.si/fileadmin/datoteke/1-O_fakulteti/7-Založba/Knjigarna/Zbirka_nalog-kem_tehnologija-2022-Skalar-Genorio.pdf)

ISBN 978-961-7078-23-7 (PDF)

# PREDGOVOR

---

Dragi bodoči tehnolog!

Delo tehnologa ni lahko, začetna zagnanost se upočasni ob prvih izzivih pri delu. Na predavanjih in vajah običajno vse poteka tekoče ter predvidljivo. Tako vam damo napačen vtis, da mora tudi pri vašem samostojnem delu potekati vse tako gladko. Včasih se boste vprašali, ali je delo, ki ga opravljate, smiselno in pomembno. Odženite pesimizem in se spomnite zmogljivosti, ki jih imate, tudi takih, ki ste jih usvojili pri tem predmetu. Na koncu boste spoznali, da ni bil pomemben cilj, ampak pot. Pot bo tisto, iz česar se boste največ naučili.

A pot se mora nekje začeti, z osnovami, dobro postavljenimi temelji, ki jih boste ustvarjali pri različnih predmetih. Zbirka nalog je bila zasnovana tako, da vas usmeri v študij osnov računanja industrijskih problemov. Razdeljena je na dva dela, prvo poglavje obsega pretvorbe količin, zgradbo snovi, plinske zakone, raztopine, bilance in elektrokemijo. Nadaljnje znanje boste dopolnili z nekaterimi realnimi problemi v industriji, kot so Haber-Boschev, Solvayev, Ostwaldov, Clausov proces, parni reforming ter ostalimi procesi, ki jih srečamo v kemijski industriji in so predstavljeni v drugem delu.

Upava, da boste uspešno in vztrajno premagovali pot reševanja izzivov v tej zbirki nalog. Naj vam ta pot ostane v spominu tudi pri kasnejšem delu.

Avtorja

# KAZALO

---

<b>1. OSNOVNI PRINCIPI REŠEVANJA NALOG V INDUSTRIJSKI KEMIJI .....</b>	<b>9</b>
1.1 PRETVORBE .....	9
1.2 ZGRADBA SNOVI (IZKORISTKI, KONCENTRACIJE, GOSTOTA, POROZNOST) .....	10
1.3 PLINSKI ZAKONI .....	16
1.4 RAZTOPINE .....	20
1.5 BILANCE .....	21
1.6 ELEKTROKEMJA .....	24
<b>2. REALNI PROBLEMI V INDUSTRIJSKI KEMIJI .....</b>	<b>25</b>
2.1 HABER-BOSCHEV PROCES .....	25
2.2 SOLVAYEV POSTOPEK .....	28
2.3 OSTWALDOV PROCES .....	33
2.4 CLAUSOV PROCES .....	35
2.5 PARNI REFORMING .....	36
2.6 OSTALI PROCESI .....	37
<b>3. REŠITVE .....</b>	<b>41</b>
1.1 PRETVORBE .....	41
1.2 ZGRADBA SNOVI .....	41
1.3 PLINSKI ZAKONI .....	43
1.4 RAZTOPINE .....	44
1.5 BILANCE .....	45
1.6 ELEKTROKEMJA .....	46
2.1 HABER BOSCHEV POSTOPEK .....	46
2.2 SOLVAYEV POSTOPEK .....	46
2.3 OSTWALDOV POSTOPEK .....	47
2.4 CLAUSOV POSTOPEK .....	47
2.5 PARNI REFORMING .....	47
2.6 OSTALI PROCESI .....	47

# ENOTE IN PRETVORBE

---

## Osnovne enote SI

Fizikalna veličina	Ime enote	Simbol
dolžina	meter	<i>m</i>
masa	kilogram	<i>kg</i>
čas	sekunda	<i>s</i>
električni tok	amper	<i>A</i>
temperatura	kelvin	<i>K</i>
svetilnost	kandela	<i>cd</i>
množina snovi	mol	<i>mol</i>

## Izpeljane enote

Fizikalna veličina	Ime enote	Simbol in definicija
sila	newton	N [ $\text{kg m s}^{-2} = \text{J m}^{-1}$ ]
energija, toplota	joule	J [ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ]
moč	watt	W [ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} = \text{J s}^{-1}$ ]
električni naboj	coulomb	C [A s]
napetost	volt	V [ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-1} = \text{J A}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]
električni upor	ohm	$\Omega$ [ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2} = \text{V A}^{-1}$ ]
električna kapaciteta	farad	F [ $\text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{A s V}^{-1}$ ]

## **Večkratniki in manjkratniki enot**

<b>Večkratnik/manjkratnik</b>	<b>Predpona</b>	<b>Simbol</b>
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hekto	h
10	deka	da
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	mili	m
$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	piko	p

### **Konstante, pomembni podatki**

Avogadrova konstanta ( $N_A$ ) =  $6,022 \cdot 10^{23}$  delcev mol<sup>-1</sup>

Plinska konstanta ( $R$ ) =  $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Faradayeva konstanta ( $F$ ) =  $96485,3399 \text{ C mol}^{-1}$

Molska prostornina idealnega plina p.n.p. ( $V_m^{pnp}$ ) =  $2,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$

1 kalorija ( $cal$ ) =  $4,184 \text{ J}$

Normalni pogoji (p.n.p.):  $T = 273,15 \text{ K}$ ,  $p = 101,3 \text{ kPa}$

1 atmosfera (atm) =  $760 \text{ torr}$  ( $\sim 760 \text{ mm Hg}$ ) =  $101\,325 \text{ N m}^{-2}$  (Pa) =  $1,013 \text{ bar}$

1 ångström = ( $\text{Å}$ ) =  $10^{-10} \text{ m}$

1ft =  $0,3048 \text{ m}$

1 funt (ang. pound – lb) =  $0,4536 \text{ kg}$

1 inča = 1 cola (") =  $2,54 \text{ cm}$

1 psi (funt na kvadratni palec) =  $6,895 \cdot 10^3 \text{ Pa}$

1 kWh (kilovatna ura) =  $3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$

# PERIODNI SISTEM ELEMENTOV

vir: <https://sciencenotes.org/printable-periodic-table/>

Periodic Table of the Elements

1	2											18					
1	2											18					
3	4											10					
5	6	7	8	9	10	11	12					17					
13	14	15	16	17	18							36					
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			

- Alkali Metal
- Alkaline Earth
- Transition Metal
- Basic Metal
- Semimetal
- Nonmetal
- Halogen
- Noble Gas
- Lanthanide
- Actinide
- rare earth element
- metalloid



## 1. OSNOVNI PRINCIPI REŠEVANJA NALOG V INDUSTRIJSKI KEMIJI

### 1.1 PRETVORBE

1.1.1 Izrazite dolžino 1 m v naslednje enote; a) Å, b) nm, c) in.

1.1.2 Kolikšna je debelina nerjavne 316L plinske cevi v mm, če je ID (ang. inner diameter) 0,12 in ter OD (ang. outer diameter) ¼ in?

1.1.3 Pretvori a) 900 sq. ft (ang. square foot) v m<sup>2</sup> ter b) 10 cm<sup>2</sup> v nm<sup>2</sup>.

1.1.4 Koliko a) atm, b) psi, c) bar, d) kPa je 10.000 N m<sup>-2</sup>?

1.1.5 Pretvori 100 mmHg v naslednje enote; a) mbar in b) torr.

1.1.6 Izrazi delež 0,0060 v %, promilih, ppm in ppb.

1.1.7 Analitiki so ugotovili, da je v vzorcu hidroliznih kali TiO<sub>2</sub> prisotnih 60 ppm bakra. Koliko µg bakra je v 45 g vzorca?




1.1.8 V stanovanjski hiši mesečno porabijo 550 kWh energije. Koliko J je to?

1.1.9 En gram maščobe ima energijsko vrednost 9 kcal, en gram beljakovin 4 kcal. Koliko energije (v kJ) zaužijemo, če pojemo 9 g maščob in 7 g beljakovin? Koliko časa bi morali kolesariti, če bi želeli to energijo porabiti? Kolesarimo s povprečno hitrostjo 25 km h<sup>-1</sup> in 100 W. Koliko kilometrov prevozimo?

1.1.10 Kolikšna je prostornina 5,6 10<sup>8</sup> µg železa z gostoto 7874 kg m<sup>-3</sup>? Rezultat izrazite v m<sup>3</sup>, dm<sup>3</sup>, mm<sup>3</sup>, mm<sup>3</sup> in nm<sup>3</sup>.

## 1.2 ZGRADBA SNOVI (IZKORISTKI, KONCENTRACIJE, GOSTOTA, POROZNOST)

Poroznost in gostota sta tesno povezana pojma. Materiali imajo različne gostote in poroznosti že zaradi različne sestave, lahko pa se razlikujejo tudi zaradi nadaljnje obdelave in se tako razlikujejo še zaradi različnega volumna in vrste por. Tako govorimo o neporoznem materialu, odprti in zaprti poroznosti. Poznamo dejanski oziroma resnični volumen, navidezni volumen in geometrijski oziroma ang. bulk volumen.

	VOLUMEN	POROZNOST	GOSTOTA ( $\rho$ ), POROZNOST ( $P$ )
	TEORETIČNI, DEJANSKI oz. RESNIČNI	neporozen material	$\rho_{teor.} = \frac{m}{V_{materiala}}$ $P_{teor.} = 0$
	NAVIDEZNI	samo zaprte pore	$\rho_{navid.} = \frac{m}{V_{materiala} + V_{zap.pore}}$ $P_{nav.} = 1 - \frac{\rho_{navid.}}{\rho_{teor.}}$
	GEOMETRIJSKI oz. TOTALNI, ang. BULK	zaprte + odprte pore	$\rho_{geom.} = \frac{m}{V_{materiala} + V_{zap.pore} + V_{odpr.pore}}$ $P_{geom.} = 1 - \frac{\rho_{geom.}}{\rho_{teor.}}$

1.2.1 Izračunaj maso 10 000 molekul metana. Rezultat izrazi v  $\mu\text{g}$ .

1.2.2 Kisik ima v naravi tri izotope, in sicer:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  in  $^{18}\text{O}$ . Delež prvega je 99,76 ut.%, drugega 0,04 ut.% in tretjega 0,20 ut.%. Izračunaj relativno atomsko maso.

1.2.3 Kolikšen je masni delež železa (Fe) v ut.% v mineralu magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )?

1.2.4 Izračunaj povprečno molsko maso zraka v sestavi vol.%:

<b>Dušik</b>	$\text{N}_2$	78,080 %
<b>Kisik</b>	$\text{O}_2$	20,946 %
<b>Argon</b>	Ar	0,9329 %
<b>Ogljikov dioksid</b>	$\text{CO}_2$	0,04 %
<b>Neon</b>	Ne	0,0011 %

**1.2.5** a) Izračunaj stopnjo mletja (kvocient karakterističnih dimenzij pred in po mletju), če smo sferične delce povprečnega premera 10 mm zdobili na povprečen premer 10  $\mu\text{m}$  (oba premera glede na volumsko porazdelitev). b) Ali gre za grobo ali fino mletje? c) Izračunaj tudi, za kolikokrat se je povečala površina, če smo zmleli 100 kg delcev z gostoto 2800  $\text{kg m}^{-3}$ .

**1.2.6** V pivu imamo 4,9 vol.% etanola (ostalo je voda). Koliko je to a) masnih in koliko b) množinskih odstotkov? Koliko mililitrov čistega etanola je 0,5 L takega piva? Gostota etanola je 789  $\text{g L}^{-1}$ , gostota vode pa 1000  $\text{g L}^{-1}$ .

**1.2.7** Določi formulo spojine, če ta vsebuje 40 ut.% Ca, 48 ut.% O in 12 ut.% C.

**1.2.8** Koliko mililitrov vode in koliko gramov brezvodnega ostanka nastane pri žganju 0,234 kg modre galice ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )? Izkoristek procesa je 100%.

**1.2.9** Pri pripravi jabolčnega soka stiskamo sadje tako dolgo, da ostanek vsebuje le še 5 ut.% soka po stiskanju. Koliko kg svežega sadja moramo stisniti, če želimo dobiti 200 L soka? Sveže sadje vsebuje 87 ut.% soka.  $\rho_{(\text{soka}) (25^\circ\text{C})} = 1,05 \text{ kg dm}^{-3}$

**1.2.10** V papirnici izdelujejo papir z gramaturo 60  $\text{g m}^{-2}$  in debelino 100  $\mu\text{m}$ . Na koncu proizvodne enote se papir navija na cilinder dolžine 2,5 m. Vsakih 5 tekočih metrov nastane 0,05 kg odpadka. Kolikšen delež glede na končno proizveden papir predstavlja odpadek? Izračunajte tudi gostoto papirja.

**1.2.11** Na embalaži kemikalije piše, da snov vsebuje 71,5 ut.% kobalta. Izračunajte delež kobaltovega oksida v kemikaliji, če je kobalt prisoten le kot kobaltov (II, III) oksid ( $\text{CoO} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$ ).

**1.2.12** Nanometrski delci železa se uporabljajo za izdelavo zlitine Fe-Pt. Izračunaj, koliko atomov je v enem sferičnem delcu Fe s premerom 3 nm.  $\rho_{(\text{Fe})} = 7,874 \text{ g cm}^{-3}$ .

**1.2.13** LPG je mednarodna oznaka za utekočinjen naftni plin (*ang. Liquefied Petroleum Gas*) s komercialno sestavo: zmes propan-butan (> 99 vol.%), 1,3-butadien (< 0,1 vol.%), metanol (< 0,125 vol.%) in etantiol (< 0,005 vol.%). Etantiol je dodatek LPG za zaznavanje vonja. Človek lahko zazna 1 molekulo etantiola v 2,8 milijardah molekulah zraka. Ali lahko zaznaš plin LPG v sobi, dimenzij 5m x 4 m x 2,8 m, če je delež LPG v sobi 0,001 vol.%? Podaj koncentracijo etantiola v sobi v  $\mu\text{L m}^{-3}$ .

**1.2.14** V prebitni kisikovi atmosferi popolnoma izgori 40 kg metana. Izračunaj povprečno molsko maso plinske zmesi po reakciji, če veš, da je bil množinski delež kisika pred njo 1,75-krat večji kot po njej. Vsi produkti izgorovanja so plini.

**1.2.15** V plinski fazi pri temperaturi nad 150  $^\circ\text{C}$  prihaja do naslednje disproporcionacije;  $\text{S}_2\text{F}_{10(\text{g})} \rightarrow \text{SF}_{6(\text{g})} + \text{SF}_{4(\text{g})}$ . Preden dosežemo temperaturo 150  $^\circ\text{C}$  je v jeklenki s prostornino 5 L 3 mol  $\text{S}_2\text{F}_{10}$ . Po dveh urah nad 150  $^\circ\text{C}$  je povprečna molska masa plinske zmesi v posodi 1,1-krat večja od povprečne

molske mase plinske zmesi po končani reakciji. Izračunaj, koliko mol.%  $S_2F_{10}$  je razpadlo po dveh urah.

**1.2.16** Želimo pripraviti čisto mešanico treh kovinskih oksidov po žganju z maso 80 g v molskem razmerju  $\frac{1}{2} : 1 : 2 = CaO : MgO : Na_2O$ . Koliko g posameznih oksidov moramo zatehtati, če omenjeno zmes pripravljamo iz CaO s čistočo 90 ut. %, MgO s čistočo 98 ut.%, in  $Na_2O$ , ki je popolnoma čist? Nečistoče, prisotne v prvotnih oksidih, se med žganjem odstranijo.

**1.2.17** Višina tablete v obliki valja je 3 mm, premer 6000  $\mu m$  in masa 0,366 g. Izračunaj gostoto tablete v  $g\ cm^{-3}$ .

**1.2.18** Vzorec, ki vsebuje  $TiO_2$ , ima obliko kocke. Teoretična gostota  $TiO_2$  je  $4,23\ g\ cm^{-3}$ . Dolžina roba kocke je 3000  $\mu m$  ter masa 0,1 g. Določi poroznost vzorca.

**1.2.19** Nasipno gostoto prahu določimo tako, da 9,8 g prahu vsujemo v merilni valj, na katerem odčitamo vrednost volumna kot 48 mL. Merilni valj nato stresamo in na ta način določimo zbito gostoto. Pri tem se volumen zmanjša za 12 % glede na začetno vrednost. Kolikšna je nasipna in kolikšna zbita gostota preiskovanega prahu?

**1.2.20** Prah  $ZnO$  smo stisnili v tableto in jo 3 h žgali pri temperaturi  $1200\ ^\circ C$ . V tableti pričakujemo odprte in zaprte pore. Masa tablete je 0,5 g, med žganjem se ne spremeni. Navidezni volumen je  $102\ mm^3$ , geometrijski volumen pa  $120\ mm^3$ . Teoretična gostota materiala je  $5,61\ cm^{-3}$ . Izračunaj geometrijsko, navidezno gostoto, totalno, odprto in zaprto poroznost. Izračunaj tudi relativni gostoti geometrijske in navidezne gostote glede na teoretično gostoto.

**1.2.21** Tableti, pripravljene iz prahu CaO, smo piknometrično določili gostoti s heksanom in živim srebrom. Gostota s heksanom je določena kot  $3,12\ g\ cm^{-3}$ , z živim srebrom pa  $2,83\ g\ cm^{-3}$ . Teoretična gostota CaO je  $3,35\ g\ cm^{-3}$ . Izračunaj odprto, zaprto in celotno (totalno) poroznost. Upoštevaj, da ima heksan, v nasprotju z živim srebrom, omaka odprte pore.

**1.2.22** Material, v obliki kocke s teoretično gostoto  $7,146\ g\ cm^{-3}$ , žgemo pri  $1000\ ^\circ C$  z namenom, da ga zgostimo. Kocka ima pred žganjem poroznost 0,72. Karakteristična dimenzija kocke po sintranju je 5,1 mm. Gostota po sintranju je  $5,98\ g\ cm^{-3}$ . Izračunajte poroznost po sintranju in karakteristično dimenzijo kocke pred njem. Upoštevaj, da se material krči enakomerno.

**1.2.23** Za koliko % se zmanjša geometrijski volumen kocke glede na začetno stanje, če je teoretična gostota enaka  $2,65\ g\ cm^{-3}$ ? Začetna poroznost kocke je 43%, končna pa 22%. Predpostavljaj, da se material krči enakomerno.

**1.2.24** Masa tablete v obliki valja je enaka 0,3 g in se med sintranjem ne spremeni. Tableto stisnemo iz prahu itrijevega (III) oksida. Izračunaj celotno poroznost  $Y_2O_3$  pred in po sintranju, če je njegova teoretična gostota  $5,01\ g\ cm^{-3}$ . Dimenzije tablet ( $h$ - višina,  $d$ - premer) pred in po sintranju so podane v spodnji tabeli.

	Pred	Po
<i>h/mm</i>	3	2,8
<i>d/mm</i>	6,2	5,8

**1.2.25** Kakšna je empirična formula plina, če pri popolnem izgorevanju 23 kg plina nastane 44 kg ogljikovega dioksida in 27 kg vode?  $\rho_{(plina)} = 2,05 \text{ g dm}^{-3}$  (p.n.p.)

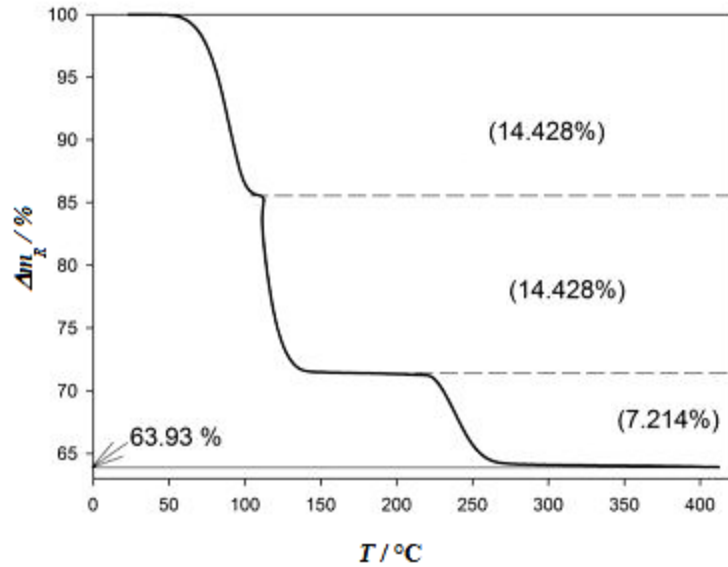
**1.2.26** Kolikšen je masni delež  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  v rudi v ut.%, če iz 2 kg rude dobimo 1,18 kg železa?

**1.2.27** Izračunaj masni delež žvepla v zmesi  $\text{CuSO}_4$  in  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , ki sta v molskem razmerju 1 : 3.

**1.2.28** Za kolikokrat se poveča površina kamnitega bloka z dimenzijami (dolžina x širina x višina) 4 m x 2 m x 1 m, če ga zdrobimo ter nato zmeljemo do monodisperznega sistema sferičnih delcev s premerom 1  $\mu\text{m}$ ?

**1.2.29** Izračunaj masni delež vustita v zmesi železovih rud; vustit ( $\text{FeO}$ ), hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Zmes vsebuje 75,1 ut.% železa, masna deleža hematita in magnetita v zmesi sta enaka.

**1.2.30** Bakrov sulfat hidrat smo analizirali z uporabo termične analize. Vzorec smo segrevali s konstantno hitrostjo do temperature 420 °C. Med termično dekompozicijo smo simultano spremljali maso vzorca. Pokaže se, da bakrov sulfat hidrat razpada v treh stopnjah, kot je prikazano na spodnji sliki (Slika 1). Zapišite formule intermediatov po vsaki taki stopnji, če upoštevate, da je izguba mase samo zaradi kristalno vezanih vod in je ostanek po tretji stopnji razpada čist  $\text{CuSO}_4$ . Izračunajte množino kristalno vezane vode v enem molu bakrovega sulfata hidrata. Koliko mg kristalne vode je v 50 mg takega hidrata?



Slika 1: Termični razpad bakrovega sulfata.

**1.2.31** Okensko steklo v povprečju vsebuje 75 ut.% SiO<sub>2</sub>, 13 ut.% Na<sub>2</sub>O in 12 ut.% CaO. Koliko peska (100 ut.% SiO<sub>2</sub>), sode (85 ut.% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) in apnenca (90 ut.% CaCO<sub>3</sub>) moramo homogeno pomešati ter zmes žgati, da na koncu dobimo 1 kg okenskega stekla z zahtevano sestavo? Upoštevajte, da med procesom priprave in žganja ni izgub.

**1.2.32** Za zlomno trdnost velja eksponentna zveza z deležem poroznosti materiala (Enačba 1).

$$\sigma = \sigma_0 e^{-nP} \quad (\text{Enačba 1})$$

$\sigma/\text{MPa}$	$P/$
70	0,1
60	0,15

Izračunajte zlomno trdnost neporoznega materiala in zlomno trdnost vzorca z 20% deležem poroznosti. V tabeli so navedene zlomne trdnosti materiala ( $\sigma$ ) pri določeni poroznosti ( $P$ ).

**1.2.33** Vpliv povprečne velikosti zrn na trdnost materiala opisuje Hall-Petch enačba (Enačba 2).

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-0.5} \quad (\text{Enačba 2})$$

2)

V enačbi sta  $\sigma_0$  in  $K$  konstanti materiala, ki sta za posamezen material podani v spodnji tabeli. Izračunajte in primerjajte, kako se trdnost bakra spreminja s povprečno velikostjo zrn v materialu. V prvem primeru je povprečna velikost 0,80  $\mu\text{m}$ , v drugem pa 80 nm. Kolikšna bi morala biti povprečna velikost zrn titana, če bi želeli doseči trdnost bakra s povprečno velikostjo zrn 0,8  $\mu\text{m}$ ?

Material	$\sigma_0/\text{MPa}$	$K/\text{MPa m}^{0,5}$
Cu	25	0,11
Ti	80	0,4

**1.2.34** V spodnji tabeli so podatki za sintrane tablete NiO-SDC materiala. Izračunajte manjkajoče količine v ustreznih enotah. NiO-SDC material je sestavljen iz 50 ut.% NiO in 50 ut.% SDC. Teoretični gostoti sta:

$$\rho(\text{NiO}) = 6,670 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\rho(\text{SDC}) = 7,146 \text{ g cm}^{-3}$$

$T_{\text{sintranja}}/\text{°C}$	$h/\text{mm}$	$m/\text{g}$	$d/\text{mm}$	$\varepsilon_{\text{geom}}/\%$	$\rho_{\text{sintrana}}/\text{g cm}^{-3}$	$\rho_{\text{relativna}}$
1000	3,10	0,302	5,82			
1100	3,00	0,298	5,61			
1200	2,97	0,299	5,20			
1300	2,99	0,300	4,82			

### 1.3 PLINSKI ZAKONI

Predpostavke, na katerih temeljita koncept idealnega plina in splošna plinska enačba, so:

(i) trki, ki vključujejo atome/molekule plinske faze, so popolnoma elastični;

(ii) volumen, ki ga zavzemajo atomi/molekule plina je bistveno manjši od volumna posode.

V realnih sistemih za pline velja, da med atomi/molekulami obstajajo privlačne sile, kar povzroča "lepljive trke", tako da je v vsakem trenutku prisotnih manj ločenih atomov/molekul, kot je dejansko celotno število posameznih molekul, ki jih predpostavi model idealnega plina. Manj ločenih delcev statistično povzroči manj trkov, kot če bi vsaka molekula nastopala posamično, zato je v realnih sistemih tlak nižji kot tlak v idealnem sistemu. Pod pogojem, da je temperatura dovolj visoka, se skupki atomov/molekul ponovno ločijo, zato velja predpostavka (i) in se realen sistem obnaša podobno kot idealen sistem. Če pa temperatura ni dovolj visoka, privlak med atomi/molekulami bistveno zniža tlak realnega sistema v primerjavi s pričakovanim tlakom idealnega plina.

Kadar je tlak plina relativno nizek, potem velja predpostavka (ii). Pri visokih tlakih skupni dejanski volumen molekul postane pomemben in je prazen prostor, kjer ni atomov/molekul plina, bistveno manjši od volumna posode, v kateri se plin nahaja.

Van der Waalsova enačba poskuša enačbo idealnega plina dopolniti tako, da bi upoštevala zgoraj omenjene dejavnike, in sicer:

Za kompenzacijo "lepljivih trkov" se dejanskemu tlaku  $P$  doda člen  $\frac{an^2}{V^2}$ . Faktor " $a$ " je konstanta za določen plin in je merilo, kako močne so privlačne sile med atomi/molekulami plina. Večje " $a$ " konstante odražajo močnejše interakcije med atomi/molekulami. Člen  $\frac{n^2}{V^2}$  lahko definiramo tudi kot "gostoto" trkov, saj je  $\frac{n}{V}$  število molov plina prisotnih na enoto prostornine. Kvadrat kvocienta se pojavi zato, ker se vsaka molekula med trkom lahko obnaša kot tarča in projektil.

Za korekcijo opazovanega volumna  $V$  na dejanski prazen prostor  $v$  v posodi se izraz  $nb$  odšteje od  $V$ . Konstanta " $b$ " je dejanska prostornina mol molekul. Večje vrednosti " $b$ " so povezane z večjimi molekulami.

Zgoraj omenjene korekcije splošne plinske enačbe se zrcalijo v t. i. van der Waalsovi enačbi za realne pline (Enačba 3).

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (\text{Enačba 3})$$



### 1.3.1 Idealni plini

1.3.1.1 Izračunaj volumen 50 g argona pri temperaturi 27 °C in tlaku 120 kPa.

1.3.1.2 Izpelji enačbo za izračun molskega volumna pri normalnih pogojih (p.n.p.).

1.3.1.3 Idealna plinska mešanica vsebuje 50 mol.% dušika, 26 mol.% kisika, 60 mol.% neona, ostalo je ogljikov monoksid. Skupni tlak je 101,3 kPa. Izračunaj parcialne tlake posameznih plinov.

1.3.1.4 Mešanici, ki vsebuje 12 vol.% kisika in 88 vol.% dušika pri temperaturi 345 K in tlaku 200 kPa, smo dodali toliko čistega kisika, da je manometer pokazal 250 kPa. Izračunaj volumsko sestavo nove mešanice.

1.3.1.5 Stisnjeni vodik se uporablja za sisteme vodikovih rezervoarjev v električnih vozilih z gorivnimi celicami. Izračunaj, za koliko lahko segrejemo poln 50 L rezervoar vodika pri tlaku 700 bar in 25 °C, da pride do aktivacije varnostnega ventila, ki se odpre pri tlaku 827 bar. Izračunaj tudi, koliko H<sub>2</sub> (v ut.%) pri tem izpustimo v zrak, če se ventil zapre, ko tlak pri povišani temperaturi pade nazaj na 700 bar.

1.3.1.6 V jeklenkah imamo naslednje plinske mešanice:

Plin	Jeklenka 1 [vol. % = Ψ]	Jeklenka 2 [vol. % = Ψ]	Jeklenka 3 [vol. % = Ψ]	Reaktor [vol.% = Ψ]
Kisik	50	50	0	26
Argon	0	50	70	38
Dušik	50	0	30	36

V kašnih razmerjih moramo dozirati zmesi plinov iz jeklenke 1, jeklenke 2 in jeklenke 3, da pripravimo zmes v reaktorju?

1.3.1.7 Pnevmatiki na kolesu smo v hladnem jutru pri 10 °C napolnili do 9,3 bar. Kolo smo nato uporabili na dirki, ko je temperatura plina v zračnici zaradi vročine zraka in asfalta narasla na 49 °C. Ob predpostavki, da je prostornina pnevmatike konstantna in se plin obnaša idealno, izračunaj tlak v vroči pnevmatiki. Rezultat podaj v psi.

1.3.1.8 Atmosferski tlak na Veneri znaša 9,2 MPa. Glavni plinski komponenti, ki sestavljata atmosfero, sta ogljikov dioksid (96,5 vol.%) in dušik (3,5 vol.%). Izračunajte gostoto ogljikovega dioksida v g mL<sup>-1</sup> v atmosferi Venere, če je temperatura ozračja na površini planeta 463 °C. Plini se obnašajo idealno.

1.3.1.9 Za določevanje masnega deleža CaCO<sub>3</sub> so v kamnolomu uporabili metodo raztapljanja s prebitno koncentracijo HCl. Določi masni delež CaCO<sub>3</sub> v zmesi, če veš, da je iz 100 g zmesi CaCO<sub>3</sub>

in  $\text{MgCO}_3$  pri raztapljanju s  $\text{HCl}$  nastalo 23,6 L  $\text{CO}_2$ , merjenega pri temperaturi 25 °C in tlaku 112,5 kPa. Plin se obnaša idealno.

**1.3.1.10** Plinsko zmes dušika in kisika uporabljamo pri procesu dopiranja. Njena gostota je pri temperaturi 25 °C in tlaku 101,3 kPa enaka 1,182 kg  $\text{m}^{-3}$ . Določi masni in prostorninski delež dušika v tej zmesi! Kolikšna sta parcialna tlaka posameznih plinskih komponent? Plina se obnašata idealno.

**1.3.1.11** V procesu uporabljamo zmes dveh plinov. Prvi je propan, drugi ima relativno gostoto glede na prvega 1,3182. Ugotovi, kateri plin je v zmesi, če je sestavljen iz 82,76 ut.% ogljika, ostalo je vodik.

**1.3.1.12** V vozilo na vodik s 6 L motorjem doziramo 2 g zmesi vodika in kisika s povprečno molsko maso 22 g  $\text{mol}^{-1}$  ter pustimo, da se vžge in izgori. 99 mol.% pare, ki pri eksploziji nastane, se utekočini in zapusti motor. Kolikšen je tlak v motorju, ko se ohladi na sobno temperaturo (25 °C)?

**1.3.1.13** Katera alkalijska kovina je sestavni del binarne zlitine z rubidijem, če veš, da pri reakciji 5 g zlitine z vodo nastane 3  $\text{dm}^3$  vodika p.n.p? Določi tudi sestavo zlitine v [ut.%].

**1.3.1.14** Helij in neon se obnašata kot idealna plina. Določi razmerje temperatur med njima ( $T_{\text{He}}/T_{\text{Ne}}$ ), če sta pri enakem tlaku njuni gostoti enaki.

**1.3.1.15** Didušikov tetraoksid je uporaben reagent v sintezni kemiji. Znano je, da pri povišanih temperaturah ravnotežno razpada na dušikov dioksid po naslednji reakciji:  $\text{N}_2\text{O}_4 (\text{g}) \leftrightarrow 2\text{NO}_2 (\text{g})$ . Izračunajte povprečno molsko maso ravnotežne zmesi pri temperaturi 70 °C v reaktorju s prostornino 50,1 L, če vemo, da je bil tlak v njem, ko smo uvedli čisti didušikov tetraoksid, enak 100,3 kPa, potem pa se je, po vzpostavitvi ravnotežja, zaradi delnega razpada didušikovega tetraoksida povečal za 10,8 kPa.

**1.3.1.16** Pri eksploziji nitroglicerina ( $\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_9$ ) nastanejo naslednji plini:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  in  $\text{O}_2$ . a) Napiši urejeno enačbo. b) Izračunaj volumen nastalih plinov  $\text{m}^3$  pri tlaku 1 bar in temperaturi 800 °C, ki nastanejo pri eksploziji 2,1 kg nitroglicerina. c) Izračunaj tlak v barih pri 800 °C, če veš, da je do eksplozije prišlo v zaprti posodi z volumnom 2000 L.

**1.3.1.17** Kalcijev karbid reagira z vodo in pri tem nastaneta etin ter kalcijev hidroksid. Izračunaj volumski delež etina v laboratoriju z dimenzijami (dolžina x širina x višina = 5 m x 6 m x 2,8 m), ki nastane pri reakciji 1 kg kalcijevega karbida pri normalnih pogojih. Ali smo dosegli eksplozijsko koncentracijo glede na to, da je spodnja eksplozijska koncentracija etina v zraku pri 2,3 vol.%?

## 1.3.2 Realni plini

**1.3.2.1** Izračunaj tlak 1 mol ogljikovega dioksida pri 373 K, ki zaseda 500 mL s pomočjo a) splošne plinske enačbe in b) van der Waalsove enačbe. Izračunajte tudi % odstopanja izračunanih vrednosti od izmerjene vrednosti, ki je 53 atm.

$$a_{(\text{CO}_2)} = 3,640 \text{ L}^2 \text{ bar mol}^{-2}, b_{(\text{CO}_2)} = 0,04267 \text{ L mol}^{-1}$$

**1.3.2.2** Z uporabo van der Waalsove enačbe izračunajte temperaturo 20,0 mol helija v 10 L jeklenki pri 120 atm ter jo primerjajte s temperaturo, izračunano s pomočjo splošne plinske enačbe. Kolikšna je razlika v temperaturah?

$$a_{(He)} = 0,0346 \text{ L}^2 \text{ bar mol}^{-2}, b_{(He)} = 0,0238 \text{ L mol}^{-1}$$

**1.3.2.3** Predvidite, katera od naslednjih snovi:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CCl}_4$ .

a) ima najmanjšo van der Waalsovo konstanto  $a$ ,

b) ima največjo konstanto  $b$ .

**1.3.2.4** Določi molsko prostornino ( $V_m$ ) propana pri 660 K in 91 atm z uporabo a) idealne plinske enačbe in b) van der Waalsove enačbe.

$$a_{(propan)} = 8,779 \text{ L}^2 \text{ bar mol}^{-2}, b_{(propan)} = 0,08445 \text{ L mol}^{-1}$$

## 1.4 RAZTOPINE

**1.4.1** Koliko mL 37 ut.% HCl z gostoto  $1,19 \text{ kg L}^{-1}$  potrebujemo za pripravo 3 L 0,5 M raztopine HCl? Raztopino pripravljamo z vodo, ki ima gostoto  $1 \text{ t m}^{-3}$ .

**1.4.2** Izračunajte masni in množinski delež soli v 1,5 L raztopine z gostoto  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ , ki jo pripravimo tako, da 500 g čiste soli KCl raztopimo v vodi.

**1.4.3** 25 mL, 1 M NaOH želiš nakisati do pH 3. Koliko mL 0,14 M raztopine HCl moraš pri tem uporabiti? Privzemi aditivnost volumna raztopin ter popolno disociacijo.

**1.4.4** Koliko litrov 62,5 ut.% raztopine sladkorja z gostoto  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$  moramo dodati 250 L, 10,0 ut.% raztopine sladkorja z gostoto  $1,04 \text{ g cm}^{-3}$ , da dobimo 25,0 ut.% raztopino sladkorja?

**1.4.5** Koliko  $\text{m}^3$  vode moramo dodati  $1000 \text{ m}^3$ , 52 ut.% raztopine z gostoto  $0,923 \text{ kg L}^{-1}$ , če želimo koncentracijo zmanjšati na 33 ut.%?  $\rho(\text{H}_2\text{O})_{25^\circ\text{C}} = 0,997 \text{ g mL}^{-1}$ ?

**1.4.6** Žveplovo kislino shranjujejo v obliki oleuma ( $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$ ). Koliko kg vode moramo dodati 300 kg, 25 ut.% oleumu, če želimo dobiti 95 ut.%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ?

**1.4.7** Koliko koncentrirane kisline HCl (37 ut.%) z gostoto  $1,2 \text{ g mL}^{-1}$  potrebujemo za pripravo  $2 \text{ m}^3$  razredčene kisline s pH 3? Privzemi aditivnost volumnov ter popolno disociacijo.

**1.4.8** Koliko koncentrirane kisline  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (96 ut.%) z gostoto  $1,83 \text{ g mL}^{-1}$  potrebujemo za pripravo  $2 \text{ m}^3$  razredčene kisline s pH 3? Privzemi aditivnost volumnov ter popolno disociacijo.

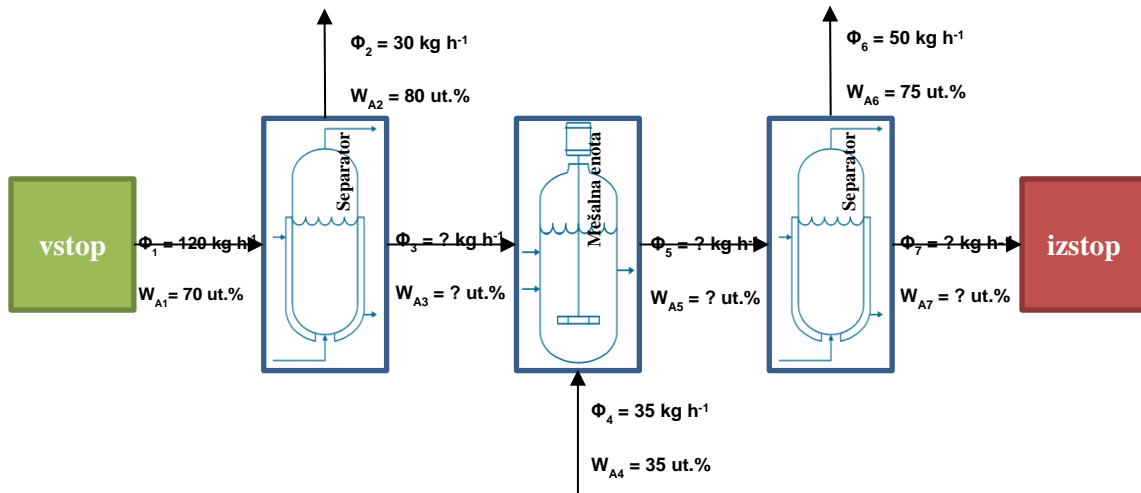
## 1.5 BILANCE

### 1.5.1 Masne bilance

**1.5.1.1** Kemijska tovarna proizvaja 80 ut.% raztopino NaOH, ki jo nato s čisto vodo redčijo na 9 ut.%. Kakšna morata biti pretoka 80 ut.% raztopine in čiste vode, da pripravijo 9 ut.% raztopino s hitrostjo  $100 \text{ kg min}^{-1}$ ?

**1.5.1.2** V tehnološkem obratu z mešanjem dveh raztopin proizvajajo raztopino NaOH z 12 mol.%. Prva raztopina NaOH je 4,5 M in ima volumski pretok  $1,5 \text{ mL min}^{-1}$  ter gostoto  $1,15 \text{ g mL}^{-1}$ , druga raztopina NaOH je 12 M z gostoto  $1,55 \text{ g mL}^{-1}$ . Izračunajte, kakšen mora biti pretok 12 M raztopine pri proizvodnji raztopine z 12 mol.%.

**1.5.1.3** Tehnološko shemo procesa, prikazano na spodnji shemi (Slika 2), sestavljata dva separatorja in mešalna enota. Glede na podane podatke izračunaj sestavo mešanic 3, 5 in 7 ter njihove pretoke (glej shemo).



Slika 2: Tehnološka shema procesa.

**1.5.1.4** V pretočni bazen velikosti  $10 \text{ m}^3$  priteka kislina odplaka žveplove (VI) kisline. Pretok je  $0,05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , koncentracija  $2 \text{ mol L}^{-1}$ . Koliko kg soli NaOH morajo dodati v bazen vsake pol ure, da popolnoma nevtralizirajo kislino? Predpostavljaj popolno disociacijo. Upoštevaj, da za popolno nevtralizacijo dodamo 5 % presežka 80 ut.% NaOH.

**1.5.1.5** V bazen s prostornino  $150 \text{ m}^3$  pritekata dva pritoka raztopin NaCl. Prvi pretok s hitrostjo  $500 \text{ L h}^{-1}$  in koncentracijo  $260 \text{ g L}^{-1}$ , drugi s hitrostjo  $6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  in koncentracijo  $0,2 \text{ kg L}^{-1}$ . Kolikšni bosta masna koncentracija ( $\gamma$  v  $\text{g L}^{-1}$ ) in množinska koncentracija ( $c$  v  $\text{mol L}^{-1}$ ) v bazenu po 2 urah polnjenja in kolikšni bosta koncentraciji takrat, ko bo poln?

**1.5.1.6** Koliko kg gašenega apna, ki vsebuje 70 %  $\text{Ca(OH)}_2$ , potrebujemo za nevtralizacijo  $100 \text{ m}^3$  bazena, če vanj pritekata  $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  s pretokom  $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  in  $0,1 \text{ M HCl}$  s pretokom  $100 \text{ L min}^{-1}$ ? Predpostavi aditivnost raztopin in popolno disociacijo.

**1.5.1.7** Kemijska tovarna z mešanjem dveh raztopin proizvaja raztopino NaOH z 10,5% molskim deležem. Prva raztopina NaOH je  $5 \text{ M}$  in ima masni pretok  $2,5 \text{ g min}^{-1}$  ter gostoto  $1,2 \text{ g mL}^{-1}$ , druga raztopina NaOH je  $9 \text{ M}$  z gostoto  $1,6 \text{ g mL}^{-1}$ . Izračunajte, kakšen mora biti masni pretok  $9 \text{ M}$  raztopine pri proizvodnji raztopine z 10,5 mol.%.

**1.5.1.8** Pri kalcinaciji  $5 \text{ t}$  tehničnega natrijevega hidrogenkarbonata s sestavo: 60 ut.%  $\text{NaHCO}_3$ , 7 ut.%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 10 ut.%  $\text{NaCl}$  in 23 ut.%  $\text{H}_2\text{O}$  prihaja do disociacije  $\text{NaHCO}_3$  po Enačbi 4.



Izračunaj, koliko ton vode imamo v sistemu po kalcinaciji ter koliko t trdnih ostankov in koliko  $\text{m}^3$   $\text{CO}_2$ , p.n.p., če je izkoristek kalcinacije 80%.

**1.5.1.9** V nevtralizacijski bazen s prostornino  $40 \text{ m}^3$  pritekajo kisle odplake, in sicer:  $0,01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$  s pretokom  $2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  in  $0,1 \text{ M HCl}$  s pretokom  $11 \text{ L min}^{-1}$ . Koliko kg nevtralizacijskega sredstva, ki vsebuje 70 ut.%  $\text{Ca(OH)}_2$ , potrebujemo za nevtralizacijo polnega bazena? Predpostavi aditivnost raztopin in popolno disociacijo.

## 1.5.2 Energijske bilance

**1.5.2.1** Koliko časa potrebujemo, da  $2,5 \text{ kg}$  vode zavre, če jo segrevamo z grelnikom z močjo  $800 \text{ W}$ ? Začetna temperatura vode je  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ni izgub v okolico.  $c_{p, \text{voda}} = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

**1.5.2.2** Kolikšna je končna temperatura vode, če zmešamo  $2 \text{ kg}$  vode s temperaturo  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  in  $5 \text{ kg}$  vode s temperaturo  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Upoštevaj, da ni izgub v okolico.  $c_{p, \text{voda}} = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

**1.5.2.3** Koliko časa moramo segreti  $1 \text{ m}^3$  veliko ledeno kocko s temperaturo  $-13,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , da jo utekočinimo in segrejemo do  $80,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , če sistem segrevamo z  $1 \text{ MW}$  grelom, ki 80 % energije porabi za gretje sistema, ostala energija se izgubi?  $\rho_{\text{led}} = 0,934 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $c_{p, \text{voda}} = 4,181 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $c_{p, \text{led}} = 2,05 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{talilna, led}} = 6,01 \text{ kJ mol}^{-1}$

**1.5.2.4** Vodna para je v zaprti posodi s prostornino  $5 \text{ L}$ , pri tlaku  $101,3 \text{ kPa}$  in temperaturi  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ . V posodo dodamo  $50 \text{ g}$  ledu s temperaturo  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kolikšna je zmesna temperatura sistema? Kaj sestavlja sistem in koliko ter kaj bo ostalo v njem?  $c_{p, \text{para}} = 4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $c_{p, \text{voda}} = 4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $c_{p, \text{led}} = 2200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{izparilna, voda}} = 2257 \text{ kJ kg}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{talilna, led}} = 336 \text{ kJ kg}^{-1}$

**1.5.2.5** Koliko časa moramo segreti  $40 \text{ g}$  ledu pri  $-10,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , da ga uparimo v vodno paro s temperaturo  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , če sistem segrevamo z  $1 \text{ kW}$  grelom? Pri računanju upoštevajte, da ni izgub v okolico.  $c_{p, \text{para}} = 2,08 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $c_{p, \text{voda}} = 4,181 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $c_{p, \text{led}} = 2,05 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{izparilna, voda}} = 40660 \text{ J mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_{\text{talilna, led}} = 333 \text{ kJ kg}^{-1}$

**1.5.2.6** V 4 kg šaržnem reaktorju, opremljenim z grelnim plaščem, je 10 kg reakcijske zmesi. Reakcijo izvajamo pri temperaturi 120 °C. Izračunajte, koliko časa potrebujemo, da sistem segrejemo iz sobne temperature (20 °C) na reakcijsko temperaturo, če segrevamo z 800 W. Izkoristek segrevanja je 100%.  $C_p(\text{reaktor}) = 0,70 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $C_p(\text{reakcijska zmes}) = 4,05 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

**1.5.2.7** Izračunajte, kolikokrat več bencina porabi avtomobil z motorjem z notranjim zgorevanjem v primerjavi z električnim avtomobilom, če s 50 L bencina naredimo 800 km. Povprečna poraba električnega avtomobila je 12,5 kWh na 100 km.  $\Delta H_{\text{sež}}^{\circ}(\text{bencin}) = 47,30 \text{ MJ kg}^{-1}$ ,  $\rho(\text{bencin}) = 0,75 \text{ kg L}^{-1}$

**1.5.2.8** Kakšni moči ustreza 2 min. polnjenje 50 L bencinskega rezervoarja avtomobila z notranjim zgorevanjem, če je specifična energija bencina 46 MJ kg<sup>-1</sup> ter gostota 0,75 kg L<sup>-1</sup>? Koliko časa bi morali polniti električni avto z ekvivalentno energijo (kapaciteto), kot jo ima 50 L bencina na domači varnostni vtičnici (16 A, 230 V)?

## 1.6 ELEKTROKEMIJA

**1.6.1** Med elektrolizo vodne raztopine kalijevega sulfata opazimo naslednje: na anodi se izloča kisik (reakcija izločanja kisika - OER), na katodi vodik (reakcija izločanja vodika - HER). Izračunaj, koliko litrov vodika in kisika smo dobili pri temperaturi 20 °C in tlaku 101,3 kPa, če smo pred elektrolizo v 500 mL vode raztopili 100 g kalijevega sulfata (VI). Masni delež kalijevega sulfata v raztopini po elektrolizi je bil 95 ut.%.  $\rho_{(voda)} = 1 \text{ g cm}^{-3}$ .

**1.6.2** Kakšni sta končni koncentraciji nikljevih in kloridnih ionov v elektrolitski celici po končani elektrolizi 50 L, 0,3 M raztopine NiCl<sub>2</sub>, če je ta potekala pri toku 15 A, 24 h? Prostornina elektrolita se med elektrolizo ne spreminja. Predpostavljajte, da na anodi nastaja plinasti klor.

**1.6.3** Za depozicijo 6 kg cinka iz raztopine ZnCl<sub>2</sub> smo porabili 20 kWh energije. Izračunajte izkoristek elektrolizerja, če smo depozicijo izvajali pri 3 V.

**1.6.4** Izračunajte, za koliko se je povečala masa katode in kolikšna je končna koncentracija raztopine bakrovega (II) sulfata po 1 h, če je skozi 70 L začetne raztopine, s koncentracijo 1,2 M, tekkel tok 2 kA. Volumen se pri elektrolizi, katere izkoristek je 100%, ne spremeni.

**1.6.5** Za elektrodepozicijo celotnega bakra na Pt-mrežico iz vodne raztopine, pripravljene iz 3 kg Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·xH<sub>2</sub>O, porabimo 2,251·10<sup>6</sup> Coulombov elektrenine. Določi število molekul kristalne vode (x) v kristalohidratu, če je izkoristek elektrodepozicije 87%.

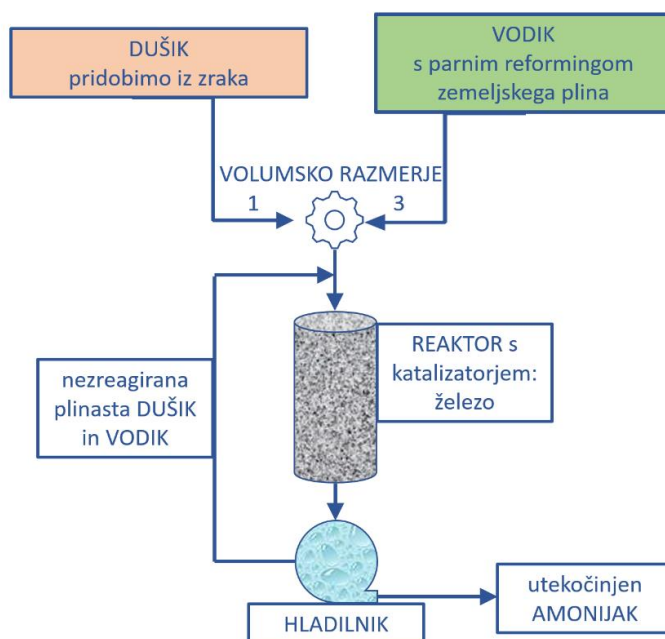


## 2. REALNI PROBLEMI V INDUSTRIJSKI KEMIJI

### 2.1 HABER-BOSCHEV PROCES

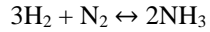
Nemška znanstvenika Fritz Haber in Carl Bosch sta na začetku 20. stoletja sintetizirala amonijak iz dušika in vodika. Omenjena sinteza šteje za eno prvih odkritij na področju katalitskih reakcij, ki so vodile v proizvodnjo surovin v velikem obsegu. Postopek sinteze je kupilo nemško podjetje BASF. Carl Bosch je postopek modificiral tako, da je povečal količino dobljenega produkta (t. i. ang. scale up). Oba raziskovalca sta ločeno za svoja odkritja dobila tudi Nobelovi nagradi. Najprej jo je leta 1918 dobil Fritz Haber za odkritje sinteze amonijaka iz plinov. Kasneje, leta 1931 pa še Carl Bosch s sodelavcem Friderichom Bergiusom za nadaljnji izum in razvoj kemijske sinteze z uporabo visokega pritiska. Postopek še vedno velja za enega od največjih izumov 20. stoletja. Po implementaciji tega odkritja v večjo proizvodnjo je število prebivalcev strmo naraslo. Amonijak se namreč uporablja kot gnojilo, kjer rastlinam predstavlja vir dušika. Plinastega dušika je v naravi veliko, vendar v taki obliki za rastline ni uporaben. Ima namreč močno trojno vez, zelo je nereaktiven in ga v taki obliki ne morejo posrkati vase. Amonijak posredno vpliva na življenje vsakega zemljana.

Reaktanta v plinastem agregatnem stanju vodik in dušik vodijo v visokotlačni reaktor s tlakom 200 atm, kjer s pomočjo katalizatorja (prvotno je bil osmij, kasneje ga je zamenjalo železo) reagirata do amonijaka. Vir dušika je zrak, vodik so pridobivali s parnim reformingom iz zemeljskega plina. Shema procesa je v poenostavljeni obliki prikazana na Sliki 3.



Slika 3: Poenostavljena shema proizvodnje amonijaka po Haber-Bosch postopku.

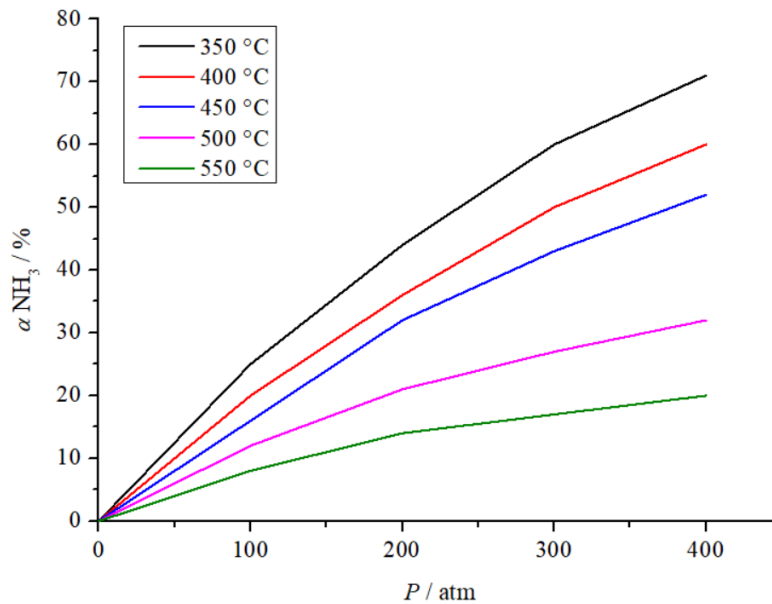
Proizvodnja amonijaka poteka po ravnotežni reakciji, opisani v Enačbi 5.



(Enačba 5)

V skladu z Le Chatelierjevem principom povišanje tlaka pri ravnotežnih reakcijah pomeni pomik ravnotežja v smer z manjšim volumnom (manjšo množino) v našem primeru v desno proti amonijaku (Slika 4). Proizvodnja amonijaka je eksotermna reakcija. Entalpija sinteze amonijaka je  $-92 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Amonijak je zelo reaktiven plin z drugimi reaktanti (žveplovo, fosforno, dušikovo kislino) in tvori različne spojine (amonijev sulfat, amonijev fosfat, amonijev nitrat). Iz amonijaka sintetizirajo tudi gnojila, kot sta amonijev karbamat in sečnina. Ta sinteza velja za prvo sintezo organske spojine iz anorganskih reaktantov (amonijaka in cianidne kisline). Druga dva pomembna produkta amonijaka sta dušikova kislina in hidrazin. Sintezni postopek za dušikovo kislino (Ostwaldov postopek) boste podrobneje spoznali v nadaljevanju.



Slika 4: Vpliv pogojev sinteze (tlaka in temperature) na končno stopnjo konverzije.

**2.1.1** Za reakcijo sinteze amonijaka ( $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{NH}_3$ ) zapišite izračun  $K_p$ , če so vstopni reaktanti v stehiometrijskem razmerju. Kolikokrat se poveča množinska koncentracija produkta, če množinsko koncentracijo reaktantov povečamo 5-krat?

**2.1.2** Ravnotežne koncentracije pri  $200 \text{ °C}$  so  $0,127 \text{ M H}_2$ ,  $0,0402 \text{ M N}_2$  in  $0,00272 \text{ M NH}_3$ . Izračunajte  $K_c$  in  $K_p$  za reakcijo  $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{NH}_3$ .

**2.1.3** Amonijak sintetiziramo iz plinastih reaktantov: dušika in vodika po reakciji  $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \leftrightarrow 2\text{NH}_3$ , kjer je stopnja konverzije ( $\alpha$ ) enaka 15 %. Kolikokrat se poveča  $K_x$ , če se  $\alpha$  poveča 2-krat? Temperatura je konstantna, reaktanti in produkti so v stehiometrijskem razmerju.

**2.1.4** Vrednost  $K_p$  je odvisna tudi od temperature. Koliko znaša za sintezo amonijaka pri 150 °C in 50 bar, če je  $K_p$  pri istem tlaku in temperaturi 350 °C enaka  $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ bar}^{-2}$ ? Upoštevajte, da imamo idealni plin.

**2.1.5** Za sintezo amonijaka s Haber-Bosch postopkom uporabljamo visokotlačni reaktor s slojem katalizatorja. Vanj iz jeklenk vodimo plinasta vodik in dušik z označeno čistostjo ter količinami, ki so navedene v spodnji tabeli. Izstopno mešanico ohladimo, amonijak se pri tem utekočini in ga lahko ločimo od nezreagiranih reaktantov.

	Dušik	Vodik
$V_{\text{jeklenke/L}}$	55	54
$\varphi_{\text{čistost plina/}}$	N4.8	N4.5
$P_{\text{polne jeklenke/bar}}$	230	300

Pretok tekočega amonijaka na izstopu je  $2 \text{ mL min}^{-1}$ . Temperatura plinov je 20 °C, vsi plini se obnašajo idealno. Gostota tekočega amonijaka je  $0,6826 \text{ g cm}^{-3}$ . Koliko časa lahko s tako postavitvijo zagotavljamo želen pretok tekočega amonijaka, če je izkoristek reakcij 100%?

**2.1.6** S Haber-Bosch procesom nastane 20 mol amonijaka pri temperaturi 450 °C. Začetni množini vodika in dušika v stehiometrijskem razmerju sta 600 mol in 200 mol. Koliko mol dušika moramo dodati začetni množini, če želimo povišati množino končnega produkta za 5 mol?

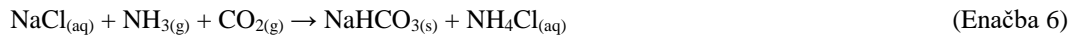
**2.1.7** Izračunajte faktor povišanja konstante ravnotežja  $K_p$  za reakcijo sinteze amonijaka, če temperaturo iz 150 °C povišamo na 400 °C. Tlak reakcije je ves čas enak, in sicer 100 bar.  $K_p$  je pri temperaturi 400 °C in tlaku 100 bar  $1,8225 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-2}$ , reakcijska entalpija pa  $-92,2 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

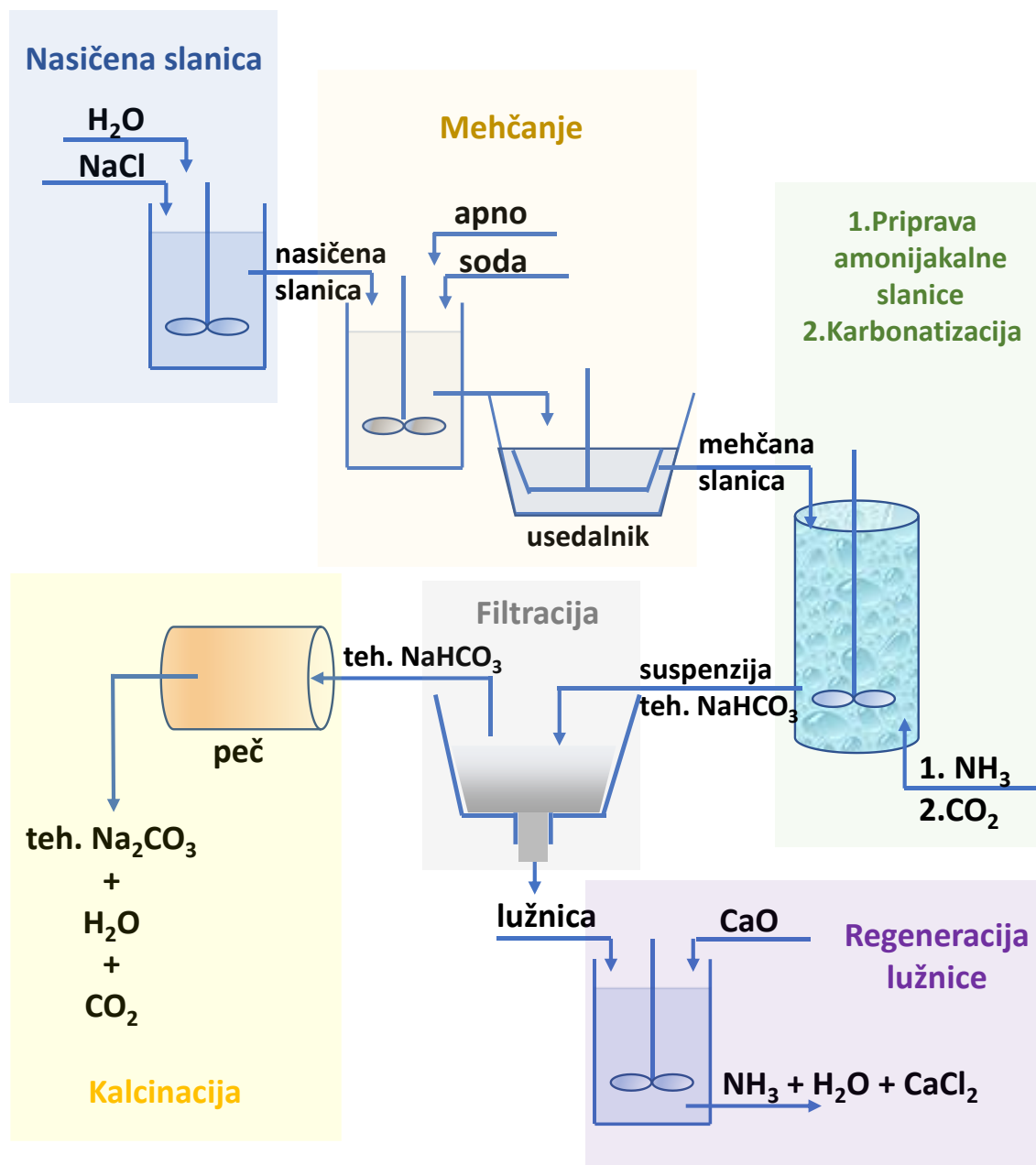
## 2.2 SOLVAYEV POSTOPEK

Solvayev postopek (Enačba 6) se uporablja za proizvodnjo sode (glavna komponenta je natrijev karbonat –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

Najprej se pripravi t. i. »nasičeno slanico«, v vodi raztopimo veliko količino soli ( $\text{NaCl}$ ). Dobljeni slanici se izmeri in izračuna koncentracijo raztopljenega  $\text{NaCl}$  ter kalcijevo ( $\text{CaT}$ ), magnezijevo ( $\text{MgT}$ ) in celokupno ( $\text{CT}$ ) trdoto. Nasičeno slanico očistimo neželenih ionov (predvsem sta to  $\text{Mg}^{2+}$  in  $\text{Ca}^{2+}$ ), ki bi se soobarjala z natrijevim hidrogen karbonatom. Te ione odstranimo s t. i. apno-soda postopkom. Najprej dodamo apno (Enačba 7), da odstranimo magnezijeve ione, zatem še sodo (Enačba 8), za odstranitev kalcijevih ionov. Po tem postopku slanico imenujemo »očiščena slanica«.

Vanjo najprej uvajamo plinasti  $\text{NH}_3$ , da zagotovimo ustrezen pH ter tako dobimo »amonijakalno slanico«. S karbonatizacijo (kasnejšim uvajanjem  $\text{CO}_2$ ) povzročimo tvorbo bele oborine – natrijevega hidrogen karbonata (Enačba 6).





Slika 5: Shema Solvayevega procesa.

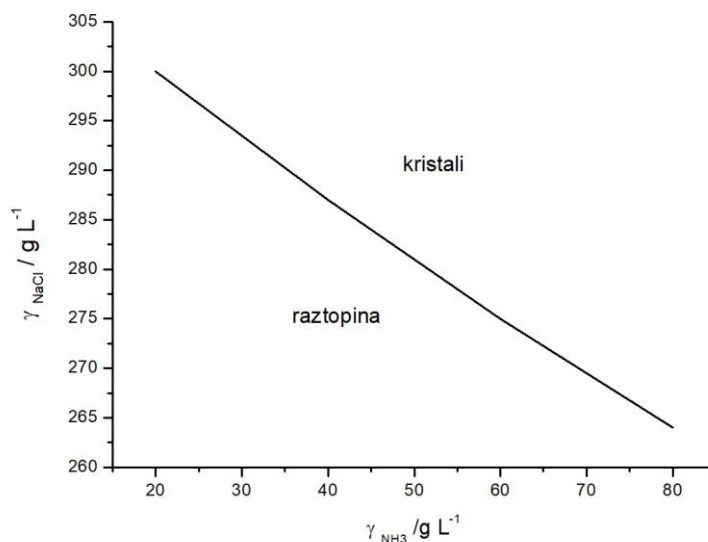
Po karbonatizaciji nastalo oborino, ki vsebuje tudi preostale trdne komponente (kar imenujemo tehnični natrijev hidrogen karbonat), ločimo od preostale raztopine s filtracijo. Končni produkt dobimo s t. i. kalcinacijo tehničnega natrijevega hidrogena karbonata v tehnični natrijev karbonat (Enačba 9).



(Enačba 9)

- 2.2.1** Kolikšen je izkoristek celotnega procesa pridobivanja sode, če smo dobili 1,8 t končnega produkta z masnim deležem 95 % natrijevega karbonata? Sintezo smo začeli s 5 m<sup>3</sup> slanice z masno koncentracijo 800 g NaCl L<sup>-1</sup>. Upoštevajte, da končni produkt vsebuje primesi, ki ne vplivajo na izkoristek procesa. Zapišite tudi reakcijo oz. reakcije, s pomočjo katerih boste lahko izračunali zahtevan izkoristek.
- 2.2.2** Regeneracijo lužnice izvajamo, kot je opisano v reakciji:  $\text{NH}_4\text{Cl}_{(\text{aq})} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$  (reakcija ni urejena), kjer regeneriramo 62 g amonijaka. Koliko L lužnice z masno koncentracijo NH<sub>4</sub>Cl 100 g L<sup>-1</sup> pri tem regeneriramo in koliko g kalcijevega diklorida dobimo?
- 2.2.3** V Solvayevem procesu proizvodnje sode reagirajo CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NaCl in H<sub>2</sub>O. V reakcijo vstopa 50 g NaCl in 10 L CO<sub>2</sub> pri STP (ang. standard conditions for temperature and pressure). Amonijak in voda sta v prebitni količini. Kateri je limitni reagent ter koliko NaHCO<sub>3</sub> proizvedemo?
- 2.2.4** Pri mehčanju 5 m<sup>3</sup> slanice smo porabili 2,7 kg 92 ut.% Ca(OH)<sub>2</sub> in 7,6 kg 95 ut.% CaCO<sub>3</sub>. Kolikšna je bila kalcijeva, magnezijeva in celotna trdota slanice pred mehčanjem? Trdote izračunajte v enotah mg CaO L<sup>-1</sup> ter predpostavljajte popolno mehčanje.
- 2.2.5** V 5 L slanice 90 min. uvajamo plinasti amonijak s pretokom 0,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Kolikšna je masna koncentracija amonijaka po koncu uvajanja v slanici? Koliko mL 0,5 M HCl porabimo pri analizi 5 mL take amonijakalne slanice? Analiza poteka po enačbi:  $\text{NH}_3 + \text{HCl} \rightarrow \text{NH}_4\text{Cl}$ . Upoštevajte, da se plin obnaša idealno in ga uvajamo p.n.p.
- 2.2.6** Tehničnemu natrijevemu hidrogen karbonatu smo določili izgubo mase v odvisnosti od temperature. Termogravimetrična analiza pokaže dva ločena intervala izgube mase. Prvi interval poteka od 30 do 105 °C in pripada izgubi adsorbirane vlage. Drugi interval poteka od 105 °C do 190 °C in pripada razpadu NaHCO<sub>3</sub>. V prvem intervalu je bila izguba mase glede na začetno maso 33 ut%, v drugem pa 25 ut.%. Izračunajte maso celokupne vode in volumen CO<sub>2</sub>, če po taki shemi razpade 650 kg tehničnega natrijevega hidrogen karbonata. Upoštevajte normalne pogoje in idealno obnašanje plinov.

**2.2.7** Tovarna sode predela vsako uro 1500 L slanice z masno koncentracijo 270 g NaCl L<sup>-1</sup>. Slanica ima kalcijevo trdoto 750 mg CaO L<sup>-1</sup> in magnezijevo 200 mg CaO L<sup>-1</sup>. Izračunajte molarnost Cl<sup>-</sup> v slanici. Izračunajte maso vseh potrebnih reagentov (mehčal, plinov, reagentov za regeneracijo lužnice) razen vode in maso končnega produkta (sode). Upoštevajte, da so vsi reagenti 100% čisti, da so vsi izkoristki 100% ter da nimamo plinskih reciklov. Narišite tudi shemo Solvayevega postopka z vsemi stopnjami priprave in plinskimi recikli. Optimalna masna koncentracija amonijaka je 70 g L<sup>-1</sup> (Slika 6).  $\rho_{(zrak)} = 1,2928 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\rho_{(NH_3)} = 0,7714 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\rho_{(CO_2)} = 1,562 \text{ kg m}^{-3}$



Slika 6: Pogoji za tvorbo kristalov kot odvisnost od koncentracije amonijaka in natrijevega klorida.

**2.2.8** V spodnji tabeli so podatki za rotameter, ki ga bomo uporabili za uvajanje amonijaka in ogljikovega dioksida.

- Izračunajte vrednosti, na katere moramo nastaviti plovec tega rotametra, če želimo uvajati amonijak s pretokom 500 L h<sup>-1</sup> in ogljikov dioksid s pretokom 1000 L h<sup>-1</sup> pri temperaturi 20 °C in tlaku 101,3 kPa. Izračunajte še, kolikšna bi bila pretoka obeh plinov, če bi se temperatura povišala na 30 °C, ostali pogoji ostanejo nespremenjeni. Predpostavljajte, da se plina obnašata idealno. Pri računanju si pomagajte s Sliko 6.
- Izračunajte vrednost na skali, na katero moramo nastaviti plovec pri standardnih pogojih rotametra, navedenih v tabeli. V 5 L slanice želimo 60 min. uvajati amonijak do koncentracije 260 g L<sup>-1</sup>.

<b>KALIBRACIJSKI PODATKI</b>			
Največji pretok	Najmanjši pretok	Enota	Merjen fluid
31154	1321	mL min <sup>-1</sup>	amonijak
Standardni pogoji	1 atm, 20 °C		Gostota pri standardnih pogojih
			0,000716 g mL <sup>-1</sup>
<b>ODČITKI NA SKALI</b>			
ODČITKI	PRETOK		
150,0	31154		
140,0	28597		
130,0	26198		
120,0	23930		
110,0	21548		
100,0	19254		
90,0	17110		
80,0	14841		
70,0	12664		
60,0	10589		
50,0	8551		
40,0	6616		
30,0	4818		
20,0	2982		
10,0	1321		



### 2.3 OSTWALDOV PROCES

Wilhelm Ostwald je leta 1902 patentiral t. i. Ostwaldov proces za proizvodnjo dušikove kisline. Postopek je tesno povezan s Haber-Bosch postopkom, ki proizvaja amonijak (pomembno surovino za proizvodnjo dušikove kisline). Nekaj let kasneje je bil tudi Ostwaldov proces nagrajen z Nobelovo nagrado.

Sintezo dušikove (V) kisline iz amonijaka in kisika lahko zapišemo s celokupno reakcijo (Enačba 10).



Dejansko pa poteka preko treh vmesnih stopenj.

V prvi stopnji (Enačba 11) poteka parcialna (delna) oksidacija amonijaka v zraku (vir kisika) do dušikovega (II) oksida. Standardna reakcijska entalpija te reakcije je ( $\Delta H_r^0$ )  $-904,7 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Tvorba NO lahko privede do stranske reakcije (Enačba 12), kjer nastaja dušik ( $\text{N}_2$ ). Ta reakcija je zelo eksotermna in nezaželena, saj amonijak razpade v plin dušik.



Tej stranski reakciji se lahko izognemo z optimizacijo reakcijskih pogojev, kar pomeni zvišanje temperature reakcije (od 800 do 950 °C) in uporabo katalizatorja Pt/Rh ali Au/Pd.

Druga stopnja je oksidacija dušikovega (II) oksida do dušikovega (IV) oksida (Enačba 13). Ta reakcija določa hitrost celotnega procesa, saj je med vsemi najpočasnejša. Poteka pri nizkih temperaturah in tlaku brez prisotnosti katalizatorja.



Ker je reakcija rahlo eksotermna, se jo izvaja pri nizkih temperaturah (od 10 do 40 °C), ki se jih vzdržuje z vodnim hlajenjem.

V tretji stopnji poteka absorpcija dušikovega (IV) oksida v vodo, kjer dobimo končna produkta dušikovo (V) kislino in dušikov (II) oksid. Slednjega lahko kot recikel vodimo v drugo stopnjo (Enačba 14).



Sestava končnega produkta obsega od 50 do 65% masnega deleža dušikove (V) kisline. Z nadaljnjo destilacijo lahko to vrednost povišamo do največ 69 %, kar imenujemo koncentrirana dušikova kislina. Če v njo dodamo močno dehidracijsko sredstvo (koncentrirano žveplovo kislino) in jo v nadaljevanju destiliramo, dobimo od 95 do 98% kislino, ki jo imenujemo kadeča dušikova kislina. Dušikova (V) kislina sodi med močnejše kisline. Kadar jo uporabimo v koncentrirani obliki, je

močnejše oksidacijsko sredstvo kot fosforna ali žveplova (VI) kislina. Kislina reagira tudi s kovinami (baker), kot produkti nastanejo kovinski nitrati in NO plin. Na to reakcijo sta inertna le zlato in platina.

Pri reakciji dušikove (V) kisline in amonijaka nastane amonijev nitrat, ki se je prvotno uporabljal kot gnojilo, kasneje tudi kot eksploziv. Opisana kislina reagira z beljakovinami in rezultira v rumeni barvi produkta. Neprevidnost pri delu z dušikovo kislino na naši koži pusti rumene sledi.

**2.3.1** Izračunajte entalpijo reakcije za vsako od treh stopenj in entalpijo reakcije celotnega Ostwaldovega procesa brez stranskih reakcij. V tabeli so tvorbeni entalpije pri temperaturi 25 °C in tlaku 100 kPa.

Spojina	$\Delta H/\text{kJ mol}^{-1}$
$\text{NH}_3(\text{g})$	-45,92
$\text{NO}(\text{g})$	90,0
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,83
$\text{NO}_2(\text{g})$	33,18
$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	-285,83
$\text{HNO}_3(\text{aq})$	-206,28

**2.3.2** Tovarna proizvaja dušikovo (V) kislino po Ostwaldovem procesu. Izračunajte volumsko porabo zraka in amonijaka na dan, če je letna (obratuje 340 dni) proizvodnja kisline  $10^5$  t. Sežig amonijaka je 90% uspešen, izkoristek absorpcije vode pa je 85%. Predpostavljajte, da je v zraku 21 vol.% kisika, idealno obnašanje plinov in normalne pogoje.

**2.3.3** Ostwaldov proces lahko spremljajo tudi stranske reakcije. Ena izmed njih je reakcija dimerizacije dušikovega dioksida v didušikov tetraoksid ( $2\text{NO}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ ). Konstanta ravnotežja reakcije ( $K_x$ ) je pri tlaku 1 bar in temperaturi 100 °C enaka 0,066. Izračunajte stopnjo pretvorbe do dušikovega tetraoksida, če imamo na začetku v reakcijski zmesi 10 vol.%  $\text{NO}_2$ . Upoštevajte spremembo volumna.

## 2.4 CLAUSOV PROCES

Z dvostopenjskim Clausovim procesom iz vodikovega sulfida proizvajajo elementarno žveplo. Proces se izkorišča v naftnih rafinerijah, kjer iz plina, bogatega z vodikovim sulfidom, regenerirajo žveplo. Elementarno žveplo se v nadaljevanju lahko uporabi tudi za proizvodnjo žveplove kisline. Omenjeni proces je leta 1883 patentiral kemik Carl Friedrich Claus.

V prvi stopnji poteka delna oksidacija vodikovega sulfida do žveplovega dioksida (Enačba 15). V drugi pa reakcija med preostalim vodikovim sulfidom in nastalim žveplovim dioksidom (Enačba 16).



Količina zraka, ki je vir kisika, vpliva na količino nastalega žveplovega dioksida. Optimalno množinsko razmerje med plinastima  $\text{H}_2\text{S}$  in  $\text{SO}_2$  je 2 : 1 ter med zrakom in plinsko zmesjo od 1,4 do 1,5.

2.4.1 Vhodna plinska zmes ima sestavo 20 mol.%  $\text{H}_2\text{S}$  in 80 mol.%  $\text{CO}_2$ . V reaktor vodimo eno tretjino te zmesi, ki s stehiometrijsko količino zraka popolnoma zreagira do žveplovega dioksida in vode. Produkt te reakcije zmešamo s preostalima dvema tretjinama vhodne plinske zmesi. Kot končni produkt dobimo elementarno žveplo in vodo. Izstopajo plini s pretokom  $10 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  pri temperaturi  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  in tlaku 205 kPa. Upoštevajte, da imamo idealne pline, v zraku je 21 vol.% kisika, ostalo so negorljivi plini. Voda, ki nastane v prvi in drugi reakciji, je v plinastem stanju. Izračunajte pretok zraka na vstopu v  $\text{mol min}^{-1}$ .

2.4.2 Proizvodnja žveplovega trioksida poteka z reakcijo med žveplovim dioksidom in kisikom (ki v proces vstopa v obliki zraka). Izračunajte stopnjo konverzije žveplovega dioksida v žveplov trioksid pri temperaturi  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  in 1 atm, če v začetni zmesi ni žveplovega trioksida.

Plin	$\varphi_{\text{izstop}}/\%$
$\text{SO}_2$	5
$\text{O}_2$	4
$\text{N}_2$	10
Drugi inertni plini	1
$\text{SO}_3$	80

## 2.5 PARNI REFORMING

Parni reforming je industrijski postopek za sintezo vodika iz ogljikovodikov in vodne pare. V Enačbi 17 je napisan potek reakcije parnega reforminga z metanom in vodno paro, ang. steam reforming methane (SRM). Omenjena reakcija je endotermna z entalpijo reakcije  $206 \text{ kJ mol}^{-1}$ . Pretvorba poteka pri povišani temperaturi ( $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Za višjo stopnjo pretvorbe (več produkta) reakcijski mešanici dodajajo presežek vodne pare. Tako se ravnotežje pomakne v desno v smeri produktov.



V nadaljevanju lahko poteče t. i. ang. *water gas shift* (WGS) reakcija (Enačba 18), kjer iz vode in ogljikovega monoksida nastaneta ogljikov dioksid in vodik.



Katalitski postopek sta leta 1924 prvič opisala Neumann in Jacob. Kasneje, leta 1930, pa je bil že implementiran v industrijsko uporabo.

Parni reforming je kljub dolgi zgodovini iz raziskovalnega vidika še vedno zanimiva tema. Trenutno poteka razvoj v smeri še učinkovitejše tehnologije, kar pomeni razvoj cenejšega, selektivnejšega in učinkovitejšega katalizatorja. Nikelj, implementiran na različnih nosilcih (ogljikove nanocevice, keramika ...), je trenutno eden najobetavnejših katalizatorjev. Zanimiv je tudi zaradi nizke cene in visoke učinkovitosti. Njegova slabost je v sintranju (zgoščevanju) delcev in s tem manjšanju aktivne površine. Raziskave so usmerjene tudi v katalizatorje na osnovi žlahtnih (Ru, Rh, Pt) in nežlahtnih (Co, Cu, Mo) kovin.

Parni reforming poteka tudi kot predhodna reakcija v SOFC (ang. *solid oxide fuel cell*) gorivnih celicah, kjer kot gorivo uporabimo ogljikovodike.

**2.5.1** Z reakcijo parnega reforminga  $\text{CH}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g})$  proizvajamo vodik. Plinaste reaktante vodimo v proces s pretokom  $1500 \text{ mol h}^{-1}$  in sestavo 80 mol.%  $\text{CH}_4$ , 15 mol.%  $\text{H}_2\text{O}$  in 5 mol.% negorljivih plinov. Za zagotavljanje stehiometrijske količine vodne pare z drugim pretokom v plinastem agregatnem stanju dovajamo tok dodatne vodne pare s sestavo 90 mol.%  $\text{H}_2\text{O}$  in 10 mol.% inertnega nosilnega plina. Izračunajte molski pretok drugega toka in molski pretok nastalega vodika, če je izkoristek procesa 75%.

**2.5.2** V zaprti posodi imamo zmes plinov CO in  $\text{H}_2\text{O}$  z začetnimi tlaki  $10^2 \text{ Pa}$  in  $10^3 \text{ Pa}$ . Zmes segrejemo na temperaturo  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri čemer se vzpostavi ravnotežje s konstanto  $K_p$  1. Izračunajte, kolikšen delež CO glede na začetno stanje ostane v posodi po vzpostavitvi ravnotežja ter kolikšen delež  $\text{H}_2\text{O}$  se pretvori v vodik.

**2.5.3** Pri 850 °C poteka ravnotežna konverzija ogljikovega monoksida z vodno paro v ogljikov dioksid in vodik. Ravnotežna konstanta  $K$  je enaka 1. V konverter vstopata plina v volumskem razmerju 1 : 2 (CO: H<sub>2</sub>O). Izračunajte volumske deleže vseh plinov v ravnotežju.

## 2.6 OSTALI PROCESI

**2.6.1** Plavžni plin je stranski produkt pri proizvodnji surovega železa v plavžu. Ker njegova sestava predstavlja predvsem negorljiva plina dušik in ogljikov dioksid, ima relativno nizko kalorično vrednost, tj. 3,5 MJ m<sup>-3</sup>, ki se uporablja za segrevanje kotlovene vode v jeklarni. a) Izračunaj teoretično porabo zraka v m<sup>3</sup> za popolno izgorevanje 200 m<sup>3</sup> plavžnega plina (sestava v tabeli), če veš, da je prostorninski delež kisika v zraku 20 vol.%, ostalo je dušik, in da so uporabili 20 vol.% presežek zraka. b) Določi volumsko sestavo izhodnih plinov. c) Koliko m<sup>3</sup> kotlovene vode lahko pri tem segrejemo iz 20 °C na 80 °C?  $c_{p,voda} = 4,181 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\rho_{(voda)} = 1 \text{ g cm}^{-3}$

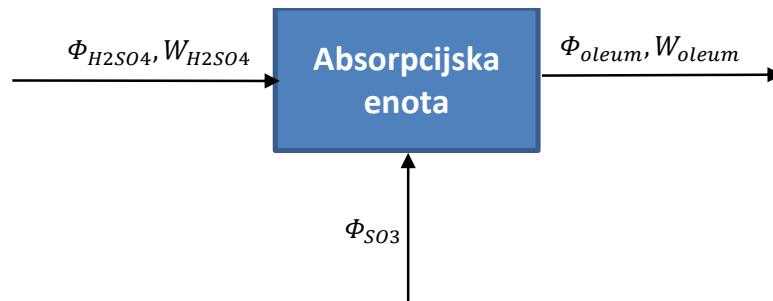
Plin	$\phi/\%$
N <sub>2</sub>	56,2
CO <sub>2</sub>	12,0
CO	28,0
H <sub>2</sub>	3,0
CH <sub>4</sub>	0,6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,2

**2.6.2** Med elektrolizo 200 mL, 2 M vodne raztopine NaCl z gostoto 1,10 g cm<sup>-3</sup>, se na katodi sprosti 22,4 L plina (p.n.p). Izračunaj masni delež NaCl v raztopini po elektrolizi v ut.%, če veš, da je standardni elektrodni potencial za reakcijo  $\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}^0 = E^0 = -2,71$  za reakcijo  $\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^- = E^0 = -0,83$  ter da so uporabili bakrene elektrode, ki reagirajo s Cl<sub>2</sub>, in med elektrolizo uporabili konstanto mešanje.

**2.6.3** Iz rude, ki vsebuje 80 ut.% sfalerita — ZnS in 18 ut.% galenita – PbS (ostalo je elementarno žveplo), proizvajamo žveplovo (VI) kislino. Koliko kg 96 ut.% vodne raztopine žveplove (VI) kisline z gostoto 1,84 g cm<sup>-3</sup> proizvedemo iz 1 t take rude? Upoštevajte, da proizvodnja SO<sub>3</sub> poteka v dveh stopnjah. V prvi iz rude izločimo žveplo v obliki žveplovega dioksida. V drugi stopnji poteka konverzija žveplovega dioksida v žveplov trioksid s t. i. kontaktnim procesom, ki poteka z izkoristkom 98 %. Zapišite vse reakcije, ki potekajo do nastanka končnega produkta (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Izračunajte še, kolikšno maso vode v kg in kolikšen volumen plinske mešanice s sestavo 80 vol.% N<sub>2</sub> in 20 vol.% O<sub>2</sub> p.n.p. porabimo za proizvodnjo 96 ut.% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pri vseh reakcijah sproti odvajamo produkte.

**2.6.4** Izračunajte temperaturno območje, v katerem bo mešanica 1-propanola z zrakom eksplozivna. Eksplozijsko območje 1-propanola v zraku je od 2,2 vol.% do 13,7 vol.%. Upoštevajte, da je zunanji zračni tlak 1 bar, temperatura vrelišča 97 °C in izparilna toplota 42,4 kJ mol<sup>-1</sup>.

**2.6.5** Oleum proizvajajo z absorpcijo SO<sub>3</sub> v koncentrirano H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. V prvem koraku pride do raztapljanja SO<sub>3</sub> v H<sub>2</sub>O, ki je na voljo sistemu, potem pa do absorpcije SO<sub>3</sub>. Koncentracija oleuma se lahko izrazi kot masni delež SO<sub>3</sub> v 100 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Glede na zgoraj povedano, izračunaj koliko SO<sub>3</sub> na uro moramo vnesti v sistem, da kontinuirno proizvajamo 30 % oleum, če veš, da je pretok 98 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 440 kg h<sup>-1</sup>. Izračunaj tudi, kolikšna je proizvodnja 30 % oleuma na uro.



**2.6.6** Fosfor uporabljamo pri proizvodnji gnojil. Na industrijski skali ga pridobivamo iz različnih mineralov. Najpogosteje iz fosforitnih rud, ki vsebujejo kalcijev fosfat (V). Izračunaj masni delež kalcijevega fosfata (V) v rudi, če veš, da smo iz 500 kg fosforitne rude pridobili 28,5 kg fosforja. Tehnološki proces proizvodnje fosforja poteka po reakcijah, zapisanih v Enačbah 19 in 20. Reakcije najprej uredi.



**2.6.7** Rdeče blato je jalovina, ki nastane pri predelavi boksitne rude. S procesom sintranja lahko v prisotnosti apnenca (CaCO<sub>3</sub>) in sode (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) v molskem razmerju: n(Na<sub>2</sub>O):n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 1,2 in n(CaO):n(SiO<sub>2</sub>) = 2,2 pri visokih temperaturah (1100–1200 °C) iz rdečega blata recikliramo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in ga nadalje uporabimo za pridobivanje aluminija. Izračunaj, koliko rdečega blata v tonah moramo reciklirati, da pripravimo surovino (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) za proizvodnjo 1 tone Al. Izračunaj tudi, koliko ton apnenca in ton sode moramo dodati v peč, če veš, da pri procesu uporabljajo apnenec s čistočo 88 ut.% ter sodo s čistočo 95 ut.%.

Sestava rdečega blata	$\omega/\%$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,0
SiO <sub>2</sub>	6,5
Na <sub>2</sub> O	5,5
CaO	2,2
TiO <sub>2</sub>	19,0
izguba pri sežigu (LOI)	8,8

**2.6.8** Pri alkalni elektrolizi vode skozi elektrolitsko celico 8 min. teče tok 1 A. Na Ni-elektrodi se razvija kisik, na grafitni elektrodi pa vodik, ki ju lovimo v merilna valja, napolnjena z elektrolitom. Po končani elektrolizi izmerimo volumen plina, ki se je izločal na anodi, tako da izenačimo gladini elektrolita v elektrolitski celici in merilnem valju. Volumen plina je 36 mL. Izračunajte parcialni tlak vodne pare v merilnem valju, če je zunanji zračni tlak 97,7 kPa in temperatura v prostoru 23 °C.

**2.6.9** Na katalizatorski sloj vodimo žveplov dioksid, kjer reagira do žveplovega trioksida. Napišite reakcijo in jo uredite. V kolikšnem množinskem razmerju sta bila SO<sub>2</sub> in O<sub>2</sub> pred reakcijo. Po reakciji so plini v razmerju SO<sub>2</sub> : O<sub>2</sub> : SO<sub>3</sub> = 0,3 : 0,4 : 0,3.

**2.6.10** Natrijev sulfat (IV) odstranjuje raztopljeni kisik iz tehnološke vode po Enačbi 21.



Z dodajanjem natrijevega sulfata (IV) v tehnološko vodo preprečujemo korozijo v recirkulacijskih hladilnih sistemih. Koliko kg natrijevega sulfata (IV) potrebujemo za popolno odstranitev kisika iz 50 m<sup>3</sup> tehnološke vode, ki vsebuje 20 vol. ppm raztopljenega kisika? Za popolno odstranitev kisika dodajamo natrijev sulfat (IV) v 2 ut.% prebitku. Upoštevajte normalne pogoje.

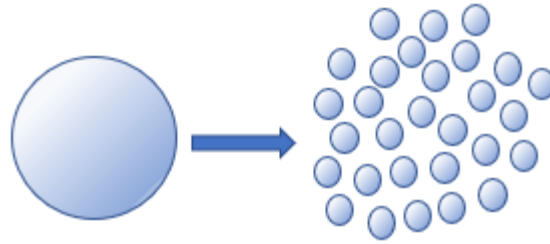
**2.6.11** Faktor oblike po Waddellu je definiran kot kvocient površine krogle z enakim volumnom kot delec in površine delca. Izračunajte faktorje oblike za delce v obliki krogle, kocke in delca v obliki kvadra (igličastega delca) z dimenzijami a = 2 mm, b = 0,5 mm in c = 1 mm.

**2.6.12** Calusius-Clapeyronova enačba se uporablja za izračun parnega tlaka hlapne komponente nad raztopino. V enačbi (Enačba 23)  $p$  predstavlja parni tlak hlapne komponente nad raztopino,  $T$  je temperatura v kelvinih. Ali s segrevanjem etanola na 20 °C dosežemo spodnjo eksplozijsko mejo, ki je 3,3 vol.%? Etanol ima vrelišče pri 78,3 °C, njegova izparilna toplota je 38,56 kJ mol<sup>-1</sup>. Zunanji zračni tlak je 1019 hPa.

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta H_{izp}}{RT^2} \quad (\text{Enačba 22})$$

$$p_1 = p_2 \exp \left[ \frac{-\Delta H_{izp}}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (\text{Enačba 23})$$

**2.6.13** Mletje je postopek, s katerim disperznim sistemom povečamo površino. Kolikokrat se poveča površina delcev, če je povprečni volumen enega delca pred mletjem enak  $0,5 \text{ cm}^3$ , po mletju pa  $3,5 \cdot 10^{17} \text{ nm}^3$ ? Upoštevajte faktor sferičnosti 1 za vse delce pred in po mletju.





### 3. REŠITVE

#### 1.1 PRETVORBE

- 1.1.1  $1 \text{ m} = 10^{10} \text{ \AA}$ , b)  $1 \text{ m} = 10^9 \text{ nm}$ , c)  $1 \text{ m} = 39,3701 \text{ in}$
- 1.1.2  $d = 1,651 \text{ mm}$
- 1.1.3 a)  $900 \text{ sq. ft} = 83,6127 \text{ m}^2$ , b)  $10 \text{ cm}^2 = 10^{15} \text{ nm}^2$
- 1.1.4 a)  $0,09869 \text{ atm}$ , b)  $1,4504 \text{ psi}$ , c)  $0,1 \text{ bar}$ , d)  $10 \text{ kPa}$
- 1.1.5 a)  $133,22 \text{ mbar}$ , b)  $\sim 100 \text{ torr}$
- 1.1.6  $0,60 \% = 6 \text{ ‰} = 6000 \text{ ppm} = 6000000 \text{ ppb}$
- 1.1.7  $m = 2700 \text{ \mu g}$
- 1.1.8  $E = 1,98 \cdot 10^9 \text{ J}$
- 1.1.9  $E = 456,056 \text{ kJ}$ ,  $t = 76,009 \text{ min}$ ,  $s = 31,67 \text{ km}$
- 1.1.10  $V = 7,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 7,11 \cdot 10^{-2} \text{ dm}^3 = 7,11 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 = 7,11 \cdot 10^{22} \text{ nm}^3$

#### 1.2 ZGRADBA SNOVI

- 1.2.1  $m = 2,66 \times 10^{-13} \text{ \mu g}$
- 1.2.2  $A_r = 16,0044 \text{ g mol}^{-1}$
- 1.2.3  $W_{(Fe)} = 72,36 \%$
- 1.2.4  $\dot{M}_{(zrak)} = 28,96 \text{ g mol}^{-1}$
- 1.2.5 a)  $n = 1000$ , b)  $n > 50 \rightarrow$  fino drobljenje, c) faktor povečanja površine = 1000
- 1.2.6  $\omega = 3,91 \%$ ,  $x = 1,57 \%$ ,  $V = 24,5 \text{ mL}$
- 1.2.7  $\text{CaCO}_3$
- 1.2.8  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 84,34 \text{ mL}$ ,  $m_{\text{CuSO}_4} = 149,66 \text{ g}$
- 1.2.9  $m_{\text{sadje}} = 243,29 \text{ kg}$
- 1.2.10  $\omega = 6,67 \%$ ,  $\rho = 600 \text{ g dm}^{-3}$

- 1.2.11  $\omega = 97,28 \%$
- 1.2.12  $N_{(Fe)} = 1200$  delcev
- 1.2.13 Da;  $0,5 \text{ ppb} > 0,36 \text{ ppb}$ ,  $\psi_{(etantiol)} = 0,5 \text{ }\mu\text{L}/\text{m}^3$
- 1.2.14  $\dot{M}_{r\infty} = 29,18 \text{ g mol}^{-1}$
- 1.2.15  $W_{\text{razpad}(S2F10)2h} = 81,82 \text{ ut.}\%$
- 1.2.16  $m_{\text{CaO}} = 12,96 \text{ g}$ ,  $m_{\text{MgO}} = 17,02 \text{ g}$ ,  $m_{\text{Na}_2\text{O}} = 51,71 \text{ g}$
- 1.2.17  $\rho = 4,32 \text{ g cm}^{-3}$
- 1.2.18  $P = 12,44 \%$
- 1.2.19  $\rho_{(nasipna)} = 204,17 \text{ g L}^{-1}$ ,  $\rho_{(zbita)} = 232,01 \text{ g L}^{-1}$
- 1.2.20  $\rho_{(navidezna)} = 4,90 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $\rho_{(geometrijska)} = 4,17 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $P_{(T)} = 25,73 \%$ ,  $P_{(O)} = 15 \%$ ,  $P_{(Z)} = 10,73 \%$ , rel.  $\rho_{(navidezna)} = 87,34 \%$ , rel.  $\rho_{(geometrijska)} = 74,33 \%$
- 1.2.21  $P_{(T)} = 15,52 \%$ ,  $P_{(O)} = 9,29 \%$ ,  $P_{(Z)} = 6,23 \%$
- 1.2.22  $P_{(PO)} = 16,32 \%$ ,  $d_{\text{pred}} = 7,35 \text{ mm}$
- 1.2.23  $-26,92 \%$
- 1.2.24  $P_{(PO)} = 19,06 \%$ ,  $P_{(PRED)} = 33,89 \%$
- 1.2.25  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$  – obstajata dve spojini s tako empirično formulo: a)  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$  in b)  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ . Etanol je pri teh pogojih tekočina, zato je pravilen odgovor: dimetil eter ( $T_v = -24^\circ\text{C}$ ).
- 1.2.26  $w_{(Fe_2O_3)} = 84,38 \text{ ut.}\%$
- 1.2.27  $w_{(S)} = 14,1 \text{ ut.}\%$
- 1.2.28  $\text{Faktor povečave površine} = 1,71 \times 10^6$
- 1.2.29  $w_{(FeO)} = 60,26 \text{ ut.}\%$
- 1.2.30 intermediati: po 1. stopnji  $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , po 2. stopnji  $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , po 3. stopnji  $\text{CuSO}_4$ ,  $n_{(\text{H}_2\text{O})} = 5 \text{ mol}$ ,  $m_{(\text{H}_2\text{O})} = 18 \text{ mg}$
- 1.2.31  $m_{(\text{peska})} = 750 \text{ g}$ ,  $m_{(\text{sode})} = 261,4 \text{ g}$ ,  $m_{(\text{apnenca})} = 237,7 \text{ g}$
- 1.2.32  $\sigma_0 = 95,28 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{20} = 51,43 \text{ MPa}$

1.2.33  $\sigma_{0,8\mu m} = 147,98 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{80nm} = 413,91 \text{ MPa}$ ,  $d = 3,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

1.2.34

$T_{\text{sintranjal}}/^{\circ}\text{C}$	$h/\text{mm}$	$m/\text{g}$	$d/\text{mm}$	$\varepsilon_{\text{geom}}/\%$	$\rho_{\text{sintrana}}/\text{g cm}^{-3}$	$\rho_{\text{relativna}}$
1000	3,10	0,302	5,82	46,9	3,661	0,531
1100	3,00	0,298	5,61	41,8	4,019	0,582
1200	2,97	0,299	5,20	31,3	4,740	0,687
1300	2,99	0,300	4,82	20,3	5,499	0,797

### 1.3 PLINSKI ZAKONI

#### 1.3.1. Idealni plini

1.3.1.1  $V = 26,03 \text{ L}$

1.3.1.2  $V_m = 22,4 \text{ mol L}^{-1}$

1.3.1.3  $p_{N_2} = 5,065 \text{ kPa}$ ,  $p_{O_2} = 26,338 \text{ kPa}$ ,  $p_{Ne} = 60,78 \text{ kPa}$ ,  $p_{CO} = 9,117 \text{ kPa}$

1.3.1.4  $\varphi_{N_2} = 70,4 \%$ ,  $\varphi_{O_2} = 29,6 \%$

1.3.1.5  $\Delta T = 54 \text{ K}$ ,  $W_{(H_2 - \text{izpust})} = 15,4 \text{ ut.}\%$

1.3.1.6 Jeklenka 1 = 43,2 vol.%, jeklenka 2 = 8,8 vol.%, jeklenka 3 = 48,0 vol.%

1.3.1.7  $p = 152 \text{ psi}$

1.3.1.8  $\rho_{(CO_2)} = 0,0638 \text{ g mL}^{-1}$

1.3.1.9  $W_{(CaCO_3)} = 0,613$

1.3.1.10  $W_{(N_2)} = 74,80 \text{ ut.}\%$ ,  $\psi_{(N_2)} = 77,23 \text{ vol.}\%$ ,  $p_{(N_2)} = 78,23 \text{ kPa}$ ,  $p_{(O_2)} = 23,07 \text{ kPa}$

1.3.1.11 Butan -  $C_4H_{10}$

1.3.1.12  $P = 18,9 \text{ kPa}$

1.3.1.13 Alkalijska kovina = Li,  $w_{(Rb)} = 68,4 \text{ ut.}\%$ ,  $w_{(Li)} = 31,6 \text{ ut.}\%$

1.3.1.14  $T_{He}/T_{Ne} = 0,2$

1.3.1.15  $\dot{M} = 83,07 \text{ g mol}^{-1}$

1.3.1.16 a)  $4\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3 \rightarrow 12\text{CO}_2 + 10\text{H}_2\text{O} + 6\text{N}_2 + \text{O}_2$ ; b)  $\Sigma V = 5,98 \text{ m}^3$ ; c)  $p = 2,99 \text{ bar}$

1.3.1.17  $\psi_{(\text{etin})} = 0,42 \text{ vol.}\%$ , NE

### 1.3.2. Realni plini

1.3.2.1 a)  $p_i = 61,2 \text{ atm}$ , % odstopanja = -15,5 %, b)  $p_r = 52,6 \text{ atm}$ , % odstopanja = +0.8 %

1.3.2.2  $T_{\text{ideal}} = 731 \text{ K}$ ,  $T_{\text{real}} = 697 \text{ K}$ ,  $\Delta T = 34 \text{ K}$

1.3.2.3 a)  $\text{N}_2$

Vrednost van der Waalove konstante  $a$  za določen plin je odvisna od jakosti medmolekulskih interakcij. Molekule s šibkejšimi privlačnimi silami imajo načeloma nižjo vrednost konstante  $a$ , medtem ko imajo tiste z najmočnejšimi privlačnimi silami višje vrednosti.

Od naštetih molekul  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CCl}_4$  sta le dve molekuli z nepolarnimi vezmi, in sicer dušik in klor. Napolarna vez načeloma rezultira v šibkejših medmolekulskih interakcijah. Preostale molekule imajo polarne vezi, zato pričakujemo višje vrednosti konstante  $a$ . Ker je molekula  $\text{N}_2$  manjša od molekule  $\text{Cl}_2$  in ima manj prisotnih elektronov, bodo privlačne sile med molekulami  $\text{N}_2$  šibkejše od tistih med  $\text{Cl}_2$  molekulami in zato lahko pričakujemo nižjo vrednost konstante  $a$ .

b)  $\text{CCl}_4$

Na vrednost van der Waalove konstante  $b$  lahko sklepamo s primerjavo volumna molekul na seznamu oz. van der Waalovega radija molekul. Majhni molekularni volumni rezultirajo v nizkih vrednostih  $b$ , medtem ko veliki molekularni volumni predstavljajo visoke vrednosti  $b$ . Od spojin na seznamu je  $\text{CCl}_4$  največja, zato pričakujemo, da bo imela največjo konstanto  $b$ .

1.3.2.4 a)  $V_{m \text{ ideal}} = 0,595 \text{ L mol}^{-1}$ , b)  $V_{m \text{ real}} = 0,528 \text{ L mol}^{-1}$

## 1.4 RAZTOPINE

1.4.1  $V = 124 \text{ mL}$

1.4.2  $x_{\text{KCl}} = 8,49 \text{ mol.}\%$ ,  $\omega_{\text{KCl}} = 27,78 \text{ ut.}\%$

1.4.3  $V_{(\text{HCl})} = 180,04 \text{ mL}$

1.4.4  $V = 80 \text{ L}$

1.4.5  $V_{(\text{H}_2\text{O})} = 533,02 \text{ m}^3$

1.4.6  $m_{(H_2O)} = 33,55 \text{ kg}$

1.4.7  $V_{(HCl)} = 164,19 \text{ mL}$

1.4.8  $V_{(H_2SO_4)} = 55,83 \text{ mL}$

## 1.5 BILANCE

### 1.5.1 Masne bilance

1.5.1.1  $\Phi_1 = 11,25 \text{ kg min}^{-1}$ ,  $\Phi_{H_2O} = 88,75 \text{ kg min}^{-1}$

1.5.1.2  $\Phi_2 = 1,097 \text{ mL min}^{-1}$

1.5.1.3  $\Phi_3 = 90 \text{ kg h}^{-1}$ ,  $W_{A3} = 66,67 \text{ ut.}\%$ ,  $W_{B3} = 33,33 \text{ ut.}\%$ ,  $\Phi_5 = 125 \text{ kg h}^{-1}$ ,  $W_{A5} = 57,80 \text{ ut.}\%$ ,  $W_{B5} = 42,20 \text{ ut.}\%$ ,  $\Phi_7 = 75 \text{ kg h}^{-1}$ ,  $W_{A7} = 46,33 \text{ ut.}\%$ ,  $W_{B7} = 53,67 \text{ ut.}\%$

1.5.1.4  $m_{NaOH} = 18900 \text{ kg}$

1.5.1.5  $\gamma_{poln} = 204,6 \text{ g L}^{-1}$ ,  $c_{poln} = 3,5 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\gamma_{2h} = 204,6 \text{ g L}^{-1}$ ,  $c_{2h} = 3,5 \text{ mol L}^{-1}$

1.5.1.6  $m_{apno} = 617,4 \text{ kg}$

1.5.1.7  $\Phi_2 = 5,51 \text{ g min}^{-1}$

1.5.1.8  $m_{(H_2O)} = 1,41 \text{ t}$ ,  $m_{(trdni\ ostane\ek)} = 2,96 \text{ t}$ ,  $V_{(CO_2)} = 320,10 \text{ m}^3$

1.5.1.9  $m_{\text{nevtalizacijskega sredstva}} = 84,4 \text{ kg}$

### 1.5.2 Energjske bilance

1.5.2.1  $t = 17,5 \text{ min}$

1.5.2.2  $T = 28,57 \text{ }^\circ\text{C}$

1.5.2.3  $t = 13,5 \text{ min}$

1.5.2.4  $T_{(sistema)} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , sistem sestavljata voda in led,  $m_{(led)} = 27,52 \text{ g}$ ,  $m_{(voda)} = 25,14 \text{ g}$

1.5.2.5  $t = 17,7 \text{ min}$

1.5.2.6  $t = 1,5 \text{ h}$

1.5.2.7 4,9

1.5.2.8  $P = 14,4 \text{ MW}$ ,  $t = 130,2 \text{ h}$

## 1.6 ELEKTROKEMIJA

1.6.1  $V_{(H_2)} = 661 \text{ L}$ ,  $V_{(O_2)} = 330,5 \text{ L}$

1.6.2  $c_{(Ni^{2+})} = 0,166 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $V_{(Cl^-)} = 0,331 \text{ mol L}^{-1}$

1.6.3  $\eta = 73,78\%$

1.6.4  $\Delta m = 2,37 \text{ kg}$ ,  $c = 0,667 \text{ mol L}^{-1}$

1.6.5  $X = 6$

## 2.1 HABER BOSCHEV POSTOPEK

2.1.1  $K_p = \frac{p_{NH_3}^2}{p_{H_2}^3 p_{N_2}}$ , poveča se 25-krat

2.1.2  $K_c = 0,0898 \text{ L}^2 \text{ mol}^{-2}$ ,  $K_p = 5,81 \cdot 10^{-15} \text{ Pa}^{-2}$

2.1.3  $K_x(2) = 7,34 K_x(1)$

2.1.4  $K_p(150 \text{ }^\circ\text{C}) = 23,95 \text{ bar}^{-2}$

2.1.5  $t = 92,01 \text{ h}$

2.1.6 dodati moramo 121,41 mol dušika

2.1.7 poviša se za 5,93-krat

## 2.2 SOLVAYEV POSTOPEK

2.2.1  $H = 23,4\%$

2.2.2  $m_{(CaCl_2)} = 202,23 \text{ g}$ ,  $V_{(NH_4Cl)} = 1,47 \text{ L}$

2.2.3 Limitni reaktant je  $CO_2$ .  $m_{(NaHCO_3)} = 36,96 \text{ g}$

2.2.4  $CT = 762,87 \text{ mg CaO L}^{-1}$ ,  $CaT = 386,91 \text{ mg CaO L}^{-1}$ ,  $MgT = 375,96 \text{ mg CaO L}^{-1}$

2.2.5  $\gamma_{(NH_3)} = 113,84 \text{ g L}^{-1}$ ,  $V_{(HCl)} = 66,96 \text{ mL}$

2.2.6  $m_{(H_2O)} = 261,68 \text{ kg}$ ,  $V_{(CO_2)} = 58,73 \text{ m}^3$

2.2.7  $m_{Ca(OH)_2} = 396,43 \text{ g}$ ,  $m_{Na_2CO_3} = 2697,32 \text{ g}$ ,  $c_{Cl^-} = 4,62 \text{ mol L}^{-1}$ ,  $\gamma_{(NH_3)} = 70 \text{ g L}^{-1}$ ,  $m_{CaO} = 194,01 \text{ kg}$ ,  $m_{CaCO_3} = 346,5 \text{ kg}$ ,  $m_{Na_2CO_3} = 367,24 \text{ kg}$

2.2.8 a)  $h_{(NH_3)} = 48$ ,  $h_{(CO_2)} = 133$ ,  $h_{(NH_3)_2} = 50$ ,  $h_{(CO_2)_2} = 138$ , b)  $h_{(NH_3)} = 148$

### 2.3 OSTWALDOV POSTOPEK

2.3.1  $\Delta H_{(1. \text{reakcija})} = -907,3 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_{(2. \text{reakcija})} = -113,64 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_{(3. \text{reakcija})} = -136,27 \text{ kJ mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_{(\text{celokupna})} = -4124,82 \text{ kJ mol}^{-1}$

2.3.2  $\phi_{v(NH_3)} = 136\,699 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$ ,  $\phi_{v(\text{zrak})} = 1\,139\,163 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$

2.3.3  $\alpha = 1,29 \%$

### 2.4 CLAUSOV POSTOPEK

2.4.1  $\Phi_n = 130,66 \text{ mol min}^{-1}$

2.4.2 stopnja konverzije je 94,1 %

### 2.5 PARNI REFORMING

2.5.1  $\Phi_{\text{drugi pretok}} = 1083,3 \text{ mol h}^{-1}$ ,  $\Phi_{H_2} = 2700 \text{ mol h}^{-1}$

2.5.2  $x(CO) = 9,09 \%$ ,  $x(H_2O) = 9,09 \%$

2.5.3  $\varphi(CO) = 11,1 \%$ ,  $\varphi(H_2O) = 44,4 \%$ ,  $\varphi(CO_2) = 22,2 \%$ ,  $\varphi(H_2) = 22,2 \%$

### 2.6 OSTALI PROCESI

2.6.1  $V_{(\text{zraka})} = 207,6 \text{ m}^3$ , b)  $\psi_{(CO_2)} = 21,77 \text{ vol.}\%$ ,  $\psi_{(H_2O)} = 2,44 \text{ vol.}\%$ ,  $\psi_{(N_2)} = 73,95 \text{ vol.}\%$ ,  $\psi_{(O_2)} = 1,84 \text{ vol.}\%$ , c)  $2,79 \text{ m}^3$

2.6.2  $w_{(NaCl)} \text{ po elektrolizi} = 12,70 \text{ ut.}\%$

2.6.3 Reakcije:  $2ZnS + 3O_2 \rightarrow 2ZnO + 2SO_2$ ,  $2PbS + 3O_2 \rightarrow 2PbO + 2SO_2$ ,  $S + O_2 \rightarrow SO_2$ ,  $2SO_2 + O_2 \leftrightarrow 2SO_3$ ,  $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ ,  $m_{(96\%)} = 958,90 \text{ kg}$ ,  $m_{(H_2O)} = 207,43 \text{ kg}$ ,  $V_{(O_2)} = 2112,04 \text{ m}^3$

2.6.4 od 16,71 °C do 50,37 °C

- 2.6.5  $\Phi_{SO_3} = 244,4 \text{ kg h}^{-1}$ ,  $\Phi_{oleum} = 684,4 \text{ kg h}^{-1}$
- 2.6.6  $w_{(Ca_3(PO_4)_2)} = 28,5\%$
- 2.6.7  $m_{(rde\check{c}e \text{ blato})} = 9,00 \text{ t}$ ,  $m_{(soda)} = 4,38 \text{ t}$ ,  $m_{(apnenec)} = 2,03 \text{ t}$
- 2.6.8  $p_{(H_2O)} = 12,67 \text{ kPa}$
- 2.6.9  $SO_2:O_2 = 0,52:0,48$
- 2.6.10  $m_{(Na_2SO_3)} = 11,48 \text{ g}$
- 2.6.11 1; 0,81; 0,69
- 2.6.12  $\psi_{(EtOH)} = 7,22 \text{ vol.}\%$ , da, presežemo spodnjo eksplozijsko mejo
- 2.6.13 11,25-krat