

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

LABORATORNÍ ABSORPČNÍ JEDNOTKA
LABORATORY ABSORPTION UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

ALEXANDR USSIK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ussik** Jméno: **Alexandr** Osobní číslo: **423385**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Laboratorní absorpční jednotka

Název diplomové práce anglicky:

Laboratory absorption unit

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši se zaměřením na způsoby separace CO₂ ze spalín nebo syntézního plynu pomocí absorpce pro jeho další využití. Při rešerši se zaměřte na používané absorbenty, potřebné výpočtové parametry, aparátová zapojení, stávající laboratorní řešení.

Na základě poznatků z rešerše:

- * Navrhněte laboratorní absorpční jednotku na separaci CO₂ včetně propojení a měřících komponent v mobilním provedení.
- * Proveďte základní bilanční výpočty potřebné pro dimenzování jednotky.
- * Proveďte basic design hlavních aparátů a komponent.
- * Proveďte odhad nákladů na stavbu jednotky.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

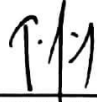
Datum zadání diplomové práce: **23.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce:



doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry




prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30-04-2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Laboratorní absorpční jednotka“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Šulce, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Alexandr Ussik

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří se na mojí práci podíleli. Zejména pak děkuji doc. Ing. Radku Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení práce a konzultace. Dále bych chtěl poděkovat všem lidem z ústavu procesní a zpracovatelské techniky, kteří poskytovali odbornou informaci v období mého studia

Anotační list

Jméno autora: Alexandr
Příjmení autora: Ussik
Název práce česky: Laboratorní absorpční jednotka
Název práce anglicky: Laboratory absorption unit

Rozsah práce:

Počet stran: 93
Počet obrázků: 36
Počet tabulek: 41
Počet příloh: 0

Akademický rok: 2018/2019
Jazyk práce: Český
Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze
Studijní program: N2301 Procesní technika
Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.

Anotace česky: Zachycování oxidu uhličitého z různých zdrojů emise pomocí alkylaminů je velmi perspektivní a rozvíjící technologií v této době. Pro procesy zachycení po spalování, čištění syntézního nebo zemního plynu chemická absorpce je nejlepší volbou, kterou lze relativně jednoduše aplikovat na stávající systémy nebo na systémy které budou postaveny v blízké budoucnosti. Snížení energetických potřeb procesu odstranění CO₂ pomocí alkylaminů je hlavní výzvou pro optimalizace ekonomičnosti pro budoucí projekty většího měřítku. Větší část potřebné energie se spotřebovává ve stripovací části jednotky, určené pro zpětné uvolnění CO₂ z absorpčního roztoku. Pro účely testování procesních parametrů v absorberu a desorberu byla navržena kompaktní laboratorní jednotka.

Anotace anglicky: The capture of carbon dioxide from various emission sources using alkylamines is very promising and growing technology at this time. For the post combustion processes, purification of synthesis or natural gas by chemical absorption is the best choice, which can be relatively easily applied to existing systems or to systems that will be built in the near future. Reducing the energy process demands of capture CO₂ by using alkylamines is a major challenge for optimising economics for future larger scale projects. Most of the necessary energy is consumed in the stripping part of the unit, designed to release CO₂ from the working solution. For the purpose of testing process parameters in the absorber and desorber, the compact laboratory unit was designed.

Klíčová slova: zachycení CO₂, absorpce, desorpce, aminy, MEA, laboratorní jednotka
Key words: CO₂ capture; absorption; desorption; amines, MEA, laboratory unit

Obsah

1	Úvod	13
2	Teoretická část	14
2.1	Zdroje oxidu uhličitého	14
2.1.1	Spaliny z tepelných elektráren.....	16
2.1.2	Zemní plyn.....	18
2.1.3	Syntézní plyn.....	18
2.1.4	Bioplyn.....	19
2.1.5	Vhodné plynné směsi pro laboratorní testování.....	20
2.2	Metody odstraňování CO ₂ z plynných směsi	21
2.3	Absorpční procesy	21
2.4	Chemická absorpce alkylaminy.....	24
2.4.1	Absorpce vodným roztokem MEA.....	26
2.4.2	Energetické poměry.....	29
2.4.3	Degradace MEA.....	33
2.4.4	Inhibitory koroze a degradace	33
2.4.5	Provozní a bezpečnostní opatření.....	35
2.5	Referenční zařízení	36
2.6	Materiály aparátů a těsnících prvků.....	38
2.7	Konstrukce reboileru	40
3	Koncepční návrh	42
3.1	Absorpčně - desorpční okruh	42
3.1.1	Návrh provozních parametrů.....	44
3.2	Stripovací kolona.....	48
3.3	Testování náplní	49
3.4	Výzkum varu a stékajícího filmu.....	50
4	Komponenty	52
4.1	Absorbér.....	52
4.1.1	Popis a uspořádání.....	52
4.1.2	Náplň kolony	53
4.2	Desorbér.....	54
4.2.1	Funkční princip.....	54
4.2.2	Popis a uspořádání.....	54
4.2.3	Pevnostní výpočty	56
4.2.4	Topná část.....	57
4.2.5	Průhledítka pro sledování procesu	59

4.3	Čerpadla	60
4.4	Kompresory	62
4.5	Výměníky tepla a kondenzátory.....	63
4.6	Chladicí jednotka	64
4.7	Měřicí prvky.....	65
4.7.1	Snímače teploty	65
4.7.2	Snímače tlaku.....	66
4.7.3	Měření průtoku.....	67
4.7.4	Analýza složení.....	69
4.7.5	Měření hladiny.....	70
4.8	Potrubí a spojovací prvky	71
4.9	Těsnící prvky	72
4.10	Izolace aparátů a potrubí.....	73
4.11	Nosná konstrukce.....	73
5	Odhad ceny zařízení	76
6	Závěr	78
	Literatura	80
	Seznam obrázků	90
	Seznam tabulek	92

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Význam	Jednotka
C	Měrné náklady	($\text{€} \cdot \text{t}^{-1}$, $\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$)
C	Cena	(Kč , USD)
C _p	Měrná izobarická tepelná kapacita	($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
d	Průměr	(m)
Δh_{abs}	Měrná absorpční entalpie	($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)
Δp_z	Tlaková ztráta	(Pa)
I _R	Marshall - Swiftův index	($-$)
F	F-faktor strukturované náplně	($\text{Pa}^{-0,5}$)
H	Výška	(m)
L	Délka	(m)
L/G	Měrná spotřeba abs. činidla	($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
LD50	Smrtná dávka (50% úhyn)	($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
ṁ	Hustota hmotnostního toku	($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
n	Látkové množství	(mol)
p _i	Parciální tlak složky i	(mbar , kPa)
P	Celkový tlak	(MPa , bar)
P	Výkon	(kW)
q	Měrná spotřeba energie	($\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$)
q	Hustota výkonu	($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Q	Tepelný tok	(W)
s	Tloušťka	(mm)
S	Plocha	(m^2)
T	Teplota	($^{\circ}\text{C}$)
U	Součinitel prostupu tepla	($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
u	Rychlost	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V	Objem	(m^3 , l)
Ṡ	Průtok	($\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$)
X	Molově-hmotnostní koncentrace	($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
α	Měrné molové zatížení roztoku	($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
λ	Vlnová délka	(μm)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Symbol	Význam	Jednotka
ρ	Hustota	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
φ	Účinnost	(%)
ω	Hmotnostní koncentrace	(% hm.)

Zkratka	Význam
AAPD-cresol	angl. Alpha,alphadiortho-cresol
AISI	angl. American Iron and Steel Institute
AMP	Aminomethylpropanol
BSPT	angl. British Standard Pipe
CAS	angl. Chemical abstracts service
CASTOR	angl. CO ₂ , from Capture to Storage
CFB	angl. Circulating fluidized bed - atmosférická fluidní vrstva
DEA	Diethanolamine
DGA	Diglycolamine
DIPA	Diisopropylamine
DMPEG	angl. Polyethylene glycol dimethyl ether
e- NRTL	angl. electrolyte Non-Random Two-Liquid model
EOR	angl. Enhanced oil recovery –dodatečná těžba ropy
EGR	angl. Enhanced gas recovery - dodatečná těžba plynu
EPDM	Etylen-propylen-dienový kaučuk
EU CAPRICE	angl. Capture using Amine Processes: International Cooperation and Exchange
FEP	angl. Fluorinated ethylene propylene
FEPM TFE	angl. Tetrafluoroethylene Propylene
FFKM	Perfluorelastoměr
HETP	angl. Height equivalent to a theoretical plate – výškový ekvivalent teoretického patra
IGCC	angl. Integrated gasification combined cycle - integrovaný cyklus zplyňování
IR	angl. Infrared radiation - infračervené záření

Zkratka	Význam
ITC	angl. International Test Centre
LMTD	angl. Logarithmic mean temperature difference - střední logaritmický teplotní rozdíl
MDEA	Methyldiethanolamine
MEA	Monoethanolamine
MEKO	angl. Methyl ethyl ketoxime
Mtoe	angl. Million tonnes of oil equivalent - miliony tun v ropném ekvivalentu
NGCC	angl. Natural gas combined cycle - plynový kombinovaný cyklus
NMP	Methylpyrrolidon
NTNU	nor. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NO	Nerezová ocel
PC	angl. Pulverized coal - spalování uhelného prášku
PCC	angl. Post-combustion capture - zachycení po spalování
PCTFE	Polychlorotrifluoroethylene
PDTA	angl. Trimethylenediaminetetraacetic acid
PE	Piperidineethanol
PFA	Perfluor alkoxyalkan kopolymer
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PZ	Piperazine
RWE	něm. Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
SINTEF	nor. Stiftelsen for industriell og teknisk forskning
TCM DA	angl. Technology Centre Mongstad
TEA	Triethylamine
UNIQAC	angl. Universal quasichemical
VT	Výměník tepla

1 Úvod

Klima naší planety je v současné době velmi příjemné a pohostinné pro lidskou civilizaci. Globální oteplování zemské atmosféry a s nimi spojená změna klimatu je jednou z aktuálních výzev 21. století. Aktuální měření zprůměrovaná za rok a po všech zeměpisných šířkách ukazují, že průměrná teplota atmosféry je přibližně 15 °C [1]. Výpočty ukazují, že tato průměrná teplota je přibližně o třicet pět stupňů vyšší, než kdyby neexistovala atmosféra v současné podobě [2]. Tento rozdíl je způsoben "skleníkovým efektem" zemské atmosféry.

Skleníkový efekt je přirozeným jevem pro naši planetu. Většina slunečního záření dopadajícího na zem je odražena do vesmíru od povrchu a atmosféry. Určité plyny v atmosféře, tzv. skleníkové plyny, absorbují a pak rychle znovu emitují infračervené a tepelné záření. Ve skutečnosti tyto plyny zachycují teplo v atmosféře, což vede ke zvýšení povrchové teploty Země. Nejdůležitějšími skleníkovými plyny jsou vodní pára (H₂O), oxid uhličitý (CO₂), metan (CH₄), oxid dusný (N₂O), troposférický ozón (O₃) a látky antropogenního původu, např. chlorfluoruhlovodíky (CFCl₃ a CF₂Cl₂) [3].

Podle zveřejněných výsledků statistických úřadů vliv CO₂ na celkovou situaci tvoří do 90% v posledních letech [4]. Snížení emisí CO₂, včetně těch, které se produkují spalováním fosilních paliv, je klíčovým prvkem při odstraňování nadbytečných emisí skleníkových plynů a nebezpečných účinků změny klimatu. Hlavním zdrojem emisí je výroba energie z fosilních paliv, jako je uhlí, ropa a zemní plyn, při spalování kterých dochází k uvolňování CO₂ jako vedlejšího produktu [5]. Tepelné elektrárny, které spalují uhlí v podobě prášku, tvoří většinu elektráren po Severní Americe, Evropě a Číně. V tomto případě skleníkové plyny ze spalin mohou být odděleny pomocí velké řady absorpčních procesů, kde rozpouštědla přímo zachycují CO₂.

Odstraněný CO₂ se využívá v potravinářství pro úpravu kyselosti produktu a pro nasycení nápojů, a také se používá při svařování jako inertní plyn. V moderní době vyvinuté nové technologie dodatečné těžby ropy, kde za pomoci injekce CO₂ do ložiska lze vytěžit navíc do 15% celkového objemu ložiska po primární a sekundární těžbě [6]. Tento záměr je technologicky velmi podobný technologii skladování stlačeného CO₂ pod zemí v prázdných přírodních kapsách nebo porézních vrstvách.

Tato diplomová práce je zaměřena na oblast výzkumu chemických absorpčních procesů pomocí speciálních vodných roztoků. Cílem práce je navrhnout kompaktní laboratorní absorpční jednotku na separaci CO₂ z různých plynných směsí. Basic design jednotky je založen na teoretických podkladech a výsledcích z experimentů provedených na různých pilotních zařízeních. Součástí práce je konstrukční návrh provedení vybraných vyráběných komponent a výběr dalších zařízení a komponent potřebných pro průběh procesu. Jednotka je navrhována jako víceúčelová pro použití i v dílčích experimentech.

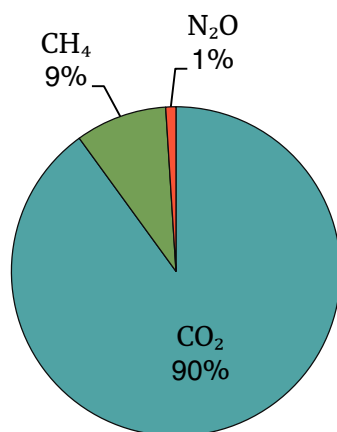
2 Teoretická část

2.1 Zdroje oxidu uhličitého

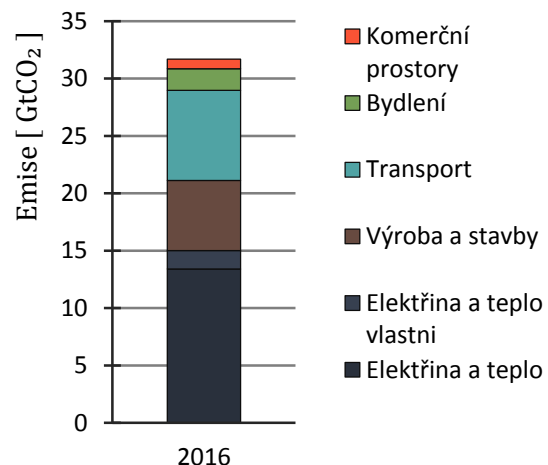
Od doby před průmyslovou revolucí, se atmosférická koncentrace několika skleníkových plynů (zejména CO_2 , CH_4 a N_2O (Obrázek 1) [3]) podstatně zvýšila. Stabilita našeho klimatu je přímo spojena s atmosférou, takže změny koncentrace jakéhokoli skleníkového plynu (Obrázek 2) budou mít citelný dopad na prostředí. Atmosférické koncentrace CO_2 jsou nyní vyšší než v minulosti. V současnosti (začátek roku 2019) dosahují hodnot 410 ppm, zatímco před průmyslovou dobou byla 280 ppm [7]. Zmenšení emise CO_2 , včetně těch, které se produkují při spalování fosilních paliv, je klíčovým prvkem při snižování emisí skleníkových plynů a nebezpečných účinků změn klimatu.

Zachycení CO_2 je dost technologicky složitým procesem, a proto jeho lze snaze aplikovat na velkých stacionárních zdrojích typu:

- Elektrárny na fosilní paliva
- Ropné rafinerie
- Těžba ropy a plynu
- Železárny a ocelárny
- Cementárny
- Chemické závody



Obrázek 1 Podíly skleníkových plynů v emise ze spalování paliv v roce 2015 [4]



Obrázek 2 Podíl emise CO_2 podle odvětví zdroje palin [4]

První projekty zachycování a ukládání CO_2 byly aplikovány v odvětví těžby a zpracování zemního plynu, protože CO_2 je přirozenou, ale nežádoucí složkou v těžném surovém

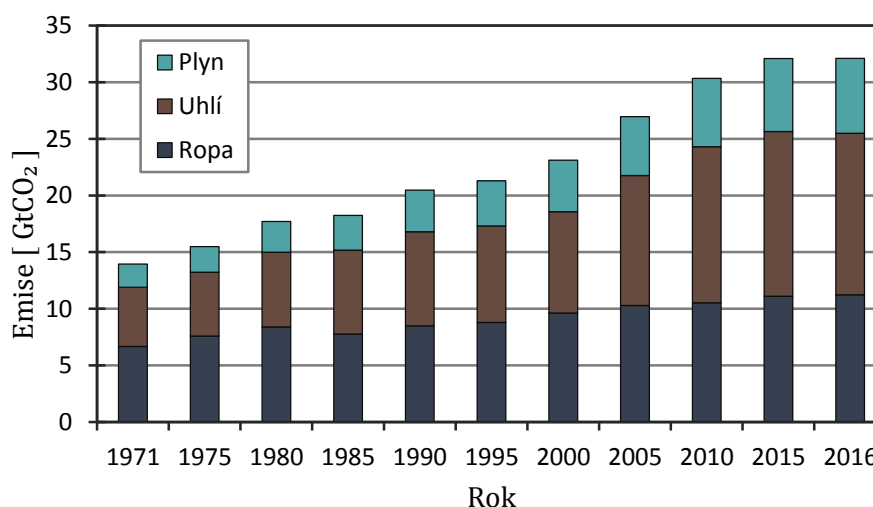
zemním plynu. Z toho důvodu CO₂ musí být před odesláním zákazníkům odstraněn ze zemního plynu. V té době zachycené CO₂ se většinou vypouští volně do atmosféry.

Aktuálně existují dvě varianty využití velkého množství zachyceného CO₂: skladování v podzemních kapsách nebo porézních vrstvách a využití při dodatečné těžbě ropy (enhanced oil recovery, EOR) nebo plynu (enhanced gas recovery, EGR). Celkový světový potenciál pro spotřebu a skladování CO₂ je v současnosti na úrovni 30 Mt_{CO₂}/rok, který zajišťuje 17 velkých projektů [8]. Projekt Sleipner v Norsku je určen pro skladování CO₂ v solné kapse hluboko pod mořským dnem od roku 1988, stejně jako nedávno schválený projekt Gorgon v severozápadní části Austrálie. Novější projekt v Snøhvit v Norsku taktéž ukládá CO₂ a zároveň využívá pro EGR.

Nejnovějším projektem zachycení CO₂ instalovaným u tepelné elektrárny je Petra Nova (kapacita 1,4 Mt_{CO₂}/rok) v Thompsons, Texas. Pro zachycení CO₂ byl vyvinut proces KM CDRTM s pracovním roztokem KS-1TM.

Oxid uhličitý rovněž může být zachycen v rámci výroby čpavku a jiných chemických látek a paliv. Výroba amoniaku nejčastěji začíná přeměnou metanu na syntézní plyn (převážně oxid uhelnatý (CO), CO₂ a vodík). Pak následuje konverze CO na CO₂ a odstranění CO₂. Čpavek je následně vyroben z vodíku pomocí Haber-Boschova procesu. Močovina, důležité hnojivo, se vyrábí z čpavku a CO₂.

Výroba železa a cementu vytváří velké množství CO₂ při zpracování surovin a z výroby energie potřebné k průběhu procesu. V případě železa a oceli, CO₂ se uvolňuje z koksovateľného uhlí a vápence použitého k odstranění uhlíku z železné rudy. V případě cementu emise CO₂ pocházejí z uhličitánu vápenatého použitého k výrobě slínku, stejně jako z velkého množství energie nutné při tomto procesu.



Obrázek 3 Vývoj emise CO₂ ze spalování podle typu paliva v letech 1971-2016 [4]

Má-li však dojít k významnému snížení množství CO₂ uvolněného do ovzduší, musí být CO₂ zachycený a uložený i z emisí uhelných a plynových elektráren (Obrázek 3). V případě technologie stávajících elektráren to bude znamenat přizpůsobení a modernizaci technologie tak, aby zachytily CO₂ po spalování uhlí (post-combustion capture, PCC).

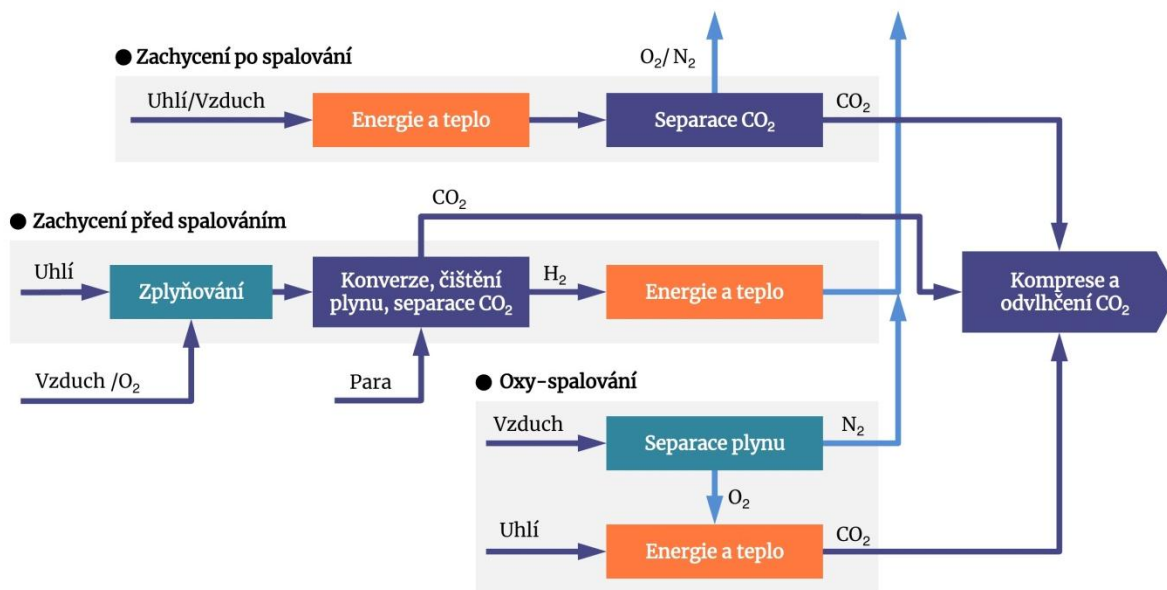
Další možností je aplikovat nové technologie zplyňování uhlí pro výrobu energie, ve které uhlí je zplyňované s použitím kyslíku nebo vzduchu k vytvoření hořlavého plynu ze kterého je pak následně CO₂ zachycován ještě před spalováním plynu (pre-combustion capture). Zpracování zemního plynu, reforming a zplyňování probíhá většinou pod vysokým tlakem $P > 40$ bar [9]. Toto odpovídá většímu parciálnímu tlaku CO₂ ve vstupní směsi, což umožňuje využít fyzikální absorpci místo chemické, která je aktuálně provozně dražší než fyzikální absorpce v důsledku nižšího parciálního tlaku CO₂. K fyzikální absorpci mohou sloužit již odzkoušené roztoky SelexolTM, RectisolTM, které umožňují regeneraci při snížení tlaku v flash-desorberech. Tento princip je charakterizován nižší celkově spotřebovanou energií oproti chemické absorpci.

Další novou technologií výroby energie vhodnou pro odstraňování CO₂ je tzv. Oxyfuel technologie nebo oxy-spalování, kde probíhá spalování uhlí v čistém kyslíku, který se nejprve separuje ze vzduchu. Výsledné plyny obsahují převážně CO₂ a vodu, což zjednodušuje proces separace CO₂.

Jelikož komprese samotného CO₂ představuje významný podíl energie potřebné na zachytávání, je významné úsilí také zaměřeno na snížení nákladů spojených s kompresí a kompresorem. Například, většina stávajících průmyslových kompresorů jsou postaveny jako jedno-hřídelové, vícestupňové, v konfiguraci s mezichladičem.

2.1.1 Spaliny z tepelných elektráren

Postupy k zachycení CO₂ z tepelných elektráren rozdělují do třech hlavních skupin: zachycení po spalování, zachycení před spalováním, oxy-spalování [10] (Obrázek 4).



Obrázek 4 Metody zachycení CO₂ ze spalin elektráren

Zachycení po spalování za použití absorpčního činidla je v současné době nejvíce rozvinutou volbou pro zachycení CO₂ z elektráren typu PC (spalování uhelného prášku), CFB (atmosférická fluidní vrstva) a NGCC (plynový kombinovaný cyklus). Zkušenosti se zachycením CO₂ ze spalin z uhlí a kombinovaného cyklu jsou poměrně omezené. Po několik desetiletí se k zachycování ze spalin uhlí používá vodný roztok monoethanolaminu (MEA). Zachycení po spalování nabízí určité výhody, protože stávající technologie spalování mohou být stále používány bez radikálních konstrukčních a technologických změn.

Tabulka 1 uvádí typické složení spalin v elektrárně pro dvě typická paliva: uhlí a zemní plyn [11]. Ze srovnání je patrné že uhelné elektrárny v průměru produkují o 3-4 krát více CO₂ než elektrárny spalující zemní plyn.

Tabulka 1 Typické složení spalin [11].

Složka	Složení [% obj.]	
	Uhelné	Plynové
N ₂	70-75	70-75
CO ₂	12-16	3-5
O ₂	3-4	10-12
H ₂ O	6-7	7-10
NO _x	400 ppm	<50 ppm
SO ₂	150 ppm	<10 ppm
Popel	<30 ppm	-

2.1.2 Zemní plyn

Surový zemní plyn obsahuje kyselé složky jako CO_2 , H_2S a sloučeniny síry, které tvoří korozní směs. Obsahuje také pevné složky jako písek, soli, vrtný kal, korozní produkty a dokonce i kapalně složky, např. inhibitory a kondenzát. Z těchto důvodů plyn musí být před dopravou a použitím upraven, protože jeho kyselé složky nesmějí se dostat do plynovodů ani spalovat. Konfigurace a dimenzování zařízení na úpravu surového plynu závisí na vlastnostech a složení surového plynu (Tabulka 2), velikosti zařízení a požadavcích na další využití zemního plynu.

Tabulka 2 Typické složení zemního plynu [12]

Složka	Složení [% obj.]
CH_4	>85
C_2H_6	3-8
C_3H_8	1-2
C_4H_{10}	<1
CO_2	1-2
H_2S	<1
N_2	1-5
He	<0,5

2.1.3 Syntézní plyn

Syntézní plyn, zkráceně označovaný jako syngas, je směs obsahující oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodík. Syngas se vyrábí zplyňováním paliva obsahujícího uhlík na plynný produkt. Syngas může být vyroben z prakticky jakékoliv uhlovodíkové suroviny různých zdrojů, např. zemního plynu, uhlí, biomasy, resp. pomocí parního reformingu nebo parciální oxidace pomocí kyslíku.

Syntézní plyn se používá jako palivo pro výrobu páry a elektřiny, nebo jako základní chemický stavební blok pro mnoho petrochemických a rafinačních procesů.

Syngas může obsahovat některé stopové prvky nečistot, které jsou zachyceny prostřednictvím dalšího zpracování. Například síra se získává v elementární formě nebo jako kyselina sírová a obě formy mohou být komerčně využity. Pokud vyrobeny syngas obsahuje značné množství dusíku, musí být dusík oddělen, aby se zabránilo tvorbě oxidů dusíku (NO_x), které jsou znečišťujícími látkami a přispívají ke vzniku kyselých dešťů.

Je-li syntézní plyn použit k výrobě elektřiny, je využit v konfiguraci IGCC (integrovaný paroplynový cyklus kombinující zplyňování, plynovou turbínu a klasický parní cyklus) [13].

Byly provedeny experimenty na jednotce IGCC [13] a typické složení vyrobeného syntézního plynu je uvedeno v tabulce 3. Výsledné složení plynu odpovídá 4-ročnímu průměru výroby od zahájení v roce 1995.

Tabulka 3 Typické složení syntézního plynu [14]

Složka	Složení [% obj.]
H ₂	32-34
CO ₂	15-17
CO	42-47
CH ₄	1-2
H ₂ S	17-107 ppm
COS	9-162 ppm

2.1.4 Bioplyn

Vzhledem ke strategickým a přírodním důvodům v současné době vzrůstá zájem o biopaliva jako alternativní zdroj energie. Alternativy pro výrobu elektrické energie jsou biomasa a bioplyn.

Bioplyn se skládá převážně z metanu a oxidu uhličitého. Může obsahovat také stopy sirovodíku. Jeho složení je velmi závislé na typu zpracované biomasy. Bioplyn je palivo se středním obsahem energie ($\sim 18-25 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), které odpovídá koncentraci metanu ve směsi, odvozené z rozkladu organického materiálu za anaerobních podmínek. Bioplyn lze získat ze zemědělského odpadu, skládek a průmyslového odpadu. Tabulka 4 ukazuje typické složení bioplynu podle použitého zdroje biomasy. Vzhledem ke své plynné povaze a nemožnosti stabilní intenzivní výroby není atraktivní pro výrobu elektrické energie ve velkém měřítku [15].

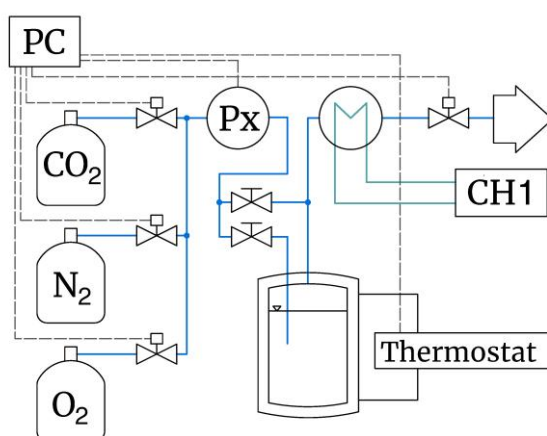
I když stále existuje několik technických problémů, které mají být vyřešeny, tato alternativa distribuované elektrické energie je považována za nejlepší alternativu pro přívod elektrické energie do venkovských obcí, které se nachází daleko od městských center. V tomto případě, použití bioplynu jako paliva ve spalovacích motorech, ke kterým jsou připojeny elektrogenerátory, se stává velmi atraktivní alternativou. Toto uspořádání je výhodné z důvodu velmi nízkých nákladů, vysokého poměru přínosů k nákladům, využití lokálních zdrojů a pozitivního dopadu na lokální životní prostředí.

Tabulka 4 Typické složení bioplynu [15]

Složka	Složení (% obj.)		
	Zemědělský odpad	Skládky	Průmyslový odpad
CH ₄	50-80	50-80	50-70
CO ₂	30-50	20-50	30-50
H ₂	0-2	0-5	0-2
H ₂ S	0,70	0,1	0,8
NH ₃	<0,01	<0,01	<0,01
CO	0-1	0-1	0-1
N ₂	0-1	0-3	0-1
O ₂	0-1	0-1	0-1

2.1.5 Vhodné plynné směsi pro laboratorní testování

Pro laboratorní experimenty se obvykle používají uměle připravené směsi čistých plynů v požadovaném poměru. Jednou z možností je napojení vstupu zařízení na směšovač jednotlivých čistých plynů z tlakových lahví (Obrázek 5). V tomto případě lze s dost velkou přesností nastavovat složení směsi, které je zajišťované pomocí regulátory hmotnostního průtoku. Regulátory jsou propojené s výpočetní jednotkou, která sleduje tlak a teploty směsi. Součástí jednotky může být taky zvlhčovač.



Obrázek 5 Schéma provedení jednotky na přípravu směsi pro experiment (upraveno [16])

Další možností je použití průmyslově připravené směsi plynů připravené přímo dodavatelem. V tomto případě není možné nastavovat koncentrace složek ve směsi, ale složení směsi je přesně zajištěno, což je důležité při dlouhodobých experimentech.

Tabulka 5 uvádí kombinace plynů pro experimentální testování, které byly vybrány na základě informace z předchozích kapitol a které byly částečně modifikované z důvodu snížení potřebného počtu jednotlivých plynů.

Tabulka 5 Plynné směsi pro laboratorní testování

Složka	Název a složení směsi (% mol.)				
	CoalPlant	GasPlant	Syngas	SyngasT	Biogas1
CO ₂	15	5	17	14	20-50
N ₂	75	75	-	-	-
H ₂	-	-	35	29	-
O ₂	4	10	-	-	-
H ₂ O	6	10	-	20	-
CO	-	-	46	35	-
CH ₄	-	-	2	2	80-50

2.2 Metody odstraňování CO₂ z plynných směsí

Pro odstraňování CO₂ z emisí existuje v současné době několik metod. Některé z nich fungují pouze v laboratorních podmínkách. Zachytávání CO₂ bylo úspěšně aplikováno při provozu uhelných elektráren, výrobě amoniaku, železa a oceli, cementu, v rafinerii a úpravě zemního plynu. Aktuálně používané a testované metody odstraňování jsou:

- Chemická absorpce
- Fyzikální absorpce
- Adsorpce
- Nízkoteplotní separace
- Membránové procesy

Nejvíce využívanými metodami jsou chemická a fyzikální absorpce. Membránové a adsorpční technologie jsou stále ve vývojových fázích výzkumu.

2.3 Absorpční procesy

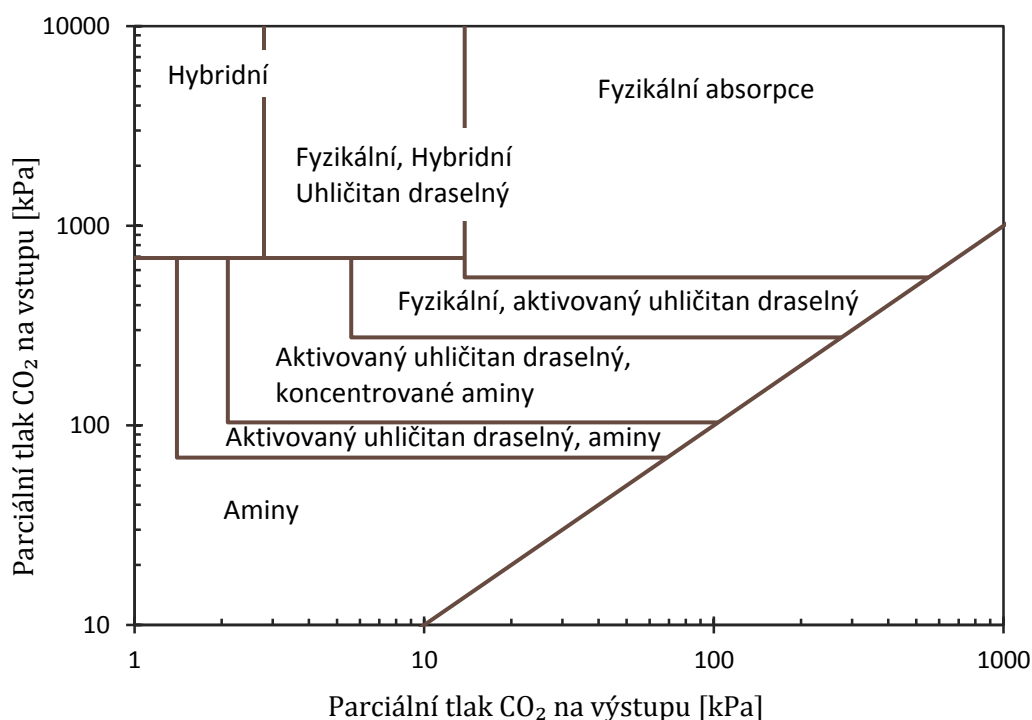
Absorpce je založena na rozdílné rozpustnosti složek plynné fáze v kapalně fázi. Stripování je zpětný přenos složky z kapalně fáze, v níž je rozpuštěna do plynné fáze. Absorpce, aplikovaná na procesy čištění plynů, může být rozdělena do následujících obecných typů na základě interakce mezi absorbátem a absorbentem (Tabulka 6).

Při návrhu zařízení pro volbu typu absorpce při známé nebo zvolené vstupní a výstupní koncentrace CO_2 lze použít rozhodovací graf (Obrázek 6). Podobné grafy existují pro různé kombinace CO_2 a H_2S [17].

Fyzikální absorpce. V případě fyzikální absorpce rozpouštění a přenos hmoty probíhá do dosažení rovnováhy. Vzhledem k tomu, že rozpuštěná složka je v kapalině vázána fyzikální vazbou, je fyzikální absorpce obvykle reverzibilní. Na této vlastnosti fyzikální absorpce je založeno uvolňování absorbovaných plynných složek z roztoků – desorpce. Desorpce složek se provádí odváděním do proudu inertního plynu nebo vodní páry při ohřátí absorbentu nebo snížení tlaku. Rovnovážná koncentrace absorbátů v kapalně fázi je silně závislá na parciálním tlaku v plynné fázi.

Procesy fyzikální absorpce umožňují provádět čištění plynu současně od všech kyselých složek plynu (H_2S , CS_2 , COS , CO_2 a merkaptanů), ale ve srovnání s procesy chemické absorpce vykazují nižší selektivitu procesů a víc pohlcují uhlovodíky.

Příkladem je absorpce sirovodíku a oxidu uhličitého v dimethyletheru polyethylenglykolu (DMPEG, proces SelexolTM), nebo v chlazeném roztoku methanolu (CH_3OH , proces RectisolTM). Pro navrhování jednotek tohoto typu byly vyvinuty relativně jednoduché analytické techniky.



Obrázek 6 Rozhodovací graf pro volbu metody separace CO_2 ze směsi bez přítomnosti H_2S [17] [20]

Chemická absorpce s vratnou chemickou reakcí. Tento typ absorpce charakterizován chemickou reakcí mezi absorbovanou plynnou složkou a složkou z kapalně směsi. Reakce tvoří volně vázané produkty. Díky vratnosti chemické reakce lze absorpční roztok regenerovat a znovu použít. Popis tohoto procesu je poměrně velmi komplikovaný v důsledku složitosti simultánně probíhajících procesů. Příkladem je absorpce oxidu uhličitého do roztoků monoethanolaminu (MEA). Tento typ absorpce je dále uvažován v této práci.

Chemická absorpce s nevratnou chemickou reakcí. Při tomto typu absorpce absorbovaná složka reaguje se složkou kapalně fáze a vznikají reakční produkty, které nelze zpětně snadno rozložit a tak uvolnit absorbát. Absorbát je tak prakticky trvale vázán v produktu. Příkladem je absorpce sirovodíku v roztoku chelátů železa (Fe-EDTA) nebo klasické odsiřování spalin pomocí vápence.

Tabulka 6 Přehled technologií pro separaci kyselých složek z plynů

Proces	Podmínky T (°C), p (bar)	Zdroj
1. Fyzikální absorpce		
Methanol (Rectisol™)	T: -70...-10 p: > 20	[17] [19] [20]
NMP (Purisol™)	T: -20...+40 p: > 20	[17] [19]
DMPEG (Selexol™)	T: -40...0 p: > 20	[17] [19]
2.1 Chemická absorpce organická		
MEA, AMP, DEA, DIPA, MDEA, TEA, PZ, KM CDR™(KS-1™,KS-2™,KS-3™)	T: +40...+60 p: 1...65	[17] [18] [19] [21]
2.2 Chemická absorpce neorganická		
Benfield Process™	T: +70...+120 p: 20...70	[18] [19] [22]
Amoniak	T: 0...+20 p: 1	[19] [23]
3. Fyzikálněchemická absorpce		
Sulfolane + MDEA (Sulfinol-M™)		
Sulfolane + DIPA (Sulfinol-D™)	T: +20...+80 p: > 5	[18] [19]
Flexsorb SE/PS		
Methanol + sek. aminy (Amisol™)		

2.4 Chemická absorpce alkylaminy

Aminy jsou deriváty amoniaku a podle počtu nahrazených molekul vodíků za alkylovou nebo arylovou skupinu se rozdělují na primární, sekundární a terciární aminy (Tabulka 7). Průmyslové řešení pro odstranění nežádoucích kyselých plynů jako CO₂, a případně H₂S v petrochemii ve většině využívají roztoky MEA, DEA, DGA, MDEA a jejich různé kombinace (Tabulka 9).

Tabulka 7 Kvalitativní charakteristiky aminů [11][24]

Skupina aminů	Primární	Sekundární	Terciární
Sumární vzorec	RNH ₂	R ₂ NH	R ₃ N
Název, registrační číslo CAS	MEA, 141-43-5 AMP, 124-68-5 DGA, 926-06-6 MDA, 80-52-4	DEA, 111-42-2 PE, 1484-84-0 PZ, 110-85-0 DIPA, 108-18-9	TEA, 102-71-6 MDEA, 105-59-9
Reakční entalpie			
Entalpie odpařování			
Rychlost reakce			
Korozivnost			
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> Vyšší ←—————→ Nižší </div>			

Zkoumané absorpčně-desorpčních procesy se obvykle charakterizují pomocí určitých specifických parametrů. Přehled obvykle používaných parametrů včetně jednotek je uveden v tabulce 8.

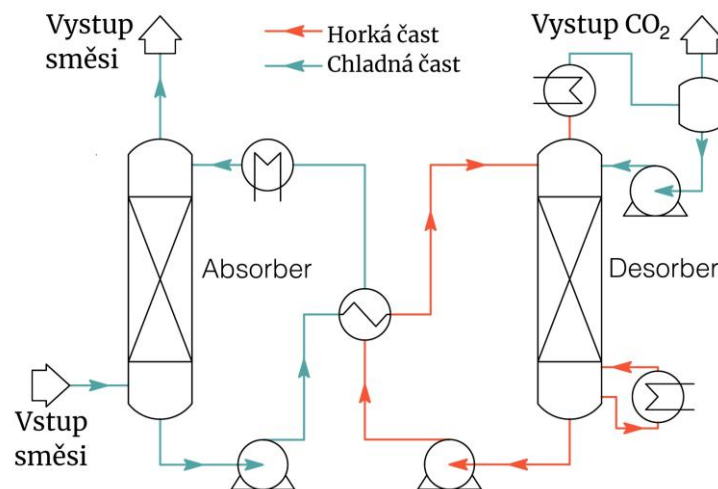
Tabulka 8 Přehled vybraných parametrů používaných při popisu absorpční separace

Popis	Vzorec	Jednotka
Celková účinnost separace CO ₂	$\varphi = \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{abs}} / \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{zprac}}$	(%)
Koncentrace CO ₂ v pracovním roztoku	$X_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} / m_{\text{PR}}$	(mol _{CO₂} · kg _{PR} ⁻¹)
Rozdíl zatížení pracovního roztoku CO ₂ – bohatý (zatížený) a chudý (nezatížený) roztok	$\Delta X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2}^{\text{rich}} - X_{\text{CO}_2}^{\text{lean}}$	(mol _{CO₂} · kg _{PR} ⁻¹)
Měrné zatížení MEA CO ₂	$\alpha_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} / n_{\text{MEA}}$	(mol _{CO₂} · mol _{MEA} ⁻¹)
Měrná spotřeba energie při desorpci CO ₂	$q^{\text{des}} = Q_{\text{des}} / \dot{m}_{\text{CO}_2}^{\text{abs}}$	(GJ · t _{CO₂} ⁻¹)

Chudý (nezatížený) roztok – regenerovaný absorpční roztok, který se nastříkuje do absorberu.

Bohatý (zatížený) roztok – absorpční roztok, který prošel absorpční kolonou a obsahuje rozpuštěnou absorbovanou složku.

Monoethanolamin se běžně používá jako absorpční činidlo pro úpravu syntézního plynu vyráběného v zařízeních na výrobu amoniaku, vodíku, oxidu uhelnatého a při spalování (Obrázek 7). V tomto případě je separovanou složkou oxid uhličitý. Obvykle je hmotnostní podíl MEA v absorpčním roztoku cca 15–20 % hm. Ve specifických případech, kdy jsou použity inhibitory koroze, dosahuje koncentrace hodnot 35–40 % hm.



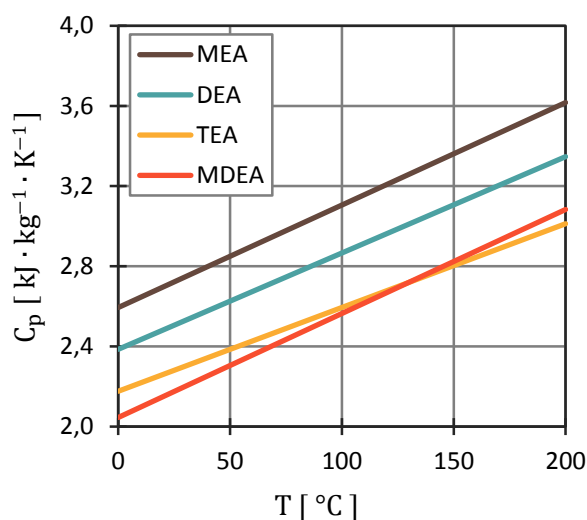
Obrázek 7 Základní procesní schéma zachycení CO₂ pomocí vratné chemické absorpce

Diethanolamin je primárně používán pro úpravu přírodního a rafinérského plynu. Oxid uhličitý a sirovodík jsou hlavní nečistoty, které je třeba odstranit. Hlavní výhodou použití DEA oproti MEA je velmi nízká korozní aktivita DEA. Dále také DEA nedegraduje za přítomnosti CS₂, COS v proudu. Nevýhodou DEA je pomalejší reakční schopnost, což vyžaduje vyšší měrnou spotřebu roztoku v zařízení. Typické hmotnostní podíly DEA v absorpčním roztoku dosahují hodnot 30–35 % hm. [17].

Tabulka 9 Přehled vlastností komerčně dostupných chemických látek [31][33]

Látka		MEA	DGA	DEA	DIPA	MDEA
Koncentrace	(% hm.)	< 30	< 60	< 40	< 40	< 50
Zatížení	($\text{mol}_{\text{CO}_2} \cdot \text{kg}_{\text{PR}}^{-1}$)	0,3	0,35	0,3-0,7	0,45	0,45
Absorpční teplo	($\text{GJ} \cdot \text{t}_{\text{CO}_2}^{-1}$)	2	2	1,5	1,5	1,3
Rychlost reakce při T=25 °C	($\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	7600	4000	1500	400	5

Při navrhování procesních zařízení pracujících s vodnými roztoky alkylaminů je potřeba zohlednit odlišnou tepelnou kapacitu jednotlivých aminů (Obrázek 8). Dále je třeba uvažovat i vliv teplotní závislosti z důvodu odlišných podmínek v absorběru a desorběru.



Obrázek 8 Měrná tepelná kapacita vybraných aminů [24][25]

2.4.1 Absorpce vodným roztokem MEA

Důležitým kritériem pro absorpci je rozpustnost CO_2 v pracovním roztoku. Rozpustnost CO_2 je velmi závislá na koncentraci MEA i teplotě roztoku. Bylo provedeno několik studií rozpustnosti (Tabulka 10). Souhrnné údaje z předchozích studií jsou prezentovány např. v Jou et al. (1995) [26], Kohl a Nielsen (1997) [19] a Ma'mun et al. (2005) [27]. Experimentální data od Jou et al. zahrnují širokou škálu teplot, tlaků a zatížení, nicméně data jsou k dispozici pouze pro koncentraci 30% hm. Další souhrn aktuálních dat a doplnění nově zjištěných dat je v práci Aronu et al. (2011) [29]. V této práci jsou uvedeny závislosti pro teploty $T = (40-120) \text{ °C}$ a pro koncentrace MEA v roztocích 15-60% hm.

Tabulka 10 Souhrn prací zaměřených na rozpustnost CO₂ ve vodném roztoku MEA

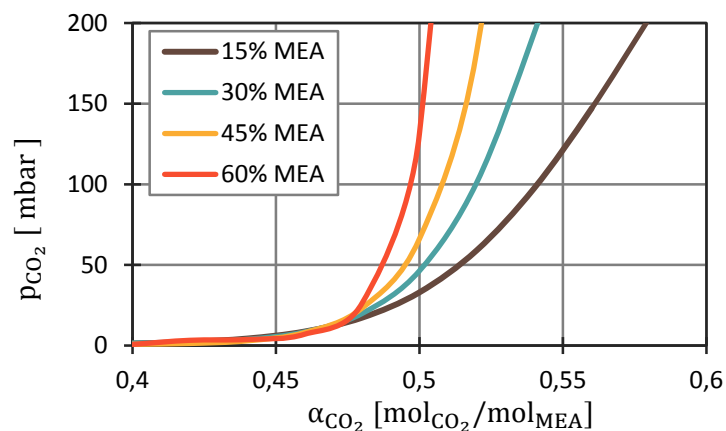
Práce	Koncentrace MEA (% hm.)	Teploty (°C)
Lee et al. (1974) [28]	6, 15, 23, 30	25, 40, 60, 80, 100, 120
Jou et al. (1995) [26]	30	40, 60, 80, 120
Aronu et al. (2011) [29]	15, 30, 45,60	40, 60, 80, 100, 120
Ma'mun et al. (2005) [27]	30	120
Shen et al. (1992) [30]	15, 30	40, 60, 80, 100

Přesnější korelace popisující rovnovážné chování CO₂ ve vodných roztocích MEA umožňuje lepší simulaci procesů, snížení nákladů a projektování efektivnějších zařízení. Různé termodynamické modely jsou používány k popisu rovnováhy CO₂ ve vodném roztoku aminů, zejména MEA. Tyto modely lze rozdělit do třech skupin: empirické modely, například Kent-Eisenberg (1976) [32] a rigorózní modely, které se dále dělí do dvou skupin: aktivitní modely (dodatková Gibbsová energie) a stavové modely vycházející z Helmholtzovy volné energie. Modely založené na aktivitě se liší v komplexnosti, od relativně jednoduchých jako např. Deshmukh a Mather (1981) [33] a k více sofistikovaným modelům jako je model elektrolyt-NRTL (Chen et al. (1986) [34], Chen and Evans (1986) [35]) a UNIQUAC model (Nicolaisen et al. (1993) [36], Thomsen and Rasmussen (1999) [37]).

Hilliard (2008) [38], používá elektrolyt-NRTL princip pro vyvinutí nového termodynamického modelu popisující chování roztoku aminů. Jeho model je přesnější než předchozí modely. Plaza et al. (2009) [40], používá tento model a popis kinetiky z výsledků od Aboudheir (2003) [39], pro návrh modelu absorpce pro roztoky MEA. Navržený model byl porovnáván s výpočtem pomocí ASPEN Plus a ověřován na pilotních zařízeních.

ASPEN Plus je výkonný software pro simulaci různých procesů a byl používán mnoha vědci pro simulaci procesů zachycování CO₂ (Freguia a Rochelle (2003) [41], Kvamsdal a Rochelle (2008) [42], Zhang et al. (2009) [43]). RateFrac a RadFrac jsou dva komerčně dostupné modely v rámci ASPEN Plus, které jsou používány pro simulaci absorbérů a regenerátorů. Abu-Zahra et al. (2006) [44], provedli simulace a optimalizace pro zachytávání CO₂ ze spalin zemního plynu z elektrárny pomocí ASPEN Plus s RadFrac modelem. Cílem jejich práce bylo optimalizovat energii potřebnou pro regeneraci absorpčního činidla. Autoři dosáhly hodnoty $q_{des} = 3,0 \text{ GJ} \cdot t_{CO_2}^{-1}$, což je o 23% nižší hodnota než pro standardní provedení jednotky. Luo et al. (2009) [45] provedli simulace pomocí čtyř různých komerčních simulátorů a dvou speciálních firemních programů: ASPEN RadFrac, Protreat, ProMax,

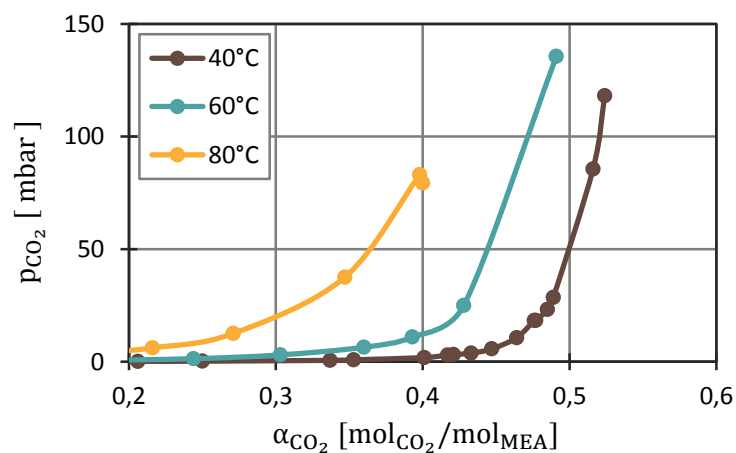
ASPEN RateSep, a firemní CHEMASIM od společnosti BASF SE a CO2SIM ze SINTEF/NTNU. Simulátory ověřovali pomocí šestnácti sad dat ze čtyř pilotních zařízení za použití 30% hm. roztoku MEA. Zjistili, že všechny simulátory dávají rozumné výsledky.



Obrázek 9 Zatížení roztoku CO₂ - vliv koncentrací MEA v pracovním roztoku při T = 40°C (graf zpracován dle dat [46])

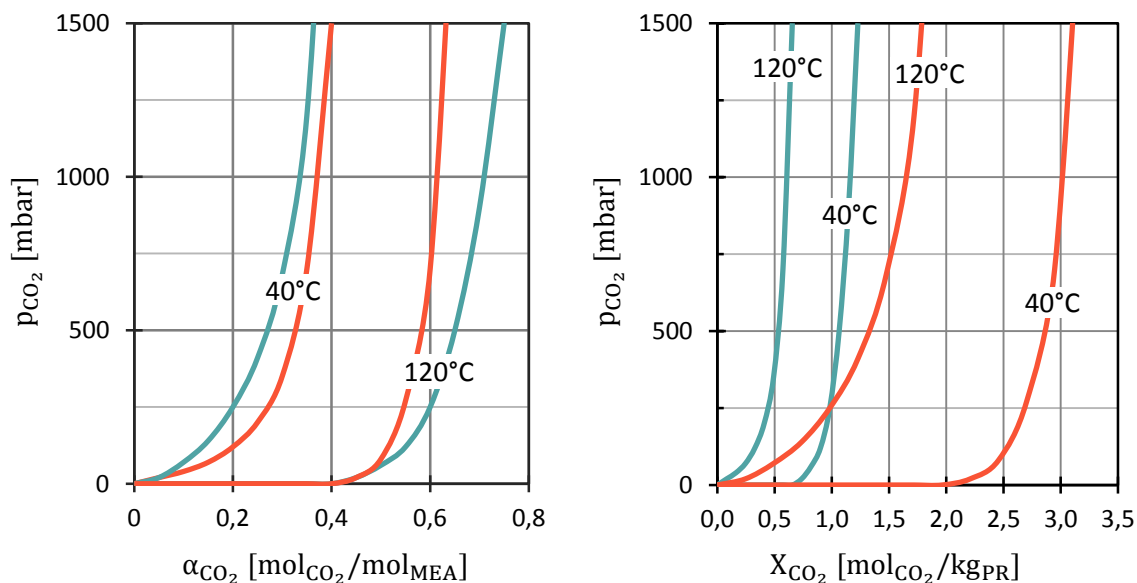
Závislost parciálního tlaku CO₂ ve vstupním plynu na zatížení roztoku MEA pro různé koncentrace MEA při teplotě 40°C je prezentována na obrázku 9. Z grafu vyplývá, že pro danou koncentraci CO₂ ve vstupním plynu s rostoucí koncentrací MEA v roztoku klesá přípustné zatížení MEA.

Ze souhrnu experimentálních dat prezentovaných v Aronu et al. (2011) [46] lze znázornit závislosti zatížení roztoku MEA na parciálním tlaku CO₂ ve vstupním plynu pro různé teploty při konstantním složení pracovního roztoku (Obrázek 10). Z grafu vyplývá, že pro danou koncentraci CO₂ ve vstupním plynu s rostoucí teplotou klesá přípustné zatížení MEA.



Obrázek 10 Zatížení CO₂ v 30% hm. roztoku MEA – vliv teploty (graf zpracován dle dat [46])

Bylo zjištěno, že účinnost separace je nepřímo úměrná zatížení roztoku. Obrázek 11 obsahuje rovnovážné křivky rozpustnosti CO₂ pro absorpční (40°C) a desorpční (120°C)[48] podmínky. Pro srovnání byly použity výsledky z experimentů prezentované na obrázku (Obrázek 9) pro koncentrace 15 a 30% hm. MEA v roztoku.



Obrázek 11 Srovnání izoterm rozpustnosti CO₂ v roztocích při koncentrace MEA: (—) 15% hm., (—) 30% hm. [48]

2.4.2 Energetické poměry

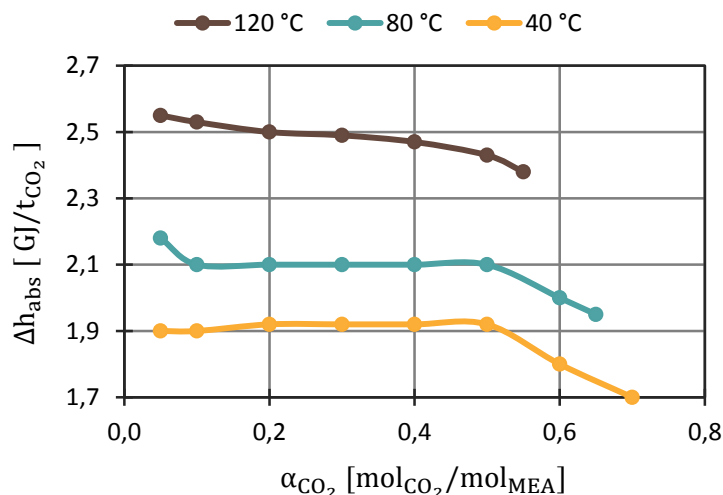
Hlavní energetické nároky absorpčně-desorpčního zařízení plynou z principů a podmínek děje. Dané zařízení využívá chemickou absorpci, která je charakterizovaná absorpčním reakčním teplem. Obecně platí pro proces absorpce, že vyšší účinnosti lze dosáhnout při nižší teplotě. Takže z tohoto plyne první požadavek na jednotku – dodržet relativně nízkou teplotu v celém absorběru.

Bohatý (zatížený) roztok je regenerován v desorbéru pomocí zvýšení teploty. Zvýšení teploty lze docílit částečně regenerací a dále přímým ohřevem roztoků. Procesní schéma jednotky s chemickou absorpcí a s teplotní regenerací absorpčního roztoku (Obrázek 7) ukazuje, že částečný ohřev bohatého roztoku před regenerací probíhá v tepelném výměníku mezi absorběrem a desorbérem horkým chudým roztokem odváděným z desorbéru. Na konečném dochlazení chudého roztoku před vstupem do absorběru se podílí další tepelný výměník chlazený externě (není vyznačen na schématu). Další přívod tepla potřebný pro desorpci CO₂ z bohatého roztoku se uskutečňuje v desorbéru za pomoci reboileru. Na výkonu reboileru se podílí, resp. teplo dodané reboilerem musí pokrýt následující požadavky:

1. Potřebné desorpční teplo pro CO₂

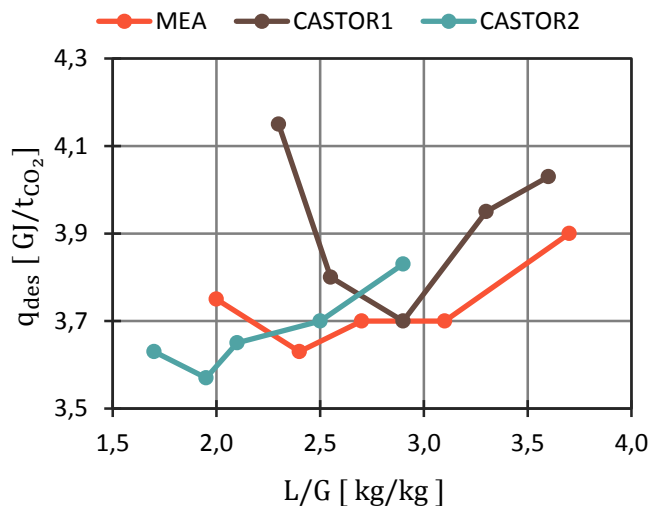
2. Výparné teplo vody
3. Ohřátí vstupujícího bohatého roztoku
4. Ohřátí refluxu z kondenzátoru
5. Tepelné ztráty kolony

Největší podíl tvoří desorpční teplo, které tvoří 20 až 70% celkové potřebné energie [48]. Při vlastním návrhu výkonu desorbéru bylo použito experimentálních dat dle Kim a Svendsen, 2007 [47] (Obrázek 12).

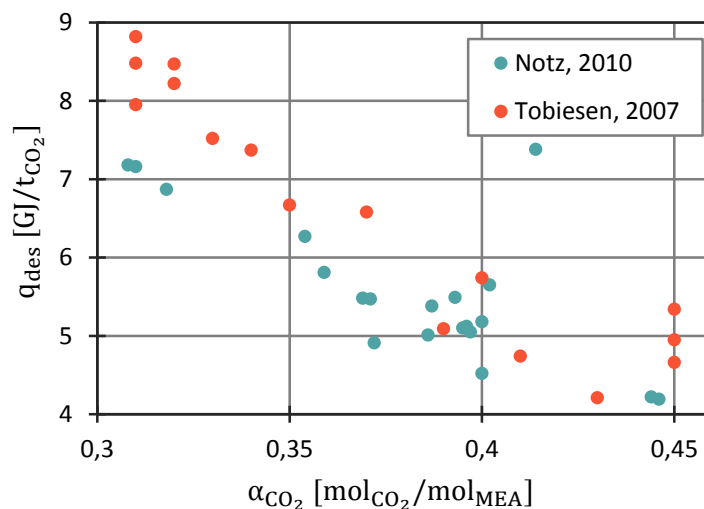


Obrázek 12 Absorpční teplo reakce CO₂-MEA pro 30% hm. koncentrace MEA – experimentální data [47]

Knudsen et al. (2009) [50] uvádí výsledky experimentu provedeného v elektrárně Esbjerg, kdy byly testovány nové směsi aminů a porovnány s referenčním MEA. Část experimentu byla zaměřena na zjištění závislosti měrného výkonu desorbéru na poměru L/G při dodržení účinnosti separace CO₂ $\varphi > 90\%$. Nejnižší dosažená měrná spotřeba tepla odpovídá rozsahu L/G = (2-3) kg · kg⁻¹ (obrázek 13). Při zvýšení měrné spotřeby absorpčního činidla L/G měrná spotřeba tepla zvyšovala. Při nižší spotřebě absorpčního činidla L/G < 2 kg · kg⁻¹ nebylo možné udržet požadovanou účinnost separace CO₂ nad 90%.



Obrázek 13 Měrný výkon desorbéru – vliv L/G – výsledky projektu CASTOR [50]

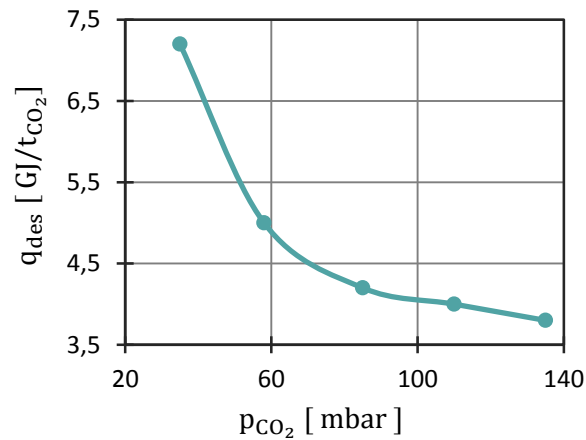


Obrázek 14 Měrný výkon desorbéru v závislosti na zatížení roztoku – přehled výsledků z experimentů (Notz (2010) [48], Tobiesen (2007) [49])

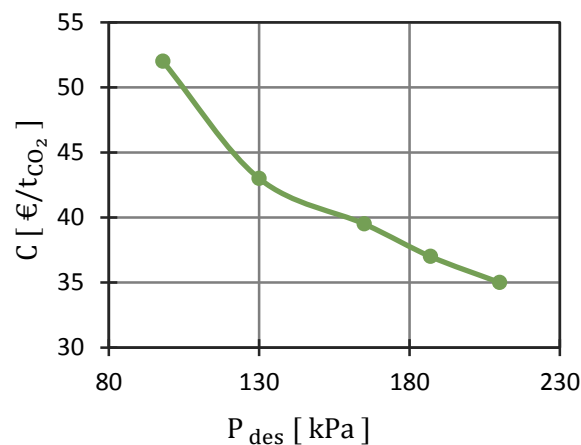
Experimentálně zjištěné hodnoty desorpčního tepla v závislosti na zatížení absorpčního roztoku od autory Notz (2010) a Tobiesen (2007) jsou prezentovány na obrázku 14. Z výsledků vyplývá, že s klesajícím zatížením absorpčního roztoku potřebné desorpční teplo výrazně roste nad běžně uváděnou průměrnou hodnotu $q_{des} = 3,6 \text{ GJ} \cdot t_{CO_2}^{-1}$. Důvodem tohoto růstu je menší stupeň nasycení roztoku (větší „vzdálenost“ od rovnovážné křivky).

Notz (2010) [48] uvádí výsledky experimentu sledování závislosti měrného výkonu desorbéru na parciální tlaku CO_2 ve vstupní směsi (Obrázek 15). Z výsledků vyplývá, že s klesající koncentrací CO_2 ve vstupním plynu potřebné desorpční teplo také výrazně roste

nad běžně uváděnou průměrnou hodnotu $q_{des} = 3,6 \text{ GJ} \cdot t_{CO_2}^{-1}$. Důvodem tohoto růstu je opět menší stupeň nasycení roztoku



Obrázek 15 Měrná energie desorbéru pro nízké koncentrace CO_2 v plynné směsi [48]



Obrázek 16 Náklady na tunu separovaného CO_2 v závislosti na tlaku v desorbéru (ceny platí pro rok 2006) [51]

Jednou z praktických výhod zvýšení pracovního tlaku v desorbéru je snížení potřebného desorpčního tepla a tím následně i snížení provozních nákladů. Abu-Zahra et al. (2007) [51] prováděl parametrickou studii a ekonomické zhodnocení vlivu tlaku v desorbéru na separaci CO_2 (Obrázek 16). Na základě simulace autoři navrhli optimální podmínky procesu pro účinnost odstranění $\varphi = 90 \%$ koncentraci 40 %hm. MEA v absorpčním roztoku a tlak v desorbéru $P_{des} = 0,24 \text{ MPa}$.

2.4.3 Degradace MEA

Vodné roztoky MEA jsou náchylné na degradaci a to několika způsoby:

Úplný tepelný rozklad MEA. K úplnému rozkladu dochází pouze při teplotách nad 200 °C [24]. K částečnému teplotnímu rozkladu MEA dochází převážně ve stripperu a reboileru vzhledem k vyšším teplotám v tomto zařízení. Davis a Rochelle (2009) [53] uvádějí, že tepelná degradace je menší, pokud se teplota v reboileru udržuje pod 110 °C, avšak se urychluje, pokud je teplota vyšší než 130 °C. Tito autoři také uvádějí, že polymerace karbamátů v důsledku vysoké teploty je hlavní příčinou tepelné degradace MEA. Míra degradace kromě toho závisí i na zatíženosti roztoku CO₂.

Oxidační degradace. Kyslík přítomný ve spalínách se rozpouští v absorpčním roztoku při průtoku absorbérem. Mechanizmy reakce MEA s kyslíkem jsou popsány v literatuře [52][54][55]. Obecně lze popsat tyto reakce jako:



Proces oxidační degradace MEA tedy zahrnuje komplex sériových a paralelních reakcí s amoniakem jako primárním produktem degradace. Při znalosti rychlosti vývoje amoniaku a rychlosti spotřeby rozpuštěného kyslíku lze stanovit celkovou stechiometrii kyslíku (n) pro oxidační degradaci MEA jako:

$$\text{Stechiometrie kyslíku (n)} = \frac{\text{rychlost spotřeby O}_2}{\text{rychlost vývoje NH}_3} \quad (2.2)$$

Hodnota parametru (n) se liší od 0,5 do 2,5 v závislosti na tom, jaký produkt rozkladu vzniká.

Nevratná reakce MEA s CO₂. V tomto případě CO₂ reaguje s MEA nevratně (podrobněji v [19][48]). Tyto nevratné degradační reakce jsou relativně pomalé, ale mohou mít větší vliv při vyšších teplotách v desorbéru.

2.4.4 Inhibitory koroze a degradace

Jak již bylo zmíněno, zařízení pro separaci CO₂ na bázi roztoku MEA musí čelit dvěma hlavním problémům: rozklad aminů a koroze zařízení. Jak již bylo uvedeno, rozklad MEA může být oxidační nebo tepelný. K oxidační degradaci dochází v absorbéru za přítomnosti rozpuštěného kyslíku. Teplotní rozklad probíhá v desorbéru v případě vyšší teploty. Celková degradace aminu snižuje výkon jednotky a negativně ovlivňuje účinnost separace CO₂.

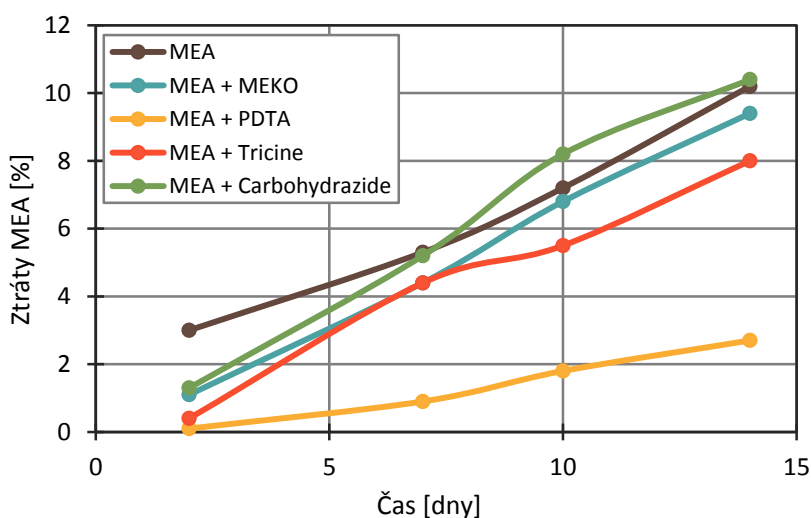
Samostatně MEA není korozivní, ale některé produkty rozkladu mohou zvýšit korozi zařízení [57]. Rozklad MEA a korozi v zařízeních lze potlačit přidávkem aditiv. Vzhledem

k tomu, že degradace a koroze jsou úzce spjaty, musí přísady inhibovat jak degradaci, tak korozi. Nejčastěji používané inhibitory degradace MEA jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Základní používané inhibitory degradace MEA [57]

Název	CAS číslo	LD50 (mg·kg ⁻¹)
PDTA	1939-36-2	1600
Pyrogallol	87-66-1	300
AAPD-cresol	94-91-7	4560
Carbohydrazide	497-18-7	311
MEKO	96-29-7	930
Tricine	5704-04-1	-

Inhibitory degradace mohou být z hlediska působení buď chelatační činidla, která tvoří komplex s rozpuštěnými kovy, nebo antioxidanty likvidující volné radikály [56]. Inhibitory koroze mohou být buď oxidační pasivátory (např. NaVO₃), které podporují tvorbu ochranné vrstvy oxidací na povrchu oceli nebo inhibitory vytvářející na povrchu ochranný film. Jedním z hlavních problémů inhibitorů je, že mnohé z nich jsou vysoce toxické i v malých koncentracích. Hodnoty letální dávky, při které dochází k 50% úhynu referenčního mikroorganismu (LD50), jsou pro vybrané inhibitory uvedeny v tabulce 11. Sloučeniny vanadu, zejména vanad sodný (NaVO₃), jsou široce a úspěšně využívány, ale tyto anorganické inhibitory jsou toxické pro člověka a životní prostředí [58]. Vliv různých typů inhibitorů na ztráty MEA byl experimentálně testován [56] (Obrázek 17).



Obrázek 17 Degradace ztráty MEA při experimentu [56]

Z testovaných inhibitorů velmi dobré snížení ztrát MEA v důsledku oxidační degradace vykazoval inhibitor PDTA. Testovaný inhibitor karboxyhydrazid neměl vliv na degradaci MEA, avšak účinně působil proti korozi.

2.4.5 Provozní a bezpečnostní opatření

Voda použitá pro přípravu roztoku MEA-H₂O musí splňovat určité minimální standardy kvality vody (Tabulka 12). Běžná voda je často zdrojem chloridů a dalších látek, které mohou výrazně podpořit korozi.

Tabulka 12 Kvalita vody - doporučené obsahy nečistot [59]

Kontaminant	Koncentrace (ppm)
Rozpuštěné soli	< 100
Tvrdość vody	< 50
Chloridy	< 2
Sodík	< 3
Draslík	< 3
Železo	< 10

Pěnění roztoků aminů je nejběžnějším provozním problémem v jednotkách pro čištění plynů. Nejčastěji se vyskytuje v absorbéru, ale může se také vyskytovat ve stripovací koloně. Pěnění může vést k nadměrným ztrátám aminů, produkci plynů nesplňující požadavky a snížení provozní rychlosti. Stejně jako u všech alkalických látek způsobují aminy napěťovou korozi. Z toho důvodu všechny nádoby a potrubí (sváry) by měly být zbaveny vnitřních pnutí. Je doporučeno ventily a potrubí provádět z nerezové oceli, stejně jako čerpadla a trubky výměníků tepla.

Běžné doporučení pro aminové jednotky [19]:

1. Musí být použit správně navržený čistič přiváděného plynu a filtr. V případě, že přiváděný plyn je kontaminován kompresorovým mazacím olejem a/nebo jinými jemně dispergovanými aerosoly doporučuje se instalace aerosolového separátoru.
2. Mechanická filtrace a filtrace aktivními uhlí bohatého (zatíženého) roztoku na výstupu z absorbéru. Obvykle postačuje 10 mikronový mechanický filtr, je však dobré použít co nejjemnější filtry, které mají přijatelnou dobu mezi výměnami.
3. Ne více než 10% aminů by mělo být vázáno jako tepelně stabilní soli.
4. Regulace teplotního rozdílu mezi chudým (nezatíženým) roztokem aminu přiváděného do absorbéru a přiváděného plynu, aby se zajistilo, že roztok je o 10 až 15 °C teplejší než přiváděný plyn.

5. Minimální kontaktní teplota v absorbéru by měla být větší než 10 až 15 °C, aby roztok byl dostatečně viskózní.

MEA je žíravá a hořlavá kapalina a vyžaduje zvláštní ohledy na manipulaci a ochranu personálu. Všechny aminy škodí personálu. Účinky expozice MEA se projevují na orgánech: ledviny, centrální nervový systém, játra. Možné účinky působení MEA na zdraví [18]:

- Oči: způsobuje silné podráždění očí a pálení.
- Kůže: může být vstřebána kůží v škodlivém množství. Příčiny mírné podráždění.
- Požití: způsobuje popáleniny gastrointestinálního traktu.
- Inhalace: inhalace vysokých koncentrací může vyvolat účinky na centrální nervový systém. To se vyznačuje bolestmi hlavy, závratěmi, bezvědomím a kómatem. Také způsobuje podráždění dýchacích cest.
- Chronická: může způsobit poškození jater a ledvin.

2.5 Referenční zařízení

Jedním z cílů projektu EU CAPRICE (ID: 38974)[60] je sběr provozních informací ze 4 různých pilotních zařízení, validace získaných dat, a otestování komerčních a vlastních simulačních programů. Tato pilotní zařízení jsou provozována pro 30% hm. koncentraci MEA a jsou přímo napojena na stávající elektrárny nebo speciální zdroje. Pilotní kapacity těchto zařízení jsou 10–1 000 kg CO₂ · h⁻¹.

Tabulka 13 uvádí krátký přehled základních charakteristik 4 vybraných pilotních zařízení z projektu EU CAPRICE [61].

Esbjerg CASTOR, Dánsko

Pilotní zařízení používá proud spalin z uhelné elektrárny Esbjerg. Kapacita pilotního zařízení je 1 t CO₂ · h⁻¹. Proud spalin se odebírá bez dodatečné předúpravy. Absorbér se skládá ze čtyř po sobě jdoucích loží s nestrukturovanou náplní typu IMTP50. V horní části absorbéru je mycí sekce s čistou vodou. Vstupní a výstupní proudy plynu absorbéru jsou nepřetržitě monitorované IR analyzátory CO₂. Zaznamenávají se teploty, průtoky a tlaková ztráta. Reboiler je ohříván párou z elektrárny. Vzorky chudého (nezatíženého) a bohatého (zatíženého) roztoku jsou odebírány a titračně testovány. Výsledky jsou prezentovány v Ma'mun et al. (2007)[63] a Tobiesen et al. (2007)[49] (2008)[64].

ITC, Univerzita Regina, Kanada

Kapacita pilotního zařízení ITC je 1 t CO₂ · den⁻¹. Vstupním plynem jsou spaliny zemního plynu z generátoru s přídatkem CO₂ na koncentraci 4% a 8%. Absorbér je vybaven mycí sekcí s čistou vodou. Voda je navíc využita pro dochlazení při reakci v absorbéru. Jako náplň je použita strukturovaná náplň Flexipak 700Y. Stejná náplň je použita i v desorbéru. Bohatý

(zatížený) roztok je před vstupem do regeneračního výměníku tepla tlakován do 2 MPa. Desorbér využívá teplo ze spalování plynu v generátoru spalin. Měření a sběr dat probíhají podle stejných principů a metod jako v Esbjerg CASTOR.

Univerzita Kaiserslautern, Německo

Malé pilotní zařízení má stejné uspořádání jako ITC. Vstupní plyn je připraven spalováním zemního plynu a domíchán s dalšími plyny na požadované složení. Absorbér a desorbér jsou vyplněny strukturovanou náplní Mellapak 250Y. Zařízení je vybaveno více měřícími místy, které umožňují navíc sledovat profil teplot v absorbéru a desorbéru. Koncentrace MEA v roztoku se měří chromatograficky, obsah vody pomocí Karl-Fisherové titrace a koncentrace CO₂ pomocí KOH titrace. Na zařízení je sledován vliv L/G, tlaku v desorbéru, koncentrace CO₂ ve vstupním plynu na separaci CO₂. Výsledky jsou publikovány v Notz et al. (2007)[62], Notz (2010)[48].

SINTEF/NTNU, Norsko

Pilotní zařízení využívá směsi očištěného plynů a CO₂. Vzhledem k čistotě používané plynné směsi není toto zařízení, na rozdíl od předchozích zařízení, vybaveno mycí sekci. Absorbér a desorbér jsou vyplněny náplní Mellapak 250Y. Výsledky jsou prezentovány v Ma'mun et al. (2007)[63] a Tobiesen et al. (2007)[49] (2008)[64].

Tabulka 13 Přehled parametrů hlavních sekcí vybraných pilotních zařízení [61]

	Mycí sekce	Absorbér	Desorbér
	Typ náplně Průměr/Výška (m)	Typ náplně Průměr/Výška (m)	Typ náplně Průměr/Výška (m)
SINTEF/NTNU	- -	Mellapak 250Y 0,15 / 4,36	Mellapak 250Y 0,1 / 3,89
Esbjerg CASTOR	Mellapak 252Y 1,1 / 3	IMTP 50 1,1 / 17	IMTP 50 1,1 / 10
ITC	Flexipac 700Y 0,33 / 2,93	Flexipac 700Y 0,33 / 7,05	Flexipac 700Y 0,33 / 9,97
Keiserslautern	Mellapak 250Y 0,125 / 0,42	Mellapak 250Y 0,125 / 4,2	Mellapak 250Y 0,125 / 2,52

materiálu AISI 1018, AISI 316L a AISI 304L. Hlavním společným znakem obou experimentů na pilotních zařízeních je relativně nízká míra koroze v chladných částech zařízení, tj. na vstupu a výstupu absorberu. Největší koroze byla zaznamenána v horké části jednotky – desorbéru a jeho propojení. Na Esbjerg bylo zjištěno, že větší koroze, víc než $1 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$, je charakteristická pro spodní část desorbéru, zatímco ITC vykazoval větší korozi na vstupu do desorbéru (horní část). Závěrem projektu je poznatek že kombinace vysoké teploty a koncentrace CO_2 v roztoku je rozhodující pro lokalizaci koroze.

V roce 2015 byli v technologickém centru Mongstad (TCM DA) provedeny testy s roztokem 30% hm. MEA [70]. Hlavním cílem bylo prokázat a ověřit výkonnost závodu TCM DA. Součástí testování byly korozní zkoušky materiálů v různých částech jednotek. Byly získány tyto výsledky:

- Vzorky z uhlíkové oceli S235 úplně zkorodovaly. Vypočtená rychlost koroze je $1,4 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ nebo vyšší.
- Rychlost koroze pro vzorky z nerezových ocelí 304L, 316L a 22%Cr duplex byla menší než $0,1 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.
- Bodová koroze nebyla zjištěna u vzorků z oceli 304L, Inconel 600 a 22%Cr duplex, ale u oceli 316L byla zaznamenána na úrovni $0,15 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$.
- Nebyla zaznamenána žádná degradace u EPDM vzorků.

Na zařízení RWE Power, Niederaussem byly experimentálně testovány kovové materiály po dobu 3,875 - 4,920 h [71]. Výsledné vzorky z oceli 1.4541, 1.4571, 1.4462 a 2.455 nevykazovaly žádné stopy koroze. U vzorků nebyla zjištěna bodová koroze a celková rychlost úbytku byla menší než $0,001 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$. Tahové zkoušky polypropylenu zařadily materiál podle ISO 4433 do skupiny materiálů odolných korozi, a polypropylen je doporučen pro vnitřní opláštění aparátu. Celková nebo bodová koroze nebyla zjištěna u přírub z oceli 1.4571. Sklolaminát s vinylostorovou/epoxidovou pryskyřicí byl také vyhodnocen jako odolný proti korozi, nevykazoval změny barvy, delaminování a tvorbu trhlin.

Materiály, které jsou použité pro těsnění, musí být odolné vyšším teplotám a chemikáliím. Hlavními skupinami těsnících materiálů vyhovujícími procesu jsou fluoroplasty a speciální pryže.

Fluoroplasty jsou skupinou plastů, strukturní analogy polyolefinů, v jejichž makromolekulách jsou atomy vodíku úplně, nebo částečně nahrazeny atomy fluoru. Nahrazení fluorem dramaticky mění vlastnosti materiálů tak, že zvyšuje pracovní teploty, odolnost vůči chemikáliím a elektrický odpor.

Přehled odolnosti vybraných materiálů vůči MEA, DEA a TEA je prezentován v tabulce 14.

Tabulka 14 Přehled materiálů pro pružné prvků [72][73]

Název	Odolnost vůči			Teplota (°C)	
	MEA	DEA	TEA	T _{min}	T _{max}
FFKM Kalrez 6375	++	++	++	-20	326
PTFE	++	++	++	-	265
FEPM TFE/P Aflas	++	-	++	-20	290
SIFEL	-	++	++	-50	250
FEP/PFA	++	-	-	-100	200/260
EPDM	+	+	+	-50	160
PCTFE Kel-F	++	++	++	-	132

++: Vynikající, +: Dobrý, -: Nepoužívat

Na zařízení RWE Power, Niederaussem byly experimentálně zkoumány měkké těsnicí materiály po dobu 3,875 - 4,920 h [71]. PTFE těsnění o tvrdosti 52 Shore D a tloušťky 2 mm nevykazovalo žádné změny. Materiál je přednostně doporučen jako těsnicí materiál. Těsnění EPDM bylo vystaveno mechanickému namáhání a nemohlo být vyhodnoceno podle ISO 4433.

2.7 Konstrukce reboileru

Nejvíce energeticky náročnou operací je desorpce CO₂ z bohatého roztoku v desorbéru [48]. Jednotky dodávající teplo do média mohou mít různá provedení a sloužit pro více účelů. Teplo je dodáváno dvěma způsoby:

- Nepřímý ohřev pomocí teplotnosného média
- Přímý elektrický ohřev pomocí topných tyčí a patron.

V průmyslových aplikacích se většinou používá nepřímý přívod tepla prostřednictvím kapalných teplotnosných médií. Výhodou toho způsobu je stejnoměrný, velkoplošný přenos. Jako médium pro přenos se nabízí zejména voda, kterou lze používat v beztlakém systému do 100 °C a v tlakových zařízeních do cca 200 °C. Pro vysoké teploty je však výhodnější použití organických teplotnosných médií. Většinu používaných teplotnosných kapalin představují ropné oleje, které jsou použitelné do teplot 300 - 350 °C .

V případě elektrického ohřevu pomocí Joulova tepla se v průmyslu používají tzv. topné patrony. Tato tělesa umožňují ohřev jakékoliv látek a materiálů. Provedení se odvíjí od zamýšleného použití a povrchové hustoty výkonu. Pro velmi agresivní prostředí jsou k dispozici povrchově chráněná provedení: mosaz, nerezové oceli nebo keramika.

Laboratorní experimentální zařízení jsou většinou vybaveny topnými tyči. Tyto elementy buď přímo ohřívají pracovní látku, nebo předávají teplo pomocí uzavřeného sekundárního oběhu. Nejjednodušší variantou je použití destilované vody jako teplonosné látky.

Kohl a Nielsen (1997)[19] uvádí tyto maximální hodnoty hustoty elektrického výkonu $q = (6000-8500) \text{ btu} \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{ft}^{-2}$, což odpovídá hodnotě $q = (2,1-2,7) \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Notz (2010)[48] udává pro laboratorní zařízení návrhovou hodnotu hustoty výkonu $q = 2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Přehled provedení topných částí vybraných laboratorních zařízení je uveden v tabulce 15.

Tabulka 15 Přehled provedení topných částí vybraných laboratorních zařízení

Práce	Vnější průměr (mm)	Počet: řada x sloupec	Délka (m)	Pracovní látka	Výkon elektrický (kW)
Zavaleta a Moreira, (2015)[74]	8	10 x 7	0,2	Syntetický olej	7,2
Bohra (2007)[75]	9,5	6 x 4	0,5	Voda + glykol 50%	5
Sangsoo (2007)[76]	9,5	6 x 4	0,29	Syltherm HF fluid	5
Lee et al. (2019)[77]	16	10 x 2	1,1, S	Voda/Para	5
Alvarez a Bourouis (2018)[78]	16	6 x 1	0,4	Voda/Para	2 x 2
Dewangan et al. (2017)[79]	25,4	3 x 1	0,2	R410a	3 x 0,9
Miller (1999)[80]	15,9	6 x 1	0,32	LiBr + H ₂ O	2,5

3 Koncepční návrh

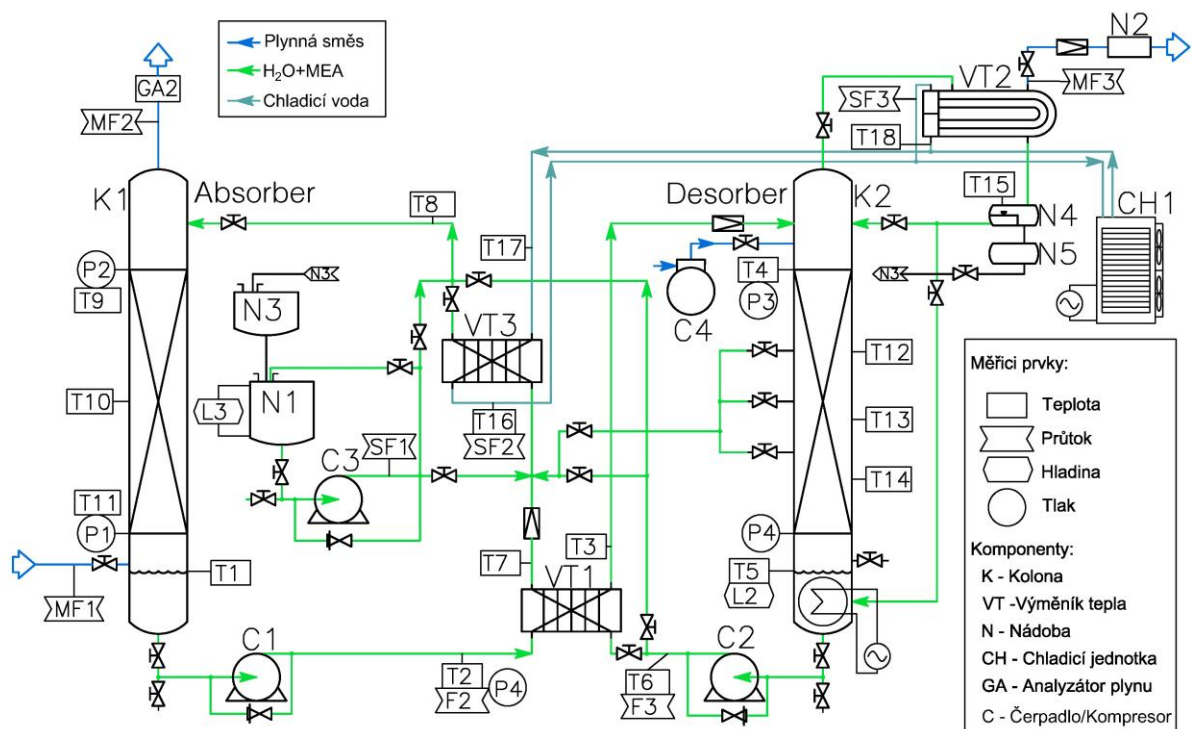
Laboratorní jednotka je koncipována pro víceúčelové využití. Záměrem je, aby součásti zařízení mohly být zapojeny do různých provozních konfigurací:

1. Absorpčně-desorpční okruh
2. Stripovací kolona
3. Testovací zařízení pro zjištění a ověření charakteristik náplně
4. Testovací zařízení pro výzkum varu a stékajícího filmu

3.1 Absorpčně - desorpční okruh

Dané provedení je určeno pro separaci CO_2 pomocí vodného roztoku MEA (kapitola 2.4.1) (Obrázek 19 a 20).

Základní komponentou je absorber (K1), ve kterém probíhá kontaktování plynné směsi a pracovního roztoku. Zpracovávaná plynná směs vstupuje do spodní části absorberu (K1) a v důsledku chemické reakce s roztokem MEA se ochuzuje o část CO_2 . Očištěný plyn vystupuje v horní části (K1).

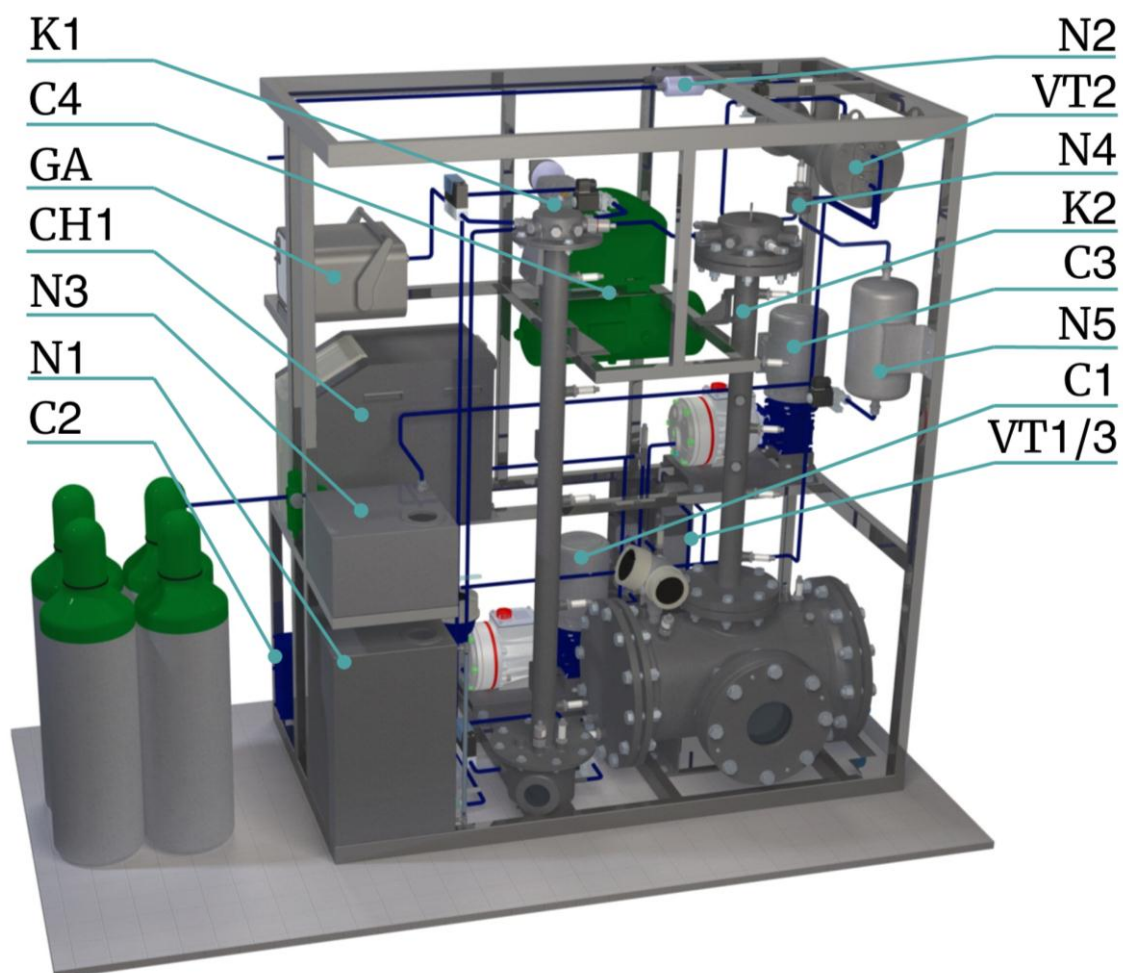


Obrázek 19 Laboratorní jednotka – schéma absorpčně - desorpční konfigurace

Pracovní vodný roztok MEA se připravuje v nádrži (N1), kde se smíchají upravená voda (Kapitola 2.4.5) a amin MEA s hmotnostní koncentrací 15% hm. nebo 30% hm.. Před vstupem do absorberu (K1) lze roztok dochladiť ve (VT3). Pracovní chudý (nezatížený)

roztok vstupuje do (K1) v horní části, kde je rovnoměrnost nátoku na náplň zajištěna distributorem. Ve spodní části (K1) je udržována hladina a je odtud odváděn bohatý (zatížený) roztok po chemické absorpci pomocí čerpadla (C1).

Bohatý roztok čerpaný čerpadlem (C1) je před vstupem do desorbéru ohříván tepelnou energií od chudého (nezatíženého) roztoku v rekuperačním výměníku (VT1). Snímače teploty a průtoku instalované na výměníku (VT1) umožňují zjištění předané tepelné energie mezi roztoky. Aby nedošlo k předběžnému varu ve (VT1) vstup do desorbéru vybaven redukčním ventilem.



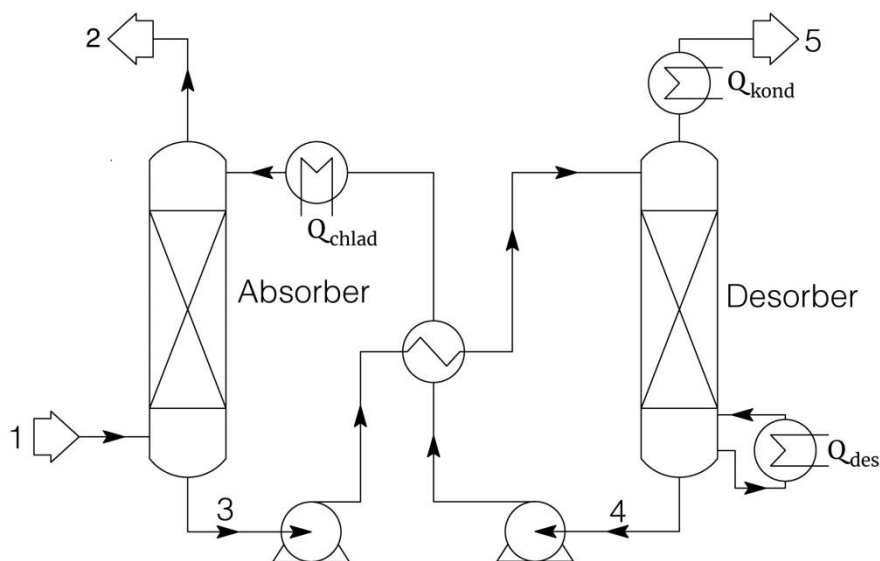
Obrázek 20 Náhled absorpčně-desorpční jednotky

Předeřtý bohatý roztok vstupuje do desorbéru (K2) v horní části, kde je rovnoměrnost nátoku na náplň zajištěna distributorem. Ve spodní části desorbéru (K2) je udržována hladina a je odtud odváděn ohřtý regenerovaný pracovní roztok čerpadlem (C2). Spodní část desorbéru (K2) je vybavena topnými elementy, které přivádějí energii potřebnou k desorpci. Páry procházejí náplní, jsou v kontaktu se stékajícím roztokem. Páry odcházejí v horní části do parciálního kondenzátoru (VT2). V kondenzátoru probíhá kondenzace části

vodních par a ochlazení separovaného CO₂. Plyný podíl odcházející z kondenzátoru (směs separovaného CO₂ a vodní páry) expanduje na atmosférický tlak do nádoby (N2). Kondenzát z kondenzátoru (VT2) se přepouští do rozdělovače refluxu (N4), kde lze nastavit průtok refluxu, a zbytek kondenzátu se odvádí do sběrné nádrže (N5). Kapalný podíl lze z (N4) vracet do spodní části desorbéru. Kondenzát ze sběrné nádrže (N5) lze odvádět pryč z okruhu do zásobníku (N3). Tento stav může nastat v případě, že vlhkost ze vstupního plynu přechází do roztoku. Potřebný chladicí výkon pro (VT2) a (VT3) je zajišťován pomocí chladicí jednotky (CH1).

3.1.1 Návrh provozních parametrů

Návrh absorpčně - desorpční jednotky byl proveden na základě teoretických poznatků, publikovaných výsledků experimentů a referenčních pilotních zařízení. Na základě pracovních křivek rozpustnosti CO₂ ve vodném roztoku MEA a vybraných směsí byl vytvořen model pro provedení zjednodušené hmotnostní bilance. Schéma (Obrázek 21) pro provedení hmotové bilance je upravenou, zjednodušenou verzí základního procesního schématu separace CO₂ bez refluxu z kondenzátoru (Obrázek 7).



Obrázek 21 Zjednodušené schéma pro hmotovou bilanci

Pomocí bilančního modelu bylo provedeno několik výpočtů pro různé varianty parametrů s cílem definovat návrhové parametry jednotky.

Pro návrhový výpočet byla použita směs plynů CoalPlant (Tabulka 5). Inerty ve vstupní směsi jsou plyny O₂, N₂, CH₄, které primárně nepodléhají chemické absorpci v roztoku MEA.

V tabulce 16 jsou uvedeny odhady průtoků hlavních proudů (Obrázek 21) pro parciální tlak CO₂ ve vstupujícím plynu 150 mbar, měrnou spotřebu absorpčního roztoku L/G = 4, laboratorní strukturovanou náplň EX a průtok plynu odpovídající zatížení F = 1,25 Pa^{-0,5}.

Tabulka 16 Odhad průtoků hlavních proudů pro vybrané podmínky

Podmínky:	Náplň	EX			
	p _{CO₂}	150	(mbar)		
	L/G	4	(kg · kg ⁻¹)		
	F	1,25	(Pa ^{-0,5})		
	ω	30	(% hm.)		

Proud číslo (kg · h ⁻¹)	1	2	3	4	5
CO ₂	1,395	0,000	2,452	1,056	1,395
H ₂ O	0,190	0,247	16,589	16,636	0,010
MEA	0,000	0,000	7,587	7,587	0,000
Inerty	4,736	4,736	0,000	0,000	0,000
Celkem	6,322	4,984	26,628	25,289	1,406

Dále byly provedeny výpočty pro dva typy náplně, EX (varianty A1 až A5) a DX (varianty A6 a A7), hodnoty parciálního tlaku CO₂ 150 mbar (varianty A1 až A4 a A6) a 300 mbar (varianta A7), měrné spotřeby absorpčního roztoku v rozsahu 2–4 kg · kg⁻¹ a různé zatížení náplně (F = 0,5 až 2,25). V tabulce 17 jsou prezentovány vybrané výsledky výpočtu – účinnost separace, zatížení absorbentu a potřebné výkony desorbéru, kondenzátoru a chladičí jednotky.

Tabulka 17 Přehled vybraných variant parametrů (sada A)

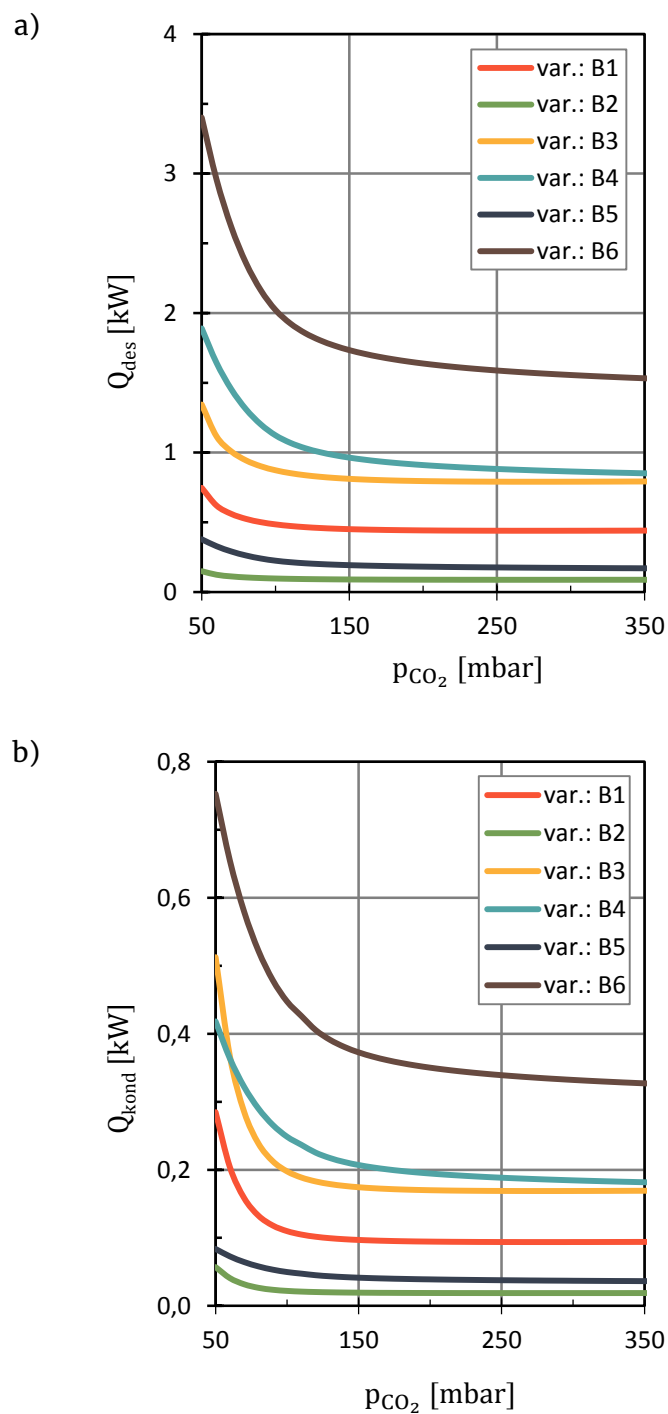
Varianta	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Náplň	EX	EX	EX	EX	EX	DX	DX
p _{CO₂} (mbar)	150	150	150	150	300	150	300
L/G (kg·kg ⁻¹)	2	2	3	4	4	2	2
F (Pa ^{-0,5})	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	2,25	2,25
ω (% hm.)	30	30	30	30	30	30	30
$\dot{m}_{\text{CO}_2\text{vst}}$ (kg · h ⁻¹)	1,26	6,32	6,32	6,32	6,32	11,38	11,38
$\dot{m}_{\text{CO}_2\text{vyst}}$ (kg · h ⁻¹)	0,09	0,43	0,65	0,86	0,87	1,654	1,54
α _{abs} (% mol.)	0,56	0,56	0,56	0,56	0,61	0,53	0,56

Varianta		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
φ	(%)	31	31	46	62	34	66	33
Q_{des}	(kW)	0,09	0,45	0,68	0,90	0,88	1,73	1,56
Q_{kond}	(kW)	0,02	0,10	0,15	0,19	0,19	0,37	0,33
Q_{chlad}	(kW)	0,05	0,24	0,35	0,47	0,47	0,32	0,33

Dále byly provedeny výpočty pro posouzení vlivu koncentrace na výkon desorbéru a kondenzátorů a celkovou účinnost separace pro několik variant parametrů pro dvě různé koncentrace MEA, dva typy náplně a měrnou spotřebu absorpčního činidla $L/G = 2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Parametry variant (B1-B6) jsou uvedené v tabulce 18. Vypočtené závislosti výkonu desorbéru a kondenzátorů jsou graficky prezentovány na obrázku 22.

Tabulka 18 Přehled vybraných variant parametru (sada B)

Varianta		B1	B2	B3	B4	B5	B6
Náplň		EX	EX	DX	EX	EX	DX
L/G	($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2	2	2	2	2	2
F	($\text{Pa}^{-0,5}$)	1,25	0,25	2,25	1,25	0,25	2,25
ω	(% hm.)	15	15	15	30	30	30



Obrázek 22 Potřebný příkon desorbéru (a) a kondenzátoru (b) v závislosti na vstupním parciálním tlaku CO_2 pro vybrané varianty (B1–B6)

Podle výpočtu výkon desorbéru prakticky nezávisí na parciálním tlaku CO_2 pro tlak vyšší než cca 100 mbar. Při dvojnásobném zvýšení koncentrace MEA se výkon také zdvojnásobil. Podobně byl výkon ovlivněn i změnou průtoku. Podobné výsledky byly získány i pro výkon kondenzátoru.

Na základě těchto výpočtů byly stanoveny návrhové parametry pro návrh jednotky (Tabulka 19). Podle těchto parametrů dále byly provedeny výpočty, konstruování jednotlivých částí jednotky a výběr doplňkových zařízení, měřících prvků.

Rozměry teplosměnné plochy kondenzátoru (VT3) byly vypočítány na základě experimentálních dat a doporučených součinitelů prostupu tepla [48]. Rozměr teplosměnné plochy vařáku desorbéru (K2) byl určen z praktických doporučení pro práci s alkylaminy (kapitola 2.7).

Tabulka 19 Souhrn návrhových provozních parametrů

Parametr	Jednotka	Hodnota	Parametr	Jednotka	Hodnota
P_{abs}	(MPa)	0,1	p_{CO_2}	(mbar)	150
P_{des}	(MPa)	0,2	\dot{m}_{CO_2vyst}	(kg · h ⁻¹)	1,40
T_{abs}	(°C)	40	φ	(%)	100
T_{des}	(°C)	120	V_{roztok}	(l)	48
Náplň	(-)	EX	Q_{des}	(kW)	1,46
L/G	(kg · kg ⁻¹)	4	S_{des}	(m ²)	0,07
F	(Pa ^{-0,5})	1,25	Q_{VT1}	(kW)	1,44
Δp_z	(Pa)	1800	Q_{kond}	(kW)	0,31
ω	(% hm.)	30	S_{kond}	(m ²)	0,09
$\dot{m}_{plyn\ vstup}$	(kg · h ⁻¹)	6,32	Q_{chlad}	(kW)	0,48

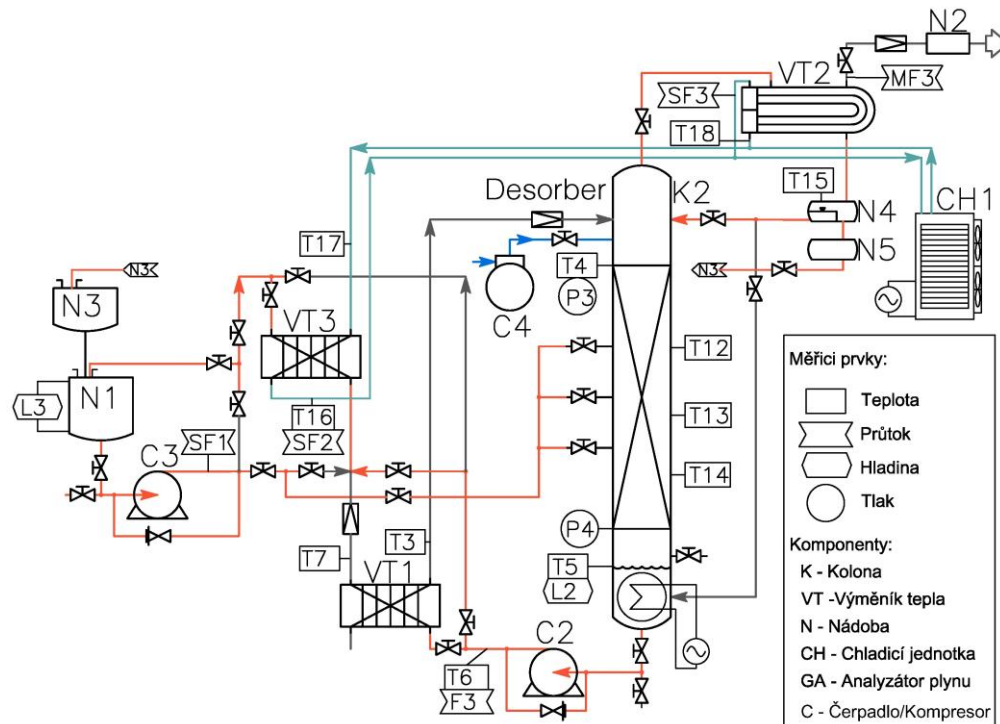
Standardní provozní tlak v desorbéru je navržen v hodnotě $P_{des} = 0,2$ MPa, jako maximální tlak je stanoven $P_{des} = 1$ MPa, pro který jsou provedené pevnostní výpočty. Objem náplně pracovního roztoku je počítán jako součet objemu spodní části absorberu, potrubí, výměníků tepla a poloviční části objemu reboileru.

3.2 Stripovací kolona

Tuto část laboratorní jednotky je možno použít v konfiguraci pro frakční destilaci, ale může být po odstranění náplně použita i pro jednoduchou destilaci.

V případě frakční destilace (Obrázek 23) desorbér (K2) vykonává funkci rektifikační destilační kolony. Nástřík je možno přivádět v určitých výškách pomocí bočních hrdel. Pro přívod nástříku se využijí návarky pro snímače teploty po odmontování příslušného snímače. Spodní část kolony (K2) je vybavena topnými elementy a využívá se pro ohřev destilované směsi. Méně těkavá složka (destilační zbytek) je ze spodní části odváděna do chladiče (VT3) a následně se uskládňuje v nádrži (N1). Těkavější složka vystupuje v horní části a dále proudí do kondenzátoru (VT2), kde probíhá kondenzování. Zkondenzovaný

produkt může být uskladněn do nádrží (N5) a (N3), anebo být dále přepouštěn do nádrže (N1).



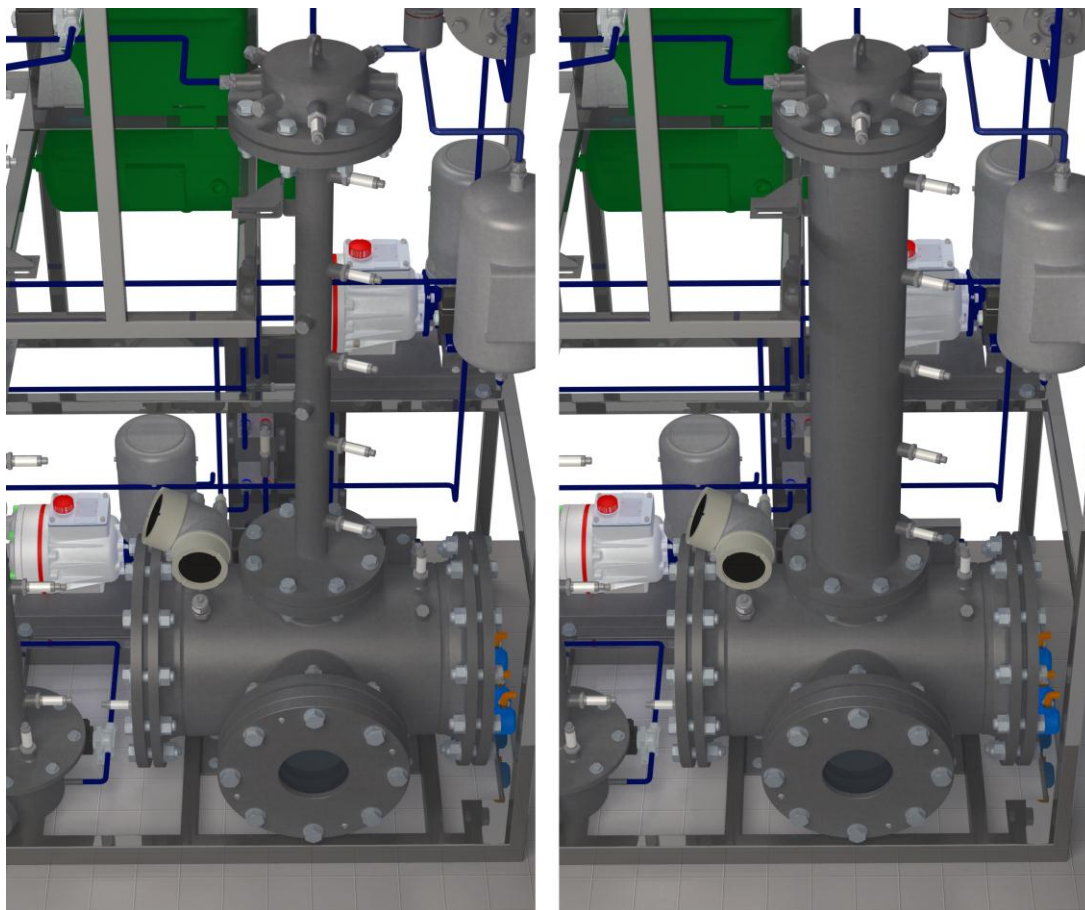
Obrázek 23 Zapojení stripovací kolony (šedě - neaktivní potrubí)

Destilace lze provádět při použití kolony (K2) většího průměru $d_{in} = 0,15$ m, což umožní zvětšit průtok kolonou.

3.3 Testování náplní

Kolona (K2) je dále upravena pro testování náplní - kontrolování a ověřování charakteristik pro existující typy náplní a stanovení pro nové typy náplní. Zapojení jednotlivých oběhů lze sestavit podle skutečných potřeb experimentu. Procesní napojení desorbéru umožňuje různé kombinace s ostatními komponenty.

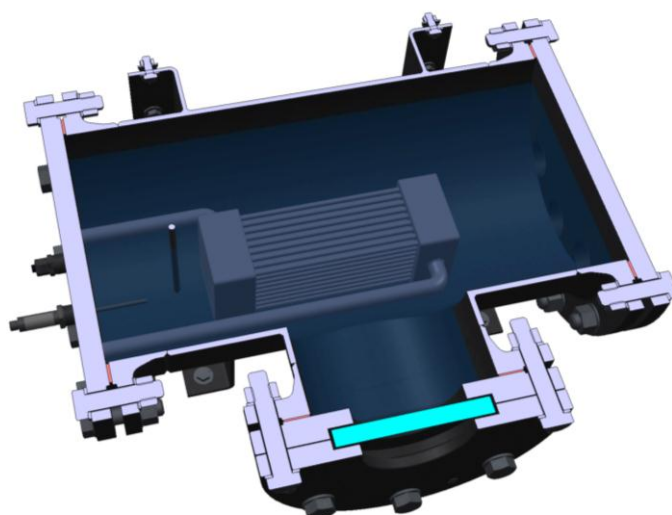
Těleso kolony (K2) s vnitřním průměrem $d_{in} = 0,05$ m lze vyměnit za podobný díl s vnitřním průměrem $d_{in} = 0,15$ m. Těleso kolony o větším průměru je nutné pro nestrukturovanou náplň jako Raschingovy kroužky apod., z důvodu nutnosti zajištění kvalitního rozložení náplní.



Obrázek 24 Náhled kolon dvou rozměru:
 $d_{in} = 0,05 \text{ m}$ (vlevo), $d_{in} = 0,15 \text{ m}$ (vpravo)

3.4 Výzkum varu a stékajícího filmu

Základními účely daného provedení jsou sledování stékajícího filmů na různých tvarech a výzkum varu za různých podmínek.



Obrázek 25 Uspořádání desorbéru (K2) pro výzkum varu (vodorovný řez)

Konstrukce spodní části stripovací kolony je koncipována tak, aby umožnila tvorbu různých podmínek pro průběh testování: teploty až do 150°C a tlaky až do 1 MPa. Boční víka reboileru jsou koncipována jako vyměnitelná a možné je vyměnit za jiné speciálně vyvinuté podle požadavků. Horní část kolony je koncipována jako odnímatelná a bylo možné ji vyměnit za víko nebo jinak konstruovanou část podle potřeby.

Těleso spodní části je zároveň koncipováno tak, aby bylo možné sledovat probíhací proces ve vařáku přes víko s průhledítkem (Kapitola 4.2.5)

4 Komponenty

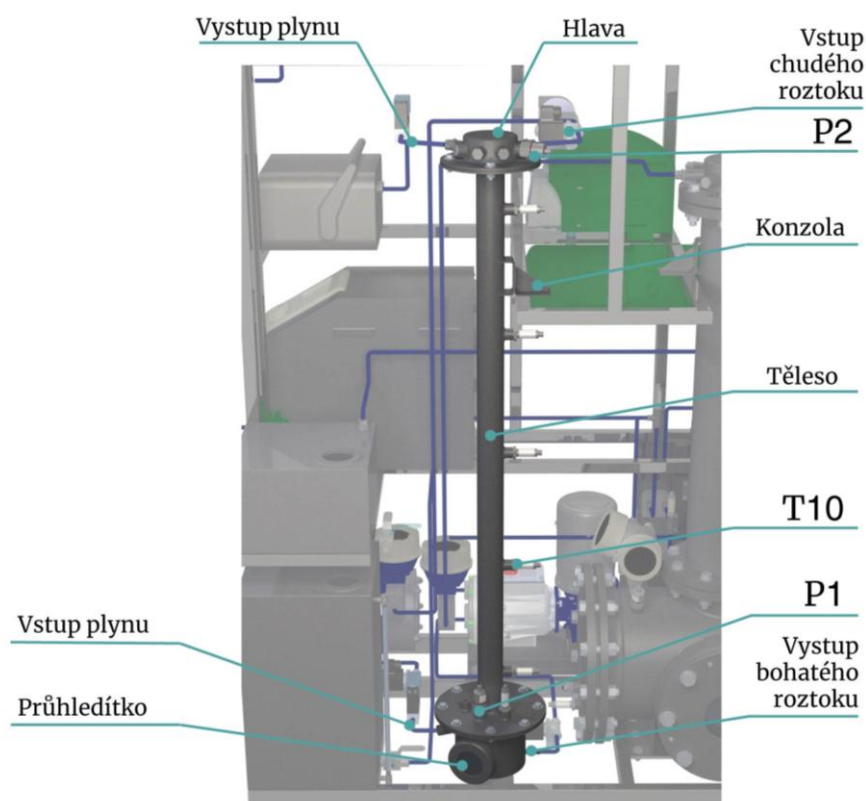
4.1 Absorbér

Absorpční kolona je určena pro kontakt plynné směsi a kapalného roztoku. Rozměry kolony jsou závislé na průtoku vstupujícího proudu plynu. Průtok plynu je svázán se zvoleným typem náplně.

Navrhovaná laboratorní jednotka je omezena maximálními možnými rozměry a požadavkem kompaktnosti provedení. Z toho důvodu je maximální výška celé vybavené absorpční kolony stanovena na $H = 1,6$ m. Zbytek dostupné výšky je určený pro montážní a připojovací účely.

4.1.1 Popis a uspořádání

Absorpční kolona je navrhovaná pro práci za atmosférického tlaku a není tak tlakovou nádobou. Propojení jsou navrhnutá tak, aby bylo možné jednotlivé části jednotky provozně kombinovat a různě pracovat bez dodatečných úprav (Obrázek 26). Příruby geometricky odpovídají PN10 dle EN 1092-1. Avšak tloušťky přírub jsou menší, než uvádí příslušná norma a to z důvodu snížení hmotnosti.



Obrázek 26 Náhled absorpční části jednotky

Spodní část absorberu je tvořena bezešvou trubkou Tr 168,3 x 4,5. Spodní část je vybavena přírubou DN150 se sníženou tloušťkou na 5 mm. Boční část je vybavena hrdlem pro vstup plynné směsi. Ve spodní části se nachází odtok pro bohatý (zatížený) roztok. Boční část je doplněna o otvor se závitem pro umístění průhledítka rozměru DN65 dle DIN 11851. Daný prvek umožní nahlížet do nádoby a jednoduše sledovat hladinu roztoku a probíhající proces.

Střední část – těleso kolony je tvořeno bezešvou trubkou Tr 60x5 délky L=1300 mm. Horní a spodní části jsou vybavené přírubami DN250 se sníženými tloušťkami do 5 mm. Po boční straně jsou umístěny návarky pro teplotní čidla s vnitřními závity.

Horní část – hlava kolony je tvořena bezešvou trubkou Tr 114,3 x 4. Spodní část je vybavena přírubou DN100. Horní část uzavřena plochým dnem s procesními připojeními.

Základní materiál je nerezová ocel 1.4401 dle ČSN EN 10088-1.

Těsnící prvky jsou vyrobeny z PTFE/FFKM dle kapitoly 2.6 s tloušťkou $s = 3$ mm.

Snímače jsou rozmístěné dle schématu (Obrázek 19). Jednotlivé typy snímačů jsou popsány v kapitole 4.7.

4.1.2 Náplň kolony

Jednou z hlavních charakteristik absorpčních kolon je počet teoretických pater N_t , který závisí probíhajícím procesem absorpce. Kohl a Nielsen [19] uvádí, že typická hodnota při použití MEA jako absorbentu je u 75–80% všech průmyslových zařízení 20 teoretických pater. Tento počet odpovídá nízkoteplotní absorpci, při které teplota absorpce nepřesahuje 55–60°C. Počet teoretických pater ve vybraných referenčních pilotních zařízeních je v rozmezí 20–30 (Kapitola 2.5). Pro větší teploty, výjimečně do 110°C, klesá účinnost z důvodů posunutí rovnováhy a v experimentálním zařízení bylo pozorováno zvýšení počtu teoretických pater až na 40. Účelem tohoto experimentu bylo zjistit, jak snížit spotřebu tepla potřebnou pro desorpci i za cenu nižší celkové účinnosti separace [19].

Pro dosažení nejvyšší efektivity je potřebné dosáhnout maximálního nasycení absorbentu, a to vyžaduje co největší možnou kontaktní plochu mezi kapalnou a plynnou fází. Nejlepší, z hlediska rozměrů kontaktní plochy na jednotku objemu, jsou strukturované náplně. Nevýhodou je vyšší cena a určité geometrické omezení v porovnání s nestrukturovanou náplní.

Z důvodu omezené výšky kolony bylo nutné zvolit náplň s nízkým HETP. Z toho důvodu bylo navrženo použití laboratorních náplní, které mají větší účinnost při menší pracovní výšce avšak za cenu větší tlakové ztráty. Výpočty byly provedeny pro strukturované náplně typu EX, DX od výrobce Sulzer [81] a proveden stejný výpočet pro Mellapack 250Y, z důvodu použití tohoto typu v pilotních zařízeních (Kapitola 2.5).

Pomocí grafu separační účinnosti pro jednotlivé náplně od výrobce lze zjistit pracovní rozsah F-faktoru, který definován jako:

$$F = u'_g \cdot \sqrt{\rho_g} \quad (4.1)$$

Z grafu lze dále odečíst hodnoty HETP pro horní a dolní meze F a příslušné tlakové ztráty. Rychlost průtoku plynné směsi je určována dle zahlcení. Typická výpočtová hodnota je v rozsahu 50-80% zahlcení. Celková výška náplně se stanoví jako součin počtu teoretických pater a HETP.

Vypočtené výsledky pro náplně EX a DX firmy Sulzer jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20 Parametry náplně kolony (data [81])

Náplň	EX		DX		250Y	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
F [Pa ^{-0,5}]	0,25	1,25	0,25	2,25	1	3
HETP [m ⁻¹]	0,02	0,06	0,03	0,07	0,35	0,4
H [m]	0,4	1,2	0,6	1,4	7	8
\dot{m}_{plyn} [kg/h]	1,3	6,3	1,3	11,4	5,1	15,2
Δp_z [Pa]	40	1800	60	2100	210	1600

Jako nejvíce odpovídající požadavkům na rozměry absorbéru byl zvolen typ laboratorní náplně Sulzer EX. Náplň DX je rozměrově podobná typu EX a lze její použít i pro větší průměry kolony. Při použití většího průměru tělesa kolony je vhodnější typ Mellapack 250Y.

4.2 Desorbér

4.2.1 Funkční princip

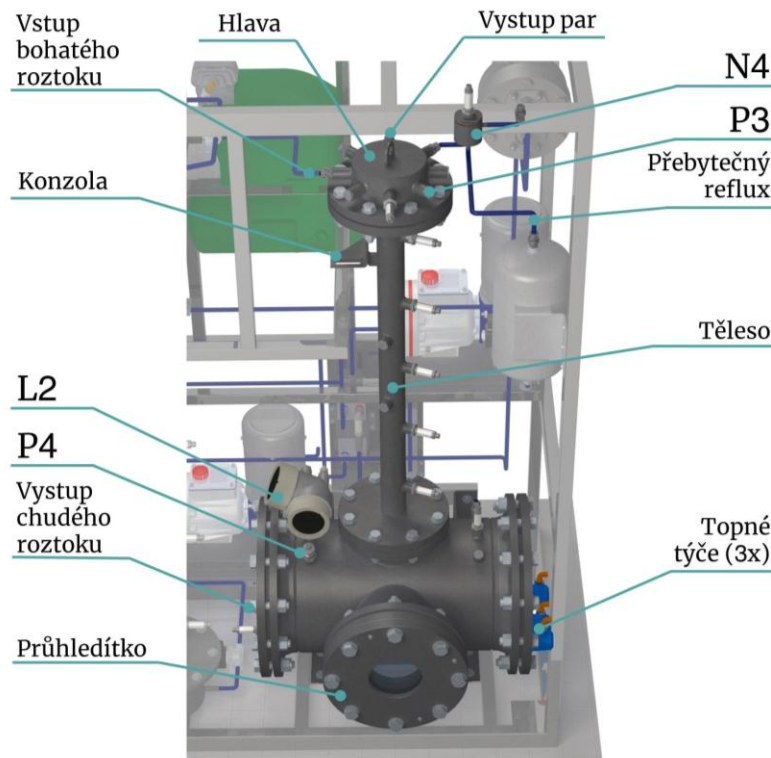
Základní funkcí desorbéru je vytvoření procesních podmínek pro regeneraci bohatého (zatíženého) roztoku, které umožní odvod zachycených plynů z roztoku. Pro případ separace CO₂ pomocí aminu jsou potřeba tyto podmínky:

- pracovní tlak atmosférický nebo do 1 MPa (Kapitola 2.4.1)
- přívod tepelné energie, která odpovídá desorpčnímu teplu (Kapitola 2.4.2)
- teplota by neměla být vyšší než 150°C.

4.2.2 Popis a uspořádání

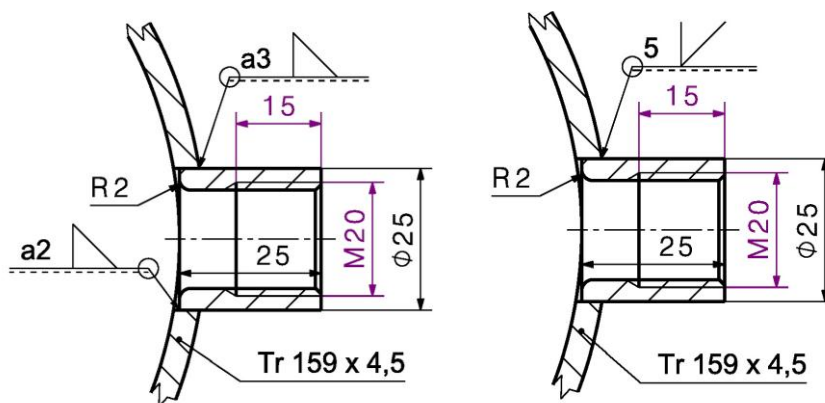
Reboiler - spodní část kolony (K2) je tvořena bezešvou trubkou Tr 323,9x10 délky L = 470 mm (Obrázek 27). Rozměry a provedení přírub a vík desorbéru odpovídají PN10 dle EN

1092-1. Na bočních stranách jsou umístěny krkové příruby typu DN300 pro připojení vík. Víka jsou navržena tak, aby umožnila montáž topných tyčí, senzorů, přívodu a odvodu pracovního roztoku. Přední čelní část je vybavena přírubou DN200. Tato příruha umožňuje namontovat jednak víko ze stejné řady nebo průhledítko dle DIN 28121. Průhledítko je vybaveno borosilikátovým sklem dle DIN 7080. Světlý průzor odpovídající typu DN200 je $d_1=150$ mm. Horní část reboileru je vybavena přírubou DN150 pro připojení tělesa kolony.



Obrázek 27 Náhled desorpční části jednotky

Střední část – těleso kolony je tvořena bezešvou trubkou Tr 60x5 délky $L = 900$ mm. Horní a spodní části jsou vybavené přírubami DN150. Po boční straně umístěný návarky pro teplotní čidla. Tyto návarky jsou koncipovány tak, aby je bylo možné využít jako nástřikové potrubí při destilačním procesu. Konstrukce provedení návarku je prezentována na obrázku 28.



Obrázek 28 Konstrukce provedení návarku (vlevo – s přístupem zevnitř, vpravo – bez přístupu)

Horní část – hlava kolony je tvořena bezešvou trubkou Tr 159 x 4,5. Spodní část hlavy je vybavena přírubou DN200. Horní část hlavy je uzavřena plochým dnem s procesními připojeními.

Základní materiál je nerezová ocel 1.4401 dle ČSN EN 10088-1.

Těsnící prvky jsou vyrobeny z PTFE/FFKM dle kapitoly 2.6 s tloušťkou $s = 2$ mm.

4.2.3 Pevnostní výpočty

Podle ČSN EN 286-1 a ČSN 690010 se tlakovou stabilní a netopenou nádobou se rozumí každá tlaková nádoba kruhového průřezu o objemu větším než $V = 10$ l s provozním přetlakem vyšším než $p = 0,07$ MPa, u níž je hodnota bezpečnostního součinu $p \cdot V \geq 10$. Pro danou konfiguraci desorbéru je součin $p \cdot V = 54$, což desorbér zařazuje do skupiny tlakových nádob.

Podle Vyhlášky Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu č.18/1979 Sb. a zákona č.174/1968 Sb. v platných zněních musí být každá tlaková nádoba, zařízení opatřena:

1. uzavírací a vypouštěcí armaturou
2. tlakoměrem
3. pojistným zařízením
4. odvětrávacím zařízením
5. příslušnou dokumentací prokazující způsobilost tlakové nádoby k provozu v rozsahu dle ČSN 690010-7.2

Vybavení tlakoměrem a pojistným zařízením není třeba, je-li dovolený konstrukční tlak nádoby vyšší než nejvýše dosažitelný tlak zdroje a je-li zároveň vyloučena jakákoliv možnost jiného zvýšení tlaku v nádobě.

Tabulka 21 Přehled parametrů desorbéru

Druh pracovní látky	H ₂ O-MEA	
Materiál	ČSN EN 10088-1 1.4401 (ČSN 17 240, AISI 316)	
Výpočtový přetlak	(MPa)	1
Teplota pracovní látky nejvyšší	(°C)	150
Teplota pracovní látky nejnižší	(°C)	10
Přídavek na korozi	(mm)	1
Přídavek na výrobní tolerance	(mm)	0,2
Objem tlakového prostoru	(m ³)	0,055
Zkušební přetlak	(MPa)	1,73

Na základě pracovních parametrů (kapitola 3.1.1) byl proveden návrhový výpočet podle normy ČSN 690010. Návrhové parametry jsou uvedeny v tabulce 21. Výsledky kontrolního výpočtu jsou uvedeny pro reboiler, těleso kolony a hlavu kolony v tabulce 22.

Tabulka 22 Výsledky kontrolního výpočtu podle ČSN 690010

		Reboiler	Těleso kolony	Hlava kolony
Rozměr		Tr 323,9x10	Tr 60x5	Tr 159x4,5
Průměr vnitřní	(mm)	303,9	50	150
Tloušťka stěny	Výpočtová (mm)	0,64	0,10	0,28
	Provedená (mm)	10	5	4,5
Průměr osamocené otvoru	Výpočtový (mm)	1347,8	978,7	241,2
	Provedený (mm)	206,4 –ok 158,3–ok	12-ok	25-ok
Tloušťka plochého dna	Výpočtová (mm)	-	-	5,88
	Provedená (mm)	-	-	8

4.2.4 Topná část

Topná část může být samostatnou jednotkou nebo být součástí desorbéru. Samostatné provedení spočívá v tom, že médium je odváděno z kolony do externího vařáku, kde se ohřívá a vypařuje a následně se vrací zpět potrubím do kolony. Průmyslová řešení používají

samostatné reboilery z důvodu větších rozměrů topných částí, které není možno zabudovat do tělesa kolony. Dalším důvodem je omezená výška kolon. V případě externího reboileru je možné snížit výšku kolony o výšku reboileru.

Vzhledem k omezenému zástavbovému prostoru zařízení a malých kapacit zařízení bylo zvoleno integrální provedení reboileru a kolony. V tomto případě tak desorpční kolona a reboiler tvoří jeden celek.

Rozměry topné části jsou závislé na zvoleném principu ohřevu. Možné typy ohřevu pro dané zařízení:

- Elektrický ohřev pomocí topných tyčí.
- Nepřímý ohřev pomocí trubkového svazku s párou nebo jiným teplotonosným médiem.

Nejlepší variantou z hlediska úspory prostoru je použití elektrických topných tyčí. Použití vyvíječe páry anebo horkého média v aktuálních laboratorních prostorách není prakticky možné.

V kapitole 2.7 uveden přehled konfigurací reboileru v experimentálních zařízeních (Tabulka 15). Z přehledu vyplývá, že v menších zařízeních jsou většinou použité topné tyče s rozsahem výkonů 2,5 až 5 kW. Zavaleta-Aguilar a Simões-Moreira (2015)[74] používají syntetický topný olej jako teplotonosné médium. Z přehledu také vyplývá, že typické uspořádání svazku trubek je do jednoho sloupce pro větší vnější průměr, a do více sloupců pro trubky menších průměrů.

Dalším faktorem ovlivňujícím rozměr trubek a uspořádání je maximální možný měrný výkon, který je závislý na vlastnostech ohřívaného roztoku. V daném případě při použití MEA, MDEA a dalších aminů je maximální teplota omezena degradací aminů. Podle specifikace firmy DOW [24] je mezní hodnotou, nad kterou probíhá dekompozice aminů, teplota 200 °C (Kapitola 2.4.3).

Primárně je zařízení navrhnuté pro použití elektrických topných tyčí. Výpočty a konstrukční přípravy jsou provedené také pro variantu s použitím trubkového svazku. Návrhové hodnoty jsou uvedeny v souhrnu (Tabulka 19).

Trubková topná tělesa jsou vhodným typem pro použití v dané laboratorní jednotce. Tento typ topného tělesa je určen pro přímý ohřev vody v bojlerech, elektrokotlích a dalších podobných zařízeních. Těleso se skládá ze tří topných větví tvaru "U" upevněných v šestihřanné hlavici, nejčastěji s OK 60 a se závitem M 48x2 nebo G 6/4" (Obrázek 29). Tělesa je možné vyrobit jako jednofázová nebo třífázová s krytím IP 54. Do nerezových nádrží je nutné používat tělesa celonerezová. Tabulka 23 uvádí rozměry komerčně dostupných topných těles podle výkonů, kde L je vzdálenost od montážní plochy do konce trubek.

Tabulka 23 Výkony topných těles v závislosti na délce [82]

P (kW)	L (m)
1,5	150
2	178
2,4	203
3	260
6	300

Aktuálně jsou topná tělesa velmi propracovanou technologií a výrobci nabízí vícero různých provedení. Tělesa jsou nejčastěji vyráběna jako zakázková na základě konkrétního požadavku zákazníka. Příklad provedení topného tělesa je prezentován na obrázku 29.

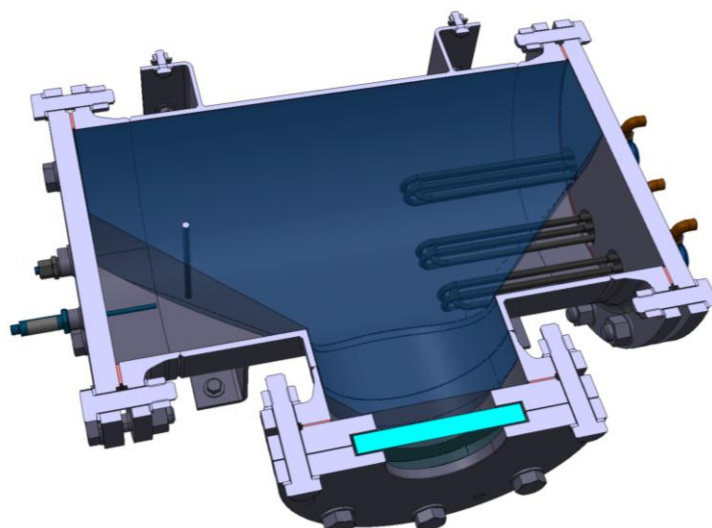


Obrázek 29 Příklad provedení topného tělesa

Pro navrhovanou jednotku je zvoleno použití třech topných těles o celkovém výkonu $P = 6$ kW. Topné tělesa musí splňovat požadavky na výši měrného výkonu $2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (Kapitola 2.7). Provedení jednotlivých topných těles je nutné ověřit u zvoleného dodavatele.

4.2.5 Průhledítka pro sledování procesu

V kapitole 4.2.2 je uvedeno, že přední část desorbéru je vybavena přírubou pro připojení průhledítka s borosilikátovým sklem. Rozměry samotného skla jsou omezené pracovními tlaky a teploty. Dle DIN 28121 je největší dostupné průhledítko o rozměru DN200 s maximálním průměrem průřezu $d_1 = 150$ mm při PN10/PN25. Vzhled příruby s průhledítkem je prezentován na obrázku 30.



Obrázek 30 Vzhled příruby s průhledítkem a rozsah průhledu (vodorovný řez)

Pro výzkum varu a stékajícího filmu je potřeba co nejširší výhled do vnitřní části desorbéru. Obrázek 30 ukazuje dostupné oblasti k nahlížení při použití vybraného průhledítka typu DN200. V tomto případě viditelná oblast tvoří 76% od celkového objemu reboileru.

4.3 Čerpadla

Pro zajištění toku kapalin v zařízení lze použít pístomembránová dávkovací čerpadla. Tento typ čerpadel umožňuje přesné dávkování tekutin v zařízení. Na procesním schématu jsou čerpadla označena jako (C1-C3). Základní charakteristiky, které plynou z parametrů zařízení, jsou průtok, tlak na vstupu a výstupu. Specifickými požadavky kladenými na čerpadla jsou maximální dovolené teploty a agresivita pracovní látky.

Čerpadla (C1) a (C3) pracují při nižších teplotách, takže lze použít jednodušší pístomembránová čerpadla s PTFE membránou (Tabulka 24).

Tabulka 24 Přehled pístomembránových čerpadel pro nižší teploty

Výrobce		Hydra-Cell	
		P300	P400
Řada		P300	P400
Průtok	($l \cdot h^{-1}$)	250 [34bar/0,37kW]	368 [34bar/0,55kW]
Max. tlak	(bar)	172	69
Max. teplota	(°C)	71, 121*	71, 121*
Materiály v kontaktu		304L/316L, Hastelloy C	304L/316L, Hastelloy C
Materiál těsnění		EPDM, FKM, PTFE	EPDM, FKM, PTFE

Montáž	1/2" BSPT	1/2" BSPT
Příruba motoru	63 B5	63 B5

*) Speciální provedení

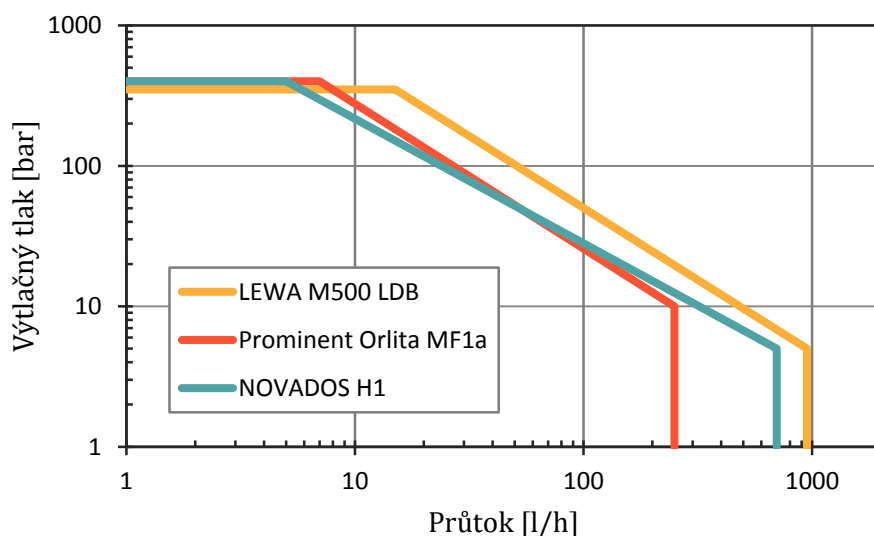
Čerpadlo (C2) bude vystaveno vyšší teplotě pracovního roztoku. Přehled vhodných pístomembránových čerpadel pro vyšší teploty pracovního roztoku jsou uvedeny v tabulce 25 a jejich charakteristiky jsou prezentovány na obrázku 31.

Tabulka 25 Přehled pístomembránových čerpadel pro vyšší teploty

Výrobce	Bran+Luebbe	Prominent	LEWA
Rada	NOVADOS	Orlita Evolution	
Model	H1	MF1a	M500 LDB
Max. průtok [l/h]	700	250	950
Max. tlak [bar]	400	400	350
Rozsah teplot [°C]	-40 / +150	-40 / +150	-50 / +150
Materiály v kontaktu	1.4571, 1.4462 *	1.4404 *	1.4404 *
Materiál membrány	PTFE, 1.4310	PTFE	PTFE

*) Další více ušlechtilé materiály jsou na dotaz

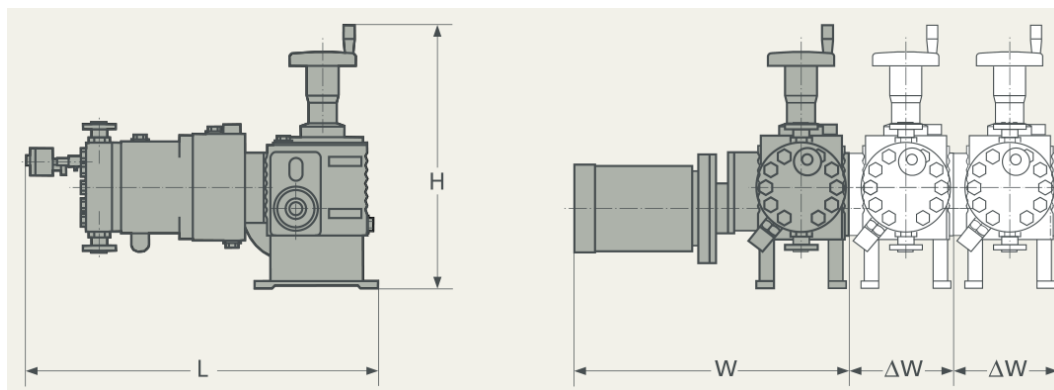
Všechny tři vybrané modely čerpadel pro vyšší teploty jsou nejmenšími v odpovídajících výrobních řadách a splňují tepelné požadavky (Tabulka 19). Čerpadla z obou skupin mohou být vybavené membránou z PTFE, což je vhodná volba materiálu pro práci s aminy (Kapitola 2.6).



Obrázek 31 Charakteristiky pístomembránových čerpadel pro vyšší teploty

Každý výrobce vybraných čerpadel z přehledu umožňuje modulární provedení čerpadel (Obrázek 32). Toto umožňuje umístění do 3 čerpadel v řadě a propojení jedním hřídelem s motorem, a to zároveň při nezávislém nastavení průtoku.

Řízení průtoku probíhá mechanicky pomocí rotační páky, nebo změnou frekvence pohybu pístu. V prvním případě se ovlivňuje zdvihová délka pístu a lze to aplikovat na konkrétní jednotku v řadě, změna frekvence se týká všech čerpadel v řadě.



Obrázek 32 Modularita čerpadel (převzato [83])

4.4 Kompresory

Pro účel tlakování a udržení tlakové hladiny připraven pístový kompresor (C4), který je vybaven tlakovou nádobou objemem 15 l. Podle signálů z tlakoměrů na desorbéru je řízena práce ventilů, zajišťujícího propojení tlakové nádoby a (K2). Jedním z omezení při výběru kompresoru je provoz bez oleje, a to z důvodu možné kontaminace plynné směsi a následné degradace aminů (Kapitola 2.4.5).

Na základě návrhových pracovních podmínek byly vybrány vhodné varianty kompresoru (Tabulka 26).

Tabulka 26 Soupis vybraných kompresoru

Výrobce	ORLÍK-KOMPRESORY		Mark Compressors	
Model	EK/EKP 4-2		RK15-7	RL20-10
Typ	Standardní		Bezolejový	Standardní
Napětí 50Hz	(V)	230	400	230
Výkonnost	($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	7,4	7,4	12,3
Výtlačný tlak	(MPa)	1	0,7	1
Výkon	(kW)	0,75	1,1	1,5
Hmotnost	(kg)	21	28	29
Rozměry DxŠxV	(cm)	47x32x37(40)	51x27x38	51x27x38

Model RK15-7 má výhodu v bezolejovém provedení, ale není schopný dodat 1MPa na výtlaku. Modely EK/EKP 4-2 a RL20-10 jsou vhodné pro zajištění tlakování laboratorní jednotky, ale musejí být opatřeny filtrem pro odlučování oleje. Aktuálně jsou dostupné regulátory tlaku s vestavěným 5 µm filtrem. Kompresory od Mark Compressors mají doplňkové odhlučnění, které umožní snížit hladinu hluku ze standardních 75 dB(A) na 62 dB(A).

Celková sestava na dodání tlaku do jednotky může se skládat z kompresoru EK 4-2, vzdušníků 15 l a regulátoru tlaku s 5 µm filtrem.

4.5 Výměníky tepla a kondenzátory

Proces odstraňování CO₂ je dost náročný na dodávku tepelné případně elektrické energie, která je spotřebována přednostně v desorpční části zařízení. Snížit spotřebu tepla je možno rekuperací tepla mezi ohřátým chudým roztokem z desorbéru a chladným bohatým roztokem z absorbéru ve výměníku (VT1), jak vyznačeno na schéma (Obrázek 19), který je umístěn mezi absorpční a desorpční částí. (VT1) přenáší tepelnou energii mezi chladnějším bohatým roztokem z absorbéru přibližně o teplotě 40 °C a regenerovaným horkým chudým roztokem z desorbéru o teplotě cca 120 °C.

Po výměně tepla ve (VT1) chudý roztok nemusí mít požadovanou finální teplotu pro vstup do absorbéru (cca 40 °C pro navrhovaný průběh chemické reakce). K dochlazení roztoku slouží výměník (VT3). Chladná strana výměníku (VT3) je napojena na externí zdroj chlazené vody (CH1).

Desorpční kolona má vstup refluxu v horní části a je ovlivněna jeho průtokem a teplotou. Reflux je zkondenzovaná část par vycházejících z horní části desorbéru. Kondenzaci par a dochlazení zajišťuje výměník (VT2). Kapalná část je odváděna do oddělovače refluxu, plynná část je odváděna přes redukční ventil do expanzní nádoby (N2) a výfukového potrubí.

Velikost teplosměnné plochy byla stanovena pomocí následujícího vztahu:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = U \cdot S \cdot \text{LMTD} \quad (4.2)$$

Tabulka 27 uvádí přehled základních charakteristik navržených VT. Rozměry a výkony odpovídají procesním parametrům uvedeným v kapitole 3.1.1.

Tabulka 27 Soupis parametrů a charakteristik výměníků tepla

Aparát	Účel	Typ	P (kW)	A_{\min} (m ²)	Materiál
VT1	Rekuperace tepla: absorbér – desorbér	Deskový	~ 2	0,35	ČSN EN 10088-1 1.4401 (ČSN 17 240, AISI 316)
VT2	Kondenzace par z desorbéru	U-Trubkový	~ 0,6	0,2	ČSN EN 10088-1 1.4571 (ČSN 17 348, 316Ti)
VT3	Dochlazení roztoku před absorbérem	Deskový	~ 0,7	0,05	ČSN EN 10088-1 1.4401 (ČSN 17 240, AISI 316)

Návrh teplosměnné plochy kondenzátoru (VT2) byl proveden na základě dostupných experimentálních výsledků [48]. Součinitel prostupu tepla při kondenzaci vodní páry silně ovlivňuje přítomnost nekondenzujícího inertu, v daném případě CO₂. Obvyklý rozsah součinitele je v rozsahu $U = (50-90) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

4.6 Chladicí jednotka

Dochlazení chudého (nezatíženého) roztoku před vstupem do absorbéru (K1) se provádí ve výměníku (VT3) pomocí vnější chladicí jednotky (CH1). Chlazení kondenzátoru par z desorbéru je zajištěno pomocí stejné jednotky. Tento typ zařízení využívá chladicí oběh se speciálním chladivem (např. R452A). Jednotka je kompaktní a přednostně se používá pro laboratorní účely. Na základě požadovaného chladicího výkonu byla vybrána vhodná zařízení.

Tabulka 28 Přehled kompaktních chladících jednotek

Výrobce		INGOS s.r.o.	JULABO GmbH		LabTech S.r.l.	
Model		COR400	FL1203	FL1703	H50-500	H150-1000N
Rozsah teplot (°C)		-20 +20	-20 +40	-20 +40	-5 +35	+8 +35
Stabilita teploty (°C)		±1	±0,5	±0,5	±0,3	±0,1
Chladicí výkon (W)		1400 (10°C)	900 (10°C)	1400 (10°C)	500 (12°C)	1000 (12°C)

Čerpadlo \dot{V} ; Δp_z	($l \cdot h^{-1}$; MPa)	120; 0,07	240; 0,3	240; 0,3	180; 0,07	300; 0,4
Rozměry ŠxHxV	(cm)	53x33x47	76x50x64	76x50x64	48x25x50	56x26x59
Hmotnost	(kg)	29	73	91	28	52

Podle zjištěných charakteristik vybraných zařízení (Tabulka 28) byla zvolena jednotka H150-1000N jako nejvhodnější varianta.

4.7 Měřicí prvky

4.7.1 Snímače teploty

Teplotní čidla pro dané laboratorní zařízení jsou vybrané podle návrhových provozních parametrů (Kapitola 3.1.1). Tabulka 29 uvádí přehled vybraných kompaktních teploměrů splňujících požadavky. Všechny modely čidel lze montovat díky malým rozměrům jak do návarku na tělese kolon, tak i do potrubní armatury.

Tabulka 29 Přehled kompaktních teploměrů

Výrobce	Endress+Hauser	Eximus	Omega	KROHNE
Model	TMR31	PT31	PR-21	TRA-C30
Typ	Pt100	Pt100	Pt100	Pt100
Třída	A	A	A	A
Rozsah měření (°C)	-50 +200	-40 +200	-50 +250	-50 +150
Průměr (mm)	6	6	3,6	6
Délka (mm)	40-600	40-400	50-300	50,100
Materiál	AISI 316L	ČSN 17248, ČSN 17249	AISI 316L	1.4404 AISI 316L
Konektor	M12	M12	M12	M12
Montáž	M14x1,5 M18x1,5	M12x1	G 1/4, G 1/2, M10x1	G 1/2

Všechny čtyři představené modely teploměrů splňují požadavky a lze je použít při stavbě zařízení. Materiál senzorů je vhodný pro použití v kontaktu s pracovním roztokem (Kapitola 2.6).

4.7.2 Snímače tlaku

Pro měření tlaku jsou vybrané komponenty rozděleny do dvou skupin podle pracovní teploty: snímače tlaku pro vyšší teploty (Tabulka 30) a pro nižší teploty (Tabulka 31). Vyšší teplota odpovídá desorbéru (K2), kde maximální teploty jsou $T = 150\text{ °C}$. Nižší teplota odpovídá absorbéru s $T = 40\text{ °C}$.

Tabulka 30 Přehled snímačů tlaku pro vyšší teploty

Výrobce		Endress+Hauser	KROHNE
Řada		Cerabar	OPTIBAR
Model		S PMC71	PC 5060 C
Max. tlak	(bar)	40	40
Rozsah teplot	(°C)	-20 +150	-60 +150
Přesnost	(%)	±0,075	±0,2
Materiál membrány		Keramika	Keramika
Materiál tělesa		AISI 316L	AISI 316L
Konektor		M12, kabel	M12, kabel
Montáž		G ¹ / ₂ , M20x1,5	G ¹ / ₂ , M20x1

Vybrané snímače tlaku pro vyšší teploty splňují celkové návrhové provozní podmínky a lze je tak použít při návrhu jednotky. Vybrané snímače tlaku pro nižší teploty v absorbéru splňují požadované provozní podmínky. Zvolené materiály membrány jsou vhodné pro použití v roztocích aminů.

Tabulka 31 Přehled snímačů tlaku pro nižší teploty

Výrobce		KROHNE	Endress+Hauser	BD SENSORS
Řada		Optibar	Cerabar	
Model		P 1010 C	PMC21	DMP 331Pi
Max. tlak	(bar)	40	40	40
Rozsah teplot	(°C)	-20 +80	-25 +100	-40 +125
Přesnost	(%)	±0,2	±0,3	±0,04
Materiál membrány		1.4435 AISI 316L	Keramika	1.4435, Hastelloy C-276
Materiál tělesa		AISI 316L	AISI 316L	AISI 316L
Konektor		M12, kabel	M12, kabel	M12, kabel
Montáž		G ¹ / ₂ , G ¹ / ₄	G ¹ / ₂ , G ¹ / ₄	G ¹ / ₂ , G1

4.7.3 Měření průtoku

Měření průtoku v dané laboratorní jednotce se provádí pro kapaliny a plyny. Pro měření kapalných směsí – pracovního roztoku je potřeba zajistit korozní odolnost měřiče. U průtokoměrů uvedených v tabulce 32 je to řešeno pomocí obložení částí, které jsou v kontaktu s roztokem, a to perfluor alkoxyalkan kopolymerem (PFA). Daný materiál je vhodný pro použití za daných podmínek a za přítomnosti MEA v roztoku, ale nedoporučuje se použití DEA a TEA pro absorpci.

Tabulka 32 Přehled vhodných průtokoměrů

Výrobce		Endress+Hauser	KROHNE	
Řada		Promag	OPTIFLUX	OPTIFLUX
Model		H100/H500	4050/4100	5100
Princip		El.mag.	El.mag.	El.mag.
Měřicí rozsah	(m · s ⁻¹)	0,01 - 10	0,04 - 16	0 - 12
Přesnost	(%)	±0,5	±0,3	±0,1
Max. tlak		PN30	PN40	PN40
Rozsah teplot	(°C)	-20 +150	< 130	-40 +140
Elektroda		1.4435	Hastelloy C	Cermet
Materiál tělesa		1.4301 + PFA	1.4435 (316L) + PFA	AISI 316 + keramika
Výstupy	Analogový	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA
	Digitální	HART®	HART®	HART®
Montáž		G 3/8, G 1/2, G1	DN 2.5 - 50	DN 15 - 80

Průtokoměry pro kapalně směsi Promag H100/H500 a OPTIFLUX 5100 jsou vhodné pro použití v horké části jednotky (F1 a F2 (Obrázek 19)). Materiály elektrody, obložení jsou vyhovující pro procesy s aminy. Výhodou modelů H500 a 5100 je kompaktní dálkové provedení, když sensor a převodník jsou oddělené. Model H100 má velmi kompaktní převodník ale musí být umístěn společně se senzorem. Modely H100 a H500 mají závitové procesní připojení, což snižuje nároky na potřebný montážní prostor.

Pro měření průtoku plynů jsou vhodné hmotnostní průtokoměry (Tabulka 33).

Tabulka 33 Přehled hmotnostních průtokoměrů

Výrobce		OMEGA	BROOKS Instruments	PARKER
Řada		FMA	SLA	Porter
Model		1600A	5853/5863	512AC
Princip		Měření	Měření/Řízení	Měření
Měřicí rozsah	(Nm ³ ·h ⁻¹)	2 - 15	6 - 150	2,4 - 15
Přesnost	(%)	±0,8	±0,9	±0,5
Max. tlak	(bar)	100	103	100
Rozsah teplot	(°C)	-10 +50	0 +65	-10 +70
Materiál		AISI 302/303	316L, EPDM, Teflon®/Kalrez®,	AISI 316L
Výstupy	Analogový	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA
	Digitální	RS232	Profibus®, RS-485	RS232, Profibus®
Montáž		G ¹ / ₄ , G ¹ / ₂	G ¹ / ₄ , G ¹ / ₂ , G1	G ¹ / ₄ , G ¹ / ₂

Pro měření průtoku plyných směsí jsou z vybraných průtokoměrů vhodnější průtokoměry SLA 5853 a Porter 512AC z důvodu použití ušlechtlejších nerezových materiálů, a případně u SLA 5853 i speciálních korozivzdorných materiálů (MF1 - MF3 (Obrázek 19)).

Pro měření průtoku chladicí vody z (CH1) lze použít jednodušší varianty průtokoměrů (SF1 a SF2 (Obrázek 19)). Vhodnými typy jsou turbínkové a plováčkové průtokoměry z důvodu malých rozměrů a dostačující přesnosti měření (Tabulka 34).

Tabulka 34 Přehled průtokoměrů

Výrobce		OMEGA	Trigas DM	ABB	KROHNE
Model		FTB9507	DM6-8	FAM3255	DK37M8E K340
Princip		Turbínkový	Turbínkový	Plováčkový	Plováčkový
Měřicí rozsah	(l·h ⁻¹)	6 - 147	10 - 120	10 - 100(300)	10 - 100
Přesnost	(%)	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 2,5
Rozsah teplot	(°C)	-268 +232	-40 +125	-25 +80	-80 +150
Materiál		17.4 PH	NO	1.4571	1.4404/316L
Výstupy	Analogový	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA	4...20 mA
Montáž		MNPT 1/2"	NPT/BSP max. DN32	G ¹ / ₄ , G ¹ / ₂	1/4 NPT, G ¹ / ₄

4.7.4 Analýza složení

Pro vyhodnocení účinnosti separace CO₂ je zapotřebí snímat koncentrace CO₂ ve vstupující a vystupující směsi. K tomuto účelu slouží kontinuální analyzátory plynů. Jednou z nejrozšířenějších technologií je použití infračerveného záření (IR) pro analýzu. IR lampa svítí skrz trubici naplněnou vzorkem vzduchu směrem k optickému filtru před detektorem IR světla. IR detektor světla měří množství IR světla, které prochází optickým filtrem. IR lampa pracuje v $\lambda = 4,2 \mu\text{m}$ pásmu, což přibližně odpovídá $\lambda = 4,26 \mu\text{m}$ délky vlny absorpčního pásma CO₂. Na konci trubici je filtr, který odstraňuje světlo jiné vlnové délky než $\lambda = 4,2 \mu\text{m}$. Zbytek prošlého světla je registrován senzorem a rozdíl vyzařovaného světla a pohlceného senzorem se přepočítá na koncentraci CO₂.

Tabulka 35 uvádí přehled vybraných analyzátorů složení. Všechny zařízení měří koncentraci CO₂ v požadovaném rozsahu. Navíc některé modely jsou schopné měřit i další plyny pomocí doplňkových senzorů, které už jsou součástí zařízení. Pracovní teploty pro měření jsou relativně nízké, což může způsobit větší nepřesnosti při zvýšení teploty v absorbéru (K1). Řešením je zvýšení chlazení chudého roztoku na vstupu do absorbéru.

Zařízení od firmy WITT gas mohou být přímo být napojené na tlakovou nádobu bez nutnosti redukce tlaku. Podle vyhodnocení charakteristik má zařízení PA 7.0 výhodu v kombinaci měření plynu O₂, CO₂, N₂ které jsou základem ve většině vybraných směsí. Analyzátory XGA301A1 a BINOS 100/M mají navíc měření vlhkosti.

Tabulka 35 Seznam analyzátorů složení plynu

Výrobce	Michell Instruments	Rosemount Analytical	WITT gas	
Model	XGA301A1	BINOS 100/M	PA 7.0	MAPY 4.0
Plyny	O ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O(p)	O ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₄ , H ₂ O(p)	O ₂ , CO ₂ , N ₂ , Ar	O ₂ , CO ₂ , He
O ₂	min. (%)	0-1	0-0,1	0-0,1
	max. (%)	0-30	0-100	0-100
	přesnost (%)	±1 ¹⁾	±0,1 ¹⁾	±0,1 ¹⁾
CO ₂	min.	0-500ppm	0-0,1%	0-0,1%
	max. (%)	0-100	0-100	0-100
	přesnost (%)	±2 ¹⁾	±1 ¹⁾	±0,5 ¹⁾
Průtok (Nl · min ⁻¹)	0-1,2	0,2-1,5	1	1
Vstupní tlak (bar(a))	0,7 – 1,4	< 1,5	< 1,3/9 ²⁾	< 1,3/9 ²⁾

Provozní teplota (°C)		5-35	5-40	0-40	0-40
Rozměry VxŠxH (cm)		25x25x29	13x12x40	17x28x27	11x30x26
Hmotnost (kg)		3,5	4-7	6	7,2
Výstupy	Analogový	2x 0-10 V 2x 4-20 mA	2x 2-10 V 2x 4-20 mA	2x 0-10 V 2x 4-20 mA	2x 0-10 V 2x 4-20 mA
	Digitální	RS232 ASCII	RS 232C/RS 485	RS232 ASCII	RS232 ASCII

¹⁾Od zvoleného rozsahu ²⁾Speciální provedení

4.7.5 Měření hladiny

Sledování hladiny roztoku v absorbéru (K1) a desorbéru (K2) je nutné z důvodu možného zahlcení kolon při nastavování čerpadel a provozu a v případě desorbéru (K2) také z nutnosti zaplavení topných tyčí. Pro sledování hladiny v absorbéru (K1) je připraveno průhledítko, pomocí kterého lze ručně provádět nastavení průtoku čerpadly. Prostor a podmínky v (K1) neumožňují použití vhodného měřiče hladiny.

Tabulka 36 uvádí přehled snímačů hladiny vhodných pro větší teploty, které odpovídají podmínkám v desorbéru (K2) (Kapitola 3.1.1). Vhodnými typy snímačů jsou vedené radary, které oproti jiným typům umožňují sledování pro velmi malé výšky: typicky od 300 mm. Modely FMR51, FMR53 a VEGAFLEX 81 jsou velmi podobné produkty a odpovídají požadavkům.

Tabulka 36 Přehled snímačů hladiny

Výrobce	Endress+Hauser	BD SENSORS	VEGA
Řada	Micropilot		VEGAFLEX
Model	FMP51 (53)	LMP 331	81
Princip	Vedený radar	Relativní tlak	Vedený radar
Měřicí rozsah (m)	0 - 30	0 - 1(400)	0-6
Přesnost	±2 mm	±0,5 %	±0,4 %
Max. tlak	PN40 (PN16)	PN40	PN40
Rozsah teplot (°C)	-40 - +200 (150)	-40 - +125	-40 - +150
Min. výška (m)	0,3	-	0,3

Materiál v kontaktu	AISI 316L	AISI 316L	AISI 316L
Procesní těsnění	PVDF, PTFE, Viton, PP, PBT	FKM, EPDM, NBR	FKM/FFKM
Výstupy	Analogový	4 - 20 mA	4 - 20 mA
	Digitální	HART®	-
Montáž	G 3/4- G1 1/2 (M24)	G3/4	M27x1,5

Nádrž (N1) pro přípravu vodného roztoku MEA je vybavena bočním trubkovým stavoznakem, např. od firmy KSR KUEBLER. Materiálem armatury je nerezová ocel 1.4571. Skleněná trubice může být vyrobena z borosilikátového skla typu DURAN® odolného organickým látkám. Materiál těsnění odpovídá PTFE/FFKM (Kapitola 2.6).

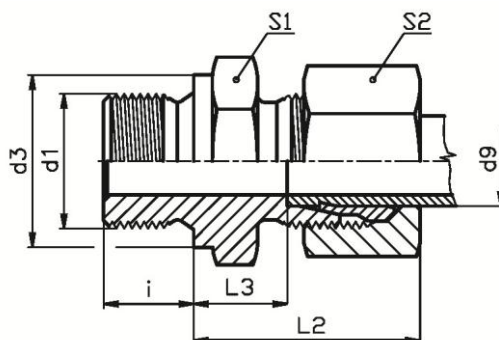
4.8 Potrubí a spojovací prvky

Pro návrhové procesní parametry a pro typické hodnoty rychlosti média v potrubí byly vypočteny průměry spojovacího potrubí (Tabulka 19). Podle doporučení Manning a Thompson (1991)[84] je pro systémy s aminy pro plyn použita návrhová rychlost $u_{\text{plyn}} = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pro kapaliny $u_{\text{kap}} = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podle vypočtených hodnot vnitřních průměrů byly zvoleny odpovídající dostupné řady potrubí (Tabulka 36).

Tabulka 37 Návrh rozměru spojovacích potrubí

Účel	u_{str} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$d_{\text{in min}}$ (m)	$d_{\text{in prov}}$ (m)	Rozměr
Vstup, výstup plynné směsi	15	0,0147	0,021	Tr25x2
Výstup CO ₂	15	0,0074	0,014	Tr18x2
Pracovní roztok	1	0,0042	0,08	Tr12x2

Část spojovacích potrubí jednotky lze provést jako stacionární, to znamená použít pro potrubí nerezovou ocel třídy dle ČSN EN 10088-1 1.4301, ČSN 17 240 (Kapitola 2.6) nebo ušlechtlejší materiály podle dostupnosti materiálů.



Obrázek 33 Přímá hrdla podle DIN EN ISO 8434

Pro spojení jednotlivých úseků a připojení komponent lze použít armatury s řezným kroužkem dle DIN EN ISO 8434-1 například od firem Voss, KNOMI nebo HANSA-FLEX. Obrázek 33 ukazuje náčrtek připojení a tabulka 38 uvádí příslušné rozměry dle vhodných řad spojek.

Tabulka 38 Základní rozměry spojek dle DIN EN ISO 8434

Řada	Max. tlak	d9 (mm)	d1 (mm)	d3 (mm)	i (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	S1 (mm)	S2 (mm)
LL	PN10	8	M10x1	14	8	20,5	9	14	14
L	PN40	8	M12x1,5	17	12	25	10	17	17
		10	M14x1,5	19	12	26	11	19	19

Druhou část propojení částí zařízení je nutné provést z ohebného potrubí – průmyslových hadic na chemikálie. Takové zapojení bylo zvoleno z důvodu potřeby větší flexibility propojení komponent. Tímto způsobem lze sestavovat potřebné procesní okruhy rychle a bez speciálních úprav.

Materiál hadic odpovídá vybranému materiálu – PTFE. Komerčně jsou dostupné hadice s hladkým vnitřním povrchem z PTFE a vnější vrstvou nerezové oceli třídy AISI 304/316, například CHEMFLUOR TH, SMOOTHBORE, HYPERLINE SB (HYDRAFLON). Standardní koncovky jsou přímé s vnitřním nebo vnějším závitem.

4.9 Těsnící prvky

V laboratorní jednotce jsou použity dva typy těsnění: ploché těsnění pro kontaktní plochy přírub a O-kroužky pro těsnění styčných ploch u přípojek. Základním materiálem těsnění je FKM/FFKM nebo expandovaný PTFE, například: GYLON® 3504, GYLON® 3510, GORE® GR, Kalrez® 6380, Kalrez® 0090.

Norma EN 1092-1 uvádí, že nekovové ploché těsnění pro rozměry \leq DN 300 musí mít tloušťku $s = 2\text{ mm}$, pro větší rozměry je vhodná tloušťka $s = 3\text{ mm}$.

4.10 Izolace aparátů a potrubí

Základním účelem tepelné izolace je snížení tepelných ztrát. Při provádění experimentu na zařízení není možné, aby došlo k popálení horkými povrchy.

Horká část jednotky se skládá z desorbéru, (VT1) a spojovacího potrubí (Obrázek 7). Pro izolace daného úseku lze použít hydrofilizované lamely z kamenné vlny (minerální plsti) spojených organickým pojivem. Lamely jsou jednostranně nalepeny na nosnou podložku, kterou tvoří hliníková fólie vyztužená skelnou mřížkou. Maximální pracovní teploty pro kamenné vlny jsou přibližně do $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Typická tloušťka hliníkové fólie je $s = (18 - 22)\ \mu\text{m}$. Materiál je běžně dostupný v tloušťkách 20-100 mm. Součinitel tepelné vodivosti pro $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ je přibližně $\lambda = (0,07-0,08)\ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

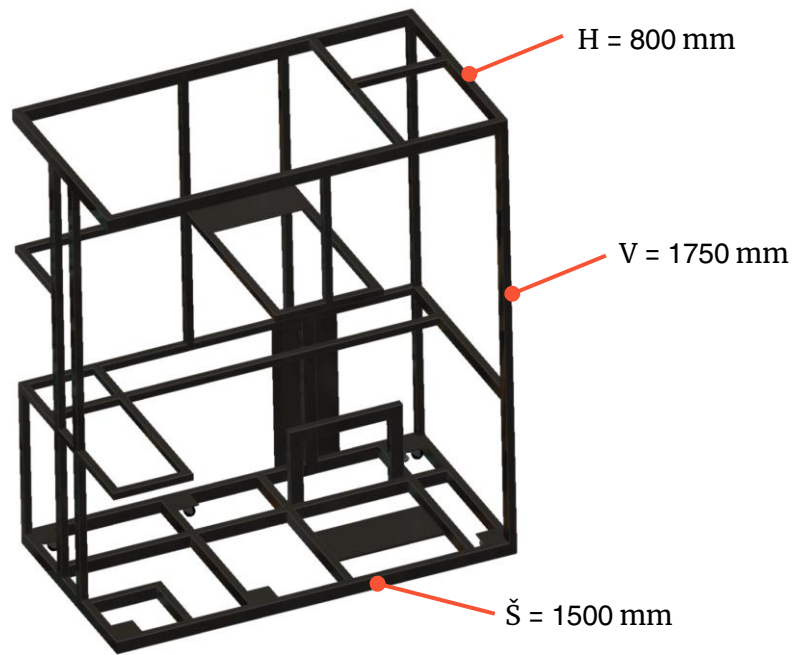
Pro chladnou část zařízení lze použít elastomerní pěnu na bázi syntetického kaučuku. Tento materiál je velmi pružný a vhodný pro složitě tvarované povrchy. Pracovní teplotní rozsah je $(-50 + 110)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Součinitel tepelné vodivosti je na úrovni $\lambda = 0,04\ \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

4.11 Nosná konstrukce

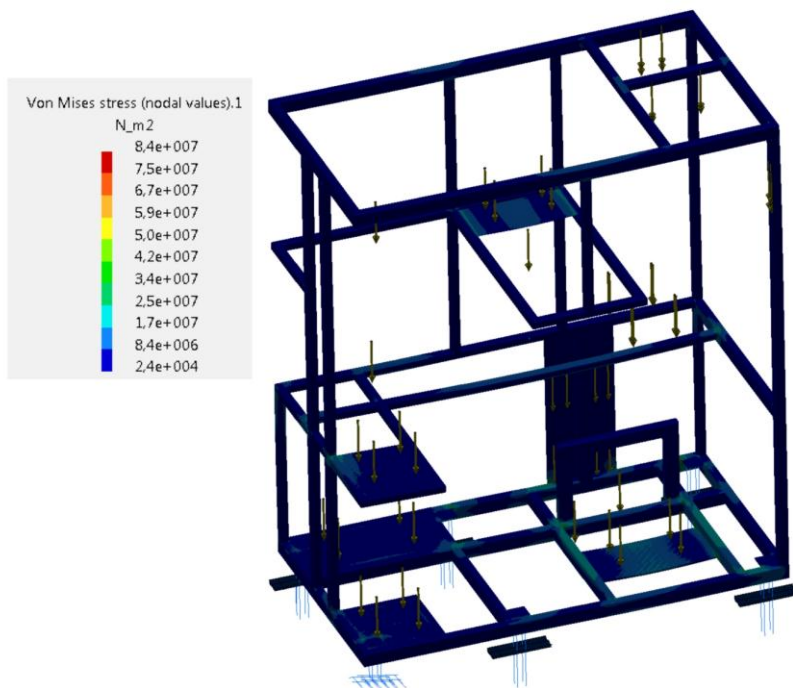
Je požadováno, aby laboratorní jednotka měla kompaktní provedení a modulární podobu. Nejlepší volbou, jak tento požadavek zajistit, je umístění jednotlivých komponent do jedné nosné konstrukce. Tuto konstrukci lze provést jako svařovaný rám z různých profilů, nebo složit z hliníkových profilů stavebnicového systému. S pevnými eloxovanými hliníkovými profily lze čistě a rychle stavět libovolné konstrukce bez potřeby dalších povrchových úprav. Běžně dostupné hliníkové profily se dělí do třech skupin dle rozměrů drážky profilu: 6, 8, 10 mm.

Byl proveden návrh struktury nosné konstrukce podle rozmístění jednotlivých komponent (Obrázek 34). Byly použité typické uzavřené profily typů 30x30, 30x40, 30x50. Bylo analyzováno rozložení napětí a posuvu v částech konstrukce pro zjištění nejvíce namáhaných míst (Obrázek 35 a 36), na které je potřeba se soustředit ve skutečném provedení.

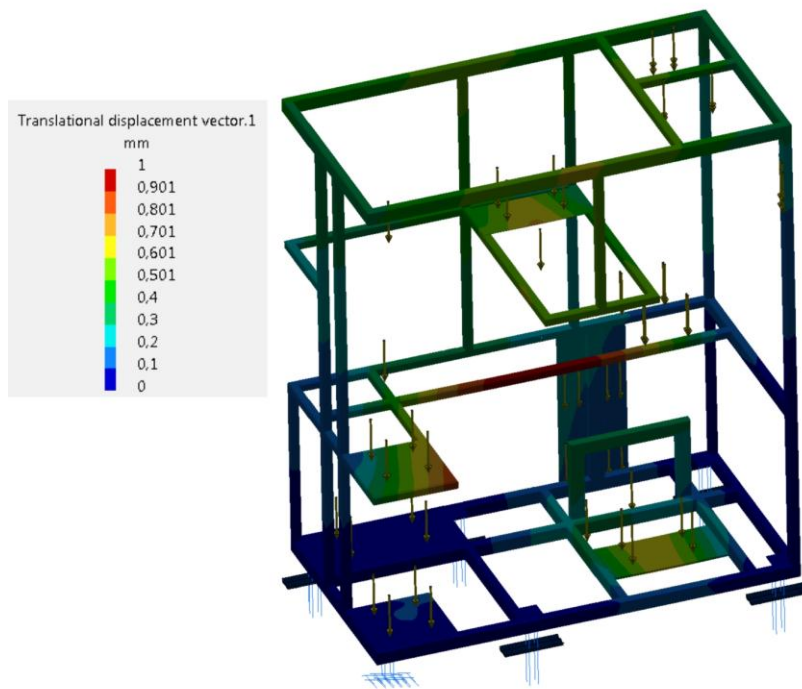
Spodní část rámu je vybavena šesti otočnými kolečky s pryžovými patkami pro fixování polohy rámu. Připojování aparátů k rámu lze provést průchozími šrouby nebo pomocí nýtovacích matic pro snížení objemu spojovacího materiálu.



Obrázek 34 Návrh nosné konstrukce



Obrázek 35 Zatížení uzlů konstrukce



Obrázek 36 Posuvy uzlů konstrukce

5 Odhad ceny zařízení

Pro odhad nákladů na laboratorní jednotku je potřeba znát množství, typ, materiál a velikost zařízení. Pro odhad nákladů byla použita metoda odhadu podle kapacity zařízení. Přehled cen zařízení lze najít v Perry's Chemical Engineering Handbook [86]. Pro přepočítání ceny C na jinou velikost zařízení lze použít vztah:

$$C = C_0 \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right)^n \cdot \left(\frac{I_R}{1000}\right) \quad (5.1)$$

kde A je velikost zařízení, C je cena zařízení o velikosti A, C_0 je cena zařízení o referenční velikosti A_0 , n je exponent charakterizující vliv velikosti zařízení pro daný typ zařízení a I_R je Marshall-Swiftův index změny ceny vůči referenčnímu období. Hodnota Marshall-Swiftova indexu pro rok 2019 je $I_R = 1716$ [85]. Ceny ze soupisu uvedeného v [86] platí pro zařízení z uhlíkové oceli. Pro jiné materiály je nutné ceny přepočítat. Pro přepočítání na jiné materiály se používají materiálové koeficienty z tabulky 39.

Tabulka 39 Materiálové koeficienty pro přepočítání ceny [87]

Materiál	Čerpadla a podobné	Jiná zařízení
Uhlíková ocel	1	1
Nerezová ocel, AISI 304	1,7	2,8
Nerezová ocel, AISI 316	1,8	2,9

Pro aparáty jako nádoby, výměníky, kolony a podobně lze využít metodu odhadu ceny podle hmotnosti zařízení. Pro potrubí a ocelové konstrukce je cena také úměrná hmotnosti. Roušar (2008) [87] uvádí tyto kilogramové ceny vybraných zařízení (Tabulka 40).

Tabulka 40 Kilogramové ceny zařízení vyrobené v ČR v roce 2007 [87]

Aparáty		Uhlíková ocel ČSN 11 375	Nerezová ocel ČSN 17 240
Nádoby, kolony, reaktory	Kč/kg	90-160	350-600
Výměníky tepla, vařáky	Kč/kg	300-600	500-900

Na základě předchozích vztahů a předpokladů byly odhadnuté náklady na aparáty (Tabulka 41). Ceny doplňkových prvků jako jsou měřící, čerpadla apod. byly zjištěny z aktuálních ceníků nebo odhadnuté na základě cen podobných prvků. Odhad nákladů na projektovou dokumentaci podle Roušar (2008) [87] je 4-8% od součtu nákladů technologické a stavební

částí. Náklady na inženýrskou činnost činí 2-4% od součtu nákladů technologické a stavební částí.

Odhad nákladu na výměník tepla (VT2) podle vzorce 5.1:

$$C = 21,7 \cdot \left(\frac{0,05}{93}\right)^{0,59} \cdot \left(\frac{1716}{1000}\right) \cdot 0,87 \cdot 2,9 \cdot 22,7 = 33\,159 \text{ Kč}$$

kde 0,87 je koeficient pro U-trubky, 2,9 je materiálový koeficient a 22,7 je aktuální směnný kurz USD ke Kč.

Tabulka 41 Struktura fixních kapitálových nákladů

Skupina nákladů	Typ	Počet	Odhad [Kč]
◦Stroje a zařízení	Absorbér		15 360
	Desorbér		138 528
	Příslušenství		29 938
	Nosná konstrukce		38 865
	Čerpadla		132 146
	Kompresory		88 595
	Výměníky tepla		45 238
	Chlazení		41 441
◦Měření a regulace	Teplota	18	66 276
	Tlak	5	94 997
	Hladina	1	44 052
	Analýza složení	1	45 440
	Průtok	3xSF, 3xMF, 2xF	213 203
◦Ostatní	Potrubí		44 172
	Izolace		7 500
Technologická část			1 150 328
Projektová dokumentace			46 013
Inženýrská činnost			34 510
Celkové náklady			1 230 851

6 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout kompaktní laboratorní jednotku pro separaci CO₂ z plynné směsi pomocí chemické absorpce.

V teoretické části práce byla popsána problematika emisí oxidu uhličitého do ovzduší. Byly zjištěny a rozebrány jednotlivé zdroje CO₂ a typická složení emisí z jednotlivých zdrojů. Na základě těchto poznatků byly definovány vhodné plynné směsi pro laboratorní testování. Složení směsí odpovídají různým zdrojům emisí. Dále byly popsány aktuální metody separace CO₂ z plyných směsí a rozříděny do skupin podle vstupní a požadované výstupní koncentrace CO₂.

Na základě zadání práce byla pro separaci CO₂ z plynné směsi zvolena chemická absorpce pomocí alkylaminů. Bylo provedeno porovnání primárních, sekundárních a terciálních aminů podle vícero hledisek. Pro navrhovanou absorpční jednotku bylo zvoleno použití vodného roztoku aminu MEA jako pracovního roztoku.

Z vědeckých publikací byly zjištěny principy a podmínky průběhu chemické reakce CO₂ s MEA. Jedním ze zdrojů poznatků byly výsledky testů ze čtyř pilotních zařízení. Tyto experimenty byly zaměřené na studium variability zatížení roztoku, teploty absorbéru a desorbéru a jejich vlivu na účinnost separace a energii potřebnou pro desorpci. Byly uvedeny základní problémy práce s roztoky MEA: tepelná a oxidační degradace MEA, koroze aparátu z uhlíkové i nerezové oceli a toxicita jak samotného MEA, tak i typických inhibitorů. Na základě tohoto jsou uvedeny potřebná návrhová a provozní opatření.

Další část práce je věnována koncepčnímu návrhu laboratorní jednotky. Pro zajištění absorpce byl navrhnout absorbér se strukturovanou náplní. Pracovní vodný roztok MEA obohacený o CO₂ je následně regenerován ve stripovací části jednotky – v desorbéru. Desorbér je navrhnout jako kolona se strukturovanou náplní. Topení reboileru je navrhnouto elektrické s topnými tělesy s možností změny na nepřímé otápění pomocí trubkového svazku. Jednotka a její části jsou koncipovány pro víceúčelové využití. Záměrem je, aby součásti zařízení mohly být zapojeny do různých provozních konfigurací. V této části práce je proveden návrh provozních parametrů, pro zvolený typ náplně a výšku absorbéru.

V dalších kapitolách jsou popsány jednotlivé části jednotky. Atmosférická část jednotky zahrnuje absorbér a směšovací nádoby. Tlaková část obsahuje desorbér, výměníky tepla, kondenzátor a oddělovač refluxu. Tato část jednotky je navrhována pro práci při tlaku maximálně i 1 MPa a teplotě 150°C. Jako základní materiál pro vyráběné a nakupované díly byla zvolena austenitická nerezová ocel typu 1.4401, 1.4571 dle ČSN EN 10088-1, a další materiály dle jednotlivých senzorů. Byl proveden návrhový a kontrolní výpočet desorbéru

dle ČSN 690010 pro zvolené provozní parametry. Pro zajištění cirkulace pracovního roztoku byla zvolena pístomembránová čerpadla s PTFE membránou.

Je požadováno, aby laboratorní jednotka měla kompaktní provedení a modulární podobu. Pro zajištění tohoto požadavku byla zvolena nosná konstrukce ze svařovaného rámu. Byl proveden návrh rámu a jeho pevnostní analýza.

Byl proveden návrh měřených veličin a jejich osazení na jednotce. Laboratorní jednotka je vybavená velkou škálou měřicích zařízení: měření teploty, tlaku, průtoku, hladiny a složení. Pro měření průtoků kapaliny bylo zvoleno měření na elektromagnetickém principu. Pro měření průtoků plynů byly navrženy hmotnostní průtokoměry. Pro měření koncentrace CO₂ ve výstupním proudu z absorberu bylo navrženo měření na IR principu.

V poslední části práce byl proveden odhad ceny zařízení pro vyráběné části jednotky a zvolené nakupované prvky. Celkově odhadovaná pořizovací cena zařízení činí 1 231 tis. Kč. Tato částka může být ovlivněna změnou ceny materiálů, zvláštní cenou výroby anebo jinou volbou komponent od dodavatelů.

Literatura

- [1] LANG, Kenneth R. *Sun, earth, and sky*. 2nd ed. New York: Springer, c2006. ISBN 03-873-0456-8.
- [2] MA, Q. a R. H. TIPPING. The distribution of density matrices over potential-energy surfaces: Application to the calculation of the far-wing line shapes for CO₂. *The Journal of Chemical Physics*. 1998, **108**(9), 3386-3399 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1063/1.475774. ISSN 0021-9606. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.475774>
- [3] Greenhouse Gas Inventory Data Explorer. *United States Environmental Protection Agency* [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://cfpub.epa.gov/ghgdata/inventoryexplorer/>
- [4] *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2018 Highlights* [online]. International Energy Agency www.iea.org, 2018 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2018-highlights>
- [5] BODEN, T.A., G. MARLAND, and R.J. ANDRES. 2017. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2017
- [6] TZIMAS, E., A. GEORGAKARI, C. GARCIA CORTES, S. D. PETEVES. Enhanced Oil Recovery using Carbon Dioxide in the European Energy System. Institute for Energy, Petten, Nizozemí. 2005. 124 s. ISBN 92-79-01044-1.
- [7] *Earth's CO₂ Home Page* [online]. Pro Oxygen [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.co2.earth>
- [8] *The Global Status of CCS: 2017* [online]. Australia: Global CCS Institute, 2017 [cit. 2019-07-22].
- [9] Engineering-Economic Evaluations of Advanced Coal Technologies with Carbon Capture and Storage – 2011. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1022025.
- [10] KANNICHE, M., R. GROS-BONNIVARD, P. JAUD, J. VALLE-MARCOS, J. AMANN a C. BOUALLOU. Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2010, 30(1), 53-62 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.05.005. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431109001471>
- [11] ROLKER, J. a W. ARLT. Abtrennung von Kohlendioxid aus Rauchgasen mittels Absorption. *Chemie Ingenieur Technik* [online]. 2006, 78(4), 416-424 [cit. 2019-07-

- 23]. DOI: 10.1002/cite.200600017. ISSN 0009-286X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cite.200600017>
- [12] MEZNI, M. *LPG Recovery Unit Optimization*. Paříž, 2015. Disertační práce. École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de paris.
- [13] Todd, D.M., 2000, October. Gas turbine improvements enhance IGCC viability. In Gasification Technologies Conference, San Francisco, CA.
- [14] DOWD, R.A. Wabash River Coal Gasification Repowering Project: Project Final Technical Report DE-FC21-92MC29310. Wabash River Energy, 2000.
- [15] HUERTAS, J.I., N. GIRALDO a S. IZQUIERDO. Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption. MARKOŠ, Jozef. *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. InTech, 2011. ISBN 978-953-307-619-5. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/mass-transfer-in-chemical-engineering-processes/removal-of-h2s-and-co2-from-biogas-by-amine-absorption>
- [16] TSAI, R.E. *Mass Transfer Area of Structured Packing*. Austin, 2010. Disertační práce. The University of Texas.
- [17] HIGMAN, C. a M. vdBURGT. *Gasification*. Boston: Elsevier/Gulf Professional Pub., 2003. ISBN 07-506-7707-4.
- [18] JONES, D. S. J. a Peter R. PUJADÓ. *Handbook of petroleum processing*. Dordrecht: Springer, c2006. ISBN 978-1-4020-2819-9.
- [19] KOHL, A.L. a R. NIELSEN. *Gas purification*. 5th ed. Houston, Tex.: Gulf Pub., c1997. ISBN 08-841-5220-0.
- [20] STEWART, M. a K. ARNOLD. Gas Sweetening. *Gas Sweetening and Processing Field Manual*. Elsevier, 2011, 2011, 1-140. DOI: 10.1016/B978-1-85617-982-9.00002-8. ISBN 9781856179829. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781856179829000028>
- [21] BAILEY, D. W. a P. H.M. FERON. *Post-Combustion Decarbonisation Processes* [online]. 2005, **60**(3), 461-474 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.2516/ogst:2005028. ISSN 1294-4475. Dostupné z: <http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/10.2516/ogst:2005028>
- [22] CULLINANE, J.T. a G.T. ROCHELLE. Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine. *Chemical Engineering Science* [online]. 2004, **59**(17), 3619-3630 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1016/j.ces.2004.03.029. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250904002696>

- [23] DIAO, Y.-F., X.-Y. ZHENG, B.-S. HE et al. Experimental study on capturing CO₂ greenhouse gas by ammonia scrubbing. *Energy Conversion and Management* [online]. 2004, **45**(13-14), 2283-2296 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.10.011. ISSN 01968904. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890403003091>
- [24] *The Dow Chemical Company* [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.dow.com/en-us>
- [25] SHOKOUHI, M., A. H. JALILI a M. HOSSEINI-JENAB. Thermo Physical Properties of Some Physical and Chemical Solvents at Atmospheric Pressure. In: Iranian Journal of Chemical Engineering. 4. 10. 2013, s. 43-54. ISSN 1735-5397.
- [26] JOU, F.-Y., A.E. MATHER a F.D. OTTO. The solubility of CO₂ in a 30 mass percent monoethanolamine solution. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 1995, **73**(1), 140-147 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1002/cjce.5450730116. ISSN 00084034. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.5450730116>
- [27] MA'MUN, S., R. NILSEN, H.F. SVENDSEN a O. JULIUSSEN. Solubility of Carbon Dioxide in 30 mass % Monoethanolamine and 50 mass % Methyldiethanolamine Solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data* [online]. 2005, **50**(2), 630-634 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1021/je0496490. ISSN 0021-9568. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je0496490>
- [28] LEE, J. I., F. D. OTTO a A. E. MATHER. The solubility of H₂S and CO₂ in aqueous monoethanolamine solutions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 1974, **52**(6), 803-805 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1002/cjce.5450520617. ISSN 00084034. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.5450520617>
- [29] ARONU, U.E., S. GONDAL a E.T. HESSEN et al.. Solubility of CO₂ in 15, 30, 45 and 60 mass% MEA from 40 to 120°C and model representation using the extended UNIQUAC framework. *Chemical Engineering Science* [online]. 2011, **66**(24), 6393-6406 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1016/j.ces.2011.08.042. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250911006117>
- [30] SHEN, K.P. a M.H. LI. Solubility of carbon dioxide in aqueous mixtures of monoethanolamine with methyldiethanolamine. *Journal of Chemical & Engineering Data* [online]. 1992, **37**(1), 96-100 [cit. 2019-07-22]. DOI: 10.1021/je00005a025. ISSN 0021-9568. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je00005a025>

- [31] VEAWAB, A., P. TONTIWACHWUTHIKUL a A. CHAKMA. Corrosion Behavior of Carbon Steel in the CO₂ Absorption Process Using Aqueous Amine Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 1999, **38**(10), 3917–3924 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1021/ie9901630. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie9901630>
- [32] KENT, R.L. a B. EISENBERG. Better data for amine treating. *Hydrocarbon Process.* 1976, **55**(2), 87–90.
- [33] DESHMUKH, R.D. a A.E. MATHER. A mathematical model for equilibrium solubility of hydrogen sulfide and carbon dioxide in aqueous alkanolamine solutions. *Chemical Engineering Science* [online]. 1981, **36**(2), 355–362 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/0009-2509(81)85015-4. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250981850154>
- [34] CHEN, C.-C., H. I. BRITT, J. F. BOSTON a L. B. EVANS. Local composition model for excess Gibbs energy of electrolyte systems. Part I: Single solvent, single completely dissociated electrolyte systems. *AIChE Journal* [online]. 1982, **28**(4), 588–596 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1002/aic.690280410. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690280410>
- [35] CHEN, C.-C. a L. B. EVANS. A local composition model for the excess Gibbs energy of aqueous electrolyte systems. *AIChE Journal* [online]. 1986, **32**(3), 444–454 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1002/aic.690320311. ISSN 0001-1541. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690320311>
- [36] NICOLAISEN, H., P. RASMUSSEN a J.M. SØRENSEN. Correlation and prediction of mineral solubilities in the reciprocal salt system (Na, K)(Cl⁻, SO₄²⁻)-H₂O at 0–100°C. *Chemical Engineering Science* [online]. 1993, **48**(18), 3149–3158 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/0009-2509(93)80201-Z. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000925099380201Z>
- [37] THOMSEN, K. a P. RASMUSSEN. Modeling of vapor–liquid–solid equilibrium in gas–aqueous electrolyte systems. *Chemical Engineering Science* [online]. 1999, **54**(12), 1787–1802 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0009-2509(99)00019-6. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250999000196>
- [38] HILLIARD, M.D. A predictive thermodynamic model for an aqueous blend of potassium carbonate, piperazine, and monoethanolamine for carbon dioxide capture from flue gas. Austin, 2008. Disertační práce. University of Texas.

- [39] ABOUDHEIR, A., P. TONTIWACHWUTHIKUL, A. CHAKMA a R. IDEM. Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO₂-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions. *Chemical Engineering Science*[online]. 2003, **58**(23-24), 5195-5210 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ces.2003.08.014. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250903004196>
- [40] PLAZA, J.M., D. VAN WAGENER a G.T. ROCHELLE. Modeling CO₂ capture with aqueous monoethanolamine. *International Journal of Greenhouse Gas Control*[online]. 2010, **4**(2), 161-166 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijggc.2009.09.017. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583609001054>
- [41] FREGUIA, S. a G.T. ROCHELLE. Modeling of CO₂ capture by aqueous monoethanolamine. *AIChE Journal*[online]. 2003, **49**(7), 1676-1686 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1002/aic.690490708. ISSN 00011541. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690490708>
- [42] KVAMSDAL, H.M. a G.T. ROCHELLE. Effects of the Temperature Bulge in CO₂ Absorption from Flue Gas by Aqueous Monoethanolamine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*[online]. 2008, **47**(3), 867-875 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1021/ie061651s. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie061651s>
- [43] ZHANG, Y. a C.-C. CHEN. Modeling CO₂ Absorption and Desorption by Aqueous Monoethanolamine Solution with Aspen Rate-based Model. *Energy Procedia*[online]. 2013, **37**, 1584-1596 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.034. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610213002774>
- [44] ABU-ZAHRA, M. R.M et al. CO₂ capture from power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*[online]. 2007, **1**(1), 37-46 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S1750-5836(06)00007-7. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583606000077>
- [45] LUO, X., J.N. KNUDSEN, D. DE MONTIGNY, et al. Comparison and validation of simulation codes against sixteen sets of data from four different pilot plants. *Energy Procedia* [online]. 2009, **1**(1), 1249-1256 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.164. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610209001659>
- [46] ARONU, U.E., S. GONDAL, E.T. HESSEN, Hallvard F. SVENDSEN a H.F. et al. Solubility of CO₂ in 15, 30, 45 and 60 mass% MEA from 40 to 120°C and model

- representation using the extended UNIQUAC framework. *Chemical Engineering Science* [online]. 2011, **66**(24), 6393–6406 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ces.2011.08.042. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250911006117>
- [47] KIM, I. a H. F. SVENDSEN. Heat of Absorption of Carbon Dioxide (CO₂) in Monoethanolamine (MEA) and 2-(Aminoethyl)ethanolamine (AEEA) Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2007, **46**(17), 5803–5809 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1021/ie0616489. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie0616489>
- [48] NOTZ, R.J. *CO₂-Abtrennung aus Kraftwerksabgasen mittels Reaktivabsorption*. Berlin: Logos Verlag Berlin, 2010. ISBN 978-3-8325-2386-2.
- [49] TOBIESEN, F.A., H.F. SVENDSEN a O. JULIUSSEN. Experimental validation of a rigorous absorber model for CO₂ postcombustion capture. *AIChE Journal* [online]. 2007, **53**(4), 846–865 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1002/aic.11133. ISSN 00011541. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.11133>
- [50] KNUDSEN, J.N., J.N. JENSEN a P. VILHELMSEN. Experience with CO₂ capture from coal flue gas in pilot-scale: Testing of different amine solvents. *Energy Procedia* [online]. 2009, **1**(1), 783–790 [cit. 2019-07-28]. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.104. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610209001052>
- [51] ABU-ZAHRA, M., J.P.M. NIEDERER, P.H.M. FERON a G.F. VERSTEEG. CO₂ capture from power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2007, **1**(2), 135–142 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S1750-5836(07)00032-1. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583607000321>
- [52] GOFF, G.S. *Oxidative Degradation of Aqueous Monoethanolamine in CO₂ Capture Processes: Iron and Copper Catalysis, Inhibition, and O₂ Mass Transfer*. Austin, 2005. Disertační práce. The University of Texas.
- [53] DAVIS, J. a G. ROCHELLE. Thermal degradation of monoethanolamine at stripper conditions. *Energy Procedia* [online]. 2009, **1**(1), 327–333 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.045. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610209000460>
- [54] SEXTON, A. *Amine Oxidization in CO₂ Capture Processes*. Austin, 2008. Disertační práce. The University of Texas.

- [55] VEVELSTAD, S.J., A. GRIMSTVEDT, J. ELNAN, E. DA SILVA a H. SVENDSEN. Oxidative degradation of 2-ethanolamine: The effect of oxygen concentration and temperature on product formation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*[online]. 2013, **18**, 88-100 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijggc.2013.06.008. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583613002569>
- [56] FYTIANOS, G., S.J. VEVELSTAD a H.K. KNUUTILA. Degradation and corrosion inhibitors for MEA-based CO₂ capture plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*[online]. 2016, **50**, 240-247 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijggc.2016.05.003. ISSN 17505836. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583616302183>
- [57] SAIWAN, C., T. SUPAP, R. IDEM a P. TONTIWACHWUTHIKUL. Corrosion and prevention in post-combustion CO₂ capture systems. *Carbon Management*[online]. 2014, **2**(6), 659-675 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.4155/cmt.11.63. ISSN 1758-3004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4155/cmt.11.63>
- [58] VEAWAB, A., P. TONTIWACHWUTHIKUL a A. CHAKMA. *Investigation of Low-Toxic Organic Corrosion Inhibitors for CO₂ Separation Process Using Aqueous MEA Solvent*[online]. 2001, **40**(22), 4771-4777 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1021/ie010248c. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie010248c>
- [59] DUPART, M.S., T.R. BACON a D.J. EDWARDS. Understanding corrosion in alkanolamine gas treating plants: Part 1&2. *Hydrocarbon Processing*[online]. 1993, (72), 75-80, 89-94. ISSN 0018-8190.
- [60] *EU-Project CAPRICE: CO₂ capture using amine processes: International cooperation and exchange*. Nizozemsko, 2007. Dostupné také z: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/81410/factsheet/en>
- [61] LUO, X., J.N. KNUDSEN, D. DE MONTIGNY, et al. Comparison and validation of simulation codes against sixteen sets of data from four different pilot plants. *Energy Procedia*[online]. 2009, **1**(1), 1249-1256 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.164. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610209001659>
- [62] NOTZ, R., N. ASPRION, I. CLAUSEN a H. HASSE. Selection and Pilot Plant Tests of New Absorbents for Post-Combustion Carbon Dioxide Capture. *Chemical Engineering Research and Design*[online]. 2007, **85**(4), 510-515 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1205/cherd06085. ISSN 02638762. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876207730745>

- [63] MA'MUN, S., V.Y. DINDORE a H.F. SVENDSEN. Kinetics of the Reaction of Carbon Dioxide with Aqueous Solutions of 2-((2-Aminoethyl)amino)ethanol. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 2007, **46**(2), 385-394 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1021/ie060383v. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie060383v>
- [64] TOBIESEN, F.A., O. JULIUSSEN a H.F. SVENDSEN. Experimental validation of a rigorous desorber model for mml. *Chemical Engineering Science* [online]. 2008, **63**(10), 2641-2656 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ces.2008.02.011. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250908000754>
- [65] GUO, X.-P a Y TOMOE. The effect of corrosion product layers on the anodic and cathodic reactions of carbon steel in CO₂-saturated mdea solutions at 100°C. *Corrosion Science* [online]. 1999, **41**(7), 1391-1402 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/S0010-938X(98)00194-2. ISSN 0010938X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X98001942>
- [66] ZHANG, Q.B. a Y.X. HUA. Corrosion inhibition of mild steel by alkylimidazolium ionic liquids in hydrochloric acid. *Electrochimica Acta* [online]. 2009, **54**(6), 1881-1887 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.electacta.2008.10.025. ISSN 00134686. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468608012267>
- [67] LIKHANOVA, N.V., M.A. DOMÍNGUEZ-AGUILAR a O. OLIVARES-XOMETL. The effect of ionic liquids with imidazolium and pyridinium cations on the corrosion inhibition of mild steel in acidic environment. *Corrosion Science* [online]. 2010, **52**(6), 2088-2097 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.02.030. ISSN 0010938X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X10000892>
- [68] BILLINGHAM, M.A., C.-H. LEE, L. SMITH, et al. Corrosion and materials selection issues in carbon capture plants. *Energy Procedia* [online]. 2011, **4**, 2020-2027 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.083. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610211002803>
- [69] KITTEL, J., R. IDEM a D. GELOWITZ, et al. Corrosion in MEA units for CO₂ capture: Pilot plant studies. *Energy Procedia* [online]. 2009, **1**(1), 791-797 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.01.105. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610209001064>
- [70] HJELMAAS, S., E. STORHEIM a N. FLØ, et al. Results from MEA Amine Plant Corrosion Processes at the CO₂ Technology Centre Mongstad. *Energy*

- Procedia* [online]. 2017, **114**, 1166-1178 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1280. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217314613>
- [71] MOSER, P., S. SCHMIDT a R. UERLINGS, et al. Material testing for future commercial post-combustion capture plants—Results of the testing programme conducted at the Niederaussem pilot plant. *Energy Procedia* [online]. 2011, **4**, 1317-1322 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.01.189. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610211001913>
- [72] Chemical Compatibility Database. *Cole-Parmer Instrument Company LLC* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.coleparmer.com/chemical-resistance>
- [73] Chemical Resistance Guide. *ERIKS Sealing & Polymer worldwide* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://o-ring.info/en/tools/chemical-resistance-guide/>
- [74] ZAVALETA-AGUILAR, E.W. a J.R. SIMÕES-MOREIRA. Horizontal tube bundle falling film distiller for ammonia–water mixtures. *International Journal of Refrigeration* [online]. 2015, **59**, 304-316 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.07.022. ISSN 01407007. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700715002297>
- [75] BOHRA, L.K. *Analysis of binary fluid heat and mass transfer in ammonia-water absorption*. Atlanta, 2007. Disertační práce. Georgia Institute of Technology.
- [76] LEE, S. *Development of techniques for in-situ measurement of heat and mass transfer in ammonia-water absorption systems*. Atlanta, 2007. Disertační práce. Georgia Institute of Technology.
- [77] LEE, J.H., D.H. KIM a S.M. KIM, et al. Heat transfer characteristics of a falling film generator for various configurations of heating tubes in an absorption chiller. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2019, **148**, 1407-1415 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.007. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431118332265>
- [78] ÁLVAREZ, M.E. a M. BOUROUIS. Experimental characterization of heat and mass transfer in a horizontal tube falling film absorber using aqueous (lithium, potassium, sodium) nitrate solution as a working pair. *Energy* [online]. 2018, **148**, 876-887 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.energy.2018.01.052. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054421830063X>
- [79] DEWANGAN, A.K., A. KUMAR a R. KUMAR. Pool boiling of iso-butane and quasi azeotropic refrigerant mixture on coated surfaces. *Experimental Thermal and Fluid*

- Science* [online]. 2017, **85**, 176-188 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.02.028. ISSN 08941777. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177717300572>
- [80] MILLER, W.A. The Synergism Between Heat and Mass Transfer Additive and Advanced Surfaces in Aqueous LiBr Horizontal Tube Absorbers. Oak Ridge National Lab., 1999.
- [81] SULZER CHEMTECH. *Structured Packings: Energy-efficient, innovative and profitable* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.sulzer.com/en/products/separation-technology/structured-packings>
- [82] THERMIS SPOL. S R.O. *Topná tělesa pro ohřev kapalin* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <http://www.thermis.cz/produkt/149-topna-telesa-pro-ohrev-kapalin/>
- [83] LEWA GMBH. *LEWA ecoflow: The custom-made metering pumps*. [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.lewa.com/en/pumps/metering-pumps>
- [84] MANNING, F.S. a R.E. THOMPSON. *Oilfield processing of petroleum*. Tulsa, Okla.: PennWell Books, c1991. ISBN 08-781-4354-8.
- [85] Marshall & Swift. *CoreLogic* [online]. [cit. 2019-07-23]. Dostupné z: <https://www.corelogic.com/solutions/marshall-swift.aspx>
- [86] PERRY, R.H. a D.W. GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, c2008. ISBN 978-007-1422-949.
- [87] ROUŠAR, Ivo. *Projektové řízení technologických staveb*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2602-1.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Podíly skleníkových plynů v emise ze spalování paliv v roce 2015 [4]	14
Obrázek 2 Podíl emise CO ₂ podle odvětví zdroje spalin [4]	14
Obrázek 3 Vývoj emise CO ₂ ze spalování podle typu paliva v letech 1971–2016 [4]	15
Obrázek 4 Metody zachycení CO ₂ ze spalin elektráren	17
Obrázek 5 Schéma provedení jednotky na přípravu směsi pro experiment (upraveno [16])	20
Obrázek 6 Rozhodovací graf pro volbu metody separace CO ₂ ze směsi bez přítomnosti H ₂ S [17] [20]	22
Obrázek 7 Základní procesní schéma zachycení CO ₂ pomocí vratné chemické absorpce	25
Obrázek 8 Měrná tepelná kapacita vybraných aminů [24][25]	26
Obrázek 9 Zatížení roztoku CO ₂ - vliv koncentrací MEA v pracovním roztoku při T = 40°C (graf zpracován dle dat [46])	28
Obrázek 10 Zatížení CO ₂ v 30% hm. roztoku MEA – vliv teploty (graf zpracován dle dat [46])	28
Obrázek 11 Srovnání izoterm rozpustnosti CO ₂ v roztocích při koncentraci MEA: (—) 15% hm., (—) 30% hm. [48]	29
Obrázek 12 Absorpční teplo reakce CO ₂ -MEA pro 30% hm. koncentraci MEA – experimentální data [47]	30
Obrázek 13 Měrný výkon desorbéru – vliv L/G - výsledky projektu CASTOR [50]	31
Obrázek 14 Měrný výkon desorbéru v závislosti na zatížení roztoku - přehled výsledků z experimentů (Notz (2010) [48], Tobiesen (2007) [49])	31
Obrázek 15 Měrná energie desorbéru pro nízké koncentrace CO ₂ v plynné směsi [48]	32
Obrázek 16 Náklady na tunu separovaného CO ₂ v závislosti na tlaku v desorbéru (ceny platí pro rok 2006) [51]	32
Obrázek 17 Degradční ztráty MEA při experimentu [56]	34
Obrázek 18 Doporučené materiály pro linku pro post spalovací separaci CO ₂ (převzato a upraveno [68])	38
Obrázek 19 Laboratorní jednotka – schéma absorpčně - desorpční konfigurace	42
Obrázek 20 Náhled absorpčně-desorpční jednotky	43
Obrázek 21 Zjednodušené schéma pro hmotovou bilanci	44

Obrázek 22 Potřebný příkon desorbéru (a) a kondenzátoru (b) v závislosti na vstupním parciálním tlaku CO ₂ pro vybrané varianty (B1-B6)	47
Obrázek 23 Zapojení stripovací kolony (šedě - neaktivní potrubí)	49
Obrázek 24 Náhled kolon dvou rozměru: $d_{in} = 0,05$ m (vlevo), $d_{in} = 0,15$ m (vpravo).....	50
Obrázek 25 Uspořádání desorbéru (K2) pro výzkum varu (vodorovný řez)	50
Obrázek 26 Náhled absorpční části jednotky	52
Obrázek 27 Náhled desorpční části jednotky	55
Obrázek 28 Konstrukce provedení návarku (vlevo – s přístupem zevnitř, vpravo – bez přístupu)	56
Obrázek 29 Příklad provedení topného tělesa	59
Obrázek 30 Vzhled příruby s průhledítkem a rozsah průhledu (vodorovný řez).....	60
Obrázek 31 Charakteristiky pístomembránových čerpadel pro vyšší teploty	61
Obrázek 32 Modularita čerpadel (převzato [83])	62
Obrázek 33 Přímá hrdla podle DIN EN ISO 8434.....	72
Obrázek 34 Návrh nosné konstrukce	74
Obrázek 35 Zatížení uzlů konstrukce.....	74
Obrázek 36 Posuvy uzlů konstrukce.....	75

Seznam tabulek

Tabulka 1 Typické složení spalin [11].	17
Tabulka 2 Typické složení zemního plynu [12]	18
Tabulka 3 Typické složení syntézního plynu [14]	19
Tabulka 4 Typické složení bioplynu [15]	20
Tabulka 5 Plynné směsi pro laboratorní testování	21
Tabulka 6 Přehled technologií pro separaci kyselých složek z plynů	23
Tabulka 7 Kvalitativní charakteristiky aminů [11][24]	24
Tabulka 8 Přehled vybraných parametrů používaných při popisu absorpční separace	24
Tabulka 9 Přehled vlastností komerčně dostupných chemických látek [31][33]	26
Tabulka 10 Souhrn prací zaměřených na rozpustnost CO ₂ ve vodném roztoku MEA	27
Tabulka 11 Základní používané inhibitory degradace MEA [57]	34
Tabulka 12 Kvalita vody - doporučené obsahy nečistot [59]	35
Tabulka 13 Přehled parametrů hlavních sekcí vybraných pilotních zařízení [61]	37
Tabulka 14 Přehled materiálů pro pružné prvky [72][73]	40
Tabulka 15 Přehled provedení topných částí vybraných laboratorních zařízení	41
Tabulka 16 Odhad průtoků hlavních proudů pro vybrané podmínky	45
Tabulka 17 Přehled vybraných variant parametrů (sada A)	45
Tabulka 18 Přehled vybraných variant parametru (sada B)	46
Tabulka 19 Souhrn návrhových provozních parametrů	48
Tabulka 20 Parametry náplně kolony (data [81])	54
Tabulka 21 Přehled parametrů desorbéru	57
Tabulka 22 Výsledky kontrolního výpočtu podle ČSN 690010	57
Tabulka 23 Výkony topných těles v závislosti na délce [82]	59
Tabulka 24 Přehled pístomembránových čerpadel pro nižší teploty	60
Tabulka 25 Přehled pístomembránových čerpadel pro vyšší teploty	61
Tabulka 26 Soupis vybraných kompresoru	62
Tabulka 27 Soupis parametrů a charakteristik výměníků tepla	64
Tabulka 28 Přehled kompaktních chladících jednotek	64

Tabulka 29 Přehled kompaktních teploměrů	65
Tabulka 30 Přehled snímačů tlaku pro vyšší teploty	66
Tabulka 31 Přehled snímačů tlaku pro nižší teploty	66
Tabulka 32 Přehled vhodných průtokoměrů	67
Tabulka 33 Přehled hmotnostních průtokoměrů	68
Tabulka 34 Přehled průtokoměrů	68
Tabulka 35 Seznam analyzátorů složení plynu	69
Tabulka 36 Přehled snímačů hladiny	70
Tabulka 37 Návrh rozměru spojovacích potrubí	71
Tabulka 38 Základní rozměry spojek dle DIN EN ISO 8434	72
Tabulka 39 Materiálové koeficienty pro přepočet ceny [87]	76
Tabulka 40 Kilogramové ceny zařízení vyrobené v ČR v roce 2007 [87]	76
Tabulka 41 Struktura fixních kapitálových nákladů	77