VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VYBRANÉ PROJEKČNÍ PRÁCE NA PROCESU STRIPOVÁNÍ KYSELÝCH VOD

SELECTED DESIGNING WORKS ON THE ACID WATER STRIPPING PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Ondřej Motyka

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	**Bc. Ondřej Motyka**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vybrané projekční práce na procesu stripování kyselých vod

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na řešení vybraných projekčních prací souvisejících s projektováním procesu stripování kyselých vod. Konkrétně se vybrané projekční práce budu týkat těchto oblastí: simulace technologického chování projektovaného procesu v profesionálním softwaru, zpracování vybraných výkresů PI&D a vybraných dispozičních výkresů a izometrií, příprava datových listů (tzv. „datasheets“) vybraných procesních zařízení a provedení pevnostního výpočtu vybraných namáhaných potrubních větví v profesionálním softwarovém systému.

Cíle diplomové práce:

1. Seznámit se s účelem, technologií a provedením procesů na stripování kyselých vod a zpracovat v tomto duchu do diplomové práce stručný úvod do problematiky.
2. Na základě vstupních technologických a dalších souvisejících projekčních dat realizovat simulaci technologického chování projektovaného procesu v profesionálním softwaru.
3. Zpracovat vybrané výkresy PI&D a vybrané dispoziční a izometrické výkresy a připravit datové listy (tzv. „datasheets“) pro vybraná procesní zařízení.
4. Provést pevnostní výpočet vybraných namáhaných potrubních větví procesu v profesionálním softwarovém systému.
5. Souhrnně zhodnotit dosažené výsledky a poznatky z provedených projekčních aktivit.

Seznam doporučené literatury:

SEIDER, W.D., LEWIN, D.R., SEADER, J.D., WIDAGDO, S., GANI, N., NG, K. M., Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, 4th. ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2017.

KLEIBER, M., Process Engineering: Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 2016.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na realizaci vybraných projekčních prací týkajících se návrhu konkrétního procesu stripování kyselých vod. Hlavním cílem práce tak je popis postupu řešení a obdržených výsledků u těchto prováděných projekčních prací na základě příslušného průmyslového zadání a požadavků řešeného procesu. V úvodních dvou kapitolách se práce zaměřuje na představení předmětného procesu a hlavních zařízení ve výrobní technologii. Následující kapitoly se už věnují popisu řešených činností, konkrétně simulaci řešeného procesu v programu CHEMCAD, návrhovému výpočtu spirálového deskového výměníku pro předehřev nástřiku, tvorbě 3D modelu procesu a výkresové dokumentace pomocí programu AutoCAD Plant 3D a v poslední řadě pevnostní analýze zvolené potrubní trasy. Hlavní praktické výstupy této práce pak tvoří zejména vygenerované výsledkové reporty ze simulace procesu a jeho zařízení a pevnostní analýzy řešené potrubní trasy, 3D model procesu a vybraná technická a výkresová dokumentace. V závěru diplomové práce jsou provedené činnosti a jejich výstupy sumarizovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Stripování kyselých vod, projektování, simulace, pevnostní analýza, potrubí, výměník tepla, kolona, P&ID, dispoziční výkres, teplotní dilatace.

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on selected designing works related to the design of a specific process of acid water stripping. The main purpose of the work is to describe the procedure and the obtained results for these performed design work based on the relevant assignment and the process requirements. In the introductory two chapters, the work focuses on process introduction and description of main process equipment. The following chapters are devoted to the description of the designing works, specifically simulation of the process in CHEMCAD, design calculation of the spiral plate heat exchanger for feed preheating, creation of 3D model and drawing documentation using AutoCAD Plant 3D and lastly strength analysis of the selected pipeline. The main outputs of this work are mainly generated result reports from the process and equipment simulation and strength analysis of the solved pipeline route, 3D model of the process and selected technical and drawing documentation. At the end of the diploma thesis, the performed activities and their outputs are summarized and evaluated.

Key words

Acid water stripping, designing, simulation, strength analysis, pipe, heat exchanger, column, P&ID, orthographic documentation, thermal expansion.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MOTYKA, Ondřej. *Vybrané projekční práce na procesu stripování kyselých vod.* Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132716. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk Jegla.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vybrané projekční práce na procesu stripování kyselých vod vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Datum *Jméno a příjmení*

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Zděnku Jeglovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborný dohled během jejího zpracování. Dále také tímto děkuji Ing. Davidu Gerykovi za jeho vstřícnost, pomoc a veškeré předané zkušenosti. Zvláštní poděkování patří mé rodině a blízkým, kteří mě podporovali během celého studia i při tvorbě této závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD 11
1 Úvod do problematiky zpracování kyselých vod 12
1.1 Odpadní vody v rafinériích 12
1.2 Nakládání s produkty stripování 13
2 Technologická zařízení procesu stripování kyselých vod a základní aspekty jejich projektování 14
2.1 Klíčové zařízení procesu - stripovací kolona 14
2.1.1 Mechanismus separace NH_3 a H_2S 14
2.1.2 Technologické a realizační možnosti klíčového zařízení 16
2.2 Potrubí 18
2.2.1 Tlakové ztráty potrubí 18
2.2.2 Teplotní dilatace potrubí a uložení potrubí 19
2.3 Čerpadla 21
2.4 Zařízení na výměnu tepla 22
2.4.1 Trubkový výměník tepla se segmentovými přepážkami 23
2.4.2 Spirálový deskový výměník tepla 24
2.4.3 Zanášení výměníků tepla 24
3 Zadání vybraných projekčních činností 26
3.1 Činnosti z oblasti technologie procesu 26
3.2 Činnosti z oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace procesu 27
4 Simulace procesu a výpočty procesních zařízení 29
4.1 Bilance procesu v CHEMCADU 29
4.1.1 Úvodní představení a nastavení softwaru 29
4.1.2 Sestavení výpočtového schématu pro simulaci procesu 31
4.2 Nastavení zařízení v softwaru CHEMCAD 31
4.3 Výsledky simulace procesu a výpočtů zařízení v softwaru CHEMCAD 38
4.4 Výpočet vybraného zařízení bez softwaru CHEMCAD 39
4.4.1 Popis spirálového deskového výměníku tepla a vstupní hodnoty pro jeho výpočet 39
4.4.2 Výpočet spirálového deskového výměníku a dosažené výsledky 40
5 Konstrukční část v softwaru AutoCAD Plant3D 44
5.1 AutoCAD Plant3D 44
5.1.1 Orientace a obecné uspořádání softwaru 44
5.2 P&ID schéma 45
5.3 3D model 49
5.4 Dispoziční výkresy 57
5.5 Izometrické výkresy 57
6 Pevnostní výpočet potrubí 59

6.1 Úvod do pevnostního výpočtu potrubí 59
6.2 Pevnostní analýza pomocí softwaru AutoPIPE 60
Závěr 67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 69
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 71
SEZNAM OBRÁZKŮ 73
SEZNAM TABULEK 75
SEZNAM PŘÍLOH 76

ÚVOD

Projekční činnost v oblasti procesního inženýrství vyžaduje širokou škálu znalostí v daném oboru. Je zapotřebí disponovat znalostmi o jednotlivých technologických zařízeních, schopnostmi tyto zařízení vhodně navrhnout a popřípadě simulovat daný proces. Dále nesmí u projektanta v oblasti procesního inženýrství chybět schopnost zhotovit potřebnou technickou dokumentaci od počátečních výkresů návrhu procesu až po detailní výkresy veškerých technologických zařízení a potrubních tras. Od projektanta se rovněž vyžaduje povědomí o veškerých nebezpečných možných situacích vznikajících při provozu daného procesu a zároveň schopnost navrhnout veškerou technologii co nejlevněji a nejefektivněji. Do oblasti návrhu bezpečné technologie také spadá schopnost ověřit, zda zvolená technologie neobsahuje místa, u kterých by mohlo dojít při provozu k poruše či nehodě způsobené nadměrným zatížením dané části. Tuto část, například tepelně namáhanou potrubní větev, by měl být projektant schopen ověřit výpočtem či analýzou, která prověří, zda je daná část schopna dlouhodobého a bezpečného provozu.

Tato diplomová práce se bude věnovat některým z výše uvedených činností z oblasti projektování u konkrétního průmyslového procesu stripování odpadních vod, a to v první řadě popisu procesu a technologických zařízení, dále softwarové simulaci procesu, tvorbě modelu a konstrukčním výkresům, nezbytným pro stavbu daného celku a v poslední řadě ověření bezpečnosti namáhaných oblastí pomocí pevnostní analýzy. Součástí diplomové práce je také softwarová simulace funkce klíčového zařízení procesu, jímž je stripovací kolona, do které jako nástřik vstupuje tzv. kyselá voda (vznikající jako jeden z vedlejších produktů atmosférické destilace ropy) a vystupuje z ní tzv. vystripovaná voda, jež již splňuje předepsaný požadavek na výslednou čistotu.

Již zmíněným technickým pojmem kyselá voda se tedy standardně označuje jeden z mnoha vedlejších produktů procesních technologií, především rafinérií. Na výrobní provozy je tak přirozeně kladen požadavek tyto vody účinně zpracovávat. To se nejčastěji realizuje v již zmíněných procesech stripování kyselých vod, jejichž klíčovým zařízením je stripovací kolona. V České republice jsou například stripovací kolony součástí provozů UNIPETROL Rafinérie Litvínov nebo UNIPETROL Rafinérie Kralupy nad Vltavou.

Předmětná technologie odstraňování kyselé vody je zavedenou procesní technologií a je v procesním průmyslu úspěšně používána po celá desetiletí. Jak se uvádí v [1], byl to inženýr Milton Beychok, který napsal jeden z prvotních textů na toto téma již v roce 1967. Přesto však, i o téměř pět desetiletí později, existuje stále mnoho striperů kyselé vody, které nepracují dostatečně a efektivně. Jinými slovy, stále je v této oblasti co zlepšovat. [1].

1 Úvod do problematiky zpracování kyselých vod

Se zvyšování poptávky po ropných produktech, jsou rafinerie nuceny rozšiřovat kapacitu svých zařízení na zpracování ropy, aby se přizpůsobily vyššímu výkonu. Výrazně se to přitom projevuje v zemích, kde domácí produkce surové ropy není anebo klesá, což vyžaduje dovoz a zpracování surové ropy s vysokým obsahem síry. V takové rafinerii pak bývají prováděny rekonstrukční úpravy stávajícího či doplňující návrh nového procesu stripování odpadních kyselých vod, označovaného často zkráceně jako tzv. striper kyselých vod. [2]

Odpadní kyselé vody ze zpracování ropy se vyznačují zvýšeným obsahem sirovodíku a čpavku, jakožto nevhodných látek odstraněných z ropných produktů před jejich zpracováním v následujících technologiích provozu. Vzhledem k potřebě dalšího využití těchto odpadních vod jako nezávadné látky, je zapotřebí je adekvátně upravit, tj. těchto nežádoucích složek je zbavit. K potřebné úpravě odpadních vod pak dochází ve zmíněném striperu kyselých vod, který kyselou vodu konvertuje na vodu zbavenou těchto nežádoucích složek, která se označuje jako voda vystripovaná. Tato voda již neobsahuje zmíněné nežádoucí látky a je neškodná pro použití v dalším procesu. Současně tato úprava kyselé vody napomáhá také například snížit riziko výskytu koroze a zanášení na technologických zařízení. [3]

Stripery kyselých vod se zavádějí do provozu také z důvodů snížení provozních nákladů a zvýšení efektivity navazujících procesů či jejich subsystémů, jako je například zanášení výměníkových sítí či během odsolování ropy. Mezi další pozitivní vlivy výstavby striperu kyselých vod patří dopad na životní prostředí, a to zejména z důvodu výraznému snížení zátěže čističky odpadních vod, eliminace nebezpečí úniku dotyčných látek do půdy při poruše, či jinému poškození technologických zařízení. [3]

1.1 Odpadní vody v rafinériích

V rafinériích vzniká několik druhů vod, které se řadí mezi odpadní vody. Jedná se o chladící, splaškové, technologické a dešťové vody. Jejich jednotlivé množství je obecně závislé na konfiguraci rafinérie, její komplexnosti, variabilitě zpracovávaných surovin a úrovni integrace jejích jednotlivých výrobních, resp. technologických procesů. [4]

Tabulka 1 zpracovaná dle [4] sumarizuje celkovou produkci odpadních vod v rafinériích, nacházejících se v Evropě a uvádí také členění produkce odpadních vod podle typu rafinérie.

Tabulka 1 Produkce a spotřeba odpadních vod [4]

Produkce odpadních vod v rafinériích v Evropě	**Hodnota**	**Jednotka**
Roční průměr produkce odpadní vody	3,6	[milion m^3 / rok]
Variační rozsah	0,07 - 21	[milion m^3 / rok]
Průměrná spotřeba na 1 t zpracované ropy	0,53	[m^3 / t ropy]
Variační rozsah	0,09 - 1,6	[m^3 / t ropy]
Produkce odpadních vod dle typu rafinérie	**Hodnota**	**Jednotka**
Obecně zaměřené rafinérie	0,1 - 0,3	[m^3/ t zpracované ropy]
Rafinérie zaměřené na produkci mazacích olejů	0,3 - 0,5	[m^3/ t zpracované ropy]
Rafinérie zaměřené na výrobu asfaltu	0,5 - 0,8	[m^3/ t zpracované ropy]

Obvykle bývají odpadní vody s obsahem dvou hlavních složek amoniaku a sirovodíku (jinak též sulfanu) čištěny v závodní nebo externí čistírně odpadních vod a následně po úpravě jsou vypuštěny. Řada destilačních nebo separačních procesů v rafinerii využívá pro zlepšení své funkce vstřikování páry. Tento nástřik následně zvyšuje produkci již zmíněné kyselé vody.

Odpadní voda s vyšší koncentrací amoniaku a sirovodíku musí před vypuštěním nebo opětovným použitím projít procesem stripování. V případě, že dochází při procesu stripování k vzniku odpadního plynu, je nutné i tento plyn následně podrobit procesu čistění. [4]

Další látky a vlastnosti odpadních vod, jež je dle [4] potřeba brát v úvahu v rámci provozu rafinérie, jsou pH, celkové nerozpustné látky (NL), dusík a jeho formy (organický R-NH_2, amonné ionty, dusitany a dusičitany), organický uhlík (TOC), fosfor, BSK, CHSK, ropné látky a fenoly.

Následující tabulka 2 uvádí koncentrace znečišťujících látek v běžných rafinérských odpadních vodách (před samotnými kroky čištění a následným opětovným použitím či vypuštěním vody). [5]

Tabulka 2 Koncentrace znečišťujících látek v běžných rafinérských odpadních vodách před jejich čištěním [5]

Zdroj	Ropné látky	H_2S	NH_3	Fenoly	BSK CHSK TOC	NL
Destilační jednotky	XX	XX	XX	X	XX	XX
Hydrorafinace	XX	XX	XX	-	X	X
Termické krakování	XX	XX	XXX	XX	XX	X
Katalytické krakování	XX	XXX	XXX	XX	XX	X
Hydrokrakování	XX	XXX	XXX	-	X	-
Mazací olej	XX	X	X	-	XX	-
Balastní voda	X	-	-	X	X	X
Dešťová voda	X	-	-	-	X	-
Splašky	-	-	X	-	X	XX

X<50 mg/l **XX=50-500 mg/l** **XXX>500 mg/l**

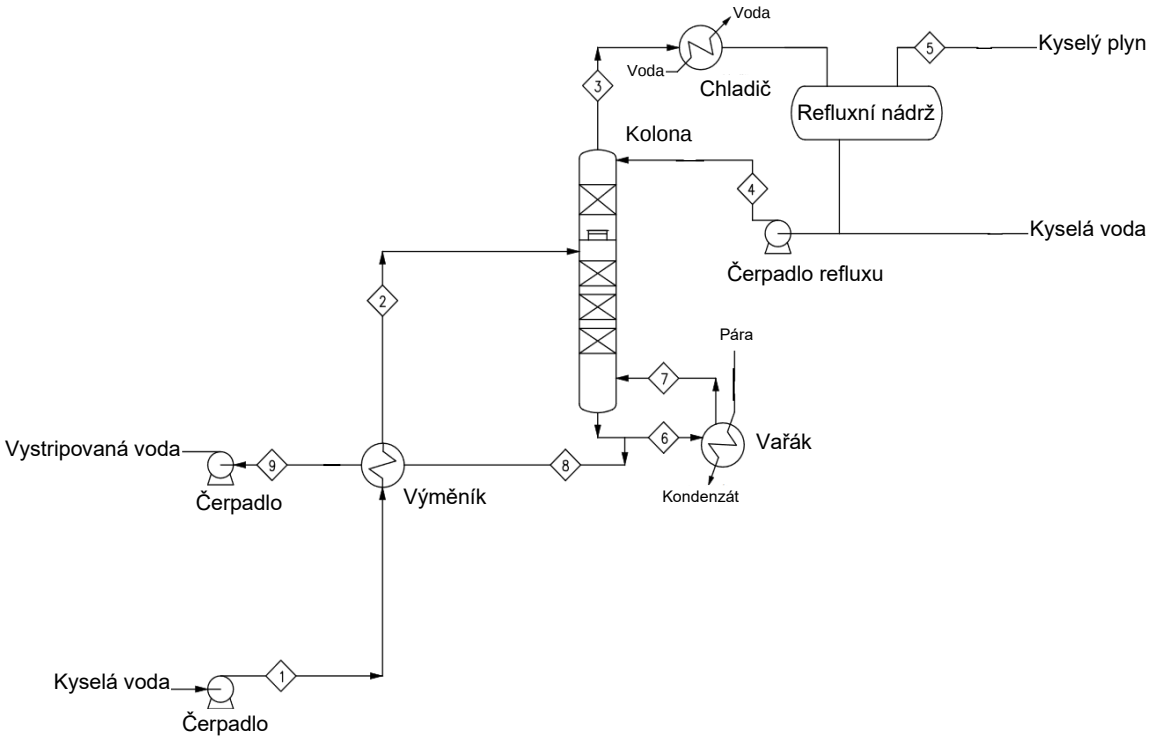
1.2 Nakládání s produkty stripování

Kapalný produkt z procesu stripování odpadních kyselých vod, tj. vystripovaná voda, se obvykle i nadále v rafinérii využívá, nejčastěji jako zdroj vody pro proces odsolování ropy. Tento produkt může být ovšem využíván jako procesní voda při odsolování pouze za splnění stanovených požadavků, týkajících se obsahu zejména sulfanu a amoniaku. Tato podmínka je nutná obzvláště z důvodu rizika vznikající koroze v dalších zařízeních vyskytujících se v provozu.

Plynný produkt (kyselý odpadní plyn) odcházející z procesu stripování bývá nejčastěji využíván buď v jednotkách sloužících k výrobě síry (tzv. Clausovy jednotky) nebo je veden do vhodného spalovacího zařízení a tam termicky zneškodňován. První varianta, výroba síry, bývá dle [6] využívána přednostněji.

2 Technologická zařízení procesu stripování kyselých vod a základní aspekty jejich projektování

Součástí procesu stripování kyselých vod je kromě již zmíněné stripovací kolony několik dalších zařízení a prvků, které umožňují správnou funkci procesu a podílejí se také na základních pracovních parametrech technologie. Tato kapitola bude věnována z obecného pohledu jednotlivým zařízením, jejich parametrům, funkcím a problematice s nimi spojené. Níže uvedené schéma na obrázku 1 znázorňuje jednu z typických možností rozmístění jednotlivých technologických zařízení v procesu a základní vstupní a výstupní proudy procesu.



Obrázek 1 Schéma procesu stripování kyselých vod

2.1 Klíčové zařízení procesu - stripovací kolona

Hlavním úkolem kolony pro stripování kyselých vod je oddělit vodu od nežádoucích látek, které voda obsahuje a dostat tak koncentrace těchto látek ve vystripované vodě na požadované hodnoty. Obvyklý rozsah množství těchto látek vyskytující se na vstupu a výstupu ze stripovacích kolon je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 Typické hodnoty nežádoucích prvků před a po procesu stripování [5]

Nežádoucí látka	Proud vstupující do kolony [ppm]	Proud vystupující z kolony [ppm]
H_2S	300-12 000	<10 (mnohdy až <1)
NH_3	100-8 000	<100 (mnohdy až <30)
FENOL	< 200	< 200

2.1.1 Mechanismus separace NH_3 a H_2S

Úkolem stripovací kolony je oddělit zmíněné nežádoucí látky (zejména NH_3 a H_2S) od zbývající kapalné fáze. K tomu účelu je možné využít jeden z difúzních pochodů, pro nějž je zásadní kontakt plynné a kapalné fáze. Tento pochod se nazývá desorpce a jedná se o děj

opačný k absorpci. Při absorpci dochází k oddělování klíčové složky z plynné fáze, a to díky absorpčnímu ději, tj pohlcování předmětné plynné složky v kapalném rozpouštědle. Desorpce probíhá naopak, a tedy ve smyslu, že dochází k uvolnění plynů z kapaliny. K tomuto procesu se používá desorpční kolona nazývaná též jako stripovací kolona (z angl. *stripping column*). V této koloně se, za účelem předmětné separace kyselých vod, realizuje desorpce jako proces destilace rozpouštědla v proudu desorpčního média (nebo též desorpčního činidla). Tímto desorpčním médiem může být obecně jakýkoliv inertní plyn, ale v případě zpracování odpadních vod je jako nejvhodnější desorpční médium používána obvykle vodní pára. Zásadní výhodou použití vodní páry je, že se od desorbované plynné složky následně jednoduše odděluje po ochlazení kondenzací. [7]

Specifická spotřeba desorpčního média (označíme ji jako „*g*“), jakožto významná charakteristika desorpce, může být definována jako látkové množství čistého desorpčního média potřebné na zpracování takového látkového množství nastřikovaného (absorpčního) roztoku, ve kterém se nachází jednotkové látkové množství čistého absorbentu (tj. čistého rozpouštědla) [7]. Hodnota specifické spotřeby desorpčního média se určí na základě následující rovnice látkové bilance protiproudého desorbéru, jež vychází ze schématu na obrázku 2, přičemž platí, že $Y_2>Y_1$ a $X_2>X_1$:

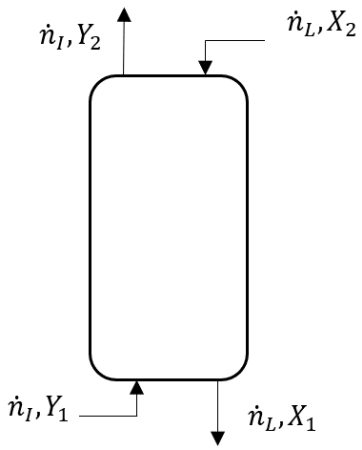
$$\dot{n} = \dot{n}_I(Y_2 - Y_1) = \dot{n}_L(X_2 - X_1) \qquad (2.1)$$

a následně jako podíl

$$g = \frac{\dot{n}_I}{\dot{n}_L} = \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} \qquad (2.2)$$

Význam symbolů v těchto rovnicích je potom tento:

- $\dot{n}$ je ustálený tok látkového množství desorbované složky z kapalné do plynné fáze.
- $\dot{n}_I$ je ustálený tok látkového množství plynného desorpčního média (indiferentní složky *I* v plynné fázi).
- $\dot{n}_L$ je ustálený tok látkového množství čistého kapalného absorbentu (čistého rozpouštědla).
- X_1 a X_2 jsou relativní koncentrace desorbované složky na výstupu a vstupu do desorbéru vyjadřující složení desorbované složky v poměru k čistému kapalnému absorbentu.
- Y_1 a Y_2 jsou relativní koncentrace desorbované složky na vstupu a výstupu z desorbéru vyjadřující složení desorbované složky v poměru k čistému desorpčnímu médiu (je-li desorpčním médiem vodní pára, pak je $Y_1 = 0$).
- g je specifická spotřeba desorpčního média.



Obrázek 2 Znázornění parametrů látkové bilance protiproudého desorbéru [7]

2.1.2 Technologické a realizační možnosti klíčového zařízení

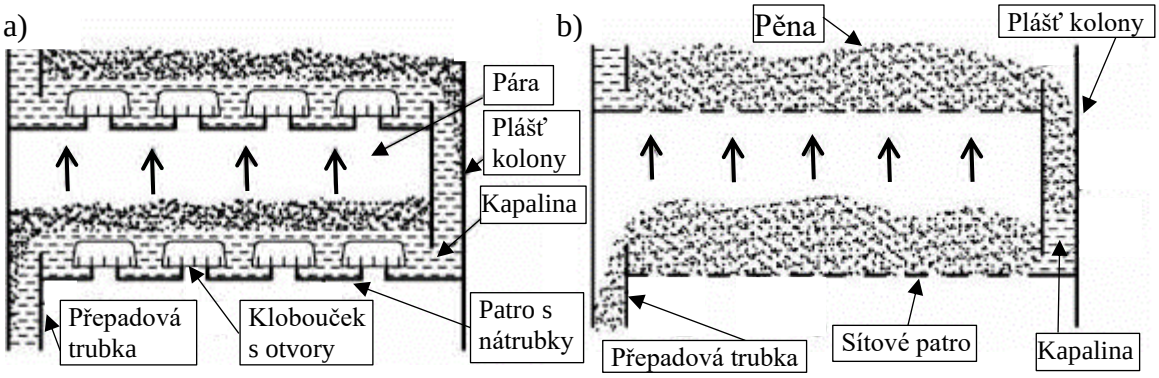
Mezi současné nejobvyklejší technologické řešení klíčového separačního zařízení (viz pro ilustraci na obrázku 3), patří jediná stripovací kolona, do které je přiváděna kyselá voda. Mezi již méně používanou konfiguraci pak patří technologie sestavená z více stripovacích kolon, přičemž každá z kolon je zaměřena na oddělení jiných nežádoucích látek. Výhodou tohoto vícekolonového uspořádání je ovšem získání proudů vedlejších produktů obsahujících pouze danou odstraňovanou látku. Například proud obsahující pouze čpavek může být spalován nebo může být jako surovina prodán. Součástí obou zmíněných technologií stripování jsou však také další zařízení, umožňující například výměnu tepelné energie nebo čerpadla, dopravující danou látku potřebným směrem. [5]

Obrázek 3 Fotografie stripovací kolony [8]

Pozornost v této diplomové práci je zaměřena na první zmíněnou technologii, kdy separační technologické zařízení tvoří jediná stripovací kolona, jíž standardně představuje vertikálně uložená tlaková nádoba (viz obrázek 3). Její vnitřní část je rozdělena na dvě části. První částí je část nad nástřikovým patrem (tj. místem, kde dochází k nástřiku zpracovávaného proudu, v našem případě kyselé vody), jež se nazývá obohacovací částí kolony. Druhou částí je pak část pod nástřikovým patrem, jež se nazývá ochuzovací částí kolony, a to z důvodu nižší koncentrace prchavějších látek. [9]

U těchto kolon, je potřeba při jejich konstrukci brát ohled na důležitý faktor ovlivňující účinnost difuzního procesu v koloně, a to je plocha styku mezi plynnou a kapalnou fází. V průmyslové praxi je možno k dosažení dostatečné velikosti mezifázové plochy použít jedno ze dvou hlavních konstrukčních provedení vnitřku kolon, a to buď kolony patrové nebo kolony výplňové.

V případě patrové kolony jsou charakteristickou a nedílnou součástí kolony samotná patra. Patro zde reprezentuje horizontálně uložená deska s otvory, jež umožňují směrem nahoru průchod páry (parní fáze) a v opačném směru průchod kapaliny (kapalné fáze). Podle konstrukčního provedení otvorů v patře či jejich souvisejících elementů se rozlišuje různá konstrukčních provedení pater [9]. Mezi dvě základní konstrukční provedení, tj. typy, pater pak patří kloboučková patra a patra sítová, jež ilustrativně znázorňuje obrázek 4.



Obrázek 4 Základní typy pater: a) kloboučková patra b) sítová patra [9]

Na druhý konstrukční případ kolon, tj. na výplňové kolony, bude v následující části textu zaměřena poněkud větší pozornost, a to z toho důvodu, že pro proces stripování odpadních vod jsou právě tyto výplňové kolony obvykle využívány. U těchto kolon zajišťuje dostatečnou plochu styku kapalné a plynné fáze použitá výplň kolony. Výplňové kolony se tak liší od patrových kolon především tím, že nemají samotná patra, ale obsahují konkrétní výplň (výpočtově rozdělenou na pomyslné segmenty).

Podle provedení se výplně do kolon obecně rozlišují na orientované (strukturované) a sypané (náhodné) provedení. Pro desorpční kolony užívané v procesech stripování odpadních vod se používají převážně sypané výplně. Mezi nejobvyklejší základní elementy těchto sypaných výplní, vyráběné z keramiky, kovu či plastu, pak patří například Rashigovy či Pallovy kroužky, Berlovo sedlo, sedlo Intalox a další. Některé z těchto základních typů tělísek sypaných výplní jsou znázorněny na následujícím obrázku 5.

Obrázek 5 Ukázka základních typů tělísek sypaných výplní: kovový Rashigův kroužek vlevo a kovový Pallův kroužek vpravo [10]

Výpočet výšky výplňové kolony se liší od výpočtu výšky patrové kolony zejména v zavedené výpočtové veličině, jíž je tzv. výška výplně ekvivalentní teoretickému patru označovaná jako *HETP* (z anglického „*Height Equivalent to a Theoretical Plate*“).

Výška výplňové kolony H se pak dle [10] vypočítá jako příslušná hodnota *HETP* vynásobená počtem teoretických pater N_{TH}, dle následující rovnice 2.3:

$$H = N_{TH}.HETP \quad [m] \tag{2.3}$$

Samotná hodnota *HETP* je závislá zejména na typu a velikosti výplně, viskozitě kapaliny, povrchovému napětí a provozním podmínkám. Dle [10] se tato hodnota u nejnovějších generací výplní přibližně pohybuje pro sypaný (náhodný) typ výplně okolo 0,6 m a pro orientovaný (strukturovaný) typ výplně okolo 0,3 m.

2.2 Potrubí

Pracovní látka je transportována mezi jednotlivými zařízeními v potrubí. Potrubní větev je nejobvykleji tvořená ocelovými bezešvými trubkami kruhového průřezu. Tyto trubky jsou definovány vnitřním a vnějším průměrem a poté samotnou délkou porubí. Častěji se ovšem v technickém prostředí setkáme se specifikací pomocí tzv. DN (z anglického *Diameter Nominal*), což je jmenovitý průměr (světlost) potrubí uváděný v milimetrech. [11]

DN pak tedy označuje přibližný vnitřní průměr potrubí (v [mm]), přičemž konkrétní průměry a tloušťku potrubí určuje norma ČSN EN ISO 6708 (pod starým označením ČSN 13 0015). Tlakově se pak potrubí charakterizuje pomocí PN (z anglického *Pressure Nominal*), což představuje desetinásobek maximálního pracovního tlaku systému v MPa, pro teplotní rozmezí 0 až 200 °C. [12]

2.2.1 Tlakové ztráty potrubí

Výpočet tlakových ztrát proudící látky v potrubí je jedna ze základních a nezbytných operací. Následující část se proto bude věnovat jejich výpočtu, za předpokladu, že v potrubí proudí Newtonovská kapalina. Pro potrubí o délce L a s Darcyho ztrátovým součinitelem tření λ lze popsat vztah mezi tlakovou ztrátou a rychlostí proudění média Darcy-Weisbachovou rovnicí (2.4) [10]:

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho . w^2 . L}{2 . d_h} \tag{2.4}$$

kde d_h je hydraulický průměr potrubí, který je definován jako

$$d_h = 4 \frac{S}{O} \tag{2.5}$$

přičemž S je průtočný průřez potrubí a O je jeho smáčený obvod. Pro kruhový průřez potrubí platí, že jeho hydraulický průměr je roven jeho vnitřnímu průměru $d_h = d$.

K získání součinitele tření je zapotřebí znát hodnotu Reynoldsova čísla, jež se vypočítá pomocí následující rovnice:

$$Re = \frac{w . d_h . \rho}{\eta} \tag{2.6}$$

Podle vypočtené hodnoty Reynoldsova čísla je možno rozlišit charakter proudění pracovní látky v potrubí. Jestliže je hodnota Reynoldsova čísla menší jak 2320, jedná se o proudění laminární.

V takovém případě se Darcyho součinitel tření pracovní látky proudící v potrubí kruhového průřezu získá výpočtem pomocí následující rovnice (2.7):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{2.7}$$

Oblast proudění nacházející se mezi hodnotami Reynoldsova čísla 2320 až cca 4000 se nazývá přechodová oblast kritická (přechodová) za níž následuje oblast turbulentního proudění (Reynoldsova čísla větší než cca 4000). V oblasti turbulentního proudění se pak rozlišuje oblast hydraulicky hladkého potrubí, oblast hydraulicky drsného potrubí a přechodová oblast (mezi potrubím hydraulicky hladkým a drsným). Pro turbulentní proudění v hydraulicky hladkém potrubí, které nabývá hodnot Reynoldsova čísla od 2320 do 10^5, může být dle [10] použit pro výpočet Darcyho součinitele tření Blasiův vztah:

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}} \tag{2.8}$$

Pro přechodovou oblast a oblast hydraulicky drsného potrubí se doporučuje celá řada vztahů od různých autorů. Například dle [10] se pro tyto dvě oblasti doporučuje pro výpočet Darcyho součinitele tření použít Coolebrook-Whiteův vztah z následující rovnice (2.9), v níž je symbolem ε označena absolutní drsnost vnitřního povrchu potrubí.

$$\lambda = \left[-2.log\left(\frac{2{,}51}{Re.\sqrt{\lambda}} + \frac{0{,}27}{d_h/\varepsilon}\right)\right]^{-2} \tag{2.9}$$

Oblast platnosti tohoto vztahu je dle [10] pro Reynoldsovo číslo od 4.10^3 až do 10^6.

2.2.2 Teplotní dilatace potrubí a uložení potrubí

Potrubní větve a procesní zařízení jsou často namáhány teplotní dilatací, která je způsobována vlivem výraznější změny provozní nebo okolní teploty. Teplotní dilatace je jedním z faktorů, na který je potřeba brát ohled už při počátku návrhu trasy potrubí. Jedná se o děj, při kterém dochází ke změně délky potrubí. Prodloužení nebo naopak zkrácení trubky vzniká po změně teploty média uvnitř potrubí nebo změně teploty okolí. Důležitou roli hraje při dilataci potrubí materiál, ze kterého je potrubí vyrobeno, jelikož každý materiál má odlišnou hodnotu součinitele teplotní délkové roztažnosti. Hodnotu prodloužení či zkrácení lze snadno vypočítat pomocí následující rovnice (2.10). Je zapotřebí znát hodnotu součinitele teplotní délkové roztažnosti materiálu, úvodní (počáteční) délku potrubí a změnu teploty. [13]

$$\Delta L = L \,.\, \alpha \,.\, \Delta T \tag{2.10}$$

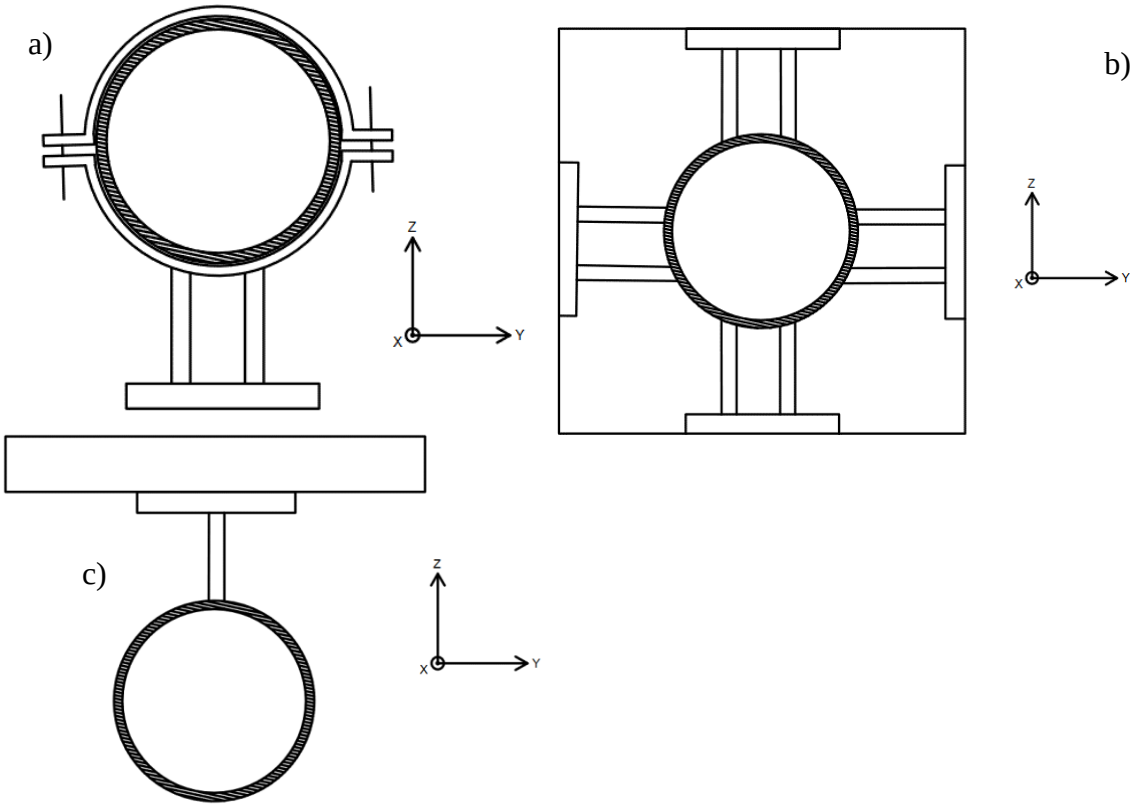
Při projektování potrubí je zapotřebí brát zřetel na tento jev zejména u potrubních tras, které jsou vystaveny vysokým provozním teplotám. Vlivem náběhu provozu z okolní teploty zařízení na pracovní teplotu zařízení může docházet k výrazným změnám délky potrubí a zařízení. Stejná situace může být způsobena odstávkou provozu, či údržbou zařízení. Cílem je tedy navrhnout vhodnou trasu potrubí, u které by nedošlo vlivem teplotní dilatace k nadměrnému namáhání. Toto namáhání může způsobovat poškození potrubí až úplné přerušení trasy a výtoku pracovního média do okolí. V případě prasknutí potrubí s nebezpečnou pracovní látkou může dojít k ohrožení celého provozu a vážnému poranění osob pohybujících se v okolí takové potrubní trasy.

K zamezení takovýchto stavů se používají kompenzátory napětí, jejichž účelem je snížit napětí, vnikající v potrubí. Tyto kompenzátory můžeme rozdělit do dvou skupin - tzv. tvarové a osové kompenzátory.

Tvarové kompenzátory fungují na principu vedení potrubí způsoby napomáhajícími vzniku kompenzačních útvarů (ohybů), které pomáhají snížit vznikající napětí a vyrovnávají dilatací svou vlastní pružností. Tyto kompenzační útvary obvykle připomínají písmena U, S, Z a P.

Druhou skupinou jsou osové kompenzátory, jejichž funkce spočívá v natahování, zkracování či jiném druhu ohýbání pomocí pružného prvku, který je součástí samotného potrubí. Mezi nejběžněji používané osové kompenzátory patří vlnový, pryžový a ucpávkový kompenzátor. [14]

S kompenzací teplotní dilatace úzce souvisí problematika samotného uložení potrubí. Pro správnou kompenzaci teplotní dilatace je zapotřebí zvolit vhodné vedení a uložení potrubí. Potrubí může být uchyceno například pevným bodem. Pevný bod znamená, že není umožněn pohyb potrubí v žádné z os X, Y nebo Z. Tento způsob uložení zastavuje jakýkoliv pohyb potrubí a přenáší zatížení na konstrukci, ke které je potrubí upevněno. Dalším způsobem uložení je osové vedení. Tento způsob je využíván zejména v těsné blízkosti osových kompenzátorů a přenáší pohyb pouze v jediném směru, a to v ose X. Mezi tyto základní typy uložení patří také uložení umožňující neomezený pohyb potrubí. Závěs se využívá zejména v situacích, kdy je vyžadován pohyb potrubí ve všech třech osách X, Y a Z, kromě konkrétního směru osy, ve kterém působí vlastní tíha potrubí. Jednotlivé způsoby uložení blíže popisuje obrázek 6. [15]



Obrázek 6 Způsoby uložení potrubí a) pevný bod b) osové vedení c) závěs [15]

Volbou vhodného uložení se zabývá projektant, přičemž vychází z výsledků analýzy potrubní trasy. I přes možnost návrhu vhodného uložení (typ uložení a rozteče jednotlivých podpor) softwarem existuje několik následujících obecných doporučení, které by měl projektant znát. Především je potřeba mít přehled o možných způsobech uložení potrubí a jejich přenosu zatížení. Konkrétní způsob uložení potrubí (tj. zda je například vhodnější závěs či podpora) následně volit dle umístění potrubí a okolní konstrukce. Na základě vlivu tření brát ohled na volbu závěsu či podpěry, přičemž u podpěr je například doporučováno aplikování kluzné desky

z PTFE či základové desky z korozivzdorné oceli. Podpěry používat v místech, kde se nachází podlaha či ocelová konstrukce pod potrubím přibližně ve vzdálenosti $30 \cdot \sqrt{DN}$ a nižší. V případech, kdy je tato vzdálenost vyšší se doporučuje použít pod podpěrou sloupek (tj. podložit podpěru sloupkem). Potrubí upevněné závěsem musí splňovat podchozí výšku 2,2 m + možný posuv směrem dolů vlivem dilatace. Povrch izolace potrubí a základna podpěry by měly být od sebe vzdáleny přibližně 30 až 50 mm. Podpěry se doporučuje používat v místech, kde se nachází ruční armatury. Výškově seřiditelné podpěry se doporučuje používat na potrubních mostech. Dále se tyto výškově seřiditelné podpěry doporučuje používat jako první podpěry za výměníky, nádržemi a čerpadly. [15]

Po volbě adekvátního způsobu uložení potrubí je zapotřebí také zvolit rozteče uložení, tj. vzdálenost mezi jednotlivými podpěrami. Při návrhu je nutné brát ohled na bezpečnost provozu, aby potrubí nebylo zbytečně namáháno vlastní váhou, ale taktéž na stránku ekonomickou, která vyžaduje použití optimálních roztečí podpěr, které budou vyhovující z finančního hlediska pro investora a potrubní větev tak nebude obsahovat nadbytečné množství podpěr.

Pro získání přibližné hodnoty rozteče uložení L_R [mm] je možné použít výpočtový vztah či doporučené hodnoty. Obě varianty připadají v úvahu pouze pokud se na potrubní větvi nenachází armatura, příruba a pokud je potrubí rovné. U výpočtu přibližné hodnoty rozteče uložení je možné vycházet z následující rovnice (2.11) [16]:

$$L_R = 400 \,.\sqrt{DN} \tag{2.11}$$

Další variantou jsou doporučené maximální hodnoty roztečí mezi podporami. Tyto hodnoty uvádí tabulka 4.

Tabulka 4 Doporučené hodnoty roztečí [17]

Jmenovitý průměr potrubí [mm]	**Maximální doporučená rozteč mezi podporami [m]**	
	Kapalné médium	Plynné médium
25	2,1	2,7
50	3,0	4,0
80	3,7	4,6
100	4,3	5,2
150	5,2	6,4
200	5,8	7,3
300	7,0	9,1
400	8,2	10,7
500	9,1	11,9

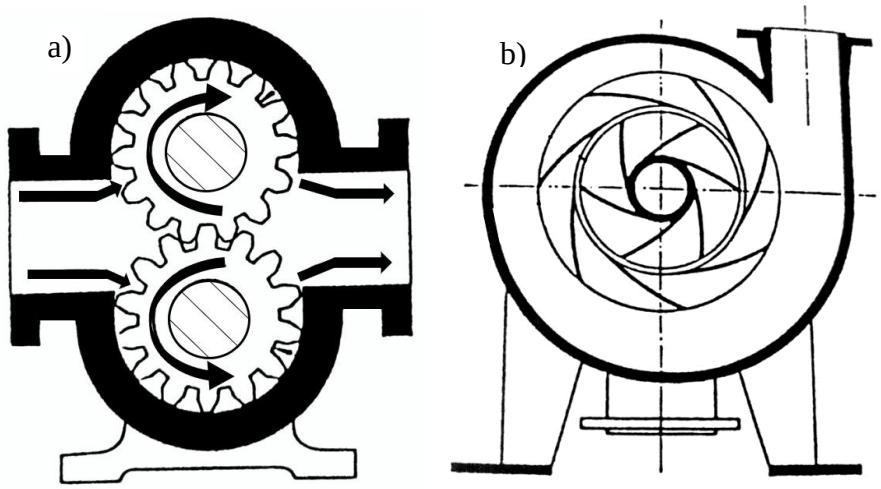
2.3 Čerpadla

Nedílnou součástí procesu stripování jsou čerpadla, které slouží k dopravě pracovní látky na potřebné místo, zrychlení průtokové rychlosti média a také k překonání určitého výškového převýšení, změny tlaků mezi úseky a tlakové ztráty. V případě procesu stripování kyselých vod v konfiguraci s jednou stripovací kolonou (viz obrázek 1 výše), je zapotřebí čerpadlo kyselé vody, čerpadlo vystripované vody a refluxní čerpadlo.

Vzhledem k odlišné chemické povaze čerpaných látek, nárokům na požadovaný tlak na výstupu z čerpadla a mnohdy velkému rozmezí průtokového množství látky, neexistuje univerzálně vyhovující čerpadlo, ale je nutno vhodné čerpadlo vybrat z několik vyráběných typů. Při výběru vhodného typu čerpadla je zapotřebí brát v potaz zmiňovaný průtok dané pracovní látky. Ten má především vliv na velikost daného čerpadla. V některých případech může být zapotřebí zvážit variantu zapojení více čerpadel za sebou, pokud by jedno nebylo dostačující. Dále hraje roli při volbě čerpadla potřebná energie, kterou musí čerpadlo látce dodat. Tato dodaná energie má za následek zvýšení tlakové a potenciální energie mezi místy nasání kapaliny a bodem, kam je látka čerpána (dopravena). Mezi následné důležité faktory při volbě čerpadla potom patří vlastnosti čerpané látky (hustota, viskozita) a volba materiálu čerpadla (ovlivňující korozívnost). V poslední řadě také investiční náklady a způsob provozu čerpadla a s tím spojené náklady na údržbu zařízení. Způsob provozu čerpadla může být obecně klasifikován jako periodický provoz či kontinuální provoz. [18]

Čerpadla se rozdělují do několika základních skupin, a to zejména na odstředivá, objemová a ostatní méně využívaná, jako jsou například proudová, mamutová, zdvižná, pístová a zubová. Odstředivá čerpadla fungují na principu proudění kapaliny ze středu rotoru čerpadla, který se velmi rychle otáčí. Lopatky rotoru jsou natočené a při proudění kapalina zrychluje, nabírá vysokou rychlost a vystupuje na obvodu rotoru. Zatímco v tomto případě dochází ke změně energie na kinetickou a poté až na tlakovou, u objemového čerpadla nastává změna z dodané mechanické energie rovnou na tlakovou energii. Píst nebo lopatky, jakožto pracovní plocha, svým působením na kapalinu ve směru normály přímo zvětšují tlakovou energii v kapalině. [18]

Na následujícím obrázku 7 jsou schematicky znázorněny dva nejčastější užívané typy čerpadel (zubové a odstředivé čerpadlo).

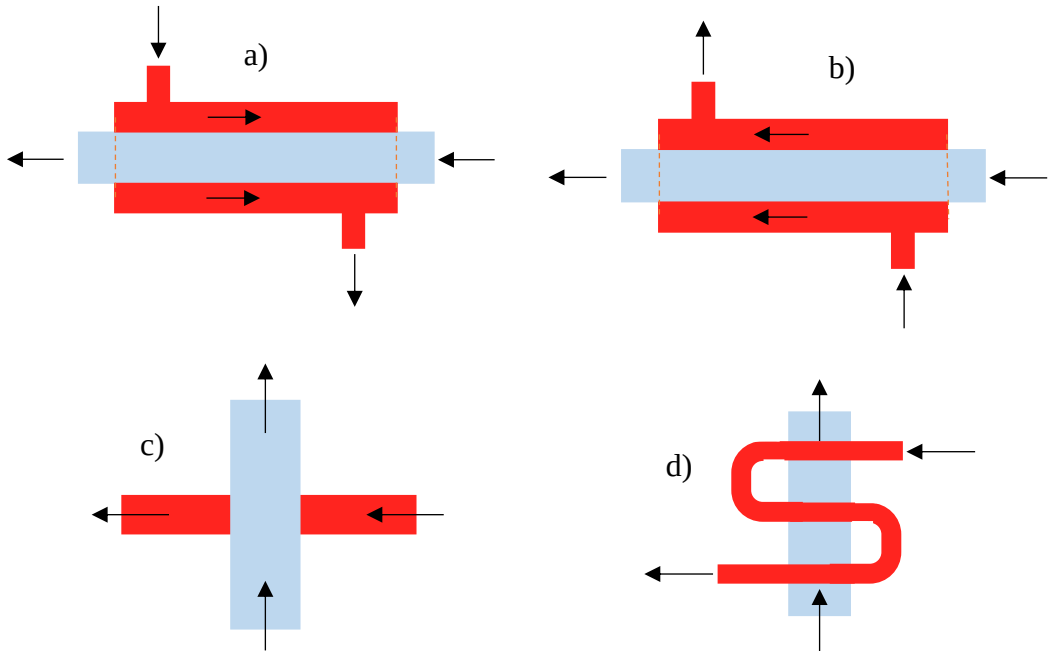


Obrázek 7 Schéma a) zubového (objemového) a b) odstředivého čerpadla [18]

2.4 Zařízení na výměnu tepla

Mezi základní zařízení, sloužící k výměně tepelné energie v procesu stripování kyselých vod patří reboiler, kondenzátor a výměník tepla pro předehřev nástřiku (viz obrázek 1 uvedený výše), přičemž všechna tato zařízení na výměnu tepla jsou tzv. rekuperačního typu.

Hlavním úkolem jakéhokoliv rekuperačního výměníku tepla je zajistit předání potřebného množství tepelné energie z teplejší pracovní látky do chladnější pracovní látky, přičemž v něm nedochází ke vzájemnému promíchávání pracovních látek, jelikož jsou v rekuperačním výměníku tepla od sebe odděleny pevnou stěnou (tzv. plochou výměny tepla), skrze kterou dochází k samotné výměně tepla. [10]



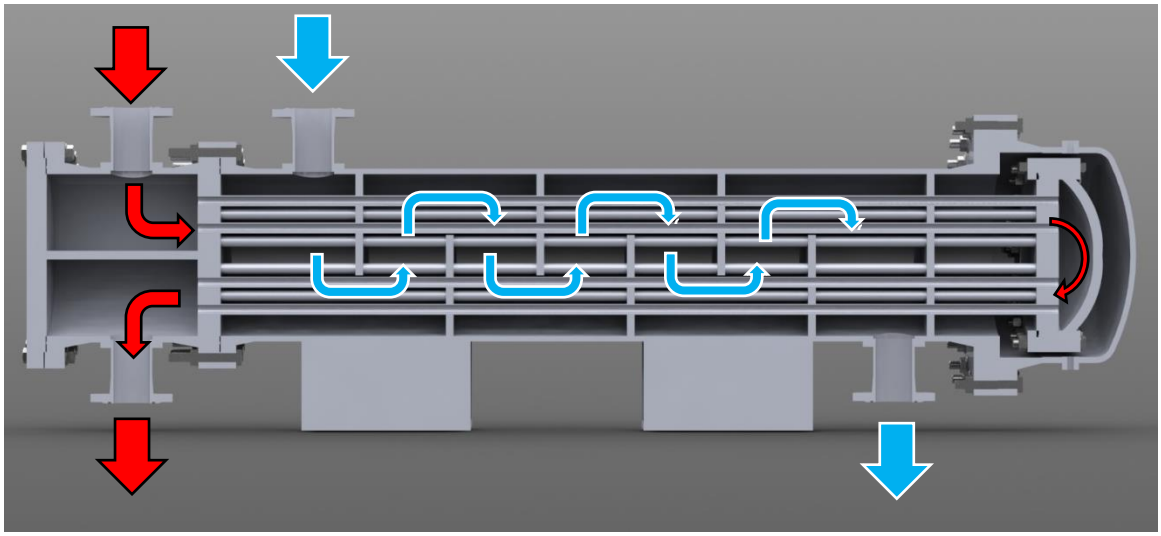
Obrázek 8 Nejčastější způsoby toku pracovních látek ve výměníku tepla: a) protiproudé; b) souproudé; c) křížové; d) kombinované [19]

Existuje několik základních konstrukčních řešení rekuperačních výměníků tepla, které se od sebe dle [19] navzájem odlišují provedením plochy výměny tepla, provozními vlastnostmi, způsobem toku pracovních látek a nároky na údržbu zařízení. Zmíněným způsobem toku pracovních látek je přitom myšleno, zda pracovní látky proudí zařízením na výměnu tepla v protiproudé, souproudé, křížové či kombinované konfiguraci, jak je schematicky znázorněno na obrázku 8.

Mezi základní typy výměníků tepla obecně patří výměníky trubkové a deskové, z nichž budou v následujících odstavcích blíže zmíněny pouze ty vybrané konstrukční typy, jež se v průmyslovém procesu stripování kyselých vod nejčastěji uplatňují.

2.4.1 Trubkový výměník tepla se segmentovými přepážkami

Základní konstrukční části trubkového výměníku tepla se segmentovými přepážkami tvoří plášť, což je v podstatě pouze horizontální tlaková nádoba, trubky nacházejících se uvnitř pláště (a fixované v tzv. trubkovnicích), segmentové přepážky, přední a zadní komora a hrdla. Jedná se o typ výměníku zvládající vysoký rozsah pracovních teplot a tlaků obou pracovních látek a vyznačující se mimořádně vysokou variabilitou svého konstrukčního provedení. Jedno z jeho typických konstrukčních provedení (s tzv. plovoucí hlavou) včetně naznačení směru proudění obou pracovních látek je zobrazeno v řezu na obrázku 9. Trubkový výměník tepla se segmentovými přepážkami se v procesu stripování kyselých vod (viz obrázek 2 uvedený výše) využívá typicky jako reboiler a kondenzátor a často i jako výměník pro předehřev nástřiku.



Obrázek 9 Podélný řez trubkovým výměníkem tepla se segmentovými přepážkami v provedení s plovoucí hlavou, s vyznačeným směrem toku pracovních látek uvnitř (obrázek autora)

2.4.2 Spirálový deskový výměník tepla

Spirálový deskový výměník tepla je specifickým konstrukčním typem spadajícím do kategorie deskových výměníků tepla, do níž dále patří deskové výměníky s hladkými deskami či deskové výměníky s profilovanými deskami. Spirálový deskový výměník (jemuž bude věnována detailní pozornost v kapitole 4.4.1) je tvořen z hladkých spirálově svinutých desek a demontovatelných fixačních vík opatřených hrdly. Proudění pracovních látek je v tomto výměníku tepla ideálně protiproudé, přičemž výrazná odstředivá složka působící na obě proudící pracovní látky přispívá k samočistící schopnosti výměníku. Z tohoto důvodu se spirálový deskový výměník tepla často s výhodou využívá v procesu stripování kyselých vod jako výměník pro předehřev nástřiku.

2.4.3 Zanášení výměníků tepla

Při návrhu výměníků tepla je zapotřebí uvažovat s reálným zanášením plochy výměny tepla nečistotami obsaženými v obou pracovních látkách, které probíhá při provozu výměníku. V procesu stripování kyselých vod se jedná o usazení vrstvy nečistot způsobujících zvýšení hydraulického odporu i odporu vůči přenosu, resp. prostupu tepla. K nárůstu hydraulického odporu dochází díky zmenšení průtočného průřezu, zatímco zvýšení odporu vůči přenosu tepla se projevuje ve formě zvětšení potřebné plochy výměny tepla (což vede, při daném průřezu kanálu, ke zvětšení jeho délky).

Tloušťka vzniklé usazené vrstvy a její schopnost zhoršovat prostup tepla závisí na několika faktorech. Mezi ně patří zejména délka doby provozu zařízení, rychlost proudění pracovní látky a její vlastnosti a provedení (tj. drsnost) povrchu. I přesto, že byla již provedena spousta výzkumů zabývajících se touto problematikou, stále nelze spolehlivě a přesně určit rychlost tvorby usazované vrstvy vznikající na teplosměnných plochách a její tepelný odpor.

Vliv zanášení pracovních látek se tak při návrhu výměníků tepla stále standardně zohledňuje ve výpočtu jeho součinitele prostupu tepla pomocí tzv. součinitele zanášení R_Z charakteristického pro danou pracovní látku.

Například výpočet součinitele prostupu tepla pro výše zmíněný trubkový výměník tepla se segmentovými přepážkami, jež uvažuje zanášení plochy výměny tepla oběma pracovními

látkami (tj. jejich součiniteli zanášení), se provádí na základě následující rovnice (2.12), přičemž R_{Z1}a R_{Z2} jsou oba zmíněné součinitele zanášení [18]:

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{d_1}.\left(\frac{1}{\alpha_1} + R_{Z1}\right) + \frac{d_2}{2.\lambda_t}.ln\frac{d_2}{d_1} + \left(\frac{1}{\alpha_2} + R_{Z2}\right)} \qquad (2.12)$$

Význam ostatních symbolů v rovnici 2.12 je potom následující:

- d_1 [m] je vnitřní průměr trubky svazku
- d_2 [m] je vnější průměr trubky svazku
- λ_t [W·m^{-1}·K^{-1}] je měrná tepelná vodivost materiálu potrubí
- α_1 [W·m^{-2}·K^{-1}] je součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru
- α_2 [W·m^{-2}·K^{-1}] je součinitel přestupu tepla v trubkách

Charakteristické hodnoty součinitelů zanášení lze pro jednotlivé typy výměníků a pracovních látek nalézt v odborné literatuře či v projekčních doporučeních. Pro ilustraci jsou v následující tabulce 5 uvedeny příklady hodnot součinitelů zanášení doporučovaných literaturou [10]:

Tabulka 5 Doporučované hodnoty součinitelů zanášení pro vybrané pracovní látky dle [10]

Pracovní látka	**Součinitel zanášení [m^2.K.W^{-1}]**
Vodní pára	100.10^{-6}
Produkty opouštějící horní část destilační kolony	200.10^{-6}
Chladící voda	300.10^{-6} – 400.10^{-6}
Kalná voda	450.10^{-6} – 600.10^{-6}

Při návrhu konkrétního výměníku tepla je tedy zapotřebí zvážit vhodnost zvoleného typu výměníku z pohledu zanášení a provést rozvahu, zda a jakým způsobem bude třeba dotyčný výměník čistit od usazenin. Obecně je čistění možné provádět mechanicky, anebo chemicky, přičemž mechanické čištění obnáší demontáž příslušných částí výměníku. [10]

3 Zadání vybraných projekčních činností

Projekční organizací bylo formulováno zadání vybraných projekčních činností, jež mají být v rámci této diplomové práce provedeny pro konkrétní projektovaný proces stripování kyselé vody. Zadání obsahuje vybrané úkoly spadající jak do oblasti řešení vlastní technologie předmětného procesu, tak do oblasti jeho konstrukčního zpracování a technické dokumentace. Jednotlivé úkoly proto budou nyní přehledně představeny.

3.1 Činnosti z oblasti technologie procesu

Vybrané úkoly spadající do oblasti technologie předmětného procesu jsou následující:

- Provést simulační výpočet procesu stripování kyselých vod pro zadanou kapacitu a požadované provozní podmínky pomocí softwaru CHEMCAD.
- Se zmíněnou softwarovou podporou také výpočtově ověřit technologickou funkci stripovací kolony o zadané geometrii a provést návrhové výpočty kondenzátoru, reboileru a výměníku pro předehřev nástřiku – u nichž je předepsán požadovaný konstrukční typ (provedení), pracovní látky a provozní omezení (dovolené tlakové ztráty pracovních látek).
- Doložit výsledky provedených činností ve formě základních výpočtových reportů (protokolů) a zpracovat datové listy (angl. *Datasheets*) předmětných zařízení.

K výše zmíněným činnostem je na tomto místě vhodné uvést některé zásadnější doplňující zadané informace, jež konkrétněji přiblíží aspekty jejich řešení.

Předně je třeba uvést, že celkové technologické provedení projektovaného procesu stripování kyselé vody, pro který mají být zmíněné úkoly řešeny, je předepsáno a je totožné se znázorněním uvedeným výše na obrázku 1. Primárním úkolem projektovaného procesu je přitom snížení obsahu a H_2S tak, aby ve vystripované vodě odcházející z procesu byl obsah H_2S nejvýše 5 ppm (což odpovídá 0,0005 % hm. H_2S v proudu vystripované vody).

Průtočné množství a složení zpracovávané kyselé vody jsou přitom zadány, stejně jako požadované provozní podmínky (tj. tlaky, teploty) v zásadních místech procesní technologie. Dále jsou předepsány typy a parametry pracovních látek, jež mají být použity jako chladicí a ohřevná média pro kondenzátor a reboiler stripovací kolony.

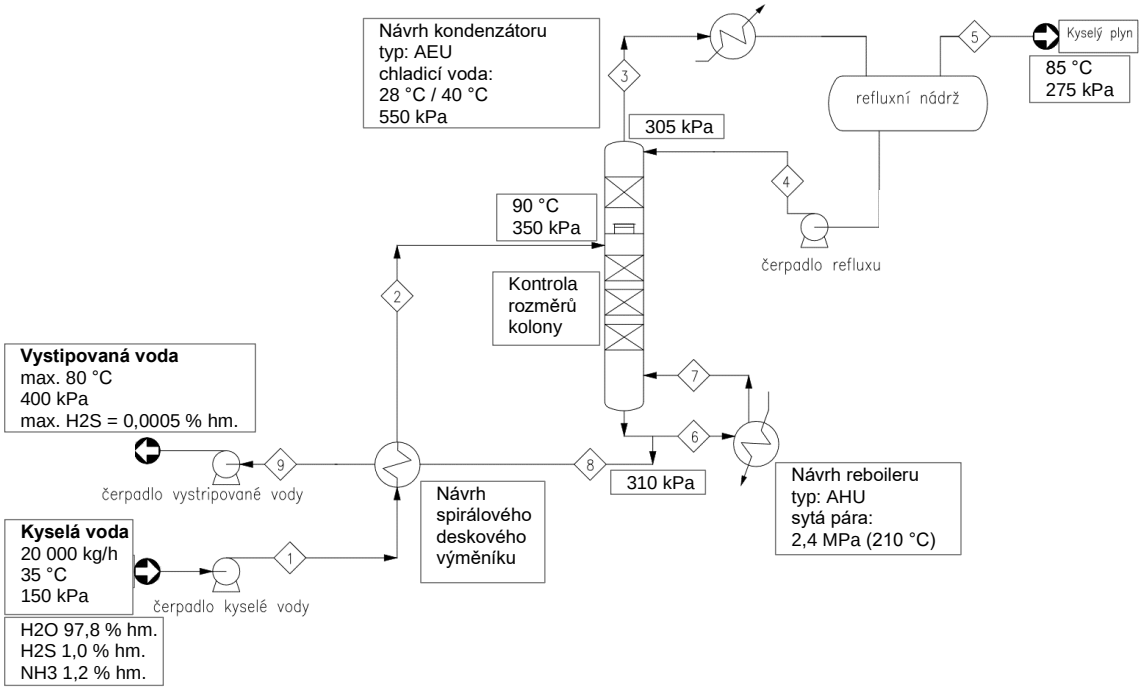
V případě stripovací kolony je předepsán průměr kolony a výška a typ náplně a je požadován kontrolní výpočet funkčnosti kolony.

V případě kondenzátoru, reboileru a výměníku pro předehřev nástřiku je pro jejich návrh předepsáno jakého konstrukčního typu (provedení) mají tato zařízení být a předepsány jejich provozní omezení (tj. předepsány dovolené tlakové ztráty jejich pracovních látek).

Konkrétně je zde například požadováno, aby výměník pro předehřev nástřiku byl navržen jako spirálový deskový výměník tepla. Oproti tomu reboiler stripovací kolony má být navržen jako trubkový výměník tepla v provedení dle TEMA klasifikace AHU. A kondenzátor hlavového proudu je pak technologicky specifikován jako parciální kondenzátor a má být navržen jako trubkový výměník tepla v provedení dle TEMA klasifikace AEU (přičemž teplota ohřáté chladicí vody na výstupu z kondenzátoru je předepsána na maximálně 40 °C a tlaková ztráta chladicí vody v kondenzátoru nesmí přesáhnout 35 kPa), atd.

Je rovněž třeba zdůraznit, že kromě všech potřebných konstrukčních a provozních požadavků na jednotlivá zařízení, byly v zadání specifikovány také požadavky týkající se konstrukčních materiálů jednotlivých aparátů.

Pro celkové zjednodušení výkladu a popisu všech zadaných či předepsaných parametrů, jsou souhrnně všechny hlavní požadavky na technologii a zařízení projektovaného procesu, jež se týkají výše zmíněných zadaných technologicky zaměřených činností, přehledně znázorněny na následujícím obrázku 10.



Obrázek 10 Technologické schéma zadaného procesu s hlavními parametry a požadavky

Veškeré další konkrétně zadané či předepsané parametry a detaily, například pro požadované výpočty jednotlivých procesních zařízení apod., budou uvedeny v této práci později, v příslušných částech popisujících jejich konkrétní řešení.

3.2 Činnosti z oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace procesu

Vybrané úkoly spadající do oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace předmětného procesu, jsou následující:

- Na základě výsledků z předchozích (technologických) činností sestavit schéma PFD (z angl. *Process Flow Diagram*) a vypracovat výkres P&ID (z angl. *Piping and Instrumentation Diagram*) s 3D modelem daného procesu - za pomoci softwaru AutoCad Plant3D.
- Za pomoci softwaru AutoCad Plant3D z vytvořeného 3D modelu procesu zpracovat projekční výkresovou dokumentaci procesu sestávající z dispozičních a izometrických výkresů.
- Seznámit se s obsluhou softwaru AutoPIPE a s jeho pomocí provést kontrolní analýzu namáhání vybrané potrubní větve.

Také k těmto zadaným činnostem budou nyní stručně uvedeny podstatné doplňující vstupní informace pro jejich řešení.

V návaznosti na výsledky z technologických činností je prvním úkolem v oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace předmětného procesu sestavit proudové schéma procesu (tzv. PFD schéma), sloužící k rozvržení aparátů, a především specifikaci vlastností a parametrů jednotlivých procesních proudů. Následně je požadováno vypracovat výkres P&ID a 3D model řešeného procesu s pomocí softwaru AutoCad Plant3D.

Přitom je požadováno, aby součástí výkresu P&ID bylo příslušné označení (s rozměry či jinými zásadními parametry) a zakreslení vedení potrubních tras, schématické značení veškerých aparátů a návrh měření a regulace.

Pro vlastní tvorbu 3D modelu procesu je diplomantovi ze strany projekční organizace poskytnuta již vytvořená podpůrná ocelová konstrukce, jelikož zadávající projekční organizace usoudila že vytvoření ocelové konstrukce není pro účel této práce zásadní či nezbytné – ba naopak, její poskytnutí může diplomantovi pomoci při vizualizaci a prezentování jím dosažených výsledků a pro lepší představu o možnostech zařazení jednotlivých jím navržených zařízení v rámci okolí a prostoru.

Vytvoření 3D modelů jednotlivých procesních zařízení a potrubí pak už je požadavkem a jedním z důležitých úkolů diplomové práce v této oblasti práce. Následně bylo zadáno vygenerování výkresové dokumentace dispozičních a izometrických výkresů, vycházejících z vytvořeného 3D modelu. V poslední řadě bylo požadováno provést kontrolní analýzu namáhání potrubní větve, která náleží dle obrázku 11 proudu 7. Jedná se o větev zatíženou zejména vyšší teplotou média, kterým je v tomto případě pára. K provedení této analýzy poskytla projekční organizace software AutoPIPE od společnosti Bentley.

4 Simulace procesu a výpočty procesních zařízení

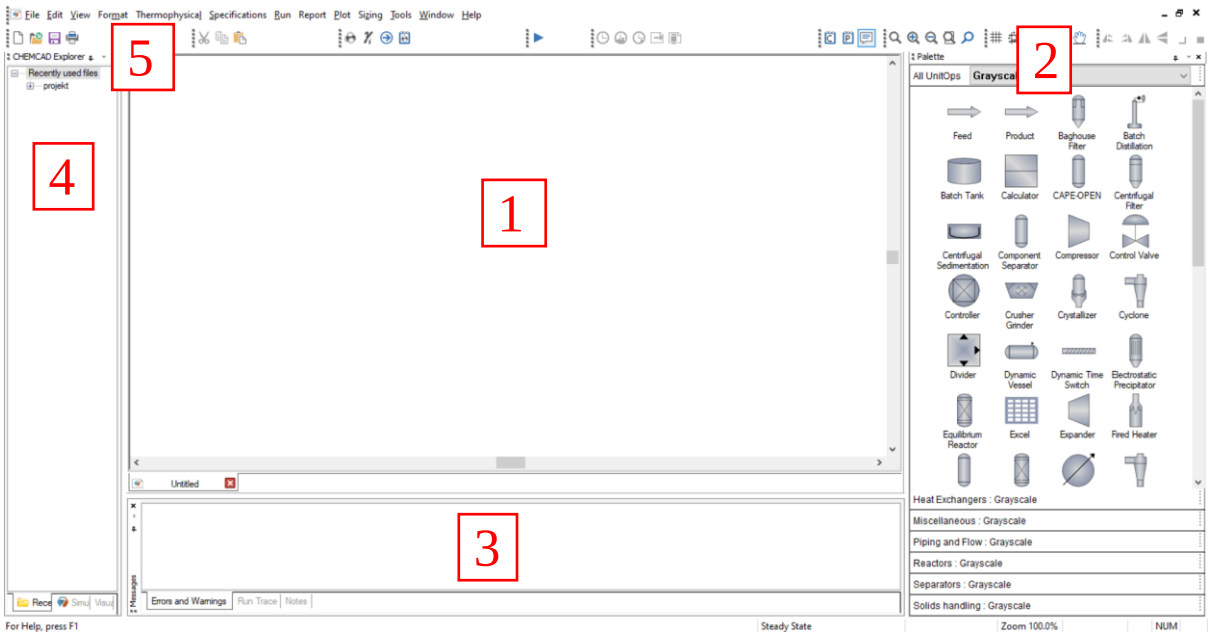
4.1 Bilance procesu v CHEMCADU

V této části diplomové práce bude popsáno provedení simulace procesu stripování kyselé vody s podporou zvoleného softwaru CHEMCAD. Tento software se svou rozsáhlou databází fyzikálně chemických vlastností látek je celosvětově užívaný v chemickém a procesním inženýrství jako nástroj pro simulace a optimalizace procesů.

Software CHEMCAD je také rovněž využíván k ověřování, resp. monitorování funkce existujících procesů a pro rozměrový návrh či kontrolu funkce jednotlivých technologických zařízení, zejména vybraných konstrukčních typů výměníků tepla, kolon a potrubí, a také k bilancování komplexních procesních celků. CHEMCAD je schopen modelovat kontinuální, semikontinuální i dávkové procesy a může simulovat jak ustálené, tak dynamické systémy. [20]

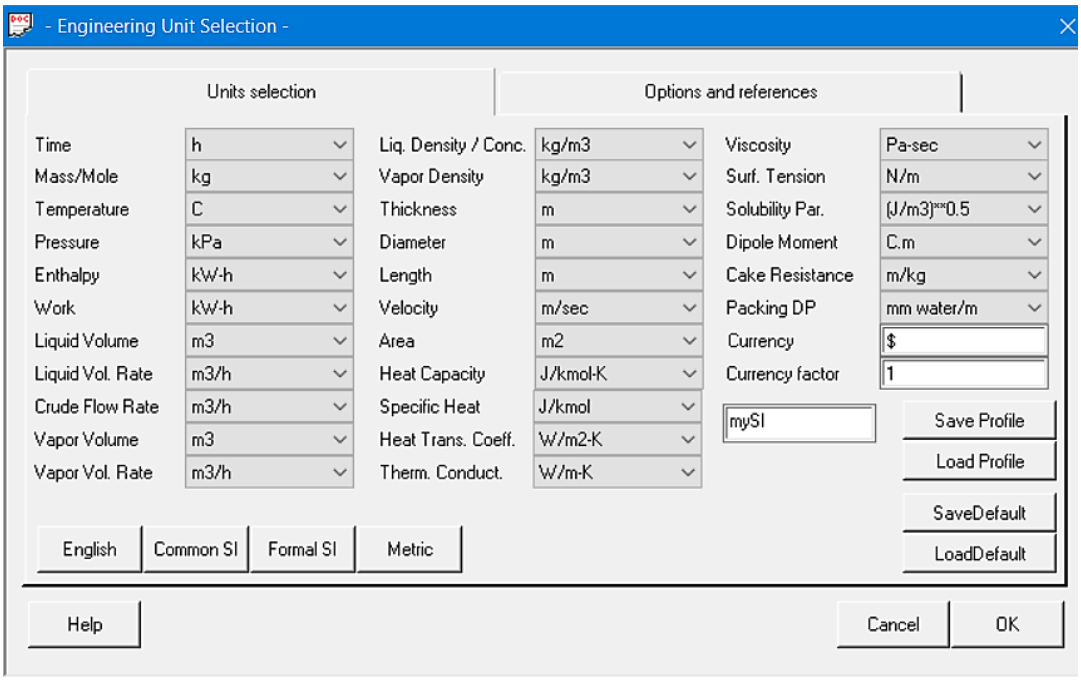
4.1.1 Úvodní představení a nastavení softwaru

Po spuštění softwaru CHEMCAD se objeví úvodní plocha zobrazená na obrázku 11. Na ní je možné uprostřed spatřit velkou bílou pracovní plochu (1), dále se na pravé straně nachází paleta nástrojů (2), dole panel s upozorněními a dalšími zprávami (3), vlevo je CHEMCAD prohlížeč (4) a nahoře se nachází horní lišta základního menu (5), umožňující například uložení stávajícího projektu nebo třeba spuštění simulace a další nezbytné úkony.



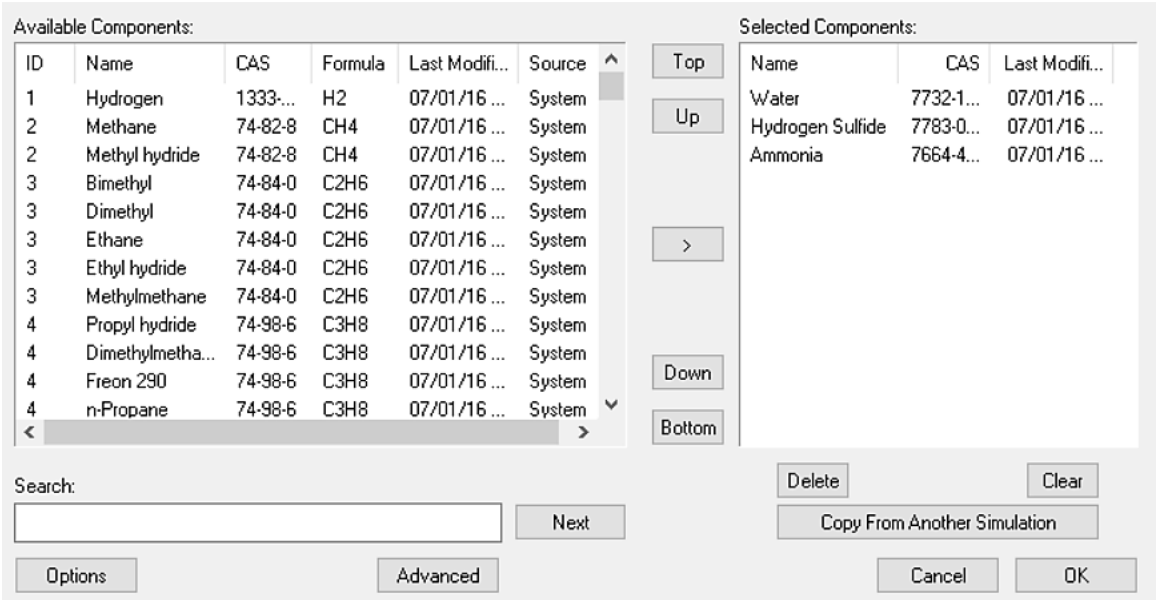
Obrázek 11 Prostředí softwaru CHEMCAD

Do pracovní plochy je potřeba připravit výpočtové schéma počítaného procesu (systému) za pomoci jednotlivých jednotkových operací, resp. zařízení, nacházejících se v paletě nástrojů. Ta nabízí ve formě příslušných ikon různé zástupce jednotkových operací, resp. zařízení, zejména k výměně tepelné energie, transportu pracovní látky a separaci látek. Před sestavením výpočtového schématu je ale ještě zapotřebí nastavit a sjednotit inženýrské jednotky, ve kterých bude celá simulace provedena. Toto nastavení se provede v horní liště kliknutím na možnost *Format* > *Engineering Units*. Následně je třeba zvolit požadované jednotky, ve kterých bude simulace provedena. Použité nastavení jednotek je na obrázku 12.



Obrázek 12 Zvolené inženýrské jednotky

Následně je zapotřebí vybrat dílčí složky (komponenty) pracovních látek, jež se účastní procesu, způsobem jako ukazuje obrázek 13. K tomu je zapotřebí kliknout opět na horní lištu, na možnost *Thermophysical* > *Select Components*. Pro řešený proces stripování kyselé vody jsou vybrány složky: voda, sulfan a amoniak jakožto hlavní komponenty řešeného procesu.

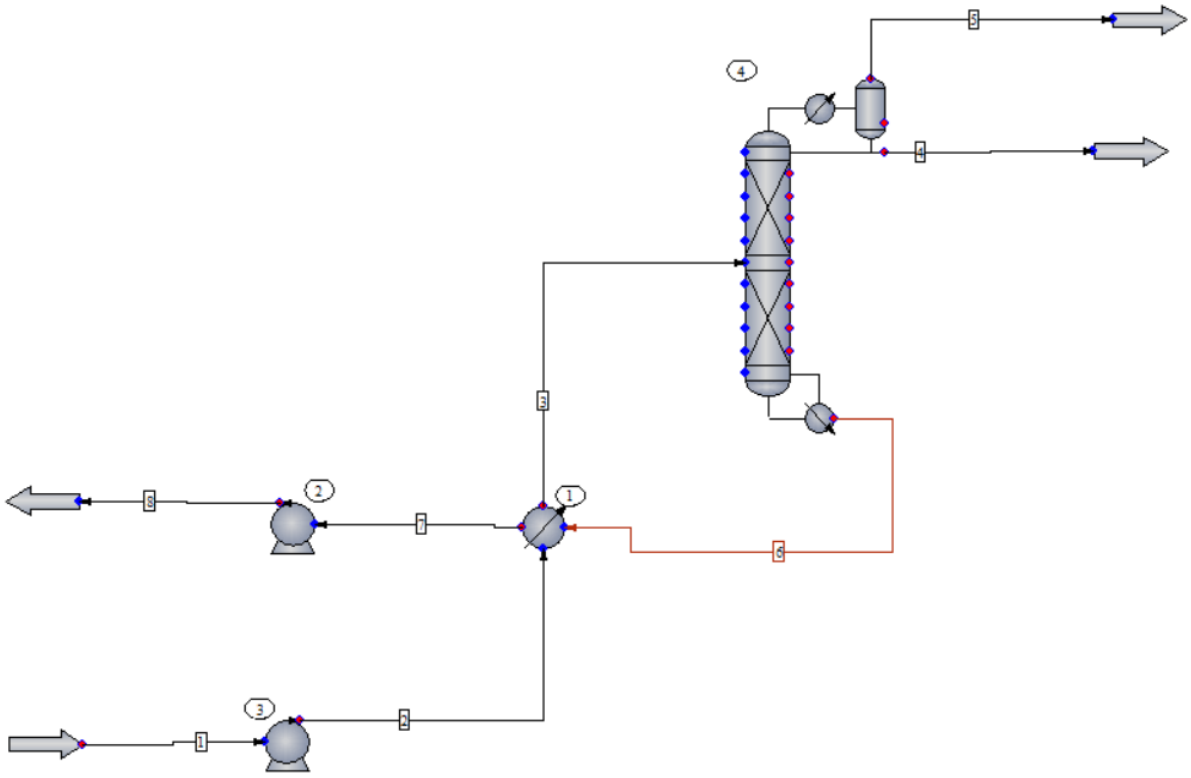


Obrázek 13 Výběr komponent

Dalším krokem je výběr vhodného termofyzikálního modelu pro výpočet termofyzikálních vlastností pracovních látek. Na základě doporučení softwaru CHEMCAD byl proto jako tzv. *Global K-value Model* zvolen *Sour Water Model* a jako tzv. *Global Entalpy Model* byla zvolena metoda *SRK*.

4.1.2 Sestavení výpočtového schématu pro simulaci procesu

Po výběru komponent pracovních látek již lze přistoupit k sestavení výpočtového schématu procesu. Z palety se postupně vyberou a na pracovní plochu umístí vstupy a výstupy proudů a zástupci předmětných zařízení a příslušně se propojí procesními proudy. Následně se do vstupních a výstupních proudů zadají požadované dílčí provozní parametry, jako je teplota, tlak, průtok (korespondující se zvolenými jednotkami) či koncentrace vstupující kyselé vody. Vzniklé výpočtové schéma procesu, jež obsahuje všechna procesní zařízení (jako jsou čerpadla, výměník tepla pro předehřev nástřiku, stripovací kolonu s vařákem a kondenzátorem a refluxní nádrž), je znázorněno na obrázku 14.



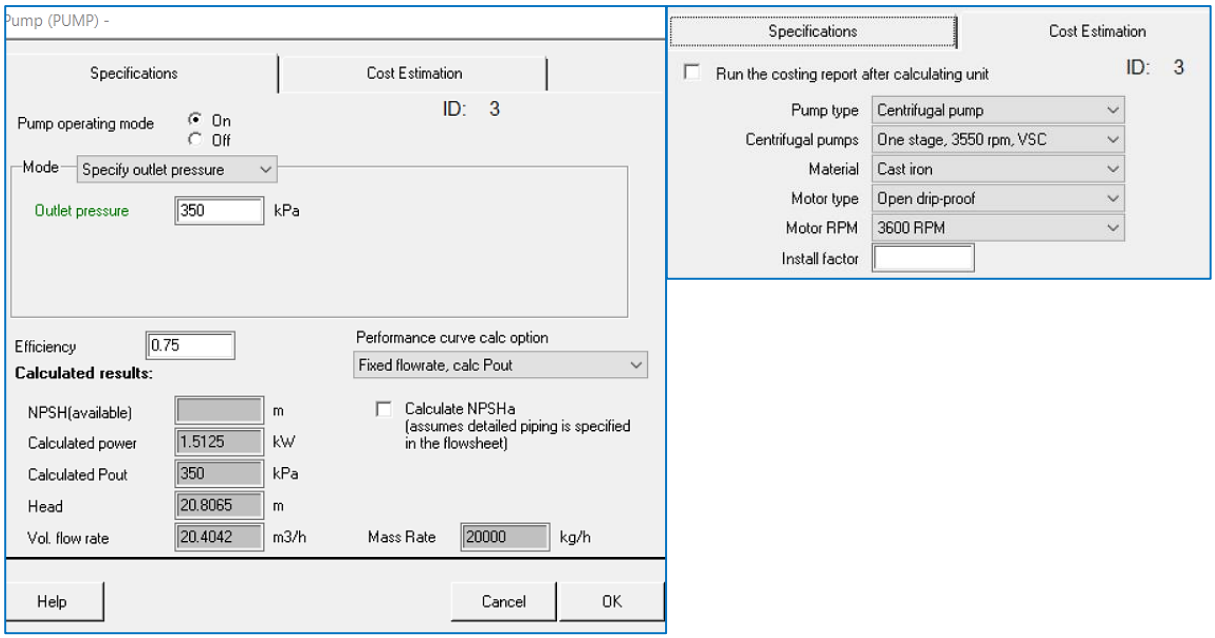
Obrázek 14 Výpočtové schéma pro simulaci procesu

4.2 Nastavení zařízení v softwaru CHEMCAD

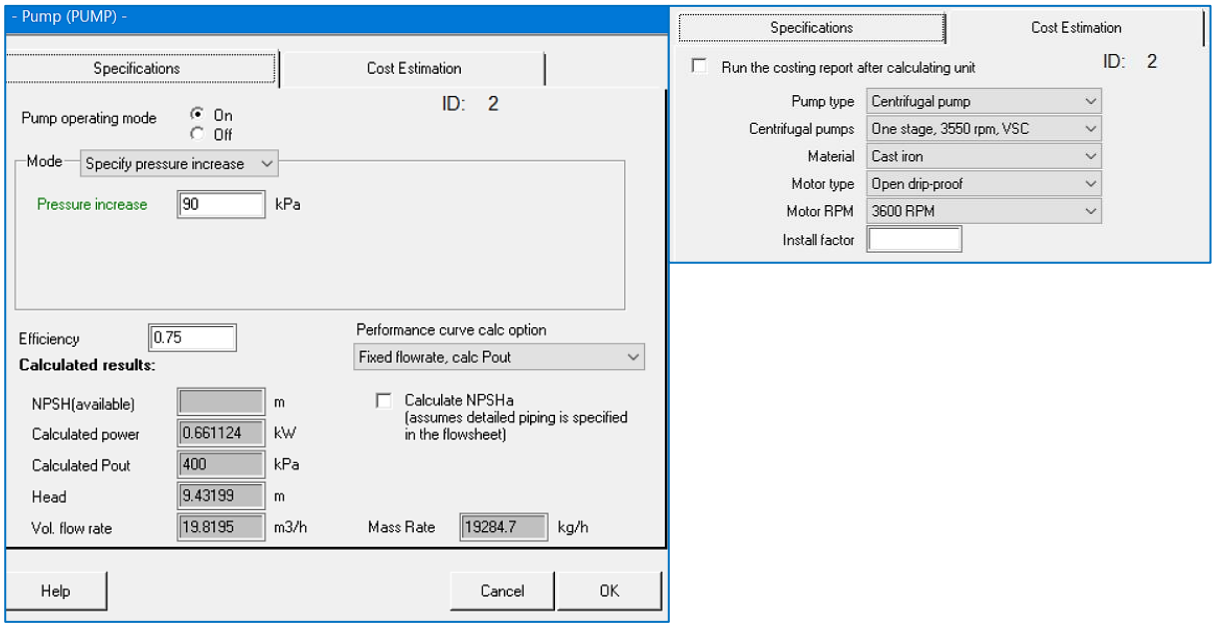
Posledním krokem ve vytvořeném výpočtovém schématu je nastavení výpočtu jednotlivých zařízení. Přitom se obvykle vychází jak z požadavků zadání, tak často z následné upřesňující komunikace se zadávající organizací. V řešeném procesu bylo upřesňující komunikace využito v případě nastavení čerpadel. Výsledné nastavení jednotlivých čerpadel přítomných v procesu je patrné na následujícím obrázku 15 a obrázku 16.

Jedno z čerpadel (čerpadlo č. 3) má za úkol zajistit dopravu zpracovávané kyselé vody přes výměník tepla do stripovací kolony, zatímco úkolem druhého čerpadla (čerpadlo č. 2) je odvádět získávanou vystripovanou vodu ze stripovací kolony přes výměník tepla pryč z procesu. Na zmíněných obrázcích 15 a 16 je vidět zadaný tlak, který byl u každé z dopravovaných látek požadován na výstupu z těchto čerpadel. Dále jsou na těchto obrázcích patrné další konkrétně specifikované parametry obou těchto odstředivých čerpadel, jako je například typ motoru, použitý materiál anebo účinnost, zapisovaná ve formě zlomku, jež byla u obou čerpadel zadána 0,75 (tj. účinnost 75 %). A současně jsou na zmíněných obrázcích

patrné i aktuálně vypočtené hodnoty (v oddílech označených jako *Calculated results*), jako například hodnoty výkonů těchto čerpadel.



Obrázek 15 Nastavení čerpadla č. 3

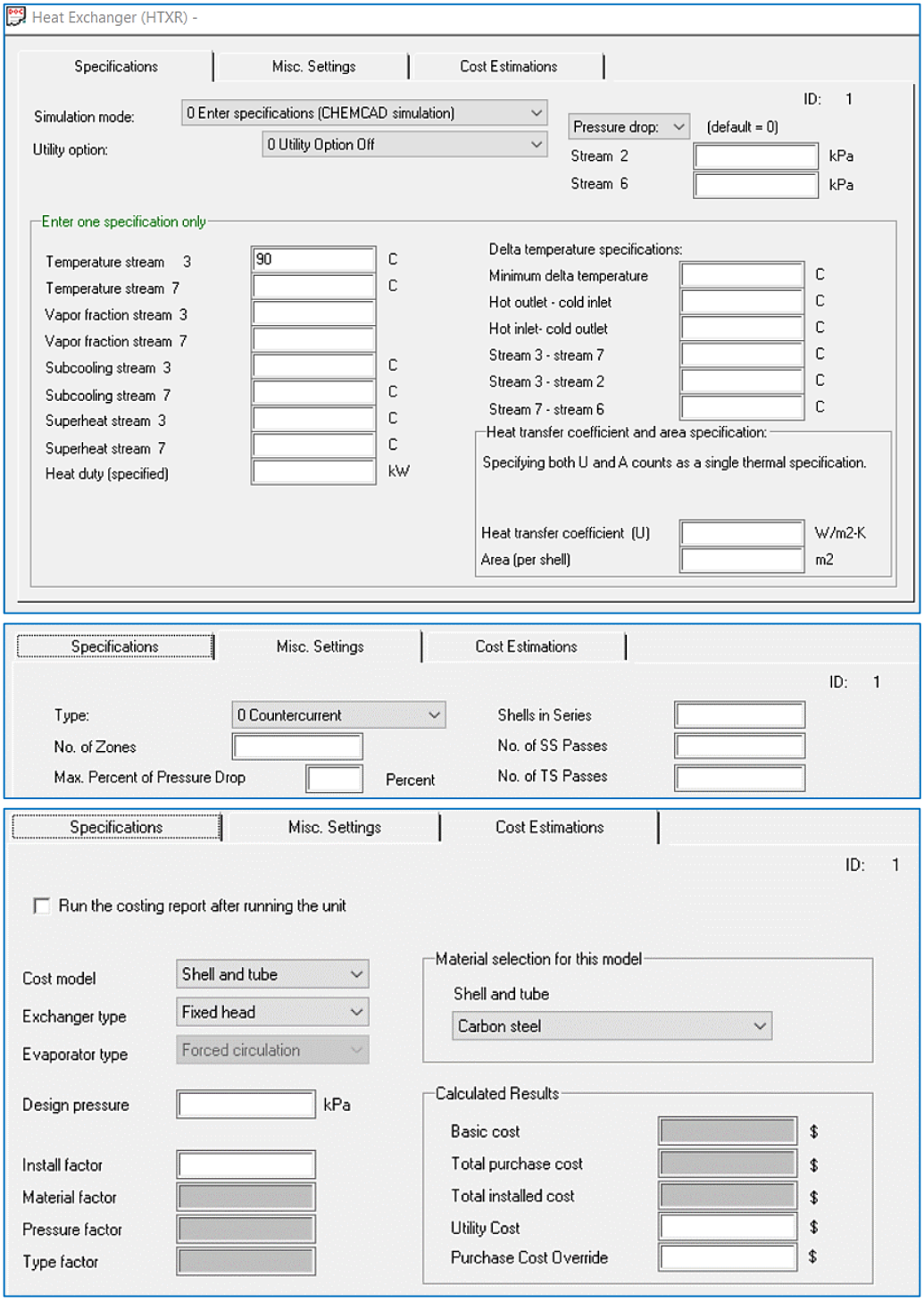


Obrázek 16 Nastavení čerpadla č. 2

Výpočet výměníku tepla, který slouží k předehřevu kyselé vody před vstupem do stripovací kolony, je ve výpočtovém schématu softwaru CHEMCAD nastaven pro trubkový výměník (typ *Shell and tube*) a to z toho důvodu, že software CHEMCAD neumožňuje provádět výpočty spirálových deskových výměníků. Z tohoto důvodu je tedy do výpočtové simulace procesu tento výměník nastaven jako trubkový výměník a na základě získaného tepelného výkonu, tepelné bilance a parametrů vstupních a výstupních proudů je následně návrh rozměrů

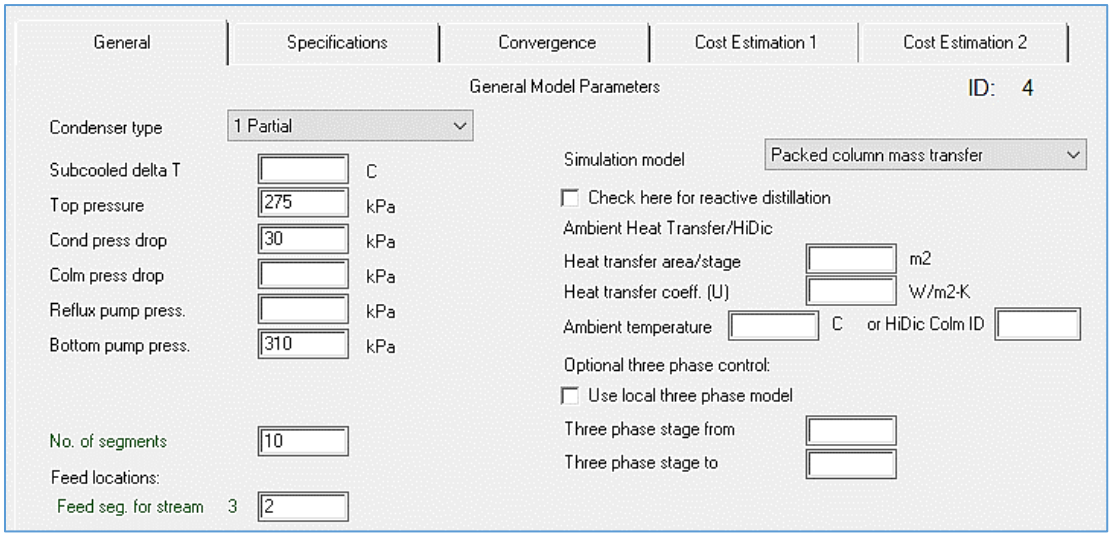
spirálového deskového výměníku pro požadovaný tepelný výkon a předepsané dovolené tlakové ztráty proveden separátně a tento návrhový výpočet je popsán v kapitole 4.4.

V softwaru CHEMCAD je pro výměník pro předehřev nástřiku tedy nastaven pouze požadavek na protiproudý výměník (což odpovídá situaci spirálového deskového výměníku), který ohřeje vstupní studený proud kyselé vody na požadovanou teplotu 90 °C pro stripovací kolonu. Způsob tohoto zadání ilustruje následující obrázek 17, na záložkách *Specifications*, *Misc Setting* a *Cost Estimations*.

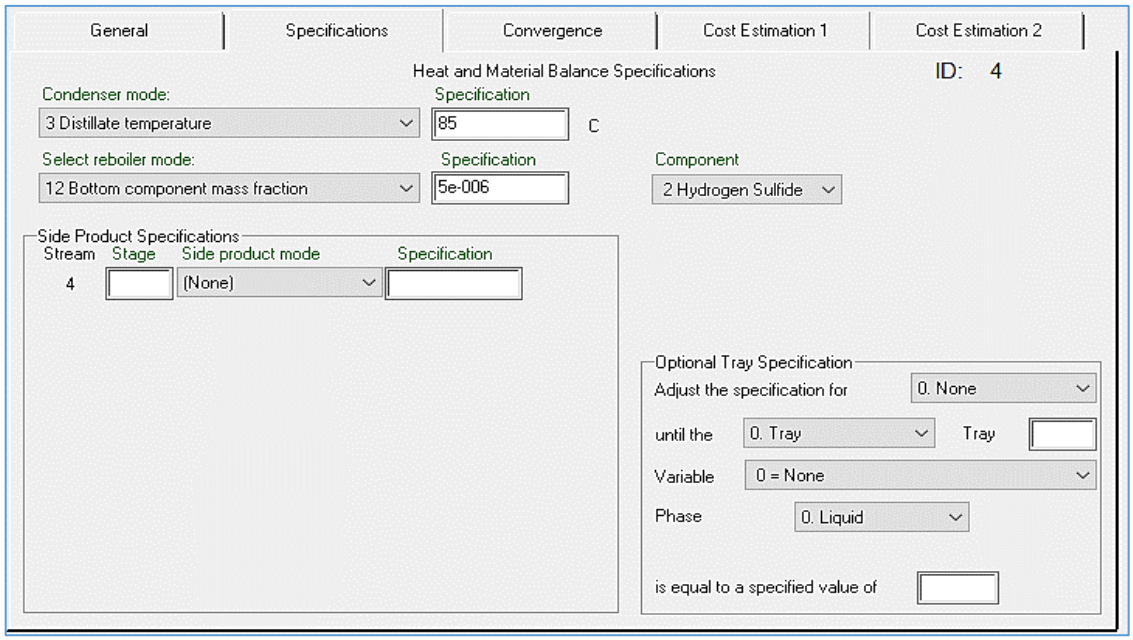


Obrázek 17 Nastavení výměníku tepla pro předehřev kyselé vody

Při nastavení výpočtu stripovací kolony se opět vycházelo ze zadaných požadavků. Kolonu pro simulaci reprezentuje tzv. model SCDS a tento model používá iterační Newton-Rapshonovu metodu neboli metodu tečen. Doba výpočtu tohoto modelu je tak v porovnání s typem TOWR v CHEMCADU obvykle výrazně delší (což je však výrazněji znatelné až v případech, kdy je celkový počet zařízení účastnících se simulace vyšší než 10). Při nastavení kolony byl v záložce *General* zvolen nejprve typ kondenzátoru *Partial* (částečný), zadána tlaková ztráta kondenzátoru 30 kPa, tlak v horní a spodní části kolony a počet segmentů (pater) kolony včetně nástřikového patra. Počet segmentů byl zvolen 10, přičemž nástřik je umístěn na druhý segment. Jestliže je součástí kolony reboiler, je brán jako poslední segment (v tomto případě desátý) a pokud je také kondenzátor součástí kolony při simulaci je naopak brán jako segment první. Toto výchozí nastavení stripovací kolony, jež se provádí na záložce *General*, je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18 Výchozí nastavení stripovací kolony



Obrázek 19 Záložka Specifications

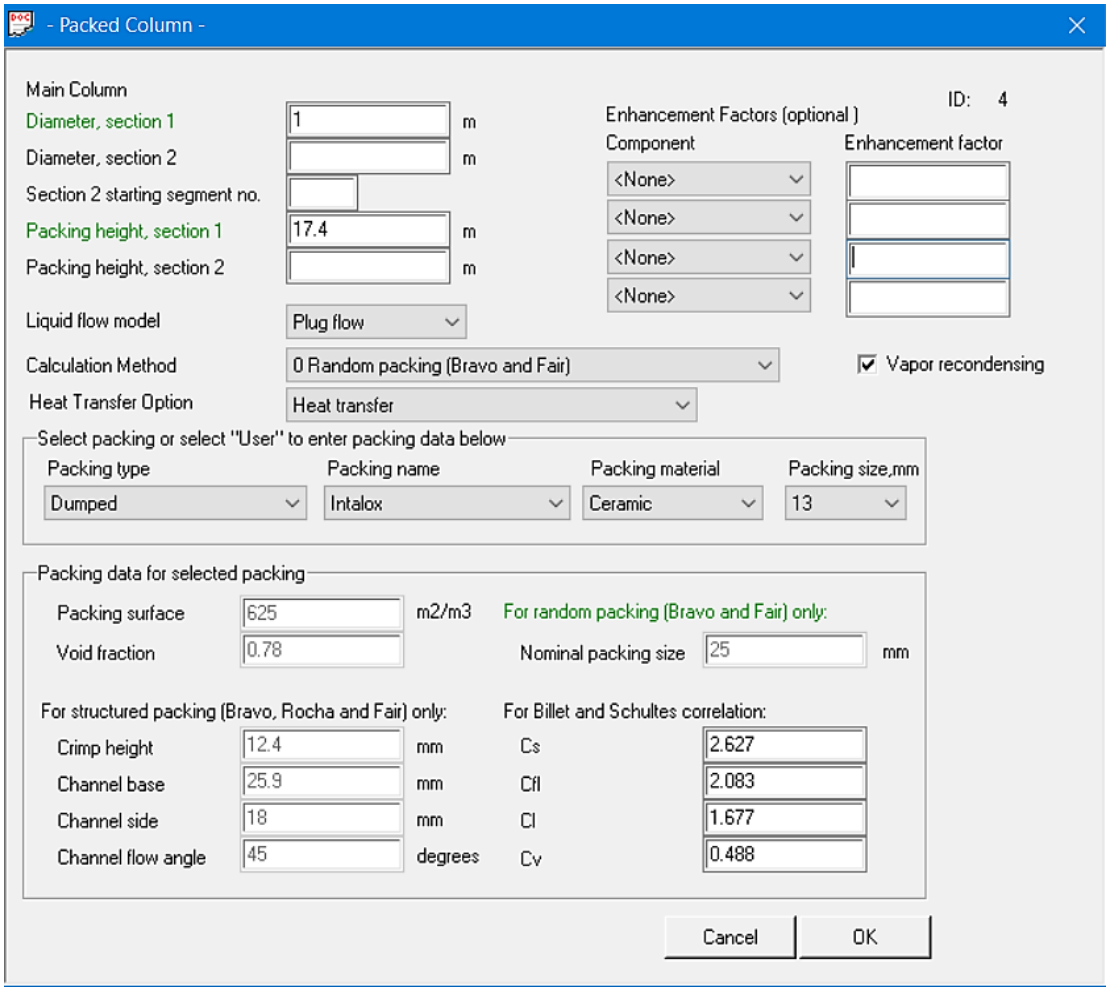
Na záložce *Specifications*, uvedené na obrázku 19 na předchozí straně, se pak provádí upřesňující nastavení výpočtu stripovací kolony. Zejména se zde zadává požadovaná výstupní teplota pro kondenzátor a požadovaná výsledná koncentrace sledované komponenty v proudu odcházejícím ze spodku (angl. *bottom*) kolony (tj. v proudu vystripované vody).

Sledovanou komponentou je dle zadání H_2S. V souladu se zadáním je proto nastaven požadovaný hm. zlomek H_2S ve vystripované vodě na hodnotu 0,000005 (což je 0,0005 % hm. a odpovídá tak požadované koncentraci 5 ppm H_2S v proudu vystripované vody).

Další záložkou pro nastavení výpočtového modelu stripovací kolony je záložka *Convergence* (jejíž přítomnost je zřejmá například na zmíněném předchozím obrázku 19), na níž je možno v případě potíží s konvergencí výpočtu stripovací kolony upravit úroveň (přesnost) konvergence jejího výpočtu. Možnosti této záložky však nebyly při simulaci řešeného procesu využity, a tato záložka tak nebude již nyní dále komentována.

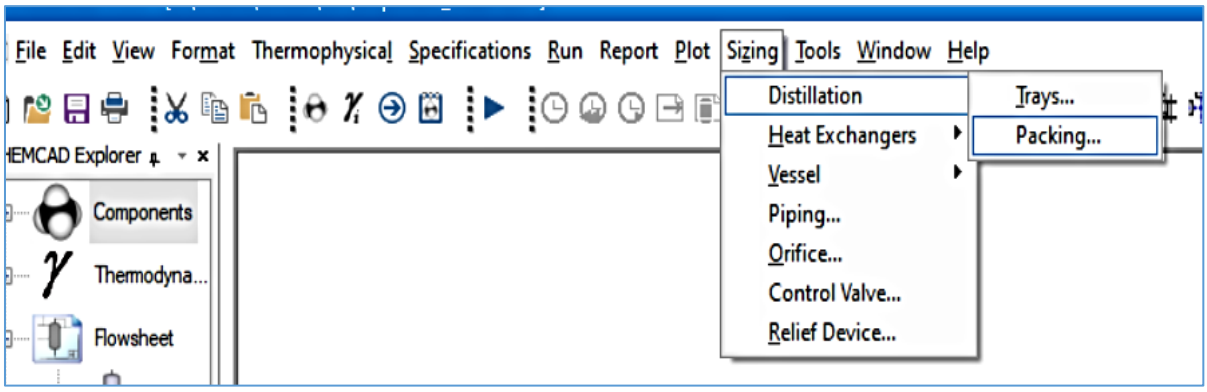
Další záložka pojmenovaná *Cost Estimation 1* umožňuje základní cenový odhad kolony na základě interních cenových parametrů obsažených v softwaru CHEMCAD a záložka *Cost Estimation 2* pak umožňuje modifikovaný odhad ceny kolony vlastní specifikací typu a materiálu kondenzátoru a vařáku.

Na následujícím obrázku 20 je pak znázorněno okno, jež se v softwaru CHEMCAD otevře pro potřeby kontrolního výpočtu kolony a umožňuje zadat známé geometrické a další nezbytné informace týkající se kolony a její výplně.



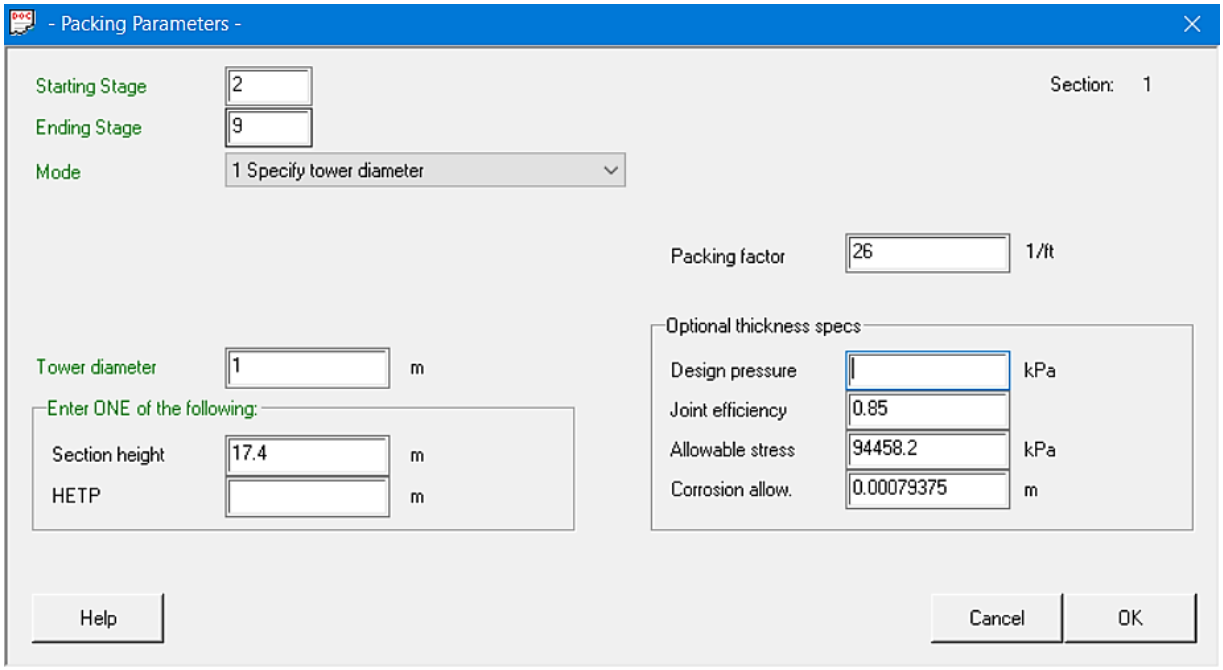
Obrázek 20 Okno pro zadání dat pro kontrolní výpočet kolony

Výplňovou kolonu lze pro potřeby kontrolního výpočtu také specifikovat pomocí režimu *Sizing*, který lze nalézt v nabídce horní lišty, jak znázorňuje obrázek 21, po následném rozkliknutí podvolby *Distillation* a *Packing*.



Obrázek 21 Volba Sizing

Pak se v režimu *Sizing* v případě výplňové kolony (*Packing*) otvírá okno nazvané *Packing parameters*, umožňující, mimo základní rozměry kolony, navíc konkrétně specifikovat (v návaznosti na dříve zadané hodnoty počtů segmentů) čísla segmentů indikujících počáteční (*Starting Stage*) a koncový (*End Stage*) segment – tj. určit rozsah segmentů náležících vlastní výplňové koloně (tj. bez kondenzátoru a reboileru). Zmíněné okno *Packing parameters* je (včetně parametrů týkajících se kontrolované stripovací kolony) znázorněno na následujícím obrázku 22.



Obrázek 22 Packing parameters

V režimu *Sizing* je pak provedeno nastavení i pro návrhové výpočty kondenzátoru a reboileru stripovací kolony. Konkrétně bylo jejich nastavení provedeno v podvolbě *Heat exchangers* (viz obrázek na předchozí straně znázorňující rozevření podvoleb režimu *Sizing*) po výběru *Shell and tube* a následném výběru identifikátoru nastavovaného výměníku (tj. kondenzátoru anebo reboileru) z výpočtového schématu procesu.

V souladu s dříve uvedenými požadavky zadání bylo v případě kondenzátoru nastaveno, že půjde o parciální kondenzátor provedený jako trubkový výměník tepla v provedení dle TEMA klasifikace AEU, s teplotou ohřáté chladicí vody na výstupu z kondenzátoru maximálně 40 °C. Dále bylo v souladu s požadavky zadání nastaveno, že chladicí voda bude umístěna v trubkovém prostoru a hlavový proud ze stripovací kolony v mezitrubkovém prostoru kondenzátoru. Následně byly nastaveny předepsané hodnoty dovolených tlakových ztrát obou pracovních látek, průměrů trubek a jejich uspořádání ve svazku (do čtverce) a jejich předepsané materiálové provedení.

Podobným způsobem bylo provedeno nastavení reboileru stripovací kolony. Ten byl v souladu s požadavky zadání nastaven jako trubkový výměník tepla v provedení dle TEMA klasifikace AHU. Dále bylo v souladu s požadavky zadání v jeho případě nastaveno, že reboilovaný proud ze spodku kolony bude umístěn v mezitrubkovém prostoru, zatímco ohřevná pára (o předepsaných parametrech) bude procházet trubkovým prostorem reboileru. Následně byly nastaveny předepsané hodnoty dovolených tlakových ztrát obou zmíněných pracovních látek, průměrů trubek a jejich uspořádání v trubkovém svazku (do čtverce) a jejich předepsané materiálové provedení.

Pro určení průměrů procesních potrubí (tj. získání hodnoty DN potrubí), je možné v softwaru CHEMCAD využít opět funkce *Sizing* a její příslušné podvolby *Piping*, která provede výpočet průměru příslušného potrubí a následně doporučí hodnotu DN.

Výpočet vnitřního průměru potrubí je však také možné provést jeho vyjádřením z rovnice kontinuity [21]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \,.\, \dot{m}}{\pi \,.\, w \,.\, \rho}} \tag{4.1}$$

Význam symbolů v rovnici 4.1 je následující:

- $\dot{m}$ [kg·s^{-1}] je hmotnostní tok proudícího média
- w [m·s^{-1}] je rychlost proudění média
- ρ [kg·m^{-3}] je hustota média

Případně lze výpočet vnitřního průměru potrubí v případě, kdy je omezena (či požadována, resp. předepsána) jeho tlaková ztráta, provést za pomoci následující rovnice [21]:

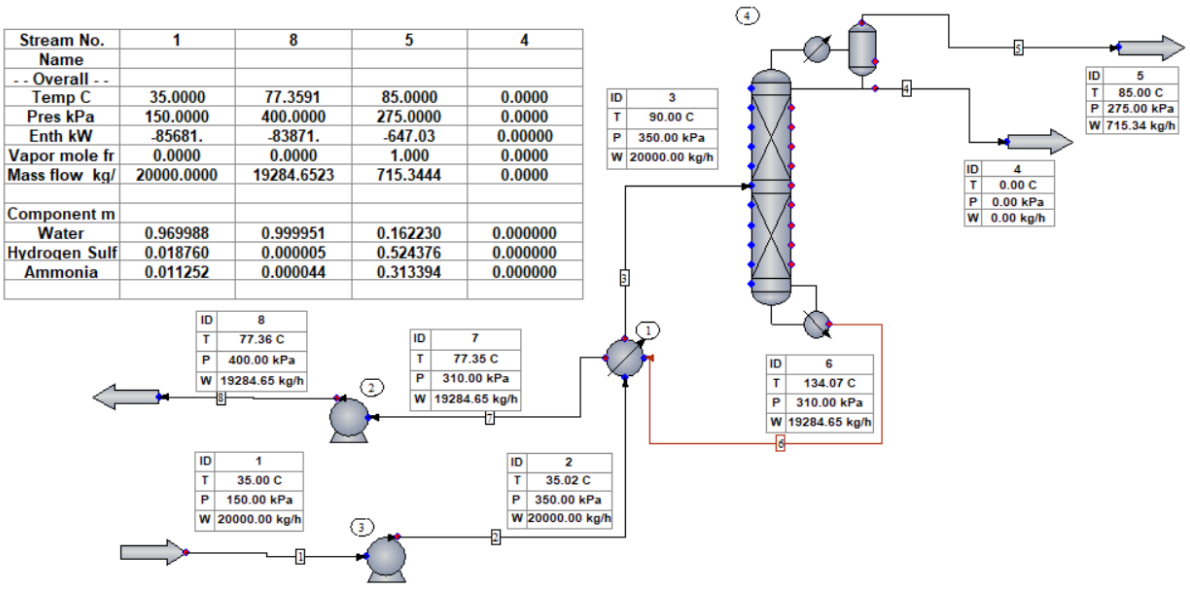
$$d = \sqrt[5]{\frac{8 \,.\, \lambda \,.\, l \,.\, \dot{V}^2 \,.\, \rho}{\Delta p \,.\, \pi^2}} \tag{4.2}$$

Přičemž význam symbolů v rovnici 4.2 je následující:

- λ [-] je ztrátový součinitel tření
- l [m] je délka potrubní trasy
- $\dot{V}$ [m^3·s^{-1}] je objemový průtok média
- ρ [kg·m^{-3}] je hustota média
- Δp [Pa] je tlaková ztráta

4.3 Výsledky simulace procesu a výpočtů zařízení v softwaru CHEMCAD

V návaznosti na výše popsaná nastavení výpočtového schématu a jeho jednotlivých zařízené bylo možno přistoupit k vlastní simulaci, jež se spustí kliknutím na tlačítko *Run* na horní liště. Úspěšné ukončení simulace program oznámí příslušným hlášením a uživatel může provést návrhové či kontrolní výpočty jednotlivých zařízení. Po úspěšném ukončení všech těchto činností lze také přistoupit k finalizaci výpočtového schématu, například jeho doplněním o vypočtené parametry apod. Této možnosti bylo využito a na následujícím obrázku 23 je znázorněno výsledné výpočtové schéma simulovaného procesu po provedení všech zmíněných výpočtů a po doplnění výpočtového schématu o znázornění vypočtených parametrů všech hlavních proudů.



Obrázek 23 Výpočtové schéma procesu s výsledky

Následně je možné v programu vygenerovat výpočtové reporty, které uživatele zajímají. V souladu s požadavky zadání tak byly v programu CHEMCAD vygenerovány (pro potřeby dalších činností v této práci) tyto konkrétní výpočtové reporty:

- report s výsledky bilance procesu, zahrnující parametry a vlastnosti jednotlivých procesních proudů;
- výsledkový reporty z kontrolního výpočtu stripovací kolony;
- výsledkový report z návrhového výpočtu kondenzátoru;
- výsledkový report z návrhového výpočtu reboileru;
- výsledkový report z návrhového výpočtu čerpadel.

Všechny tyto zmíněné vygenerované reporty jsou součástí Přílohy 1 této diplomové práce.

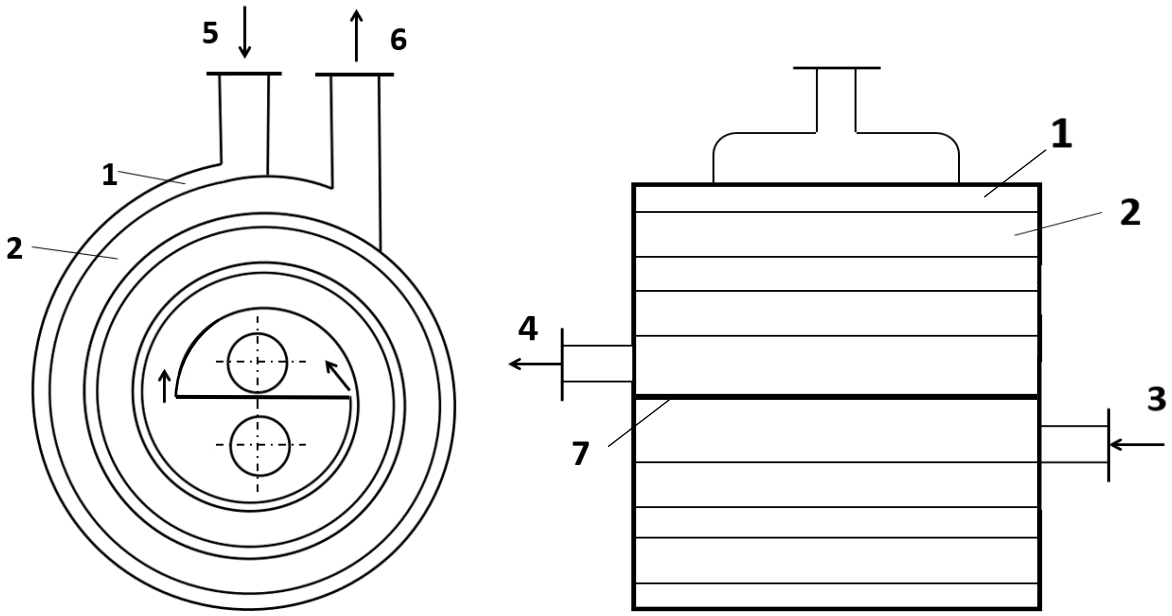
Jak bylo výše zmíněno, software CHEMCAD neumožňuje návrh spirálového deskového výměníku pro předehřev kyselé vody pro vstup do stripovací kolony. Tento výměník je proto potřeba navrhnout samostatně, mimo prostředí softwaru CHEMCAD. Touto problematikou se proto bude zabývat následující kapitola.

4.4 Výpočet vybraného zařízení bez softwaru CHEMCAD

Jednou ze zadaných činností, jíž se má tato práce zabývat, je návrh spirálového deskového výměníku pro předehřev kyselé vody pro stripovací kolonu. Návrh výměníku tohoto typu však software CHEMCAD neumožňuje. Proto je potřeba návrh tohoto výměníku provést samostatně, mimo prostředí softwaru CHEMCAD. Tato kapitola je proto zaměřena na problematiku návrhu tohoto specifického výměníku.

4.4.1 Popis spirálového deskového výměníku tepla a vstupní hodnoty pro jeho výpočet

Spirálové deskové výměníky tepla jsou vyvinuty pro výměnu tepla mezi plynnými či kapalnými proudy se zvýšenou tendencí k zanášení. Odstředivá složka působící v tomto výměníku na pracovní látky potlačuje jejich tendenci k zanášení a výměník tak má oproti ostatním klasickým typům výměníků (trubkovým či deskovým) výrazně vyšší samočistící schopnost. Této vlastnosti tohoto výměníku se využívá právě v procesech stripování odpadních vod, především při předehřevu kyselé vody pro stripovací kolonu, jelikož předehřívaná kyselá voda vykazuje značnou tendenci k zanášení. Ve výměníku navíc pracovní látky proudí v čistě protiproudém uspořádání, což minimalizuje nároky na velikost výměníku tepla. Schematické znázornění spirálového deskového výměníku je uvedeno na obrázku 24. Tento typ výměníku se vyznačuje také jednoduchou údržbou při čištění jeho vnitřních prostor [9].



Obrázek 24 Principiální schéma spirálového deskového výměníku tepla [9]

Konstrukce spirálového deskového výměníku se skládá ze dvou spirálově tvarovaných kanálů, označených na obrázku 24 čísly 1 a 2. Ve střední části výměníku se nachází mezistěna označená číslem 7, jež odděluje látky vstupující a vystupující do středu výměníku. Na obvodu spirálového výměníku jsou dvě samostatná hrdla, které umožňují vtok a výtok pracovních látek. Horká pracovní látka, vstupuje do výměníku hrdlem označeným číslem 3 a vystupuje hrdlem číslo 6. Zatímco studená látka vstupuje hrdlem číslo 5 a vystupuje z výměníku hrdlem číslo 4.

Pro tepelně-hydraulický návrh spirálového deskového výměníku tepla, je třeba disponovat jednak potřebnými termofyzikálními vlastnostmi obou pracovních látek, jež se budou ve výměníku účastnit vzájemné výměny tepla a také specifickými provozními a výrobně-geometrickými omezeními tohoto typu výměníku. Potřebné termofyzikální vlastnosti obou pracovních látek jsou pro návrh spirálového deskového výměníku převzaty

z výsledků provedené simulace procesu v softwaru CHEMCAD, popsané výše a jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Termofyzikální vlastnosti látek ze softwaru CHEMCAD

Veličina	Značka	Horký proud	Studený proud	Jednotka
Průtok média	m	5,356	5,556	[kg/s]
Teplota na vstupu	t_{i1}	134	35	[°C]
Teplota na výstupu	t_{i2}	77,3	90	[°C]
Hustota	ρ	935,6	964,4	[kg/m^3]
Molární hmotnost	M_H	18,0150	18,1638	[kg/kmol]
Měrná mol. tepelná kapacita	c_{pm}	76077,13	76260,42	[J/(kmol.K)]
Dynamická viskozita	η	0,0002641	0,0004526	[Pa.s]
Tepelná vodivost	λ	0,6784	0,6172	[W/(m.K)]
Entalpie na vstupu	H_{i1}	-82587	-85680	[kJ/s]
Entalpie na výstupu	H_{i2}	-83872	-84395	[kJ/s]

Specifické provozní požadavky (tj. dovolené hodnoty tlakových ztrát obou pracovních látek ve výměníku, materiálové provedení výměníku a oba součinitele zanášení) byly součástí zadání této práce, zatímco výrobně-geometrická omezení výměníku jsou převzaty od konkrétního výrobce výměníku (společnost *Bechtel National*) z podkladu [22]. Všechny tyto parametry jsou souhrnně uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Konstrukčně-provozní požadavky na výměník

Veličina	Značka	Hodnota [jednotka]
Materiál výměníku	-	304L (Cr/Ni: 18/8)
Tepelná vodivost materiálu	λ_d	16,2 [W/(m.K)]
Tloušťka použitých desek	δ	2,5 [mm]
Vzdálenost spirálových desek	B_1, B_2	3 [mm]
Předepsaný průměr středové trubky	d_c	304,8 [mm]
Předepsaný minimální rádius spirály	R_{min}	152,4 [mm]
Předepsaný maximální rádius spirály	R_{max}	273,05 [mm]
Střední výpočtový rádius spirály $R_m = (R_{min}+R_{max})/2$	R_m	212,725 [mm]
Dovolená tlaková ztráta horkého proudu (vystrip. voda)	Δp_{1D}	20 [kPa]
Součinitel zanášení horkého proudu (vystrip. voda)	R_{z1}	0,00034 [m^2.K/W]
Dovolená tlaková ztráta studeného proudu (kyselá voda)	Δp_{2D}	20 [kPa]
Součinitel zanášení studeného proudu (kyselá voda)	R_{z2}	0,00034 [m^2.K/W]
Požadovaná hodnota předimenzování (*over-surface*):	OS	15 [%]

4.4.2 Výpočet spirálového deskového výměníku a dosažené výsledky

Pro výpočet spirálového deskového výměníku byl sestaven výpočtový program v prostředí GNU Octave a tento výpočtový program je ve formě textového dokumentu přiložen k této práci jako její Příloha č. 2. Tento výpočtový program používá výpočtové vztahy pro tepelně-hydraulický návrh spirálového deskového výměníku tepla, doporučované výrobcem výměníku, společností *Bechtel National*) v článku [22]. Pro konkrétní ilustraci tepelně-hydraulického návrhového výpočtu spirálového deskového výměníku, bude jeho podstatná část nyní předvedena.

Nejprve je provedeno stanovení tepelného výkonu spirálového deskového výměníku a tím současně a kontrola bilančních dat ze softwaru CHEMCAD. Tj. je kontrolováno, zda se rovná množství tepla odevzdaného horkým proudem množství tepla přijatého studeným proudem. V tomto výpočtu tepelného výkonu (stejně jako v další části výpočtu) je horký proud značen (prvním) dolním indexem 1 a studený proud (prvním) dolním indexem 2.

$$Q_1 = abs(H_{12} - H_{11}) = abs[-83872 - (-82587)] = 1285 \text{ [kW]} \quad (4.3)$$

$$Q_2 = abs(H_{22} - H_{21}) = abs[-84395 - (-85680)] = 1285 \text{ [kW]} \quad (4.4)$$

Jak lze z výpočtu pomocí rovnic (4.3) s (4.4) vidět, je potřebný tepelný výkon výměníku 1285 kW a výpočet současně potvrdil očekávanou přesnost dat ze softwaru CHEMCAD.

Dalším krokem výpočtu je určení středního logaritmického teplotního spádu pro protiproudý tok pracovních látek ve výměníku.

$$\Delta Tln = \frac{(t_{11} - t_{22}) - (t_{12} - t_{21})}{\ln \frac{(t_{11} - t_{22})}{(t_{12} - t_{21})}}$$

$$\Delta Tln = \frac{(134 - 90) - (77{,}3 - 35)}{\ln \frac{(134 - 90)}{(77{,}3 - 35)}} = 43{,}14\ [°C] \quad (4.5)$$

Nyní je potřeba zvolit šířku výměníku, tak, aby byla, dle požadavků výrobce výměníku, šířka výměníku blízká vnějšímu průměru výměníku. Jelikož vnější průměr výměníku vyjde až z dalších kroků výpočtu, je třeba šířku výměníku odhadnout a následně (podle výsledku vnějšího průměru výměníku) iterativně korigovat, aby bylo dosaženo výrobcem požadované srovnatelné hodnoty šířky a průměru výměníku (spolu s požadovaným tepelným výkonem výměníku). Počáteční hodnota šířky výměníku je zvolena H=1,46 m.

Následuje výpočet hodnot součinitelů přestupu tepla pro stranu horkého i studené pracovní látky. Postup bude demonstrován na výpočtu součinitele přestupu tepla pro stranu horkého proudu (vystripované vody). Tento výpočet začíná určením hodnoty průtočného průřezu kanálu (horkého proudu), dle následující rovnice (4.6):

$$A_{C1} = B_1 \,.\, H$$

$$A_{C1} = 0{,}003 \,.\, 1{,}46 = 0{,}00438\ [m^2] \quad (4.6)$$

Pomocí hodnoty průtočného průřezu kanálu a známého hmotnostního průtoku horkého proudu je následně vypočtena tzv. hmotová rychlost toku dle rovnice (4.7):

$$G_{h1} = \frac{m_1}{A_{C1}}$$

$$G_{h1} = \frac{5{,}356}{0{,}00438} = 1223{,}02\ \left[\frac{kg}{s * m^2}\right] \quad (4.7)$$

Z hodnoty hmotové rychlosti a hustoty pracovní látky při její střední teplotě je vypočtena střední rychlost proudění příslušné pracovní látky výměníkem z rovnice (4.8):

$$w_1 = \frac{G_{h1}}{\rho_1}$$

$$w_1 = \frac{1223{,}02}{953{,}6} = 1{,}2825\ \left[\frac{m}{s}\right] \quad (4.8)$$

Dalším krokem je výpočet hydraulického průměru dle následující rovnice (4.9).

$$D_{h1} = B_1 \,.\, 2$$
$$D_{h1} = 0{,}003 \,.\, 2 = 0{,}006 \qquad (4.9)$$

Nyní je možno již dopočítat Reynoldsovo číslo, Prandtlovo číslo a Nusseltovo číslo. Tyto výpočty pro horký proud ilustrují následující rovnice (4.10), (4.11) a (4.12):

$$Re_1 = \frac{G_{h1} . D_{h1}}{\eta_1}$$
$$Re_1 = \frac{1223{,}02 \,.\, 0{,}006}{0{,}0002641} = 27785{,}49\ [-] \qquad (4.10)$$

$$Pr_1 = \frac{c_{pm,1} . \eta_1}{M_{H,1} . \lambda_1}$$
$$Pr_1 = \frac{76077{,}13 \,.\, 0{,}0002641}{18{,}0150 \,.0{,}6784} = 1{,}644\ [-] \qquad (4.11)$$

$$Nu_1 = 0{,}239 \,.\left(1 + 5{,}54 \,.\frac{D_{h1}}{R_m}\right) .\ Re_1^{0{,}806} . Pr_1^{0{,}268}$$
$$Nu_1 = 0{,}239 \,.\left(1 + 5{,}54 \,.\frac{0{,}006}{0{,}212725}\right) .27785{,}49^{0{,}806} \,.\, 1{,}644^{0{,}268} = 120{,}512\ [-] \qquad (4.12)$$

Pomocí vypočteného Nusseltova čísla již lze provést výpočet hledaného součinitele přestupu tepla (na straně horkého proudu) pomocí rovnice (4.13).

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \,.\, \eta_1}{D_{h1}}$$
$$\alpha_1 = \frac{120{,}512 \,.\, 0{,}0002641}{0{,}006} = 13625{,}94\ \left[\frac{W}{m^2 \,.\, K}\right] \qquad (4.13)$$

Zcela obdobným postupem probíhá ve výpočtovém programu v Příloze 2 diplomové práce výpočet součinitele přestupu tepla studeného proudu (kyselé vody) a jeho příslušná obdržená hodnota činí α_2 = 9784,07 W/(m^2.K).

Následuje výpočet součinitele prostupu tepla se zohledněním zadaných součinitelů zanášení obou pracovních látek, pomocí následující rovnice (4.14)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_d} + R_{z1} + R_{z2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$
$$k = \frac{1}{\frac{1}{13625{,}94} + \frac{0{,}0025}{16{,}2} + 0{,}00034 + 0{,}00034 + \frac{1}{9784{,}07}} = 990\ \left[\frac{W}{m^2 \,.\, K}\right] \qquad (4.14)$$

Pomocí zjištěné hodnoty součinitele prostupu tepla lze z přenosové rovnice již určit potřebnou plochu výměny tepla spirálového deskového výměníku. Tento výpočet popisuje rovnice (4.15).

$$A_z = \frac{Q}{k \,.\, \Delta T ln}$$
$$A_z = \frac{1285000}{990 \,.\, 43{,}14} = 30{,}079\ [m^2] \qquad (4.15)$$

Hodnota plochy výměny tepla se následně navýší o požadované předimenzování OS (*over-surface*) dle následující rovnice (4.16):

$$A_{OS} = A_z \,.\left(1 + \frac{OS}{100}\right)$$
$$A_{OS} = 30{,}079 \,.\left(1 + \frac{15}{100}\right) = 34{,}59\ [m^2] \qquad (4.16)$$

Délka rozvinuté reálné plochy výměny tepla se potom získá z rovnice (4.17):

$$L = \frac{A_{OS}}{2 \,.\, H}$$
$$L = \frac{34{,}59}{2 \,.\, 1{,}46} = 11{,}846\ [m] \qquad (4.17)$$

Další krokem je výpočet vnějšího průměru výměníku z rovnice (4.18):

$$D = \sqrt{(15{,}36 \,.\, L \,.\, (B_1 + B_2 + 2 \,.\, \delta) + {d_c}^2)}$$
$$D = \sqrt{(15{,}36 \,.\, 11{,}84 \,.\, (0{,}003 + 0{,}003 + 2 \,.\, 0{,}0025) + 0{,}2048^2)} \qquad (4.18)$$
$$D = 1{,}447[m]$$

V tomto momentě končí tepelný výpočet a provádí se kontrola, zda se šířka výměníku (H) přibližně rovná jeho vnějšímu průměru (D). Je zřejmé, že je tomu tak, lze tedy pokračovat hydraulickým výpočtem – tj. výpočtem tlakových ztrát pro horký i studený proud dle následujících rovnic (4.19) a (4.20):

$$\Delta p_1 = 1{,}45 \,.\, L \,.\, \rho_1 . w_1^2 \,\frac{1}{1705}$$
$$\Delta p_1 = 1{,}45 \,.\, 11{,}846 \,.\, 935{,}6 \,.\, 1{,}2825^2 \,\frac{1}{1705} = 15{,}80\ [kPa] \qquad (4.19)$$

$$\Delta p_2 = 1{,}45 \,.\, L \,.\, \rho_2 . w_2^2 \,\frac{1}{1705}$$
$$\Delta p_2 = 1{,}45 \,.\, 11{,}846 \,.\, 964{,}4 \,.\, 1{,}315^2 \,\frac{1}{1705} = 16{,}81\ [kPa] \qquad (4.20)$$

Dovolená tlaková ztráta pro horký i studený proud je maximálně 20 kPa. Vypočtená tlaková ztráta je v obou případech nižší než tato dovolená tlaková ztráta. Navržený výměník tak splňuje veškeré požadavky.

Souhrnně lze tedy konstatovat, že navržený spirálový deskový výměník tepla pro předehřev kyselé vody s plochou výměny tepla 34,59 m^2, o šířce 1,46 m a vnějším průměru 1,45 m vyhovuje jak tepelně-hydraulickým (resp. provozně-technologickým) požadavkům řešeného procesu stripování kyselých vod, tak výrobně-konstrukčním požadavkům potenciálně uvažovaného dodavatele výměníku (společnosti *Bechtel National*) v souladu s [22].

Návrhem spirálového deskového výměníku byla splněna výpočtová část úkolů spadajících do oblasti technologie předmětného procesu. A na základě těchto výsledků již bylo následně také provedeno zpracování datových listů (angl. *Datasheets*) požadovaných procesních zařízení. Vypracované datové listy tvoří Přílohu 3 této diplomové práce.

Současně také bylo s pomocí softwaru CHEMCAD sestaveno proudové schéma PFD (viz předminulý obrázek 23) a je tak nyní možno přistoupit k plnění zadaných úkolů z oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace řešeného procesu.

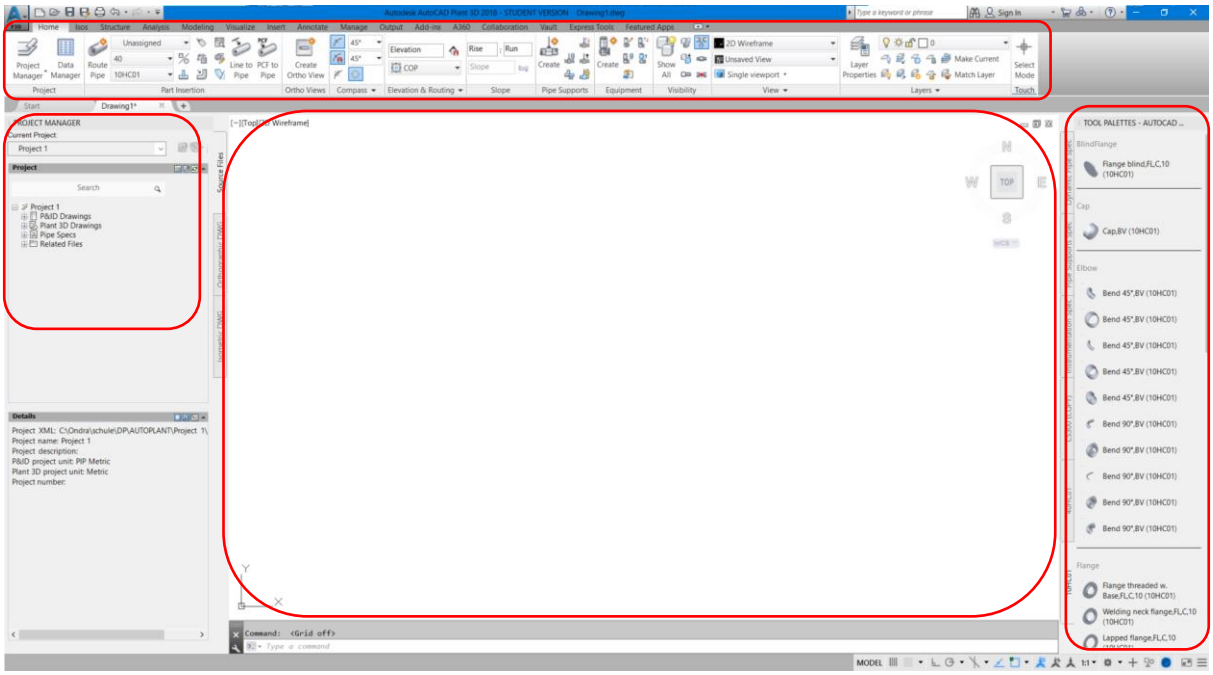
5 Konstrukční část v softwaru AutoCAD Plant3D

5.1 AutoCAD Plant3D

Pro tvorbu modelu systému a výkresové dokumentace byl zvolen AutoCAD Plant3D 2018, jakožto software dostupný v podobě studentské verze. Software AutoCAD Plant3D 2018 dodávaný společností Autodesk je jedním z řady programů AutoCAD, sloužící zejména pro tvorbu 3D modelů a práci obecně s potrubními systémy. Mezi hlavní průmyslové oblasti, ve kterých je AutoCAD Plant 3D využíván, patří chemický, potravinářský, energetický a zpracovatelský průmysl. Předností tohoto softwaru je zejména jednoduché a intuitivní vedení potrubních tras, mezi jednotlivými zařízeními, které se účastní daného procesu a které je také možné pomocí nástrojů k tomu určeným vytvářet a upravovat. AutoCAD Plant 3D také disponuje nástroji k tvorbě podpůrných prvků (jako jsou ocelové konstrukce, žebříky, schodiště, zábradlí) a prvků k podpoře a uložení potrubí a technologických zařízení. Dále tento software umožňuje na základě vytvořeného 3D modelu generovat příslušné dispoziční a izometrické výkresy. Mezi významné výhody tohoto softwaru patří kompatibilita s aplikací AutoCAD P&ID a Autodesk Navisworks. Autodesk Navisworks slouží zejména pro přehlednější vizualizace projektů a potrubních tras. [23]

5.1.1 Orientace a obecné uspořádání softwaru

Po založení nového projektu v programu AutoCAD Plant 3D se zobrazí pracovní plocha. V levé straně okna, zobrazeného na obrázku 25, se nachází strom projektu, kde můžeme nalézt P&ID výkresy, 3D modely, potrubní třídy a ostatní složky. Horní lišta nabízí spoustu nástrojů a možností, od modelování potrubí, zařízení a konstrukce až po export projektů do potřebných formátů. Na pravé straně se nachází tzv. paleta nástrojů, z níž se obvykle při tvorbě modelu čerpají jednotlivé prvky. Uprostřed se nachází prostor pro modelování a tvorbu výkresové dokumentace. Veškeré tyto části zřetelně popisuje obrázek 25:



Obrázek 25 Rozvržení prostředí softwaru

Nejčastěji používanou záložkou z horní lišty je *Home*, která nabízí možnosti spravování projektu, vkládání a úpravu potrubí a nastavení kolen či T-kusů, ortografické výkresy, práci

s podpůrnými prvky, tvorbu a úpravu zařízení, nastavení vzhledu prostředí a 3D modelů a také vrstev.

5.2 P&ID schéma

V předchozí kapitole 4 byl uveden postup pro získání výsledků simulace a jejich zakreslení do PFD schématu. Toto schéma je obecně vytvářeno v úvodní části projektu. Po PFD následuje výkresová dokumentace P&ID. Tato výkresová dokumentace blíže specifikuje jednotlivé potrubní větve, včetně jejich označení, potrubní třídy a armatur. Dále zobrazuje podrobněji jednotlivá zařízení, účastnící se procesu a také prvky měření a regulace procesu s bezpečnostními prvky. Základní prvky, resp. jejich symboly a značky nacházející se na výkrese P&ID uvádí tabulka 8.

Tabulka 8 Symboly a značky pro výkres P&ID

	Hlavní potrubí		Soustředná redukce		Místní přístroj
	Vedlejší potrubí		Jednostranná redukce		Měřící přístroj (funkce jsou dostupné na velínu)
	Otápěné potrubí		Trojcestý ventil		Měřící přístroj (funkce jsou dostupné v řídícím systému DCS, ovládání z velínu není možné)
	Dálkově ovládaní armatura		Zpětná klapka		Měřící přístroj (funkce jsou dostupné v řídícím systému DCS, ovládání z velínu)
M	Armatura s elektrickým pohonem		Šoupátko		Měřící přístroj (funkce jsou dostupné v řídícím systému PLC, ovládání z velínu)
	Přímý ventil		Kulový ventil		Regulační ventil setrvávající v poloze při poruše (s tendencí se otevírat)
SGI	Průhledítko		Y-filtr		Regulační ventil otevírající se při poruše
	Redukční ventil		Akční člen (pohon)		Regulační ventil zavírající se při poruše

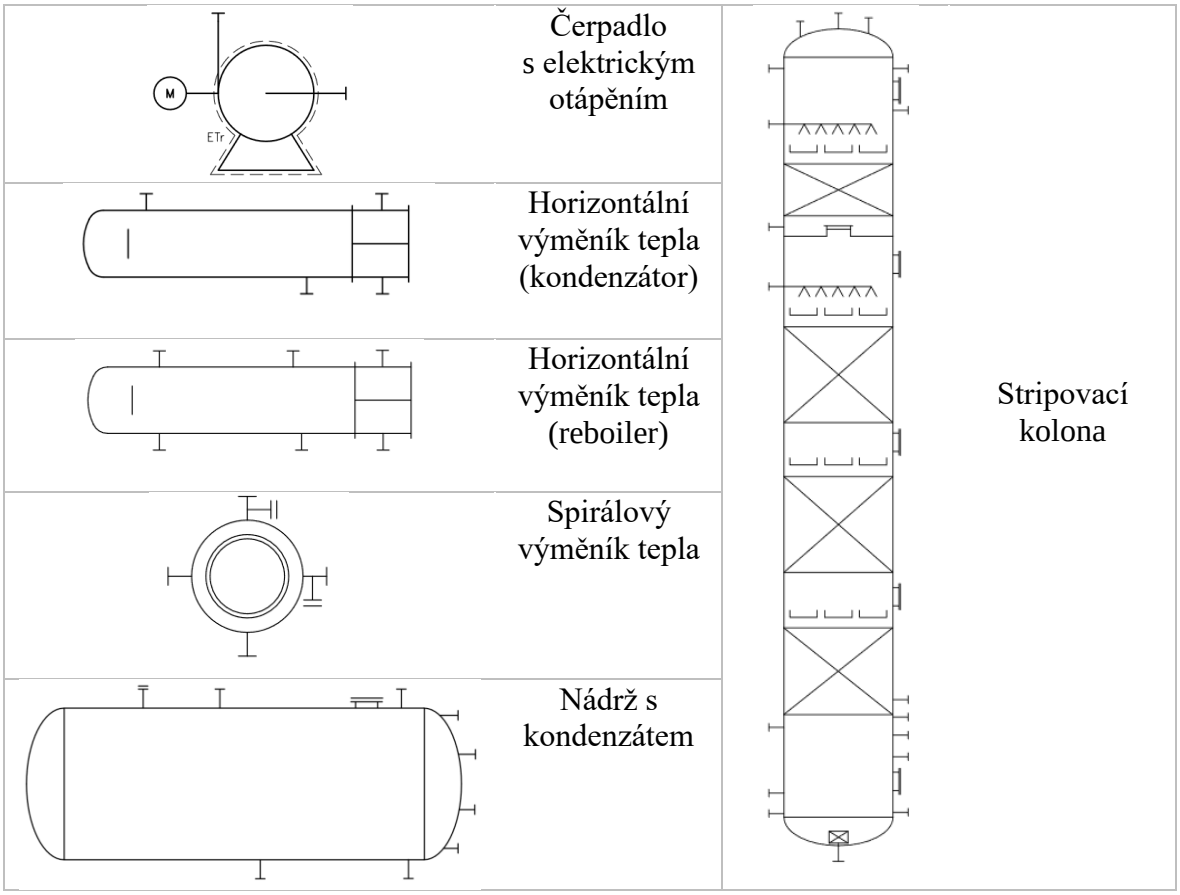
Konkrétní funkci měřících přístrojů uváděných na výkrese P&ID blíže specifikuje písemný kód, jež se obvykle skládá ze dvou písmen. První písmeno označuje měřenou nebo řízenou veličinu, zatímco písmeno na následující pozici označuje regulátor, zobrazovací nebo výstupní funkci. Nejčastější symboly uvádí následující tabulka 9.

Tabulka 9 Písemný kód pro označení funkcí přístrojů

První písmeno		**Následující písmena**	
Písmeno	**Význam**	**Písmeno**	**Význam**
D	Hustota	**D**	Rozdíl
F	Průtok	**E**	Poměr
L	Hladina	**J**	Snímání
M	Vlhkost	**A**	Alarm, signalizace
P	Tlak	**C**	Regulace
Q	Kvalita (koncentrace)	**I**	Zobrazování
S	Rychlost nebo frekvence	**R**	Zapisování
T	Teplota	**T**	Vysílání
K	Čas	**S**	Spínání

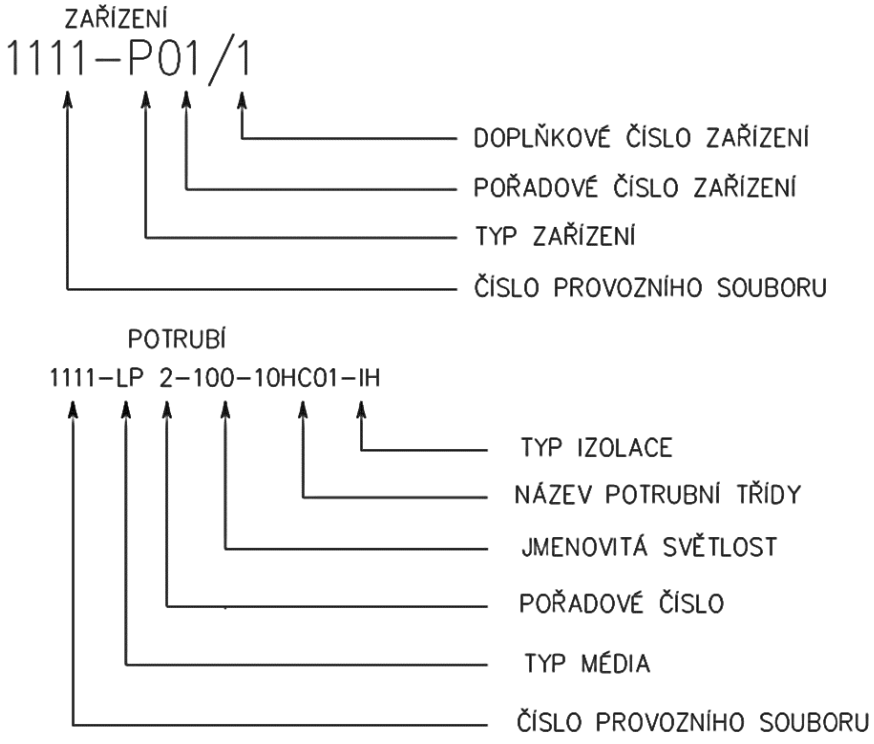
Dále jsou nedílnou součástí výkresové dokumentace P&ID samotná technologická zařízení procesu. Tabulka 10 proto pro úplnost výkladu uvádí schématické značky zařízení vyskytujících se v řešeném procesu stripování kyselých vod.

Tabulka 10 Značky jednotlivých zařízení



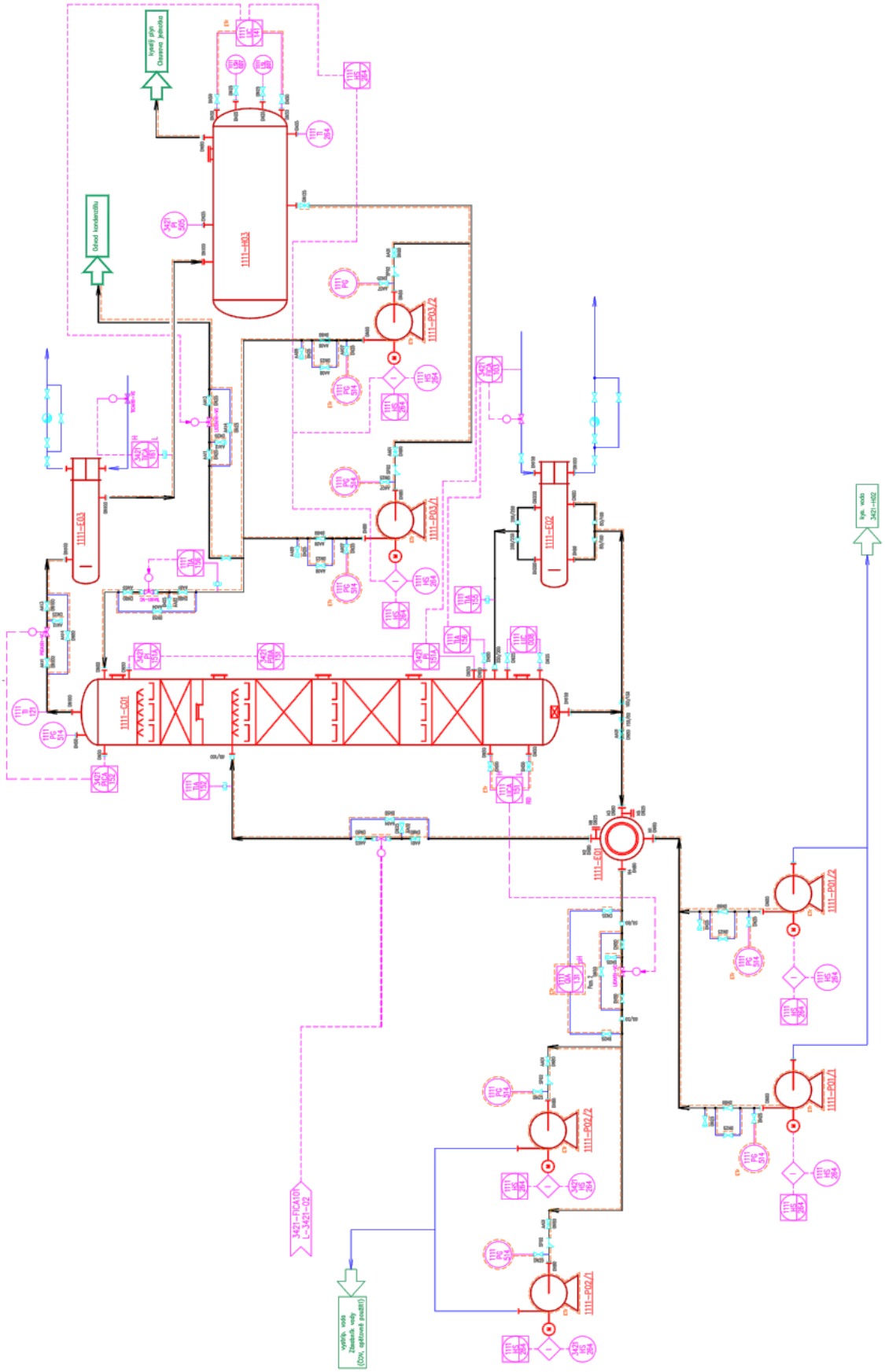
Při návrhu P&ID výkresu v softwaru AutoCAD Plant3D se postupuje následujícím způsobem. Po umístění šablony výkresu a popisového pole do prostoru, jsou nejprve vytvořeny a vloženy značky zařízení, s rozmístěním odpovídajícímu výkresu PFD. Na rozdíl od PFD diagramu jsou již v P&ID například zdvojena čerpadla, přičemž jedno čerpadlo je provozní, u kterého je předpokládaný obvyklý provoz a druhé z čerpadel je čerpadlo rezervní, které je připravené zastoupit funkci čerpadla prvního v případě jeho poruchy či potřebě jeho odstavení.

Následně je zapotřebí vhodně zvolit a nakreslit v softwaru potrubní větve, které vzájemně propojují zařízení a aparáty. U potrubních tras, které vyžadují elektrické otápění se toto otápění znázorňuje oranžovou přerušovanou čarou kopírující trasu samotného potrubí. Dalším krokem je naznačení potrubních tras, jež souvisí s návaznými procesy. Tyto proudy jsou ve výkresu vedeny modrou barvou, přičemž obvykle nejsou součástí zadání projektu. V momentě, kdy jsou veškeré zařízení vzájemně propojeny potrubními trasami, jsou zavedeny do výkresu armatury, redukce a příruby včetně jejich popisků a označení. Způsob značení, který byl v této diplomové práci použit pro veškerá zařízení a potrubí vysvětluje obrázek 26.



Obrázek 26 Příklad označení zařízení a potrubí

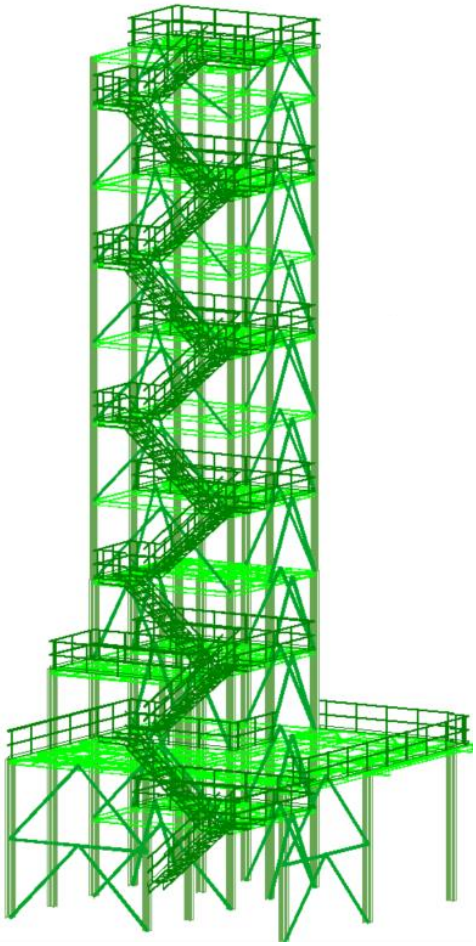
Výsledný vytvořený P&ID výkres je ilustrativně ve zmenšené podobě znázorněn na následujícím obrázku 27 na další straně. A v plné velikosti a provedení je vytvořený výkres P&ID uveden jako Příloha č. 4 této diplomové práce.



Obrázek 27 Sestavený P&ID výkres

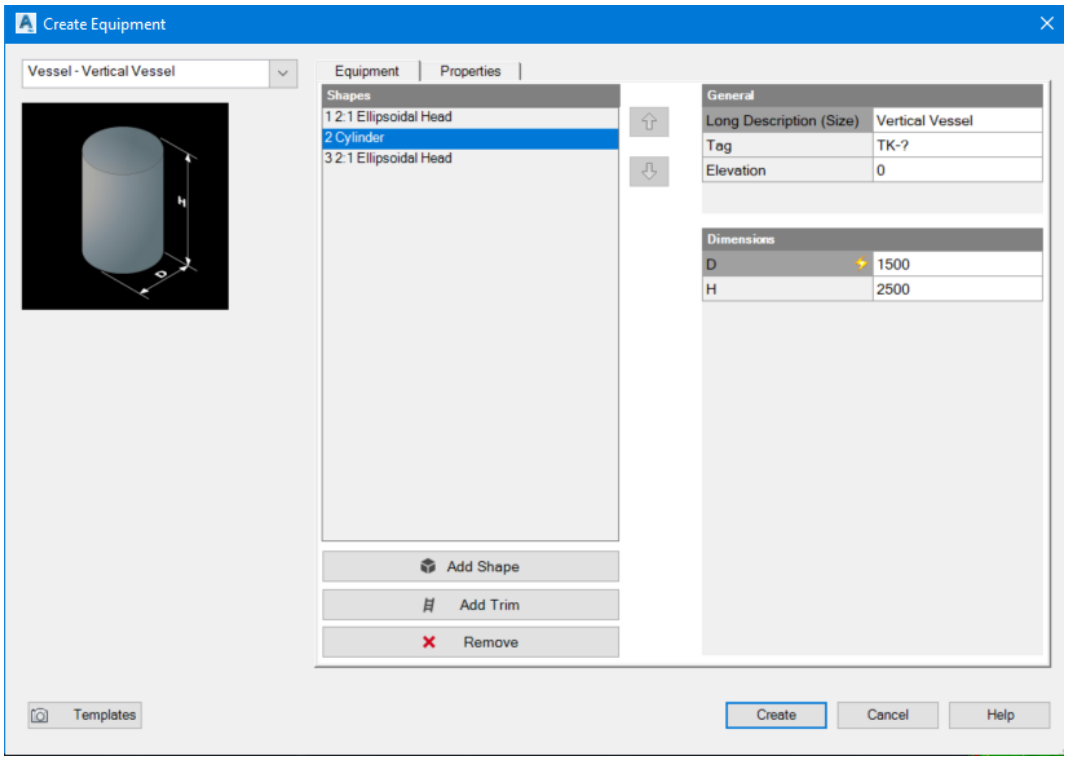
5.3 3D model

Pro vytvoření 3D modelu procesu poskytla projekční společnost vytvořenou ocelovou konstrukci, definující prostorové možnosti pro umístění jednotlivých zařízení a potrubních větví. Jedná se o nosnou ocelovou konstrukci, schody, jednotlivá patra, zábradlí a další části konstrukce. Při volbě trasy potrubí je tedy potřeba tuto konstrukci zohlednit a přizpůsobit jí vedení potrubí. Poskytnutou ocelovou konstrukci znázorňuje obrázek 28.



Obrázek 28 Ocelová konstrukce

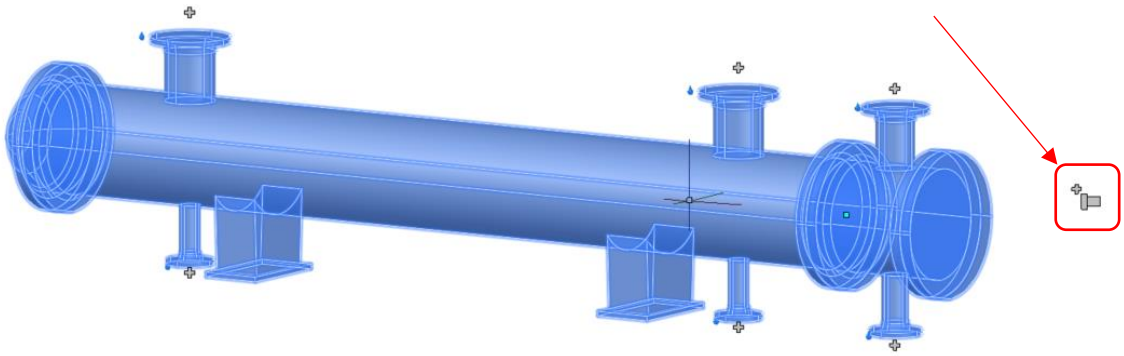
Prvním krokem, při tvorbě 3D modelu je tvorba modelů jednotlivých zařízení. Je zapotřebí vytvořit modely aparátů na základě výsledků jejich výpočtů popsaných v předchozí kapitole 4. Software AutoCAD Plant3D umožňuje vytvořit 3D modely jednotlivých zařízení pomocí režimu *Create Equipment*, založeném na nastavení hlavních rozměrů jednotlivých zařízení a jejich podpěr. Základní možnosti tohoto režimu ilustruje následující obrázek 29.



Obrázek 29 Nastavení zařízení (nádrže)

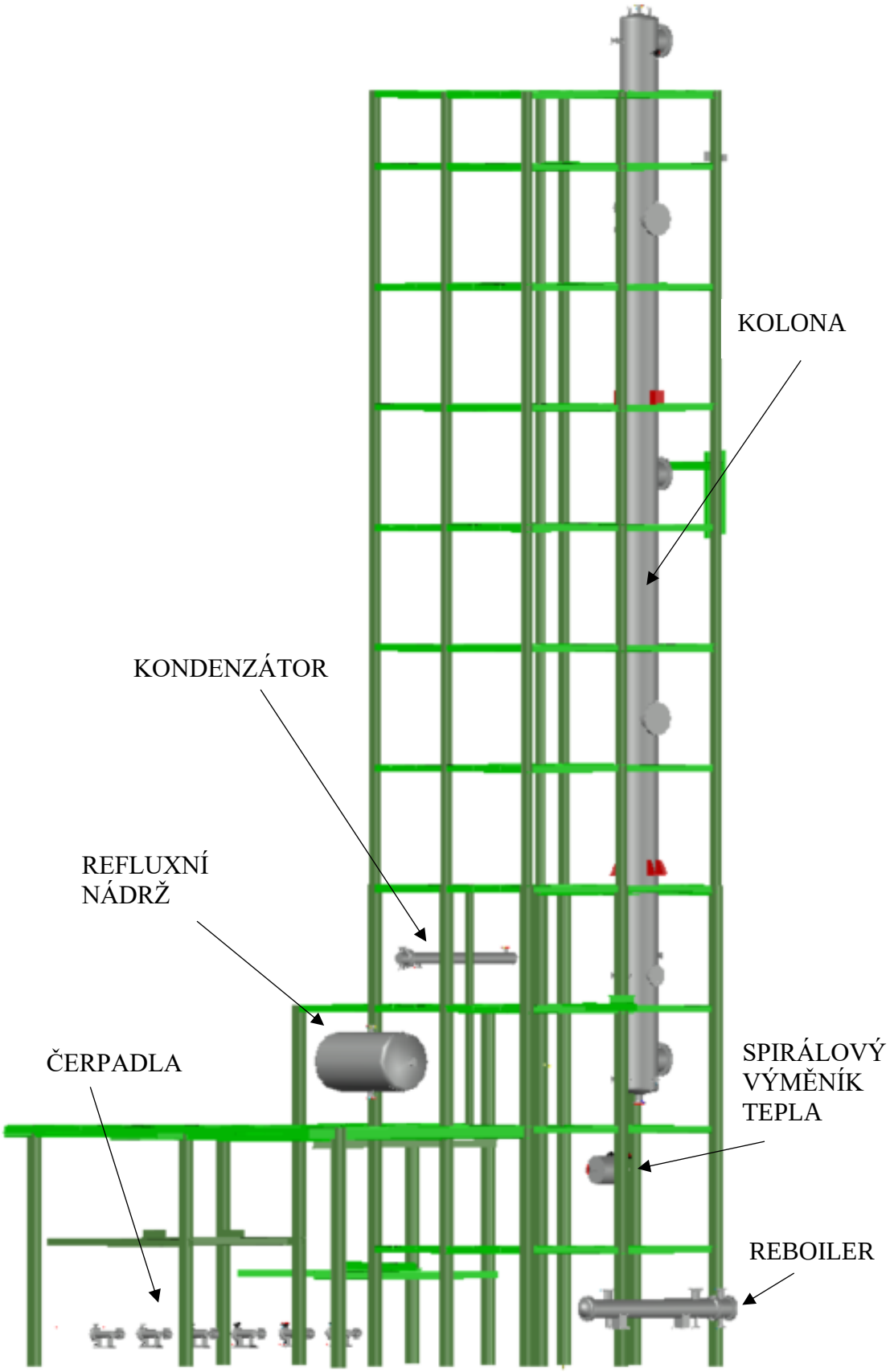
Pomocí tohoto režimu jsou tak vymodelovány všechna zařízení řešeného procesu stripování kyselých vod, tj. zadány veškerá čerpadla, veškeré výměníky tepla, refluxní nádrž a stripovací kolona.

Zmíněný režim rovněž umožňuje umístění jednotlivých hrdel, včetně nastavení jejich parametrů, a to pomocí speciální ikony, jež se po vytvoření základního modelu zařízení automaticky objeví vedle něj, jak ilustrativně znázorňuje následující obrázek 30.



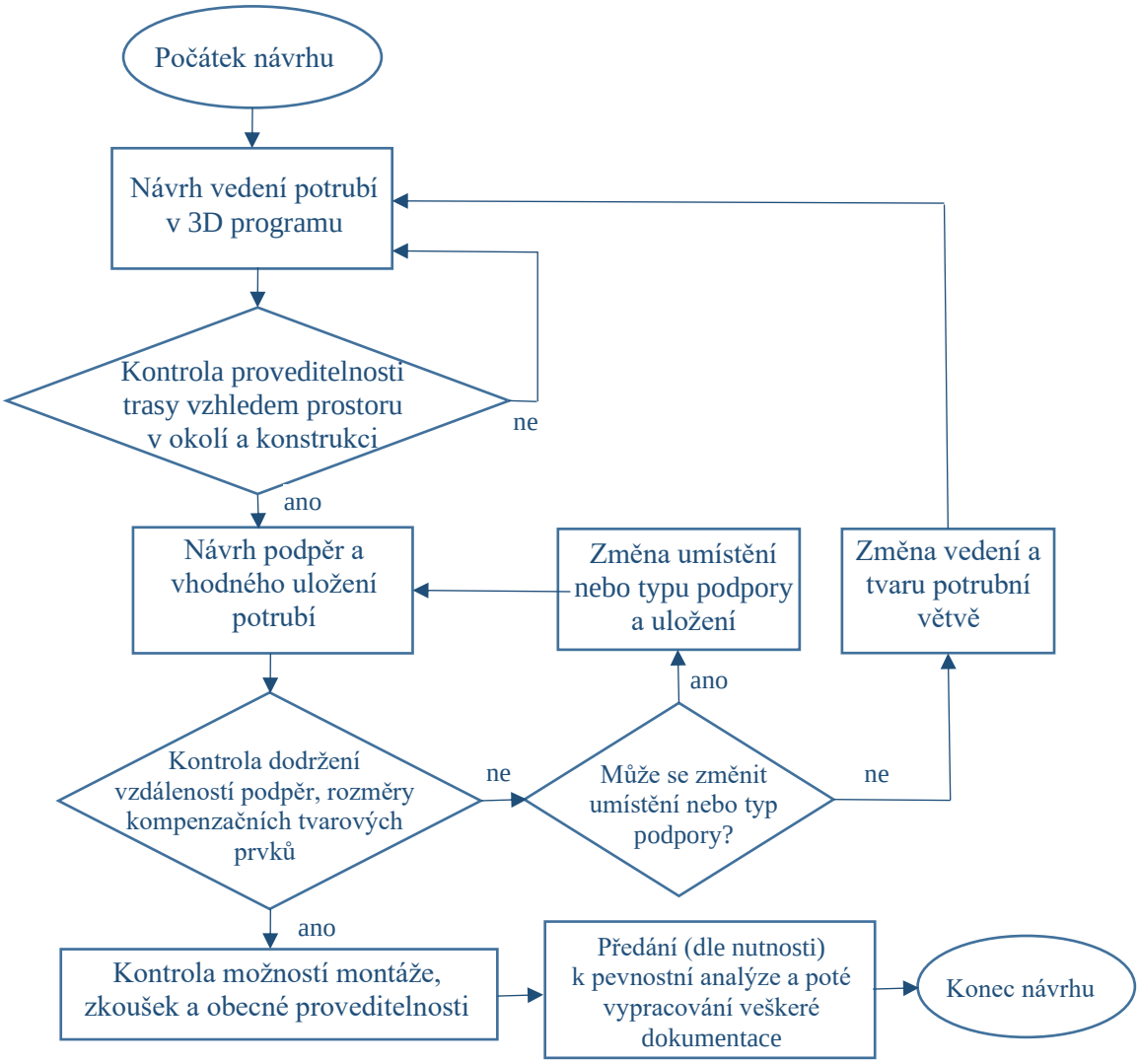
Obrázek 30 Přidání hrdel

Po vymodelování veškerých procesních zařízení je potřeba je v prostředí ocelové konstrukce vhodně umístit. Provedené rozvržení jednotlivých zařízení znázorňuje následující obrázek 31. Je z něj patrné, že na přízemním patře konstrukce jsou umístěny veškerá čerpadla a reboiler. Na prvním patře, ve výšce 3 metry, se pak nachází spirálový deskový výměník. O patro výše je umístěna refluxní nádrž. Nad refluxní nádrží je umístěn kondenzátor. Samotná kolona, upevněná v patře čtvrtém, sahá svými rozměry od druhého až po desáté patro.



Obrázek 31 Umístění jednotlivých zařízení

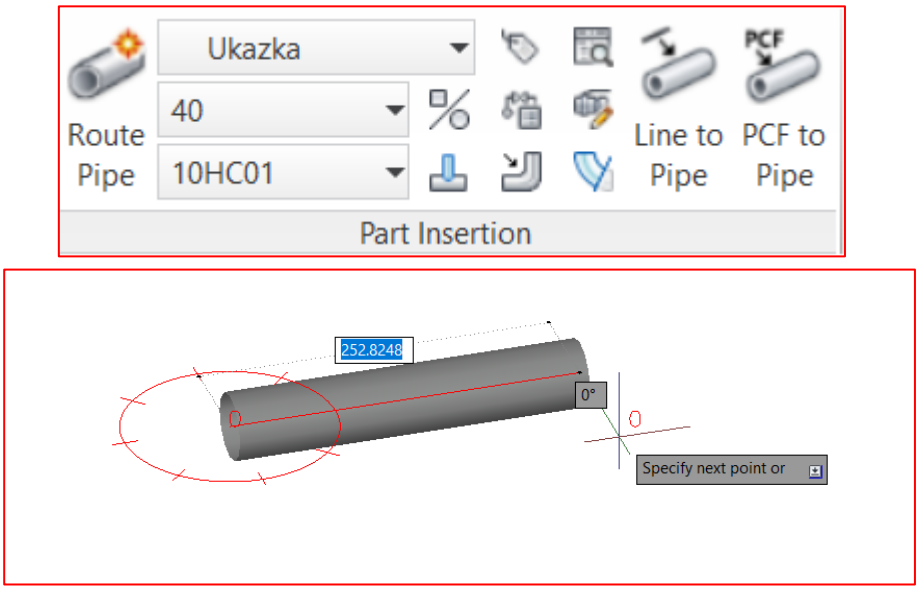
Následně je zapotřebí rozmístěná zařízení vzájemně propojit potrubím. Obecný postup tvorby potrubní trasy popisuje vývojový diagram na obrázku 32.



Obrázek 32 Vývojový diagram návrhu potrubí

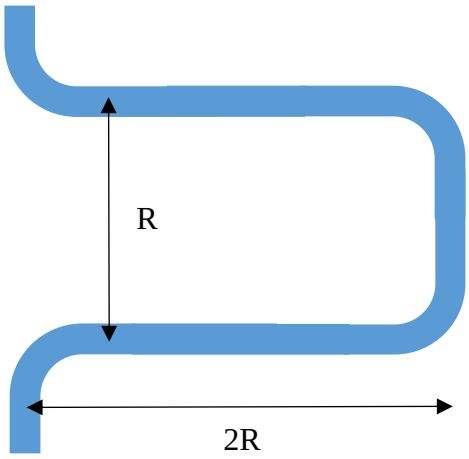
Mezi obecné zásady návrhu potrubí platí vést potrubí způsobem, který umožní bezpečný pohyb obsluhy v prostoru, jednoduchou montáž a způsobem, který nezatíží konstrukci a ostatní zařízení. Pokud to situace umožňuje, je vhodné vést potrubí ve svazcích. Svazky potrubí však mohou v některých případech vést k nadměrnému a nerovnoměrnému zatížení konstrukce kolony. Může se jednat například o situaci zatížení konstrukce větrem, který se opírá do svazku trubek vedených v horizontálním směru po konstrukci. Na tyto situace je potřeba brát ohled a popřípadě kontaktovat návrháře podpůrné konstrukce a obeznámit jej se situací a potřebami, nebo vést potrubí jiným a vhodnějším způsobem.

V programu AutoCAD Plant3D je modelování potrubí velmi intuitivní záležitost. Za pomoci nástrojů volby *Route pipe*, v horní liště na záložce *Home*, se nejprve zvolí označení potrubní trasy, potrubní třídy a DN potrubí. Poté stačí kliknout do prostoru (popřípadě začít od příruby hrdla daného zařízení) a zvolit délku a směr potrubí, jak ilustruje obrázek 33.



Obrázek 33 Nástroje k modelování a vedení potrubí

Při návrhu potrubních tras ze spirálového deskového výměníku do kolony, refluxní nádrže do kondenzátoru a horního výstupu z kolony do refluxní nádrže, je zapotřebí mít na zřeteli teplotní roztažnost potrubí a zvážit následnou kompenzaci. Jedná se o potrubí, ve kterých proudí látky s teplotou do maximálně 100 °C a jejich délka v přímém způsobu vedení potrubí dosahuje přibližně od 20 do 25 metrů. Na základě rovnice (2.10) z kapitoly 2.2.2 byl u nich proto proveden orientační výpočet, díky kterému se dospělo k závěru, že potenciální prodloužení těchto potrubí může dosáhnout hodnot až do 23 mm. Z tohoto důvodu byl zaveden do potrubní trasy tvarový U kompenzátor. Výpočet rozměrů tohoto kompenzátoru byl proveden podle [24] a blíže jej specifikuje následující tabulka 11 a obrázek 34. [24]

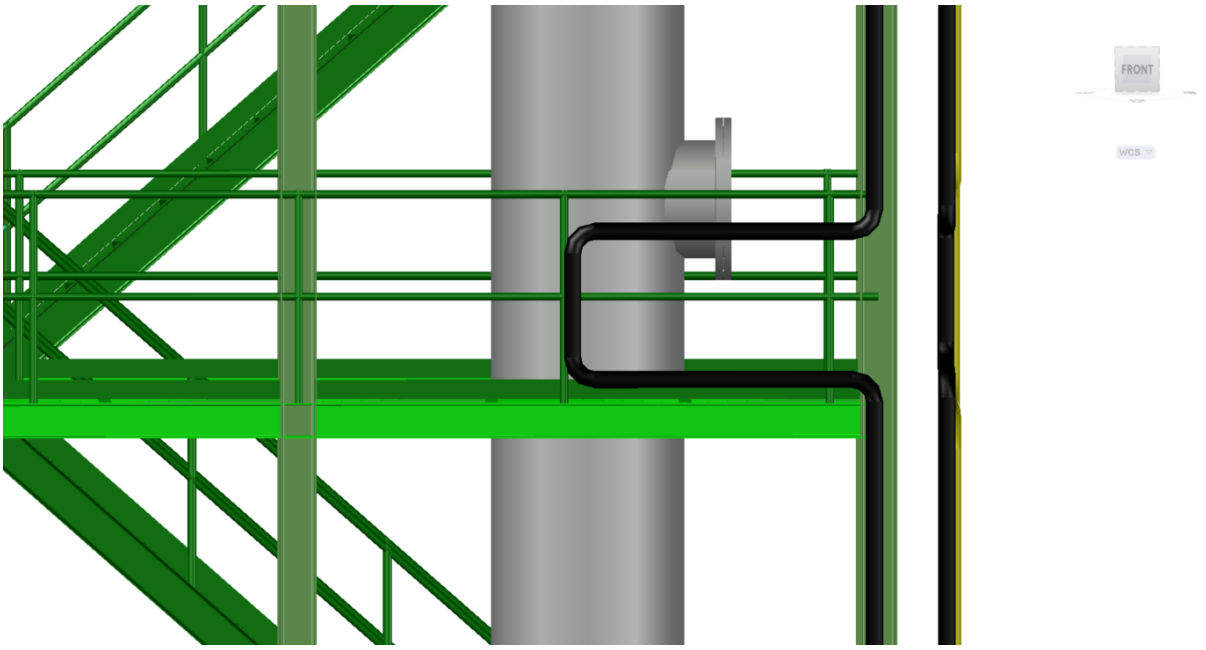


Obrázek 34 Charakteristický rozměr R kompenzátoru U

Tabulka 11 Přibližné hodnoty charakteristických rozměrů [24]

Vnější průměr trubky [mm]	**Prodloužení trubky [mm]**						
	12	**25**	**38**	**50**	**75**	**100**	**125**
	Charakteristický rozměr R [mm]						
12	195	281	347	398	488	562	627
15	218	315	387	445	548	649	709
18	240	350	430	495	600	700	785
22	263	382	468	540	660	764	850
28	299	431	522	609	746	869	960
35	333	479	593	681	823	960	1072
42	366	528	647	744	912	1055	1178
54	414	599	736	845	1037	1194	1333
64	450	650	801	919	1126	1300	1453
76,1	491	709	784	1002	1228	1418	1585
88,9	531	766	944	1083	1327	1532	1713
108	585	844	1041	1194	1463	1689	1888
133	649	937	1155	1325	1623	1874	2095
159	710	1025	1263	1449	1775	2049	2291
219	833	1202	1482	1700	2083	2405	2689

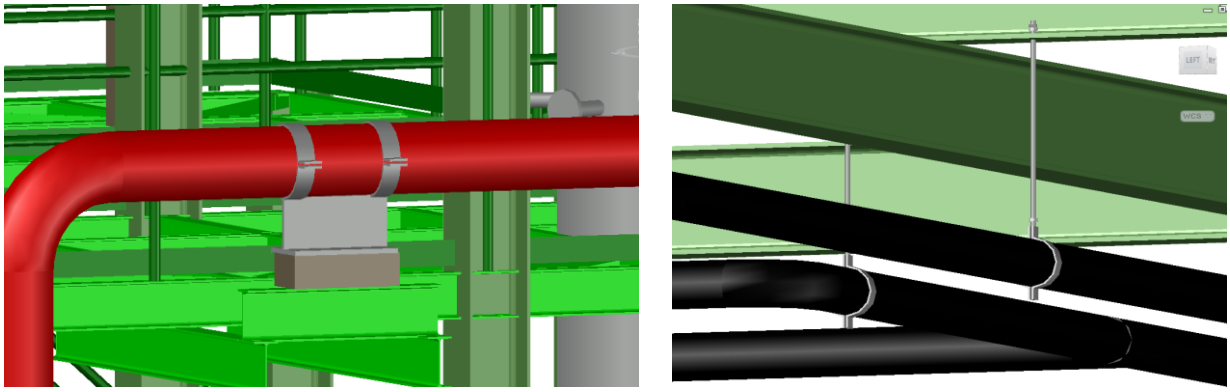
Podle tabulky 12 je tak pro příslušnou hodnotu prodlužení trubky o průměru 88,9 mm zvolen charakteristický rozměr o hodnotě 766 mm. Vymodelované potrubí (černou barvou) s tvarovým kompenzátorem v tomto provedení je vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 Vymodelovaný tvarový kompenzátor

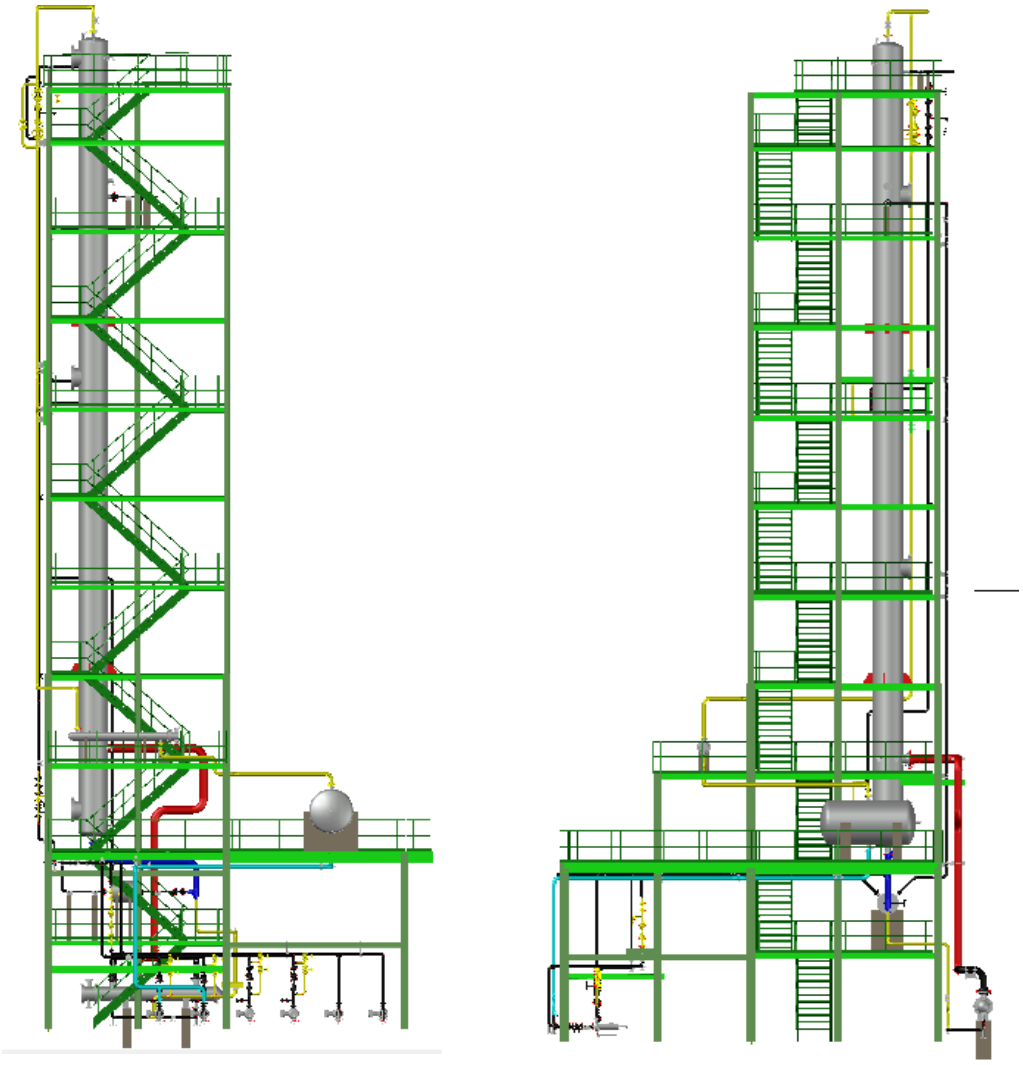
Uložení potrubí a způsobu uchycení trubek se blíže věnuje kapitola 2.2.2. Pro modelování podpor v programu AutCAD Plant3D se využívá paleta nástrojů, která nabízí řadu možností podpor. Tyto konkrétní podpory je ovšem možné dále přizpůsobit konkrétním požadavkům. Při modelování je pak zapotřebí pouze vybrat jednu z podpor potrubí a místo, kde se bude podpora

nacházet. Uchycení se pak automaticky přizpůsobí rozměrům potrubí. Dva ilustrativní příklady jsou uvedeny na obrázku 36 (kluzná podpora potrubí a uchycení potrubí pomocí závěsu).

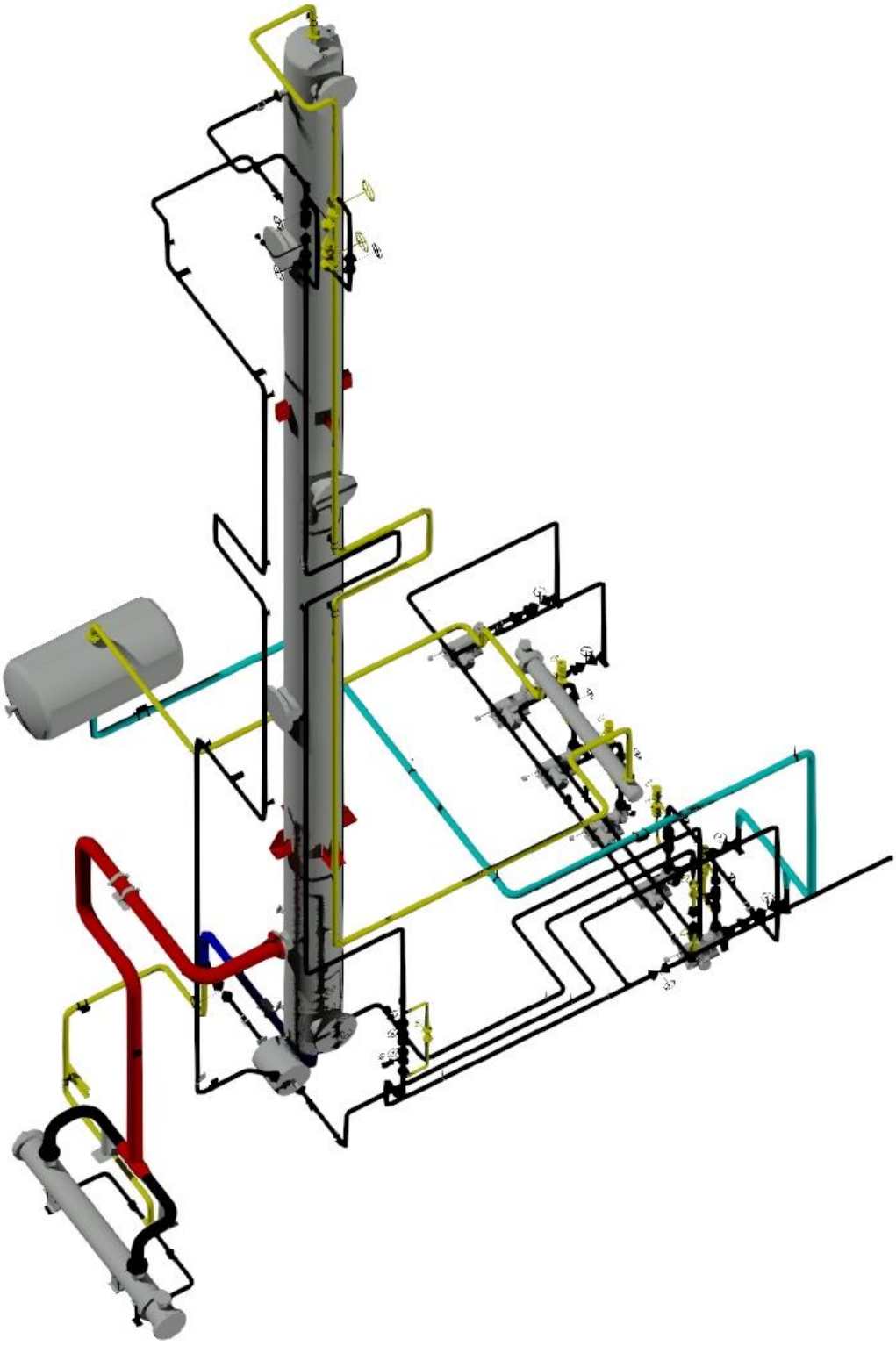


Obrázek 36 Dva příklady uložení potrubí: kluzná podpora (vlevo) a závěs (vpravo)

Výsledný 3D model procesu (obsahující veškeré procesní zařízení, potrubní větve a jejich podpěry a nosnou ocelovou konstrukci) je znázorněn na obrázcích 37 a 38. Obrázek 37 zachycuje boční pohledy na celý systém, včetně konstrukce, zatímco obrázek 38 přibližuje 3D model jiným způsobem - bez konstrukce, pouze zařízení a potrubní trasy včetně jejich podpor.



Obrázek 37 Boční pohledy na konstrukci, zařízení a potrubní trasy

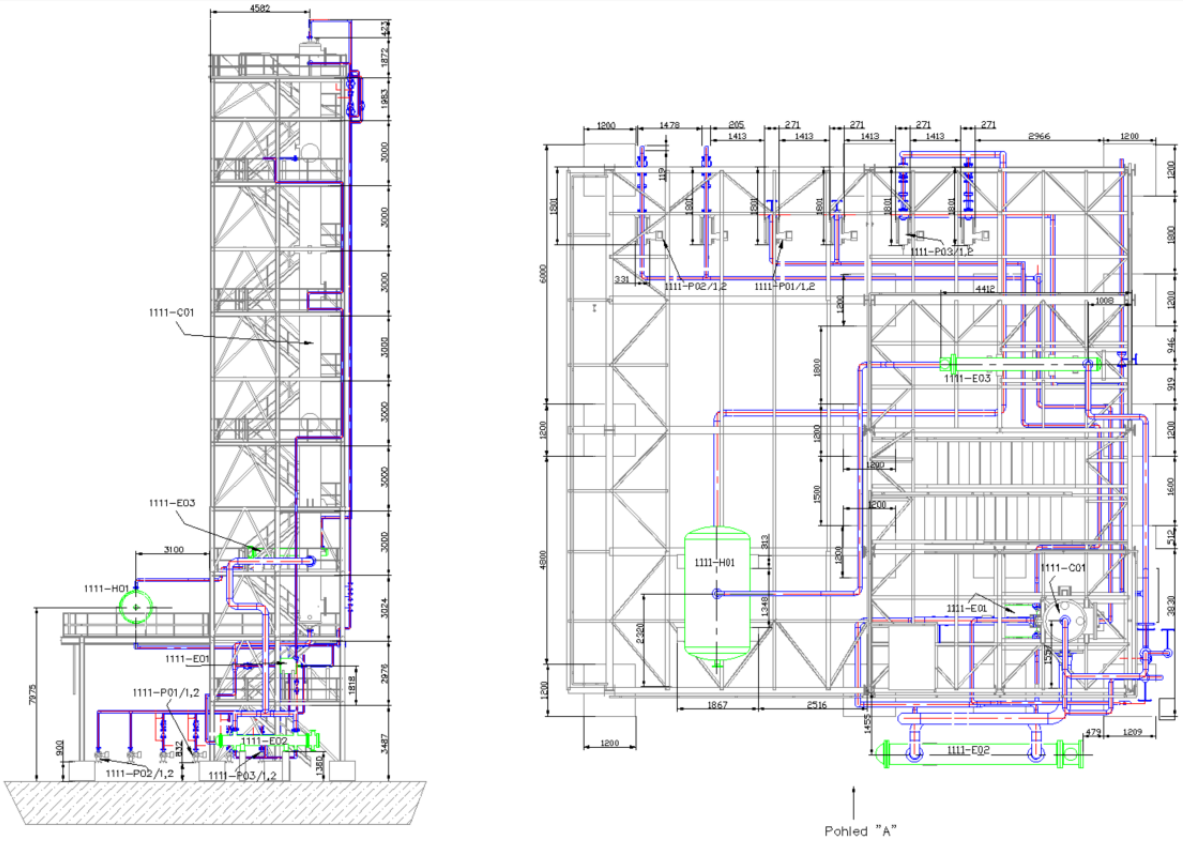


Obrázek 38 Pohled na zařízení a potrubí

Znázornění ukázaná na obrázcích 37 a 38 však slouží projektantům pouze jako pomocné nástroje k lepší představě o modelu a celém systému. Konkrétní rozměry a rozmístění jednotlivých zařízení pak popisují dispoziční výkresy a izometrické výkresy. Tvorbě této technické dokumentace se budou věnovat následující kapitoly 5.4 a 5.5.

5.4 Dispoziční výkresy

Po sestavení 3D modelu procesu je možné přistoupit k tvorbě dispozičních výkresů. Tato výkresová dokumentace bývá také nazývaná ortografické výkresy. V programu AutoCAD Plant 3D slouží k vytvoření těchto výkresů funkce *Create Ortho View*, s jejíž pomocí se vybírají potřebné pohledy a části k vytvoření dispozičního výkresu. Dispoziční výkresy mají za úkol především upřesnit umístění veškerých zařízení vzhledem k okolnímu prostoru, kde se nacházejí. Umožňují přehledněji se orientovat v rozmístění zařízení v rámci celého areálu, jehož součástí bývá obvykle celá řada systémů, budov a zařízení. Dispoziční výkres by měl také znázorňovat pohledy, které budou schopné lépe identifikovat situaci a výšku, ve které se nacházejí jednotlivá zařízení a konkrétní patra konstrukcí či budov. Pro lepší orientaci se používá také tabulka nad popisovým polem, která uvádí zařízení, nacházející se ve výkrese. Hlavní části dispozičního výkresu vytvořeného v rámci této práce znázorňuje obrázek 39. Výkres byl vytvořen ve formátu A1, z důvodu maximálního možného měřítka v poměru 1:100 a vysoké stripovací kolony. Řez kolonou by v tomto případě sice mohl být jedním z řešení pro výkres menšího formátu, ovšem kvůli přehlednosti byla raději zvolen způsob provedení výkresu, jež ilustruje zmíněný obrázek 39.



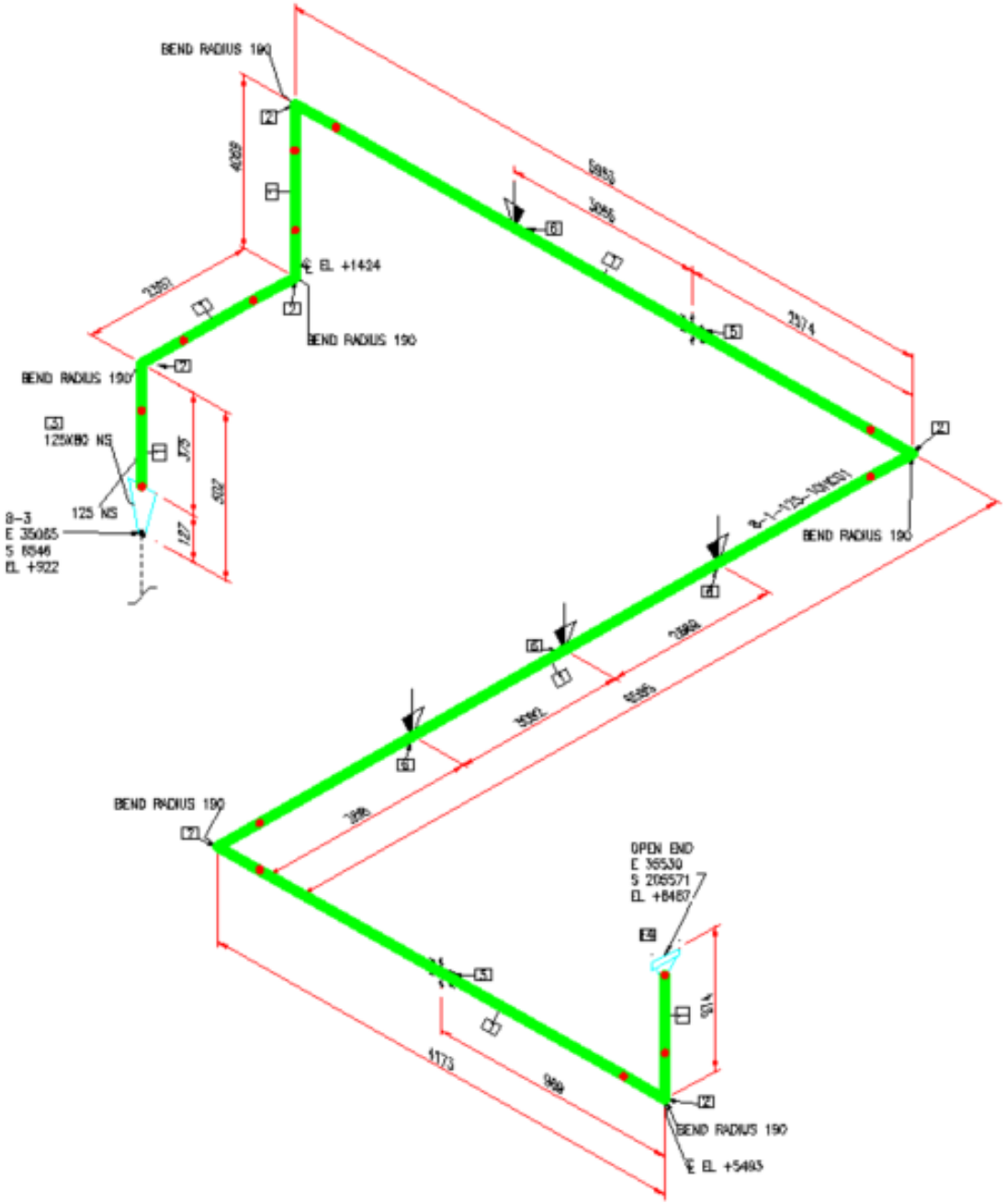
Obrázek 39 Část dispozičního výkresu

Kompletní dispoziční výkres ve formátu PDF tvoří Přílohu č. 5 této diplomové práce.

5.5 Izometrické výkresy

Izometrické výkresy popisují velmi detailně jednotlivé potrubní větve. Jedná se o výkresy, na kterých se nachází potrubní trasa s kótami a poznámkami sdělujícími, jak dlouhá je daná část potrubí, kde se nachází kolena, příruby, armatury a podpory včetně odkazů na tyto jednotlivé prvky v kusovníku, automaticky vygenerovaném a umístěném do pravé části výkresu nad popisové pole. Obvykle bývají součástí izometrických výkresů také informace o elevaci, tj. výšce v níž se daná potrubní větev nachází. Při tvorbě potrubních tras řešeného procesu

stripování odpadních vod byly jednotlivé větve označeny popisným číslem. Celou soustavu potrubí procesu přitom tvoří 10 větví. Každá z těchto větví byla označena příslušným číslem od 1 do 10 a při generování izometrických výkresů rozdělil program danou větev automaticky (dle situace) na více výkresů. Například větev 8 (což je větev mezi refluxní nádrží a čerpadly refluxu) byla takto rozdělena na čtyři dílčí výkresy (části). U některých z automaticky vygenerovaných výkresů bylo dále potřeba zvážit, zda není příliš nepřehledný a zda není vhodnější jej ještě dále rozdělit na více výkresů. To pak umožňuje, například montážním pracovníkům, rychlou orientaci ve výkresové dokumentaci při montáži. Na obrázku 40 je pro ilustraci znázorněn vygenerovaný izometrický výkres hlavní (první) části zmíněné větve 8, tj. výkres 8-1, jež na svém konci odkazuje na navazující část (tj. na výkres 8-3 k čerpadlu). Zbytek větve 8 (k rezervnímu čerpadlu), pak znázorňují navazující výkresy označené 8-2 a 8-4.



Obrázek 40 Ukázka izometrického výkresu první části potrubní větve 8

Veškeré vytvořené izometrické výkresy jsou součástí Přílohu č. 6 této diplomové práce.

6 Pevnostní výpočet potrubí

Tato kapitola popisuje řešení posledního úkolu této diplomové práce, kterým je seznámit se s obsluhou softwaru AutoPIPE a s jeho pomocí provést analýzu namáhání vybrané potrubní větve. Pro přehlednost a souvislost řešení bude nejprve uveden stručný teoretický úvod do pevnostních výpočtů potrubí následovaný samotnou analýzou namáhání vybrané potrubní větve v programu AutoPIPE.

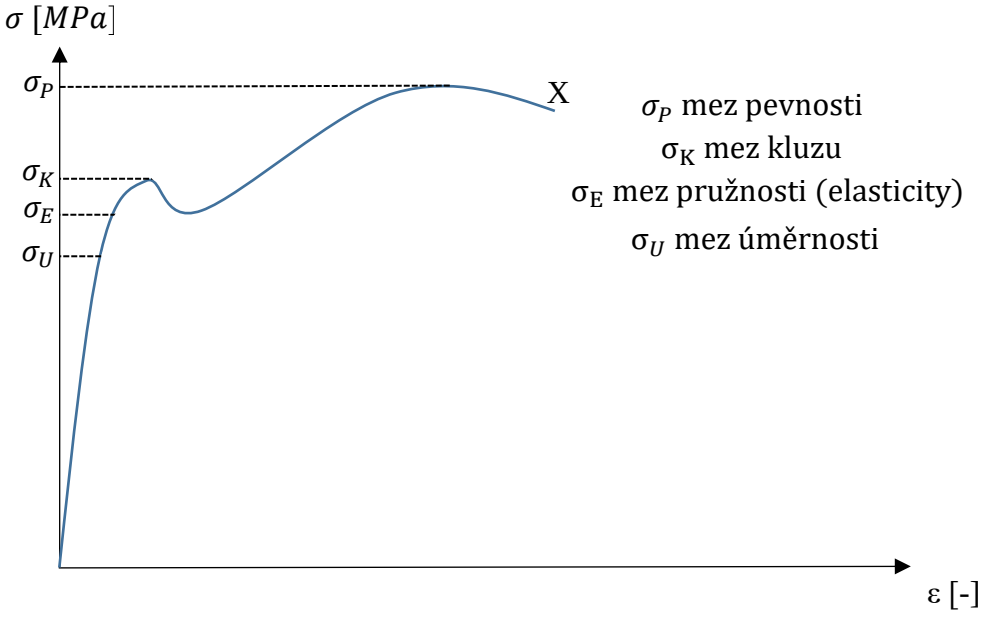
6.1 Úvod do pevnostního výpočtu potrubí

Pro zajištění bezpečného provozu je zapotřebí provádět pevnostní analýzu potrubí, jejímž úkolem je zjistit skutečné namáhání v materiálu potrubí. Samotné zařízení je pak nutné provozovat pouze v provozních režimech, při nichž je hodnota skutečného namáhání nižší než hodnota nejvyššího dovoleného namáhání, závisící na použitém materiálu. Hodnota nejvyššího dovoleného namáhání se odvíjí od meze kluzu materiálu, kterou lze určit pomocí experimentální zkoušky tahem. Při výpočtu pevnosti potrubí je přesnost jedním ze základních požadavků.

Přesnost pevnostního výpočtu závisí na znalosti materiálových charakteristik, konkrétního provozního namáhání a zvolené metodě výpočtu. K eliminaci případných nepřesností v pevnostním výpočtu příslušného zařízení či potrubí se používá tzv. bezpečnostní koeficient. Tento koeficient snižuje maximální dovolené napětí materiálu, což vede k bezpečnějšímu pevnostnímu návrhu.

U procesních zařízení a potrubí se předpokládá, že během provozu nebude docházet k jejich trvalé deformaci způsobené namáháním. Přípustné jsou pouze deformace elastické, při kterých nedochází k trvalému poškození materiálu, jelikož se z nich materiál po odlehčení dokáže vrátit opět do původního stavu. [21]

Pro pevnostní výpočet je proto důležitá znalost Hookova zákona elasticity, který popisuje přímou úměrnost mezi napětím a elastickou deformací. Modul pružnosti v tahu (tzv. Youngův modul pružnosti) je konstantou úměrnosti, která je odlišná pro různé typy materiálů. Oblast Hookova zákona přestává platit v momentě, kdy se začíná projevovat nelinearita. Závislost mezi napětím a poměrným prodloužením popisuje deformační diagram na obrázku 41. [25]



Obrázek 41 Deformační diagram [25]

Pomocí význačných bodů vynesenými na ose y na zmíněném obrázku 41 se následně rozlišují významné oblasti namáhání, kterými dle [25] jsou:

- σ_U - oblast s napětím na mezi úměrnosti. Oblast Hookova zákona, splňující podmínku linearity, jakožto závislosti napětí na poměrném prodloužení.
- σ_E - oblast s napětím na mezi pružnosti (elasticity), vymezující místo, od kterého již může docházet k trvalým deformacím.
- σ_K - oblast s napětím na mezi kluzu, při kterém dochází k částečné poruše krystalické mřížky materiálu. V materiálu se vytváří plastická deformace a ten tzv. teče.
- σ_P - oblast s napětím na mezi pevnosti. Dochází k trvalé poruše až do bodu X, při kterém nastane přetržení materiálu.

Jelikož se při pevnostním výpočtu uvažuje o potrubí jako o tenkostěnné takové nádobě, resp. skořepině, uvažuje se namáhání materiálu tečným napětím, které vzniká vnitřním tlakem. Radiální napětí se tedy zanedbává. Toto zjednodušení je platné pouze pokud je tloušťka potrubí zanedbatelně menší než průměr potrubí a pokud se nebere v potaz vnější přetlak. Mezi další způsoby namáhání potrubí může ovšem patřit namáhání způsobené teplotní dilatací a dále přídavné zatížení způsobené větrem či sněhem. Pro bezpečný návrh potrubí je zapotřebí, aby hodnota tečného napětí byla menší či maximálně rovna nejvyššímu dovolenému napětí. U výpočtu tloušťky stěny tenkostěnného potrubí je také zapotřebí brát v potaz hodnoty korozních a erozních přídavků. Rovnici pro získání hodnoty tloušťky stěny *t* popisuje tzv. Lamého vzorec (7.1), přičemž je zapotřebí znát hodnotu součinitele svarového spoje *z* (0,5 až 0,8; pro bezešvé potrubí 1), dovolené namáhání *f*, dopočítané z pevnosti a meze kluzu, vnější průměr trubky D_o a hodnotu působícího vnitřní tlaku *p*. [21]

$$t = \frac{p \,.\, D_O}{2 \,.\, f \,.\, z + p} \qquad (6.1)$$

6.2 Pevnostní analýza pomocí softwaru AutoPIPE

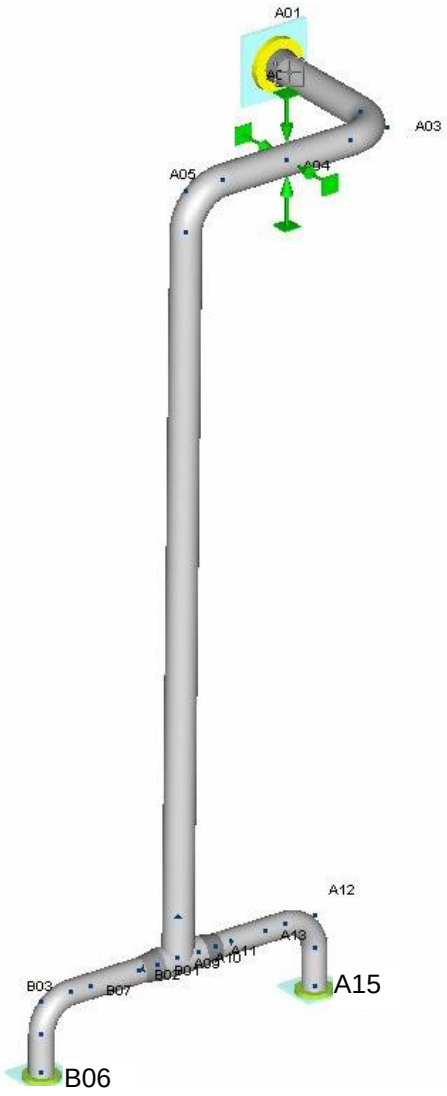
Software AutoPIPE je jedním z produktů společnosti Bentley a je využíván zejména pro pokročilou analýzu zatížení již vytvořených modelů potrubních tras a nádob. Pro pevnostní analýzu pomocí tohoto programu byla zvolena norma ČSN EN 13480. Program AutoPIPE byl poskytnut k účelům řešení této diplomové zadávající projekční společností.

Vybranou potrubní větví řešeného procesu stripování odpadních vod, u níž je požadováno provedení analýzy namáhání, je větev 1, spojující výstup z reboileru se stripovací kolonou, a to z důvodu nejvyššího tepelného a tlakového zatížení této větve z celé potrubní soustavy řešeného procesu. Software AutoPIPE nabízí, mimo jiné, možnost importu 3D modelu potrubí vytvořeného v jiném softwaru, jako například v AutoCAD Plant 3D, Ceasar II., Aveva PDS, Solidworks, Autodesk Inventor či CATIA. Z důvodu lepšího seznámení se s prostředím a prací v softwaru AutoPIPE, však možnost importu již vytvořené potrubní trasy v AutoCAD Plant 3D nebyla využita, ale jednotlivé prvky analyzované potrubní trasy byly v programu AutoPIPE postupně vymodelovány. Při modelování se přitom vycházelo z izometrického výkresu této větve vygenerovaného programem AutoCAD Plant 3D.

Pro potřeby vymodelování analyzované větve bylo nejprve v programu AutoPIPE zapotřebí tzv. založit nový projekt a provést jeho základní nastavení, kam spadá například výběr zmíněné normy a zadání okrajových podmínek za kterých bude analýza probíhat. Pro potřeby této diplomové práce je analýza dotyčné potrubní trasy prováděná pouze pro její nominální

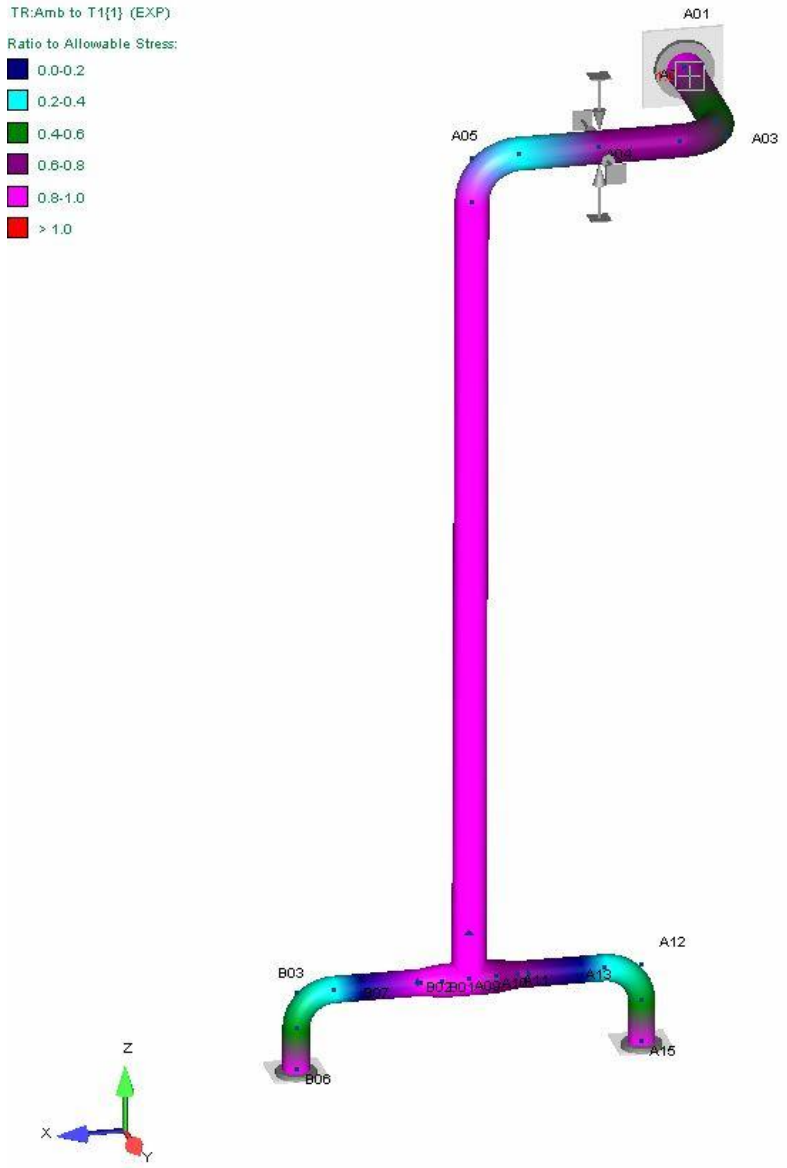
provozní podmínky. Dle dřívějších výsledků simulace v programu CHEMCAD je tedy u této potrubní trasy nastaveno provozní zatížení vnitřním tlakem 0,31426 MPa a provozní teplota 134,083 °C. Materiálové vlastnosti potrubí byly zadány na základě potrubní třídy z programu AutoCAD Plant 3D. Následně byla potrubní trasa vymodelována směrem od přírubového spoje u kolony k přírubám reboileru. Počáteční bod analyzované potrubní trasy byl v softwaru AutoPIPE nastaven jako pevný bod (pevné uložení), kterému je povolen pohyb pouze v záporném směru osy z, a to z důvodu dříve provedeného výpočtu pomocí rovnice (2.10). Tento pohyb může být způsoben teplotní dilatací kolony od místa jejího uchycení vlivem teplotní roztažnosti. Vypočtená hodnota možného posuvu v tomto bodě činí 2,97 mm.

Následně již bylo možno modelovat jednotlivé prvky analyzované potrubní větve, jako jsou příruby, redukce, rovné potrubní úseky a upevnění potrubí pomocí funkce *insert*, nacházející se na horní liště v programu AutoPIPE. Koncové body analyzované potrubní větve byly opět upevněny pevným bodem. Vzhledem k typu a rozměrům reboileru byl umožněn posuv pevného bodu B06 (viz obrázek 42) o 2,1 mm v kladném směru osy x a bodu A15 o 0,1 mm v záporném směru osy x. Rozdílné hodnoty dovoleného posuvu těchto dvou bodů jsou zapříčiněny tím, že jedna z patek reboileru je ke konstrukci pevně uchycena, zatímco druhé patce je umožněn pohyb v ose reboileru. Takto vymodelovanou první variantu provedení analyzované potrubní trasy zachycuje obrázek 42.



Obrázek 42 Varianta 1

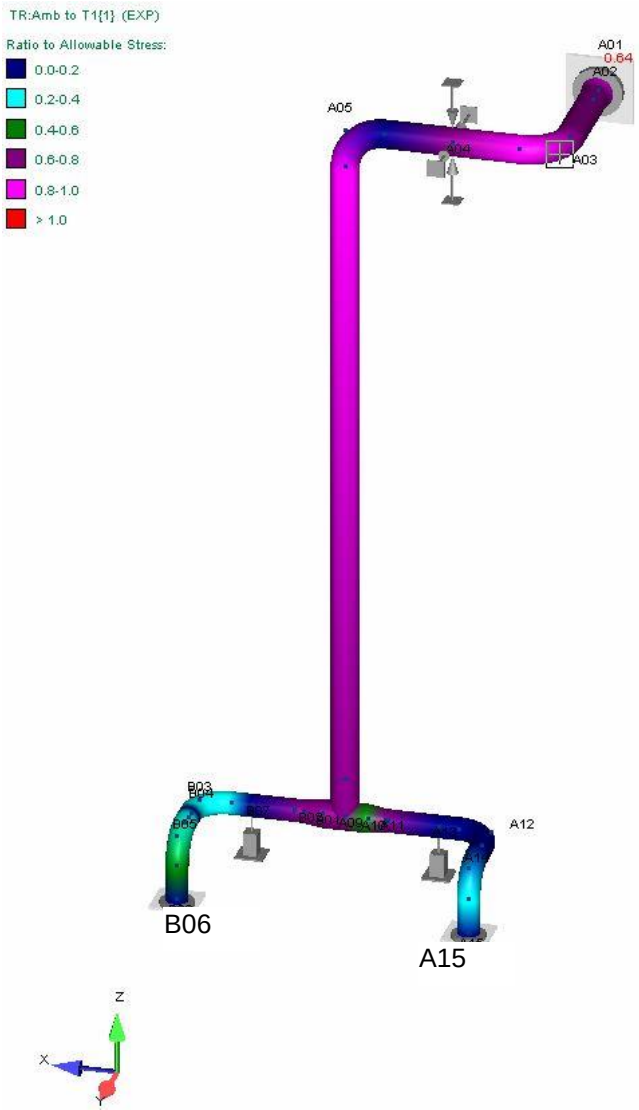
Po vymodelování této varianty potrubní trasy, byla provedena její pevnostní analýza pomocí funkce *analyse* a zobrazeny výsledky. Výsledky v podobě barevně oddělených oblastí podle poměru skutečného namáhání k dovolenému namáhání lze vidět na obrázku 43.



Obrázek 43 Výsledná analýza varianty 1

Z obrázku je zřejmé, že po trase dochází nejvýraznějšímu namáhání v přírubách a v nejdelší trubce vedené ve směru osy z. Při této variantě vedení potrubní trasy dochází k nadměrnému zatěžování materiálu potrubí vlivem silového a momentového působení způsobeného nedostatečným prostorem pro kompenzaci teplotní roztažnosti nejdelší trubky. Dále tato varianta není vhodná zejména z důvodu přílišného zatěžování potrubí jeho vlastní hmotností v bodech T-kusu a spodních přírub vedoucích k reboileru.

Proto byla vymodelována druhá varianta předmětné potrubní větve, která měla za úkol především snížit zatížení vznikající v dolních přírubách od působící hmotnosti potrubí, a tím snížit zatížení na reboiler, na nějž se tato trasa napojuje. Provedení a výsledky pevnostní analýzy této druhé varianty potrubní trasy v podobě barevně oddělených oblastí podle poměru skutečného namáhání k dovolenému namáhání jsou znázorněny na následujícím obrázku 44.

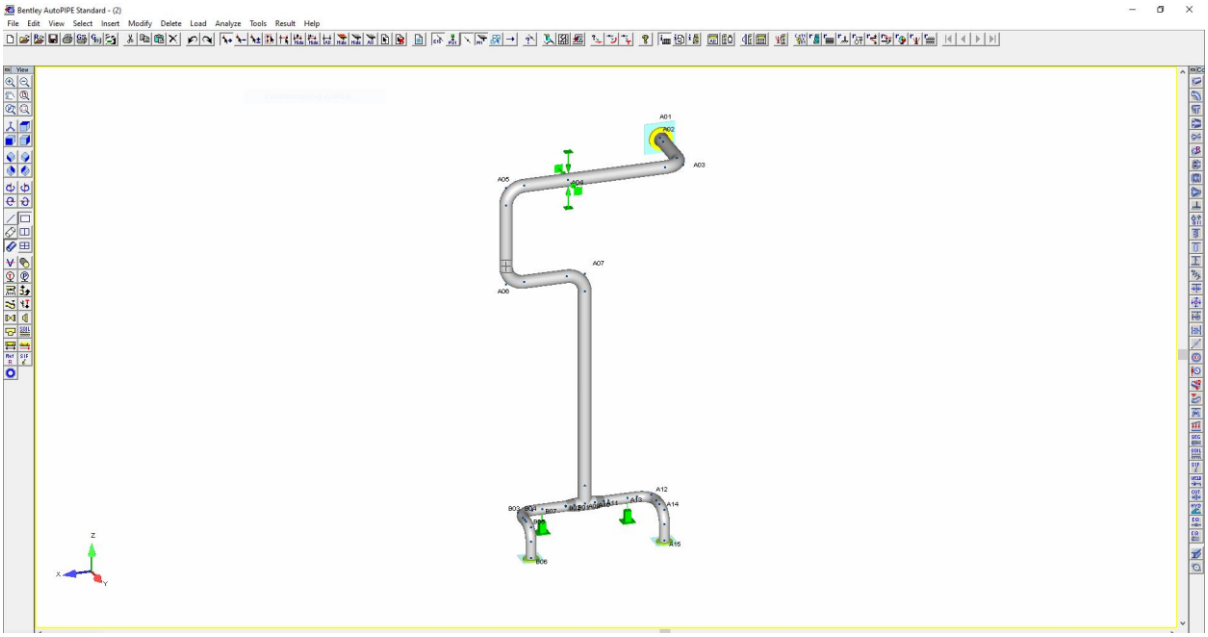


Obrázek 44 Výsledná analýza varianty 2

Z obrázku 44 je zřejmé, že se touto úpravou tvaru potrubí podařilo snížit napětí vznikající v dolních přírubách. Tato varianta je tedy vhodnější i z hlediska zmíněného nezatěžování reboileru nacházejícího se pod přírubami B06 a A15.

Avšak, jak je z obrázku 44 patrné, není stále vyřešen problém s namáháním nejdelší trubky, která vlivem vysokého teplotního zatížení dilatuje. Z tohoto důvodu byla vymodelována další nová varianta 3.

Provedení této třetí varianty analyzované potrubní trasy, včetně pracovního prostředí programu AutoPIPE lze vidět na obrázku 45 na následující straně. Provedení této třetí varianty je již navrženo tak, aby byla potrubí umožněno kompenzovat teplotní roztažnost nejdelšího vertikálního úseku. Způsob vedení kompenzátoru je přitom navržen tak, aby byl vyhovující jak z hlediska prostoru okolo zařízení, tak vzhledem k okolní nosné konstrukci.



Obrázek 45 Varianta 3 v prostředí softwaru AutoPIPE

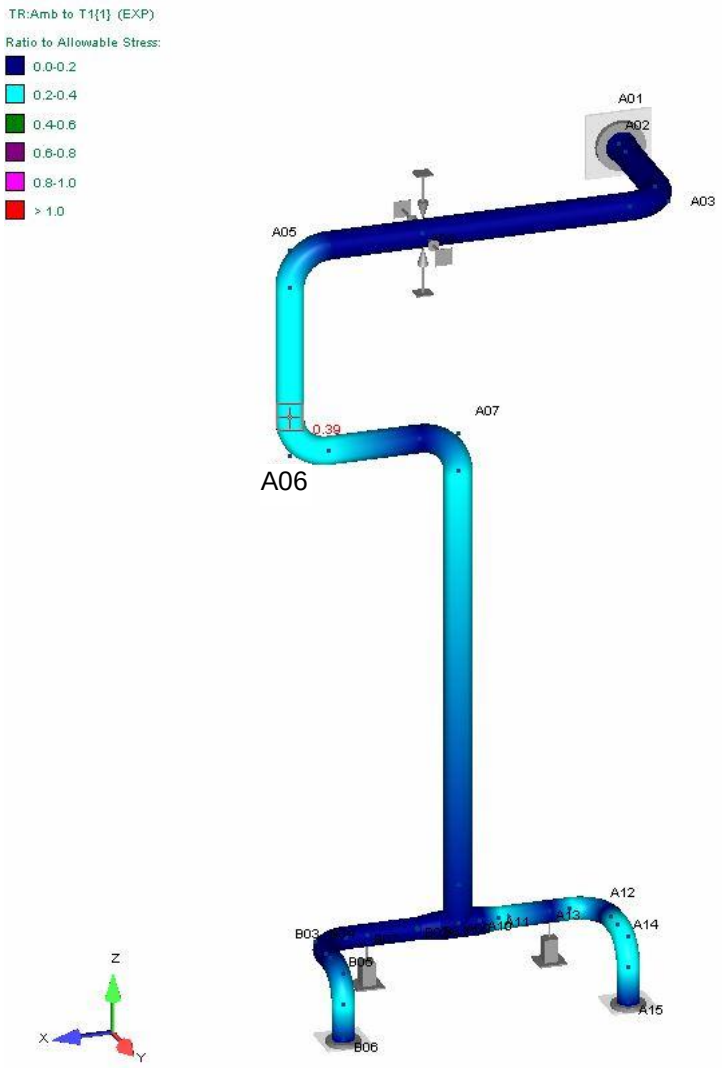
Po provedení pevnostní analýzy této třetí varianty byly v softwaru AutoPIPE opět zobrazeny obdržené výsledky ve formě barevného gradientu vyznačujícího poměr skutečného a maximálního dovoleného zatížení. Tyto výsledky jsou znázorněny na obrázku 46, umístěného, vzhledem k jeho velikosti, na následující straně.

Z grafické formy výsledků na obrázku 46 je jednoznačně zřejmé, že navržený způsob vedení potrubí ve třetí variantě je mnohem bezpečnější než obě předchozí varianty. Z výsledků je také patrné, že k největšímu zatížení bude v této třetí variantě analyzované potrubní větve docházet v částech potrubí, které slouží ke kompenzaci teplotní roztažnosti a také v kolenech, nacházejících se nad reboilerem.

Nejvyšší poměr skutečného a maximálního povoleného napětí vypočtený u této varianty softwarem AutoPIPE přitom činí 0,39 a nachází se v oblasti bodu A06, jehož pozici také zobrazuje zmíněný obrázek 46, uvedený na další straně.

Vzhledem k těmto zcela vyhovujícím dosaženým výsledkům tak lze již nyní konstatovat, že tato třetí varianta analyzované potrubní trasy představuje její výsledný bezpečně vyhovující návrh, který lze pro projektovaný proces stripování odpadních vod použit.

Posledním kontrolním krokem analýzy namáhání vybrané potrubní větve pak v softwaru AutoPIPE může být využití některé z jeho dalších užitečných doplňkových grafických, resp. vizualizačních možností pro zobrazení výpočtových výsledků provedené pevnostní analýzy, jež umožňují rychle získat o analyzované potrubní větvi v přehledné a srozumitelné podobě další detailní doplňující, resp. upřesňující výpočtové informace.

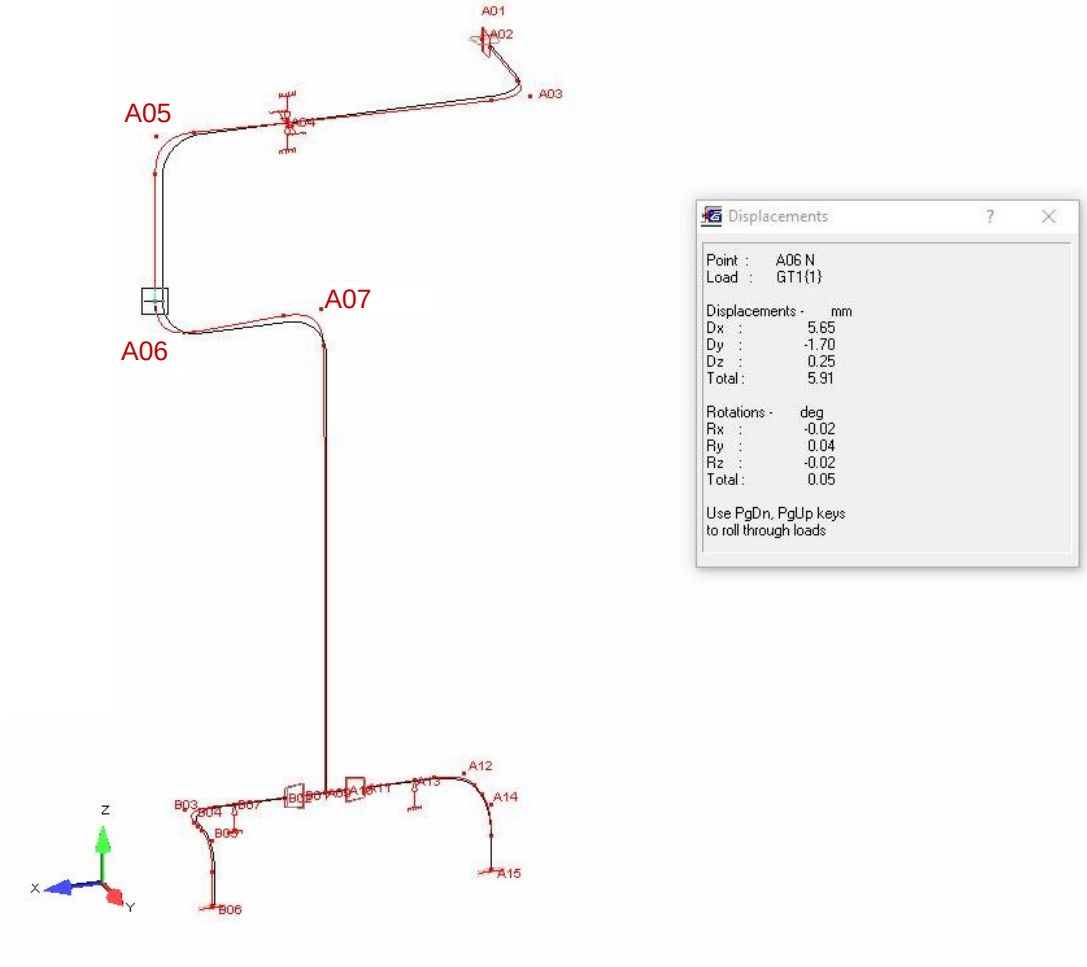


Obrázek 46 Výsledná analýza varianty 3

Jednou z takových užitečných dalších možností zobrazení výsledků, které program AutoPIPE umožňuje je tzv. *displacement.* Jedná se o grafické znázornění či animaci odchýlení jednotlivých bodů analyzované trasy od své původní polohy vlivem zatížení. Formu těchto výsledků, jež program AutoPIPE poskytuje, lze (pro analyzovanou třetí variantu potrubní větve) vidět na obrázku 47, přičemž je z něj zřejmé, že k největšímu posuvu dojde v oblasti bodů označených jako A05, A06 a A07.

Konkrétně potom u bodu A06 (jak pro něj na obrázku 47 dokládá zobrazený tabelovaný výpis výsledků) dochází k posuvu o 5,65 mm v kladném směru osy x, o 1,7 mm v záporném směru osy y a o 0,25 mm ve směru osy z.

Maximální zjištěné hodnoty posuvů jsou potom pro osu x v okolí bodu A05 a to o 6,01 mm, pro osu y v okolí bodu A06 o 1,79 mm (v záporném směru této osy) a pro osu z 6,13 mm v okolí bodu A07.



Obrázek 47 Displacement

Na základě všech výše uvedených výsledků tak lze jednoznačně prohlásit, že třetí navržená varianta analyzované potrubní trasy představuje výsledný a vyhovující návrh, který lze pro projektovaný proces stripování odpadních vod bezpečně použít.

K tomuto závěru dochází i software AutoPIPE ve svém shrnutí dosažených výsledků, v němž se uvádí, že daná potrubní trasa je v pořádku a splňuje veškeré požadavky pro provozuschopnost dle vybrané normy.

Z tohoto důvodu je pro tuto vyhovující výslednou třetí variantu potrubní trasy provedeno v softwaru AutoPIPE vygenerování detailní výpočtové zprávy a tato výpočtová zpráva je zařazena jako Příloha č. 7 této diplomové práce.

Pro úplnost je vhodné na úplný závěr této pevnostní analýzy poznamenat, že na základě těchto výsledků byla předmětná potrubní trasa ve vytvořeném 3D modelu procesu v softwaru AutoCAD Plant 3D upravena do finální podoby (odpovídající výslednému provedení potrubní trasy ve variantě 3) a následně bylo finalizováno i vygenerování izometrických výkresů, jež jsou v této finální podobě součástí (již dříve zmíněné) Přílohy č. 6 této diplomové práce.

Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na uskutečnění vybraných projekčních úkolů z oblasti projektování konkrétního průmyslového procesu stripování kyselých vod. Po nezbytném obecném úvodu do této konkrétní průmyslové oblasti provedeném v první kapitole, pak již druhá kapitola této diplomové práce zaměřuje pozornost na nezbytný základní popis technologie samotného procesu stripování kyselých vod a představení jednotlivých procesních zařízení, které jsou jeho nedílnou součástí. Mezi ně patří především stripovací kolona, výměníky tepla, čerpadla a potrubí. Současně je také u těchto zařízení v úvodním výkladu upozorněno na některé podstatné aspekty související s jejich projektováním.

V další kapitole diplomové práce je pak již představeno samotné zadání, tj. specifikace vybraných projekčních činností, jež jsou předmětem řešení diplomové práce. Zadavatelem vybraných projekčních úkolů je projekční společnost KOČKA, inženýrské technologie, spol. s r.o. Vzhledem k tomu, že zadání obsahuje celou řadu vybraných úkolů spadajících jak do oblasti řešení vlastní technologie předmětného procesu, tak do oblasti jeho konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace, je v této kapitole kladen důraz především na stručné a přehledné představení jednotlivých zadaných projekčních úkolů.

Následující kapitola diplomové práce je již zaměřena na popis řešení těch projektových úkolů, jež spadají do oblasti řešení vlastní technologie předmětného procesu. Konkrétně je pozornost zaměřena na provedení simulace procesu a návrhových či kontrolních výpočtů konkrétních procesních zařízení (stripovací kolona, reboiler, kondenzátor, čerpadla) pomocí profesionálního simulačního softwaru CHEMCAD a prezentován postup provádění těchto činností. Jedním z požadavků zadávající projekční společnosti přitom je, aby pro ohřev kyselé vody pro stripovací kolonu byl navržen spirálový deskový výměník tepla, jehož návrh však, jakožto specifického typu deskového výměníku tepla, software CHEMCAD neumožňuje. Proto je v samostatné podkapitole této části diplomové práce zaměřena pozornost na návrh tohoto výměníku tepla vlastním vytvořeným výpočtovým modelem, zpracovaným na základě veřejně dostupného výpočtového postupu pro projekční návrh tohoto typu výměníku tepla. Spirálový deskový výměník tepla navržený tímto vlastním vytvořeným modelem splňuje veškeré konstrukčně-provozní požadavky, jež na tento výměník klade technologie procesu i potenciální výrobce výměníku. Rovněž všechny výsledky simulace a návrhů zařízení v softwaru CHEMCAD splňují zadané požadavky projekční společnosti. Výpočtové reporty ze softwaru CHEMCAD tvoří Přílohu 1 této diplomové práce a vytvořený výpočtový model pro návrh spirálového deskového výměníku tepla tvoří Přílohu 2. Výsledky z těchto výpočtů tvoří stěžejní podklady pro zpracování dalšího úkolu, jímž je vytvoření požadovaných datových listů (datasheetů) vybraných procesních zařízení. Příslušné vypracované datové listy pak tvoří Přílohu 3 této diplomové práce.

Další kapitola diplomové práce je pak zaměřena na řešení skupiny konkrétních projekčních úkolů z oblasti konstrukčního zpracování, resp. technické dokumentace procesu. Jedná se o tvorbu P&ID výkresu a zpracování 3D modelu procesu za účelem vytvoření dispozičního výkresu procesu a tvorbu izometrických výkresů procesních potrubí pomocí profesionálního softwaru AutoCAD Plant3D. Výsledný vypracovaný P&ID procesu je přiložen k diplomové práci jako její Příloha 4. Vytvořený dispoziční výkres procesu pak tvoří Přílohu 5 diplomové práce a izometrické výkresy procesních potrubí tvoří Přílohu 6 diplomové práce.

A poslední šestá kapitola diplomové práce je zaměřena na využití profesionálního softwaru AutoPIPE pro pevnostní analýzu potrubní trasy, která je v projektovaném procesu namáhána nejvyšší teplotou a tlakem. Konkrétně se jedná o analýzu potrubní trasy nacházející se mezi reboilerem a stripovací kolonou. V prvém kroku je dotyčným softwarem analyzováno provedení této trasy navržené nejjednodušším a nejekonomičtějším způsobem. Pevnostní analýza však ukázala, že toto provedení potrubní trasy nevyhovuje, především

z hlediska vysokého zatížení vlivem teplotní dilatace a vlastní hmotnosti potrubí. Byla proto navržena druhá varianta této potrubní větve, výhodnější z hlediska jejího uchycení k podpůrné konstrukci a z hlediska jejího nezatěžování vlastní hmotností a tím i nezatěžování reboileru. Avšak pevnostní analýza ukázala, že ani tato druhá varianta není stále schopna dostatečně kompenzovat teplotní dilatace a následné zatížení materiálu. Proto byla na základě poznatků z druhé varianty navržena třetí varianta s tvarovým kompenzátorem, u níž již pevnostní analýza softwarem AutoPIPE jednoznačně prokázala, že splňuje veškeré podmínky pro schopnost bezpečného provozu dle normy ČSN EN 13480-3. Detailní výpočtová zpráva z pevnostní analýzy této výsledné třetí varianty potrubní trasy pak tvoří Přílohu 7 této diplomové práce.

Souhrnně tak lze konstatovat, že se v diplomové práci podařilo uskutečnit a úspěšně splnit všechny zadané projekční úkoly vybrané z oblasti projektování konkrétního průmyslového procesu stripování kyselých vod.

Autor diplomové práce si závěrem dovoluje konstatovat, že zpracování jednotlivých zadaných projekčních úkolů v diplomové práci mu umožnilo prohloubit jeho dosavadní teoretické znalosti nabyté v průběhu magisterského studia o poznatky z profesionálního inženýrského pohledu i z pohledu moderní dostupné projekční softwarové podpory a prakticky se v těchto vybraných činnostech procesního inženýra zdokonalit na úroveň vyžadovanou projekčními organizacemi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] PONTING, J., KISTER, H. Z., & NIELSEN, R. B. (2013). Troubleshooting and solving a sour-water stringer problem. *Chemical Engineering, 120*(11), 28-32,34. Retrieved from https://search.proquest.com/docview/1462203894?accountid=17115

[2] DAS, S. a N. K. SINGH. Configuration study and design of sour water stripper units for a refinery revamp. *Hydrocarbon Processing* [online]. 2018, s. 89-93. ISSN 00188190.

[3] ČOPÁK, L. a Libor ŠEDA, 2019. Separace kyselin od solí z roztoků pomocí aplikace difúzní dialýzy. *CHEMAGAZÍN s.r.o*. Stráž pod Ralskem, XXIX(2), 60. ISSN 1210 – 7409.

[4] BARTHE, Pascal, Michel CHAUGNY, Serge ROUDIER a Luis DELGADO SANCHO, 2015. *Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách (BAT) pro rafinaci minerálních olejů a plynů* [online]. [cit. 2020-12-15]. ISSN 1831-9424 (online). Dostupné z: doi:10.2791/010758

[5] SIWEK, Mariana, Luke ADDINGTON, Carl FITZ, Kevin LUNSFORD a Lili LYDDON, 2011. *Sour water: where it comes from and how to handle it* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: https://www.bre.com/PDF/Sour-Water-Where-It-Comes-from-and-How-to-Handle-It.pdf

[6] *Referenční dokument BAT Rafinérie ropy a zemního plynu: Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. In: . Prosinec 2001, s. 646 [cit. 2020-12-15].

[7] DOJČANSKÝ, Ján a Jaroslav LONGAUER. *Chemické inžinierstvo II: difúzne procesy, prestup látky, absorpcia, adsorpcia, destilácia a rektifikácia, extrakcia, úprava vzduchu a chladenie vody, sušenie, kryštalizácia, membránové procesy*. Bratislava: Malé Centrum, 2000, 392 s. ISBN 8096706489

[8] Sour water stripping column, 2015. In: *Paramountlimited* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: http://www.paramountlimited.com/Strippers_Full.html

[9] HOVORKA, František. *Technologie chemických látek*. Praha: VŠCHT, 2005, 180 s. ISBN 80-7080-588-9.

[10] KLEIBER, Michael. *Process engineering: addressing the gap between studies and chemical industry*. Berlin; Boston: Walter de Gruyter, 2016, xii, 412 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-3-11-031209-6

[11] CIHELKA, Jaromír, Jaroslav BRADNA, Jiří CIKHART, Jan ČERMÁK, Jaroslav CHYSKÝ, Jaroslav PITTER a Jiří VALÁŠEK. *Vytápění a větrání*. Druhá přepracované a doplněné vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1975, 697 stran : ilustrace, tabulky + příloha (3 listy).

[12] *ČSN EN IS O 6708 Potrubní části- Definice a výběr jmenovitých světlostí - DN*, 1996. Brno: Český normalizační institut.

[13] KŘÍŽ, Rudolf. *Stavba a provoz strojů I. Části strojů*. Praha: SNTL, 1977, 323 s.

[14] MOTYKA, Ondřej. Projekční návrh procesního potrubí.Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117676. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk Jegla.

[15] KŘIVÁNEK, Michal. *Příručka projektování: Část 5 -Podpěry a závěsy potrubí* [online]. 2011 [cit.2021-02-22]. Dostupné z: http://docplayer.cz/5638085-Obecne-technicke-informace-funkce-ulozeni-potrubi.htm

[16] MAJER, Jan. Výpočet potrubní trasy parovodu. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. 59s.

[17] PENG, Liang-Chuan a Tsen-Loong PENG. Pipe stress engineering. New York, NY: ASME Press, c2009, ISBN 978-079-1802-854.

[18] BAFRNEC, Milan. *Chemické inžinierstvo I: fyzikálne veličiny a ich jednotky, rozmerová analýza a teória podobnosti, bilancie, tok tekutín, prestup tepla, odparovanie kvapalín, chemické reaktory*. Bratislava: Malé Centrum, 1999, 427 s. ISBN 80-967064-3-8.

[19] JIROUŠ, František. *Aplikovaný přenos tepla a hmoty*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 207 s. : il. ; 21 cm. ISBN 978-80-01-04514-5.

[20] CHEMCAD Version 6. User Guide. [online], [cit. 2020-12-15]. Dostupné také z: http://www.chemstations.com/content/documents/CHEMCAD_6_User_Guide_-_online.pdf

[21] ZÝMA, Jiří a Martin NEUŽIL, 1998. *Části a mechanismy strojů: potrubí a armatury*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01765-6.

[22] MORETTA, Angelo A. Spiral plate heat exchangers: sizing units for cooling non-Newtonian slurries. *Chemical Engineering* [online]. Access Intelligence, 2010, **117**(5), 44 [cit. 2020-12-16]. ISSN 0009-2460.

[23] CAD Studio, 2021. *Cadstudio* [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://www.cadstudio.cz/plant3d

[24] POSPÍŠIL, Pavel, 2016. *KOMPENZACE DÉLKOVÝCH ZMĚN POTRUBÍ* [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://docplayer.cz/8392671-Kompenzace-delkovych-zmen-potrubi.html

[25] VYBÍRAL, Bohumil. *Mechanika pružného tělesa: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. [cit. 2021-03-19]. Dostupné také z: http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A_{C1}	Průtočný průřez	m^2
A_{OS}	Reálná plocha výměny tepla	m^2
A_z	Potřebná plocha výměny tepla	m^2
B_1	Vzdálenost spirálových desek na straně horkého proudu	m
B_2	Vzdálenost spirálových desek na straně studeného proudu	m
d_1	Vnitřní průměr trubky ve svazku	mm
d_2	Vnější průměr trubky ve svazku	mm
D_o	Vnější průměr trubky	mm
d_a/d_i	Poměr vnějšího a vnitřního průměru potrubí	-
d_h	Hydraulický průměr	m
f	Dovolené namáhání	MPa
H_1	Entalpie horkého média	kJ/s
H_2	Entalpie studeného média	kJ/s
k	Součinitel prostupu tepla	$W.m^{-2}.K^{-1}$
l	Délka potrubí	m
L	Celková délka tělesa	mm
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{n}$	Ustálený tok látkového množství	$mol \cdot s^{-1}$
$\dot{n}_I$	Ustálený tok látkového množství v plynné fázi	$mol \cdot s^{-1}$
$\dot{n}_L$	Ustálený tok látkového množství v kapalné fázi	$mol \cdot s^{-1}$
O	Smáčený obvod průtočného průřezu	m
p	Tlak	MPa
Q_1	Teplo odevzdané horkým proudem	kW
Q_2	Teplo přijaté studeným proudem	kW
$\dot{Q}$	Tepelný tok	W
Re	Reynoldsovo číslo	-
R_m	Střední výpočtový rádius spirály	m
R_{z1}	Součinitel zanášení horkého proudu	$m^2.K.W^{-1}$
R_{z2}	Součinitel zanášení studeného proudu	$m^2.K.W^{-1}$
S	Průtočný průřez potrubí	m^2
t_1	Teplota horkého média	K
t_2	Teplota studeného média	K
t_s	Teplota stěny	K
$\dot{V}$	Objemový průtok	$m^3.s^1$
w	Rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
$X_{1,2}$	Relativní molární zlomek složky v kapalné fázi	-
$Y_{1,2}$	Relativní molární zlomek složky v plynné fázi	-

z	Součinitel svarového spoje	-

Řecký symbol	**Veličina**	**Jednotka**
Δp	Tlaková ztráta	Pa
λ	Ztrátový součinitel tření	-
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
η	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
α	Součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu	K^{-1}
ΔL	Délka prodloužení materiálu	mm
α_1	Součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru	$W. m^{-2} . K^{-1}$
α_2	Součinitel přestupu tepla v trubkách	$W. m^{-2} . K^{-1}$
ΔT	Teplotní rozdíl	K
Δp	Tlaková ztráta	Pa
η	Dynamická viskozita	Pa . s
λ_1	Tepelná vodivost	$W . m^{-1} . K^{-1}$
δ	Tloušťka spirálových desek	m

Zkratka	**Význam**
BSK	Biochemická spotřeba kyslíku
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
TOC	Celkový organický uhlík
NL	Nebezpečné látky
HETP	Z anglického *Height Equivalent to a Theoretical Plate*
DN	Z anglického *Diameter Nominal*
PN	Z anglického *Pressure Nominal*
BOM	Z anglického *Bill of Materials*
PFD	Z anglického *Process Flow Diagram*
P&ID	Z anglického *Piping and Instrumentation Diagram*

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma procesu stripování kyselých vod 14
Obrázek 2 Znázornění parametrů látkové bilance protiproudého desorbéru [7] 15
Obrázek 3 Fotografie stripovací kolony [8] 16
Obrázek 4 Základní typy pater: a) kloboučková patra b) sítová patra [9] 17
Obrázek 5 Ukázka základní typy tělísek sypaných výplní: kovový Rashigův kroužek vlevo a kovový Pallův kroužek vpravo [10] 17
Obrázek 6 Způsoby uložení potrubí a) pevný bod b) osové vedení c) závěs [15] 20
Obrázek 7 Schéma a) zubového (objemové) a b) odstředivého čerpadla [18] 22
Obrázek 8 Nejčastější způsoby toku pracovních látek ve výměníku tepla: a) protiproudé; b) souproudé; c) křížové; d) kombinované [19] 23
Obrázek 9 Podélný řez trubkovým výměníkem tepla se segmentovými přepážkami v provedení s plovoucí hlavou, s vyznačeným směrem toku pracovních látek uvnitř (obrázek autora) 24
Obrázek 10 Technologické schéma zadaného procesu s hlavními parametry a požadavky 27
Obrázek 11 Prostředí softwaru CHEMCAD 29
Obrázek 12 Zvolené inženýrské jednotky 30
Obrázek 13 Výběr komponent 30
Obrázek 14 Výpočtové schéma pro simulaci procesu 31
Obrázek 15 Nastavení čerpadla č. 3 32
Obrázek 16 Nastavení čerpadla č. 2 32
Obrázek 17 Nastavení výměníku tepla pro předehřev kyselé vody 33
Obrázek 18 Výchozí nastavení stripovací kolony 34
Obrázek 19 Záložka Specifications 34
Obrázek 20 Okno pro zadání dat pro kontrolní výpočet kolony 35
Obrázek 21 Volba Sizing 36
Obrázek 22 Packing parameters 36
Obrázek 23 Výpočtové schéma procesu s výsledky 38
Obrázek 24 Principiální schéma spirálového deskového výměníku tepla [9] 39
Obrázek 25 Rozvržení prostředí softwaru 44
Obrázek 26 Příklad označení zařízení a potrubí 47
Obrázek 27 Sestavený P&ID výkres 48
Obrázek 28 Ocelová konstrukce 49
Obrázek 29 Nastavení zařízení (nádrže) 50
Obrázek 30 Přidání hrdel 50
Obrázek 31 Umístění jednotlivých zařízení 51
Obrázek 32 Vývojový diagram návrhu potrubí 52
Obrázek 33 Nástroje k modelování a vedení potrubí 53
Obrázek 34 Charakteristický rozměr R kompenzátoru U 53
Obrázek 35 Vymodelovaný tvarový kompenzátor 54
Obrázek 36 Dva příklady uložení potrubí: kluzná podpora (vlevo) a závěs (vpravo) 55
Obrázek 37 Boční pohledy na konstrukci, zařízení a potrubní trasy 55
Obrázek 38 Pohled na zařízení a potrubí 56
Obrázek 39 Část dispozičního výkresu 57
Obrázek 40 Ukázka izometrického výkresu první části potrubní větve 8 58
Obrázek 41 Deformační diagram [25] 59
Obrázek 42 Varianta 1 61
Obrázek 43 Výsledná analýza varianty 1 62

Obrázek 44 Výsledná analýza varianty 2 63
Obrázek 45 Varianta 3 v prostředí softwaru AutoPIPE 64
Obrázek 46 Výsledná analýza varianty 3 65
Obrázek 47 Displacement..... 66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Produkce a spotřeba odpadních vod [4] 12
Tabulka 2 Koncentrace znečišťujících látek v běžných rafinérských odpadních vodách před jejich čištěním [5] 13
Tabulka 3 Typické hodnoty nežádoucích prvků před a po procesu stripování [5] 14
Tabulka 4 Doporučené hodnoty roztečí [17] 21
Tabulka 5 Doporučované hodnoty součinitelů zanášení pro vybrané pracovní látky dle [10] 25
Tabulka 6 Termofyzikální vlastnosti látek ze softwaru CHEMCAD 40
Tabulka 7 Konstrukčně-provozní požadavky na výměník 40
Tabulka 8 Symboly a značky pro výkres P&ID 45
Tabulka 9 Písemný kód pro označení funkcí přístrojů 46
Tabulka 10 Značky jednotlivých zařízení 46
Tabulka 11 Přibližné hodnoty charakteristických rozměrů [24] 54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Chemcad výsledky
Příloha č. 2: Výpočet spirálového výměníku tepla
Příloha č. 3: Datasheety zařízení
Příloha č. 4: P&ID výkres
Příloha č. 5: Dispoziční výkres
Příloha č. 6: Izometrické výkresy
Příloha č. 7: Výsledky z pevnostního výpočtu