

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301R016 Stavba energetických strojů a zařízení

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh rotačního čerpadla a navazujícího potrubního systému

Autor: **Marek ŠVEJNOHA**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel ŽITEK**

Akademický rok 2017/2018

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

|                      |  |                   |                         |  |
|----------------------|--|-------------------|-------------------------|--|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Švejnoha                                       | Jméno<br>Marek    |                         |  |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | B2301 Strojní inženýrství                                  |                   |                         |  |
| <b>VEDOUCÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Ing. Žitek                     | Jméno<br>Pavel    |                         |  |
| <b>PRACOVISŤE</b>    | ZČU - FST - KKE  |                   |                         |  |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>   | <b>BAKALÁŘSKÁ</b> | Nehodící se<br>škrtněte |  |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Návrh rotačního čerpadla a navazujícího potrubního systému |                   |                         |  |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KKE | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2018 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                      |   |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|
| <b>CELKEM</b> | 56 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 34 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 0 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|---|

|   |  |
|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>                                       | <p>Cílem této práce je návrh rotačního čerpadla a navazujícího potrubního systému pomocného chladicího okruhu teplé užitkové vody ve spalovně komunálního odpadu. Za tímto účelem byla zpracována rešerše rotačních čerpadel a návrhu potrubních systémů a popsána problematika stanovení tlakových ztrát a pevnostních a teplotně dilatačních výpočtů.</p> <p>Byl stanoven jmenovitý průměr potrubního systému, předběžně stanoveny tlakové ztráty a navrženo optimální čerpadlo. Dále byla navržena dipozice potrubního systému, který byl ověřen pevnostním a teplotně dilatačním výpočtem dle EN 13480. Na závěr byly přepočítány tlakové ztráty dle finálního designu potrubního systému.</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA<br/>JEDNOSLOVNÉ POJMY,<br/>KTERÉ VYSTIHUJÍ<br/>PODSTATU PRÁCE</b></p> | <p style="text-align: center;">rotační čerpadlo, potrubní systém, tlakové ztráty, pevnostní výpočet, teplotně dilatační výpočet</p>  |

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

|                          |   |                 |                            |
|--------------------------|---|-----------------|----------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Švejnoha                             | Name<br>Marek   |                            |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | B2301 Strojní inženýrství                       |                 |                            |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Ing. Žitek    | Name<br>Pavel   |                            |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KKE                                 |                 |                            |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>                                  | <b>BACHELOR</b> | Delete when not applicable |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Design of rotary pump and related piping system |                 |                            |

|                |                        |                   |                          |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Power System Engineering | <b>SUBMITTED IN</b> | 2018 |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |    |                  |    |                       |   |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| <b>TOTALLY</b> | 56 | <b>TEXT PART</b> | 34 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 0 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

|   |  |
|---|--|
| <b>BRIEF DESCRIPTION<br/>TOPIC, GOAL, RESULTS<br/>AND CONTRIBUTIONS</b> | <p>The aim of the thesis is to design a rotary pump and related piping system of a district heating auxiliary cooling system of a municipal waste incineration plant. For this purpose a research focused on rotary pumps and design of piping systems was made and problematics of pressure losses, strength and thermal expansion calculations were explained.</p> <p>A nominal diameter of the piping system was determined, preliminary pressure losses were calculated and an optimal pump was chosen. Then a space disposition of the piping system was designed and strength and thermal expansion calculation was made according to EN 13480. Finally, pressure losses were recalculated according to final desing of the piping system.</p> |
| <b>KEY WORDS</b>  | rotary pump, piping system, pressure losses, strength calculation, thermal expansion calculation   |

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Pavlu Žitkovi, konzultantovi práce, panu Ing. Jiřímu Kocábovi, a slečně Ing. Elišce Blažkové za pomoc při řešení této práce.

Poděkovat bych chtěl také společnosti AF Engineering s.r.o. za poskytnutí zadání a prostoru pro řešení práce.

# Obsah

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Úvod.....   | 1  |
| 2     | Rešerše v oblasti rotačních čerpadel .....                          | 2  |
| 2.1   | Rozdělení čerpadel .....  | 2  |
| 2.2   | Hydrodynamická čerpadla .....                                       | 2  |
| 2.2.1 | Princip a dělení .....  | 2  |
| 2.3   | Charakteristika čerpadla .....                                      | 3  |
| 2.3.1 | Pracovní bod .....  | 4  |
| 2.4   | Měrné otáčky .....  | 5  |
| 2.5   | Účinnost a ztráty .....   | 5  |
| 2.5.1 | Hydraulické ztráty .....  | 5  |
| 2.5.2 | Objemové ztráty .....   | 6  |
| 2.5.3 | Mechanické ztráty .....   | 7  |
| 2.5.4 | Účinnost a příkon .....   | 7  |
| 3     | Rešerše v oblasti návrhu potrubních systémů .....                   | 8  |
| 3.1   | Jmenovitá světlost.....   | 8  |
| 3.2   | Jmenovitý tlak.....   | 12 |
| 3.3   | Materiály.....  | 12 |
| 3.3.1 | Vlastnosti materiálu .....  | 12 |
| 3.3.2 | Značení oceli .....   | 13 |
| 3.3.3 | Používané oceli .....   | 14 |
| 3.4   | Součásti potrubních systémů .....                                   | 14 |
| 3.4.1 | Trubky .....  | 15 |
| 3.4.2 | Části potrubí k přivařování .....                                   | 15 |
| 3.4.3 | Potrubní spoje .....  | 15 |
| 3.4.4 | Kompenzátory .....  | 15 |
| 3.4.5 | Uložení potrubí .....   | 16 |
| 3.4.6 | Armatury .....  | 17 |
| 3.4.7 | Instrumenty a zařízení .....  | 17 |
| 4     | Stanovení tlakových ztrát.....                                      | 18 |
| 4.1   | Třecí ztráty.....   | 18 |
| 4.2   | Místní ztráty.....  | 19 |
| 5     | Popis problematiky pevnostních a teplotně dilatačních výpočtů ..... | 20 |
| 5.1   | Pevnostní výpočet.....  | 20 |
| 5.2   | Vzdálenost podpor .....   | 21 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.3   | Teplotně dilatační výpočet.....                     | 21 |
| 6     | Použitý software.....                               | 22 |
| 6.1   | PDMS .....  | 22 |
| 6.2   | VVD.....  | 22 |
| 6.3   | Caesar II.....                                      | 22 |
| 7     | Praktická část .....                                | 23 |
| 7.1   | Popis daného problému .....                         | 23 |
| 7.2   | Stanovení jmenovitého průměru.....                  | 24 |
| 7.3   | Výpočet tlakových ztrát.....                        | 24 |
| 7.3.1 | Třecí ztráta .....                                  | 24 |
| 7.3.2 | Místní ztráty .....                                 | 24 |
| 7.3.3 | Výšková ztráta .....                                | 26 |
| 7.3.4 | Celková ztráta .....                                | 26 |
| 7.4   | Výběr optimálního čerpadla .....                    | 26 |
| 7.4.1 | Charakteristika potrubí.....                        | 26 |
| 7.5   | Návrh prostorové dispozice .....                    | 27 |
| 7.6   | Pevnostní výpočet.....                              | 28 |
| 7.7   | Teplotně dilatační výpočet.....                     | 30 |
| 7.8   | Přepočet tlakových ztrát .....                      | 32 |
| 7.8.1 | Třecí ztráta .....                                  | 32 |
| 7.8.2 | Místní ztráty .....                                 | 32 |
| 8     | Závěr .....   | 34 |
|       | Seznam použitých zdrojů.....                        | 35 |
|       | Příloha 1: Report výpočtů v programu VVD .....      | 36 |
|       | Příloha 2: Report výpočtu v programu Caesar II..... | 46 |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Řez a pohled na jednostupňové odstředivé radiální čerpadlo – převzato z [1] ..... | 3  |
| Obrázek 2: Typy hydrodynamických čerpadel – převzato z [1] .....                             | 3  |
| Obrázek 3: Charakteristika čerpadla – převzato z [2] .....                                   | 4  |
| Obrázek 4: Pracovní bod čerpacího systému – převzato z [2] .....                             | 5  |
| Obrázek 5: Rozložení rychlosti kapaliny na výstupu z oběžného kola – převzato z [1].....     | 6  |
| Obrázek 6: Zpětný tok kapaliny z výtlaku do sání (objemová ztráta) – převzato z [1] .....    | 6  |
| Obrázek 7: Ohybové kompenzátory – převzato z [8] .....                                       | 16 |
| Obrázek 8: Moodyho diagram – převzato z [11] .....   | 19 |
| Obrázek 9: Příklady koeficientu druhu uložení $\beta$ – převzato z [13] .....                | 21 |
| Obrázek 10: P&ID navrhovaného chladicího okruhu .....  | 23 |
| Obrázek 11: Charakteristika potrubí, čerpadla a pracovní bod .....                           | 27 |
| Obrázek 12: Prostorová dispozice potrubního systému navržená v PDMS .....                    | 28 |
| Obrázek 13: Prostředí výpočetního programu VVD .....   | 29 |
| Obrázek 14: Výpočet v programu VVD dle EN 13480-3 .....                                      | 29 |
| Obrázek 15: Výpočetní model chladicího okruhu v programu Caesar II .....                     | 30 |
| Obrázek 16: Vizualizace napětí materiálu pro CASE 5 .....                                    | 31 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1: Doporučené rychlosti proudění médií podle – převzato z [6].....                             | 9  |
| Tabulka 2: Jmenovité průměry DN podle ČSN EN ISO 6708 - převzato z [5].....                            | 9  |
| Tabulka 3: Přednostní rozměry trubek dle EN 10220 – převzato z [4].....                                | 10 |
| Tabulka 4: PN pro ocel 11 366.1, 11 366.5, 11 368.1 dle ČSN 13 0010 – převzato z [7].....              | 12 |
| Tabulka 5: Minimální smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a $R_{p0,1}$ za zvýšené teploty – převzato z [9] ... | 14 |
| Tabulka 6: Ztrátový součinitel pro průtok clonou – převzato z [12] .....                               | 19 |
| Tabulka 7: Souhrn ztrátových součinitelů a tlakových ztrát .....                                       | 26 |
| Tabulka 8: Procentuální využití pevnostních vlastností potrubních komponentů .....                     | 29 |
| Tabulka 9: Hodnoty sil a momentů vyvozených na hrdla připojených zařízení .....                        | 31 |
| Tabulka 10: Souhrn ztrátových součinitelů a tlakových ztrát navrženého systému .....                   | 33 |



## 1 Úvod

Cílem bakalářské práce je návrh rotačního čerpadla a na něj navazujícího potrubního systému. Návrh bude sestávat ze stanovení jmenovitého průměru potrubí dle požadovaného tlaku a dodávaného množství média. Následovat bude výpočet tlakových ztrát potrubní trasy a výběr optimálního rotačního čerpadla pro zajištění dodávky dopravovaného média požadovaných parametrů. Poté bude navržen design potrubní trasy s ohledem na prostorové dispozice stavby a okolních zařízení. Použité potrubní díly budou ověřeny pevnostním výpočtem dle EN 13480. Jako poslední bude proveden teplotně dilatační výpočet navrženého potrubního systému dle EN 13480.

Praktické části práce bude předcházet část teoretická, která popíše rozdělení a princip čerpadel a problematiku projektování potrubních systémů. V této části budou popsány komponenty potrubních systémů a jejich funkce, principy výpočtů používaných při návrhu potrubních systémů a software používaný pro dispoziční a výpočetní návrh potrubních systémů.

Práce je vytvořena pod záštitou firmy AF Engineering s.r.o. v rámci basic designu potrubní části spalovny komunálního odpadu. Navrhovaný potrubní systém je pomocný chladicí okruh teplé užitkové vody.

## 2 Rešerše v oblasti rotačních čerpadel

### 2.1 Rozdělení čerpadel

Čerpadlo je stroj sloužící k dodávání energie (obvykle tlakové) kapalině za účelem její distribuce a zvyšování jejího tlaku. Podle způsobu přeměny a dodání energie kapalině lze čerpadla rozdělit do tří hlavních skupin na čerpadla hydrostatická a hydrodynamická a na ostatní druhy.

Hydrostatická (objemová) čerpadla přeměňují mechanickou energii stroje na tlakovou energii kapaliny přímo, tedy tlakovým působením pohyblivého členu čerpadla na kapalinu. Podle způsobu pohybu pohyblivého členu se dále dělí na:

- čerpadla s kmitavým pohybem (pístová, plunžrová, membránová, vlnovcová, křídlová, atd.),
- čerpadla s rotačním pohybem (zubová, vřetenová lamelová, s rotujícími písty, s odvalujícím pístem).

Hydrodynamická čerpadla dodávají kapalině prvotně energii kinetickou, která je následně přeměněna na energii tlakovou. Tato dvojitá přeměna energie způsobuje nižší celkovou účinnost ve srovnání s objemovými čerpadly. Naopak výhodami jsou nepřetržitý proud čerpané kapaliny, velké průtoky (za nižších tlaků), práce ve vyšších otáčkách nebo menší rozměry a hmotnost, což je dělá cenově výhodnějšími. Dělí se podle směru proudění kapaliny na radiální, diagonální a axiální. [1]

Ostatní druhy čerpadel mimo předchozí dvě skupiny využívají k dodání energie kapalině unikátní principy. Jsou to např. čerpadla:

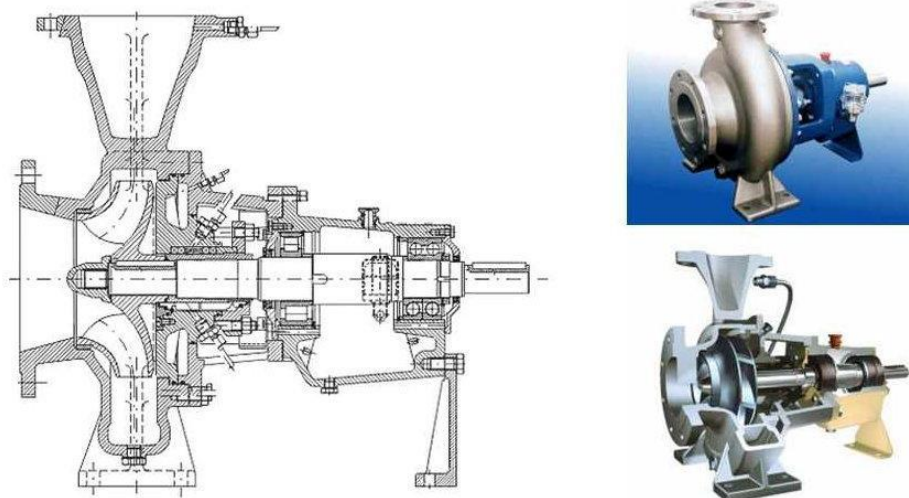
- proudová (tzv. ejektory) – využívají podtlaku média proudícího vysokou rychlostí z trysky k nasávání kapaliny,
- mamutová – mísí kapalinu se vzduchem, který vynáší kapalinu do výšky vytvořením směsi o nízké hustotě,
- trkače – využívající energetického rázu přerušovaného proudu kapaliny.

### 2.2 Hydrodynamická čerpadla

V energetice se hojně uplatňují čerpadla hydrodynamická. Využívají se například pro čerpání napájecí vody, čerpání kondenzátu nebo pro přívod chladicí vody. Na důležitých částech energetických systémů se používají i čerpadla záložní, sloužící při výpadku nebo údržbě čerpadel hlavních.

#### 2.2.1 Princip a dělení

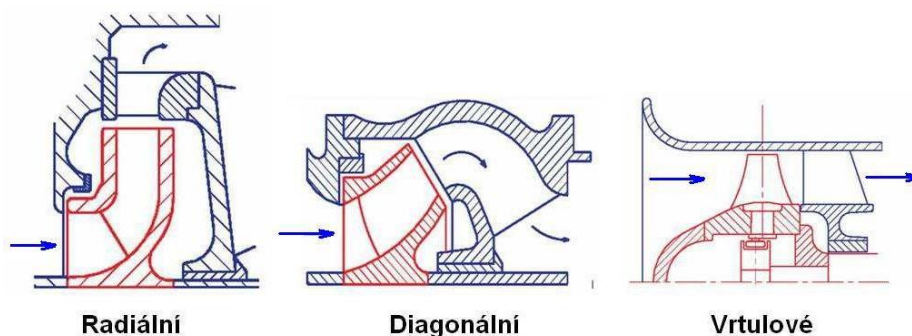
Princip činnosti je následující. Kapalina je sáním přivedena z potrubí do rotujícího oběžného kola, které je poháněno motorem čerpadla. V kanálech oběžného kola je kapalina uváděna do pohybu a mechanická práce (energie) kola je tak transformována na kinetickou energii kapaliny. Dále je kapalina přiváděna na rozváděcí kolo nebo do spirální skříně (případně kombinace obojího), kde se kinetická energie přeměňuje na tlakovou a kapalina je vytlačována do návazného potrubí. Rotační čerpadla se konstruují jako jednostupňová (ze spirální skříně je kapalina vytlačována do potrubí) nebo vícešupňová (ze spirální skříně je kapalina přiváděna na další oběžné kolo). Konstrukci hydrodynamického jednostupňového rotačního čerpadla znázorňuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Řez a pohled na jednostupňové odstředivé radiální čerpadlo – převzato z [1]

Jak bylo zmíněno výše, hydrodynamická čerpadla se dělí podle směru proudění čerpané kapaliny. Do všech typů přichází kapalina sáním ve směru axiálním s osou rotace oběžného kola. Konstrukce oběžného kola potom dělí čerpadla na:

- radiální (odstředivá) – kapalina opouští oběžné kolo kolmo na osu rotace (oběžné kolo je v podstatě Francisova turbína s opačným směrem proudění kapaliny),
- diagonální – kapalina opouští oběžné kolo šikmo na osu rotace,
- axiální (vrtulová) – kapalina opouští oběžné kolo rovnoběžně s osou rotace, stejně jako do něj vstupuje.



Obrázek 2: Typy hydrodynamických čerpadel – převzato z [1]

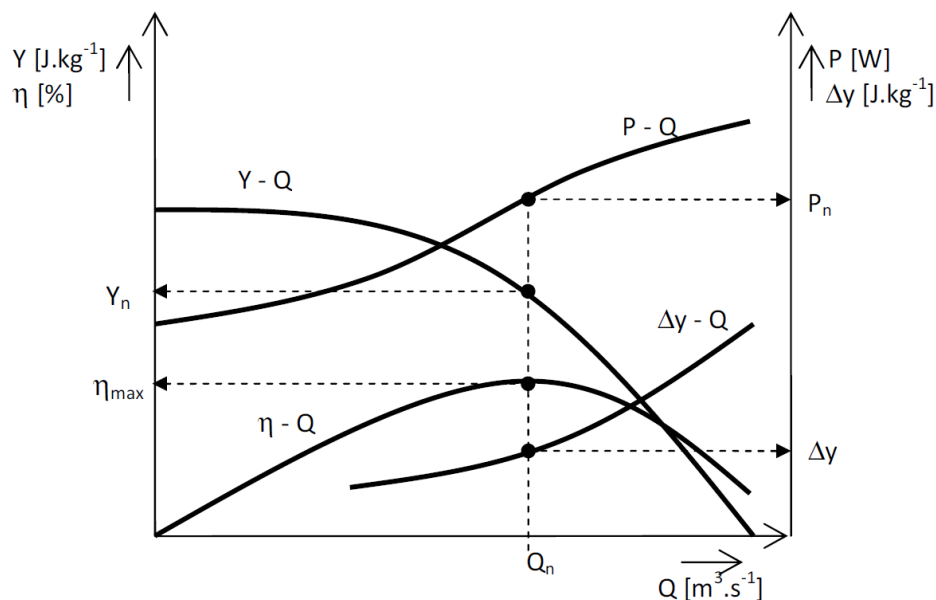
### 2.3 Charakteristika čerpadla

Charakteristika čerpadla znázorňuje závislost hlavních funkčních parametrů čerpadla na objemovém průtoku  $Q$  při určitých konstantních otáčkách  $n$ . Těmito parametry jsou:

- dopravní výška  $H$  [m] – součet výškového rozdílu hladiny čerpané kapaliny a odběrového místa, celkové tlakové ztráty v potrubním systému a požadovaného tlaku kapaliny na odběru,
- měrná energie  $Y$  [J/kg] – energie dodaná čerpadlem kilogramu kapaliny vyjádřená pomocí dopravní výšky jako  $Y = g \cdot H$ ,
- příkon čerpadla  $P$  [W],
- účinnost čerpadla  $\eta$  [%],

- kavitační deprese  $\Delta y$  [J/kg] – (též měrná sací energie) napomáhá eliminaci kavitace při umístění sání čerpadla nad hladinou čerpané kapaliny a tím pádem vzniku podtlaku na sání čerpadla.

Charakteristika čerpadla se určuje experimentálně na zkušebním okruhu, jehož součástí je právě zkoumané čerpadlo. Znázorněna je na Obrázku 3.

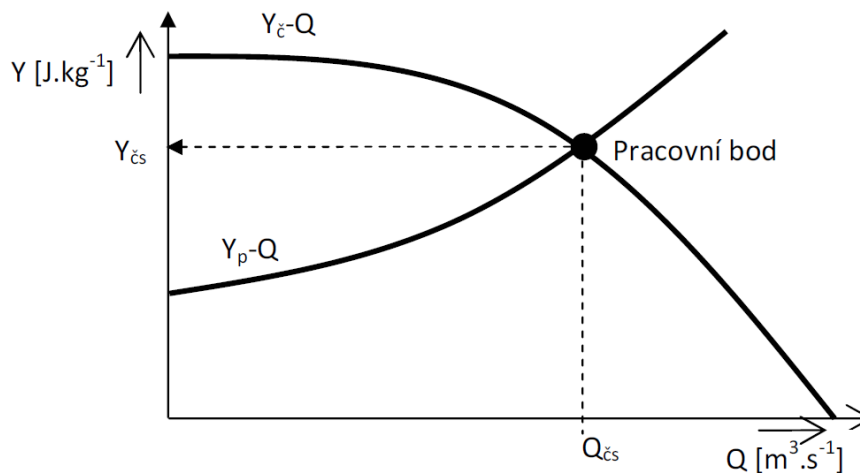


Obrázek 3: Charakteristika čerpadla – převzato z [2]

Nabývá-li měrná energie  $Y$  své maximální hodnoty při nulovém objemovém průtoku  $Q(Y_{max}) = 0$ , pak se jedná o charakteristiku stabilní. V opačném případě, kdy  $Q(Y_{max}) < 0$ , má charakteristika labilní a stabilní větve rozdělené právě bodem  $Q(Y_{max})$  a provoz čerpadla by neměl probíhat v labilní větvi, tedy při menším objemovém průtoku než  $Q(Y_{max})$ .

### 2.3.1 Pracovní bod

Vedle charakteristiky čerpadla je důležitá také charakteristika potrubí. Ta udává ztrátu měrné energie  $Y$  kapaliny v potrubí (danou místními a třecími ztrátami) v závislosti na objemovém průtoku  $Q$  a má zpravidla tvar stoupající větve paraboly. Za ustáleného provozu je energie dodaná kapalině čerpadlem spotřebovaná ztrátami v potrubí a parametry  $Q$  a  $Y$  mají pro čerpadlo i potrubí stejnou hodnotu. Mezi charakteristikou čerpadla a charakteristikou potrubí tedy existuje průsečík, který udává tzv. pracovní nebo provozní bod čerpacího systému.



Obrázek 4: Pracovní bod čerpacího systému – převzato z [2]

Při výběru čerpadla pro určitý potrubní systém se známou charakteristikou potrubí je třeba volit takové čerpadlo, u kterého se pracovní bod získaný jako průsečík obou charakteristik pohybuje co nejbližší maximální účinnosti čerpadla  $\eta$ .

## 2.4 Měrné otáčky

Měrné otáčky jsou pojem zavedený v souvislosti s teorií podobnosti jako měřítko rychloběžnosti čerpadla. Na základě podobnostních čísel (Eulerova – Eu, Froudova – Fr, Reynoldsova – Re a Strouhalova – Sh) byl odvozen následující vztah, který udává otáčky čerpadla geometricky podobného danému při jednotkovém průtoku a měrné energii (tedy  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Y = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ):

$$n_b = n \frac{Q^{0,5}}{Y^{0,75}} \quad (2.1)$$

Kvůli principu fungování hydrodynamických čerpadel založeném na změně rychlosti proudění kapaliny u nich má hlavní význam číslo Strouhalovo:

$$Sh = \frac{c}{n \cdot D}, \quad (2.2)$$

kde  $c$  je rychlost kapaliny,  $n$  jsou otáčky stroje a  $D$  je charakteristický rozměr stroje. Měrné otáčky jsou tedy u hydrodynamických čerpadel úzce spjaty s geometrií průtočné části a ovlivňují její výběr. [3]

## 2.5 Účinnost a ztráty

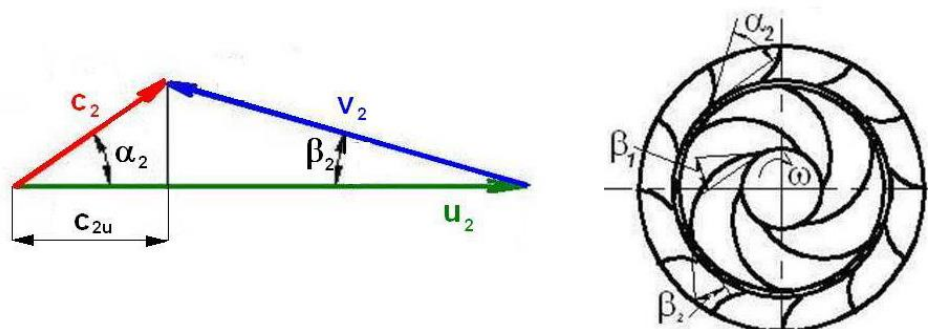
Jak bylo zmíněno výše, přeměna energie u hydrodynamických čerpadel je doprovázena relativně vysokými ztrátami, které lze rozdělit na tři typy: hydraulické, objemové a mechanické.

### 2.5.1 Hydraulické ztráty

Jedná se o ztráty způsobené třením kapaliny, změnou směru proudění, změnou průtočného průřezu a turbulentním prouděním v kanálech čerpadla. Hydraulickou účinnost lze vyjádřit jako:

$$\eta_h = \frac{H}{H_t} = \frac{g \cdot H}{u_2 \cdot c_{2u}}, \quad (2.3)$$

kde  $H$  je dosažená dopravní výška,  $H_t$  je teoretická dopravní výška,  $g$  je gravitační zrychlení,  $u_2$  je unášivá rychlost kapaliny způsobená rotací kanálu na výstupu z oběžného kola a  $c_{2u}$  je složka absolutní rychlosti  $c$  promítnutá do směru unášivé rychlosti  $u$  na výstupu z oběžného kola. Výstupní rychlosti znázorňuje Obrázek 3.



Obrázek 5: Rozložení rychlosti kapaliny na výstupu z oběžného kola – převzato z [1]

## 2.5.2 Objemové ztráty

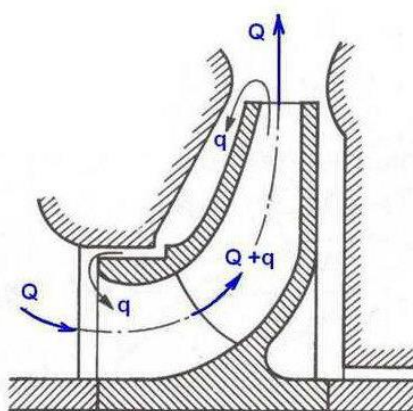
Vznikají únikem kapaliny z výstupu oběžného kola (z výtlaku) zpět před vstup do oběžného kola (do sání) nedokonalě utěsněným prostorem mezi kolem a skříní čerpadla. Oběžným kolem tedy prochází větší množství kapaliny, než které je výtlakem dodáno do potrubí. Zpětný únik kapaliny znázorňuje obrázek 4. Objemovou účinnost lze vyjádřit jako:

$$\eta_o = \frac{Q}{Q + q}, \quad (2.4)$$

kde  $Q$  je objemový průtok dodávaný čerpadlem a  $q$  je zpětný průtok z výtlaku do sání ( $0,05 \div 0,1 Q$ ) stanovitelný jako:

$$q = \mu \cdot S \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2.5)$$

kde  $\mu$  je výtokový součinitel ( $0,2 \div 0,6$  dle konstrukce spáry),  $S$  je příčný průřez spáry,  $\Delta p$  je tlakový spád ve spáře a  $\rho$  je hustota kapaliny. S rostoucí velikostí měrných otáček čerpadla roste i jeho objemová účinnost.



Obrázek 6: Zpětný tok kapaliny z výtlaku do sání (objemová ztráta) – převzato z [1]

### 2.5.3 Mechanické ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny mechanickým třením hřídele v ucpávkách, spojkách a ložiskách. Dále vznikají třením mezi kapalinou a oběžným kolem nebo skříní čerpadla. Mechanická účinnost  $\eta_m$  obvykle dosahuje hodnot  $0,8 \div 0,94$  v závislosti na kvalitě konstrukce a velikosti čerpadla.

### 2.5.4 Účinnost a příkon

Celková účinnost čerpadla je dána součinem všech dílčích účinností vycházejících ze ztrát. Lze také vyjádřit poměrem výkonů. Tedy:

$$\eta_c = \frac{P_t}{P_{ef}} = \eta_h \cdot \eta_o \cdot \eta_m, \quad (2.6)$$

kde  $P_t$  je příkon teoretický a  $P_{ef}$  je příkon efektivní, který lze vyjádřit jako:

$$P_{ef} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_c}. \quad (2.7)$$

### 3 Rešerše v oblasti návrhu potrubních systémů

Potrubní systém je dopravní prostředek určený zejména pro přenos tekutin případně pevných látek ve směsi s tekutinou. Cílem dopravy může být přenos média samotného nebo přenos energie (např. tepelné nebo tlakové) vázané na přenášené médium.

Na potrubní systém je kladena řada požadavků z hlediska množství a parametrů dopravovaného média (s tím jsou spjaty např. tlakové a teplotní ztráty v potrubí či výběr jeho materiálu), regulace průtoku média systémem, měření parametrů přenášeného média, těsnosti potrubních spojů, schopnosti systému kompenzovat teplotní roztažnost při přenosu média o vysoké teplotě, pevnosti potrubních součástí při přenosu média o vysokém tlaku atd. V neposlední řadě musí systém vyhovovat také dispozičním podmínkám pracovního prostředí, v některých případech musí být schopen fungovat při údržbě nebo výměně jeho určitých součástí (zavádění bypassů a záložních prvků) či umožňovat odzdušnění nebo úplné vypuštění.

Proces návrhu potrubního systému tedy sestává z návrhu jmenovité světlosti potrubí, jmenovitého tlaku, materiálu a schématického návrhu systému z hlediska plnění své funkce včetně návrhu větvení jednotlivých tras, regulačních, uzavíracích či měřících prvků atd. (tzv. P&ID – Piping and Instrumentation Diagram).

Následuje dispoziční návrh systému v závislosti na okolním pracovním prostředí, návrh uložení, teplotně dilatační výpočet, pevnostní výpočet, popřípadě výpočet tlakových ztrát v systému.

#### 3.1 Jmenovitá světlost

Jmenovitá světlost  $J_s$  nebo jmenovitý průměr, pro který se používá označení DN (Diameter Nominal), je normovaná řada vnitřních průtočných průměrů potrubí.

Jmenovitý průměr se neshoduje se skutečným vnitřním průměrem trubky, což je dáno výrobou trubek pro různé jmenovité tlaky. Pro sjednocení výroby je dána řada přednostních vnějších průměrů trubek  $D$  a tloušťek stěny  $T$ , které se pro jednotlivé vnější průměry vyrábí. Tuto řadu udává norma ČSN EN 10220 [4] (viz Tabulka 3)

Používané jmenovité průměry udává norma ČSN EN ISO 6708 [5] (viz Tabulka 2) nahrazující starší normu ČSN 13 0015.

Návrh průměru potrubí je odvozen od požadovaného průtoku. Podle vzorce:

$$Q = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v, \quad (3.1)$$

kde  $Q$  je objemový průtok,  $S$  průtočný průřez potrubí,  $v$  rychlost proudícího média a  $d$  hledaný průtočný průměr, který se vyjádří jako:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v}}. \quad (3.2)$$

Dosažením požadovaného průtoku a optimální rychlosti proudění média se získá průtočný průměr a vybere se jemu blízký jmenovitý průměr.

Optimální průtočná rychlost musí být volena s ohledem na hospodárnost potrubního systému. Ohled musí být brán na třecí ztráty v potrubí (s rostoucí rychlostí rostou ztráty), ale i na pořizovací, montážní a údržbové náklady, spotřebu materiálu, prostoru atd. Tabulka 1



udává doporučené rychlosti proudění různých médií na základě praktických zkušeností podle [6].

Tabulka 1: Doporučené rychlosti proudění médií podle – převzato z [6]

| Látka                   | Potrubí                                      | Rychlost [m/s] | Poznámka  |
|-------------------------|--|----------------|---|
| Pára                    | přívod od kotle k turbíně:                   | 40             | Hospodárná rychlost by měla být co nejvyšší, pokud to dovolí rozdíl tlaků, který redukční ventil udržuje. |
|                         | přetlak 40 bar                               | 50 až 60       |   |
|                         | přetlak 100 bar                              | 80             |   |
|                         | vyšší tlaky                                  | až 70          |   |
|                         | přívod páry k redukční stanici               | 10 až 15       |   |
| nízkotlaká topná pára   | 20 až 40                                     |                |   |
| dálkové parovody:       | normální                                     | 50 až 60       |   |
|                         | až asi                                       |                |   |
| Voda                    | vodovody: hlavní řady                        | 1 až 2         | normálně 0,6 až 0,7   |
|                         | místní síť                                   | 0,5 až 1,2     |   |
|                         | sací potrubí kondenzátek                     | 0,5            |   |
|                         | výtlač kondenzátek                           | 2,0            |   |
|                         | sací potrubí napáječek (odstředivé čerpadlo) | 0,5 až 1       |   |
|                         | výtlač napáječek                             | 2 až 3         |   |
|                         | sací potrubí chladicí vody                   | 0,7 až 1,5     |   |
|                         | výtlačné potrubí chladicí vody               | 1,5 až 3,0     |   |
| dálkové vodní teplovody | 0,5 až 2                                     |                |   |
| Vzduch                  | potrubí nízkotlaká                           | 12 až 15       |   |
|                         | potrubí vysokotlaká                          | 20 až 25       |   |
| Plyny                   | nízkotlaký plynovod                          | 1 až 2         |   |
|                         | plynovody do 2 bar                           | 4 až 20        |   |
|                         | plynovody do 5 bar                           | 11 až 35       |   |
|                         | dálkové plynovody                            | až 25          |   |
| Oleje                   | sání   | 0,5 až 1,2     |   |
|                         | výtlač plynový olej                          | 1 až 2         |   |
|                         | výtlač těžké oleje                           | 0,5 až 2       |   |
|                         | v hydraulickém zařízení                      | 2 až 4,5       |   |
| Benzín/benzol           |  | 1 až 2         |   |
| Chladiva                | látka v plynném stavu:                       |                |   |
|                         | sání   | 5 až 10        |   |
|                         | výtlač                                       | 100 až 180     |   |
|                         | látka v kapalném stavu:                      | 0,6 až 1,2     |   |
| Solanka                 |  | 1,0 až 2,5     |   |

Tabulka 2: Jmenovité průměry DN podle ČSN EN ISO 6708 - převzato z [5]

| Jmenovitý průměr |         |         |
|------------------|---------|---------|
| DN 10            | DN 250  | DN 1500 |
| DN 15            | DN 300  | DN 1600 |
| DN 20            | DN 350  | DN 1800 |
| DN 25            | DN 400  | DN 2000 |
| DN 32            | DN 450  | DN 2200 |
| DN 40            | DN 500  | DN 2400 |
| DN 50            | DN 600  | DN 2600 |
| DN 60            | DN 700  | DN 2800 |
| DN 65            | DN 800  | DN 3000 |
| DN 80            | DN 900  | DN 3200 |
| DN 100           | DN 1000 | DN 3400 |
| DN 125           | DN 1100 | DN 3600 |
| DN 150           | DN 1200 | DN 3800 |
| DN 200           | DN 1400 | DN 4000 |

Tabulka 3: Přednostní rozměry trubek dle EN 10220 – převzato z [4]

| Řady vnějších průměrů $D^3$ |       |      | Tloušťka stěny $T$ |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|-----------------------------|-------|------|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|---|-----|-----|-----|---|-----|----|----|------|------|--|
| 1                           | 2     | 3    | 1,6                | 1,8 | 2 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,6 | 4 | 4,5 | 5 | 5,6 | 6,3 | 7,1 | 8 | 8,8 | 10 | 11 | 12,5 | 14,2 |  |
| 10,2                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 12    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 12,7  |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 13,5                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             |       | 14   |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 16    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 17,2                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 18    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 19    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 20    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 21,3                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             |       | 22   |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 25    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 25,4  |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 26,9                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 30    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 31,8  |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 32    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 33,7                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 35    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 38    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 40    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 42,4                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             |       | 44,5 |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 48,3                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 51    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 54    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 57    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 60,3                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 63,5  |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 70    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 73    |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 76,1                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 82,5  |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 88,9                        |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 101,6 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 108   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 114,3                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 127   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 133   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 139,7                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 141,3 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 152,4 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 159   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 168,3                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 177,8 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 193,7 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 219,1                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 244,5 |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 273                         |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 323,9                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 356,6                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 406,4                       |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 457                         |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 508                         |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 559   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 610                         |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
|                             | 660   |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |
| 711                         |       |      |                    |     |   |     |     |     |     |     |   |     |   |     |     |     |   |     |    |    |      |      |  |

Tabulka 3 (dokončení)

| Řady vnějších průměrů $D^a$ |      |       | Tloušťka stěny $T$ |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|-----------------------------|------|-------|--------------------|------|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|--|
| 1                           | 2    | 3     | 16                 | 17,5 | 20 | 22,2 | 25 | 28 | 30 | 32 | 36 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 80 | 90 | 100 |  |
| 10,2                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             | 12   |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             | 12,7 |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 13,5                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 14    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 16    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 17,2                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 18    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 19    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 20    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 21,3                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 22    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 25    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 25,4  |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 26,9                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 30    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 31,8  |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 32    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 33,7                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 35    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 38    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 40    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 42,4                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 44,5  |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 48,3                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 51    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 54    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 57    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 60,3                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 63,5  |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 70    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 73    |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 76,1                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 82,5  |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 88,9                        |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 101,6 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 108   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 114,3                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 127   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 133   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 139,7                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 141,3 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 152,4 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 159   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 168,3                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 177,8 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 193,7 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 219                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 244,5 |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 273                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 323,9                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 366,6                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 406,4                       |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 457                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 508                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 559   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 610                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
|                             |      | 660   |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |
| 711                         |      |       |                    |      |    |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |  |

<sup>a</sup> Řada 1 = průměry, pro něž je normalizováno veškeré příslušenství potřebné pro konstrukci potrubních systémů;  
 Řada 2 = průměry, pro něž není normalizováno veškeré příslušenství;  
 Řada 3 = průměry pro speciální použití, pro které existuje jen velmi málo normalizovaného příslušenství.

## 3.2 Jmenovitý tlak

Jmenovitý tlak  $J_t$  nebo PN (Pressure Nominal) je normovaná řada tlaků vytvořená pro sjednocení výroby, omezení počtu provedení a umožnění návrhu potrubí bez pevnostních výpočtů pro každou větev podle jejího přesného tlaku.

Jmenovitý tlak PN udává maximální pracovní přetlak  $p_{pmax}$ , kterému je daná součást potrubí schopna odolat v závislosti na pracovní teplotě. Hodnoty nejvyššího pracovního přetlaku  $p_{pmax}$  jsou stanoveny podle vzorce:

$$p_{pmax} = 0,1 \cdot PN \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_r}, \quad (3.3)$$

kde  $\sigma_d$  je dovolené namáhání, určené podle ON 131010 pro příslušnou jakost materiálu a pracovní teplotu a  $\sigma_r$  je referenční napětí sloužící pro výpočet rozměrů součástí, při kterém platí:

$$p_{pmax} = 0,1 \cdot PN, \quad (3.4)$$

a které je pro součásti potrubí a armatury z tvářených ocelí zvoleno  $\sigma_r = 115$  MPa.

Tabulka 4 uvádí příklad z normy ČSN 13 0010 [7]. Označení ocelí je dle staré, dnes již neplatné ČSN normy.

Tabulka 4: PN pro ocel 11 366.1, 11 366.5, 11 368.1 dle ČSN 13 0010 – převzato z [7]

| Teplota [°C] | Jmenovitý tlak PN                          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | 2,5  | 6    | 10   | 16   | 25   | 40   | 63   | 100  | 160  | 250  |
|              | Nejvyšší pracovní přetlak $p_{pmax}$ [MPa] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 200          | 0,21                                       | 0,54 | 0,85 | 1,36 | 2,13 | 3,41 | 5,37 | 8,52 | 13,6 | 21,3 |
| 250          | 0,18                                       | 0,46 | 0,74 | 1,18 | 1,84 | 2,95 | 4,64 | 7,37 | 11,8 | 18,4 |
| 300          | 0,16                                       | 0,39 | 0,63 | 1,00 | 1,57 | 2,50 | 3,94 | 6,26 | 10,0 | 15,7 |
| 350          | 0,13                                       | 0,34 | 0,54 | 0,86 | 1,35 | 2,16 | 3,40 | 5,39 | 8,63 | 13,5 |
| 400          | 0,11                                       | 0,28 | 0,45 | 0,72 | 1,13 | 1,81 | 2,85 | 4,52 | 7,23 | 11,3 |

## 3.3 Materiály

### 3.3.1 Vlastnosti materiálu

Volba materiálu potrubí je dána mnoha faktory a podmínkami, jimž potrubní díly čelí od vlastní výroby až po použití v potrubním systému. Požadavky kladené na materiál potrubí se dají rozdělit do tří hlavních skupin:

#### a) Fyzikální a mechanické vlastnosti

- $R_m$  [Pa] – mez pevnosti materiálu,
- $R_e$  [Pa] – mez kluzu v tahu,
- $R_{p0,2}$  [Pa] – smluvní mez kluzu v tahu,
- $R_{pT0,2/T}$  [Pa] – smluvní mez kluzu v tahu za teploty,
- $R_T/10^5/1/T$  [Pa] – mez tečení v tahu (creep) za teploty,
- $R_{mT}/10^5/T$  [Pa] – mez pevnosti při tečení v tahu za teploty,
- $\varepsilon$  [%] – poměrné prodloužení, případně tažnost A [%],
- vrubová houževnatost [J/cm],
- tvrdost [HB, HRB, HRC, HV],
- $E$  [Pa] – modul pružnosti v tahu,
- $G$  [Pa] – modul pružnosti ve smyku,

- $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] – hustota,
- $\alpha_T$  [ $\text{K}^{-1}$ ] – tepelná roztažnost,
- $\lambda$  [ $\text{W/mK}$ ] – tepelná vodivost.

Tyto vlastnosti jsou stanovovány materiálovými zkouškami a uváděny v materiálových listech. Ovlivňují hlavně pevnostní výpočet potrubních dílů, teplotně dilatační výpočet navrženého potrubního systému, tepelné ztráty a další jevy projevující se především na výsledné funkci potrubního systému.

#### b) Technologické vlastnosti

- svařitelnost,
- tvárnost,
- obrobitelnost,
- odolnost proti opotřebení,
- schopnost tepelného zpracování.

Tyto vlastnosti jsou také uváděny v materiálových listech a ovlivňují hlavně možnosti technologického postupu výroby a montáže potrubních dílů.

#### c) Chemické vlastnosti

Tyto vlastnosti závisí zejména na druhu dopravovaného média. Buď agresivní médium (nebo okolí) nesmí chemicky ovlivňovat a snižovat vlastnosti materiálu potrubí, nebo naopak potrubí nesmí chemicky ovlivňovat dopravované médium. [8]

V energetickém průmyslu jsou obvykle používaným materiálem potrubí oceli. V této části se proto zaměříme na ně.

### 3.3.2 Značení oceli

Jednotlivé oceli jsou dle ČSN EN 10027 označovány unikátní značkou a číslem. ČSN EN 10027-1 rozděluje značky ocelí do dvou hlavních skupin:

- Skupina 1 – oceli označované podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností, např.: P235GH.

První písmeno označuje druh oceli z hlediska použití (např. S = konstrukční oceli, P = oceli pro tlakové účely, L = oceli na potrubí atd.). Následuje trojciferné číslo označující stanovenou minimální mez kluzu v MPa pro nejmenší rozsah tlouštěk. Dále následují až 3 symboly označující zpracování, rozsah a podmínky použití nebo jiné zvláštní požadavky (např.: M = termomechanicky válcováno, G = jiné charakteristiky, H = vysoká teplota).

- Skupina 2 – oceli označované podle chemického složení, např.: X10CrNi18-8.

Pro korozivzdorné oceli a ostatní legované oceli je značení následující. První písmeno X označuje, že střední obsah nejméně jednoho legujícího prvku je větší nebo roven 5%. Následuje číslo označující stonásobek procentuální střední hodnoty rozsahu předepsané obsahu uhlíku. Dále následují chemické značky legujících prvků a čísla oddělená spojovací čárkou, která odpovídají procentuálnímu střednímu obsahu příslušného prvku zaokrouhleného na nejbližší vyšší číslo. Může následovat chemická značka oddělená spojovací čárkou pro charakteristický prvek pro ocel, jehož obsah je v rozmezí  $0,20 \div 1$  % a číslo označující desetinásobek středního obsahu příslušného prvku. Může následovat symbol označující zvláštní požadavky.

ČSN EN 10027-2 stanovuje čísla ocelí jako 1.XXYYYYY, kde první číslo značí skupinu materiálu (1 = ocel), XX značí číslo skupiny oceli a YYYYY její pořadové číslo.

### 3.3.3 Používané oceli

Norma EN 10217-7 uvádí seznam legovaných ocelí používaných na svařované ocelové koživzdorné trubky pro tlakové účely. Uvádí chemické složení jednotlivých ocelí i jejich mechanické vlastnosti.

Podle mechanických vlastností za zvýšených teplot, ovlivněných obsahem legujících prvků v legovaných ocelích, jsou v energetice důležité oceli žárovečné, které i při zvýšených teplotách do cca 650 °C vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti nebo žáruvzdorné, které odolávají velmi vysokým teplotám i nad 650 °C, avšak jejich mechanické vlastnosti v těchto podmínkách klesají. Důležité jsou rovněž oceli korozivzdorné.

Tabulka 5 uvádí minimální smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  a  $R_{p0,1}$  vybraných ocelí za zvýšené teploty podle ČSN EN 10217-7.

Tabulka 5: Minimální smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  a  $R_{p0,1}$  za zvýšené teploty – převzato z [9]

| Označení oceli     |                        | $R_{p0,2}$ minimálně v MPa, při teplotě (°C) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | $R_{p0,1}$ minimálně v MPa, při teplotě (°C) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Mezní teplota <sup>a</sup> |
|--------------------|------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|
| Značka oceli       | Číselné označení oceli | 50   | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 50   | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | °C                         |
| X2CrNi18-9         | 1.4307                 | 165  | 147 | 132 | 118 | 108 | 100 | 94  | 89  | 85  | 81  | 80  | 200  | 181 | 162 | 147 | 137 | 127 | 121 | 116 | 112 | 109 | 108 | 350                        |
| X2CrNi19-11        | 1.4308                 | 165  | 147 | 132 | 118 | 108 | 100 | 94  | 89  | 85  | 81  | 80  | 200  | 181 | 162 | 147 | 137 | 127 | 121 | 116 | 112 | 109 | 108 | 350                        |
| X2CrNi18-10        | 1.4311                 | 255  | 205 | 175 | 157 | 145 | 136 | 130 | 125 | 121 | 119 | 118 | 282  | 240 | 210 | 187 | 175 | 167 | 161 | 156 | 152 | 149 | 147 | 400                        |
| X5CrNi18-10        | 1.4301                 | 180  | 157 | 142 | 127 | 118 | 110 | 104 | 98  | 95  | 92  | 90  | 218  | 191 | 172 | 157 | 145 | 135 | 129 | 125 | 122 | 120 | 120 | 300                        |
| X8CrNiTi18-10      | 1.4541                 | 190  | 178 | 167 | 157 | 147 | 136 | 130 | 125 | 121 | 119 | 118 | 222  | 208 | 196 | 186 | 177 | 167 | 161 | 156 | 152 | 149 | 147 | 400                        |
| X8CrNiNb18-10      | 1.4550                 | 195  | 177 | 167 | 157 | 147 | 136 | 130 | 125 | 121 | 119 | 118 | 232  | 211 | 196 | 186 | 177 | 167 | 161 | 156 | 152 | 149 | 147 | 400                        |
| X2CrNiMo17-12-2    | 1.4404                 | 182  | 166 | 152 | 137 | 127 | 118 | 113 | 108 | 103 | 100 | 98  | 217  | 199 | 181 | 167 | 157 | 145 | 139 | 135 | 130 | 128 | 127 | 400                        |
| X5CrNiMo17-12-2    | 1.4401                 | 193  | 177 | 162 | 147 | 137 | 127 | 120 | 115 | 112 | 110 | 108 | 230  | 211 | 191 | 177 | 167 | 156 | 150 | 144 | 141 | 139 | 137 | 300                        |
| X8CrNiMoTi17-12-2  | 1.4571                 | 202  | 185 | 177 | 167 | 157 | 145 | 140 | 135 | 131 | 129 | 127 | 232  | 218 | 206 | 196 | 186 | 175 | 169 | 164 | 160 | 158 | 157 | 400                        |
| X2 CrNiMo 17-12-3  | 1.4432                 | 182  | 166 | 152 | 137 | 127 | 118 | 113 | 108 | 103 | 100 | 98  | 217  | 199 | 181 | 167 | 157 | 145 | 139 | 135 | 130 | 128 | 127 | 400                        |
| X2CrNiMo17-13-3    | 1.4429                 | 260  | 211 | 185 | 167 | 155 | 145 | 140 | 135 | 131 | 129 | 127 | 290  | 246 | 218 | 198 | 183 | 175 | 169 | 164 | 160 | 158 | 157 | 400                        |
| X3CrNiMo17-13-3    | 1.4436                 | 195  | 177 | 162 | 147 | 137 | 127 | 120 | 115 | 112 | 110 | 108 | 228  | 211 | 191 | 177 | 167 | 156 | 150 | 144 | 141 | 139 | 137 | 300                        |
| X2CrNiMo18-14-3    | 1.4435                 | 180  | 165 | 150 | 137 | 127 | 119 | 113 | 108 | 103 | 100 | 98  | 217  | 200 | 180 | 165 | 153 | 145 | 139 | 135 | 130 | 128 | 127 | 400                        |
| X2CrNiMo17-13-5    | 1.4439                 | 260  | 225 | 200 | 185 | 175 | 165 | 155 | 150 | -   | -   | -   | 290  | 255 | 230 | 210 | 200 | 190 | 180 | 175 | -   | -   | -   | 400                        |
| X2CrNiMo18-15-4    | 1.4438                 | 200  | 172 | 157 | 147 | 137 | 127 | 120 | 115 | 112 | 110 | 108 | 232  | 206 | 188 | 177 | 167 | 156 | 148 | 144 | 140 | 138 | 136 | 400                        |
| X1NiCrMoCu31-27-24 | 1.4563                 | 210  | 190 | 175 | 160 | 155 | 150 | 145 | 135 | 125 | 120 | 115 | 240  | 220 | 205 | 190 | 185 | 180 | 175 | 165 | 155 | 150 | 145 | 400                        |
| X1NiCrMoCu25-20-5  | 1.4539                 | 216  | 205 | 190 | 175 | 160 | 145 | 135 | 125 | 115 | 110 | 105 | 244  | 235 | 220 | 205 | 190 | 175 | 165 | 155 | 145 | 140 | 135 | 400                        |
| X1CrNiMoCuN20-18-7 | 1.4547                 | 267  | 230 | 205 | 190 | 180 | 170 | 165 | 160 | 153 | 148 | -   | 306  | 270 | 245 | 225 | 212 | 200 | 195 | 190 | 184 | 180 | -   | 400                        |
| X1NiCrMoCuN25-20-7 | 1.4529                 | 270  | 230 | 210 | 190 | 180 | 170 | 165 | 160 | 150 | 140 | 105 | 310  | 270 | 245 | 225 | 215 | 205 | 195 | 190 | 180 | 150 | 135 | 400                        |

<sup>a</sup> Pro tloušťky stěny větší než 60 mm jsou hodnoty smluvní meze kluzu předmětem dohody při objednávání. **Volitelný požadavek 10:** Platí dohodnuté hodnoty smluvní meze kluzu při zvýšené teplotě pro tloušťky stěn větší než 60 mm.  
<sup>b</sup> Až do těchto teplot by se materiál, po dobu do 100 000 hod, neměl měnit tak, aby vykazoval náchylnost k mezikrystalové korozi, je-li zkoušen podle EN ISO 3651-2. Viz také tabulka 6.

### 3.4 Součásti potrubních systémů

Potrubní systém je pro zjednodušení výroby, dosažení kompatibility součástí různých výrobců a omezení nutnosti výpočtů obvykle navrhován a konstruován z normalizovaných součástí. Tyto součásti lze rozdělit do následujících několika skupin:

- trubky,
- části potrubí k přivařování,
- potrubní spoje obtížně a snadno rozebiratelné,
- kompenzátory,
- uložení potrubí,
- armatury,
- instrumenty a zařízení.

### 3.4.1 Trubky

Označení trubek se píše ve tvaru TR  $D_2 \times s - L$ , kde TR je značka polotovaru (trubky),  $D_2$  je vnější průměr trubky,  $s$  je tloušťka stěny a  $L$  je délka trubky (např.: TR 60,3 x 3 – 2000). Rozměrům trubek pak odpovídá určitý jmenovitý průměr DN a jmenovitý tlak PN.

Pro účely energetického průmyslu se používají trubky vyráběné jako bezešvé nebo svařované podélným či šroubovicovým svarem. Podle způsobu výroby jsou válcované nebo tažené za tepla či za studena.

Vlastnosti a dodací podmínky bezešvých resp. svařovaných ocelových trubek pro tlakové nádoby a zařízení udává norma ČSN EN 10216 resp. ČSN EN 10217.

### 3.4.2 Části potrubí k přivařování

Těmito částmi jsou myšlena ohyby, kolena, oblouky, tvarovky T a Y, redukce nebo záslepky.

První tři zmiňované části se liší ve způsobu výroby, potažmo hlavně v rozměrech a pevnosti. Ohyby jsou vyráběny ohýbáním za tepla či za studena z rovné trubky. Je to cenově nejdostupnější volba, avšak nevýhodou je rozdílná tloušťka vnitřní a vnější strany ohybu, možné zvrásnění vnitřní stěny a nutný velký poměr mezi rádiusem ohybu a průměrem trubky (zhruba  $R/d \geq 3$ ). Oblouky jsou svařované části používané pro velké jmenovité průměry potrubí, kde ohýbání už není možné. Kolena jsou potom lité nebo lisované součásti. Cenově jsou nejnáročnější, ale jejich výhodou je malý poměr  $R/d$  (od  $R = d$ ).

### 3.4.3 Potrubní spoje

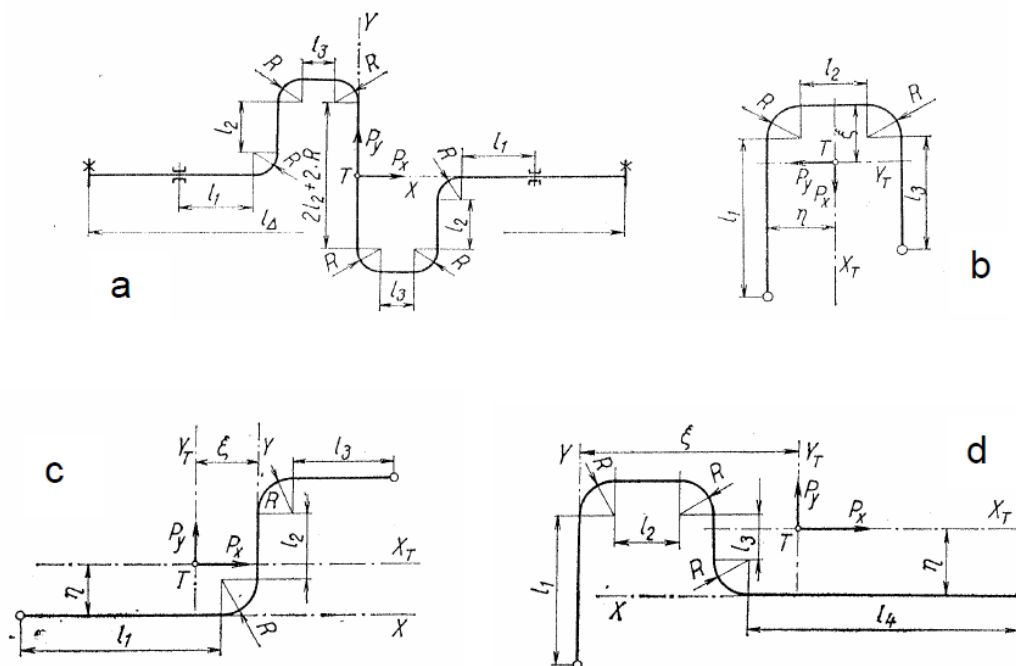
Výběr spojů závisí na druhu a parametrech dopavovaného média a nárocích na spolehlivost systému a jeho údržbu spojenou s rozebíráním jednotlivých částí potrubí. Dělicím znakem spojů je tedy jejich rozebíratelnost.

Mezi obtížně rozebíratelné patří spoje závitové, hrdlové a svařované. Mezi snadno rozebíratelné potom přírubové, šroubení nebo spojky pro rychlou montáž.

### 3.4.4 Kompenzátory

Kompenzátory jsou deformovatelné součásti potrubí. Slouží ke snížení sil a momentů v potrubní trase vyvolaných zejména tepelnou dilatací potrubí nebo změnou polohy připojovacích míst. Do potrubní trasy jsou implementovány v případě, že možné síly a momenty vzniklé v trase jsou větší, než je trasa schopna kompenzovat vlastní elastickou deformací.

Kompenzátory jsou buď vyráběny a montovány jako samostatné komponenty (gumové, vlnovcové, ucpávkové), nebo jsou vytvářeny tvarováním části potrubí pomocí ohybů a kolen (viz Obrázek 8: a – kompenzátor tvaru S, b – tvaru U, c – tvaru Z, d – tvaru P).



Obrázek 7: Ohybové kompenzátory – převzato z [8]

### 3.4.5 Uložení potrubí

Uložením se rozumí zavěšení, podepření nebo jiné připevnění potrubí ke stavbě nebo k zemi a zachycení silových a momentových účinků, které v potrubí za provozu nebo při montáži vznikají. Obecně mohou působit na uložení tyto síly a momenty [6]:

- vlastní tíha trubky a jejích komponentů,
- hmotnost proudícího, popřípadě zkušební média,
- hmotnost tepelné izolace,
- síly od tření o kluznou podpěru v patce nebo v bočních vedeních,
- síly a momenty, vyvolané kompenzačními účinky potrubí při změně teploty,
- síly od působení hydraulického tlaku ve vlnovcových nebo ucpávkových kompenzátorech,
- síly vyvolané předpětím vestavěných trubkových kompenzátorů nebo předpětím celé soustavy za studena,
- síly vyvolané hydraulickými rázy v potrubí,
- síly vyvolané dynamickými účinky proudícího média,
- síly působící na potrubí z vnějšího prostředí (síla větru, sníh).

Správným rozmístěním a volbou typu uložení je tedy nutno upevnit potrubní systém v prostoru a zároveň mu poskytnout dostatečnou volnost pro jeho pružný pohyb při pracovním zatížení.

Základní typy uložení můžeme rozdělit podle pohybu, kterému dané uložení zamezuje:

- pevný bod momentově pevný – zamezuje jakémukoliv posuvu a rotaci trubky,
- pevný bod momentově volný – zamezuje jakémukoliv posuvu trubky, ale umožňuje její libovolnou rotaci,
- osově pevný bod – zamezuje pouze posuvu v ose trubky,
- osové vedení – zamezuje posuvu v rovině kolmé na osu trubky,
- pevná podpěra – zamezuje posuvu trubky ve směru tíhové síly,



- pevný závěs – zamezuje posuvu trubky ve směru tíhové síly, trubka je uchycena shora.

Pevná podpěra a pevný závěs mohou být nahrazeny pružinovými variantami, které se dokážou přispůsobit pohybu trubky.

### 3.4.6 Armatury

Armatury jsou průtočné části potrubí jimiž lze daný průtok uzavřít nebo regulovat. Z hlediska ovládání mohou být ruční nebo ovládané motorem a to buď automaticky (podle aktuálních údajů měření v systému) nebo ručně.

Podle funkce je lze rozdělit takto:

- uzavírací armatury – slouží k úplnému uzavření nebo otevření potrubní trasy,
- regulační armatury – slouží k regulaci průtoku potrubní trasou,
- k řízení tlaku tekutin – pojistné ventily předcházející překročení určitého maximálního tlaku v systému nebo redukční ventily ovládající výstupní tlak,
- ostatní příslušenství – např. odvaděče kondenzátu nebo filtry.

Základními typy armatur z hlediska konstrukčního provedení jsou:

- ventily,
- šoupátka,
- kohouty,
- klapky.

### 3.4.7 Instrumenty a zařízení

Instrumenty slouží k měření parametrů dopravovaného média. Měření může být buď místní pro informativní účely nebo může být informace o měření předávána regulačnímu systému a ovlivňovat regulaci procesu.

Mezi zařízení patří čerpadla, nádrže, tepelné výměníky, kondenzátory, turbíny atd., které návrhově nespádají přímo do potrubního systému, ale určují jeho okrajové podmínky a zajišťují chod procesu.

## 4 Stanovení tlakových ztrát

Od počátečního do koncového bodu potrubní trasy dochází vlivem vazkosti tekutiny k poklesu tlaku dopravovaného média. Tření v tekutině způsobuje tzv. disipaci části energie mechanické na energii tepelnou. Této energii se říká ztrátová a obvykle se vztahuje na jednotku hmotnosti, tíhy nebo objemu. Vyjádřena je následovně:

$$e_z = Y_z = \frac{p_z}{\rho} = gh_z = \zeta \frac{v^2}{2}, \quad (4.1)$$

kde  $p_z$  je tlaková ztráta,  $h_z$  je ztrátová výška a  $\zeta$  je ztrátový součinitel třecího nebo místního odporu. [10]

Tlakovou ztrátu je nutné vzít v potaz při návrhu čerpadla pro potrubní systém, neboť výkon čerpadla musí pokrýt nejen dopravní výšku kapaliny a požadovaný výstupní tlak, ale také celkovou tlakovou ztrátu v potrubním systému.

Tlakové ztráty se dělí na dva druhy:

- třecí ztráty,
- místní ztráty.

### 4.1 Třecí ztráty

Ztráta třecí vzniká na volné délce potrubí vlivem tření o stěnu trubky a je závislá na typu proudění a drsnosti stěny trubky. Vyjádřena je vztahem:

$$p_z = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho, \quad (4.2)$$

kde  $L$  je délka trubky,  $d$  její vnitřní průměr,  $v$  rychlost proudění,  $\rho$  hustota tekutiny a  $\lambda$  součinitel tření. Součinitel tření je potom funkcí Reynoldsova čísla  $Re$  (daným typem proudění) a poměrné drsnosti trubky  $\varepsilon$ :

$$\lambda = f(Re, \varepsilon), \quad (4.3)$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad \varepsilon = \frac{k}{d}, \quad (4.4)$$

kde  $\nu$  je kinematická vazkost tekutiny a  $k$  je absolutní drsnost stěny potrubí.

Z hlediska Reynoldsova čísla lze proudění rozdělit do tří oblastí:

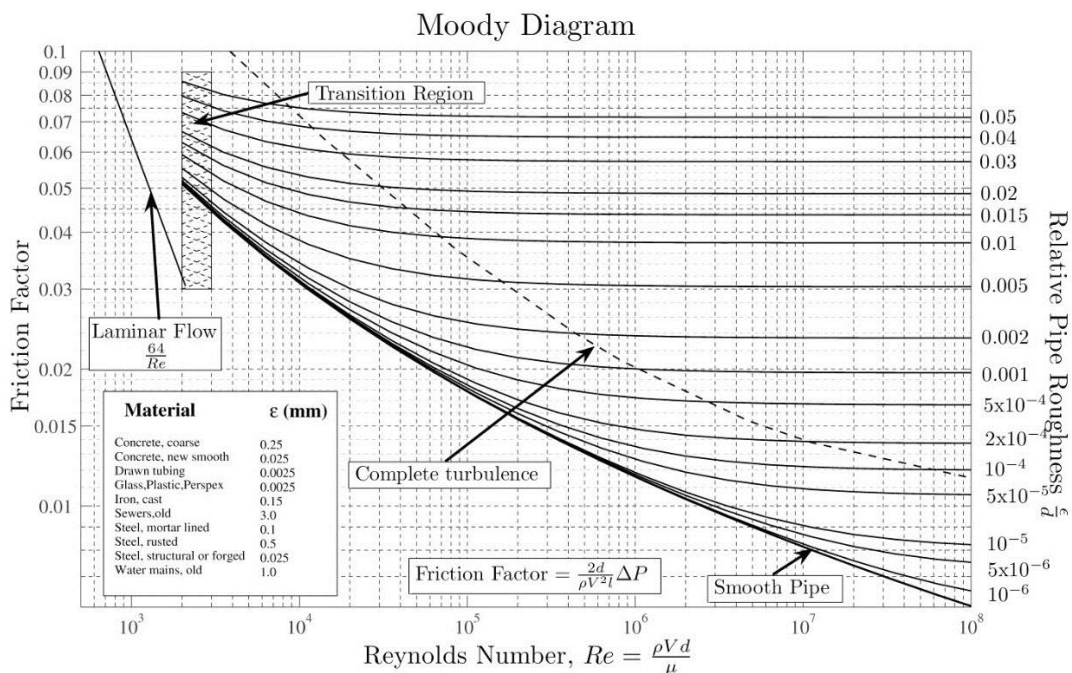
- laminární proudění,
- přechodová oblast,
- turbulentní proudění.

Z hlediska drsnosti stěny lze pak turbulentní proudění dále rozdělit na oblasti:

- hydrodynamicky hladká stěna – nerovnosti stěny jsou menší než vazká podvrstva proudění, která je zakryje a tím pádem nemají vliv na třecí odpor (ten závisí jen na  $Re$ ),
- oblast přechodová – nerovnosti stěny začínají vyčnívat z vazké podvrstvy a  $\varepsilon$  ovlivňuje třecí odpor společně s  $Re$ ,

- vyvinuté turbulentní proudění – vazká podvrstva nezakrývá nerovnosti stěny a součinitel tření je závislý jen na  $\epsilon$ . [10]

Experimentálně zjišťovaný průběh součinitele tření  $\lambda$  je zobrazen na Obrázku 8.



Obrázek 8: Moodyho diagram – převzato z [11]

## 4.2 Místní ztráty

Ztráta místní vzniká na jednotlivých komponentech potrubního systému (kolena, T kusy, redukce, armatury atd.) vlivem změny velikosti a směru proudění, což vyvolává víření, případně odtržení proudu tekutiny od stěny. Tyto jevy jsou doprovázeny disipací a dochází tak ke ztrátě mechanické energie proudící tekutiny a k její přeměně na teplo.

Ztrátový součinitel  $\zeta$  tedy v tomto případě závisí kromě Reynoldsova čísla a drsnosti stěny hlavně na geometrickém tvaru komponentu a změně průtočného průřezu.

U jednoduchých geometrií, jako je například náhlá změna průtočného průřezu, se dá tlaková ztráta vypočítat analyticky pomocí věty o změně toku hybnosti, Bernulliho rovnice a rovnice kontinuity. U složitějších geometrií není analytický výpočet možný. Proto se v praxi pro výpočet ztrát v potrubí používá tabulkových hodnot, či z nich zobecněných vzorců, dodaných výrobcem, které jsou výsledky experimentálních měření. [12]

Např. podle [12] se dá ztrátový součinitel v kolenu určit podle vzorce:

$$\zeta = 0,131 + 0,16 \left( \frac{d}{R} \right)^{3,5}, \quad (4.5)$$

kde  $d$  je vnitřní průměr trubky a  $R$  je vnitřní radius kolene.

Tabulka 6 pak uvádí hodnoty ztrátového součinitele pro průtok clonou dle [12], kde  $S$  je průřez otvoru clony vložené do válcové trubice průřezu  $S_1$ .

Tabulka 6: Ztrátový součinitel pro průtok clonou – převzato z [12]

|                  |     |      |      |     |      |     |     |      |      |   |
|------------------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|------|------|---|
| S/S <sub>1</sub> | 0,1 | 0,2  | 0,3  | 0,4 | 0,5  | 0,6 | 0,7 | 0,8  | 0,9  | 1 |
| $\zeta$          | 225 | 47,7 | 17,8 | 7,8 | 3,75 | 1,8 | 0,8 | 0,29 | 0,06 | 0 |

## 5 Popis problematiky pevnostních a teplotně dilatačních výpočtů

Každý potrubní systém je během své životnosti vystavován mnoha zatížením. Zatížení mohou být následujících druhů nebo jejich kombinací [13]:

- vnitřní nebo vnější tlak,
- zatížení od teplotní roztažnosti,
- vlastní hmotnost potrubí, komponent systému a vedeného média,
- zatížení od klimatických podmínek,
- dynamické účinky vedeného média,
- pohyb podloží nebo budov,
- vibrace systému,
- zemětřesení.

Vlivem těchto zatížení je v materiálu potrubního systému vyvoláváno napětí, na které je potřeba potrubní systém dimenzovat a kontrolovat. Vstupními hodnotami pro tyto výpočty jsou teplota a tlak. Pro obě tyto veličiny jsou pro potrubní systém podle jeho funkce definovány dvě hodnoty: operační (operační teplota  $t_o$  a operační tlak  $p_o$ , což jsou očekávané hodnoty za běžného provozu) a návrhové nebo výpočetní (maximální dovolená teplota  $TS$  a maximální dovolený tlak  $PS$ , což jsou maximální hodnoty, které mohou v systému nastat za extrémních podmínek a které slouží pro výpočet a dimenzování systému).

Dle ČSN EN 13480-3 [13] se pro výpočty stanovuje výpočetní napětí jako menší hodnota z časově nezávislého napětí a časově závislého napětí. Například časově nezávislé napětí v neaustenitických ocelích je určeno jako:

$$f = \min \left\{ \frac{R_{eHt}}{1,5} \text{ nebo } \frac{R_{p0,2t}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right\}, \quad (5.1)$$

kde  $R_{eHt}$  je horní mez kluzu za výpočetní teploty,  $R_{p0,2t}$  je napětí, při kterém plastická deformace dosáhne 0,2% za výpočetní teploty a  $R_m$  je mez pevnosti. Časově závislé napětí v ocelích (creep) je pak určeno jako:

$$f_{cr} = \frac{S_{RTt}}{S_{f_{cr}}}, \quad (5.2)$$

kde  $S_{RTt}$  je creepová pevnost za výpočetní teploty a dané životnosti systému a  $S_{f_{cr}}$  je bezpečnostní koeficient závislý na životnosti systému dle [13].

Dále jsou uvedeny tři druhy výpočtů ověřující bezpečné dimenzování a návrh potrubního systému.

### 5.1 Pevnostní výpočet

Výpočet ověřuje pevnost potrubí a jeho komponent za působení vnitřního přetlaku. Tu zaručuje dostatečná tloušťka stěny. Následuje příklad výpočtu pro rovnou trubku.

Výpočet minimální tloušky stěny potrubí  $e$  pro rovnou trubku dle [13]:

- pro  $D_o/D_i \leq 1,7$ :

$$e = \frac{p_c \cdot D_o}{2f \cdot z + p_c} \quad \text{nebo} \quad e = \frac{p_c D_o}{2f \cdot z + p_c} \quad (5.3)$$

- pro  $D_o/D_i > 1,7$ :

$$e = \frac{D_o}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{f \cdot z - p_c}{f \cdot z + p_c}} \right) \quad \text{nebo} \quad e = \frac{D_i}{2} \left( \sqrt{\frac{f \cdot z + p_c}{f \cdot z - p_c}} - 1 \right), \quad (5.4)$$

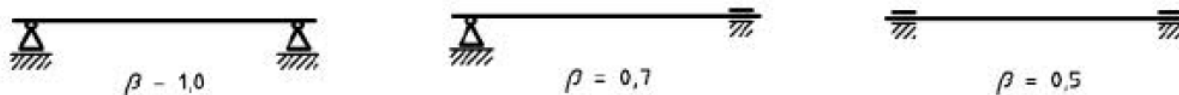
kde  $D_o$  je vnější průměr trubky,  $D_i$  je vnitřní průměr trubky,  $f$  je výpočetní napětí,  $z$  je součinitel hodnoty svaru.

## 5.2 Vzdálenost podpor

Při návrhu uložení potrubního systému je třeba dodržet určitou maximální vzdálenost dvou po sobě následujících podpor. Při překročení vzdálenosti může dojít k poničení potrubí vlivem sil působících na daný nepodepřený úsek. Podobný výpočet se také používá u spádovaného potrubí, kde průhyb potrubí mezi dvěma podpěrami nesmí přerušit požadovaný spád. Základní výpočet maximální vzdálenosti podpor  $L_G$  dle [13] vypadá následovně:

$$L_G = \frac{\pi}{\beta} \sqrt{\frac{E \cdot J}{F_i \cdot S}}, \quad (5.5)$$

kde  $E$  je modul pružnosti,  $J$  je moment setrvačnosti průřezu trubky,  $S$  je bezpečnostní koeficient,  $F_i$  je souhrn sil působících na úsek potrubí a  $\beta$  je koeficient druhu uložení dle Obrázku 9.



Obrázek 9: Příklady koeficientu druhu uložení  $\beta$  – převzato z [13]

## 5.3 Teplotně dilatační výpočet

Potrubí je montováno za běžné teploty okolí a při vlastním provozu může jeho teplota stoupnout řádově o stovky stupňů Celsia. Proto je nutné ověřit, zda navržené uložení poskytuje potrubnímu systému dostatečnou volnost pro kompenzaci jeho teplotní roztažnosti. Ve vhodně zvoleném směru se posuzuje vždy úsek potrubí, který je v daném směru zafixován dvěma krajními podpěrami. Potrubí tohoto úseku rovnoběžné s daným směrem potom při změně teploty mění svou délku podle vzorce pro teplotní roztažnost:

$$\Delta x = x_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T, \quad (5.6)$$

kde  $\Delta x$  je změna délky potrubí,  $x_0$  je úvodní délka potrubí,  $\gamma$  je teplotní součinitel roztažnosti materiálu potrubí a  $\Delta T$  je změna teploty. Části potrubí na daném úseku různoběžné či mimoběžné s vyšetřovaným směrem pak musejí mít dostatečnou délku, aby svou deformací vykompenzovali změnu  $\Delta x$  a při tom nepřekročili dané výpočtové napětí.

## **6 Použitý software**

### **6.1 PDMS**

Plant Design Management System (PDMS) společnosti AVEVA je 3D projekční software vyvinutý pro tvorbu a správu modelů průmyslových zařízení a staveb. Využíván je hlavně pro navrhování elektráren, spaloven nebo chemických továren.

Návrh potrubních systémů je v něm efektivně řešen vytvořením katalogu modelů potrubních komponent požadované specifikace a následným trasováním samotného systému s využitím referencí na daný katalog.

### **6.2 VVD**

Visual Vessel Design (VVD) společnosti Hexagon PPM je výpočetní software využívaný k pevnostním výpočtům potrubí, potrubních komponent a tlakových nádob vystaveným přetlaku. Výpočet prováděný tímto programem respektuje normu EN 13480.

### **6.3 Caesar II**

Caesar II společnosti Hexagon PPM je výpočetní software využívaný k teplotně dilatačním výpočtům potrubí, pevnostním výpočtům potrubí od zatížení vlastní vahou, vnějšími silami, dynamickými účinky atd..

## 7 Praktická část

### 7.1 Popis daného problému

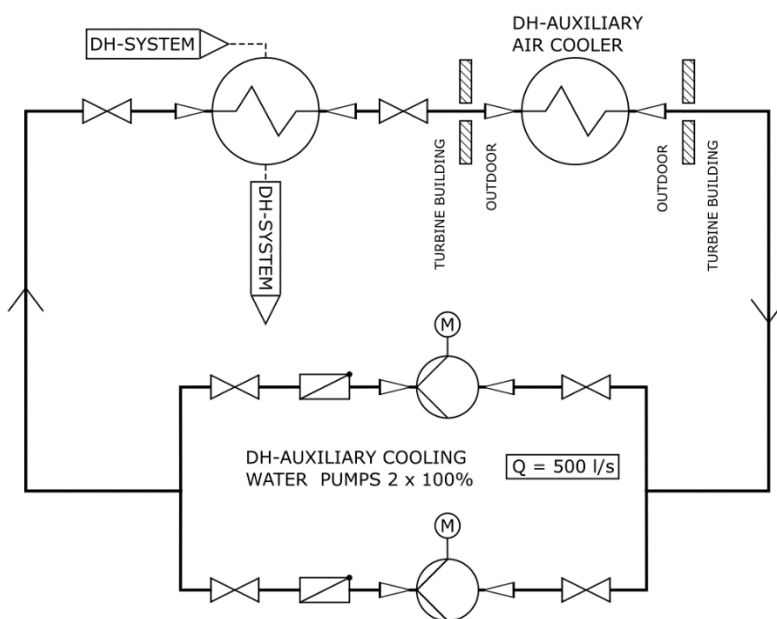
Předmětem návrhu a výpočtů této bakalářské práce je potrubní systém pomocného chladicího okruhu teplé užitkové vody (TUV) na projektu spalovny komunálního odpadu sloužící pro výrobu elektrické energie a ohřev TUV o výkonu do 24 MWe resp. 50 MWt.

Navrhovaný pomocný chladicí okruh slouží ke snížení teploty TUV ohřívané odběrem z turbíny v případě odstavení dodávky TUV do sítě. Chladicí okruh bude obsahovat tepelný výměník pro chlazení TUV, tepelný výměník voda-vzduch pro chlazení média a dvě stejná, paralelně zapojená čerpadla, obě dimenzovaná na 100% výkonu okruhu (v chodu bude vždy jen jedno). Ostatní příslušenství chladicího okruhu jako instrumenty k měření parametrů média, nádoby na chladicí médium nebo bypass tepelného výměníku nejsou zahrnuty do rozsahu této práce.

Jako médium v chladicím okruhu bude používána směs vody a ethylenglykolu v poměru 1:1. Požadovaný průtok chladicím okruhem je  $Q = 500$  l/s. Operační teplota média před resp. za tepelným výměníkem je 50 resp. 70 °C. Nejvyšší výpočetní teplota okruhu se nachází v části za tepelným výměníkem a to 120 °C. Nejvyšší operační tlak se nachází mezi čerpadly a tepelným výměníkem s hodnotou 5,5. Výpočetní tlak celého okruhu je 8,4 bar. Tlak okruhu pro hydrotest je 14 bar. Tlaková ztráta na prvním tepelném výměníku činí 0,5 bar a na druhém tepelném výměníku 2 bar. Na sání čerpadel je požadován minimální tlak 2,5 bar.

Požadovaná potrubní třída pro chladicí okruh je PSK 4233 E16H1A normovaná dle ČSN EN 10217-7. Materiál daný touto potrubní třídou je 1.4307 (X2CrNi18-9). Jedná se o austenitickou ocel obsahující podle ČSN EN 10217-7 maximálně 0,030 % uhlíku a dále 17,5 až 19,5 % chromu a 8,0 až 10,5 % niklu. Další legující prvky jsou obsaženy v poměrně menším množství. Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 180$  MPa a mez pevnosti v tahu  $R_m = 470 \div 670$  MPa, obojí při pokojové teplotě. Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  za teploty 100 resp. 150 °C potom klesne na 147 resp. 132 MPa.

Obrázek 10 zobrazuje P&ID navrhovaného chladicího okruhu.



Obrázek 10: P&ID navrhovaného chladicího okruhu

## 7.2 Stanovení jmenovitého průměru

Stanovení jmenovitého průměru vychází ze vzorce (3.2):

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v}}$$

do kterého je dosazen požadovaný průtok  $Q = 500 \text{ l/s} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  a doporučená rychlost proudění pro výtlačné potrubí chladicí vody  $v = 1,5 \div 3 \text{ m/s}$ . Pro dvě krajní hodnoty doporučené rychlosti proudění potom vychází  $d_{min} = 460,7 \text{ mm}$  a  $d_{max} = 651,5 \text{ mm}$ .

Podle vypočtených hodnot byl zvolen jmenovitý průměr DN 600. Z vycházejícího intervalu se jedná o nejvyšší možný jmenovitý průměr, který byl zvolen z důvodu minimalizace tlakových ztrát v potrubním systému.

## 7.3 Výpočet tlakových ztrát

### 7.3.1 Třecí ztráta

Pro samotný výpočet je třeba stanovit podmínky proudění v daném potrubí. Podle [14] byla pro směs vody a ethylen glykolu v poměru 1:1 za teploty  $48,9 \text{ }^\circ\text{C}$  přiřazena hustota  $\rho = 1064 \text{ kg/m}^3$  a dynamická vazkost  $\mu = 1,5 \text{ cP} = 0,0015 \text{ kg/(ms)}$ . Kinematická vazkost byla vypočtena jako  $\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,0015}{1064} = 1,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Pro potrubí DN600 dané specifikace je vnější průměr  $D = 610 \text{ mm}$  a tloušťka stěny  $t = 8 \text{ mm}$ . Vnitřní průměr tedy vychází  $d = D - 2t = 610 - 16 = 594 \text{ mm}$ . Přesná rychlost proudění v potrubí tedy bude  $v = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,5}{\pi \cdot 0,594^2} = 1,804 \text{ m/s}$ . Reynoldsovo číslo proudění potom vychází jako:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,804 \cdot 0,594}{1,41 \cdot 10^{-6}} = 759983.$$

Podle [15] je drsnost svařovaného potrubí nového nebo starého v dobrém stavu  $0,04 \div 0,1 \text{ mm}$ . Pro výpočet byla vybrána hodnota  $k = 0,1 \text{ mm}$ . Poměrná drsnost potrubí potom vychází  $\varepsilon = \frac{k}{d} = \frac{0,1}{594} = 0,00017$ . Dle [14] odpovídá výše stanoveným hodnotám koeficient tření  $\lambda = 0,0146$ .

Dále byla dle prostorové dispozice délka potrubí chladicího okruhu předběžně odhadnuta jako  $L = 150 \text{ m}$ .

Odhadovaná třecí ztráta byla na chladicím okruhu vypočtena dosazením do vzorce (4.2) jako:

$$\Delta p_t = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho = 0,0146 \frac{150}{0,594} \frac{1,804^2}{2} \cdot 1064 = 6383,3 \text{ Pa} = 0,063 \text{ bar}.$$

### 7.3.2 Místní ztráty

Pro výpočet místních ztrát na jednotlivých potrubních komponentech je třeba stanovit pro použité komponenty ztrátový součinitel  $\zeta$ . Tento součinitel byl podle [15] stanoven pro koleno  $90^\circ$ , redukci DN600/DN350 pro napojení na tepelné výměníky a čerpadla, klapku při plně otevřeném stavu a zpětnou klapku. T kusy sloužící k rozdělení resp. sloučení potrubí před resp. za čerpadly byly zanedbány z důvodu používání vždy jen jednoho čerpadla. Tím pádem bude T kus uvažován buď jako rovný úsek potrubí nebo jako koleno.



- Koleno 90°

Střední rádius kolene  $R = 914$  mm, vnitřní průměr  $d = 594$  mm, poměr  $\frac{R}{d} = 1,54$ ,  $k > 0$ ,  $Re \geq 10^4$ ,  $\delta = 90^\circ$ . Podle [15]:

$$\zeta_1 = k_\Delta \cdot k_{Re} \cdot \zeta_{loc} + 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \frac{R}{d},$$

kde  $k_\Delta = 1 + \varepsilon \cdot 10^3 = 1 + 0,00017 \cdot 10^3 = 1,17$ ,  $k_{Re} = 1$ ,  $\zeta_{loc} = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1$ . Pro  $A_1(\delta = 90^\circ) = 1$ ,  $B_1 = 0,21 \left( \sqrt{(R/d)^{-0,5}} \right) = 0,19$  a  $C_1 = 1$  je  $\zeta_{loc} = 0,19$ . Ztrátový součinitel kolene byl potom vypočítán jako:

$$\zeta_1 = 0,26.$$

- Redukce DN600/DN350

Pro použití jako rozšíření potrubí o úhlu rozšíření  $\alpha \cong 20^\circ$  a poměru průřezných ploch  $n = \frac{F_1}{F_0} = \frac{d_1^2}{d_0^2} = \frac{594^2}{349,2^2} = 2,90$  vyšel ztrátový součinitel redukce dle [15] jako:

$$\zeta_2 = 0,15.$$

Pro použití jako zúžení potrubí o úhlu zúžení  $\alpha \cong 20^\circ$  a poměru průřezných ploch  $n = \frac{F_0}{F_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} = \frac{349,2^2}{594^2} = 0,35$  vyšel ztrátový součinitel redukce dle [15] jako:

$$\zeta_3 = 0,045.$$

- Klapka plně otevřená

Dle [15]  $\zeta_6 = \frac{1}{Re} + \left(1 - \frac{50}{Re}\right) \zeta_{qu}$ , kde  $\zeta_{qu} = 0,6$  vyšel ztrátový součinitel klapky jako:

$$\zeta_4 = 0,6.$$

- Zpětná klapka

Dle [15]  $\zeta_7 = \alpha_0 + \beta_0$ , kde členy  $\alpha_0$  a  $\beta_0$  byly kvůli neznámosti dodavatele a tudíž neznámosti vnitřní geometrie zpětné klapky zvoleny jako střední tabulkové hodnoty  $\alpha_0 = 0,87$  a  $\beta_0 = 4,78$ . Ztrátový součinitel zpětné klapky potom vyšel jako:

$$\zeta_5 = 5,65.$$

Podle prostorové dispozice byl počet kolen v chladícím okruhu předběžně odhadnut na 30. Před a za každé čerpadlo je požadována jedna uzavírací klapka. Zpětná klapka bude umístěna za výtlak obou čerpadel zvlášť. Redukce obou velikostí budou použity před a za oběma výměníky. Ztrátové součinitele jednotlivých komponent byly tedy sečteny a výsledná tlaková místní ztráta byla vypočtena jako:

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= (30 \cdot \zeta_1 + 3 \cdot \zeta_2 + 3 \cdot \zeta_3 + 6 \cdot \zeta_4 + 2 \cdot \zeta_5) \frac{v^2}{2} \rho \\ &= (30 \cdot 0,26 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,045 + 4 \cdot 0,6 + 2 \cdot 5,65) \frac{1,804^2}{2} 1064 \\ &= 38236,8 \text{ Pa} = 0,382 \text{ bar}. \end{aligned}$$

### 7.3.3 Výšková ztráta

Vzhledem k prostorové dispozici bude nutné vést část chladicího okruhu k a od chladiče média umístěného vně budovy otvorem ve zdi budovy určeným k tomuto účelu. Tento otvor se nachází nad plánovaným prostorem pro umístění čerpadel a představuje nejvyšší předpokládané místo okruhu. Předpokládaná překonávaná výška byla odhadnuta na 8 m. To představuje tlakovou ztrátu danou jako:

$$\Delta p_h = g h_z \rho = 9,81 \cdot 8 \cdot 1064 = 83502.7 \text{ Pa} = 0,835 \text{ bar} .$$

Vzhledem k uzavřenosti okruhu a předpokládanému plnění médiem z místa nad nejvyšším bodem hlavní trasy bude ale vliv výškové ztráty vynulován.

### 7.3.4 Celková ztráta

Celková ztráta na chladicím okruhu bude dána součtem ztráty třecí  $\Delta p_t$ , ztrát místních  $\Delta p_m$  a ztrátami na obou tepelných výměnících, které podle dodavatele činí 0,5 bar a 2 bar při požadovaném průtoku 500 l/s. Ztráta na výměnících tedy bude  $\Delta p_v = 2,5$  bar. Předpokládaná celková ztráta byla tedy vypočítána jako:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_m + \Delta p_v = 0,063 + 0,382 + 2,5 = 2,945 \text{ bar} .$$

Hodnoty vypočtených ztrátových součinitelů a tlakových ztrát jsou souhrně uvedeny v Tabulce 7.

Tabulka 7: Souhrn ztrátových součinitelů a tlakových ztrát

| Místní ztrátové součinitele                                       |                   | Tlakové ztráty |                                  |
|---|-------------------|----------------|----------------------------------|
| Koleno 90°  | $\zeta_1 = 0,26$  | Třecí          | $\Delta p_t = 0,063 \text{ bar}$ |
| Redukce DN600/DN350   | $\zeta_2 = 0,15$  | Místní         | $\Delta p_m = 0,382 \text{ bar}$ |
| Redukce DN350/DN600   | $\zeta_3 = 0,045$ | Výšková*       | $\Delta p_h = 0,835 \text{ bar}$ |
| Klapka plně otevřená  | $\zeta_4 = 0,6$   | Výměníků       | $\Delta p_v = 2,5 \text{ bar}$   |
| Klapka zpětná   | $\zeta_5 = 5,65$  | Celková        | $\Delta p = 2,945 \text{ bar}$   |
| *Výšková ztráta je anulována vlivem uzavřenosti chladicího okruhu |                   |                |                                  |

## 7.4 Výběr optimálního čerpadla

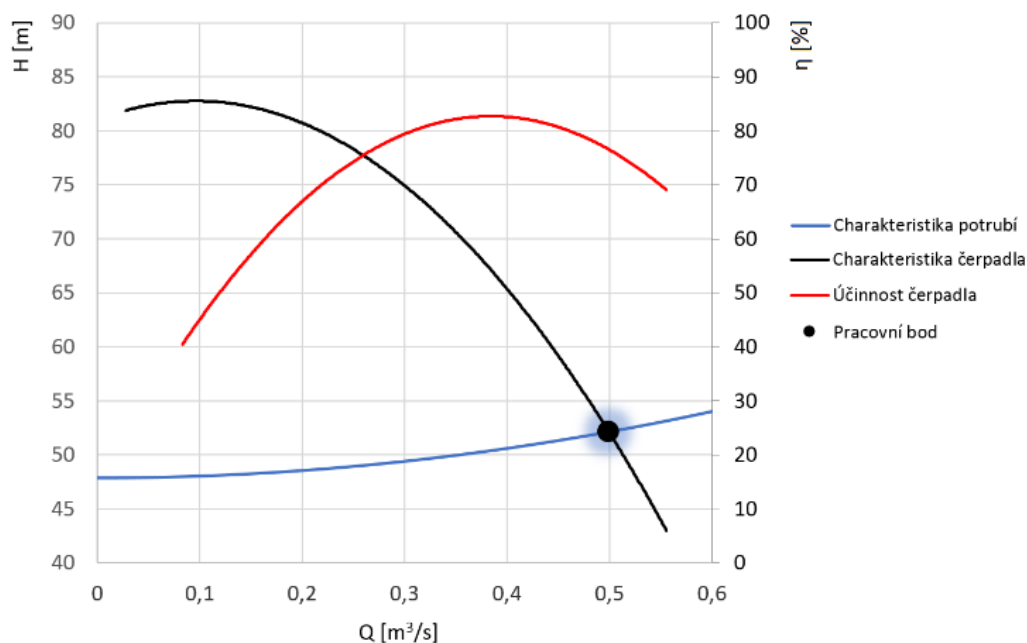
Výběr optimálního čerpadla spočívá v nalezení takového, které při daném průtoku a požadovaném tlaku pracuje s nejvyšší možnou účinností. Charakteristika vybraného čerpadla je následně porovnána s charakteristikou potrubí pro nalezení pracovního bodu čerpadla.

### 7.4.1 Charakteristika potrubí

Charakteristická křivka potrubí je vyobrazení závislosti dopravní výšky potřebné k zajištění určitého průtoku potrubím. Pro vytvoření této závislosti byla sestavena rovnice jejíž levá strana vyjadřuje celkovou dopravní výšku  $H$  nutnou k zajištění daného průtoku a pravá strana má dvě složky. První složka je konstantní a jsou do ní zahrnuty, tlakové ztráty na obou výměnících  $\Delta h_v$  a tlak požadovaný na sání čerpadel  $\Delta h_s$ . Výšková ztráta je zanedbána z důvodu uzavřenosti okruhu. Druhá složka pravé strany rovnice jsou třecí a místní ztráty na potrubí  $\Delta h_t$  a  $\Delta h_m$  závislé na rychlosti proudění. Z rychlosti proudění byl vyjádřen průtok jako proměnná. Všechny členy byly vyjádřeny ve tvaru dopravní výšky.

$$\begin{aligned}
 H &= \Delta h_v + \Delta h_s + \Delta h_t + \Delta h_m = \frac{\Delta p_v + \Delta p_s + \Delta p_t + \Delta p_m}{\rho \cdot g} \\
 &= \frac{\Delta p_v + \Delta p_s}{\rho \cdot g} + \left( \sum \zeta + \lambda \frac{L}{d} \right) \frac{v^2}{2g} \\
 &= \frac{\Delta p_v + \Delta p_s}{\rho \cdot g} + \left[ (30 \cdot \zeta_1 + 3 \cdot \zeta_2 + 3 \cdot \zeta_3 + 6 \cdot \zeta_4 + 2 \cdot \zeta_5) + \lambda \frac{L}{d} \right] \frac{16 \cdot Q^2}{2g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \\
 &= \frac{2,5 \cdot 10^5 + 2,5 \cdot 10^5}{1064 \cdot 9,81} + \left[ 22,085 + 0,0146 \frac{150}{0,594} \right] \frac{16 \cdot Q^2}{2 \cdot 9,81 \cdot \pi^2 \cdot 0,594^4} \\
 &= 47,9 + 17,1 \cdot Q^2
 \end{aligned}$$

Při zadání požadovaného průtoku  $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  do kvadratické rovnice charakteristiky potrubí vychází požadovaná dopravní výška  $H = 52,175 \text{ m}$ . V nabízeném sortimentu výrobce čerpadel bylo nalezeno takové, které vyhovuje těmto parametrům. Graf charakteristiky čerpadla v porovnání s charakteristikou potrubí s vyznačeným pracovním bodem a účinností je vyobrazen na Obrázku 10. Čerpadlo v tomto pracovním bodě podle výrobce pracuje s celkovou účinností  $\eta = 77,3 \%$ .



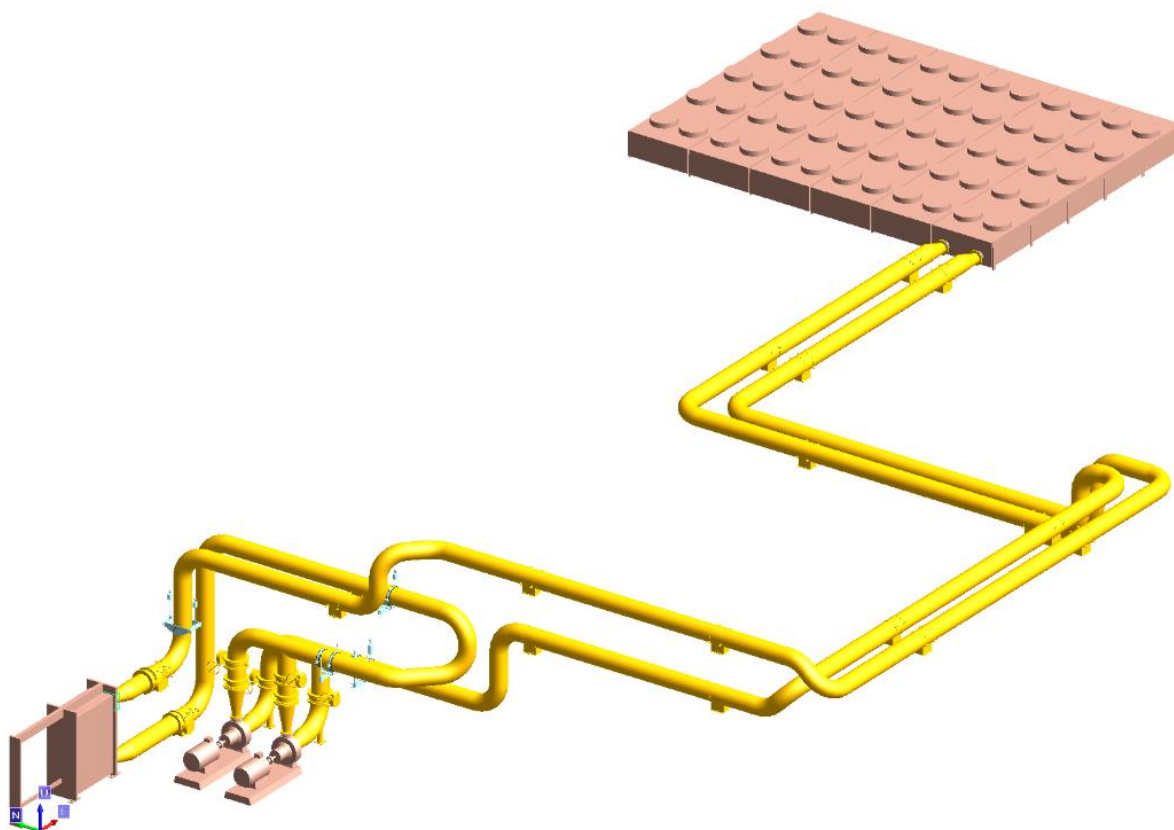
Obrázek 11: Charakteristika potrubí, čerpadla a pracovní bod

## 7.5 Návrh prostorové dispozice

Prostorová dispozice pomocného chladicího okruhu byla vytvořena v modelovacím softwaru PDMS. Při návrhu dispozice potrubního systému byly brány v úvahu následující faktory:

- plánované umístění čerpadel a tepelných výměníků,
- plánované umístění dalších potrubních tras nacházejících se v okolním prostoru,
- plánovaná dispozice potrubního mostu nacházejícího se vně budovy,
- prostorová dispozice budovy,
- hmotnost potrubí mezi dvěma podporami,
- vliv teplotní roztažnosti za provozu systému.

Výsledný návrh dispozice potrubního systému pomocného chladicího okruhu je vyobrazen na Obrázku 11.



Obrázek 12: Prostorová dispozice potrubního systému navržená v PDMS

## 7.6 Pevnostní výpočet

Pevnostní výpočet jednotlivých potrubních dílů byl proveden ve výpočetním softwaru VVD. Výpočty prováděné v tomto programu respektují postupy dané normou EN 13480-3: Kovová průmyslová potrubí – Část 3: Konstrukce a výpočet [13]. Nejedná se o simulace pomocí metody konečných prvků, ale o analytické výpočty dané vzorcí uváděnými touto normou.

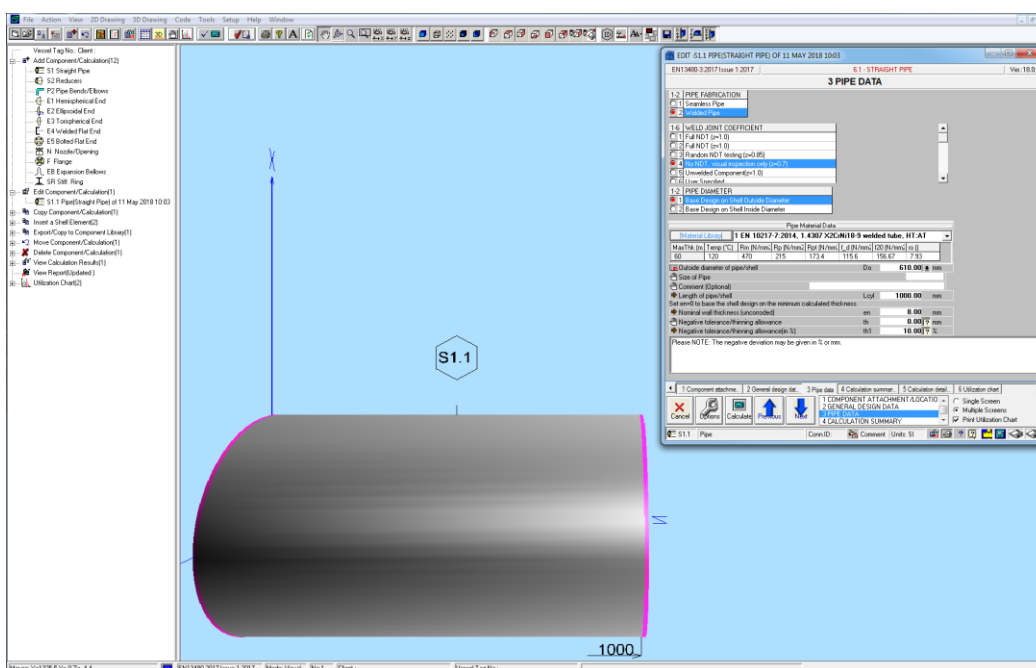
Ukázku prostředí programu VVD v průběhu zadávání dat pro výpočet zobrazuje Obrázek 12, na němž je možné vidět model rovného kusu trubky vytvořeného dle rozměrových a materiálových dat daných požadovanou potrubní třídou PSK 4233 E16H1A a výpočetními parametry danými pro chladicí okruh. Z obrázku je také patrné, že výpočet se řídí normou EN 13480-3.

Obrázek 13 zobrazuje příklad výpočtu programu VVD pro rovnou část potrubí vybraný z výsledkového reportu programu. Z obrázku je patrné, že výpočet postupuje dle výpočtů uvedených jako příklad výše v kapitole 5.1 a respektuje tak normu EN 13480-3.

Dva reporty pevnostních výpočtů v programu VVD obsahuje Příloha 1. Všechny potrubní komponenty pevnostně vyhovují teplotním a tlakovým podmínkám navrhovaného okruhu. Tabulka 8 obsahuje seznam pevnostně ověřovaných komponentů a maximální procentuální hodnotu využití jejich materiálového potenciálu při daných podmínkách.

Tabulka 8: Procentuální využití pevnostních vlastností potrubních komponentů

| Komponent                        | Maximální pevnostní využití [%] |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Trubka                           | 49,3                            |
| Koleno 90°                       | 47,3                            |
| Koleno 45°                       | 47,3                            |
| Redukce koncentrická DN600/DN400 | 49,5                            |
| Redukce koncentrická DN400/DN250 | 62,7                            |
| Redukce excentrická DN600/DN350  | 50,0                            |
| Redukce excentrická DN600/DN400  | 50,1                            |
| T kus DN600/DN600                | 51,8                            |



Obrázek 13: Prostředí výpočetního programu VVD

| CALCULATION DATA   |              |           |
|--|--------------|-----------|
| <b>6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE</b>                     |              |           |
| Outside Diameter of Shell (corroded) $D_{os}$                          |              | 610.00 mm |
| $D_{os} = D_o - 2 * c_o = 610 - 2 * 0 =$                               |              |           |
| Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. $e_{min}$ :               |              |           |
| $e_{min} = p_c * D_{os} / (2 * f * z + p_c)$                           | (6.1-1)      |           |
| $= 0.84 * 610 / (2 * 115.6 * 0.7 + 0.84) =$                            |              | 3.1497 mm |
| Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :                         |              |           |
| $e_{min} = (e_{min} + c + c_o + th) + e_n * th_1 / 100$                |              |           |
| $= (3.15 + 0 + 0 + 0) + 8 * 10 / 100 =$                                |              | 3.9500 mm |
| Analysis Thickness   |              |           |
| $e_a = e_n - c - c_o - th - e_n * th_1 / 100$                          |              |           |
| $= 8 - 0 - 0 - 0 - 8 * 10 / 100 =$                                     |              | 7.2000 mm |
| <b>Internal Pressure <math>e_{min} = 3.95 \leq e_n = 8 [mm]</math></b> | <b>49.3%</b> | <b>OK</b> |

Obrázek 14: Výpočet v programu VVD dle EN 13480-3

## 7.7 Teplotně dilatační výpočet

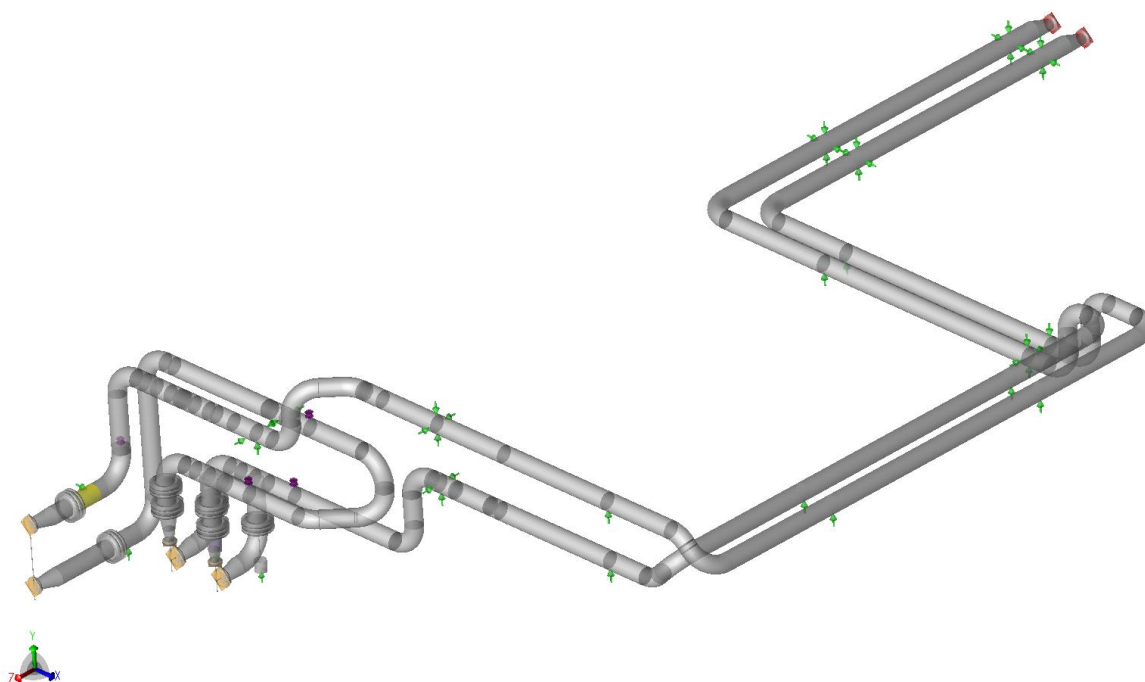
Teplotně dilatační výpočet společně s pevnostním výpočtem celého navrženého systému byl proveden ve výpočetním softwaru Caesar II. Výpočet v tomto programu je založen na metodě konečných prvků.

V programu Caesar II byl vytvořen model potrubního systému chladicího okruhu dle návrhu v PDMS, byla zadána rozměrová a materiálová data daná požadovanou potrubní třídou PSK 4233 E16H1A a výpočetní parametry dané pro chladicí okruh (operační tlak a teplota, výpočetní tlak a teplota a tlak daný pro hydrotest).

Dále byla zadána omezení pohybu potrubí v místech uložení daná typem použitého uložení. Tato omezení obsahují informace o směrech zamezení pohybu, koeficientech tření mezi úložnými elementy a jejich podložkou případně tuhost a předpětí u pružinových závěsů či podpěr.

Připojovací místa potrubního systému k navazujícím zařízením byla vytvořena jako pevné body s posuvem daným teplotní roztažností zařízení za teploty média na vzdálenosti od místa ukotvení zařízení k připojovacímu místu.

Obrázek 14 zobrazuje výpočetní model vytvořený v programu Caesar II.



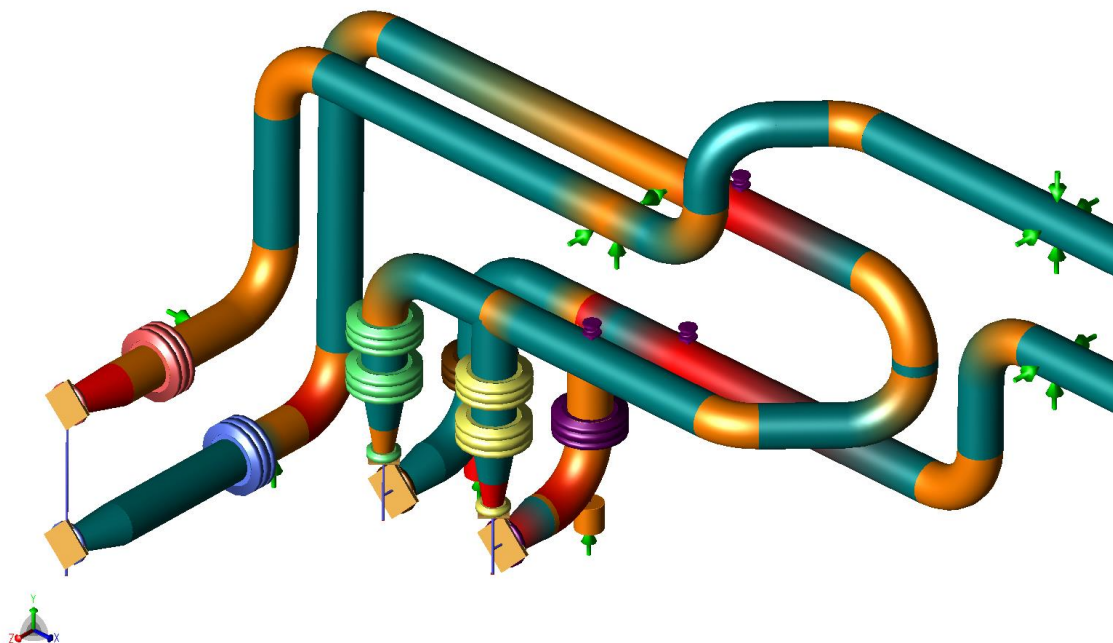
Obrázek 15: Výpočetní model chladicího okruhu v programu Caesar II

Potrubní systém byl následně ověřen výpočtem v sedmi zátěžových případech (load cases) dle EN 13480:

- CASE 1 (HYD) WW+HP – zahrnuje tíhu potrubí naplněného vodou a působení tlaku hydrotestu,
- CASE 2 (OPE) W+T1+P1 – zahrnuje tíhu potrubí naplněného médiem a působení operační teploty a tlaku,
- CASE 3 (OPE) W+T2+P2 – zahrnuje tíhu potrubí naplněného médiem za působení návrhové teploty a tlaku,

- CASE 4 (SUS) W+P1 – zahrnuje tíhu prázdného potrubí a působení operačního tlaku,
- CASE 5 (SUS) W+P2 – zahrnuje tíhu prázdného potrubí a působení návrhového tlaku,
- CASE 6 (EXP) L6=L2-L4 – zahrnuje teplotní roztažnost pro operační podmínky,
- CASE 7 (EXP) L7=L3-L5 – zahrnuje teplotní roztažnost pro výpočetní podmínky.

Výsledná maximální napětí pro jednotlivé zátěžové případy byla porovnána s hodnotami dovoleného napětí dle normy EN 13480-3. Nejvyšší poměr maximálního napětí ku dovolenému napětí vykazuje CASE 5, u kterého tento poměr činí 49,1 %. Report výsledků maximálních napětí pro jednotlivé zátěžové případy obsahuje Příloha 2. Obrázek 15 zobrazuje vizualizaci napětí pro CASE 5 v oblasti kolem čerpadel a prvního tepelného výměníku. Zelená oblast značí poměr do 10 %, oranžová mezi 10 a 20 % a červená nad 20 %.



Obrázek 16: Vizualizace napětí materiálu pro CASE 5

Tabulka 9 obsahuje největší hodnoty sil a momentů vyvozených na připojovací hrdla navazujících zařízení. Až na čerpadlo, u kterého nejsou dosud známé povolené síly a momenty působící na hrdla, je zatížení hrdel navazujících zařízení v pořádku.

Tabulka 9: Hodnoty sil a momentů vyvozených na hrdla připojených zařízení

| Zařízení   | Vstupní/výstupní hrdlo | Maximální síla/moment [kN]/[kNm] | Zátěžový případ síly/momentu | Dovolená síla/moment [kN]/[kNm] |
|------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1. výměník | Vstup                  | 6,2/6,0                          | CASE 3/CASE 3                | 15/13                           |
|            | Výstup                 | 5,9/12,4                         | CASE 3/CASE 2                | 15/13                           |
| 2. výměník | Vstup                  | 10,2/8,1                         | CASE 3/CASE 3                | 12/9,5                          |
|            | Výstup                 | 11,3/8,2                         | CASE 3/CASE 3                | 12/9,5                          |
| Čerpadlo   | Vstup                  | 10,5/14,9                        | CASE 3/CASE 3                | Ke konzultaci s výrobcem        |
|            | Výstup                 | 14,7/14,1                        | CASE 3/CASE 3                | Ke konzultaci s výrobcem        |

## 7.8 Přepočet tlakových ztrát

Po pevnostním a teplotně dilatačním ověření navrženého chladicího okruhu byly přepočítány tlakové ztráty v potrubním systému dle navrženého designu.

### 7.8.1 Třecí ztráta

Podmínky proudění v potrubí zůstaly stejné jako při předběžném výpočtu v kapitole 7.3. Byla přeměřena celková délka potrubí, která činí 153,6 m. Třecí ztráta byla tedy vypočtena podle vzorce (4.2) jako:

$$\Delta p_t = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho = 0,0146 \frac{153,6}{0,594} \frac{1,804^2}{2} \cdot 1064 = 6543,4 \text{ Pa} = 0,065 \text{ bar}.$$

Předběžně vypočtená třecí ztráta činila 0,063 bar.

### 7.8.2 Místní ztráty

Byly přepočítány potrubní komponenty na navrženém chladicím okruhu, který obsahuje 23 kolen 90°, 4 kolena 45°, 4 redukce DN600/DN350 (2 použité jako rozšíření a 2 použité jako zúžení), 1 redukce DN600/DN400 použitá jako zúžení, 1 redukce DN600/DN250 použitá jako rozšíření, 4 plně otevřené klapky a 2 zpětné klapky. Ztrátové součinitele komponent jsou následující.

- Koleno 90°

Výpočet viz kapitola 7.3.

$$\zeta_1 = 0,26$$

- Koleno 45°

Střední rádius kolene  $R = 914$  mm, vnitřní průměr  $d = 594$  mm, poměr  $\frac{R}{d} = 1,54$ ,  $k > 0$ ,  $Re \geq 10^4$ ,  $\delta = 45^\circ$ . Podle [15]:

$$\zeta_1 = k_\Delta \cdot k_{Re} \cdot \zeta_{loc} + 0,0175 \cdot \delta \cdot \lambda \frac{R}{d},$$

kde  $k_\Delta = 1 + \varepsilon \cdot 10^3 = 1 + 0,00017 \cdot 10^3 = 1,17$ ,  $k_{Re} = 1$ ,  $\zeta_{loc} = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1$ . Pro  $A_1(\delta = 45^\circ) = 0,6$ ,  $B_1 = 0,21 \left( \sqrt{(R/d)^{-0,5}} \right) = 0,19$  a  $C_1 = 1$  je  $\zeta_{loc} = 0,11$ . Ztrátový součinitel kolene byl potom vypočítán jako:

$$\zeta_2 = 0,15.$$

- Redukce DN600/DN350

Pro použití jako rozšíření výpočet viz kapitola 7.3.

$$\zeta_3 = 0,15$$

Pro použití jako zúžení výpočet viz kapitola 7.3.

$$\zeta_4 = 0,045$$



- Redukce DN600/DN400

Pro použití jako zúžení potrubí o úhlu zúžení  $\alpha \cong 20^\circ$  a poměru průtočných ploch  $n = \frac{F_0}{F_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} = \frac{398,4^2}{594^2} = 0,45$  vyšel ztrátový součinitel redukce dle [15] jako:

$$\zeta_5 = 0,05 .$$

- Redukce DN600/DN250

Pro použití jako rozšíření potrubí o úhlu rozšíření  $\alpha \cong 20^\circ$  a poměru průtočných ploch  $n = \frac{F_1}{F_0} = \frac{d_1^2}{d_0^2} = \frac{594^2}{267,8^2} = 4,92$  vyšel ztrátový součinitel redukce dle [15] jako:

$$\zeta_6 = 0,26 .$$

- Klapka plně otevřená

Výpočet viz kapitola 7.3.

$$\zeta_7 = 0,6$$

- Zpětná klapka

Výpočet viz kapitola 7.3.

$$\zeta_8 = 5,65$$

Celková místní ztráta  $\Delta p_m$  byla vypočtena jako:

$$\begin{aligned} \Delta p_m &= (23 \cdot \zeta_1 + 4 \cdot \zeta_2 + 2 \cdot \zeta_3 + 2 \cdot \zeta_4 + \zeta_5 + \zeta_6 + 4 \cdot \zeta_7 + 2 \cdot \zeta_8) \frac{v^2}{2} \rho \\ &= (23 \cdot 0,26 + 4 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,045 + 0,05 + 0,26 + 4 \cdot 0,6 + 2 \cdot 5,65) \cdot \\ &\quad \frac{1,804^2}{2} 1064 = 36323,7 \text{ Pa} = 0,363 \text{ bar} . \end{aligned}$$

Předběžně vypočtená celková místní ztráta činila 0,382 bar. Ztrátové součinitele jednotlivých komponentů a tlakové ztráty navrženého systému jsou shrnuty v Tabulce 9.

Tabulka 10: Souhrn ztrátových součinitelů a tlakových ztrát navrženého systému

| Místní ztrátové součinitele |                   | Tlakové ztráty |                                  |
|-----------------------------|-------------------|----------------|----------------------------------|
| Koleno 90°                  | $\zeta_1 = 0,26$  | třecí          | $\Delta p_t = 0,065 \text{ bar}$ |
| Koleno 45°                  | $\zeta_2 = 0,15$  | místní         | $\Delta p_m = 0,363 \text{ bar}$ |
| Redukce DN600/DN350         | $\zeta_3 = 0,15$  | celková        | $\Delta p = 0,428 \text{ bar}$   |
| Redukce DN350/DN600         | $\zeta_4 = 0,045$ |                |                                  |
| Redukce DN600/DN400         | $\zeta_5 = 0,05$  |                |                                  |
| Redukce DN250/DN600         | $\zeta_6 = 0,26$  |                |                                  |
| Klapka plně otevřená        | $\zeta_7 = 0,6$   |                |                                  |
| Klapka zpětná               | $\zeta_8 = 5,65$  |                |                                  |

Součet celkové třecí a místní ztráty podle navrženého modelu činí 0,428 bar. Součet předběžné celkové třecí a místní ztráty činil 0,445 bar. Rozdíl předběžné a výsledné tlakové ztráty na potrubí je tedy 0,017 bar, což je pro návrh čerpadla pro tento chladicí okruh zanedbatelná hodnota.

## 8 Závěr

Cílem práce byl návrh rotačního čerpadla a navazující potrubní trasy. Jednalo se o pomocný chladicí okruh teplé užitkové vody ve spalovně komunálního odpadu. Vstupními údaji pro tento návrh bylo požadované médium včetně jeho teploty, tlaku a průtoku, potrubní třída, procesní P&ID okruhu a plánovaná prostorová dispozice spalovny.

Byl navrhnut jmenovitý průměr potrubní trasy a předběžně vypočítány předpokládané tlakové ztráty na základě odhadu použitých komponentů a průběhu trasy dle prostorových možností. Následně byla vybrána charakteristika čerpadla potřebného výkonu podle vypočítané charakteristiky potrubního systému.

Potrubní systém chladicího okruhu byl podle prostorové dispozice spalovny vytvořen v projekčním programu PDMS. Použité komponenty byly ověřeny pevnostním výpočtem v programu VVD a celý systém byl pevnostně a teplotně dilatačně ověřen ve výpočetním programu Caesar II. Navržený potrubní systém vyhověl pevnostním limitům materiálu i silovým požadavkům výrobců navazujících zařízení. V případě čerpadla musí být maximální síly a momenty vyvozené na hrdla konzultovány s výrobcem.

Na závěr byly přepočítány tlakové ztráty podle navržené dispozice potrubního systému. Odchylka výsledné ztráty od předběžného výpočtu byla shledána zanedbatelnou a návrh rotačního čerpadla zůstal v původní podobě.

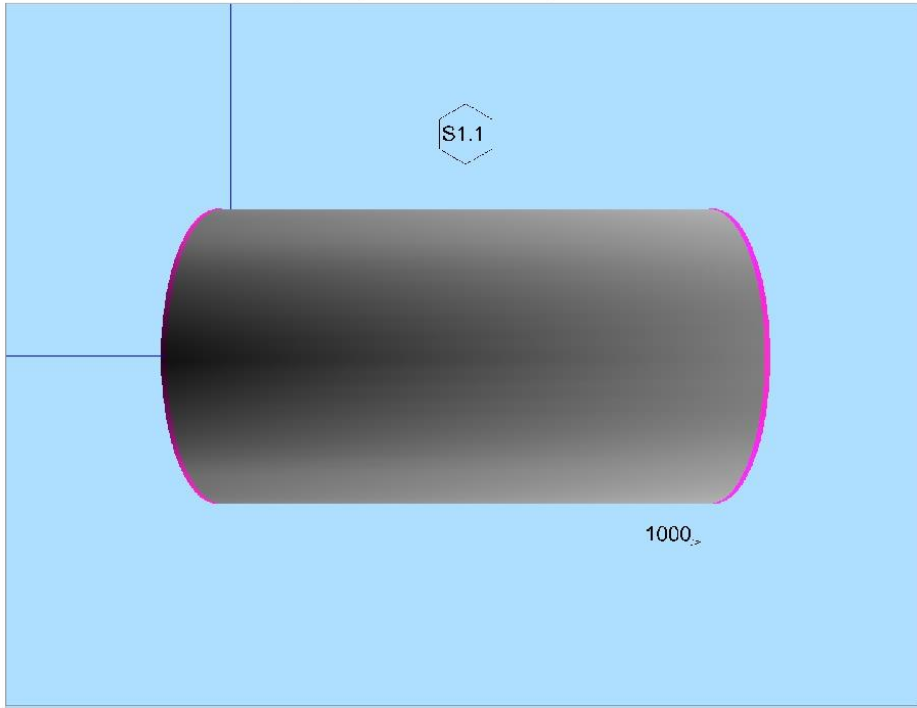
V průběhu práce získal student zkušenosti s návrhem potrubního systému na základě procesních dat a dispozičních možností, s návrhem vhodného čerpadla na základě stanovení charakteristiky navrženého systému dle tlakových ztrát a s pevnostním a teplotně dilatačním výpočtem pro ověření funkčnosti navrženého systému.

Práci by bylo možné dále rozšířit o optimalizaci navrženého potrubního systému za účelem minimalizace tlakových ztrát systému.

## Seznam použitých zdrojů

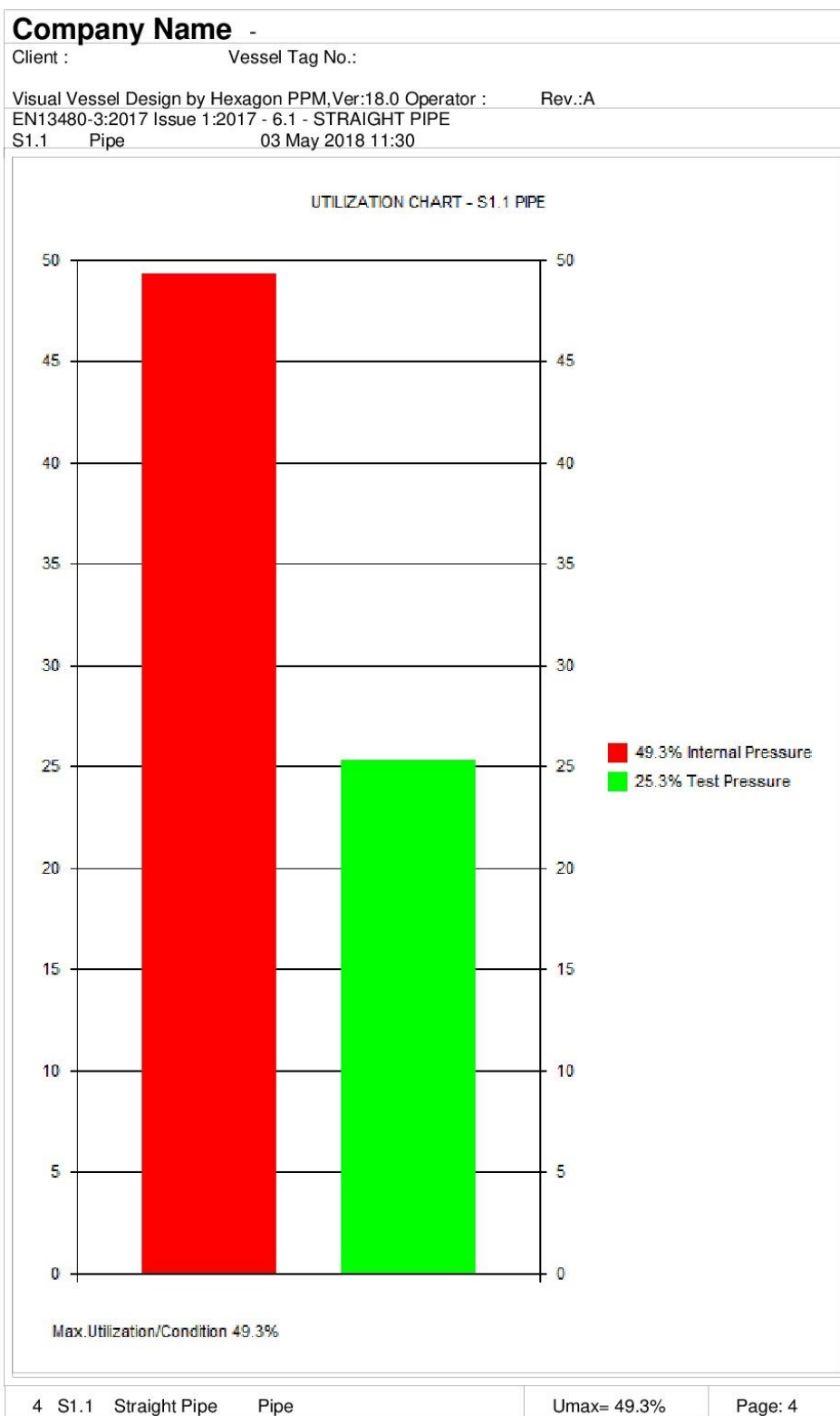
- [1] Janalík, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. [Online] 2008. [Citace: 11. Březen 2018.] <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- [2] Drábková, Sylva. *Potrubní systémy a armatury - část 2*. [Online] 2011. [Citace: 18. Březen 2018.] <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- [3] Melichar, Jan, Bláha, Jaroslav a Brada, Karel. *HYDRAULICKÉ STROJE: Konstrukce a provoz*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02657-4.
- [4] ČSN EN 10220. *Bezešvé a svařované ocelové trubky - Rozměry a hmotnost na jednotku délky*.
- [5] ČSN EN ISO 6708. *Potrubní části. Definice a výběr jmenovitých světlostí. DN*.
- [6] Wilda, Vladimír. *Projektování průmyslových potrubí a potrubních rozvodů*. Praha : SNTL, 1968.
- [7] ČSN 13 0010. *Potrubí a armatury. Jmenovité tlaky a pracovní stupně*.
- [8] Pavlok, Bohuslav. *Potrubní systémy a armatury - část 1*. [Online] 2011. [Citace: 25. Březen 2018.] <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- [9] ČSN EN 10217-7. *Svařované ocelové trubky pro tlakové účely - Technické dodací podmínky - Část 7: Trubky z korozivzdorných ocelí*.
- [10] Janalík, Jaroslav a Šťáva, Pavel. *MECHANIKA TEKUTIN*. [Online] [Citace: 3. Duben 2018.] <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.
- [11] *Wikimedia Commons*. [Online] 2008. [Citace: 3. Duben 2018.] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moody\\_diagram.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moody_diagram.jpg).
- [12] Linhart, Jiří. *Mechanika tekutin I*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-766-7.
- [13] ČSN EN 13480-3. *Kovová průmyslová potrubí - Část 3: Konstrukce a výpočet*.
- [14] *The Engineering Toolbox*. [Online] [Citace: 25. Duben 2018.] [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com).
- [15] Idelchik, I. E. *Handbook of hydraulic resistance 3rd Edition*. Mumbai : Jaico Publishing House, 2008. ISBN 81-7992-118-2.

## **Příloha 1: Report výpočtů v programu VVD**

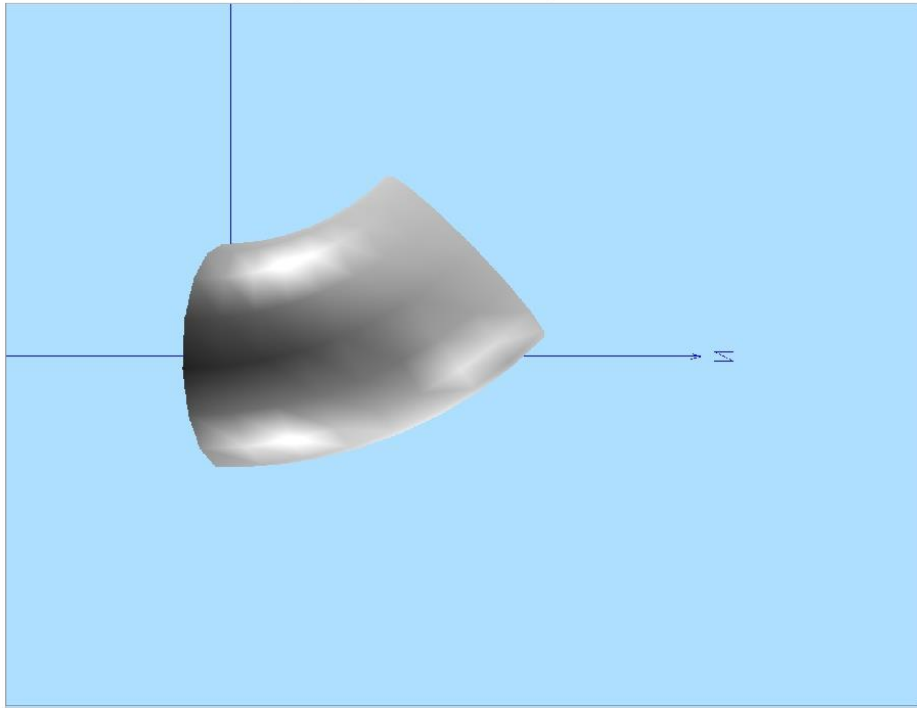
| <b>Company Name -</b>  |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|--|-----------------|---------------------|------------------------------------|---|-------------|----------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------------|---|-----|------|--------------------------------|-----|--|--------------------------|-----|--|---------------------------------|----|-----|---------------------------------|----|--|----------------------------|----|--|--------------------------|----|---|-------------------|--|--|------------------------------|--|-------|------------------------------|----|--|
| Client :   | Vessel Tag No.: |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator :   |                 | Rev.:A              |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>(0) Drawing</b>   |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| 3D View of Vessel (alter by using the Save User Specified View command)  |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|   |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>Design Data &amp; Process Information</b>   |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Description</th> <th>Units</th> <th>Design Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Process Card</td> <td></td> <td>General Design Data</td> </tr> <tr> <td>Design Code &amp; Specifications</td> <td></td> <td>EN13480-3</td> </tr> <tr> <td>Internal Design Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td>0.84</td> </tr> <tr> <td>External Design Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hydrotest Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Maximum Design Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Minimum Design Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Operating Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Corrosion Allowance (mm)</td> <td>mm</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Content of Vessel</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Specific Density of Oper.Liq</td> <td></td> <td>1.064</td> </tr> <tr> <td>Normal Liquid Level NLL (mm)</td> <td>mm</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> |                 |                     | Description                        | Units   | Design Data | Process Card         |                   | General Design Data | Design Code & Specifications |                    | EN13480-3                          | Internal Design Pressure (MPa)                              | MPa | 0.84 | External Design Pressure (MPa) | MPa |  | Hydrotest Pressure (MPa) | MPa |  | Maximum Design Temperature (°C) | °C | 120 | Minimum Design Temperature (°C) | °C |  | Operating Temperature (°C) | °C |  | Corrosion Allowance (mm) | mm | 0 | Content of Vessel |  |  | Specific Density of Oper.Liq |  | 1.064 | Normal Liquid Level NLL (mm) | mm |  |
| Description  | Units           | Design Data         |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Process Card   |                 | General Design Data |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Design Code & Specifications   |                 | EN13480-3           |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Internal Design Pressure (MPa)   | MPa             | 0.84                |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| External Design Pressure (MPa)   | MPa             |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Hydrotest Pressure (MPa)   | MPa             |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Maximum Design Temperature (°C)  | °C              | 120                 |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Minimum Design Temperature (°C)  | °C              |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Operating Temperature (°C)   | °C              |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Corrosion Allowance (mm)   | mm              | 0                   |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Content of Vessel  |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Specific Density of Oper.Liq   |                 | 1.064               |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Normal Liquid Level NLL (mm)   | mm              |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>Bill of Materials</b>   |                 |                     |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>No</th> <th>Description</th> <th>Component Dimensions</th> <th>Material Standard</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1.1</td> <td>1</td> <td>Straight Pipe-Pipe</td> <td>De= 610, en= 8, L= 1000 ( 120kg/m)</td> <td>ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT</td> </tr> </tbody> </table>  |                 |                     | ID                                 | No  | Description | Component Dimensions | Material Standard | S1.1                | 1                            | Straight Pipe-Pipe | De= 610, en= 8, L= 1000 ( 120kg/m) | ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| ID   | No              | Description         | Component Dimensions               | Material Standard   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| S1.1   | 1               | Straight Pipe-Pipe  | De= 610, en= 8, L= 1000 ( 120kg/m) | ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|  |                 | Page: 1             |                                    |   |             |                      |                   |                     |                              |                    |                                    |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |

|   |                 |                   |
|---|-----------------|-------------------|
| <b>Company Name -</b>   |                 |                   |
| Client :  | Vessel Tag No.: |                   |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator : Rev.:A               |                 |                   |
| EN13480-3:2017 Issue 1:2017 - 6.1 - STRAIGHT PIPE                             |                 |                   |
| S1.1  | Pipe            | 03 May 2018 11:30 |
| <b>INPUT DATA</b>   |                 |                   |
| <b>COMPONENT ATTACHMENT/LOCATION</b>  |                 |                   |
| Distance from end of cylinder to ref. DATUM LINE....:mm                       |                 | 0.00 mm           |
| <b>GENERAL DESIGN DATA</b>  |                 |                   |
| PRESSURE LOADING: Design Component for Internal Pressure Only                 |                 |                   |
| PROCESS CARD:   |                 |                   |
| General Design Data : Temp= 120°C, P=0.8400 MPa, c=0.0 mm, Pext=0.0000 MPa    |                 |                   |
| EXTERNAL CORROSION/EROSION ALLOWANCE.....:co                                  |                 | 0.00 mm           |
| SPECIFIC DENSITY OF OPERATING LIQUID.....:SG                                  |                 | 1.0640            |
| LIQUID HEAD.....:LH   |                 | 0.00 mm           |
| <b>PIPE DATA</b>  |                 |                   |
| PIPE FABRICATION: Welded Pipe   |                 |                   |
| WELD JOINT COEFFICIENT: No NDT, visual inspection only (z=0.7)                |                 |                   |
| PIPE DIAMETER: Base Design on Shell Outside Diameter                          |                 |                   |
| EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT THK<=60mm 120'C         |                 |                   |
| Rm=470 Rp=215 Rpt=173.4 f=115.6 f20=156.67 fttest=235 E=191484(N/mm2) ro=7.93 |                 |                   |
| OUTSIDE DIAMETER OF PIPE/SHELL.....:Do  |                 | 610.00 mm         |
| Size of Pipe:   |                 |                   |
| Comment (Optional):   |                 |                   |
| LENGTH OF PIPE/SHELL.....:Lcyl  |                 | 1000.00 mm        |
| NOMINAL WALL THICKNESS (uncorroded).....:en                                   |                 | 8.0000 mm         |
| NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th                                 |                 | 0.00 mm           |
| NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE (in %).....:th1                         |                 | 10.00 %           |
| <b>CALCULATION DATA</b>   |                 |                   |
| <b>6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE</b>                            |                 |                   |
| Outside Diameter of Shell (corroded) Dos                                      |                 |                   |
| Dos = Do - 2 * co =610-2*0=   |                 | 610.00 mm         |
| Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :                           |                 |                   |
| emin = pc * Dos / (2 * f * z + pc)  |                 | (6.1-1)           |
| =0.84*610/(2*115.6*0.7+0.84)=   |                 | 3.1497 mm         |
| Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :                                |                 |                   |
| emina = (emin + c + co + th) + en * th1 / 100                                 |                 |                   |
| =(3.15+0+0+0)+8*10/100=   |                 | 3.9500 mm         |
| Analysis Thickness  |                 |                   |
| ea = en - c - co - th - en * th1 / 100  |                 |                   |
| =8-0-0-0-8*10/100=  |                 | 7.2000 mm         |
| <b>Internal Pressure emina=3.95 &lt;= en=8[mm]</b>                            | <b>49.3%</b>    | <b>OK</b>         |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW &amp; COLD</b>                |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD                           |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)  |                 |                   |
| =2*7.2*156.67*0.7/(610-7.2)=  |                 | 2.6198 MPa        |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT &amp; CORR</b>                |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR                           |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)  |                 |                   |
| =2*7.2*115.6*0.7/(610-7.2)=   |                 | 1.9331 MPa        |
| <b>MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)</b>                   |                 |                   |
| MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)                          |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)  |                 |                   |
| =2*7.2*235*1/(610-7.2)=   |                 | 5.6138 MPa        |
| 4 S1.1 Straight Pipe Pipe   | Umax= 49.3%     | Page: 2           |

|  |                 |                   |
|--|-----------------|-------------------|
| <b>Company Name</b> -  |                 |                   |
| Client :   | Vessel Tag No.: |                   |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator : Rev.:A        |                 |                   |
| EN13480-3:2017 Issue 1:2017 - 6.1 - STRAIGHT PIPE                      |                 |                   |
| S1.1   | Pipe            | 03 May 2018 11:30 |
| <b>EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin</b> |                 |                   |
| NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3                        |                 |                   |
| Ptmin = MAX( 1.43 * Pd , 1.25 * Pd * f20 / f )                         |                 |                   |
| =MAX(1.43*0.84, 1.25*0.84*156.67/115.6)=                               |                 |                   |
|  | 1.4230 MPa      |                   |
| <b>Test Pressure Ptmin=1.42 &lt;= Pmax=5.61[MPa]</b>                   | <b>25.3%</b>    | <b>OK</b>         |
| <b>CALCULATION SUMMARY</b>   |                 |                   |
| <b>6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE</b>                     |                 |                   |
| Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :                    |                 |                   |
| emin = pc * Dos / ( 2 * f * z + pc) (6.1-1)                            |                 |                   |
| =0.84*610 / (2*115.6*0.7+0.84)=  |                 |                   |
|  | 3.1497 mm       |                   |
| Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :                         |                 |                   |
| emina = (emin + c + co + th) + en * th1 / 100                          |                 |                   |
| =(3.15+0+0+0)+8*10/100=  |                 |                   |
|  | 3.9500 mm       |                   |
| <b>Internal Pressure emina=3.95 &lt;= en=8[mm]</b>                     | <b>49.3%</b>    | <b>OK</b>         |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW &amp; COLD</b>         |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD                    |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)                                     |                 |                   |
| =2*7.2*156.67*0.7 / (610-7.2)=   |                 |                   |
|  | 2.6198 MPa      |                   |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT &amp; CORR</b>         |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR                    |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)                                     |                 |                   |
| =2*7.2*115.6*0.7 / (610-7.2)=  |                 |                   |
|  | 1.9331 MPa      |                   |
| <b>MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)</b>            |                 |                   |
| MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)                   |                 |                   |
| Pmax = 2 * ea * f * z / (Dos - ea)                                     |                 |                   |
| =2*7.2*235*1 / (610-7.2)=  |                 |                   |
|  | 5.6138 MPa      |                   |
| <b>EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin</b> |                 |                   |
| NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3                        |                 |                   |
| Ptmin = MAX( 1.43 * Pd , 1.25 * Pd * f20 / f )                         |                 |                   |
| =MAX(1.43*0.84, 1.25*0.84*156.67/115.6)=                               |                 |                   |
|  | 1.4230 MPa      |                   |
| <b>Test Pressure Ptmin=1.42 &lt;= Pmax=5.61[MPa]</b>                   | <b>25.3%</b>    | <b>OK</b>         |
| Volume:0.2786 m3 Weight:120 kg (SG= 7.93)                              |                 |                   |
| 4 S1.1 Straight Pipe Pipe  | Umax= 49.3%     | Page: 3           |



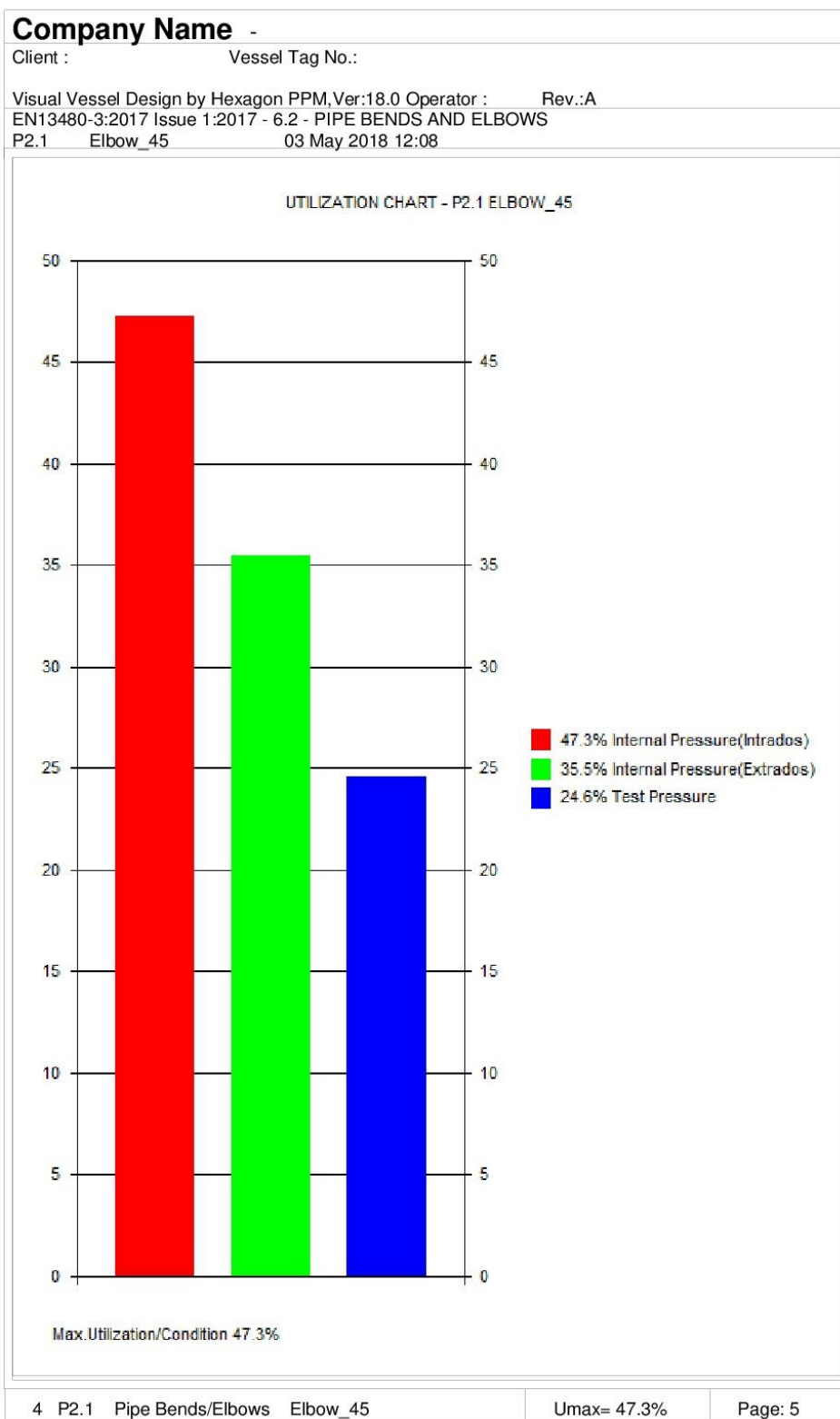


| <b>Company Name -</b>  |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|--|-----------------|----------------------------|--|---|-------------|----------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|----------------------------|--|---|-----|------|--------------------------------|-----|--|--------------------------|-----|--|---------------------------------|----|-----|---------------------------------|----|--|----------------------------|----|--|--------------------------|----|---|-------------------|--|--|------------------------------|--|-------|------------------------------|----|--|
| Client :   | Vessel Tag No.: |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator :   |                 | Rev.:A                     |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>(0) Drawing</b>   |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| 3D View of Vessel (alter by using the Save User Specified View command)  |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|   |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>Design Data &amp; Process Information</b>   |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Description</th> <th>Units</th> <th>Design Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Process Card</td> <td></td> <td>General Design Data</td> </tr> <tr> <td>Design Code &amp; Specifications</td> <td></td> <td>EN13480-3</td> </tr> <tr> <td>Internal Design Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td>0.84</td> </tr> <tr> <td>External Design Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Hydrotest Pressure (MPa)</td> <td>MPa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Maximum Design Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Minimum Design Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Operating Temperature (°C)</td> <td>°C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Corrosion Allowance (mm)</td> <td>mm</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Content of Vessel</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Specific Density of Oper.Liq</td> <td></td> <td>1.064</td> </tr> <tr> <td>Normal Liquid Level NLL (mm)</td> <td>mm</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> |                 |                            | Description  | Units   | Design Data | Process Card         |                   | General Design Data | Design Code & Specifications |                            | EN13480-3  | Internal Design Pressure (MPa)                              | MPa | 0.84 | External Design Pressure (MPa) | MPa |  | Hydrotest Pressure (MPa) | MPa |  | Maximum Design Temperature (°C) | °C | 120 | Minimum Design Temperature (°C) | °C |  | Operating Temperature (°C) | °C |  | Corrosion Allowance (mm) | mm | 0 | Content of Vessel |  |  | Specific Density of Oper.Liq |  | 1.064 | Normal Liquid Level NLL (mm) | mm |  |
| Description  | Units           | Design Data                |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Process Card   |                 | General Design Data        |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Design Code & Specifications   |                 | EN13480-3                  |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Internal Design Pressure (MPa)   | MPa             | 0.84                       |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| External Design Pressure (MPa)   | MPa             |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Hydrotest Pressure (MPa)   | MPa             |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Maximum Design Temperature (°C)  | °C              | 120                        |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Minimum Design Temperature (°C)  | °C              |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Operating Temperature (°C)   | °C              |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Corrosion Allowance (mm)   | mm              | 0                          |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Content of Vessel  |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Specific Density of Oper.Liq   |                 | 1.064                      |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| Normal Liquid Level NLL (mm)   | mm              |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <b>Bill of Materials</b>   |                 |                            |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>No</th> <th>Description</th> <th>Component Dimensions</th> <th>Material Standard</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P2.1</td> <td>1</td> <td>Pipe Bends/Elbows-Elbow 45</td> <td>De= 610, Rbend= 914, erint= 10, enext= 10, L= 717.9 ( 149.5kg/m)</td> <td>ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT</td> </tr> </tbody> </table>  |                 |                            | ID   | No  | Description | Component Dimensions | Material Standard | P2.1                | 1                            | Pipe Bends/Elbows-Elbow 45 | De= 610, Rbend= 914, erint= 10, enext= 10, L= 717.9 ( 149.5kg/m) | ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| ID   | No              | Description                | Component Dimensions   | Material Standard   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
| P2.1   | 1               | Pipe Bends/Elbows-Elbow 45 | De= 610, Rbend= 914, erint= 10, enext= 10, L= 717.9 ( 149.5kg/m) | ID 1, EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |
|  |                 | Page: 1                    |  |   |             |                      |                   |                     |                              |                            |  |   |     |      |                                |     |  |                          |     |  |                                 |    |     |                                 |    |  |                            |    |  |                          |    |   |                   |  |  |                              |  |       |                              |    |  |

|   |                 |                   |
|---|-----------------|-------------------|
| <b>Company Name -</b>   |                 |                   |
| Client :  | Vessel Tag No.: |                   |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator : Rev.:A               |                 |                   |
| EN13480-3:2017 Issue 1:2017 - 6.2 - PIPE BENDS AND ELBOWS                     |                 |                   |
| P2.1  | Elbow_45        | 03 May 2018 12:08 |
| <b>INPUT DATA</b>   |                 |                   |
| <b>COMPONENT ATTACHMENT/LOCATION</b>  |                 |                   |
| Origo x-value referenced to the base coordinate system:x                      | 0.00            | mm                |
| Origo y-value referenced to the base coordinate system:y                      | 0.00            | mm                |
| Origo z-value referenced to the base coordinate system:z                      | 0.00            | mm                |
| Angle between axis of symmetry and z-axis of the BCS:Teta                     | 0.00            | Degr.             |
| Angle of rotation of z-axis projected in the x-y plane:Phi                    | 0.00            | Degr.             |
| ANGLE IN DEGREE OF PIPE BEND.....:Beta  | 45.00           | degr.             |
| ORIENTATION OF PIPE BEND.....:Phi   | 0.00            | degr.             |
| <b>GENERAL DESIGN DATA</b>  |                 |                   |
| PROCESS CARD: General Design Data : Temp= 120°C, P=0.8400 MPa, c=0.0 mm       |                 |                   |
| EXTERNAL CORROSION/EROSION ALLOWANCE.....:co                                  | 0.00            | mm                |
| SPECIFIC DENSITY OF OPERATING LIQUID.....:SG                                  | 1.0640          |                   |
| LIQUID HEAD.....:LH   | 0.00            | mm                |
| <b>PIPE DATA</b>  |                 |                   |
| PIPE FABRICATION: Welded Pipe   |                 |                   |
| WELD JOINT COEFFICIENT: No NDT, visual inspection only (z=0.7)                |                 |                   |
| EN 10217-7:2014, 1.4307 X2CrNi18-9 welded tube, HT:AT THK<=60mm 120°C         |                 |                   |
| Rm=470 Rp=215 Rpt=173.4 f=115.6 f20=156.67 ftest=235 E=191484 (N/mm2) ro=7.93 |                 |                   |
| OUTSIDE DIAMETER OF PIPE/SHELL.....:Do  | 610.00          | mm                |
| Size of Pipe:   |                 |                   |
| Comment (Optional):   |                 |                   |
| RADIUS OF BEND OR ELBOW.....:R  | 914.00          | mm                |
| ORDERED WALL THK.ON THE INTRADOS OF THE PIPE/ELBOW...:enint                   | 10.00           | mm                |
| ORDERED WALL THK.ON THE EXTRADOS OF THE PIPE/ELBOW...:enext                   | 10.00           | mm                |
| NEGATIVE TOLERANCE/THINNING ALLOWANCE.....:th                                 | 0.8000          | mm                |
| <b>CALCULATION DATA</b>   |                 |                   |
| <b>6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE</b>                            |                 |                   |
| Outside Diameter of Shell (corroded) Dos                                      |                 |                   |
| Dos = Do - 2 * co =610-2*0=   | 610.00          | mm                |
| Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :                           |                 |                   |
| emin = pc * Dos / (2 * f * z + pc)  | (6.2-1)         |                   |
| =0.84*610/(2*115.6*0.7+0.84)=   | 3.1497          | mm                |
| Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :                                |                 |                   |
| emina = (emin + c + co + th) / (1 - thl / 100)                                |                 |                   |
| =(3.15+0+0+0.8)/(1-0/100)=  | 3.9500          | mm                |
| <b>6.2 - PIPE BENDS AND ELBOWS</b>  |                 |                   |
| Do2e = Dos / (2 * e) =610/(2*3.15)=   | 96.83           |                   |
| Tmpl = Sqr(0.25*(Do2e^2+(R/e)^2)-Do2e*(Do2e-1)*(R/e)^2)                       |                 |                   |
| =Sqr(0.25*(96.83^2+(914/3.15)^2)-96.83*(96.83-1)*(914/3.15)^2) =              | 37523.41        |                   |
| roe = Sqr(0.5*(Do2e^2+(R/e)^2)+Tmpl)  |                 |                   |
| =Sqr(0.5*(96.83^2+(914/3.15)^2)+37523.41)=                                    | 290.37          |                   |
| Btmp = Sqr((roe^2-Do2e^2)/(roe^2-Do2e*(Do2e-1)))                              |                 |                   |
| =Sqr((290.37^2-96.83^2)/(290.37^2-96.83*(96.83-1)))=                          | 0.9994          |                   |
| Bint = Do2e + roe - (Do2e + roe - 1) * Btmp                                   | (B.4.1-3)       |                   |
| =96.83+290.37-(96.83+290.37-1)*0.9994=  | 1.2493          |                   |
| Bext = Do2e - roe - (Do2e - roe - 1) * Btmp                                   | (B.4.1-9)       |                   |
| =96.83-290.37-(96.83-290.37-1)*0.9994=  | 0.8744          |                   |
| B.4.1.1 Minimum Required Wall Thickness on the Intrados (excl.allow.), eint   |                 |                   |
| eint = e * Bint (B.4.1-1) =3.15*1.25=   | 3.9349          | mm                |
| Minimum Required Wall Thickness on the Intrados (incl.allow.), einta          |                 |                   |
| einta = eint + c + co + th =3.93+0+0+0.8=                                     | 4.7349          | mm                |
| Internal Pressure(Intrados) einta=4.73 <= enint=10[mm]                        |                 | 47.3% OK          |
| 4 P2.1 Pipe Bends/Elbows Elbow_45   | Umax= 47.3%     | Page: 2           |

|   |                            |                     |
|---|----------------------------|---------------------|
| <b>Company Name -</b>   |                            |                     |
| Client :  | Vessel Tag No.:            |                     |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM, Ver:18.0 Operator : Rev.:A   |                            |                     |
| EN13480-3:2017 Issue 1:2017 - 6.2 - PIPE BENDS AND ELBOWS   |                            |                     |
| P2.1  | Elbow_45                   | 03 May 2018 12:08   |
| B.4.1.2 Minimum Required Wall Thickness on the Extrados (excl.allow.), eext<br>$eext = e * Bext \text{ (B.4.1-7)} = 3.15 * 0.8744 =$ <u>2.7542 mm</u>   |                            |                     |
| Minimum Required Wall Thickness on the Extrados (incl.allow.), eexta<br>$eexta = eext + c + co + th = 2.75 + 0 + 0 + 0.8 =$ <u>3.5542 mm</u>  |                            |                     |
| <b>Internal Pressure(Extrados) eexta=3.55 &lt;= enext=10[mm]</b>  |                            | <b>35.5% OK</b>     |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW &amp; COLD</b>  |                            |                     |
| $Pmaxint = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R-0.5*Dos+1.5*eaint-0.5*eaext) / (2*R-Dos+eaint))+0.5) \text{ (B.4.2-2)}$<br>$= 156.67 / ((610-9.2-9.2) / (2*0.7*9.2)) * ((2*914-0.5*610+1.5*9.2-0.5*9.2) / (2*914-610+9.2))+0.5) =$ <u>2.7083 MPa</u><br>$Pmaxext = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R+0.5*Dos+0.5*eaint-1.5*eaext) / (2*R+Dos-eaext))+0.5) \text{ (B.4.2-4)}$<br>$= 156.67 / ((610-9.2-9.2) / (2*0.7*9.2)) * ((2*914+0.5*610+0.5*9.2-1.5*9.2) / (2*914+610-9.2))+0.5) =$ <u>3.8528 MPa</u><br><b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW &amp; COLD</b><br>$Pmax = \text{MIN}( Pmaxint, Pmaxext) = \text{MIN}(2.71, 3.85) =$ <u>2.7083 MPa</u> |                            |                     |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT &amp; CORR</b>  |                            |                     |
| $Pmaxint = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R-0.5*Dos+1.5*eaint-0.5*eaext) / (2*R-Dos+eaint))+0.5) \text{ (B.4.2-2)}$<br>$= 115.6 / ((610-9.2-9.2) / (2*0.7*9.2)) * ((2*914-0.5*610+1.5*9.2-0.5*9.2) / (2*914-610+9.2))+0.5) =$ <u>1.9984 MPa</u><br>$Pmaxext = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R+0.5*Dos+0.5*eaint-1.5*eaext) / (2*R+Dos-eaext))+0.5) \text{ (B.4.2-4)}$<br>$= 115.6 / ((610-9.2-9.2) / (2*0.7*9.2)) * ((2*914+0.5*610+0.5*9.2-1.5*9.2) / (2*914+610-9.2))+0.5) =$ <u>2.8428 MPa</u><br><b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT &amp; CORR</b><br>$Pmax = \text{MIN}( Pmaxint, Pmaxext) = \text{MIN}(2., 2.84) =$ <u>1.9984 MPa</u>     |                            |                     |
| <b>MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)</b>   |                            |                     |
| $Pmaxint = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R-0.5*Dos+1.5*eaint-0.5*eaext) / (2*R-Dos+eaint))+0.5) \text{ (B.4.2-2)}$<br>$= 235 / ((610-9.2-9.2) / (2*1*9.2)) * ((2*914-0.5*610+1.5*9.2-0.5*9.2) / (2*914-610+9.2))+0.5) =$ <u>5.7820 MPa</u><br>$Pmaxext = f / ((Dos-eaint-eaext) / (2*z*eaext)) * ((2*R+0.5*Dos+0.5*eaint-1.5*eaext) / (2*R+Dos-eaext))+0.5) \text{ (B.4.2-4)}$<br>$= 235 / ((610-9.2-9.2) / (2*1*9.2)) * ((2*914+0.5*610+0.5*9.2-1.5*9.2) / (2*914+610-9.2))+0.5) =$ <u>8.2126 MPa</u><br><b>MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)</b><br>$Pmax = \text{MIN}( Pmaxint, Pmaxext) = \text{MIN}(5.78, 8.21) =$ <u>5.7820 MPa</u>              |                            |                     |
| <b>EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin</b>  |                            |                     |
| NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3<br>$Ptmin = \text{MAX}( 1.43 * Pd , 1.25 * Pd * f20 / f )$<br>$= \text{MAX}( 1.43 * 0.84, 1.25 * 0.84 * 156.67 / 115.6) =$ <u>1.4230 MPa</u>  |                            |                     |
| <b>Test Pressure Ptmin=1.42 &lt;= Pmax=5.78[MPa]</b>  |                            | <b>24.6% OK</b>     |
| <b>CALCULATION SUMMARY</b>  |                            |                     |
| <b>6.1 - STRAIGHT PIPE UNDER INTERNAL PRESSURE</b>  |                            |                     |
| Required Minimum Shell Thickness Excl.Allow. emin :   |                            |                     |
| $emin = pc * Dos / (2 * f * z + pc)$  |                            | (6.2-1)             |
| $= 0.84 * 610 / (2 * 115.6 * 0.7 + 0.84) =$   |                            | <u>3.1497 mm</u>    |
| Required Minimum Shell Thickness Incl.Allow. :  |                            |                     |
| $emina = (emin + c + co + th) / (1 - th1 / 100)$  |                            |                     |
| $= (3.15 + 0 + 0 + 0.8) / (1 - 0 / 100) =$  |                            | <u>3.9500 mm</u>    |
| 4 P2.1  | Pipe Bends/Elbows Elbow_45 | Umax= 47.3% Page: 3 |

|  |                 |                   |
|--|-----------------|-------------------|
| <b>Company Name -</b>  |                 |                   |
| Client :   | Vessel Tag No.: |                   |
| Visual Vessel Design by Hexagon PPM,Ver:18.0 Operator : Rev.:A         |                 |                   |
| EN13480-3:2017 Issue 1:2017 - 6.2 - PIPE BENDS AND ELBOWS              |                 |                   |
| P2.1   | Elbow_45        | 03 May 2018 12:08 |
| <b>6.2 - PIPE BENDS AND ELBOWS</b>                                     |                 |                   |
| Internal Pressure(Intrados) einta=4.73 <= enint=10[mm]                 | 47.3%           | OK                |
| Internal Pressure(Extrados) eexta=3.55 <= enext=10[mm]                 | 35.5%           | OK                |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW &amp; COLD</b>         |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :NEW & COLD                    |                 |                   |
| Pmax = MIN( Pmaxint, Pmaxext) =MIN(2.71,3.85)=                         |                 | 2.7083 MPa        |
| <b>MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT &amp; CORR</b>         |                 |                   |
| MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE MAWP :HOT & CORR                    |                 |                   |
| Pmax = MIN( Pmaxint, Pmaxext) =MIN(2.,2.84)=                           |                 | 1.9984 MPa        |
| <b>MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)</b>            |                 |                   |
| MAX TEST PRESSURE (Uncorroded cond.at ambient temp.)                   |                 |                   |
| Pmax = MIN( Pmaxint, Pmaxext) =MIN(5.78,8.21)=                         |                 | 5.7820 MPa        |
| <b>EN13480-5;10.2.3.3 REQUIRED MIN.HYDROSTATIC TEST PRESSURE:Ptmin</b> |                 |                   |
| NEW AT AMBIENT TEMP. FOR TEST GROUPS 1, 2 and 3                        |                 |                   |
| Ptmin = MAX( 1.43 * Pd , 1.25 * Pd * f20 / f )                         |                 |                   |
| =MAX(1.43*0.84,1.25*0.84*156.67/115.6)=                                |                 | 1.4230 MPa        |
| Test Pressure Ptmin=1.42 <= Pmax=5.78[MPa]                             | 24.6%           | OK                |
| Volume:0.2055 m3 Weight:107.3 kg (SG= 7.93 )                           |                 |                   |
|  |                 |                   |
| 4 P2.1 Pipe Bends/Elbows Elbow_45                                      | Umax= 47.3%     | Page: 4           |



## **Příloha 2: Report výpočtu v programu Caesar II**

CAESAR II 2017 Ver.9.00.00.5900, (Build 160721) Date: MAY 11, 2018 Time: 7:17  
Job Name: CII-01  
Licensed To: AF-ENGINEERING S.R.O.  
STRESS SUMMARY REPORT: Highest Stresses Mini Statement  
Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

CASE 1 (HYD) WW+HP+H  
CASE 4 (SUS) W+P1+H  
CASE 5 (SUS) W+P2+H  
CASE 6 (EXP) L6=L2-L4  
CASE 7 (EXP) L7=L3-L5

Piping Code: EN-13480 = EN-13480, June 2012

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 1 (HYD) WW+HP+H

Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 1 (HYD) WW+HP+H  
Ratio (%): 32.3 @Node 1460  
Code Stress: 55.2 Allowable Stress: 171.0  
Axial Stress: 33.2 @Node 1620  
Bending Stress: 30.9 @Node 1460  
Torsion Stress: 6.7 @Node 1630  
Hoop Stress: 66.9 @Node 1620  
Max Stress Intensity: 69.5 @Node 1770

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 4 (SUS) W+P1+H

Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 4 (SUS) W+P1+H  
Ratio (%): 44.5 @Node 2100  
Code Stress: 51.4 Allowable Stress: 115.6  
Axial Stress: 14.0 @Node 1620  
Bending Stress: 45.5 @Node 2100  
Torsion Stress: 2.8 @Node 1180  
Hoop Stress: 28.3 @Node 1620  
Max Stress Intensity: 51.2 @Node 2100

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 5 (SUS) W+P2+H

Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 5 (SUS) W+P2+H  
Ratio (%): 49.1 @Node 2090  
Code Stress: 56.8 Allowable Stress: 115.6  
Axial Stress: 24.6 @Node 15030  
Bending Stress: 43.5 @Node 2100  
Torsion Stress: 3.1 @Node 1180  
Hoop Stress: 56.1 @Node 15040  
Max Stress Intensity: 57.3 @Node 15040

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 6 (EXP) L6=L2-L4

CAESAR II 2017 Ver.9.00.00.5900, (Build 160721) Date: MAY 11, 2018 Time: 7:17  
Job Name: CII-01  
Licensed To: AF-ENGINEERING S.R.O.  
STRESS SUMMARY REPORT: Highest Stresses Mini Statement  
Various Load Cases

LOAD CASE DEFINITION KEY

Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 6 (EXP) L6=L2-L4  
Ratio (%): 24.7 @Node 2080  
Code Stress: 68.7 Allowable Stress: 278.1  
Axial Stress: 2.3 @Node 15040  
Bending Stress: 48.2 @Node 2080  
Torsion Stress: 24.5 @Node 2090  
Hoop Stress: 0.0 @Node 14  
Max Stress Intensity: 69.3 @Node 2080

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 7 (EXP) L7=L3-L5

Highest Stresses: (N./sq.mm. ) LOADCASE 7 (EXP) L7=L3-L5  
Ratio (%): 37.5 @Node 1790  
Code Stress: 112.7 Allowable Stress: 300.8  
Axial Stress: 3.5 @Node 1780  
Bending Stress: 112.5 @Node 1790  
Torsion Stress: 20.9 @Node 2090  
Hoop Stress: 0.0 @Node 14  
Max Stress Intensity: 115.0 @Node 1790