ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

# ENERGETICKÁ OPTIMALIZACE TECHNOLOGICKÉHO PROCESU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021 ŠIMON MALÝ

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malý** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **484748**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Energetická optimalizace technologického procesu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Energetic optimization of technological process**

Pokyny pro vypracování:

Vyberte vhodný technologický proces - proces, který vás zaujme a bude vhodný pro aplikaci energetické optimalizace. Proveďte literární rešerši k problematice energetické optimalizace procesů, používaných technik, používaných komponent a pokuste se během literární rešerše nalézt nějaké aplikace technik energetické optimalizace na příkladech reálných technologií. Popište vybraný proces z hlediska technologie. Sestavte proudové technologické schéma optimalizovaného procesu a to jak výchozího stavu, tak optimalizovaného stavu. Sestavte hmotnostní a energetické bilance, vyberte vhodné komponenty potřebné pro rozšíření či vlastní optimalizaci a doplňte proces vhodnými měřicími přístroji a případnými regulačními smyčkami. Proveďte zhodnocení navrženého procesu.

Seznam doporučené literatury:

Dle provedené literární rešerše.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Martin Dostál, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

| Ing. Martin Dostál, Ph.D. | prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. | prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. |
|---|---|---|
| podpis vedoucí(ho) práce | podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | podpis děkana(ky) |

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

. | Datum převzetí zadání

Podpis studenta



© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

## Poděkování

Velice rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Dostálovi, Ph.D. za velice vstřícné jednání a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat firmě Glanzstoff Bohemia s.r.o., že mi umožnila tuto práci zpracovat, a konkrétně Ing. Matěji Filipovi za celkový dohled a kontrolu výpočtů, Ing. Radimu Stáněmu za rady a konzultace k tvorbě schémat a Ing. Janu Smolíkovi za pomoc při tvorbě hmotnostních bilancí. V neposlední řadě bych rád poděkoval Bc. Tereze Pokorné za podporu a jazykovou korekci a celé své rodině, která mě podporuje po celou dobu mého studia.

# Anotační list

| | |
|---|---|
| **Jméno autora:** | Šimon Malý |
| **Název práce česky:** | Energetická optimalizace technologického procesu |
| **Název práce anglicky:** | Energetic optimization of technological process |
| **Rozsah práce:** | počet stran: 98<br>počet obrázků: 78<br>počet tabulek: 15 |
| **Akademický rok:** | 2020/2021 |
| **Ústav:** | Ústav procesní a zpracovatelské techniky |
| **Studijní program:** | Teoretický základ strojního inženýrství |
| **Vedoucí práce:** | Ing. Martin Dostál, Ph.D. |
| **Klíčová slova:** | bilance, energetická optimalizace, chladící okruh, chladící věže, chlazení, PFD, PID |
| **Keywords:** | balance, energetic optimization, cooling circuit, cooling towers, cooling, PFD, PID |
| **Anotace:** | Bakalářská práce se zabývá rešerší energetických bilancí a optimalizací technologických procesů. Dále je popsán návrh rozšíření a optimalizace daného chladícího okruhu včetně vytvoření PFD, PID schémat a 3D modelu. |
| **Anotation:** | Bachelor thesis deals with research of energetic balance and optimization of technological process. Further is described an extention and optimization of given cooling circuit including PFD, PID diagrams and 3D model. |

# Obsah


1 Úvod ..... 8

1.1 Bilancování ..... 9

1.1.1 Hmotnostní bilance ..... 11

1.1.2 Energetická bilance ..... 12

2 Literární rešerše ..... 13

2.1 Nové přístupy k bilancování ..... 13

2.2 Pinch analýza ..... 15

3 Chladící okruh ..... 19

3.1 Chladící věže – PID 205 ..... 21

3.2 Krystalizace C – PID 412 a 413 ..... 22

3.3 Odplynění – PID 404 ..... 23

3.4 Dvanáctistupňová odparka Ebner – PID 407 ..... 24

3.5 Výměník W602 – PID 128 ..... 25

3.6 Nádrže ..... 25

3.7 Čerpadla ..... 26

3.8 PID schéma současného stavu ..... 26

4 Požadavky nového zařízení ..... 28

4.1 Krystalizace E – PID 420 ..... 28

4.2 Dvanáctistupňová odparka Lurgi – PID 408 ..... 29

5 Tvorba PFD schématu ..... 30

6 Bilance chladícího okruhu ..... 32

6.1 Energetická bilance ..... 32

6.1.1 Krystalizace C ..... 32

6.1.2 Odplynění ..... 36

6.1.3 Dvanáctistupňová odparka Ebner ..... 39

6.1.4 Krystalizace E ..... 40

6.1.5 Dvanáctistupňová odparka Lurgi ..... 44

6.1.6 Výměník W602 ..... 47
6.1.7 Chladící věže ..... 49
6.1.8 Bilance celého okruhu ..... 51
6.2 Hmotnostní bilance ..... 53
6.3 Návrh čerpadel ..... 54
6.3.1 Výpočet základních parametrů čerpadel ..... 55
6.4 Návrh chladících věží ..... 57
7 Tvorba PID schématu ..... 60
7.1 Potrubní větve ..... 60
7.1.1 Popis potrubních větví ..... 60
7.1.2 Potrubní značky ..... 60
7.1.3 Médium ..... 61
7.1.4 Výpočet DN ..... 61
7.1.5 Volba potrubní třídy ..... 61
7.1.6 Návrh nových potrubních tras ..... 62
7.2 Ventily a speciály ..... 63
7.2.1 Popis ventilů a speciálů ..... 63
7.2.2 Symbolické zobrazení ventilů a speciálů ..... 64
7.2.3 Návrh nových ventilů a speciálů ..... 64
7.3 Měření a regulace ..... 65
7.3.1 Popis MaR ..... 65
7.3.2 Symbolické zobrazení MaR ..... 66
7.3.3 Typ MaR ..... 66
7.3.4 Návrh nových měřidel a regulačních smyček ..... 67
8 Měření ..... 69
8.1 Teplota ..... 69
8.1.1 Teplota ve sběrných nádržích ..... 69
8.1.2 Teplota na výstupu ze směsných kondenzátorů ..... 70

8.1.3 Specifikace nových teploměrů ..... 71
8.2 Tlak ..... 71
8.2.1 Tlak v rozvaděčích ..... 72
8.2.2 Specifikace nových tlakoměrů ..... 72
8.3 Průtok ..... 73
8.3.1 Průtok na jednotlivé technologie ..... 74
8.3.2 Průtok na vývěvy ..... 74
8.4 Měření hladiny ..... 75
8.4.1 Hladina ve sběrných nádržích ..... 75
8.4.2 Specifikace nového hladinoměru ..... 76
8.5 Měření pH ..... 76
8.6 Měření vodivosti ..... 77
9 Tvorba 3D modelu ..... 78
9.1 Návrh nových izometrií ..... 82
9.1.1 P205059-CHV-400-SSD ..... 82
9.1.2 P205052-58-CHV-200-SSD ..... 83
9.1.3 P205050-CHV-300-SSD ..... 84
9.1.4 P205051-CHV-350-SSD ..... 84
9.1.5 P205035-CHV-300-SSD ..... 85
9.1.6 P205025-CHV-200-SSD ..... 85
9.1.7 P205049-CHV-200-SSD ..... 86
9.1.8 P205019-CHV-250-SSD ..... 86
9.1.9 Výkresy potrubí ..... 87
10 Závěr ..... 89
Seznam použitých symbolů ..... 91
Seznam použité literatury ..... 96

# 1 Úvod

Chlazení je hojně využíváno nejen v elektrárnách či teplárnách, ale také ve výrobních procesech. Velká část výrobních procesů totiž využívá zařízení (např. odparky), která pro správné fungování potřebují chladit. V dřívějších dobách byly závody stavěny vedle vodních zdrojů, které byly využívány právě pro tuto činnost. V podstatě se voda přivedla do jednotlivých technologií, kde byla využita, v některých případech i znečištěna, a poté zpět vrácena. Na tento způsob chlazení se v dnešní době nahlíží jako na vysoce neefektivní, neekonomický a hlavně neekologický. Z tohoto důvodu se téměř po celém světě začalo investovat do tzv. chladících okruhů, které pracují cyklicky a o odvod nízkopotenciálního tepla z média se stará chladící zařízení, nejčastěji chladící věž. Základem návrhu těchto chladících okruhů zůstává bilanční schéma a bilance sama. Dále je důležité zvolit vhodný způsob chlazení média, aby náklady na provoz zůstaly minimální.

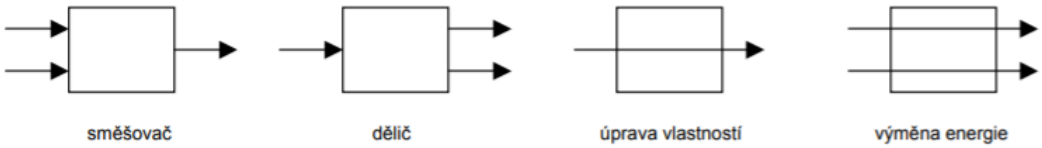
Firma Glanzstoff Bohemia s.r.o. (GBO), která se zabývá výrobou viskózového vlákna, je rozdělena na tři hlavní sektory a co se týče optimalizace chlazení, oddělení spřádací lázně je tím nejzajímavějším. V této technologii můžeme stále najít pozůstatky "zastaralých" technologií, kde je zařízení chlazeno labskou vodou (interně pojmenovanou jako *Surová voda*), která dále putuje do místní čističky a není znovu nijak využívána. Tento přístup se společnosti GBO již nelíbil, jelikož vycházel na 84 € za 1000 $m^3$, a rozhodla se tak investovat do modernizace těchto zařízení. Prvním zařízením je *Dvanáctistupňová odparka Lurgi*, která zde funguje od sedmdesátých let minulého století. Jedním z úkolů modernizace bylo odparku napojit na stávající chladící okruh, který momentálně chladí hlavně krystalizační odparku *Krystalizace C*. Dále byla projevena snaha do okruhu zapojit chlazení nové krystalizační odparky *Krystalizace E*, která byla vybudována namísto staré *Krystalizace B*, jež také využívala k chlazení *Surovou vodu*.

V práci je popsán kompletní postup návrhu chladícího okruhu počínaje kontrolou současného stavu a zkompletování zadání. Dále je zpracován postup tvorby PFD schématu, na který navazuje vytvoření entalpické a hmotností bilance a zhodnocení dosažených výsledků. Z těchto bilancí vyplývá potřebný chladící výkon věží a také specifické parametry čerpadel. Na základě bilance je vytvořeno PID schéma, kde se již můžeme setkat s měřidly a armaturami, jejichž specifikace je zpracována v následujícím kroku. Nakonec je zpracován 3D model chladícího okruhu, na jehož základech jsou navrženy nové izometrie potrubních rozvodů.

Cílem této práce je tedy navrhnout a naprojektovat chladící okruh, který splňuje zadání a zároveň je ekonomicky vyhovující.

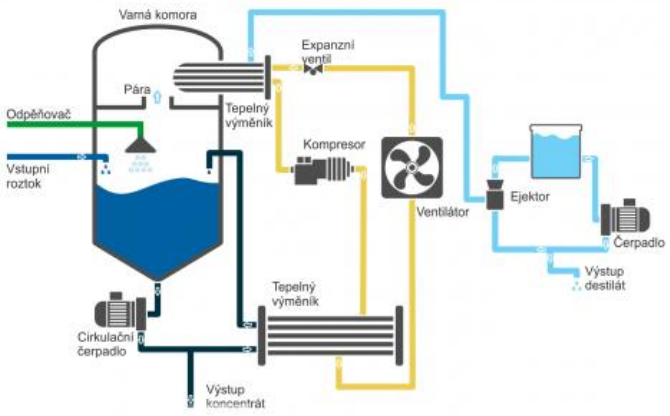
## 1.1 Bilancování

Bilancování neboli sčítání a odčítání veličin, pro které platí za jistých podmínek zákon zachování (např. energie, hmotnosti, …), nám slouží k popisu jednotlivých dějů. Naším cílem je dostat se k soustavě údajů o vstupech, výstupech, vzniku, zániku a akumulaci, a to nejlépe tak, že nám žádná hodnota nezůstane skryta. To ovšem vyžaduje, abychom na začátku výpočtu znali dostatečný počet parametrů. Základem bývá bilanční schéma, které nám pomáhá k lepší orientaci v procesu. Skládá se z uzlu, který může být reprezentován čtverečkem nebo jednoduchou skicou aparátu,, viz obr. 1. (Wichterle, 2012)




*Obr. 1 Příklady bilančních schémat (zdroj: Wichterle, 2012)*

Můžeme se setkat také se schématy mnohem složitějšími, která obsahují například více vstupů a výstupů, nebo dokonce kombinují více uzlů. Tímto stylem můžeme sestavit bilanční schéma prakticky jakéhokoliv procesu (např. odparek nebo chladících okruhů),, viz obr. 2. (Lecjaks et al., 2007)




*Obr. 2 Schéma vakuové odparky (zdroj: KOVOFINIŠ) (https://kovofinis.cz/vakuove-odparky)*

Po sestavení schématu následuje rozbor jednotlivých veličin. Jak jsem již uvedl, jednotlivé veličiny podléhají zákonu zachování, a tak by pro každou z nich měla platit následující rovnice: (Wichterle, 2012)

$$akumulace = součet\ vstupů + součet\ vzniků - součet\ výstupů - součet\ zániků \qquad (1)$$

V bilanci se většinou nevyskytují všechny položky dané rovnice, jako například během ustáleného děje, kdy nedochází k akumulaci, nebo během dějů, u nichž se nesetkáváme s chemickými reakcemi, většinou neuvažujeme vznik veličiny. Některé postupy vedou k úspěšnému a rychlému vypočtení bilance, jiné zase ke zdlouhavému a někdy i nepřesnému řešení. Ve skriptech „Základy procesního inženýrství“ z Vysoké školy báňské můžeme najít třeba tento doporučený postup: (Wichterle, 2012)

1) *„Zakreslíme bilanční schéma procesu, kde jednotlivé aparáty buďto zjednodušeně naznačíme, nebo jenom znázorníme bloky. Vyznačíme proudy, kterými se látky pohybují.*
2) *Probíhají-li v systému reakce, zapíšeme příslušné stechiometrické rovnice. Pro každou reakci připojíme k danému reaktoru dvojici fiktivní výstup a vstup.*
3) *Aparáty i proudy označíme jednoduchými symboly (u aparátů obvykle alfanumerická skupina, u proudů obvykle spíše jen číslo).*
4) *Provedeme soupis všech složek, případně skupin složek, vystupujících v bilanci společně (suchý vzduch můžeme třeba brát jako jedinou skupinu třeba v procesu sušení, při spalování musíme odděleně bilancovat kyslík, ale společně stále můžeme stále brát zbývající inertní plyny, při destilaci kapalného vzduchu se i argon od dusíku musí odlišit atd.). Je užitečné proudy a jejich složky zapsat jako tabulku*
5) *Sepíšeme všechny zadané hodnoty.*
6) *Sepíšeme matematickými výrazy všechny známé vztahy mezi veličinami.*
7) *Zvolíme bilancovanou veličinu; zpravidla hmotnost jednotlivých složek. Výjimečně při práci s čistými látkami (některé reaktory, destilační procesy, ...) volíme látková množství. Pro plynné soustavy za podmínek ideálního plynu to může být i tzv. normální objem plynu (objem přepočtený na normální podmínky).*
8) *Přepočteme všechny hodnoty a vztahy na tento jednotný základ bilancování.*
9) *Bilanční vztahy jsou takto převedeny na soustavu rovnic, která by měla být jednoznačně řešitelná a nepřeurčená. Vhodným seskupením lze zpravidla rozdělit úlohu na dílčí jednoduché kroky a dostat se k menším přehlednějším soustavám rovnic, které lze řešit postupně. Pro řešení složitějších bilančních systémů je vhodné použít simulační programy, které jsou schopny řadu kroků provést automaticky.“* (Wichterle, 2012)

### 1.1.1 Hmotnostní bilance

Hmotnostní bilance vychází ze zákona o zachování hmoty. Udává kvantitativní vztahy mezi množstvím a složením směsí, které do systému vstupují, jsou v něm obsaženy a opět z něho vystupují. Rovnice hmotnostní bilance umožňují mimo jiné zjistit množství a složení proudů, které nebyly proměřeny. Jelikož při hmotnostní bilanci nepočítáme se vznikem či zánikem hmoty, platí jednoduchá rovnice: (Wichterle, 2012)

$$akumulace = součet\ vstupů - součet\ výstupů \tag{2}$$

Bilancovat můžeme jak hmotnost celého systému, tedy všech složek dohromady, tak i jednotlivých složek zvlášť. Podobným způsobem můžeme také bilancovat všechny proudy dohromady nebo tyto proudy rozdělit. Pro zcela obecný popis hmotnostní bilance o několika proudech a složkách profesor Lecjaks et al. (2007) uvedl rovnice:

$$\sum_{j=1}^{k} m_{\mathrm{ij}} + m_{\mathrm{iz}} = \sum_{j=k+1}^{l} m_{\mathrm{ij}} + \Delta m_{\mathrm{ai}}\,, \tag{3}$$

kde $m_{ij}$ je hmotnost $i$-té složky v $j$-tém proudu, $m_{iz}$ je hmotnost vzniku či zániku složky $i$, $\Delta m_a$ symbolizuje akumulaci složky $i$, $k$ je počet vstupních proudů a $l$ počet výstupních proudů.

Pokud chceme sledovat hmotnost v daném časovém intervalu, můžeme se setkat s hmotnostním tokem, který je definován jako časová derivace hmotnosti: (Lecjaks et al., 2007)

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \tag{4}$$

předchozí rovnici bychom tedy mohli napsat jako:

$$\sum_{j=1}^{k} \dot{m}_{\mathrm{ij}} + \dot{m}_{\mathrm{iz}} = \sum_{j=k+1}^{k+l} \dot{m}_{\mathrm{ij}} + \frac{dm_{\mathrm{ai}}}{dt}\,, \tag{5}$$

kde $\dot{m}_{ij}$ je hmotnostní tok $i$-té složky v $j$-tém proudu. (Wichterle, 2012)

Množství složky ve směsi lze poté dopočítat na základě znalostí hmotnosti a koncentrace dané složky ve směsi. Musíme však dát pozor, jelikož použití špatné koncentrace může vést ke špatnému výsledku. Nejběžnější způsob, jak vyjádřit koncentraci směsi, je hmotnostní zlomek, který je definován jako:

$$x'_{\mathrm{i}} = \frac{m_{\mathrm{i}}}{m} = \frac{m_{\mathrm{i}}}{\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}} m_{\mathrm{i}}}\,, \tag{6}$$

kde $x'_{\mathrm{i}}$ je hmotností zlomek složky $i$, $m$ je hmotnost směsi, $m_i$ je hmotnost složky a $n$ je počet složek. (Wichterle, 2012)

Zároveň však v celém systému musí platit rovnosti: (Wichterle, 2012)

$$m_{\mathrm{i}} = m \cdot x'_{\mathrm{i}} \tag{7}$$

a

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} x'_{\mathrm{i}} = 1 \tag{8}$$

### 1.1.2 Energetická bilance

Energetická bilance je matematickým vyjádřením zákona zachování energie a je nezbytné rozlišovat, v jakém systému bilanci tvoříme. Základní rovnice energetické bilance uzavřeného systému je definována jako:

$$energie\ na\ začátku + teplo\ dodané = energie\ na\ konci + práce\ vykonaná \tag{9}$$

neboli 1. zákon termodynamiky. (Wichterle, 2012)

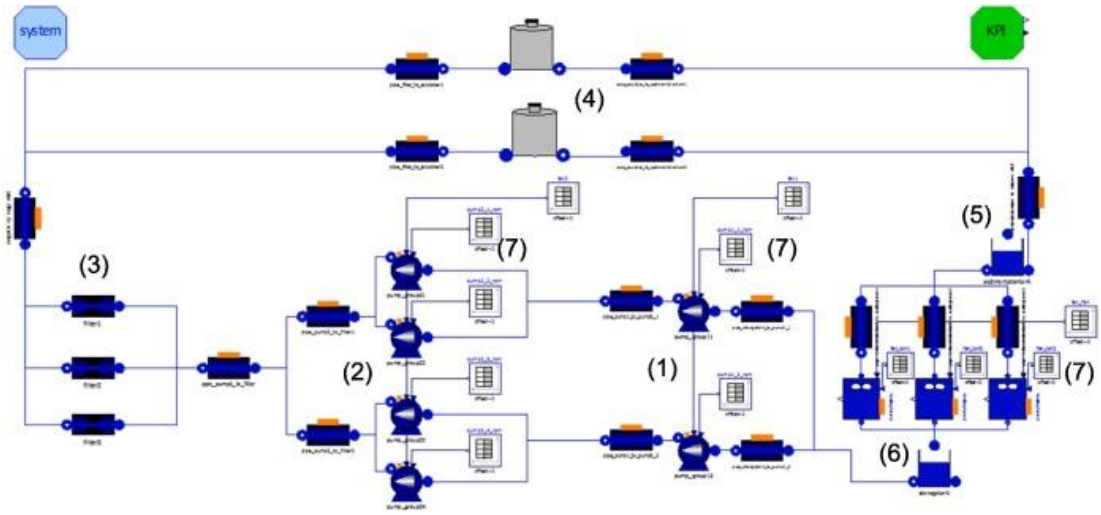
V přírodě se můžeme setkat s mnoha druhy energie, jejichž vliv je nutno brát v potaz při tvorbě energetických bilancí. Mezi nejčastěji používané formy řadíme například energii kinetickou, potenciální nebo vnitřní. Speciálním případem je pak bilance tepelná, u které často zanedbáváme vliv kinetické a potenciální energie. Tato forma bilance využívá speciálně definované energetické veličiny, jakými je vnitřní energie a entalpie. Dané veličiny jsou z praktických důvodů tabelovány a ve výpočtech vázány na látkové množství nebo hmotnost. (Lecjaks et al., 2007)

# 2 Literární rešerše

## 2.1 Nové přístupy k bilancování

Při řešení složitějších bilančních schémat může být použití konvenčního výpočtu zdlouhavé, náročné a někdy bývá dokonce nemožné dojít k jednoznačnému řešení. V posledních letech se tedy čím dál více využívají počítačové simulace a numerická řešení. Další výhodou těchto programů je, že se u jednotlivých simulací mohou měnit parametry a uživatel tím může odhalit případné nedostatky na skutečném zařízení. V nabídce je nepřeberné množství takovýchto programů a nástrojů, a i když každý funguje na jiné bázi, všechny mají společný cíl, provést co nejpřesnější řešení.

Například Oliveira a Iten (2019) se zabývali simulací vodních okruhů v průmyslových měřítkách. K tomuto účelu jim posloužil program *Modelica*, ve kterém využili upravenou knihovnu *Water watt*. Jejich cílem bylo ukázat, jak tato knihovna funguje a jak nápomocná může být v bilancování vodních okruhů jak chladících, tak i ostatních. Celkem provedli simulaci tří vodních okruhů: chladícího, na oplachovou vodu a okruhu PTP *(Paper and pulp transportation&pressing)*. Chladící okruh namodelovali dle obr. 3.



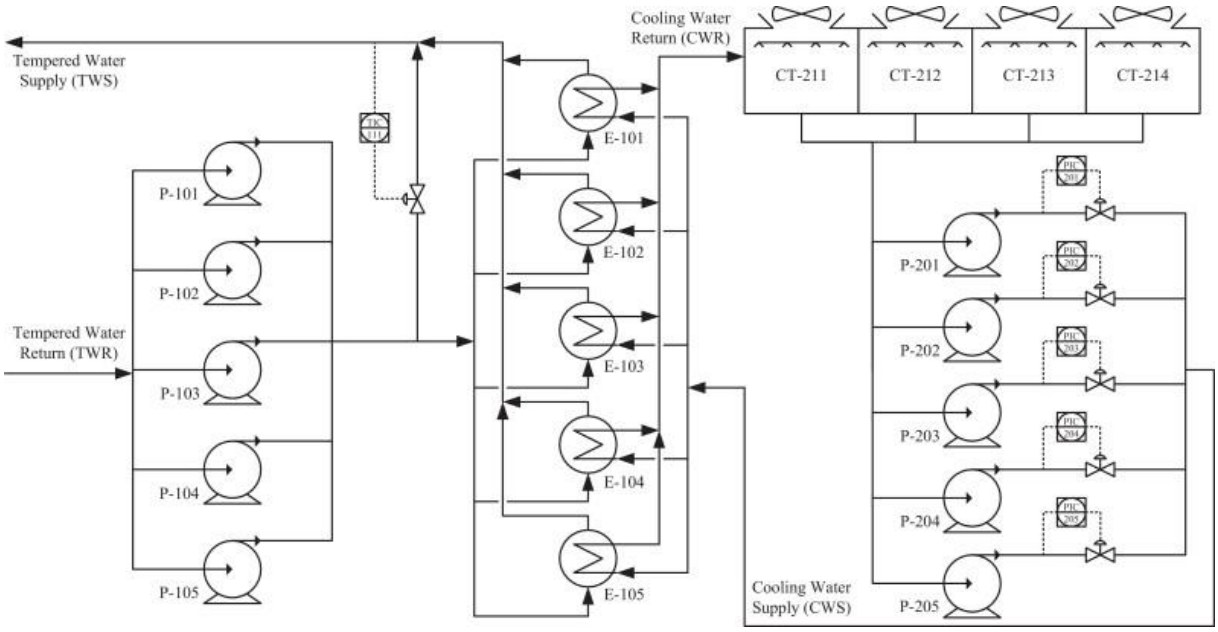

*Obr. 3 Schéma vodního okruhu (zdroj: Oliveira a Iten, 2019)*

Po spuštění simulace dosáhli výsledků, které byly velice podobné reálným hodnotám, jelikož ani jedna z nich nepřesáhla relativní odchylku 2 %, viz tab. 1.

| Parameter | Real data | Simulation Results | Deviation (%) |
|---|---|---|---|
| Pump Group 1 Power (kW) | 10.38 | 10.24 | 1.37 |
| Pump Group 2 Power (kW) | 13.59 | 13.40 | 1.40 |
| Cooling Tower Inlet Temperature (°C) | 35.00 | 35.04 | 0.13 |
| Cooling Tower Outlet Temperature (°C) | 30.00 | 29.42 | 1.92 |
| Control Cabinet Inlet Temperature (°C) | 32.00 | 31.95 | 0.15 |
| Control Cabinet Outlet Temperature (°C) | 33.00 | 32.96 | 0.13 |
| Heat Exchanger Hot Inlet Temperature (°C) | 33.00 | 33.00 | 0.00 |
| Heat Exchanger Hot Outlet Temperature (°C) | 32.00 | 31.70 | 0.94 |
| Heat Exchanger Cold Inlet Temperature (°C) | 30.00 | 29.44 | 1.87 |
| Heat Exchanger Cold Outlet Temperature (°C) | 31.17 | 30.95 | 0.68 |

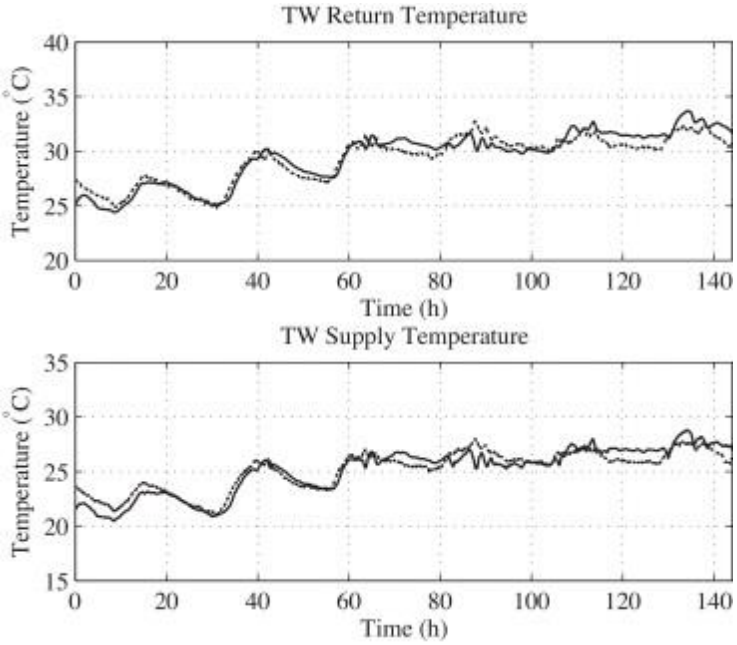
*Tab. 1 Porovnání výsledků (Oliveira a Inten, 2019)*

O něco klasičtější přístup zvolili Muller a Craig (2017), kteří se zabývali simulací a optimalizací chladícího okruhu v petrochemickém průmyslu. Začali popisem procesu a okrajových podmínek, načež byli schopni sestavit schéma (obr. 4) celého procesu.




*Obr. 4 Schéma chladícího okruhu (zdroj. Muller a Craig, 2017)*

Následně byli schopni popsat chladící technologii pomocí osmi stavových a čtrnácti algebraických rovnic. Dohromady se čtyřmi zadanými vstupy a třemi měřenými veličinami byli schopni matematicky popsat celý proces. Na jeho základě provedli několikadenní simulaci, během níž se měnily vstupní veličiny podle naměřených dat. Samotná simulace byla provedena v prostředí programu *MatLab*. Na následujících grafech jsou porovnána data ze simulace a skutečná data naměřená v provozu, viz obr. 5. (Muller a Craig, 2017)

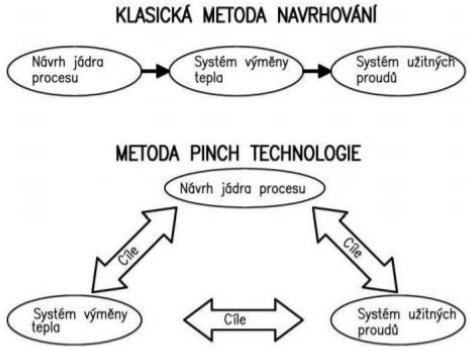



*Obr. 5 Porovnání naměřených a skutečných hodnot (zdroj: Muller a Craig, 2017)*

Jak je vidět z grafů, simulace se dosti přiblížila skutečnosti, a tím pádem byl model vyhodnocen jako spolehlivý a může tedy sloužit jako startovní bod pro řízení a optimalizaci procesu. (Muller a Craig, 2017)

## 2.2 Pinch analýza

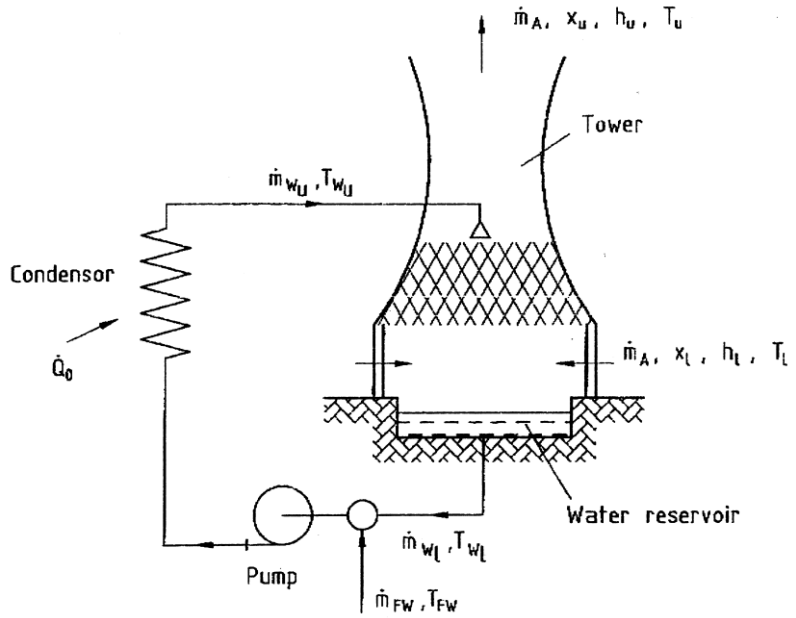
Analýza pinch, jež identifikuje tepelné potenciály v procesu a snaží se snížit spotřebu energie, byla představena kolem roku 1979 Bodo Linnhoffem a Johnem Flowerem. Metoda bere v potaz i takové věci jako je provozuschopnost, plán výroby, či další, a dá se využít jak ve stávajícím provozu, tak při projektování. Zatímco při klasickém projektování se postupuje od jádra procesu přes systém výměny tepla až k systému užitných proudů, v pinch analýze se tyto fáze projektování prolínají (obr. 6) a hledá se nejoptimálnější zapojení jednotlivých aparátů. (Pinch Analysis 2009)




*Obr. 6 Projektování pomocí pinch analýzy (Šimková, 2015)*

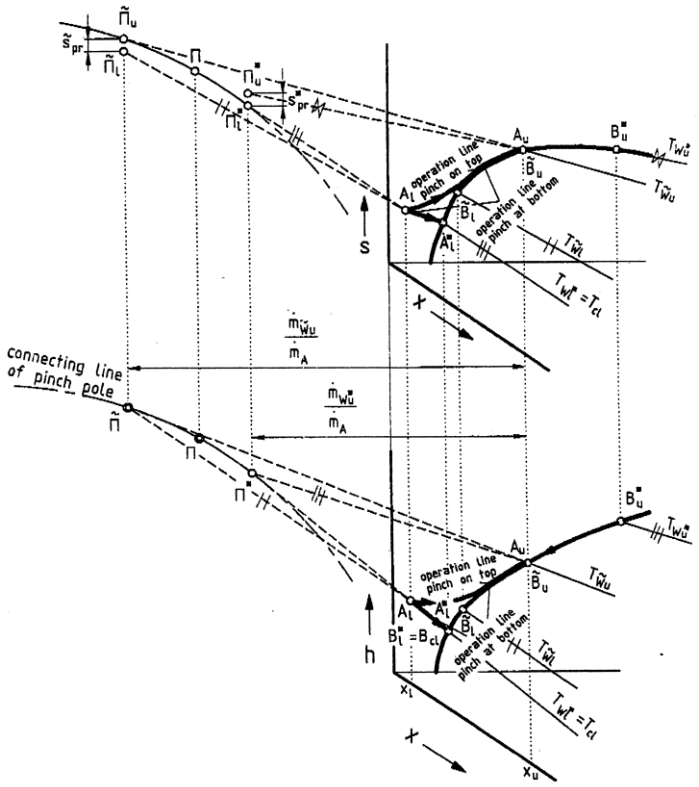
Využitím pinch analýzy v chladícím okruhu se zabývali Bošnjakovič a Knoche (1998), kteří tuto metodu aplikovali na optimalizaci hmotnostního průtoku vody chladící věží v elektrárně.

Ve své práci mimo jiné zdůrazňují, že samotná optimalizace chladící věže je velice zajímavé, nicméně natolik složité téma, že se raději zabývali již existující věží, pro niž byly upraveny ostatní parametry. Jak je zvykem, začali zpracováním schématu procesu (obr. 7) a následným popisem rovnicemi.




*Obr. 7 Schéma procesu (zdroj: Bošnjakovič a Knoche, 1998)*

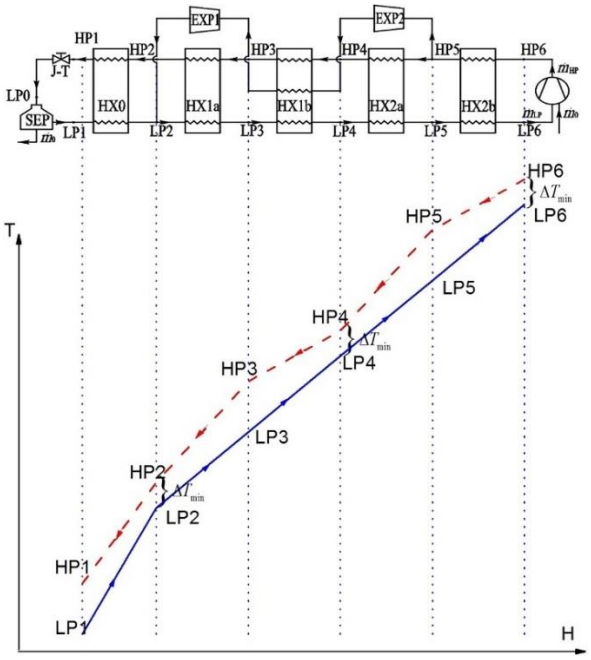
Výsledkem jejich práce byl diagram porovnání pracovních křivek (obr. 8) okruhu pro různé hmotnostní průtoky.




*Obr. 8 Diagram pracovních křivek (zdroj: Bošnjakovič a Knoche, 1998)*

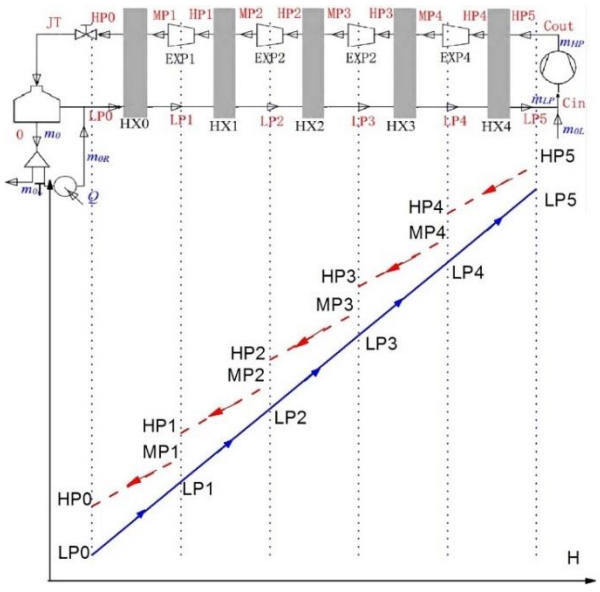
Závěrem práce bylo zjištění, že optimální hmotnostní průtok okruhem závisí na okolní teplotě. (Bošnjakovič a Knoche, 1998)

V roce 2019 skupina čínských výzkumníků využila pinch analýzu pro optimalizaci kryogenického procesu. Jak v práci uvádějí, tento postup by se dal aplikovat na jakýkoli proces daného typu, avšak ne vždy to okolnosti dovolují. V práci se opírali o závěry hned několika vědců z přelomu devatenáctého a dvacátého století. Nejvýrazněji pak o práci Davida G. Collinse, který v roce 1946 upravil cyklus zkapalnění plynů (obr. 9), jenž byl následně ještě upraven a nazván jako *Modifikovaný Braytonův cyklus*. (Yu et al., 2021)



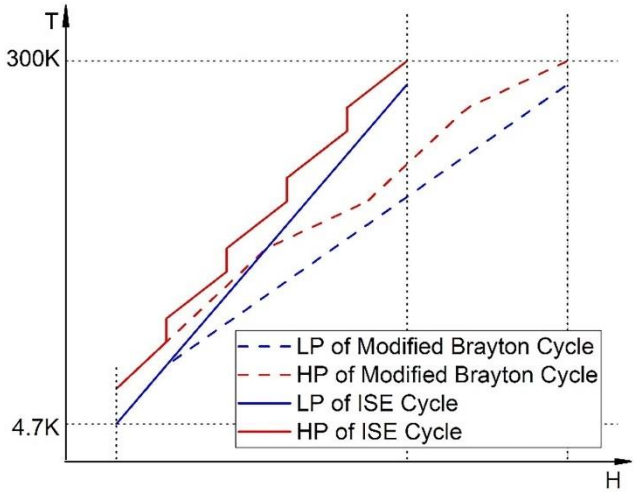

*Obr. 9 Pinch analýza Modifikovaného Braytonova cyklu (zdroj: Yu et al., 2021)*

Tento upravený cyklus porovnávali s ISE *(Intercooled Series Expansion)* cyklem (obr. 10), který využívá sériového zapojení expandéru a tepelného výměníku. (Yu et al., 2021)




*Obr. 10 Pinch analýza ISE cyklu (zdroj: Yu et al., 2021)*

Obě T-H charakteristiky porovnali (obr. 11) a došli k závěru, že ISE cyklus má vyšší účinnost přenosu tepla. (Yu et al., 2021)

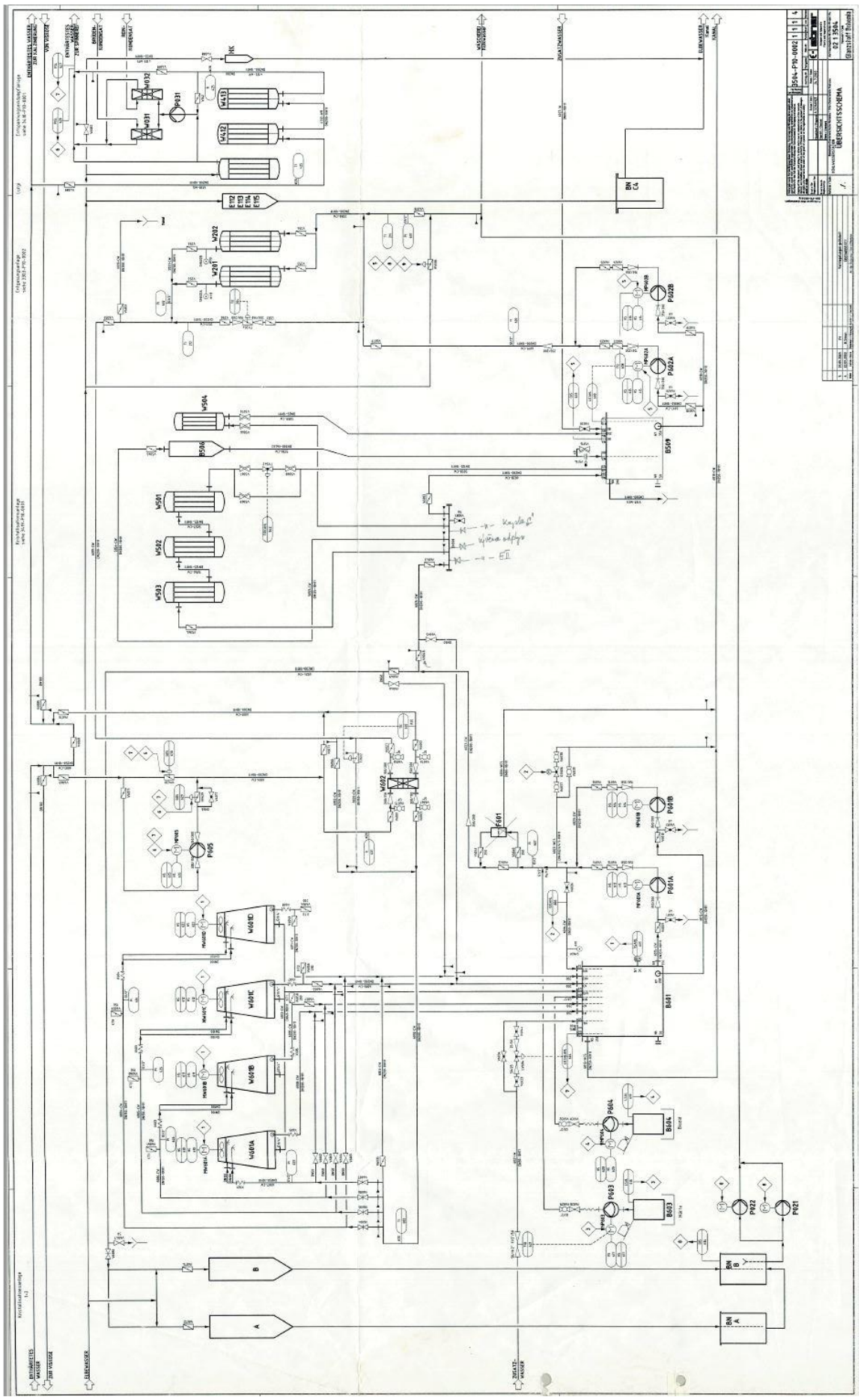



*Obr. 11 Porovnání modifikovaného a ISE cyklu (zdroj: Yu et al., 2021)*

# 3 Chladící okruh

Současný stav chladícího okruhu byl popsán na základě přehledového PID schématu od firmy Ebner (obr. 12), která okruh vybudovala v roce 2004. Bylo zřejmé, že některé věci na schématu se již nemusí shodovat s realitou, tudíž bylo nutné provést kontrolu přímo v provozu. Provedená kontrola odhalila jen několik nepřesností, a tím pádem bylo možné popsat fungování okruhu.

V současnosti okruh zásobuje chladící vodou technologie *Odplynění*, *Krystalizaci C* a *Dvanáctistupňovou odparku Ebner*. Samotné chlazení vody zajišťují otevřené chladící věže, které jsou umístěny na střeše strojovny. Po ochlazení voda stéká volně do nádrže, jež je umístěna pod věžemi. Dodávku vody pro technologie zajišťuje čerpadlo, které je řízené frekvenčním měničem a které napájí hlavní rozvaděč chladící vody. Z tohoto rozvaděče vychází devět potrubních větví, z čehož sedm vede do aparátů *Krystalizace C*, jedna větev vede na *Dvanáctistupňovou odparku Ebner* a na vývěvy *Odplynění* a poslední větev plní funkci přepadu do nádrže *Korekce 1* pro případy, kdy je *Krystalizace C* odstavena. Veškerá voda, která je využita na *Krystalizaci C* je svedena do *Korekce 1*, u níž nalezneme čerpadlo, které čerpá vodu zpět do věží a okruh tím uzavírá. Na této cestě je však ještě část vody využita v kondenzátorech *Odplynění* a dále pak v deskovém výměníku, kde se již maximálně ohřátá voda předchlazuje a ohřívá proud *Alkalicky čiřené vody*.



*Obr. 12 Původní schéma chladícího okruhu*

## 3.1 Chladící věže – PID 205

V současné době je v provozu využíváno sedm chladících věží (obr. 13), z nichž tři nejsou součástí okruhu pro chlazení výše zmíněných technologií, nýbrž pro chlazení kompresorů *Yorky*. V okruhu technologií jsou tedy zapojeny čtyři věže od firmy Axima a konkrétně se jedná o model EWK 900/09.

*„Jedná se o základní řadu určenou pro malé a střední chladící výkony. Základním rysem je kompaktní sklolaminátová skříň a axiální ventilátor zaručující minimální spotřebu elektrické energie. Chladící věže jsou standardně vybaveny dvouotáčkovým motorem. V naprosté většině jsou dodávány se spodní sběrnou vanou“* (Sultrade.cz). Všechny čtyři věže mají společný rozvaděč ohřáté vody dimenze DN 200, ze kterého je voda rovnoměrně distribuována do jednotlivých věží potrubím DN 100. Po průtoku věžemi je voda sbírána do již zmíněných sběrných van, odkud má každá věž své odvodní potrubí DN 200, které vede do sběrné nádrže na chladící vodu technologií.

*Obr. 13 Umístění současných chladících věží*

V současné době jsou ventilátory věží řízené podle teploty ve sběrné nádrži. Motor, který ventilátory pohání má tři možnosti chodu: 0 – není v provozu, 1 – provoz na nižší otáčky, 2 – provoz na vyšší otáčky. Zároveň se sledují motohodiny každého motoru, které se zapínají a vypínají tak, aby všechny měly, pokud možno, stejný počet motohodin.

## 3.2 Krystalizace C – PID 412 a 413

*Krystalizace C* (obr. 14) je považována za jednu z kritických technologií výrobního procesu. Daná technologie má za úkol vytvořit krystaly ze spřádací lázně a oproti *Krystalizaci A* je schopna plně pojmout nároky na celkovou výrobu. Chladící voda je v této technologii využívána ve vodním kondenzátoru, v němž se kondenzují brýdové páry z ejektorů a *Předchladiče*. Nátok do tohoto kondenzátoru je regulován automatickou klapkou, která je řízena podle teploty vody na výtoku z kondenzátoru. Dalšími aparáty, které využívají chladící vodu, jsou tepelné výměníky, které chladí ředěnou kyselinu sírovou v kyselinových okruzích. Tyto kyselinové chladiče jsou zapojeny sériově a průtok je automaticky regulován klapkou, která se nachází na výtoku z posledního kondenzátoru. Na hlavní rozvaděč vody jsou napojeny ještě tři další pomocné kondenzátory, dva směsné a jeden povrchový, na kterých se nátok nastavuje ručně a není nijak kontrolován ani regulován. Posledními zařízeními jsou čtyři kapalinokružné vývěvy, které chladící vodu využívají jako servisní kapalinu. Aby bylo zajištěno jejich správné fungování, kontrolují se jednotlivé nátoky do zařízení.

*Obr. 14 Krystalizace C*

## 3.3 Odplynění – PID 404

*Odplynění* (obr. 15) je první technologie, kterou projde využitá spřádací lázeň. Hlavním úkolem je z lázně odsát nežádoucí plyny, které se uvolňují v *Odplyňováku*. Toto zajišťují dva povrchové kondenzátory využívající chladící vodu, která již putuje zpět na chladící věže. Průtok těmito kondenzátory je regulován podle teploty vody na výtoku z kondenzátoru. Dalším zařízením jsou dvě vývěvy, které odsávají nezkondenzované plyny z právě zmíněných kondenzátorů a mají nátok napojený z hlavního rozvaděče u *Krystalizace C*. Podobně jako u krystalizace je kontrolován průtok, ale není nijak regulován. Jelikož výtok není zapojen zpět do okruhu ale na kanalizační potrubí, zajišťuje odkalení okruhu.

*Obr. 15 Odplynění*

## 3.4 Dvanáctistupňová odparka Ebner – PID 407

Dalším strategicky důležitým zařízením je *Dvanáctistupňová odparka Ebner* (obr. 16), která se využívá k zahuštění spřádací lázně. Oproti *Dvanáctistupňové odparce Lurgi* je efektivnější a bývá tedy využívána přednostně. Chladící voda se zde využívá ke kondenzaci zbylých plynů, které se nezkondenzovaly ve všech předchozích povrchových kondenzátorech. Odtah inertních plynů z tohoto finálního kondenzátoru zajišťují kapalinokružné vývěvy, které také využívají chladící vodu jako servisní kapalinu. Jak bývá zvykem, i u těchto vývěv se kontroluje průtok pro zajištění správného fungování. Výtok z kondenzátoru i vývěv není zacyklený, a tak tyto zařízení plní odkalovací funkci celého okruhu.

*Obr. 16 Dvanáctistupňová odparka Ebner*

## 3.5 Výměník W602 – PID 128

Posledním aparátem, kterým voda projde před nátokem na chladící věže, je deskový tepelný výměník s *Alkalicky čiřenou vodou* (obr. 17), která se dále využívá například jako chladící médium v kondenzátorech obou dvanáctistupňových odparek. V tomto aparátu již chladící voda nezastává funkci chladící ale ohřevnou. Chladící voda tedy ztratí něco málo ze své teploty, ale jelikož výměníkem prochází přibližně jen polovina, ochlazení není nijak radikální.

*Obr. 17 Výměník W602*

## 3.6 Nádrže

Součástí okruhu jsou i dvě sběrné nádrže. První, sběrná nádrž chladící vody pro technologie (obr. 18), je umístěna ve strojovně a jsou do ní svedeny výtoky ze všech čtyř věží. Do horní části nádrže je přiveden nátok *Alkalicky čiřené vody*, který zajišťuje vyrovnávání ztrát odkalením a řídí se výškou hladiny v nádrži. Další nádrž, *Korekce 1,* do níž bývá sváděna veškerá chladící voda využita v technologii krystalizace, je umístěna pod *Krystalizací C*.

*Obr. 18 Sběrná nádrž chladící vody pro technologie*

## 3.7 Čerpadla

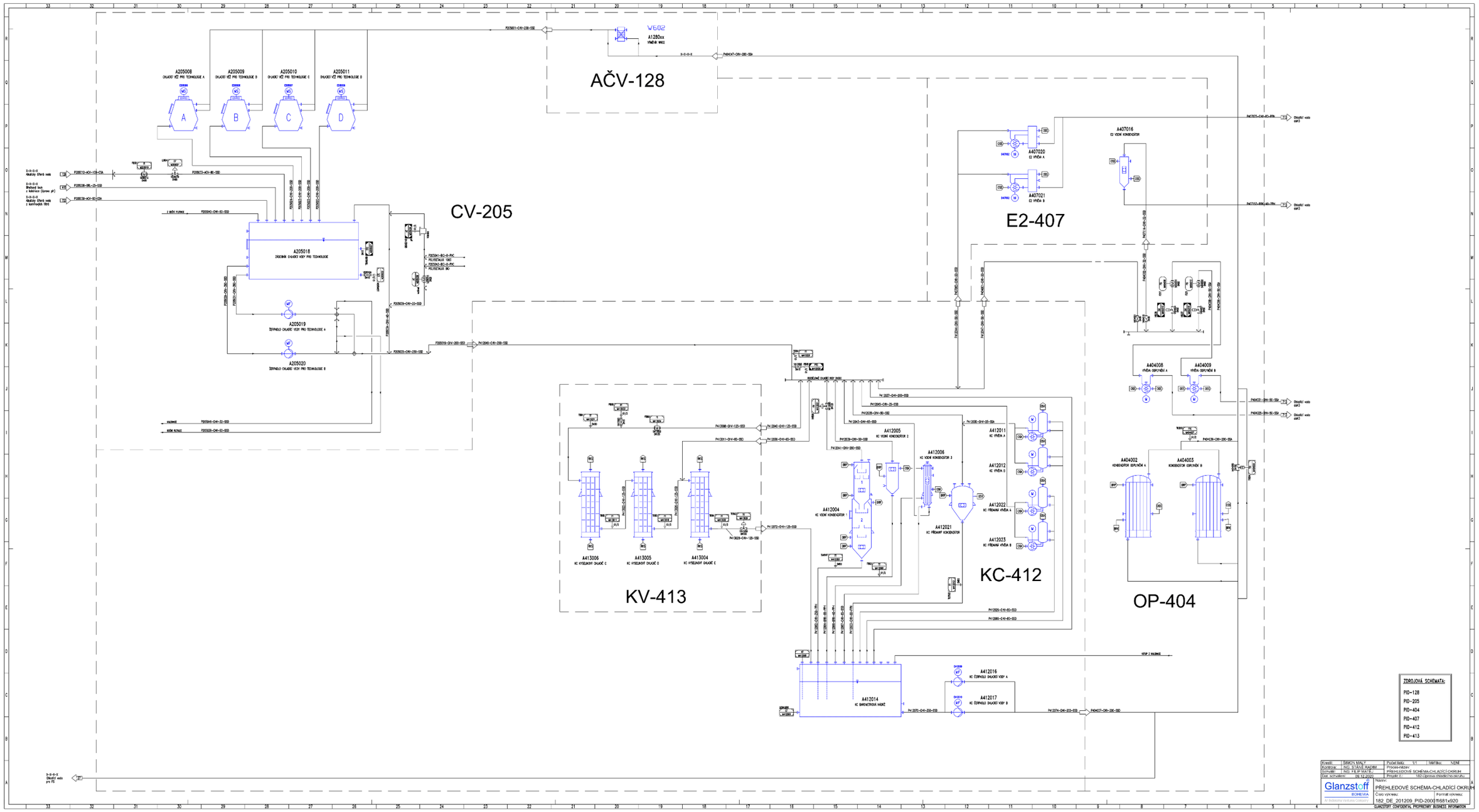
Hlavní hnací mechanismus v okruhu představují celkem čtyři odstředivá čerpadla. Dvě jsou umístěna u sběrné nádrže pod chladícími věžemi a dvě u *Korekce 1*. Stejně jako vývěvy, jsou i čerpadla provozována v režimu jedna plus jedna, kdy je jedno čerpadlo zapnuté a druhé je připravené jako záložní. Ze štítkových hodnot čerpadel a jejich asynchronních motorů byly zjištěny následující údaje, viz tab. 2:

| | P601A | P601B | P602A | P602B |
|---|---|---|---|---|
| Výkon motoru [kW] | 75 | 55 | 75 | 75 |
| Nominální otáčky [$min^{-1}$] | 1450 | 1450 | 1450 | 1450 |
| Průměr oběžného kola [mm] | 352 | 372 | 404 | 404 |
| Napájení frekvenčním měničem | Ano | Ne | Ano | Ano |
| Nominální průtok čerpadla [l $s^{-1}$] | 80,56 | 80,56 | 80,56 | 80,56 |

*Tab. 2 Štítkové hodnoty čerpadel*

## 3.8 PID schéma současného stavu

Na základě projektového PID od firmy Ebner a osobní prohlídky jednotlivých technologií bylo zpracováno PID schéma současného stavu chladícího okruhu, viz obr. 19.




*Obr. 19 PID schéma současného stavu*

# 4 Požadavky nového zařízení

Nejdůležitějšími požadavky na nové zařízení jsou chlazení nově vybudované *Krystalizace E* a také příprava na zapojení *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, která je nyní chlazena *Surovou vodou*. Jelikož se tyto technologie nachází ve stejné budově jako stávající, je tedy logickým řešením zachovat současný okruh a rozšířit ho o zmíněné technologie.

## 4.1 Krystalizace E – PID 420

*Krystalizace E* je nová technologie vybudovaná v roce 2020, která nahradila již nevyhovující *Krystalizaci B,* jež zde stála více než padesát let. Jedním z hlavních důvodů vybudování byl také přechod z chlazení *Surovou vodou* na napojení do chladícího okruhu, a tedy chlazení *Chladící vodou*. *Krystalizace E* nemá sice takovou výkonost jako *Krystalizace C,* ale při jejím výpadku ji spolu s *Krystalizací A* dokážou plně nahradit. Podobně jako *Krystalizace C* má do chladícího okruhu zapojeno hned několik zařízení a sice: velký vodní kondenzátor, malý vodní kondenzátor, sériově zapojené dva kyselinové chladiče (obr. 20) a vývěvy. Zatímco bude nátok do malého kondenzátoru konstantní, do velkého bude regulován automatickou klapkou, která bude řízena teplotou na výtoku chladící vody z kondenzátoru. Průtok kyselinovými chladiči je rovněž regulovaný klapkou, která se nachází na konci tohoto sériového zapojení. Nátok na vývěvy bude, jak je zvykem, kontrolován pouze orientačně, ale nebude nijak regulován. Distribuci chladící vody do jednotlivých zařízení bude zajišťovat hlavní rozvaděč. Využitá chladící voda poté bude stékat do vlastní nádrže *Krystalizace E*, odkud bude čerpadlem tlačena zpět do chladících věží.

*Obr. 20 Kyselinové chladiče Krystalizace E*

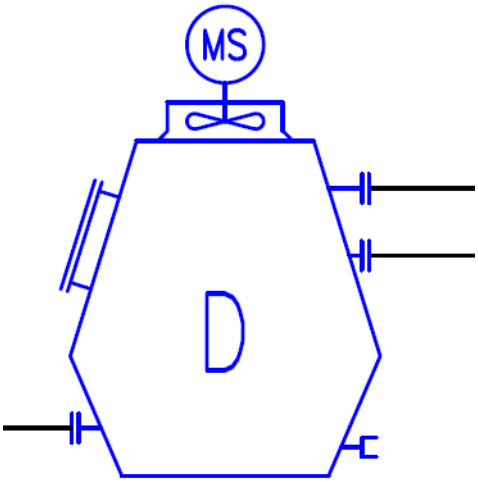
## 4.2 Dvanáctistupňová odparka Lurgi – PID 408

Oproti *Krystalizaci E* je *Dvanáctistupňová odparka Lurgi* (obr. 21) podstatně starším zařízením. Byla vybudována v sedmdesátých letech minulého století firmou Lurgi. Jelikož by nová dvanáctistupňová odparka byla velice nákladnou investicí, bylo rozhodnuto o modernizaci starého zařízení. Součástí této modernizace je zvažováno předělání chlazení posledního kondenzátoru ze *Surové vody* na *Chladící vodu* při zachování stávajícího výkonu. Tento směsný kondenzátor zajišťuje kondenzaci brýdových par z posledních dvou komor expandéru. Nátok do tohoto kondenzátoru je regulován automatickou klapkou, která je řízena podle teploty vody na výtoku z kondenzátoru. Za tímto kondenzátorem se nachází finální kondenzátor, který zajišťuje kondenzaci zbylých nezkondenzovaných plynů. Nátok do tohoto menšího kondenzátoru je konstantní a není nijak regulován. Spolu s kondenzátory budou do okruhu zapojeny také vývěvy, které odsávají inertní plyny z již zmíněných kondenzátorů a jako servisní kapalinu momentálně používají *Surovou vodu*.

*Obr. 21 Dvanáctistupňová odparka Lurgi*

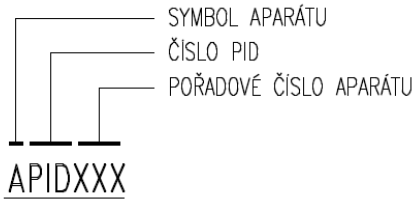
# 5 Tvorba PFD schématu

PFD *(Process flow diagram)* je blokové schéma, které obsahuje aparáty, hlavní toky a je základem pro vytvoření bilance procesu. Jednotlivé aparáty jsou zobrazeny skicou (obr. 22), která reprezentuje skutečný vzhled.




*Obr. 22 Zobrazení chladící věže na PFD schématu*

Číslování aparátů (obr. 23) je zpracováno podle interního předpisu Glanzstoff Bohemia, díky němuž je hned na první pohled vidět, ke které technologii aparát patří. Pod tímto číslem jsou v interní databázi uloženy všechny informace, které slouží k lepší orientaci při provozování či údržbě.

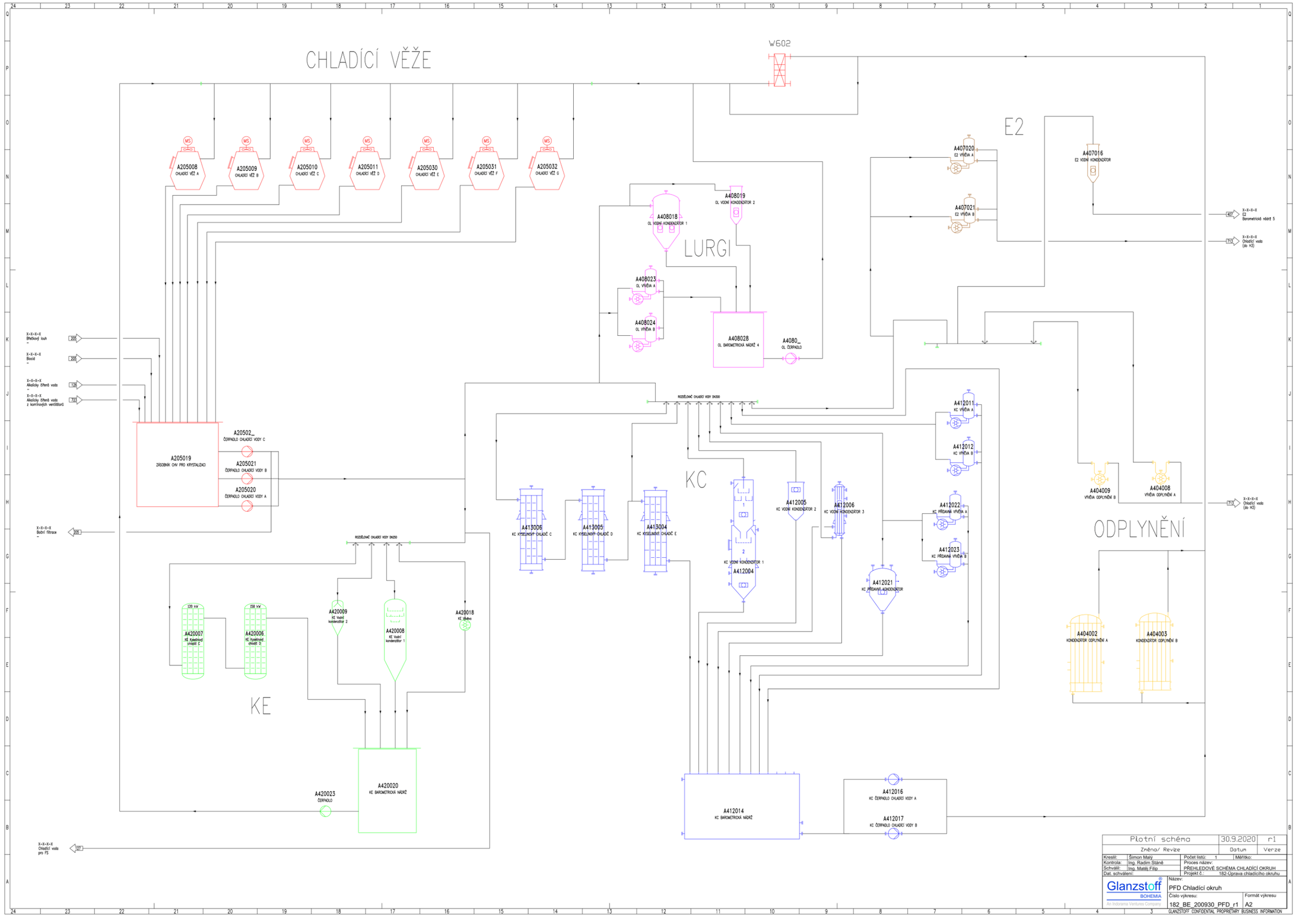



*Obr. 23 Značení aparátů*

Již na začátku projektu bylo rozhodnuto o investici do tří nových chladících věží, jež musí vyhovovat energetickým požadavkům, které budou vypočteny z bilance. Vzhledem k plánovanému umístění nových věží na střechu strojovny je nejelegantnějším řešením napojení výtokových potrubí do stávající sběrné nádrže pro technologie. Stejně jako u věží, i u čerpadel bylo zřejmé, že stávající počet čerpadel nebude vyhovovat novým požadavkům, a tudíž je ve schématu zakresleno o jedno čerpadlo navíc.

U části, kde je schematicky zobrazena část *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, je předběžně počítáno s vybudováním vlastní sběrné nádrže a s připojením čerpadla, které bude využitou chladící vodu vracet k chladícím věžím.

Na základě těchto základních pravidel a požadavků je zpracováno PFD schéma budoucího stavu okruhu, viz obr. 24.




*Obr. 24 PFD schéma*

# 6 Bilance chladícího okruhu

## 6.1 Energetická bilance

Jedním z hlavních parametrů bilance je teplota vody na výstupu z chladících věží. Jelikož chladící věže pracují na principu chlazení adiabatickým vypařováním, výstupní teplota je silně ovlivněna okolními podmínkami. Nejnižší teplota, na kterou se věže mohou dostat při nejnepříznivějších podmínkách, je stanovena na 23 °C.

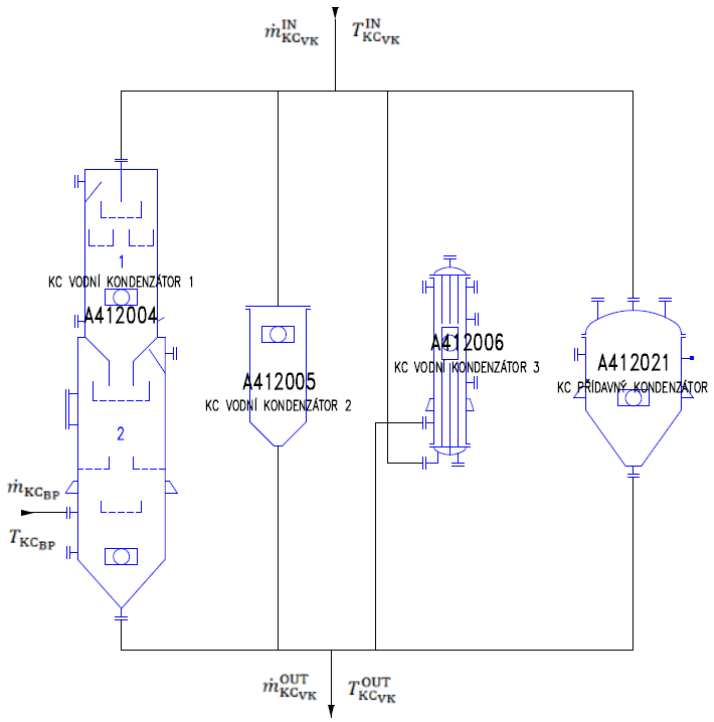
### 6.1.1 Krystalizace C

*Krystalizace C* je jednoznačně energeticky nejnáročnější technologií, co se chlazení týče. Z hlediska bilance chladící vody můžeme tuto technologii zjednodušit na tři hlavní části: vodní kondenzace, chlazení kyseliny a vývěvy.

**Vodní kondenzace**

Vodní kondenzaci *Krystalizace C* zajišťují aparáty A412004, A412005, A412006 a A412021. Jelikož jediný aparát A412004 nemá ručně nastavený nátok, bylo provedeno zjednodušení celé části této technologie na jeden bilanční uzel. Z charakteristiky technologie vyplývá, jaké množství brýdových par je nutné celkem zkondenzovat a o jaké teplotě. Aby vodní kondenzátor držel dostatečně velký podtlak, je stanovena maximální výstupní teplota vody na 26,5 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 25:




*Obr. 25 Bilanční schéma vodní kondenzace Krystalizace C*

Z bilance celé technologie *Krystalizace C* vychází následující parametry:

Výparné teplo brýdových par při teplotě $T_{\mathrm{KC_{BP}}} = 60\ °\mathrm{C}$:

$$r\left(T_{\mathrm{KC_{BP}}}\right) = 2368\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$$

Hmotnostní tok brýdových par:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} = 0{,}51\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$$

Vstupní teplota:

$$T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Výstupní teplota:

$$T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} = 26{,}5\ °\mathrm{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) = 4{,}183\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 4{,}1815\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{10}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{KC_{BP}}}\right) = \dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{11}$$

Z těchto rovnic dostaneme:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{KC_{BP}}}\right)}{C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} - C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}} \tag{12}$$

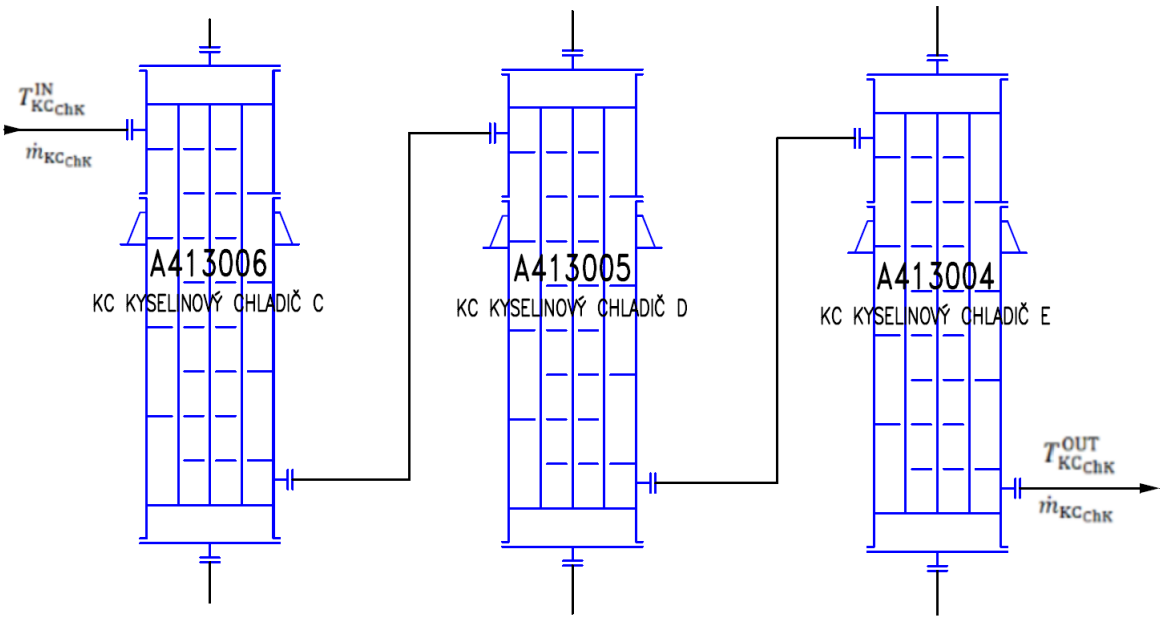
$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{0{,}51 \cdot 4{,}1815 \cdot 26{,}5 - 0{,}51 \cdot 2368}{4{,}183 \cdot 23 - 4{,}1815 \cdot 26{,}5} = 78{,}82\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{13}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = 0{,}51 + 78{,}84 = 79{,}33\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{14}$$

**Chlazení kyseliny**

Z bilance technologie nám vychází celkové teplo, které se v sérii tří výměníků má sdílet. Dalším zadaným parametrem je teplota vody na výtoku z posledního výměníku, která je vzhledem k požadované teplotě kyseliny na výtoku nastavena na 26,5 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 26:




*Obr. 26 Bilanční schéma chlazení kyseliny Krystalizace C*

Sdílený tepelný výkon ve výměnících:

$$\dot{Q}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = 320\ \mathrm{kW}$$

Vstupní teplota:

$$T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Výstupní teplota:

$$T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = 26{,}5\ °\mathrm{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) = 4{,}183\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) = 4{,}1815\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) \cdot T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}} - \dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) \cdot T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = \dot{Q}_{\mathrm{KC_{ChK}}} \tag{15}$$

Vyjádření neznámé:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{KC_{ChK}}}}{C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) \cdot T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_{ChK}}} - C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}\right) \cdot T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{ChK}}}} \tag{16}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} = \frac{320}{4{,}1815 \cdot 26{,}5 - 4{,}183 \cdot 23} = 21{,}92\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{17}$$

**Vývěvy**

Průtok vody vývěvami je po celou dobu provozu konstantní a není tedy potřeba zpracovávat bilanci tohoto zařízení. Na *Krystalizaci C* jsou k chladícímu okruhu připojeny čtyři vývěvy, avšak dvě z nich nejsou v provozu a plní pouze roli náhradního zařízení. Doporučený průtok daný výrobcem vývěvy je $\dot{V}_{\mathrm{KC_V}} = 2\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$. Jelikož při maximálním vytížení linky jsou provozovány nejvýše dvě vývěvy zároveň, budeme v bilanci počítat s průtokem $2 \cdot \dot{V}_{\mathrm{KC_V}} = 4\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$.

Celkový hmotnostní tok vývěvami *Krystalizace C* může být tedy vypočten ze vztahu:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_V}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_V}}\right) \cdot \left(2 \cdot \dot{V}_{\mathrm{KC_V}}\right) \tag{18}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_V}} = 35\ \mathrm{°C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{KC_V}}\right) = 997{,}496\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_V}} = 997{,}496 \cdot \frac{4}{3600} = 1{,}11\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{19}$$

**Korekce 1**

Do *Korekce 1* je svedena veškerá využitá chladící voda z *Krystalizace C*. Celkovou teplotu vody na výstupu z této nádrže lze pak vyjádřit z následující rovnice. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že všechny měrné tepelné kapacity jsou si rovny.

$$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KC_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_V}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KC}_V}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{K1}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{K1}} \tag{20}$$

Dostaneme vztah pro teplotu na výstupu z nádrže:

$$T_{\mathrm{K1}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} \cdot T_{\mathrm{KC_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_V}} \cdot T_{\mathrm{KC}_V}^{\mathrm{OUT}}}{\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_V}}} \tag{21}$$

$$T_{\mathrm{K1}} = \frac{79{,}33 \cdot 26{,}5 + 21{,}92 \cdot 26{,}5 + 1{,}11 \cdot 35}{79{,}33 + 21{,}92 + 1{,}11} = 26{,}59\ ^{\circ}\mathrm{C} \tag{22}$$

Celkový průtok *Korekcí 1*:

$$\dot{m}_{\mathrm{K1}} = \dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}} + \dot{m}_{\mathrm{KC_V}} \tag{23}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{K1}} = 79{,}33 + 21{,}92 + 1{,}11 = 102{,}3\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{24}$$

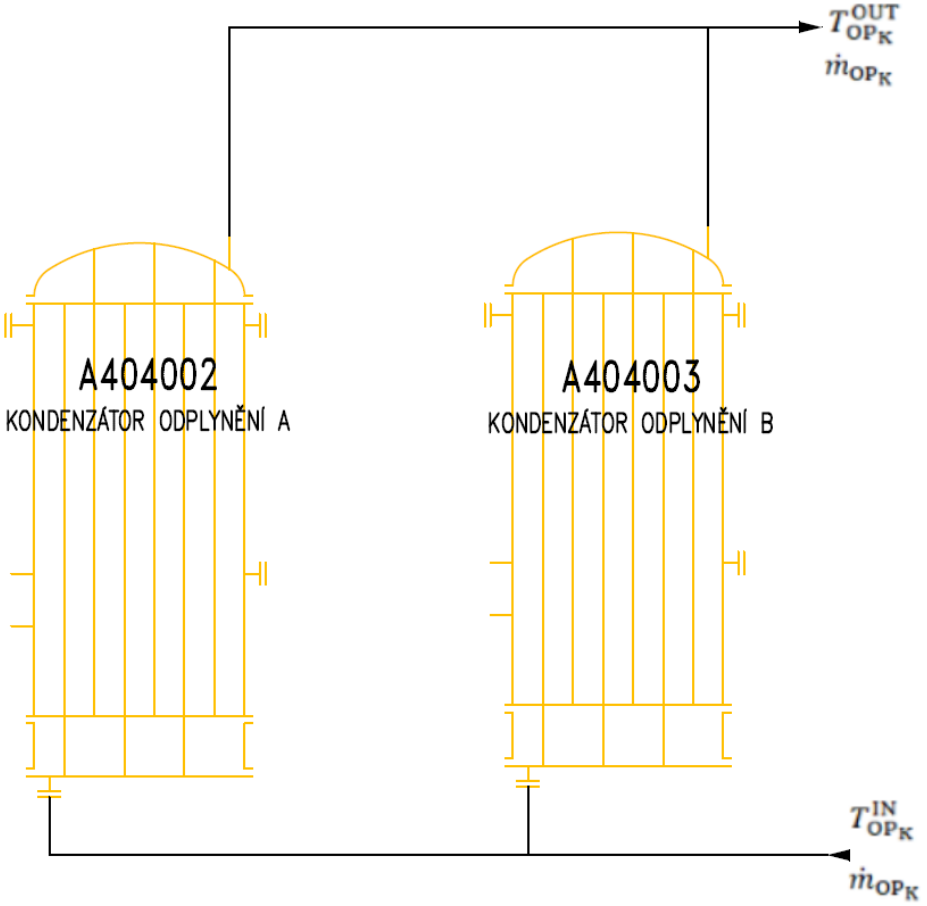
### 6.1.2 Odplynění

Dalším zařízením, které vyžaduje dostatečný přísun chlazení, je *Odplynění*, konkrétně tedy dva povrchové kondenzátory a dvě vývěvy.

**Kondenzátory**

Výstupní teplota vody z kondenzátorů je z bilance zařízení nastavena na 34 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 27:




*Obr. 27 Bilanční schéma kondenzátorů Odplynění*

Sdílený tepelný výkon v kondenzátorech:

$$\dot{Q}_{\mathrm{OP_K}} = 783\ \mathrm{kW}$$

Vstupní teplota:

$$T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}} = T_{\mathrm{K1}} = 26{,}59\ °\mathrm{C}$$

Výstupní teplota:

$$T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}} = 34\ °\mathrm{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}}\right) = 4{,}1815\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 4{,}1794\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_K}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{OP_K}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}} = \dot{Q}_{\mathrm{OP_K}} \tag{25}$$

Vyjádření neznámé:

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_K}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{OP_K}}}{C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}} - C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}}} \tag{26}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_K}} = \frac{783}{4{,}1794 \cdot 34 - 4{,}1815 \cdot 26{,}59} = 25{,}34\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{27}$$

Z celkového hmotnostního průtoku tedy přes *Odplynění* poteče $25{,}34\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ a zbytek vody poteče obchozem. Pro další výpočty je užitečné vypočítat celkovou teplotu chladící vody po průchodu odplyněním. Výpočet si opět zjednodušíme předpokladem, že měrné tepelné kapacity jsou si rovny.

Bilanční rovnice po průchodu *Odplyněním*:

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_K}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}} + \left(\dot{m}_{\mathrm{K1}} - \dot{m}_{\mathrm{OP_K}}\right) \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{K1}} = \dot{m}_{\mathrm{K1}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{OP}}^{\mathrm{OUT}} \tag{28}$$

Vyjádřením teploty na výstupu z *Odplynění* dostaneme vztah:

$$T_{\mathrm{OP}}^{\mathrm{OUT}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{OP_K}} \cdot T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}} + \left(\dot{m}_{\mathrm{K1}} - \dot{m}_{\mathrm{OP_K}}\right) \cdot T_{\mathrm{K1}}}{\dot{m}_{\mathrm{K1}}} \tag{29}$$

$$T_{\mathrm{OP}}^{\mathrm{OUT}} = \frac{25{,}34 \cdot 34 + (102{,}3 - 25{,}34) \cdot 26{,}59}{102{,}3} = 28{,}43\ ^{\circ}\mathrm{C} \tag{30}$$

**Vývěvy**

Stejně jako u *Krystalizace C* mají vývěvy nastavený konstantní průtok, který tak není potřeba bilancovat. I v tomto případě je v provozu pouze jedna vývěva a druhá plní funkci záložní. Při plném vytížení technologie tedy stačí počítat s nominálním průtokem jedné vývěvy. Nominální průtok byl stanoven výrobcem na $\dot{V}_{\mathrm{OP_V}} = 4\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$. Průtok na vývěvy není přiveden ze sejné větve jako na kondenzátory odplynění ale z hlavního rozvaděče u *Krystalizace C*. Tyto vývěvy ovšem nejsou zapojeny zpět do okruhu, a tak je voda, která vývěvou proteče, kanalizována.

Celkový hmotnostní tok vývěvami *Odplynění* může být vypočten ze vztahu:

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_V}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{OP_V}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot \dot{V}_{\mathrm{OP_V}} \tag{31}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T_{\mathrm{OP_V}}^{\mathrm{IN}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{OP_V}}^{\mathrm{IN}}\right) = 997{,}496\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{\mathrm{OP_V}} = 997{,}496 \cdot \frac{4}{3600} = 1{,}11\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{s}^{-1} \tag{32}$$

### 6.1.3 Dvanáctistupňová odparka Ebner

*Dvanáctistupňová odparka Ebner* je na chlazení nejméně náročná a k chladícímu okruhu technologie je připojen pouze malý směsný kondenzátor a dvě vývěvy.

**Malý kondenzátor**

Tento malý kondenzátor slouží k finální kondenzaci inertních plynů a ostré páry využité v ejektoru. Jelikož nátok do něj je poměrně malý, není nijak regulován. Obsluha má tedy konstantně nastavený průtok tímto kondenzátorem na $\dot{V}_{\mathrm{E2_K}} = 4\ \mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$. Ani tento kondenzátor není zapojen zpět do okruhu, a tak částečně plní i odkalovací funkci.

Celkový hmotnostní tok kondenzátorem *Dvanáctistupňové odparky Ebner* může být vypočten ze vztahu:

$$\dot{m}_{\mathrm{E2_K}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{E2_K}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot \dot{V}_{\mathrm{E2_K}} \tag{33}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T_{\mathrm{E2_K}}^{\mathrm{IN}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{E2_K}}^{\mathrm{IN}}\right) = 997{,}496\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{E2_{\mathrm{K}}} = 997{,}496 \cdot \frac{4}{3600} = 1{,}11\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{34}$$

**Vývěvy**

Vývěvy na *Dvanáctistupňové odparce Ebner* nejsou nijak odlišné od ostatních, a tak i ony mají nastavený konstantní průtok doporučený výrobcem. Stejně jako u předchozích dvou případů, je jedna vývěva spuštěna a druhá připravena, kdyby nastaly komplikace. Celkový průtok tedy je stanoven na $\dot{V}_{\mathrm{E2_V}} = 2\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$.

Celkový hmotnostní tok vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Ebner* může být vypočten ze vztahu:

$$\dot{m}_{E2_{\mathrm{V}}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{E2_V}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot \dot{V}_{\mathrm{E2_V}} \tag{35}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T_{\mathrm{E2_V}}^{\mathrm{IN}} = 23\ \mathrm{°C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{E2_V}}^{\mathrm{IN}}\right) = 997{,}496\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{E2_{\mathrm{K}}} = 997{,}496 \cdot \frac{2}{3600} = 0{,}554\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{36}$$

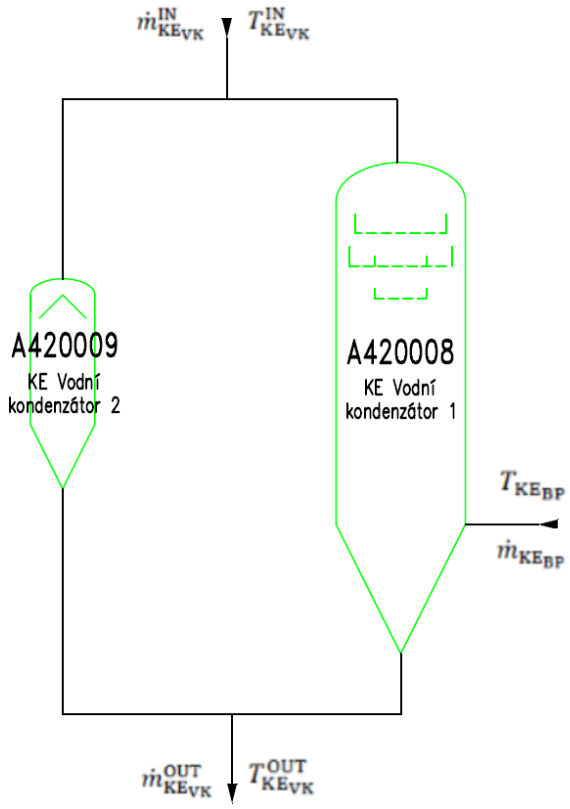
### 6.1.4 Krystalizace E

*Krystalizace E* je energeticky náročná technologie, především co se týče chlazení. Z hlediska bilance chladící vody můžeme tuto technologii, stejně jako *Krystalizaci C*, zjednodušit na tři hlavní části: vodní kondenzace, chlazení kyseliny a vývěvy.

**Vodní kondenzace**

Vodní kondenzace *Krystalizace E* plní obdobnou funkci jako u *Krystalizace* C. Maximální výstupní teplota vody je však v této části technologie stanovena na 28 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 28:




*Obr. 28 Bilanční schéma vodní kondenzace Krystalizace E*

Z bilance celé technologie *Krystalizace E* vychází následující parametry:

Výparné teplo brýdových par při teplotě $T_{KE_{BP}} = 60$ °C:

$$r(T_{KE_{BP}}) = 2368\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní tok brýdových par:

$$\dot{m}_{KE_{BP}} = 0{,}344\ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vstupní teplota:

$$T_{KE_{VK}}^{IN} = 23\ °\text{C}$$

Výstupní teplota:

$$T_{KE_{VK}}^{OUT} = 28\ °\text{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_p(T_{KE_{VK}}^{IN}) = 4{,}183\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 4{,}1809\ \mathrm{kJ}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{37}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{KE_{BP}}}\right) = \dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{38}$$

Z těchto rovnic dostaneme:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{KE_{BP}}}\right)}{C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} - C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}} \tag{39}$$

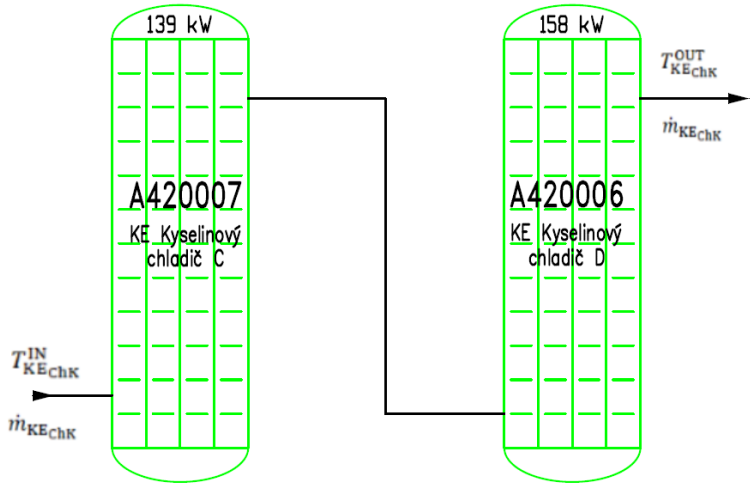
$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{0{,}51 \cdot 4{,}1815 \cdot 28 - 0{,}344 \cdot 2368}{4{,}183 \cdot 23 - 4{,}1809 \cdot 28} = 37{,}153\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{40}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = 0{,}344 + 78{,}84 = 37{,}5\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{41}$$

**Chlazení kyseliny**

Z bilance technologie nám vychází celkové teplo, které se v sérii dvou výměníků má sdílet. Dalším zadaným parametrem je teplota vody na výtoku z posledního výměníku, která je vzhledem k požadované teplotě kyseliny na výtoku nastavena na 26,5 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 29:




*Obr. 29 Bilanční schéma chlazení kyseliny Krystalizace E*

Sdílený tepelný výkon ve výměnících:

$$\dot{Q}_{\mathrm{KE_{ChK}}} = 297\ \mathrm{kW}$$

Vstupní teplota:

$$T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{IN}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Výstupní teplota:

$$T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} = 26{,}5\ °\mathrm{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) = 4{,}183\ \mathrm{kJ}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 4{,}1815\ \mathrm{kJ}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}}\cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}}\right)\cdot T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}}\cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{IN}}\right)\cdot T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{IN}} = \dot{Q}_{\mathrm{KE_{ChK}}} \tag{42}$$

Vyjádření neznámé:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{KE_{ChK}}}}{C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}}\right)\cdot T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} - C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right)\cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}} \tag{43}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} = \frac{297}{4{,}1815\cdot 26{,}5 - 4{,}183\cdot 23} = 20{,}35\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{44}$$

**Vývěvy**

Průtok vody skrze vývěvy je konstantní po celou dobu provozu a není tedy potřeba zpracovávat bilanci tohoto zařízení. Na *Krystalizaci E* je k chladícímu okruhu připojena pouze jedna vývěva, a tak je celkový průtok vývěvou nastaven na $\dot{V}_{\mathrm{KE_V}} = 2\ \mathrm{m}^3\cdot\mathrm{h}^{-1}$.
Celkový hmotnostní tok vývěvou *Krystalizace E* může být vypočten ze vztahu:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_V}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{KE_V}}^{\mathrm{OUT}}\right)\cdot\dot{V}_{\mathrm{KE_V}} \tag{45}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T_{\mathrm{KE_V}}^{\mathrm{OUT}} = 37\ °\mathrm{C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{KE_V}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 997{,}294\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE}_V} = 997{,}294 \cdot \frac{2}{3600} = 0{,}554\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{46}$$

**Sběrná nádrž Krystalizace E**

Do *Sběrné nádrže Krystalizace E* je svedena veškerá využitá chladící voda z této technologie. Celkovou teplotu vody na výstupu z této nádrže lze pak vyjádřit z následující rovnice. Pro zjednodušení budeme předpokládat, že všechny měrné tepelné kapacity jsou si rovny.

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{EC_V}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KE}_V}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} \cdot C_{\mathrm{p}} \cdot T_{\mathrm{KE_N}} \tag{47}$$

Dostaneme vztah pro teplotu na výstupu z nádrže:

$$T_{\mathrm{KE_N}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} \cdot T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_V}} \cdot T_{\mathrm{KE}_V}^{\mathrm{OUT}}}{\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_V}}} \tag{48}$$

$$T_{\mathrm{KE_N}} = \frac{37{,}5 \cdot 28 + 20{,}35 \cdot 26{,}5 + 0{,}554 \cdot 37}{37{,}5 + 20{,}35 + 0{,}554} = 27{,}56\ °\mathrm{C} \tag{49}$$

Celkový průtok *Sběrnou nádrží Krystalizace E*:

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_N}} = \dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_V}} \tag{50}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{KE_N}} = 37{,}5 + 20{,}35 + 0{,}554 = 58{,}4\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{s}^{-1} \tag{51}$$

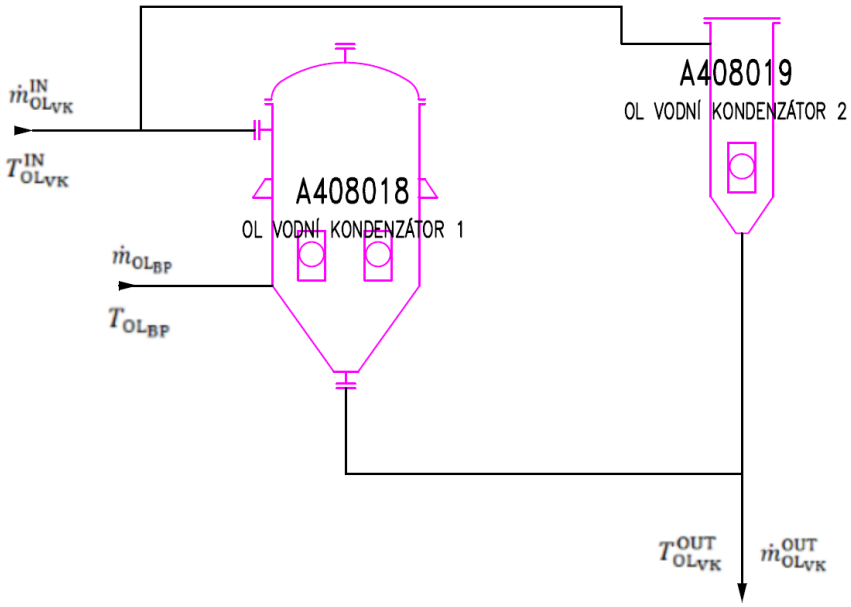
### 6.1.5 Dvanáctistupňová odparka Lurgi

*Dvanáctistupňová odparka Lurgi* potřebuje oproti *Dvanáctistupňové odparce Ebner* mnohem více chladící energie, jelikož se pomocí chladící vody kondenzují brýdové páry z posledních dvou komor. Bilančně tuto technologii můžeme zjednodušit na dvě části: vodní kondenzaci a vývěvy.

**Vodní kondenzace**

Aby vodní kondenzátor držel dostatečně velký podtlak, je maximální výstupní teplota vody stanovena na 33 °C.

Bilanční schéma, viz obr. 30:




*Obr. 30 Bilanční schéma vodní kondenzace Dvanáctistupňové odparky Lurgi*

Z bilance celé technologie *Dvanáctistupňové odparky Lurgi* vychází následující parametry:

Výparné teplo brýdových par při teplotě $T_{OL_{BP}} = 45$ °C:

$$r(T_{OL_{BP}}) = 2394\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní tok brýdových par:

$$\dot{m}_{OL_{BP}} = 0{,}334\ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vstupní teplota:

$$T^{IN}_{OL_{VK}} = 23\ °\text{C}$$

Výstupní teplota:

$$T^{OUT}_{OL_{VK}} = 33\ °\text{C}$$

Měrné tepelné kapacity v závislosti na vstupní a výstupní teplotě:

$$C_p(T^{IN}_{OL_{VK}}) = 4{,}183\ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) = 4{,}1795\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

Bilanční rovnice:

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{52}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{OL_{BP}}}\right) = \dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} \tag{53}$$

Z těchto rovnic dostaneme:

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}} \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}} \cdot r\left(T_{\mathrm{OL_{BP}}}\right)}{C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} - C_{\mathrm{p}}\left(T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}\right) \cdot T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}} \tag{54}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = \frac{0{,}334 \cdot 4{,}1795 \cdot 33 - 0{,}334 \cdot 2394}{4{,}183 \cdot 23 - 4{,}1795 \cdot 33} = 18{,}04\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{55}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}} = 0{,}344 + 78{,}84 = 18{,}38\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{56}$$

**Vývěvy**

Jelikož součástí modernizace *Dvanáctistupňové odparky Lurgi* je i výměna vývěv, není známo, jaký nominální průtok servisní kapaliny bude potřeba. Po vzoru současných vývěv je tak zvažován nominální průtok $\dot{V}_{\mathrm{OL_V}} = 4\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$. Daná hodnota je, stejně jako u ostatních vývěv, pouze přepočítána na hmotnostní průtok a bude-li to možné, výtok z těchto vývěv bude zapojen do okruhu.

Celkový hmotnostní tok vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*:

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_V}} = \rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{OL_V}}^{\mathrm{IN}}\right) \cdot \dot{V}_{\mathrm{OL_V}} \tag{57}$$

Výstupní teplota z vývěv:

$$T_{\mathrm{OL_V}}^{\mathrm{IN}} = 23\ \mathrm{°C}$$

Hustota vody závislá na výstupní teplotě:

$$\rho_{\mathrm{H_2O}}\left(T_{\mathrm{OL_V}}^{\mathrm{IN}}\right) = 997{,}496\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$$

Číselné dosazení:

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_V}} = 997{,}496 \cdot \frac{4}{3600} = 1{,}11\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{58}$$

**Sběrná nádrž Dvanáctistupňové odparky Lurgi**

Jelikož není známa teplota na výstupu z vývěv, pro zjednodušení budeme předpokládat $T_{\mathrm{OL_N}}^{\mathrm{OUT}} = 33\ °\mathrm{C}$. Poté můžeme stanovit celkovou teplotu ve *Sběrné nádrži Dvanáctistupňové odparky Lurgi:*

$$T_{\mathrm{OL_N}} = 33\ °\mathrm{C}$$

Celkový průtok *Sběrnou nádrží Dvanáctistupňové odparky Lurgi*:

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_N}} = \dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_V}} \tag{59}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{OL_N}} = 18{,}38 + 1{,}11 = 19{,}49\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{60}$$

### 6.1.6 Výměník W602

Deskový výměník W602 má za úkol ochladit chladící vodu a jedná se o poslední aparát před vstupem do rozvaděče chladících věží. Druhým médiem, které proudí ve výměníku, je *Alkalicky čiřená voda*, která dále putuje do povrchových kondenzátorů dvanáctistupňových odparek. Kvůli velikosti výměníku jím neprojde celý průtok chladící vody a zbytek tak musí proudit obchozem.

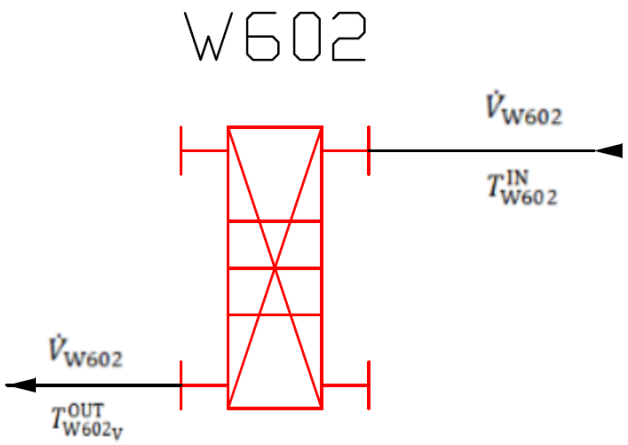
Z charakteristiky výměníku víme maximální doporučený průtok:

$$\dot{V}_{\mathrm{W602}} = 250\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}} \tag{61}$$

Dále se pozorováním odhadl přibližný tepelný výkon výměníku:

$$\dot{Q}_{\mathrm{W602}} = 600\ \mathrm{kW} \tag{62}$$

Bilanční schéma, viz obr. 31:




*Obr. 31 Bilanční schéma výměníku W602*

Bilanční rovnice:

$$\dot{Q}_{W602} = \rho_{H_2O}(T^{IN}_{W602}) \cdot \dot{V}_{W602} \cdot C_p(T^{IN}_{W602}) \cdot (T^{IN}_{W602} - T^{OUT}_{W602_V}), \tag{63}$$

kde:

$$T^{IN}_{W602} = T^{OUT}_{OP} = 28{,}43\ °C$$

$$\rho_{H_2O}(T^{IN}_{W602}) = 996{,}072\ kg \cdot m^{-3}$$

$$C_p(T^{IN}_{W602}) = 4{,}1808\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

Pro teplotu na výstupu z výměníku platí:

$$T^{OUT}_{W602_V} = T^{IN}_{W602} - \frac{\dot{Q}_{W602}}{\rho_{H_2O}(T^{IN}_{W602}) \cdot \dot{V}_{W602} \cdot C_p(T^{IN}_{W602})} \tag{64}$$

$$T^{OUT}_{W602_V} = 28{,}43 - \frac{600}{996{,}072 \cdot \frac{250}{3600} \cdot 4{,}1808} = 26{,}35\ °C \tag{65}$$

Při uvažování stejných měrných tepelných kapacit pro celkovou teplotu za výměníkem platí:

$$T^{OUT}_{W602} = \frac{T^{OUT}_{W602_V} \cdot \rho_{H_2O}(T^{IN}_{W602}) \cdot \dot{V}_{W602} + T^{IN}_{W602} \cdot (\dot{m}_{K1} - \rho_{H_2O}(T^{IN}_{W602}) \cdot \dot{V}_{W602})}{\dot{m}_{K1}} \tag{66}$$

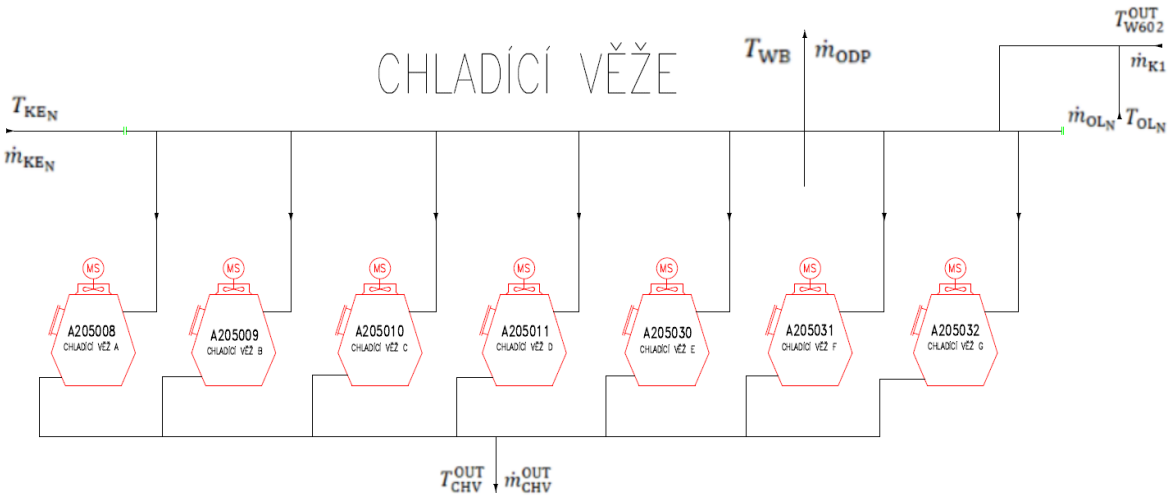
$$T_{\mathrm{W602}}^{\mathrm{OUT}} = \frac{26{,}35 \cdot 996{,}072 \cdot \frac{250}{3600} + 28{,}43 \cdot \left(102{,}3 - 996{,}072 \cdot \frac{250}{3600}\right)}{102{,}3} = 27{,}01\ °\mathrm{C} \qquad (67)$$

### 6.1.7 Chladící věže

Chladící věže mají za úkol ochladit vodu na teplotu, s níž vstupovala do okruhu, a jak již bylo uvedeno, nejnižší teplota, které může voda po průchodu věžemi dosáhnout, je stanovena na 23 °C. Dalšími důležitými parametry při poptávce po chladících věží jsou teplota vody na vstupu do věže a celkový průtok věží. Pro přehlednost je v bilanci uveden údaj o celkovém chladícím výkonu všech věží. Poslední, ale velice důležitou hodnotou, je množství ztrát odparem, které nám umožňuje lepší přehled o potřebném objemu dopouštěné kapaliny.

$$T_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{OUT}} = 23\ °\mathrm{C}$$

Bilanční schéma, viz obr. 32:




*Obr. 32 Bilanční schéma chladících věží*

Teplota na vstupu do věží:

$$T_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{IN}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{K1}} \cdot T_{\mathrm{W602}}^{\mathrm{OUT}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} \cdot T_{\mathrm{KE_N}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_N}} \cdot T_{\mathrm{OL_N}}}{\dot{m}_{\mathrm{K1}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_N}}} \qquad (68)$$

$$T_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{IN}} = \frac{102{,}3 \cdot 27{,}01 + 58{,}4 \cdot 27{,}56 + 19{,}49 \cdot 33}{102{,}3 + 58{,}4 + 19{,}49} = 27{,}84\ °\mathrm{C} \qquad (69)$$

Průtok jednou věží:

$$\dot{m}_{1\mathrm{CHV}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{K1}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_N}}}{7} \tag{70}$$

$$\dot{m}_{1\mathrm{CHV}} = \frac{102{,}3 + 58{,}4 + 19{,}49}{7} = 25{,}74\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{71}$$

Celkový chladící výkon:

$$P_{\mathrm{CH}} = \left(\dot{m}_{\mathrm{K1}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_N}}\right) \cdot C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{W602}}\right) \cdot \left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{CHV}} - T^{\mathrm{OUT}}_{\mathrm{CHV}}\right), \tag{72}$$

kde,

$$C_{\mathrm{p}}\left(T^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{W602}}\right) = 4{,}181\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

$$P_{\mathrm{CH}} = (102{,}3 + 58{,}4 + 19{,}49) \cdot 4{,}181 \cdot (27{,}84 - 23) = 3621\ \mathrm{W} \tag{73}$$

Ztráty odparem:

$$\dot{m}_{\mathrm{ODP}} = \frac{P_{\mathrm{CH}}}{r(T_{\mathrm{WB}})}, \tag{74}$$

kde teplota vlhkého teploměru $T_{\mathrm{WB}} = 21\ \mathrm{°C}$ a:

$$r(T_{\mathrm{WB}}) = 2454\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{ODP}} = \frac{3621}{2454} = 1{,}476\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{75}$$

**Sběrná nádrž chladících věží**

Po ochlazení voda stéká do sběrné nádrže, kam je přiveden nátok *Alkalicky čiřené vody*, který vyrovnává ztráty chladící vody v okruhu. Hmotnostní průtok musí být dostatečný na pokrytí nároků jednotlivých technologií.

Hmotnostní tok z věží:

$$\dot{m}_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{K1}} + \dot{m}_{\mathrm{KE_N}} + \dot{m}_{\mathrm{OL_N}} - \dot{m}_{\mathrm{ODP}} \tag{76}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{OUT}} = 102{,}3 + 58{,}4 + 19{,}49 - 1{,}476 = 178{,}7\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{77}$$

Potřebný průtok na výstupu z nádrže:

$$\dot{m}_{\mathrm{CHV_N}}^{\mathrm{OUT}} = \dot{m}_{\mathrm{KC}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{KE}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{OL}}^{\mathrm{IN}} + \dot{m}_{\mathrm{KAN}} \tag{78}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{CHV_N}}^{\mathrm{OUT}} = 101{,}83 + 58{,}02 + 19{,}15 + 2{,}77 = 181{,}77\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{79}$$

Spotřeba Alkalicky čiřené vody:

$$\dot{m}_{\mathrm{AČV}} = \dot{m}_{\mathrm{CHV_N}}^{\mathrm{OUT}} - \dot{m}_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{OUT}} \tag{80}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{AČV}} = 181{,}77\ - 178{,}7 = 3{,}07\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \tag{81}$$

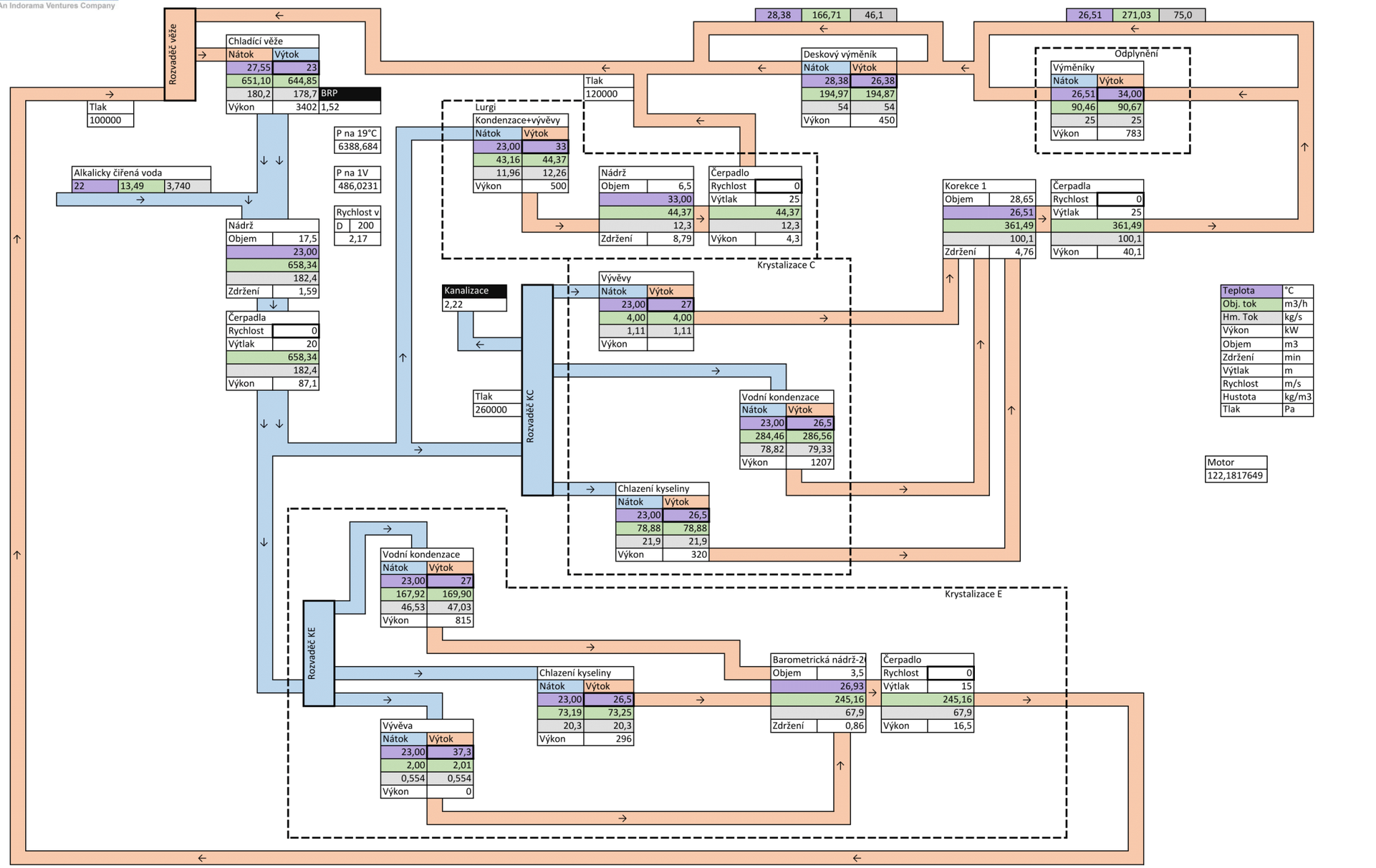
### 6.1.8 Bilance celého okruhu

Z bilancí jednotlivých částí technologií je v programu MS EXCEL vytvořena bilance celého chladícího okruhu, v níž jsou obsaženy všechny dílčí výsledky, viz obr. 33.

Glanzstoff BOHEMIA
An Indorama Ventures Company

# BILANCE Chladící vody

182_DE_201102_Bilance_r2
Model_Budoucnost




Tisk: 27.05.2021

Strana: 1/1

*Obr. 33 Energetická bilance*

## 6.2 Hmotnostní bilance

Hmotnostní bilanci vzhledem ke složitosti a různorodosti brýdových par není vhodné počítat. V tomto případě je vhodnější se přiklonit k možnosti bilanci „naměřit“. V okruhu bylo vytipováno osm strategicky významných míst, kde bude proveden odběr chladící vody, jejíž vzorky se následně vyhodnotí v laboratoři. U jednotlivých vzorků budeme měřit pH, množství pevných částic a hodnotu některých důležitých látek, u kterých je normou ČSN 75 7171 (2013) předepsána maximální koncentrace v potrubí. Cílem zpracování této bilance bylo mimo jiné zjistit, zda by bylo možné do okruhu zapojit výtoky zařízení, které v současné době plní odkalovací funkci a snížit tím spotřebu vody.

Ze vzorků bylo zjištěno:

| Odběrové místo | pH | NL [mg/l] | Fe a Mn [mg/l] | $S^{2-}$ [mg/l] | $SO_4^{2-}$ [mg/l] | $Cl^-$ [mg/l] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zásobník A205019 | 6,8 | 0,2 | 0,07 | 0,01 | 152 | 37,7 |
| Nádrž A412014 | 6,8 | 1,6 | 0,54 | 0,03 | 143 | 36,2 |
| Výměník W602 | 6,8 | 1,2 | 0,08 | 0,11 | 143 | 35,5 |
| Za vývěvou A404008 | 4,2 | 14,6 | 1,43 | 66,50 | 189 | 14,2 |
| Za vývěvou A407020 | 4,1 | 2,8 | 0,55 | 0,05 | 160 | 39 |
| Výstup z kond. A407016 | 8,2 | 1 | 0,10 | 0,00 | 109 | 36,9 |
| Vstup AČV do zásobníku | 4,1 | 0,6 | 0,04 | 0,06 | 137 | 31,9 |
| Povolené množství | min. 6 | max. 50 | max. 5 | max. 2 | max. 500 | max. 600 |

*Tab. 3 Hmotnostní bilance chladícího okruhu (zdroj: ČSN 75 7171)*

Z tabulky můžeme vyčíst, že se všechny hodnoty pohybují v limitech stanovených normou ČSN 75 7171 (2013), kromě koncentrace sulfidů na výtoku z vývěv odplynění. Z tohoto výsledku můžeme konstatovat, že vývěvy A404008 a A404009 by neměly být zapojeny do okruhu. Oproti tomu výstupy z vývěv a kondenzátoru *Dvanáctistupňové odparky Ebner* by mohly být do okruhu zpět zavedeny a snížit tak spotřebu *Alkalicky čiřené vody*.

Spolu s chladící vodou byla změřena koncentrace těchto látek na vstupu a výstupu z kondenzátorů *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*. Bylo zjištěno, že v aparátech se do vody dostane veliké množství látek, především sulfidů. Při zapojení směsných kondenzátorů do chladícího okruhu by měla být zvážena možnost výměny za kondenzátory povrchové. Dalším zajímavým zjištěním je, že v *Krystalizaci C* se do vody rozpustí 126 g/h Fe a Mn, z čehož lze konstatovat, že v této technologii nejspíše došlo k poškození některého z aparátů nebo pogumovaných potrubních dílů.

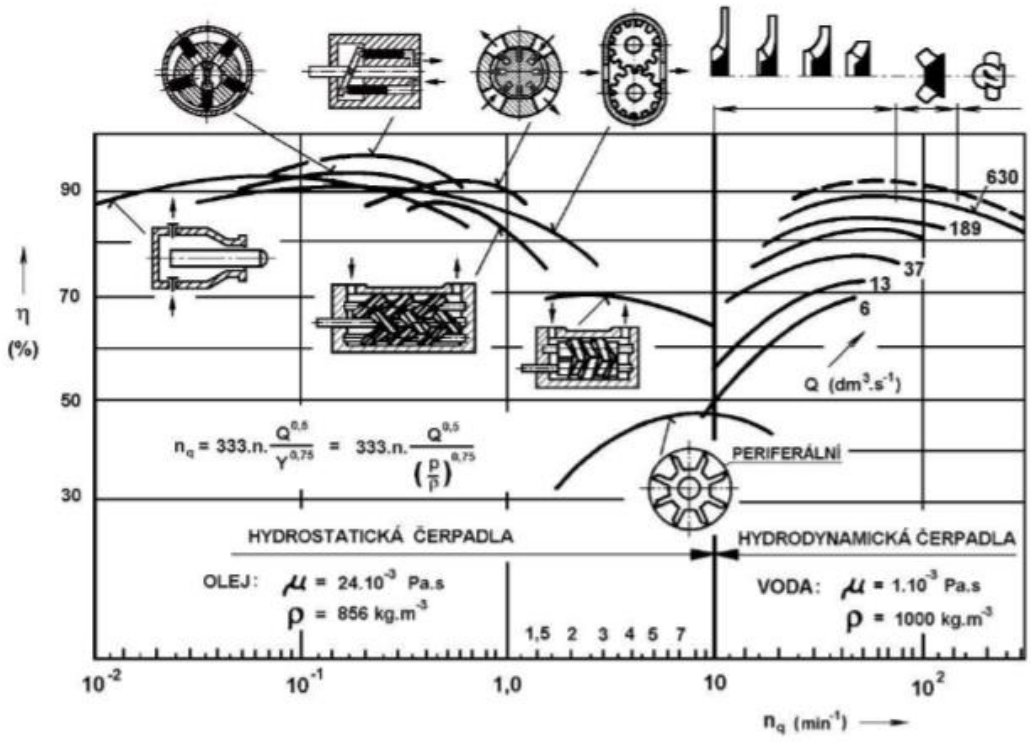
## 6.3 Návrh čerpadel

Čerpadla obecně patří mezi hydraulické stroje, jejichž největší výhodou je, že dokáží přeměnit mechanickou energii v tlakovou, a tudíž jsou schopny zajistit čerpání kapaliny z jednoho místa na druhé. Nejzákladnějšími parametry, které se sledují u čerpadel, jsou průtok $Q$ $[\mathrm{l \cdot s^{-1}}]$ a měrná energie $Y$ $[\mathrm{J \cdot kg^{-1}}]$. Na základě těchto parametrů jsou u konkrétních čerpadel dány charakteristiky, ve kterých se hledá příslušný pracovní bod. (Melichar, 2012)

Obecně jsou čerpadla dělena na hydrostatická, hydrodynamická a speciální. Vhodný typ čerpadla se volí nejen na základě průtoku a měrné energie, ale také se zohledňují fyzikální a chemické vlastnosti čerpaného média. Zjednodušeně se dá typ čerpadla odhadnout dle následujícího diagramu (obr. 34), který jako základní parametr využívá měrné otáčky $n_\mathrm{q}$ $[\mathrm{min^{-1}}]$, jež se dají spočítat podle jednoduchého vztahu:

$$n_\mathrm{q} = 333 \cdot n \cdot \frac{Q^{0,5}}{Y^{0,75}}, \tag{82}$$

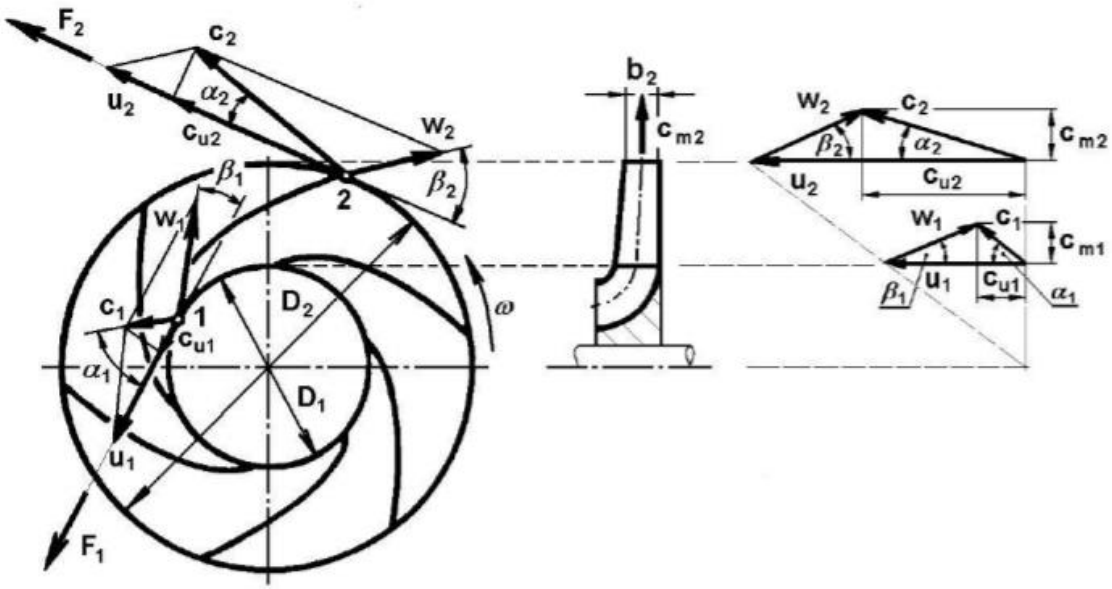
kde $n$ $[\mathrm{s^{-1}}]$ je frekvence otáčení čerpadla. (Melichar, 2012)




*Obr. 34 Diagram pro volbu čerpadel (zdroj: Melichar 2012)*

Jak je z diagramu patrné, hydrostatická čerpadla se využívají pro měrné otáčky $n_\mathrm{q} < 10\ \mathrm{min^{-1}}$, avšak v dnešní době byl tento typ převážně nahrazen rychloběžnými hydrodynamickými čerpadly. Význam hydrostatických čerpadel je tedy například při přepravě vazkých kapalin.

Je tedy jasné, že v našem okruhu budeme využívat čerpadel hydrodynamických, ve kterých dochází k přeměně energie rotujícím lopatkovým oběžným kolem (obr. 35). Na následujícím obrázku jsou znázorněny kinematické poměry na oběžném kole. (Melichar, 2012)




*Obr. 35 Oběžné kolo odstředivých čerpadel (zdroj: Melichar 2012*

### 6.3.1 Výpočet základních parametrů čerpadel

Z energetické bilance máme již vypočítaný průtok, který bude čerpadlem dopravován. Dalším důležitým parametrem je tedy měrná energie, kterou čerpadlo musí kapalině předat. Tuto hodnotu můžeme vypočítat z rozšířené Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho_{\mathrm{H_2O}}} + \frac{u_1^2}{2} + g \cdot h + Y = \frac{p_2}{\rho_{\mathrm{H_2O}}} + \frac{u_2^2}{2} + g \cdot H + e_{\mathrm{z}}\,, \tag{83}$$

kde $p_1$ je tlak v nádrži, $\rho$ je hustota kapaliny, $u_1$ a $u_2$ jsou rychlosti proudění kapaliny, $h$ je výška hladiny v nádrži, $p_2$ je tlak v rozvaděči, $H$ je výška, do které je kapalina dopravována a $e_z$ jsou tlakové ztráty v potrubí.

Jelikož je v nádrži volná hladina, můžeme $p_1$ vynechat. Dále budeme předpokládat, že rychlosti proudění v nádrži a v rozvaděči jsou malé, a tím pádem také zanedbatelné. Po úpravě dostáváme tedy výraz:

$$Y = \frac{p_2}{\rho_{\mathrm{H_2O}}} + g \cdot (H - h) + e_{\mathrm{z}} \tag{84}$$

Zadané hodnoty:

$$p_2 = 260 \text{ kPa}$$

$$\rho_{H_2O} = 997{,}5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$g = 9{,}81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$H = 23 \text{ m}$$

$$h = 3 \text{ m}$$

Tlakové ztráty byly předběžně odhadnuty:

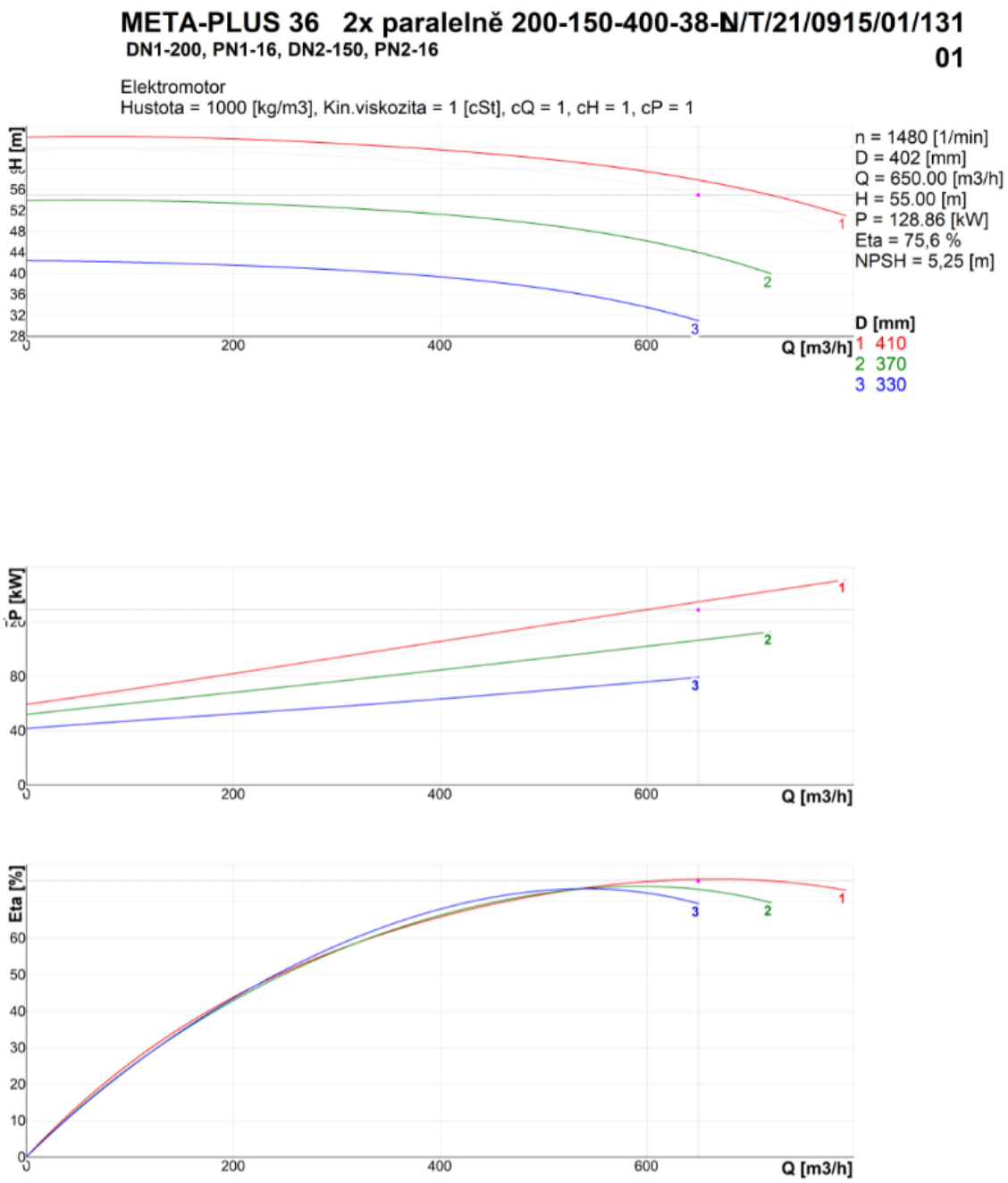
$$e_z = 40 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Dosazením získáme výslednou hodnotu měrné energie:

$$Y = \frac{260000}{997{,}5} + 9{,}81 \cdot (22 - 2) + 40 = 495{,}85 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (85)$$

Na základě těchto hodnot byla vytvořena nabídka firmou ISH Olomouc, která dodala i stávající čerpadla. Bylo nabídnuto řešení, kdy kapalinu čerpají zároveň dvě čerpadla v paralelním zapojení. Tato čerpadla se spolu se stávajícími shodovala hned v několika ohledech. Z ekonomických důvodů tedy nebudou pořízena tři nová čerpadla (dvě v provozu a jedno náhradní), ale přistoupí se k možnosti přebudování stávajících a zakoupení jednoho nového.

Výrobcem byly spolu s nabídkou zaslány charakteristiky čerpadel, viz obr. 36.




*Obr. 36 Charakteristika paralelně zapojených čerpadel (zdroj: ISH Pumps)*

## 6.4 Návrh chladících věží

Proces návrhu chladící věže je celkem složitý a dost závisí na prostředí, ve kterém je věž umístěna. Návrh jednotlivých věží se navíc liší podle způsobu chlazení média. V dnešní době chladící věže dělíme na mokré, suché a hybridní podle toho, zda médium přichází do kontaktu se vzduchem. U každého typu těchto věží můžeme zároveň využívat přirozený nebo nucený tah.

- **Mokrá chladící věž**

Při mokrém chlazení přichází ohřátá voda do přímého kontaktu s proudícím vzduchem a zpravidla bývá přiváděna do vrchních částí věže, odkud je pomocí sprch rozstřikována a přes výplň v chladících věží stéká do sběrné vany. Samotné chlazení je způsobeno odparem malého množství vody, které je poté vzduchem unášeno ven ze systému. U věží s nuceným tahem se o proudění vzduchu obvykle stará ventilátor, který je poháněn elektromotorem. (Susna, 2018)

- **Suchá chladící věž**

Při suchém chlazení, oproti mokrému, nepřichází voda do přímého kontaktu s proudícím vzduchem. V suché chladící věži tedy není voda rozstřikována sprchou, ale proudí v žebrovaném výměníku, který je ofukován. Stejně jako u mokrých chladících věží může vzduch proudit samovolně nebo může být poháněn ventilátorem. Největší výhodou suchého chlazení je, že při chlazení nedochází k odparu, a tím pádem ani ke ztrátě objemu vody. Na druhou stranu, suché chlazení má oproti mokrému výrazně nižší výkon. (Susna, 2018)

- **Hybridní chladící věž**

Hybridní chlazení kombinuje suché a mokré chlazení za účelem zvýšení účinnosti. Voda je přiváděna do žebrovaného výměníku, kde probíhá suchá část chlazení, a odtud je vedena do sprch, které vodu rozstřikují na chladící výplň. Zde voda přichází do přímého kontaktu se vzduchem a nastává část mokrého chlazení. (Susna, 2018)

Z těchto tří možností, které nám současný trh nabízí je pro řešený chladící okruh nejlepší volbou mokrá chladící věž s nuceným tahem. Toto rozhodnutí je podpořeno i faktem, že v současném stavu je chlazení vody zajištěno právě tímto způsobem. Pro návrh chladící věže je potřeba hned několik parametrů, které byly vypočteny v bilanci.

Parametry potřebné pro návrh mokré chladící věže, viz tab. 4.

| | |
|---|---|
| Vstupní teplota | 27,84 °C |
| Požadovaná výstupní teplota | 23 °C |
| Teplota vlhkého teploměru | 21 °C |
| Hmotnostní průtok jednou věží | 25,74 kg/s |

*Tab. 4 Požadované parametry chladících věží*

Na základě těchto parametrů byla firmou Sultrade nabídnuta věž EWK 900/09, která odpovídá současným věžím. Tato skutečnost nahrává i snadnější údržbě a provozu.
Parametry nabídnuté věže, viz tab. 5:

| | |
|---|---|
| Průtok | 33,3 kg/s |
| Teplota vody na vstupu | 27,84 °C |
| Teplota vody na výstupu | 23,12 °C |
| Teplota vlhkého teploměru | 21 °C |
| Chladící výkon | 517,4 kW |
| Ztráty odparem | 0,2 kg/s |
| Ztráty únosem | 0,00067 kg/s |
| Typ výplně | FKP 312 |

*Tab. 5 Parametry nabídnuté chladící věže*

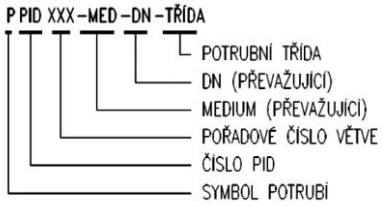
# 7 Tvorba PID schématu

PID *(Piping and Instrumentation diagram)* je schéma procesu (obr. 44), které je založeno na PFD, ale obsahuje již detailnější popis procesu. Na rozdíl od PFD můžeme v PID najít všechna potrubí, armatury a měřidla. U každé z těchto částí je možné vyčíst typ, dimenzi a materiál. Číslování a zobrazování jednotlivých komponent je provedeno dle vnitřního předpisu Glanzstoff Bohemia (stejně jako u Aparátů), který vychází z mezinárodní normy ISO 14617.

## 7.1 Potrubní větve

### 7.1.1 Popis potrubních větví

Každá potrubní větev má své popisové číslo, pod nímž je zavedena v interní databázi GBO. Samotné schéma značení je vidět na obr. 37.




*Obr. 37 Popis potrubních větví*

### 7.1.2 Potrubní značky

Pro větší přiblížení skutečného vzhledu potrubní větve slouží její schématické zobrazení, z něhož lze vyčíst například jaké spoje se na potrubí vyskytují nebo jakým směrem médium proudí. Celkový přehled potrubních značek je zobrazen v tab. 6:

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Potrubní trasa | | Hlavní potrubní trasa |
| | Přerušení vodorovné a svislé | | Přenosné potrubní spojení |
| | Sklon potrubí | | Elektrootop |
| | Izolace potrubí | | Redukce |
| | Přírubový spoj | | Šroubový spoj |
| | Hadicová koncovka | | Zaslepovací dno |
| ATM. | Výfuk do ATM. | | Směr potrubí |
| | Ukončení větve potrubí | | Přerušení potrubí |
| | T – kříž | | Hadice |

*Tab. 6 Potrubní značky*

### 7.1.3 Médium

Jedním z velice důležitých parametrů popisu potrubní větve je médium, které rozlišujeme podle symbolického troj-písmenného označení. V GBO se používá celá řada médií, která se dělí do nejrůznějších skupin. Pro lepší přehlednost jsou v následující tabulce obsažena pouze média, která jsou využita v souvislosti s chladícím okruhem, viz tab. 7.

| Symbol média | Název média | Kategorie | Řád | Skupenství | Kategorie BOZP |
|---|---|---|---|---|---|
| ACV | Alkalicky čiřená voda | Surovina | hlavní | Kapalné | Technologická voda |
| AVZ | Atmosférický vzduch | Procesní médium | vedlejší | Plynné | Vzduch |
| BIC | Biocid | Surovina | pomocný | Kapalné | Ostatní |
| BRL | Břečkový louh | Procesní médium | vedlejší | Kapalné | Louhy |
| BRP | Brýdová pára | Procesní médium | vedlejší | Kapalné | Pára |
| CHV | Chladící voda | Energetické médium | transportní | Kapalné | Technologická voda |

*Tab. 7 Použitá média v chladícím okruhu*

### 7.1.4 Výpočet DN

Součástí popisu potrubní větve je také její dimenze, podle níž se v dalších krocích volí například rozměry ventilů či speciálů. Charakteristický rozměr nám udává DN, tedy přibližná velikost vnitřního průměru potrubí, která je volena dle vztahu:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{v_{\max} \cdot \pi}}, \tag{86}$$

kde $v_{\max}$ je maximální dovolená rychlost v potrubí, která je dle interního předpisu stanovena na $2\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

### 7.1.5 Volba potrubní třídy

Spolu se širokou škálou médií a jejich specifických vlastností existuje stejné množství druhů potrubních tříd. Podobně jako u médií, by nebylo k užitku vypisovat všechny potrubní třídy, tudíž jsou v následující tabulce obsaženy pouze ty, které jsou spjaté s chladícím okruhem, viz tab. 8:

| Symbol | Název | Popis |
|---|---|---|
| PPH | Polypropylen-H SDR11 | Tlakové potrubí |
| SSA | Korozivzdorná ocel 1.4301 | Austenitická – X5CrNi18 (ANSI 304, ČSN 17 240) |
| SSD | Korozivzdorná ocel 1.4541 | Austenitická s Ti – X6CrNiTi18-10 (AISI 321) |
| SSE | Korozivzdorná ocel 1.4571 | Austenitická s Ti a Mo – X6CrNiTi18-10(AISI 316Ti) |

*Tab. 8 Seznam použitých potrubních tříd*

Samotný návrh potrubní třídy je silně závislý na médiu, které ve větvi proudí. Z tohoto důvodu byla vytvořena následující tabulka výše zmíněných médií a potrubních tříd, podle které probíhá samotná volba potrubní třídy, viz tab. 9:

| Symbol | Název média | PPH | SSA | SSD | SSE |
|---|---|---|---|---|---|
| ACV | Alkalicky čiřená voda | X | | S | |
| AVZ | Atmosférický vzduch | X | S | X | |
| BIC | Biocid | S | | X | |
| BRL | Břečkový louh | | | | S |
| BRP | Brýdová pára | | | S | |
| CHV | Chladící voda | X | | S | |

*Tab. 9 Volba potrubních tříd*

Symbol S značí doporučenou kombinaci, X značí možnou kombinaci materiálu s médiem.

### 7.1.6 Návrh nových potrubních tras

Jako příklad postupu při návrhu potrubní větve můžeme vzít nový společný výtlak čerpadel A205019, A205020 a A205032. Již z PFD je známo, jakým stylem potrubí propojuje napojovací body, a jelikož se jedná v pořadí o třicátou pátou potrubní větev vyskytující se na technologickém PID 205, začátek označení větve bude P205035.

V dalším kroku je nutné si uvědomit, jaké médium v potrubí proudí a podle toho zvolit potrubní třídu. Jelikož se jedná o chladící vodu, pro kterou je doporučený materiál SSD, rozšíří se popis větve na P205035-CHV-XXX-SSD.

Posledním chybějícím údajem je tedy dimenze daného potrubí. Z bilance je zřejmé, že touto potrubní větví bude protékat objemový průtok $\dot{V}_{\mathrm{P205035}} = 656\ \mathrm{m^3 \cdot h^{-1}}$ a maximální rychlost v potrubí je tak $v_{\max} = 2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Z následujícího vztahu můžeme vypočítat potřebný vnitřní průměr potrubí:

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{\mathrm{P205035}}}{v_{\max} \cdot \pi}} \tag{87}$$

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot 656 \cdot \frac{10^6}{3600}}{2 \cdot \pi}} = 320{,}3 \text{ mm} \tag{88}$$

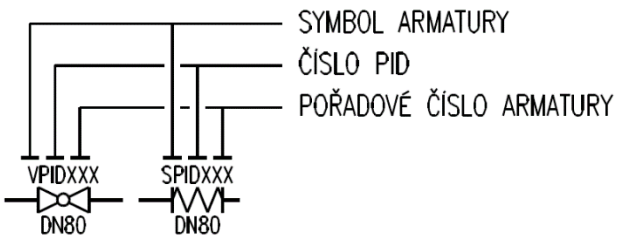
Nejblíže dané hodnotě odpovídá potrubí o velikosti DN 300, které má vnitřní průměr $d = 317{,}5$. Tímto krokem je návrh označení potrubní větve hotov (obr. 38) a potrubní větev nese označení P205035-CHV-300-SSD.

*Obr. 38 Návrh potrubní větve*

## 7.2 Ventily a speciály

### 7.2.1 Popis ventilů a speciálů

Díky popisu je možné se dozvědět, kterého PID jsou ventily a speciály součástí a jaké mají pořadové číslo (obr. 39). Doplňkovou informaci u těchto potrubních částí představuje DN ventilu nebo speciálu, které je odvozeno od DN potrubní větve, na níž je umístěno.




*Obr. 39 Značení ventilů a speciálů*

### 7.2.2 Symbolické zobrazení ventilů a speciálů

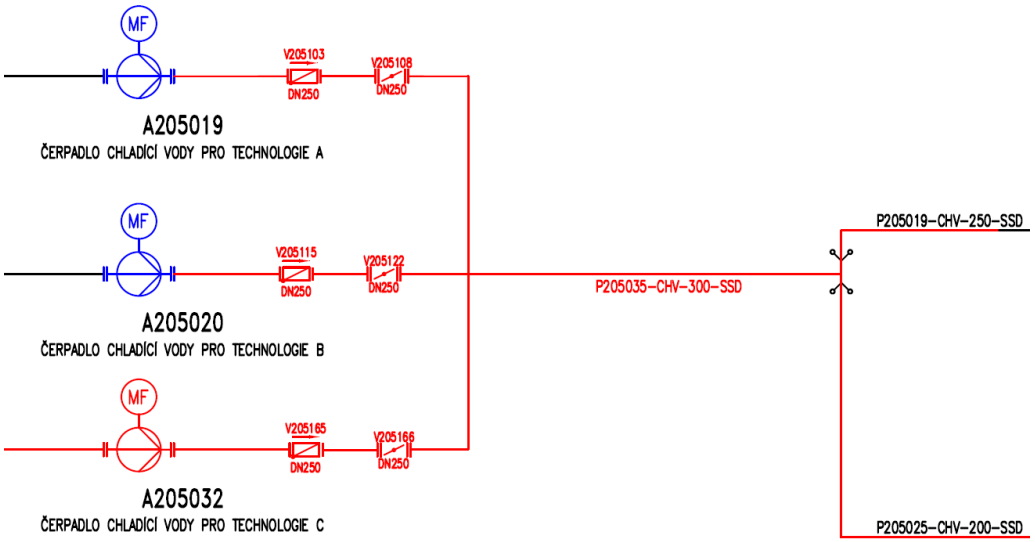
Další informací, kterou lze z označení vyčíst, je typ daného ventilu nebo speciálu. Jednotlivé typy těchto komponent lze určit dle tab. 10:

| Ventily | | Speciály | |
|---|---|---|---|
| | Ventil bezpečnostní | | Omezovací clona |
|  | Kohout kulový |  | Měřící clona |
|  | Ventil jehlový | | Expanzní nádoba |
| | Klapka | | Filtr potrubní |
| | Ventil membránový | | Odvaděč kondenzátu |
| | Ventil redukční | | Membrána |
| | Šoupátko | | Průhledítko |
| | Kohout kulový trojcestný | | Kompenzátor |
| | Ventil sedlový | | Záslepka otevřená |
| | Ventil trojcestný | | Záslepka zavřená |
| | Ventil zpětný | | Průtokoměr |
| | Klapka zpětná | | Rotametr |

*Tab. 10 Symbolické zobrazení ventilů a speciálů*

### 7.2.3 Návrh nových ventilů a speciálů

Návrh nových ventilů a speciálů probíhá na základě několika faktorů. Jedním z hlavních činitelů jsou určitě funkčnost systému a jednoduchá ovladatelnost nebo dokonce zavedená zvyklost. Na potrubní větvi P205035-CHV-300-SSD je ukázán příklad umístění ventilů, viz obr. 40.



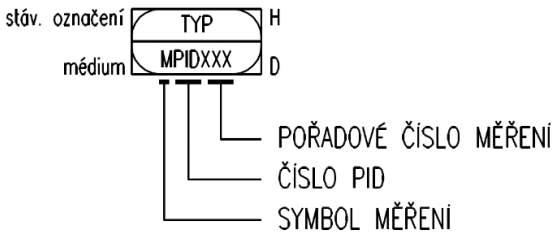

*Obr. 40 Umístění ventilů do potrubní větve v PID*

Na jednotlivé výtlaky z čerpadel byly umístěny zpětné klapky, které plní bezpečnostní funkci. Pokud by náhle čerpalo přestalo fungovat, zpětná klapka zajistí, že voda nebude čerpadlem protékat v opačném směru. Dalšími ventily, které byly na větev umístěny, jsou klasické ruční klapky jednotlivých výtlaků z čerpadel, které zajišťují jejich bezproblémové odstavení například při opravě nebo údržbě.

## 7.3 Měření a regulace

### 7.3.1 Popis MaR

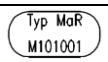
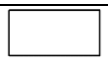
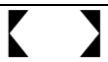
Z popisu měřidel a regulací (obr. 41) můžeme vyčíst nejen, o jaký typ se jedná nebo na jakém PID ho můžeme najít, ale také jakým způsobem můžeme data z těchto přístrojů číst.




*Obr. 41 Značení a zobrazování MaR na PID*

### 7.3.2 Symbolické zobrazení MaR

V tab. 11 jsou obsaženy symboly, které se využívají ke grafickému zobrazení MaR v PID schématu:

| | | | |
|---|---|---|---|
|  | Značka MaR |  | Směr signálu |
|  | Přenos signálu | | Pneupohon pístový |
|  | Místní panel | | Pneupohon membránový |
|  | Řídící systém | | Solenoid |
|  | Skupinové regulace | | Při chybě zavřít |
|  | Připojení | | Při chybě otevřít |
| --------- | Signál | | Při chybě ponechat |

*Tab. 11 Symbolické značení MaR*

### 7.3.3 Typ MaR

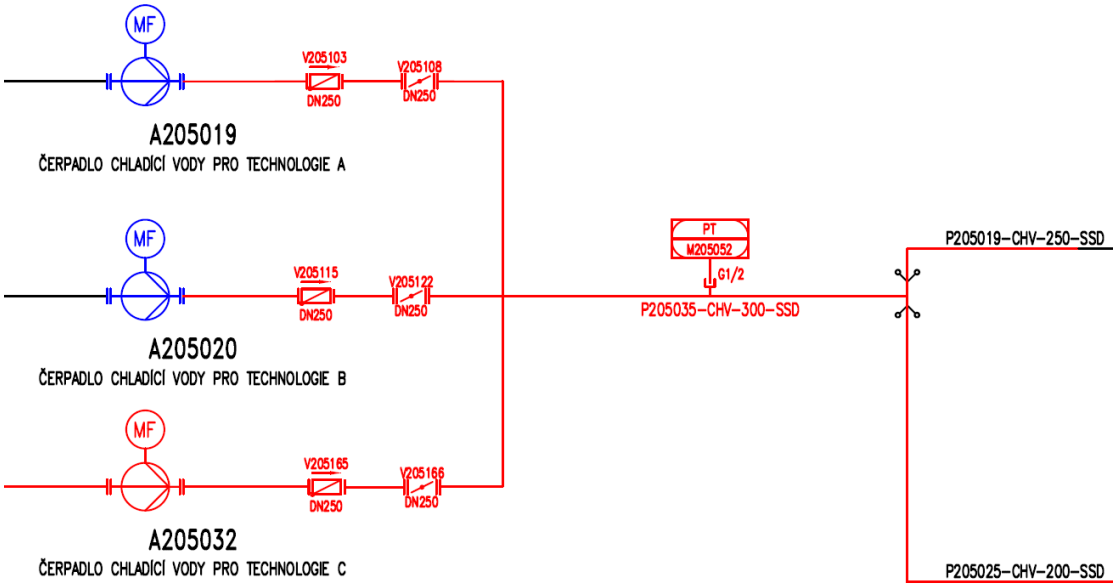
Typ měřidla nebo regulace je pravděpodobně nejdůležitějším ukazatelem zobrazení v PID. Uvádí, s jakou veličinou v dané oblasti pracujeme a jakým způsobem jsme schopni údaje číst či kontrolovat. Typ se označuje několika velkými písmeny, jejichž význam je shrnut v tab. 12.

| První písmeno – veličina | | Následující písmena – doplňkové informace | |
|---|---|---|---|
| A | Analýza | B | Blokace |
| C | Chronometr | C | Regulátor |
| D | Hustota | D | Diferenční |
| E | Elektrické veličiny | F | Poměr |
| F | Průtok | G | Budík, sklo |
| H | Ruční řízení | I | Digitální zobrazení |
| L | Hladina | R | Ruční provedení |
| P | Tlak | S | Sumace |
| S | Rychlost | T | Převodník, vysílání |
| T | Teplota | V | Ventil |
| W | Hmotnost | | |
| X | Poloha | | |

*Tab. 12 Popis typu MaR*

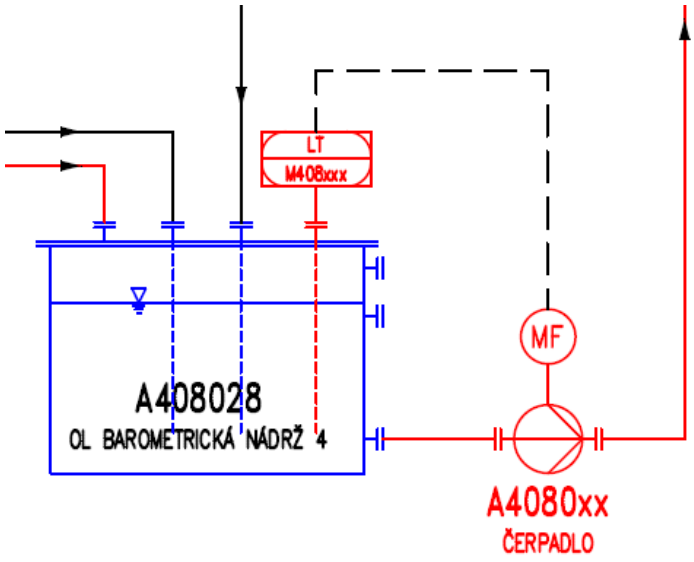
### 7.3.4 Návrh nových měřidel a regulačních smyček

Stejně jako v předchozích případech, proběhne příklad návrhu měřidel na potrubní větvi P205035-CHV-300-SSD. Jak je zvykem, na výtlaku čerpadel se z důvodu kontroly správného fungování čerpadla kontroluje tlak. Daný tlakoměr bude umístěn na společné části výtlaku a bude připojen do řídícího systému, viz obr. 42.

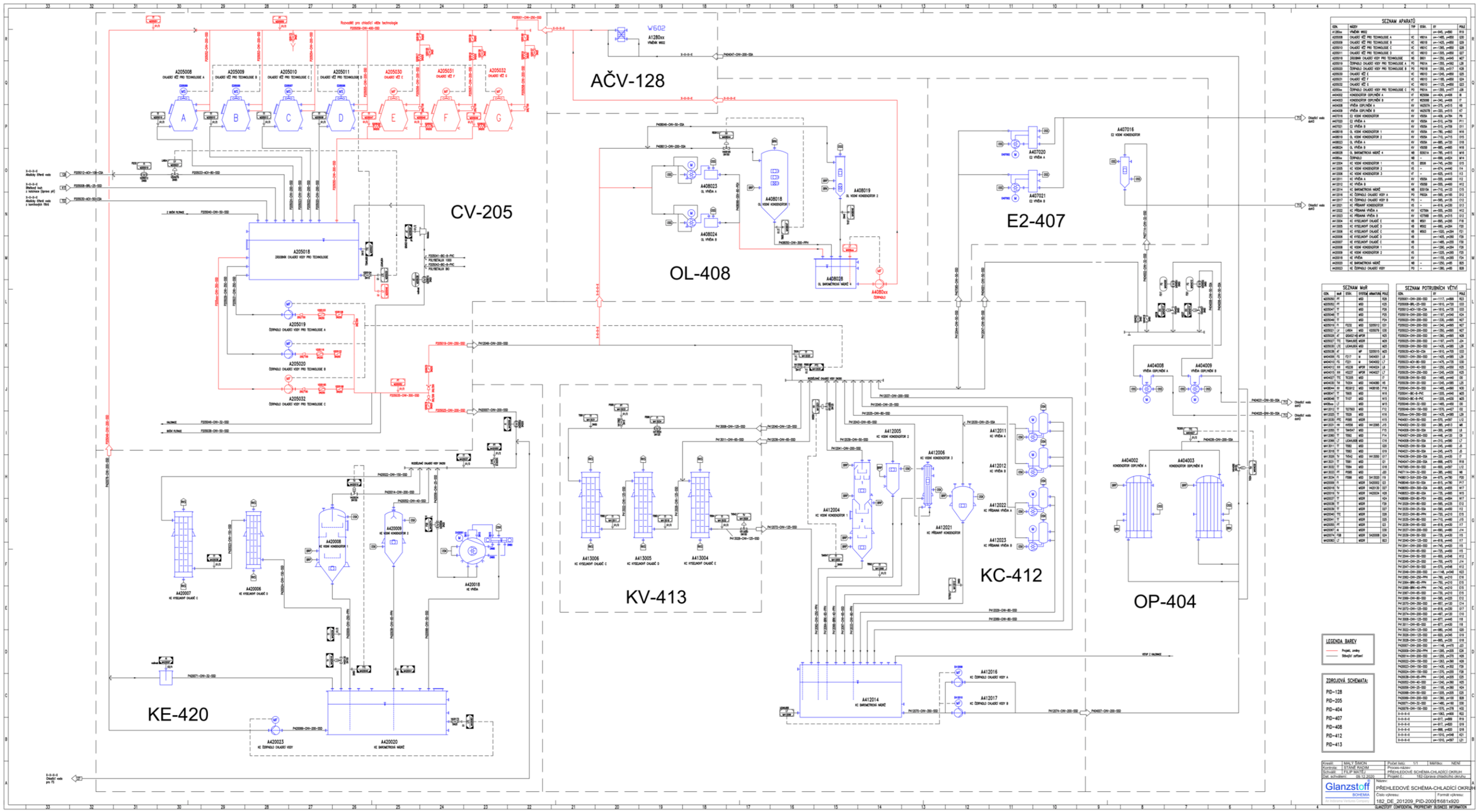



*Obr. 42 Umístění měřidel na potrubní větev v PID*

Návrh regulačních smyček probíhá především z hlediska funkčnosti celého okruhu. Jejich úkolem je v okruhu řídit hlavní parametry a zajistit, aby okruh správně fungoval a nemusela mu tak být zbytečně věnována veliká pozornost. Jednou z klasických regulačních smyček v chladícím okruhu je regulace otáček motoru čerpadla řízená hladinoměrem na přilehlé nádrži. Příklad této regulace lze vidět na obr. 43.




*Obr. 43 Příklad regulační smyčky na PID*




*Obr. 44 PID schéma*

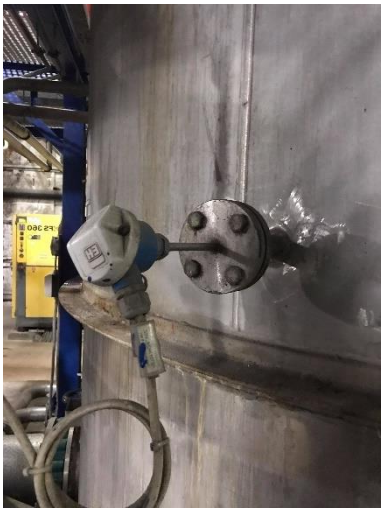
# 8 Měření

Je zřejmé, že v tomto procesu je zapotřebí kontrolovat, zda chladící okruh funguje správně. Hlídají se především teploty na strategických místech, tlaky v rozvaděčích, hladiny v nádržích a průtoky na kritických aparátech. Najdeme zde však i měření pH a měření vodivosti, která nejsou až tak běžná jako ostatní. V této části je popsán základní princip měřících přístrojů, jejich příklady využití ve stávajícím stavu a také specifikace nových měřidel.

## 8.1 Teplota

Teplota je základní veličinou měřenou v okruhu. Je důležité zajistit dostatečně nízkou teplotu vody v kondenzátorech a výměnících, aby celý proces správně fungoval. V celém procesu chlazení se teploměry, spolu s ostatními měřidly, dělí na místní (obr. 45) a připojené do řídícího systému (obr. 46). Kvůli kompatibilitě celého systému se ve všech teploměrech využívá senzor Pt100, který je v nerezové jímce. Veškeré teploměry jsou připevněny buď pomocí závitu nebo přírubového spoje.

*Obr. 45 Místní teploměr*



*Obr. 46 Teploměr připojený do řídícího systému*

### 8.1.1 Teplota ve sběrných nádržích

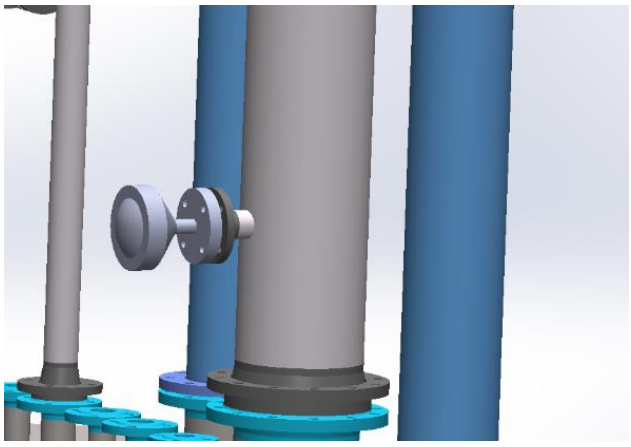
Teplota ve sběrných nádržích (obr. 47) je měřena kvůli kontrole celkového stavu okruhu. Udává, jakou teplotu má voda po ochlazení na věžích a následně jakou teplotu má po průchodu celé linky. I z těchto údajů se dá včas predikovat problém, který může být způsoben poruchou na aparátech či potrubí. Teplota ve sběrné nádrži chladících věží navíc řídí otáčky ventilátorů každé z věží.

| | |
|---|---|
| Název: | TST410-Modular RTD thermometer |
| Typ: | Pt100 |
| Jímka: | Nerez 1.4541 |
| Ponor: | 400 mm |
| Signál: | 4–20 mA |
| Třída př.: | A |
| Krytí: | IP 66 (EndressHauser.com) |

*Obr. 47 Měření teploty v nádrži*

### 8.1.2 Teplota na výstupu ze směsných kondenzátorů

Teplota na výstupu z kondenzátorů (obr. 48) udává, zda je v aparátu dostatečný podtlak a tím pádem, zda správně odsává brýdové páry. Aby byla tato hodnota zajištěna, automatická klapka na nátoku do kondenzátorů je řízena právě těmito teploměry, u nichž je zapotřebí vyššího krytí, neboť voda může být kyselá.



| | |
|---|---|
| Název: | SenzoTEMPT-240-DN50-PN16- Pt-B-3-VHS |
| Typ: | Pt100 |
| Jímka: | Nerez 1.4541 |
| Ponor: | 240 mm |
| Signál: | 4 - 20mA HART |
| Třída př.: | A |
| Krytí: | IP 66/68 (SenzoryCZ.eu) |

*Obr. 48 Teploměr na výstupu z kondenzátoru*

### 8.1.3 Specifikace nových teploměrů

Všechny nové teploměry jsou z důvodu kompatibility stejné. Konkrétně se jedná o měřidla M205047, M205048, M205049 a M205051. V tab. 13 jsou přehledné specifikace těchto měřidel.

| Číslo měření | M205047 | M205048 | M205049 | M205051 |
|---|---|---|---|---|
| Typ | TT | TT | TT | TT |
| Výrobce | Senzory.cz | Senzory.cz | Senzory.cz | Senzory.cz |
| Objednací kód | SenzoTEMP GN-100-G1/2-11-Pt-B-3-VHS /SenzoTRANS 24G | SenzoTEMP GN-100-G1/2-11-Pt-B-3-VHS /SenzoTRANS 24G | SenzoTEMP GN-100-G1/2-11-Pt-B-3-VHS /SenzoTRANS 24G | SenzoTEMP GN-100-G1/2-11-Pt-B-3-VHS /SenzoTRANS 24G |
| Rozsah | 0-100 °C | 0-100 °C | 0-100 °C | 0-100 °C |
| Připojení | G1/2 | G1/2 | G1/2 | G1/2 |
| Název měření | Teploměr na výstupu z chladící věže E | Teploměr na výstupu z chladící věže F | Teploměr na výstupu z chladící věže G | Teploměr nátoku chladící vody z *Krystalizace E* na věže |
| Umístění | P205050 | P205050 | P205050 | P205049 |

*Tab. 13-Specifikace nových teploměrů*

## 8.2 Tlak

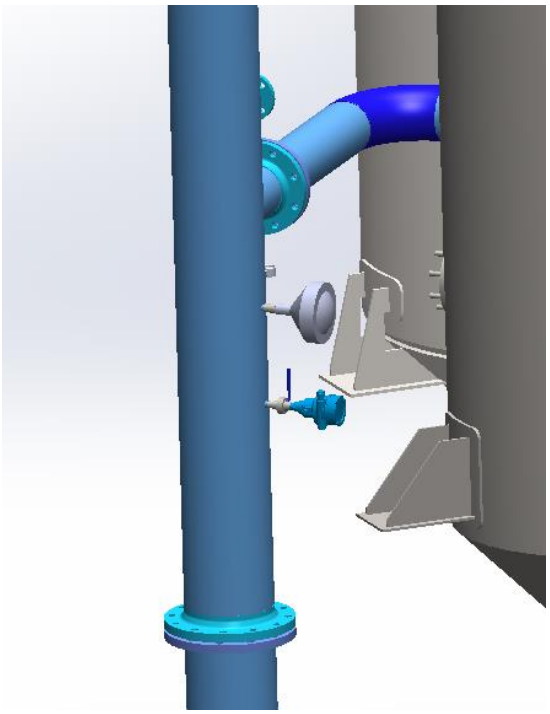
Další důležitou veličinou je tlak. Samotné měření je zajištěno membránovým tlakoměrem, který pracuje na principu kovové membrány, jež je chycena mezi dvě příruby. Při změně tlaku se membrána deformuje a signál se přenáší na ukazatel. Podobně jako u teploměrů rozlišujeme tlakoměry místní (obr. 49) a připojené do řídícího systému (obr. 50). (SenzoryCZ.eu)

*Obr. 49 Místní tlakoměr*

*Obr. 50 Tlakoměr s možností zapojení do řídícího systému (zdroj: https://cs.sgmls.com/industrial-smart-pressure-transmitter-316l-flange-diaphragm.html)*

### 8.2.1 Tlak v rozvaděčích

Měření tlaku se využívá především na rozvaděčích chladící vody, aby byl zajištěn dostatečný nátok na jednotlivé aparáty. Jelikož bývá rozvaděč umístěn níže než aparáty (obr. 51), musí být tlak dostatečně vysoký, aby byla kapalina vytlačena do požadované polohy.



*Obr. 51 Umístění tlakoměru na rozvaděči*

| | |
|---|---|
| Název: | SenzoHART/ALW/0-7bar/0-4bar/GP/Hastelloy |
| Typ: | Převodník tlaku s oddělovací membránou |
| Tělo: | Al |
| Membrána: | 240 mm |
| Signál: | 4 - 20mA HART |
| Napájení: | 24 V DC |
| Přesnost: | 0,2% |
| Krytí: | IP 66 (SenzoryCZ.eu) |

### 8.2.2 Specifikace nových tlakoměrů

Nové tlakoměry jsou oproti teploměrům rozdílné. Jedná se o měřidla M205050 a M205052, jejichž specifikace jsou uvedeny v tab. 14.

| Číslo měření | M205050 | M205052 |
|---|---|---|
| Typ | PI | PI |
| Výrobce | Senzory.cz | Senzory.cz |
| Objednací kód | SenzoMitter/0…100kPa/PD/G1/2 | SenzoMitter/0…600kPa/PD/G1/2 |
| Rozsah | 0-1 bar | 0-6 bar |
| Připojení | G1/2 | G1/2 |
| Název měření | Tlakoměr na rozvaděči chladící vody pro chladící věže pro technologie | Tlakoměr na výtlaku čerpadel chladící vody pro technologie |
| Umístění | P205059 | P205035 |

*Tab. 14 Specifikace nových tlakoměrů*

## 8.3 Průtok

Měření průtoku funguje jako okamžitá kontrola, zda do zařízení skutečně proudí požadované množství vody, a je realizováno na kritických aparátech. V rámci tohoto projektu nebylo potřeba specifikovat nový průtokoměr, a proto jsou zde zobrazeny pouze příklady využití ve stávajícím okruhu. K měření průtoku se využívají dva různé principy: rotametr a elektromagnetický indukční průtokoměr.

Rotametr (obr. 52) funguje na jednoduchém principu vznášení tělíska v kuželovité části tohoto přístroje. Pokud se průtok zvýší, plováček se vznese výš a ukáže změnu průtoku. (Kadlec, 2015)

*Obr. 52 Ukázka rotametru (zdroj: http://www.energonova.cz/katalog/mer_mn_tepl/ROTAMETR.htm)*

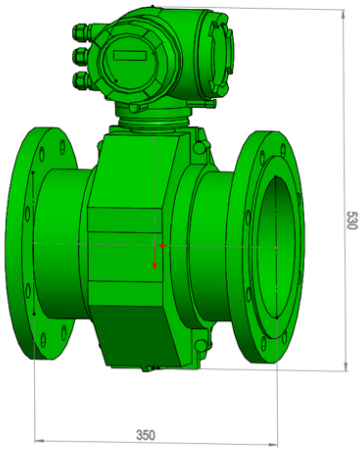
Indukční průtokoměr (obr. 53) oproti tomu pracuje na složitějším principu. Základem je Faradayův zákon, podle kterého je napětí generováno jako důsledek časové změny magnetického toku při pohybu vodiče v magnetickém poli. Vodič je v tomto případě nahrazen vodivou kapalinou. (Kadlec, 2015)

*Obr. 53 Ukázka indukčního průtokoměru (zdroj: https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Proline-Promag-E-100-5E1B?g.filters=%5B%5D)*

### 8.3.1 Průtok na jednotlivé technologie

Měření průtoku na jednotlivé technologie je spíše orientační. Pokud uděláme bilanci jednotlivých zařízení, vyjde potřebný průtok. Nicméně není od věci tuto hodnotu porovnávat se skutečností, k čemuž slouží právě indukční průtokoměr, viz obr. 54.

| | | |
|---|---|---|
| Typ: | Indukční | (indukční, magneticko-indukční, elektromagnetický, magnetický) |
| Příruba: | Uhlíková ocel, EN1092-1, PN10 | |
| Výstelka: | PTFE | |
| Elektroda: | Hastelloy C-22 | |
| Signál: | 4-20 mA HART | |
| Napájení: | 100-230VAC/24VDC | |
| Průchodka | M20 | |
| Hlavice: | Lakovaný hliník | |
| Displej: | 4 řádky, podsvícený | |
| Ovládání: | Dotykové | |
| Prostředí: | Bez nebezpečí výbuchu | |
| Krytí: | IP66/67 | |
| Přesnost: | 0,5% | |




| | | |
|---|---|---|
| Řešení: | Výrobce | E+H |
| | Název | Promag P 300, 5P3B2H, DN200 8" |
| | Kód | 5P3B2H-AAIBAEAFAAED2K1AA1+AREBZ1 |

*Obr. 54 Indukční průtokoměr se specifikací*

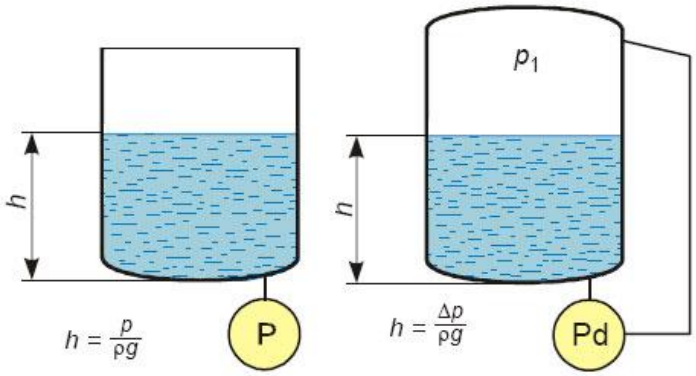
### 8.3.2 Průtok na vývěvy

Průtok na vývěvy je měřen obyčejným rotametrem a jedná se spíše o informační hodnotu. Některé vývěvy plní odkalovací funkci a měření průtoku tak udává přehled o množství kanalizované vody, viz obr. 55.

*Obr. 55 Měření průtoku na vývěvy*

## 8.4 Měření hladiny

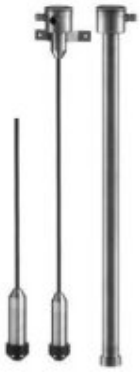
Měřit hladinu se dá hned několika způsoby. Můžeme využít jednoduchá mechanická měřidla nebo složitější elektrická či ultrazvuková. Pro měření hladiny v otevřených nádržích je pravděpodobně nejlepší volbou hydrostatický hladinoměr, který pracuje na principu měření hydrostatického tlaku a následném výpočtu výšky hladiny (obr. 56, 57). Spolehlivě funguje v různých podmínkách a je jisté, že výsledky nejsou ovlivněny například bublinami na hladině. (Kadlec, 2015)




*Obr. 56-Přepočet hydrostatického tlaku na výšku hladiny (zdroj: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/teorie-hladina/hydrostaticke-hladinomery/prime-mereni-hydrostatickeho-tlaku.html)*

### 8.4.1 Hladina ve sběrných nádržích

Výška hladiny v nádrži je důležitý údaj především pro čerpadla, která z nádrže čerpají vodu. Pokud by se stalo, že se zastaví dodávka vody do nádrží, může v čerpadlech dojít ke kavitaci vody. Tomuto nežádoucímu jevu se dá předejít tím, že jsou čerpadla řízena na výšku hladiny. Pokud tedy hladina v nádrži poklesne, čerpadlo sníží výkon.



*Obr. 57 Hydrostatický snímač (zdroj: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimce_hladiny/ponorne_sondy/hydrostaticky-snimac-hladiny-klay-hydrobar.html)*

| | |
|---|---|
| Název: | Klay Hydrobar |
| Typ: | I |
| Tělo: | Nerez 1.4401 (JSP.cz) |

### 8.4.2 Specifikace nového hladinoměru

Nový hladinoměr M205046 slouží jako rezervní měřidlo pro kontrolu hladiny v nádrži pro technologie a jeho specifikace je obsažena v tab. 15.

| | |
|---|---|
| Číslo měření | M205046 |
| Typ | LT |
| Výrobce | Senzory.cz |
| Objednací kód | SenzoMitter/0...35kPa/PD/CG1 |
| Rozsah | 0–135 % |
| Připojení | G1 |
| Název měření | Rezervní hladinoměr v zásobníku chladící vody pro technologie |
| Umístění | A205018 |

*Tab. 15 Specifikace nového hladinoměru*

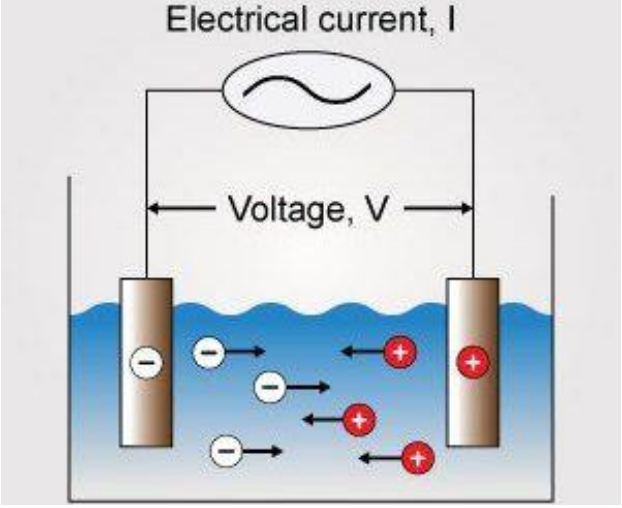
## 8.5 Měření pH

Jedna z možností, jak kontrolovat kvalitu vody, je měření pH. Tento ukazatel nám říká, zda je voda spíše zásaditá nebo kyselá. Hodnotu pH vody měříme, neboť ve směsných kondenzátorech přichází do kontaktu s parami, které jsou kyselé, a je tedy jasné, že se hodnota pH po průchodu tímto kondenzátorem změní. Měření probíhá ve speciální nádržce pomocí indikační elektrody, viz obr. 58. (Formánek)

*Obr. 58-Nádržka na měření vodivosti*

## 8.6 Měření vodivosti

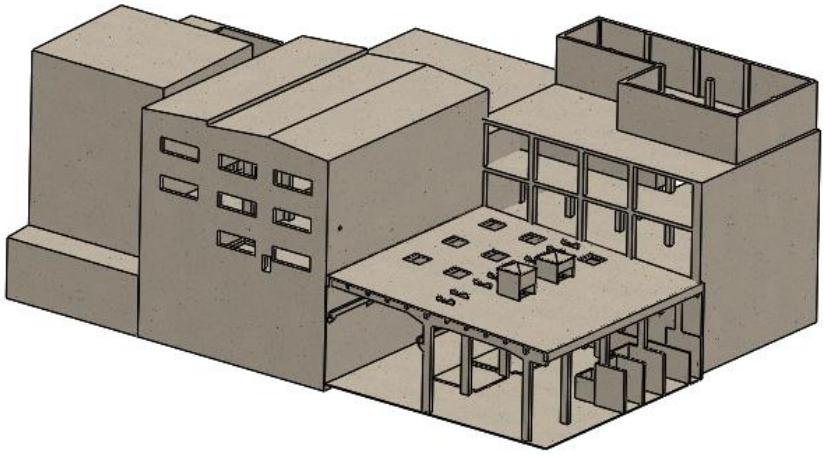
Dalším měřením kvality vody je vodivost, která udává informaci o množství iontů rozpuštěných v roztoku. Tento údaj je důležité sledovat kvůli možnému poškození výměníků nebo jiných aparátů, kde by voda neměla přijít do kontaktu s druhým médiem. Pokud se tedy výrazně změní vodivost, lze s jistotou říci, že je poškozen některý z aparátů. Stanovení měrné vodivosti roztoků se provádí změřením jejího odporu v nádobce, kde jsou umístěny dvě elektrody potopené v měřené kapalině, viz obr. 59. (Formánek)




*Obr. 59-Schéma měření vodivosti (zdroj: https://megadepot.com/resource/a-guide-to-conductivity-measuring)*

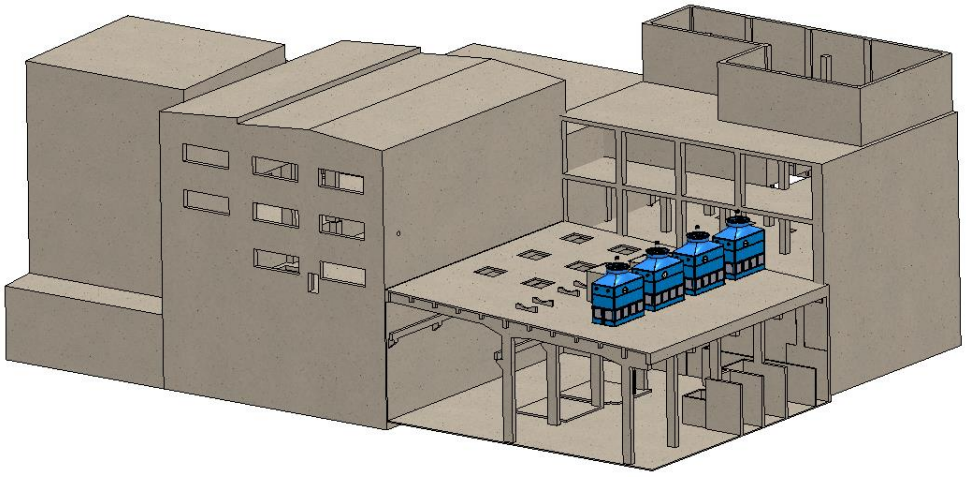
# 9 Tvorba 3D modelu

Jedním z dalších výstupů práce má být 3D model celého okruhu, k němuž byla využita firemní licence Glanzstoff Bohemia na SolidWorks 2018. Základem jsou modely budov (obr. 60), jichž se týká návrh nového okruhu. K vytvoření 3D modelu budov poslouží situační výkresy, které zpracovala firma Chemkomex v roce 2003. Jelikož jsou výkresy takto staré, je určitě namístě některé rozměry zkontrolovat. Především pak rozmístění sloupů a nosníků, které nejdou odstranit, aniž by nebyla narušena statika budovy.



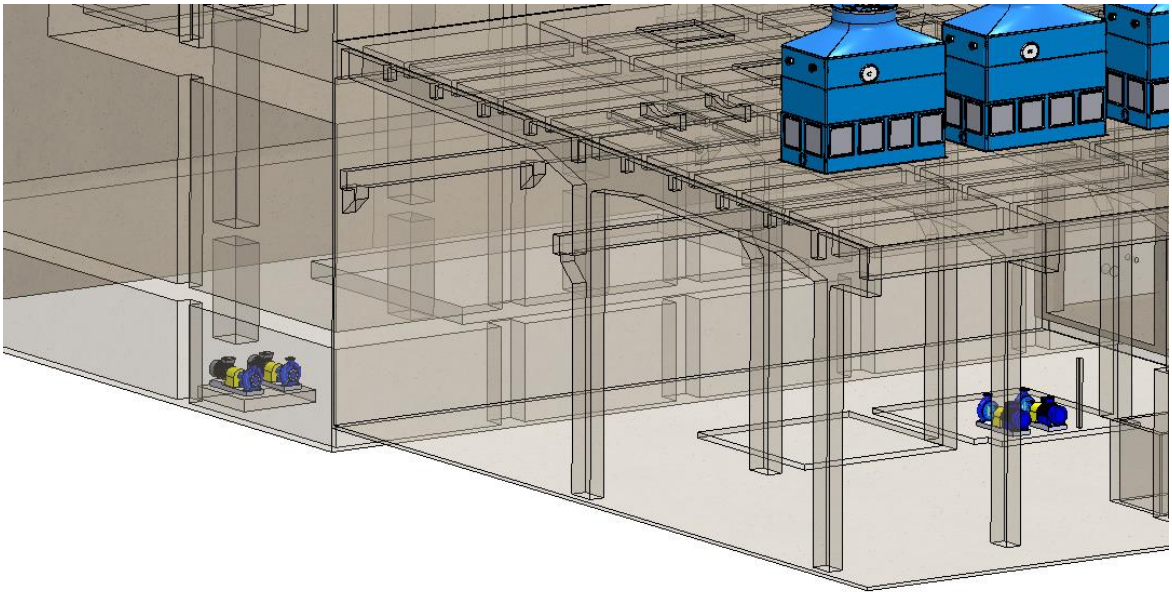
*Obr. 60 Modely budov*

Dalším krokem jsou 3D modely stávajících aparátů, včetně chladících věží, čerpadel a ostatních zařízení. Model chladící věže poskytla firma Sultrade v rámci objednávky nových věží. Stávající věže jsou v modelu rozmístěny podle skutečných rozměrů, viz obr. 61.



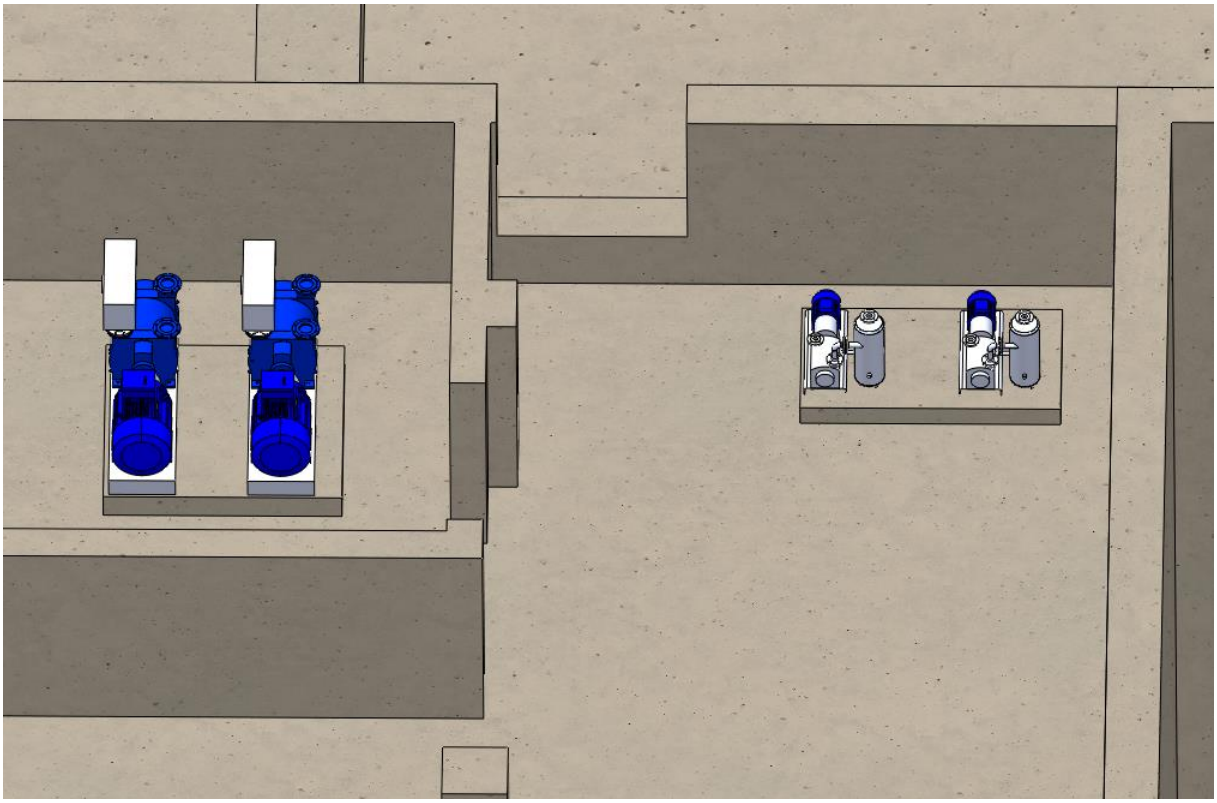
*Obr. 61 Rozmístění stávajících věží na střeše strojovny*

Modely čerpadel byly stejným způsobem vytvořeny na základě výkresové dokumentace od firmy ISH Pumps. Důležitými rozměry jsou připojovací příruby a ocelová konstrukce, na níž je čerpadlo umístěno,, viz obr. 62.

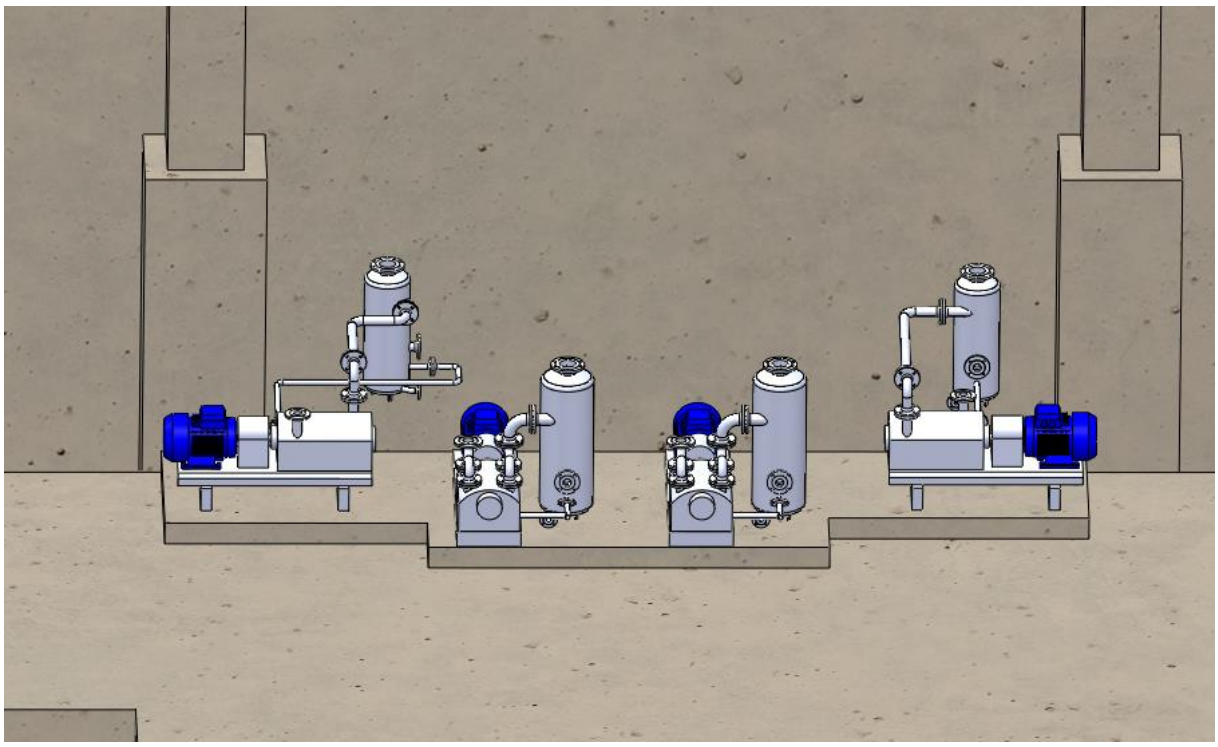


*Obr. 62 Umístění modelů čerpadel*

Modely vývěv byly stejně jako modely čerpadel zhotoveny na základě výkresové dokumentace a jejich umístění opět koreluje se skutečností,, viz obr. 63, 64.

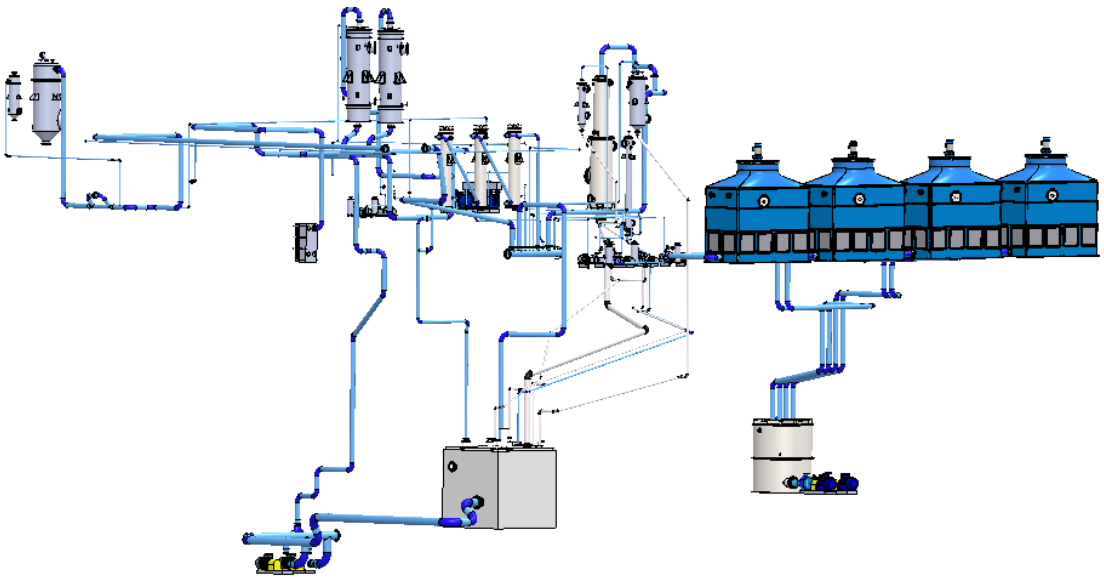


*Obr. 63 Umístění vývěv Odplynění a Dvanáctistupňové odparky Lurgi*



*Obr. 64 Umístění vývěv Krystalizace C*

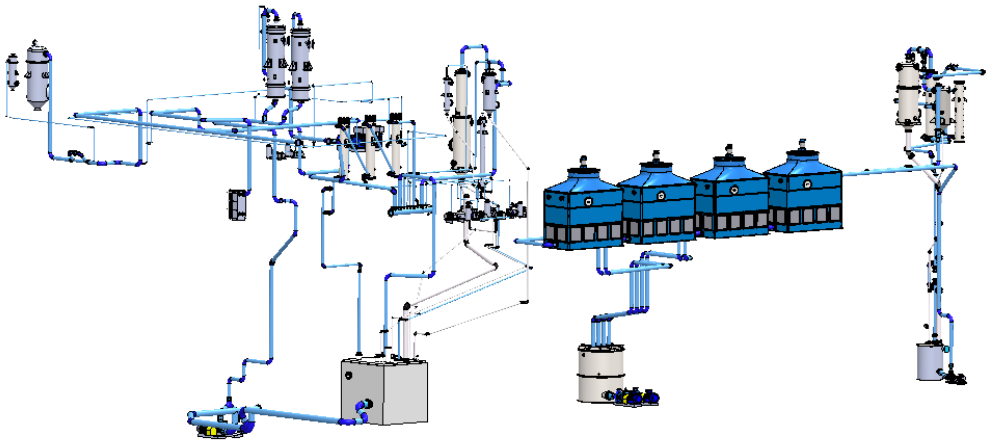
Modely aparátů a potrubních tras stávajících technologií byly vytvořeny na základě výkresů a osobní prohlídky v provozu,, viz obr. 65.



*Obr. 65 Model doplněný o aparáty a stávající izometrie*

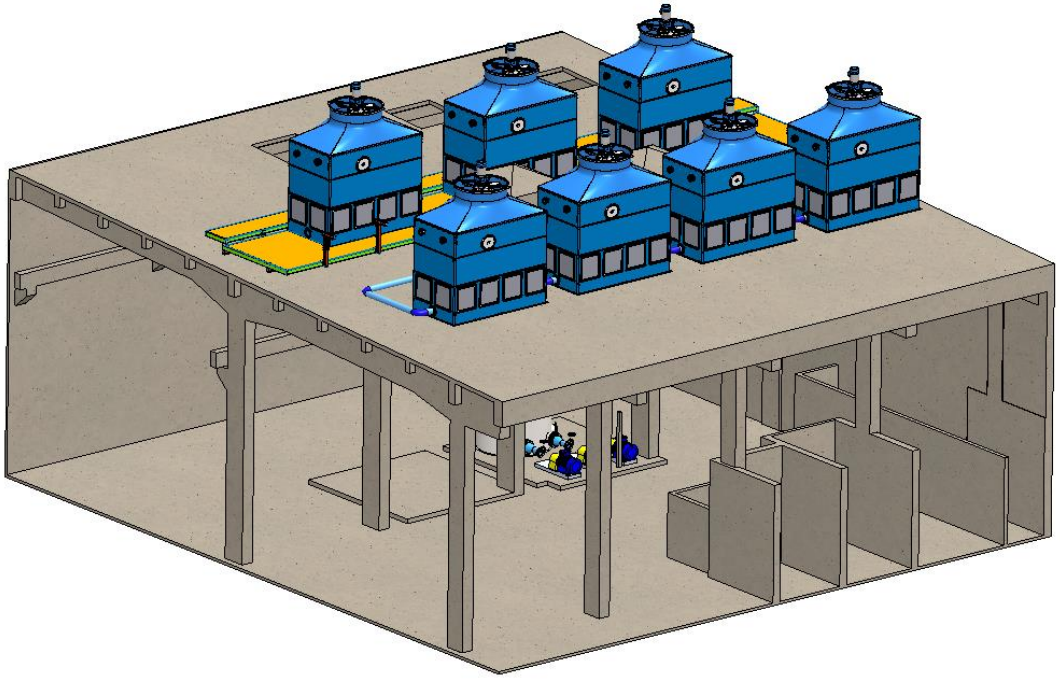
Tímto krokem je hotový model stávajícího stavu, do kterého budou postupně doplňovány nové aparáty a potrubní izometrie.

Jako první lze doplnit aparáty a potrubní trasy *Krystalizace E*, které byly vytvořeny již při projekci technologie. Část této technologie, jež využívá chladící vodu, je tedy do modelu importována jako celek,, viz obr. 66.



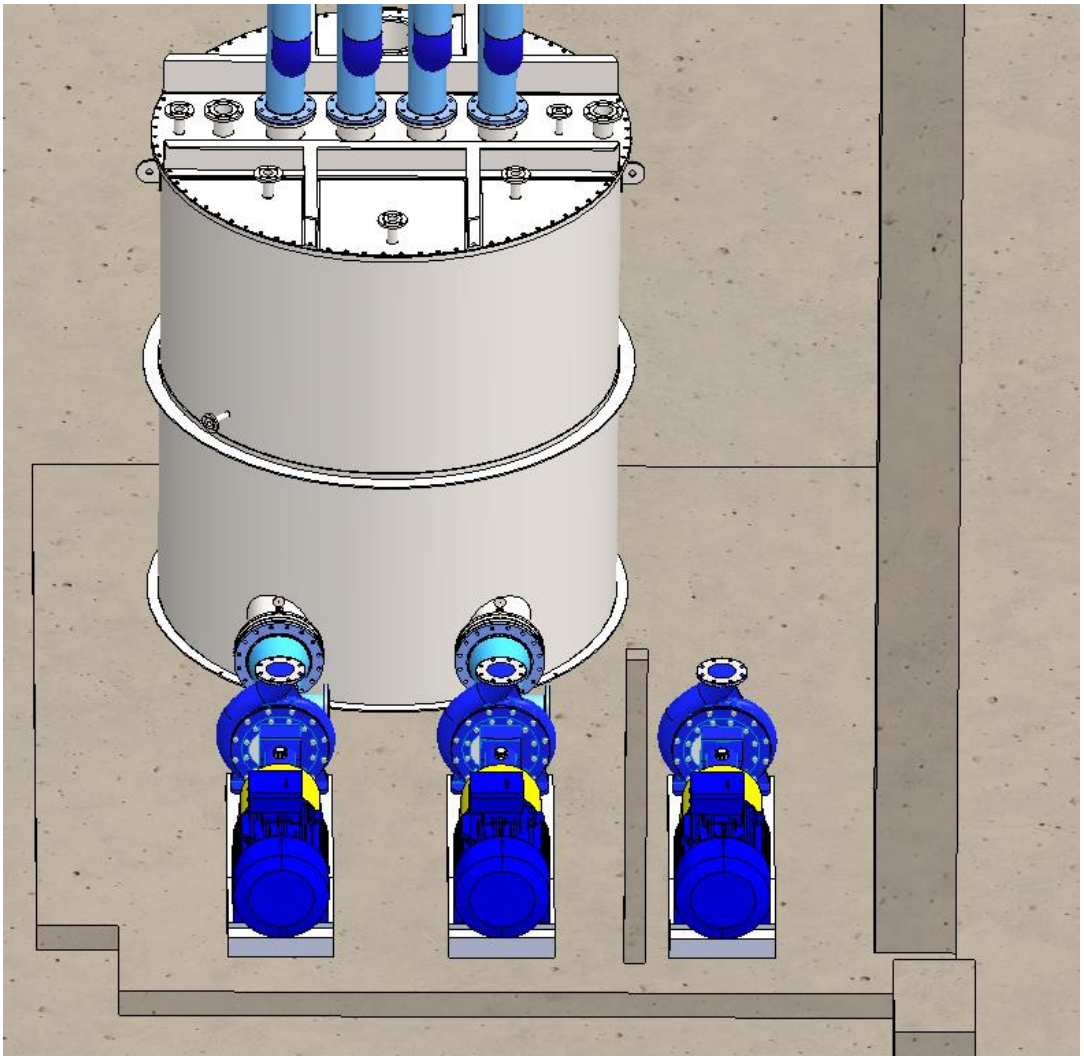
*Obr. 66 Doplnění části Krystalizace E do modelu*

Dalšími aparáty, které mohou být do modelu umístěny, jsou nové chladící věže. Při jejich umístění je třeba vzít v potaz polohu stávajících věží, aby byl nový společný nátok realizovatelný,, viz obr. 67.



*Obr. 67 Rozmístění nových chladících věží*

Posledním aparátem, pro který je potřeba navrhnout umístění, je nové čerpadlo A205032 (obr. 68). Aby bylo možné zkonstruovat společný výtlak všech tří čerpadel, musí být při umístění čerpadla bráno v potaz umístění předchozích dvou.



*Obr. 68 Umístění nového čerpadla*

Tímto krokem je model připraven na navržení nových potrubních izometrií.

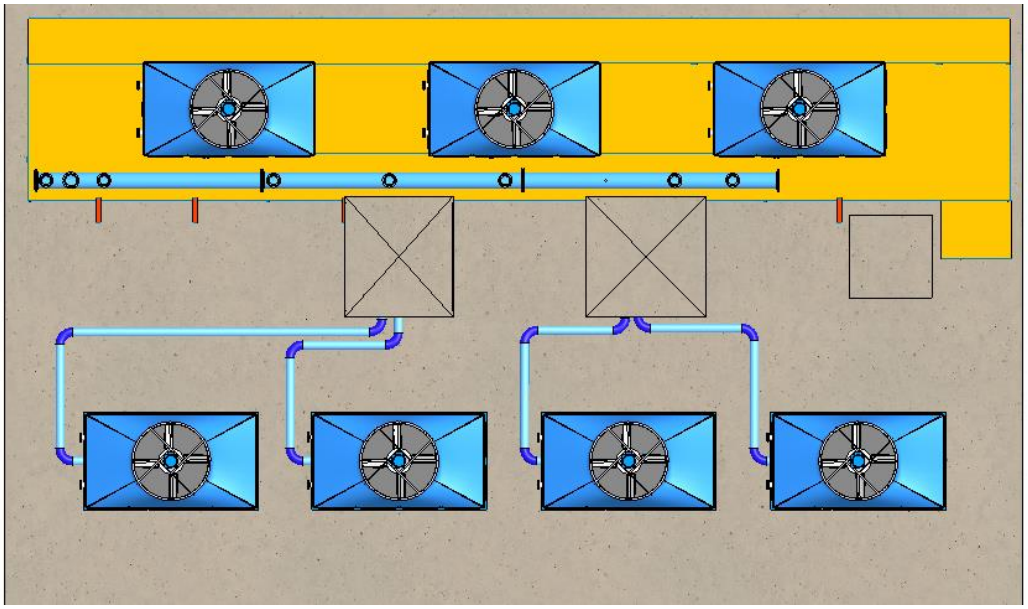
## 9.1 Návrh nových izometrií

Při návrhu izometrií je nutné brát v potaz možnosti prostoru, ve kterém se bude potrubí vyskytovat. Každá potrubní větev je vytvořena i včetně všech měřidel, ventilů a případně speciálů, které byly navrženy v rámci vytvoření PID schématu.

### 9.1.1 P205059-CHV-400-SSD

Rozvaděč chladící vody na střeše strojovny má za úkol rovnoměrně distribuovat vodu na chladící věže. Logickým krokem tedy je umístit jej mezi staré a nové věže. Pro každou věž je na rozvaděči připravena příruba pro napojení nátoku. Zatímco je přítok do rozvaděče z deskového výměníku

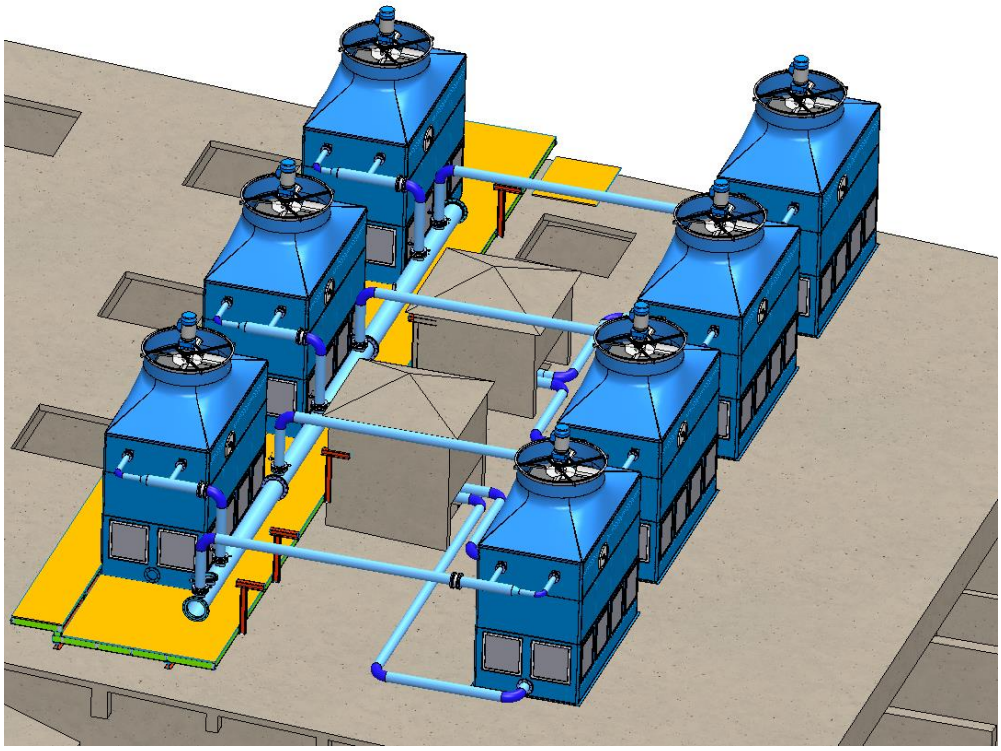
*W602* napojen ve stejné rovině jako všechny výtoky na věže, z *Krystalizace E* je napojen přímo v ose. Podle PID schématu víme, že na rozvaděči bude tlakoměr, který je důležité vhodně umístit,, viz obr. 69.



*Obr. 69 Umístění rozvaděče na střeše strojovny*

### 9.1.2 P205052-58-CHV-200-SSD

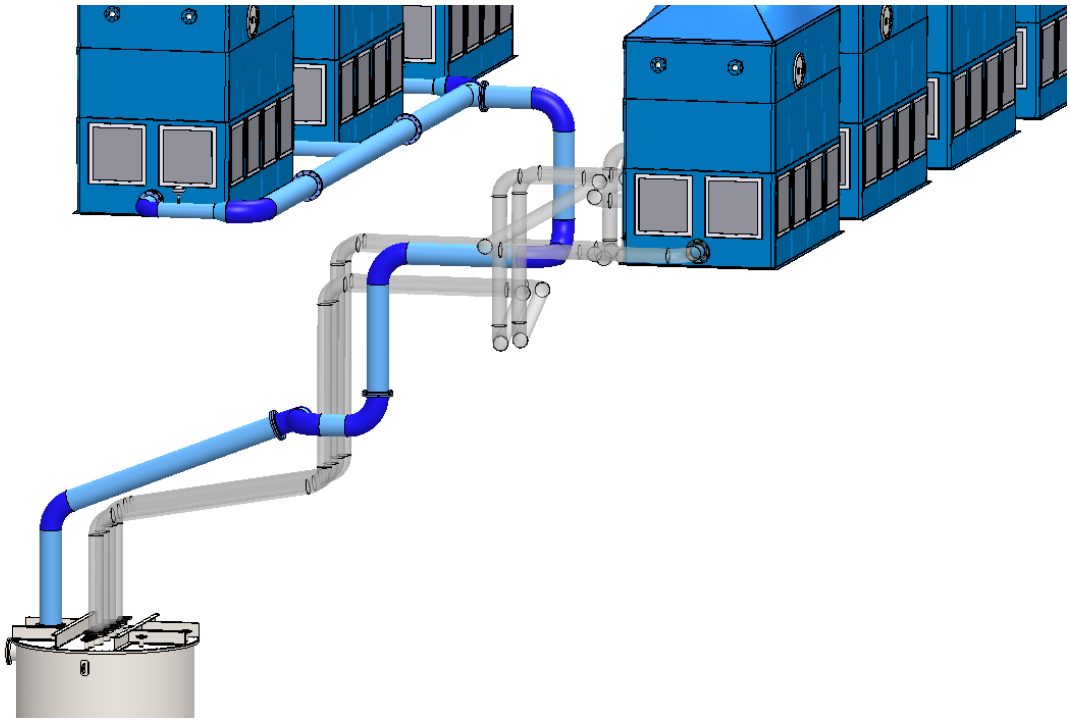
Jelikož byl rozvaděč vhodně umístěn, nátoky na jednotlivé věže jsou si velmi podobné. Z PID schématu víme, jaké komponenty tyto izometrie obsahují, a stačí je tak v modelu pouze vhodně umístit,, viz obr. 70.



*Obr. 70 Nové nátoky na chladící věže*

### 9.1.3 P205050-CHV-300-SSD

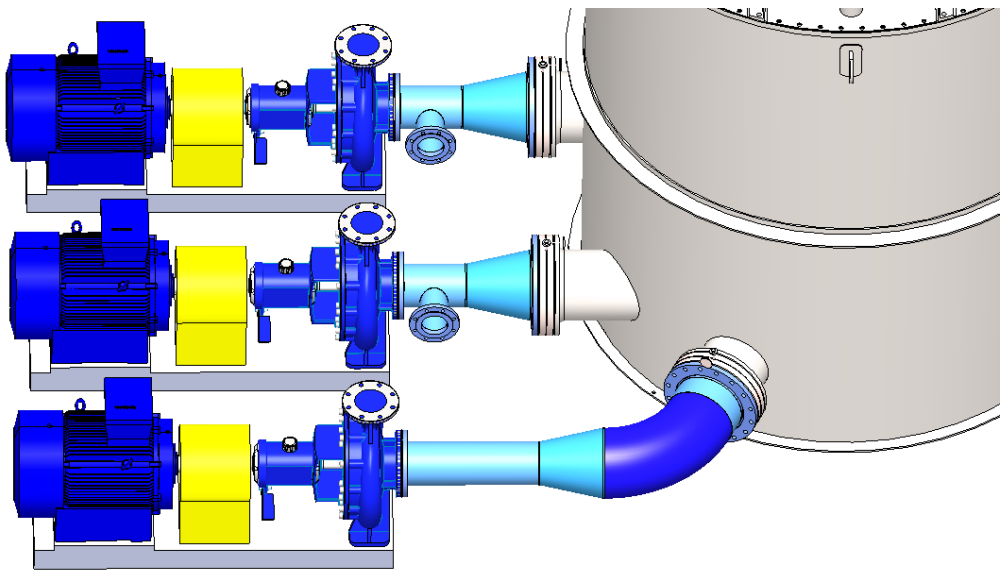
Na rozdíl od starých věží mají nové společný výtok ochlazené vody. Pro tuto izometrii v současném stavu není vytvořeno připojovací místo na sběrné nádrži, a je tedy potřeba připojení vytvořit. Současně je nutné dbát na možnosti prostoru, v němž by se měla izometrie nacházet,, viz obr. 71.



*Obr. 71 Společný výtok nových věží*

### 9.1.4 P205051-CHV-350-SSD

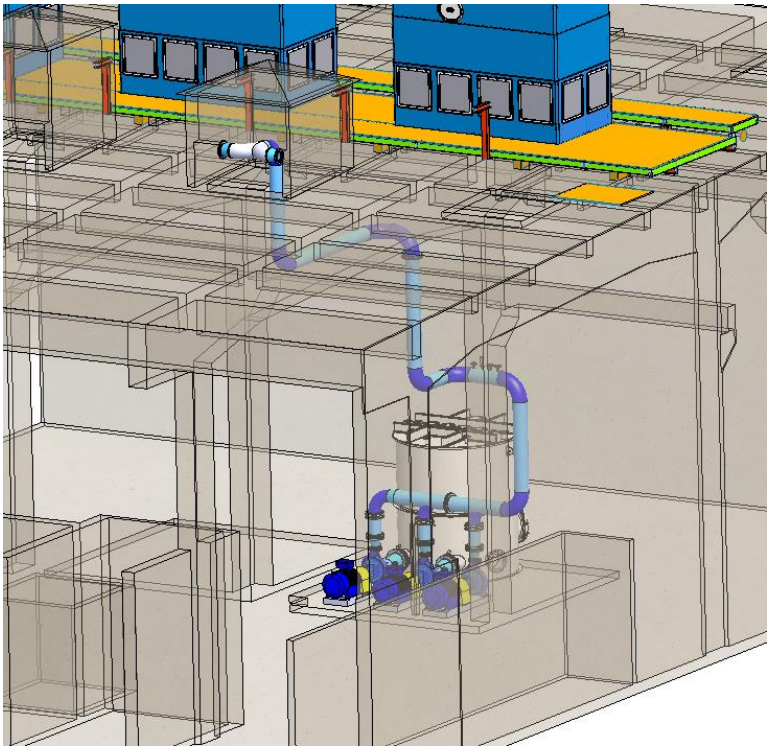
Tato potrubní větev propojuje sběrnou nádrž s novým čerpadlem a stejně jako u předchozí izometrie není na sběrné nádrži připravena připojovací příruba,, viz obr. 72.



*Obr. 72 Nové sání čerpadla*

### 9.1.5 P205035-CHV-300-SSD

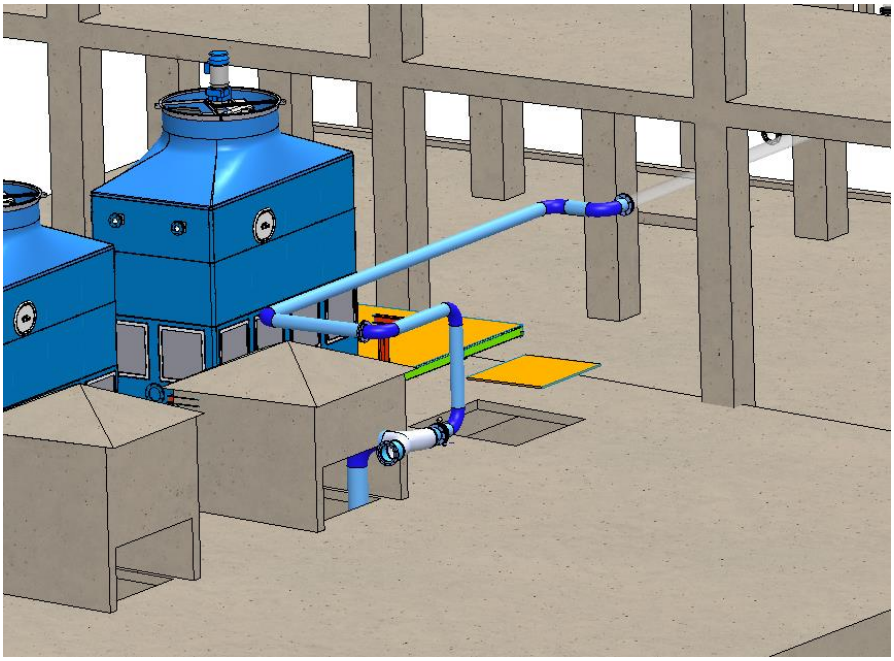
Společný výtlak všech tří čerpadel vede chladící vodu zpět na střechu strojovny, kde se dělí potrubní větev a část průtoku jde na *Krystalizaci E*, zatímco zbytek jde na ostatní technologie,, viz obr. 73.



*Obr. 73 Nový společný výtlak čerpadel*

### 9.1.6 P205025-CHV-200-SSD

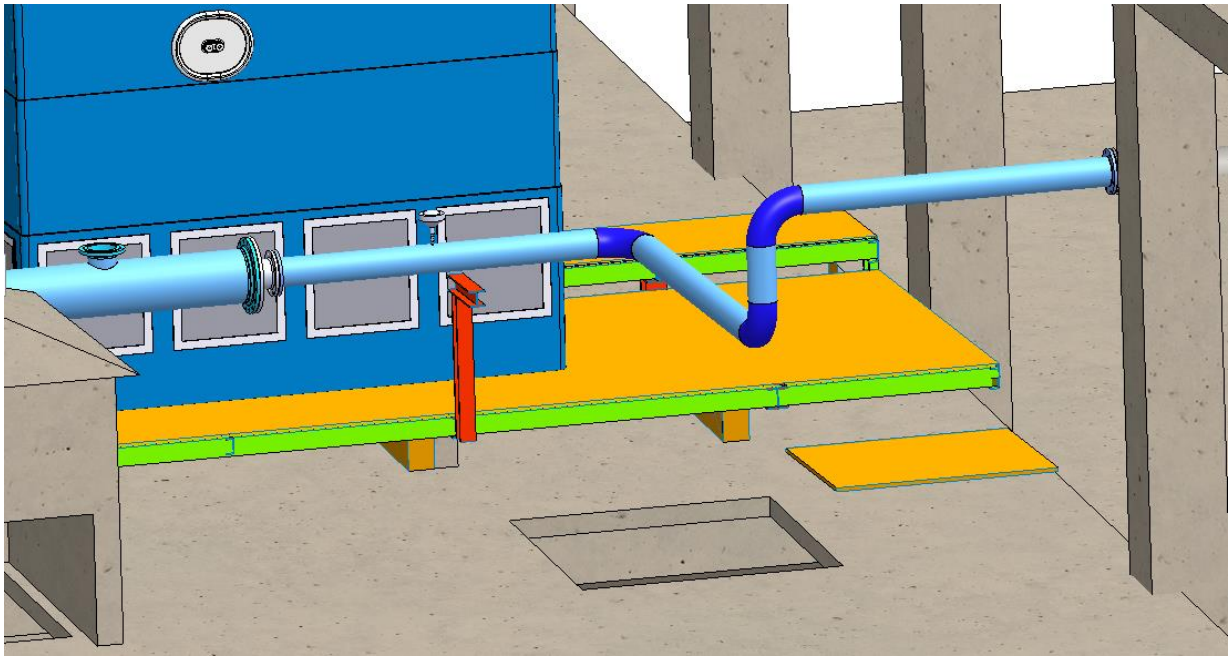
Tato izometrie propojuje výtlak čerpadel s potrubím, které zajišťuje dodávku chladící vody do rozvaděče *Krystalizace* E,, viz obr. 74.



*Obr. 74 Propojený nového výtlaku a Krystalizace E*

### 9.1.7 P205049-CHV-200-SSD

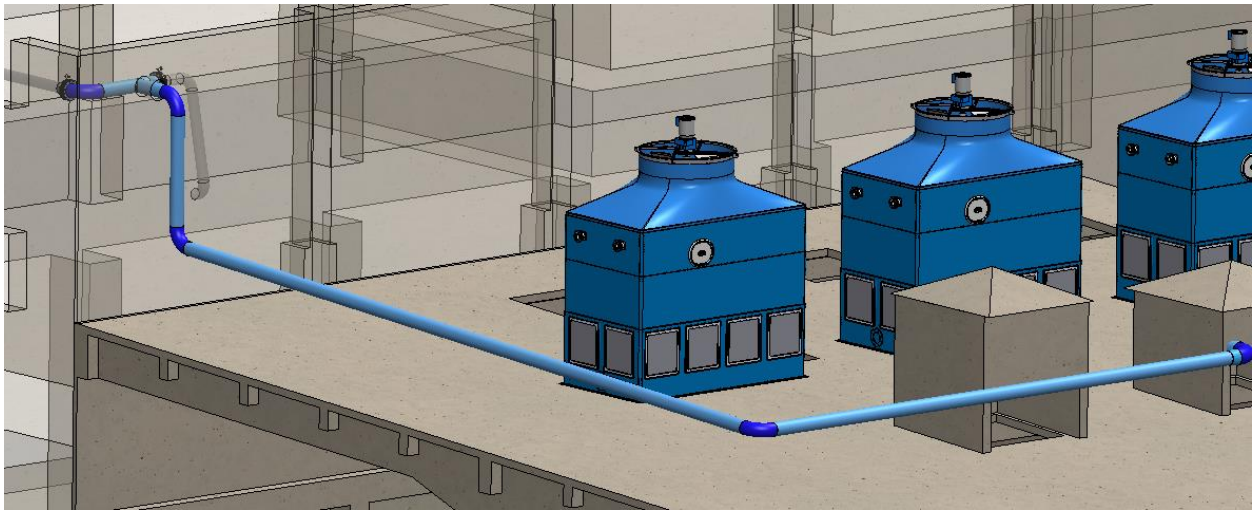
Tato potrubní větev má za úkol propojit výtlak čerpadla *Krystalizace E* s rozvaděčem chladící vody na věže. Z důvodu nestandartního propojení s rozvaděčem byl navržen speciální díl, který zajistí bezproblémový chod,, viz obr. 75.



*Obr. 75 Propojení Krystalizace E a nového rozvaděče*

### 9.1.8 P205019-CHV-250-SSD

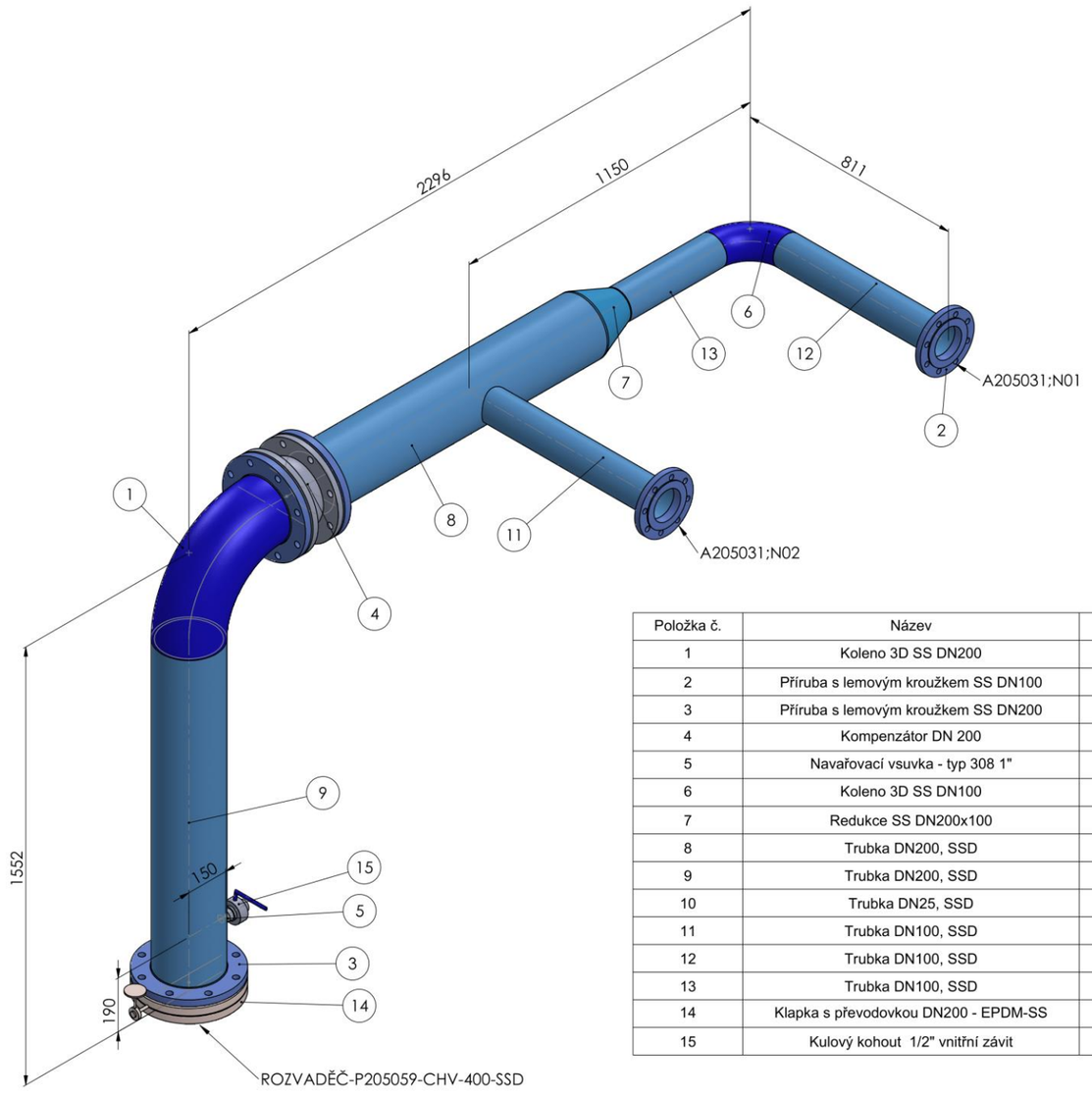
Potrubní větev P205019-CHV-250-SSD zajišťuje přívod chladící vody do rozvaděče u *Krystalizace C* a zároveň do *Dvanáctistupňové odparky* Lurgi,, viz obr.76.



*Obr. 76 Propojení nového výtlaku s Dvanáctistupňovou odparkou Lurgi a Krystalizací C*

### 9.1.9 Výkresy potrubí

Každá z takto vytvořených potrubních izometrií má vlastní výkres, na kterém je zobrazen izometrický pohled, který má očíslované pozice dle kusovníku. U připojovacích přírub je uvedena poznámka, s čím se potrubní větev spojuje. Příklad výkresu izometrie potrubí je zobrazen na obr. 77.




| Položka č. | Název | Norma | Rozměr | Množství | Délka | Úhel spec. kolena | Typ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Koleno 3D SS DN200 | DIN 2605 | 219,1 x 3,2 | 1 | | 90stupně | |
| 2 | Příruba s lemovým kroužkem SS DN100 | DIN 2642 | | 2 | | | |
| 3 | Příruba s lemovým kroužkem SS DN200 | DIN 2642 | | 3 | | | |
| 4 | Kompenzátor DN 200 | - | 340 x 130 | 1 | | | - |
| 5 | Navařovací vsuvka - typ 308 1" | DIN 2982 | | 1 | | | |
| 6 | Koleno 3D SS DN100 | DIN 2605 | 114,3 x 2,6 | 1 | | 90stupně | |
| 7 | Redukce SS DN200x100 | DIN 2616 | 219,1 x 152 x 114,3 x 3,6 | 1 | | | |
| 8 | Trubka DN200, SSD | | 219,1 x 3,2 | 1 | 1107.48mm | | |
| 9 | Trubka DN200, SSD | | 219,1 x 3,2 | 1 | 1157.32mm | | |
| 10 | Trubka DN25, SSD | | 33,7 x 2 | 1 | 21.75mm | | |
| 11 | Trubka DN100, SSD | | 114,3 x 2,6 | 1 | 689.79mm | | |
| 12 | Trubka DN100, SSD | | 114,3 x 2,6 | 1 | 631.25mm | | |
| 13 | Trubka DN100, SSD | | 114,3 x 2,6 | 1 | 389.95mm | | |
| 14 | Klapka s převodovkou DN200 - EPDM-SS | - | 60 x 268 | 1 | | | VK-FL-EPDM_SS |
| 15 | Kulový kohout 1/2" vnitřní závit | | 77 | 1 | | | VH-SC-A351_CF8M |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Materiál: | | Hmotnost: | Kg |
| | | Povrchová úprava: | |
| Polotovar: | | Třída odpadu: | |
| Promítání: | | PID: 420 | Měřítko: 1:10 |
| Tolerování dle ISO 8015: | NE | Sestava: | |
| Přesnost ISO 2768 - | mK | Kusovník: | |
| Kreslil: | Šimon Malý | Počet listů: 1 | List číslo: 1 |
| Kontrola: | Ing. Matěj Filip | Projekt: | 01.06.2021 |
| Schválil: | Ing. Dušan Kovač | 182 - Úprava chladího okruhu | |
| Dat. schválení: | | Starý výkres: | |
| Glanzstoff® BOHEMIA An Indorama Ventures Company | | Název: P205058-CHV-200-SSD | |
| | | Číslo výkresu: | Formát výkresu A2 |

GLANZSTOFF CONFIDENTIAL PROPRIETARY BUSINESS INFORMATION

*Obr. 77 Příklad výkresu potrubní trasy*

# 10 Závěr

Cílem práce bylo získat přehled o fungování chladícího okruhu technologie spřádací lázně, zpracovat PID schéma současného stavu, dle požadavků okruh rozšířit o další technologie a případně provést optimalizaci. K těmto problematikám byla také zpracována literární rešerše, která se zabývá právě bilancováním a optimalizací technologických procesů.

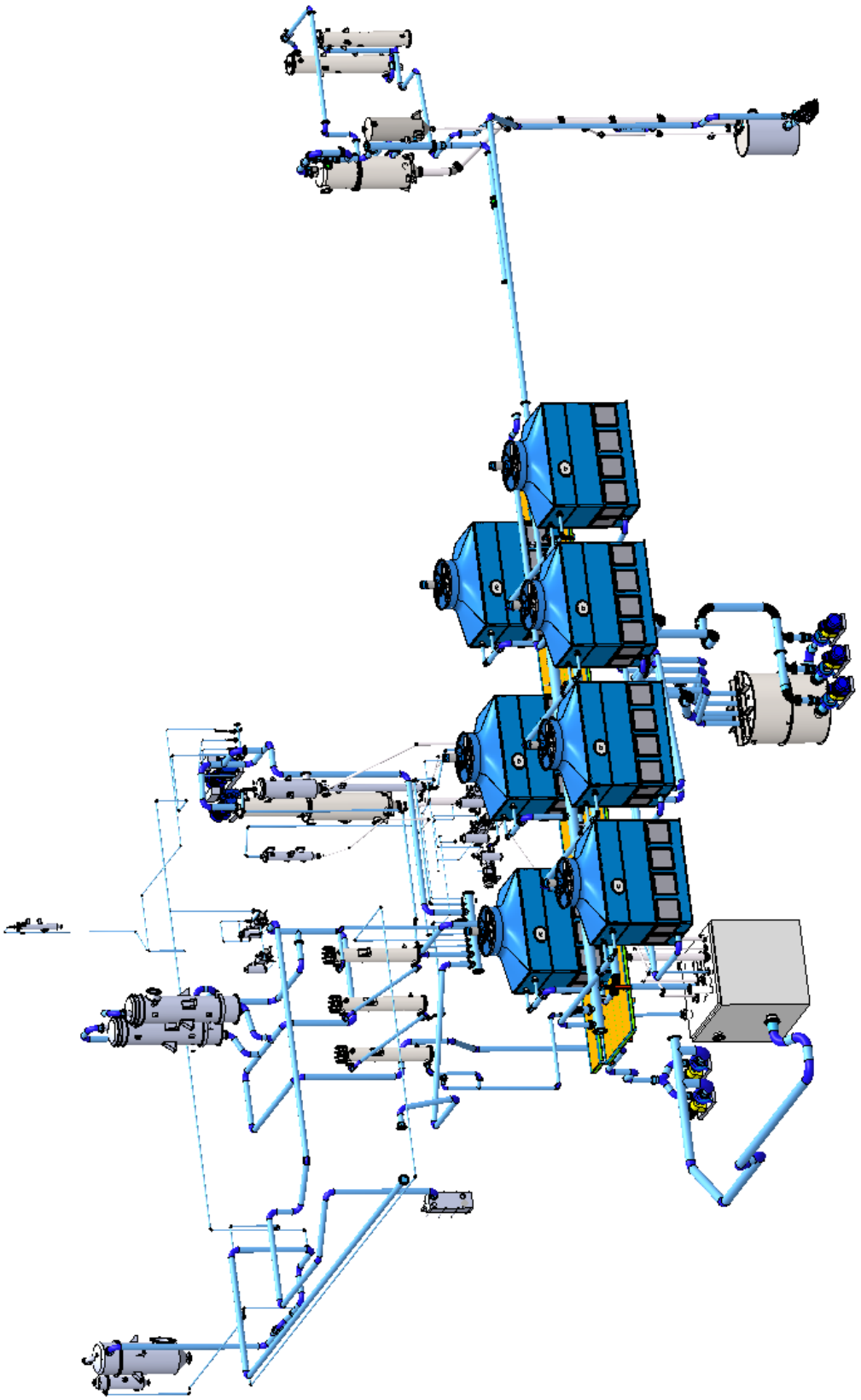
Při popisování současného stavu bylo zjištěno několik nedostatků v původním schématu, načež bylo zpracováno nové, realitě odpovídající schéma, které poskytlo solidní základ pro následnou úpravu okruhu. V následném kroku bylo zpracováno PFD schéma nového okruhu, kde dle požadavků bylo navrženo zapojení nových technologií a dalších zařízení, která jsou nezbytná pro bezchybné fungování celého okruhu. Na základě zpracovaného PFD schématu byla zpracována energetická bilance okruhu, včetně parametrů nového čerpadla a chladících věží, které byly následně porovnány s parametry nabídnutými dodavateli těchto zařízení. V plánu práce bylo také energetickou bilanci zkontrolovat výpočtem v simulačním programu COCO, který se však nezdařil. Zároveň s energetickou bilancí byla zpracována bilance hmotnostní, z níž bylo zjištěno, která zařízení jsou vhodná do okruhu zacyklit a která pro zacyklení nejsou vhodná. Příkladem mohou být kondenzátory *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, ve kterých vzroste hladina koncentrace sledovaných látek ve vodě nad mez předepsanou normou ČSN 75 7171. Navrženým řešením je výměna směsných kondenzátorů za kondenzátory povrchové.

Na základě těchto poznatků bylo zpracováno PID schéma budoucího stavu, ve kterém byly navrženy nové potrubní větve, ventily, měřidla a regulační smyčky, které by pro optimální fungování okruhu měly využívat hodnoty akčních veličin vypočtených v bilanci. Po návrhu měřidel v rámci tvorby PID schématu byly zpracovány specifikace nových měřidel.

Posledním krokem bylo zpracování 3D modelu chladícího okruhu, na základě kterého byly vyhotoveny izometrie nově navržených potrubních větví i včetně ventilů a měřidel, viz obr. 78.

Jednoznačně největším úspěchem práce je snížení spotřeby *Surové vody,* která byla využívána k chlazení *Dvanáctistupňové odparky Lurgi* a původní *Krystalizace B*. Pro snížení spotřeby Alkalicky čiřené vody je možné využít zacyklení aparátů *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, které v současném stavu plní odkalovací funkci. U této úpravy okruhu je však důležité brát v potaz výši investice.

V současné době se realizuje dopojení technologie *Krystalizace E*, přičemž dopojení *Dvanáctistupňové odparky Lurgi* by mělo být realizováno v příštích letech. Práce by tedy mimo jiné měla poskytnout dostačující informace o fungování a stavu okruhu pro budoucí plánované i neplánované úpravy.



*Obr. 78 3D model budoucího stavu chladícího okruhu*

# Seznam použitých symbolů

| | |
|---|---|
| $C_\mathrm{p}$ | měrná tepelná kapacita vody, $\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$ |
| $C_\mathrm{p}(T)$ | měrná tepelná kapacita vody v závislosti na dané teplotě, $\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$ |
| $d'$ | vypočtený vnitřní průměr potrubí, mm |
| $d$ | navržený vnitřní průměr potrubí, mm |
| $e_z$ | tlakové ztráty v potrubí, $\mathrm{J \cdot kg^{-1}}$ |
| $g$ | gravitační zrychlení, $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$ |
| $h$ | výška hladiny v nádrži, m |
| $H$ | výtlačná výška, m |
| $k$ | počet vstupních proudů, 1 |
| $l$ | počet výstupních proudů, 1 |
| $m$ | hmotnost, kg |
| $m_\mathrm{i}$ | hmotnost $i$-té složky, kg |
| $m_\mathrm{ij}$ | hmotnost $i$-té složky v $j$-tém proudu, kg |
| $m_\mathrm{iz}$ | hmotnost vzniku či zániku složky $i$, kg |
| $\Delta m_\mathrm{ai}$ | akumulace hmotnosti složky $i$, kg |
| $\dot{m}$ | hmotnostní tok, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ |
| $\dot{m}_\mathrm{ij}$ | hmotnostní tok $i$-té složky v $j$-tém proudu, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ |
| $\dot{m}_\mathrm{ij}$ | hmotnostní tok $i$-té složky v $j$-tém proudu, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ |
| $\dot{m}_{\mathrm{KC_{BP}}}$ | hmotnostní tok brýdových par do *Krystalizace C*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ |
| $\dot{m}^{\mathrm{IN}}_{\mathrm{KC_{VK}}}$ | hmotnostní tok vody na vstupu do vodní kondenzace *Krystalizace C*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$ |

$\dot{m}_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ hmotnostní tok vody na výstupu z vodní kondenzace *Krystalizace C*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KC_{ChK}}}$ hmotnostní tok vody kyselinovými chladiči *Krystalizace C*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KC_V}}$ hmotnostní tok vody vývěvami *Krystalizace C*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{K1}}$ hmotnostní tok vody *Korekcí 1*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OP_K}}$ hmotnostní tok vody kondenzátory *Odplynění*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OP_V}}$ hmotnostní tok vody vývěvami *Odplynění*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{E2_K}}$ hmotnostní tok vody kondenzátorem *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{E2_{\mathrm{V}}}$ hmotnostní tok vody vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_{BP}}}$ hmotnostní tok brýdových par do *Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}$ hmotnostní tok vody na vstupu do vodní kondenzace *Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ hmotnostní tok vody na výstupu z vodní kondenzace *Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_{ChK}}}$ hmotnostní tok vody kyselinovými chladiči *Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_V}}$ hmotnostní tok vody vývěvami *Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{KE_N}}$ hmotnostní tok vody *Sběrnou nádrží Krystalizace E*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OL_{BP}}}$ hmotnostní tok brýdových par do *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}}$ hmotnostní tok vody na vstupu do *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ hmotnostní tok vody na výstupu z *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OL_V}}$ hmotnostní tok vody vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{OL_N}}$ hmotnostní tok vody *Sběrnou nádrží Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{1CHV}}$ hmotnostní tok vody jednou chladící věží, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$\dot{m}_{\mathrm{ODP}}$ hmotnostní tok ztrát odparem, $\mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

| | |
|---|---|
| $n$ | frekvence otáčení čerpadla, $[\mathrm{s}^{-1}]$ |
| $n_{\mathrm{q}}$ | měrné otáčky, $[\mathrm{min}^{-1}]$ |
| $P_{\mathrm{CH}}$ | celkový chladící výkon věží, kW |
| $p_1$ | tlak v nádrži, kPa |
| $p_2$ | tlak v rozvaděči, kPa |
| $\dot{Q}_{\mathrm{KC_{ChK}}}$ | sdílený tepelný výkon v kyselinových výměnících *Krystalizace C*, kW |
| $\dot{Q}_{\mathrm{OP_K}}$ | sdílený tepelný výkon v kondenzátorech *Odplynění*, kW |
| $\dot{Q}_{\mathrm{KC_{ChK}}}$ | sdílený tepelný výkon v kyselinových výměnících *Krystalizace E*, kW |
| $\dot{Q}_{\mathrm{W602}}$ | sdílený tepelný výkon ve výměníku *W602*, kW |
| $Q$ | objemový tok vody čerpadlem, $\mathrm{l} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ |
| $\rho_{\mathrm{H_2O}}$ | hustota vody, $\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$ |
| $\rho_{\mathrm{H_2O}}(T)$ | hustota vody v závislosti na dané teplotě, $\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$ |
| $r(T)$ | výparné teplo v závislosti na dané teplotě, $\mathrm{kJ} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$ |
| $T_{\mathrm{KC_{BP}}}$ | teplota brýdových par *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{IN}}$ | teplota vody na vstupu do vodní kondenzace *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{KC_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ | teplota vody na výstupu z vodní kondenzace *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{KC_{ChK}}}^{\mathrm{IN}}$ | teplota vody na vstupu do kyselinových výměníků *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{KC_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}}$ | teplota vody na výstupu z kyselinových výměníků *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{KC_V}}^{\mathrm{OUT}}$ | teplota vody na výstupu z vývěv *Krystalizace C*, °C |
| $T_{\mathrm{K1}}$ | teplota vody v *Korekci 1*, °C |
| $T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{IN}}$ | teplota vody na vstupu do kondenzátorů *Odplynění*, °C |

$T_{\mathrm{OP_K}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z kondenzátorů *Odplynění*, °C

$T_{\mathrm{OP}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z technologie *Odplynění*, °C

$T_{\mathrm{OP_V}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do vývěv *Odplynění*, °C

$T_{\mathrm{E2_K}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do kondenzátoru *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, °C

$T_{\mathrm{E2_V}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do vývěv *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, °C

$T_{\mathrm{KE_{BP}}}$ teplota brýdových par *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do vodní kondenzace *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{KE_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z vodní kondenzace *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do kyselinových výměníků *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{KE_{ChK}}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z kyselinových výměníků *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{KE_V}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z vývěv *Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{K1}}$ teplota vody ve *Sběrné nádrži Krystalizace E*, °C

$T_{\mathrm{OL_{BP}}}$ teplota brýdových par *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do kondenzátorů *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{OL_{VK}}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z kondenzátorů *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{OL_V}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do vývěv *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{OL_V}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z vývěv *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{OL_N}}$ teplota vody ve *Sběrné nádrži Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, °C

$T_{\mathrm{W602}}^{\mathrm{IN}}$ teplota vody na vstupu do *W602*, °C

$T_{\mathrm{W602_V}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z výměníku *W602*, °C

$T_{\mathrm{W602}}^{\mathrm{OUT}}$ teplota vody na výstupu z *W602*, °C

| | |
|---|---|
| $T_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{IN}}$ | teplota vody na vstupu do chladících věží, °C |
| $T_{\mathrm{CHV}}^{\mathrm{OUT}}$ | teplota vody na výstupu z chladících věží, °C |
| $T_{\mathrm{WB}}$ | teplota vlhkého teploměru, °C |
| $u_1$ | rychlost v proudění v nádrži, $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ |
| $u_2$ | rychlost v proudění v rozvaděči, $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ |
| $\dot{V}$ | objemový tok vody, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{KC_V}}$ | objemový tok vody vývěvami *Krystalizace C*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{OP_V}}$ | objemový tok vody vývěvami *Odplynění*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{E2_K}}$ | objemový tok vody kondenzátorem *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{E2_V}}$ | objemový tok vody vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Ebner*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{KE_V}}$ | objemový tok vody vývěvami *Krystalizace E*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{OL_V}}$ | objemový tok vody vývěvami *Dvanáctistupňové odparky Lurgi*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{W602}}$ | objemový tok vody výměníkem *W602*, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $\dot{V}_{\mathrm{P205035}}$ | objemový tok vody potrubím P205035, $\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{h}^{-1}$ |
| $v_{\mathrm{max}}$ | maximální rychlost v potrubí, $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ |
| $x_{\mathrm{i}}'$ | hmotnostní koncentrace složky $i$, 1 |
| $Y$ | měrná energie čerpadla, $\mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1}$ |

# Seznam použité literatury

*A Guide to Conductivity Measuring*. Mega Depot [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://megadepot.com/resource/a-guide-to-conductivity-measuring.

BOŠNJAKOVIČ, F a K.-F. KNOCHE. *Pinch analysis for cooling towers. Energy Conversion and Management*. 1998, 1998(39), 1745-1752.

*ČSN 75 7171*. Praha: Sweco hydroprojekt, 2013.

*Elektromagnetický průtokoměr*. Endress Hauser [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Proline-Promag-E-100-5E1B?g.filters=%5B%5D.

FORMÁNEK, Josef. *Podklady k principu měření hodnoty pH a vodivosti kapalin* [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/14-F.pdf.

*Hydrostatický snímač*. JSP [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/ponorne_sondy/hydrostaticky-snimac-hladiny-klay-hydrobar.html.

ISH PUMPS, Olomouc. *Charakteristika paralelně zapojených čerpadel*. Olomouc, 2021.

KADLEC, Karel, Miloš KMÍNEK a Pavel KADLEC. *Měření a řízení: v potravinářských a biotechnologických výrobách*. Ostrava: Aleš Čeněk, KEY Publishing, 2015. ISBN 978-80-7418-232-7.

LECJAKS, Zdeněk, Ivan MACHAČ a Milan KUCHLER. *Chemické inženýrství I*. Páté. Pardubice: Universita Pardubice, 2007. ISBN 978-80-7194-946-655-722-07.

MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05056-9.

*Měření hladiny*. JSP [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/teorie-hladina/hydrostaticke-hladinomery/prime-mereni-hydrostatickeho-tlaku.html.

*Modulární teploměry*. Endress Hauser [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-teploty/Modularni-teplomer-TST410.

MULLER, C.J. a I.K. CRAIG. *Economic hybrid non-linear model predictive control of a dual circuit induced draft cooling water system*. Journal of Process Control. 2017, 2017(53), 37-45.

*Pinch Analysis: For the Efficient Use of energy, water and hydrogen*. Varennes: Québec: Natural Resources Canada, 2009. ISBN 0-662-34964-4.

*Rotametr*. Energo nova [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://www.energonova.cz/katalog/mer_mn_tepl/ROTAMETR.htm.

*Snímače tlaku*. Bingo [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: https://cs.sgmls.com/industrial-smart-pressure-transmitter-316l-flange-diaphragm.html.

SUSNA, David. *NÁVRH CHLADÍCÍHO OKRUHU PRO ODVOD TEPLA Z KONDENZÁTORU PARNÍ TURBÍNY*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

ŠIMKOVÁ, Lenka. *Pinch analýza provozu koksochemie*. Ostrava, 2015. Bakalářská práce. Technická universita Ostrava. Vedoucí práce doc. Ing. Marek Večeř, Ph.D.

*Teploměry*. Senzory CZ [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://www.senzorycz.eu/produkty/teplota/hlavicove-snimace-teploty-pro-prumysl/snimace-teploty-s-jimkou/senzotemp-gn.html.

*Tlakoměry*. Senzory CZ [online]. [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: http://www.snimacetlaku.cz/produkty/tlak/snimace-tlaku-pro-vzduchotechniku/snimace-tlaku/senzomitter-as.html.

*Vakuové odparky*. KOVOFINIŠ [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: https://kovofinis.cz/vakuove-odparky.

WICHTERLE, Kamil. *Základy procesního inženýrství*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2580-9.

YU, Zhinakng. *Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021, 2021(169).

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Šimon Malý, v. r.,
1. června 2021

Kuba, J.: Metodický pokyn č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, ČVUT v Praze, 1. července 2009, https://www.cvut.cz/sites/default/files/content/d1dc93cd-5894-4521-b799-c7e715d3c59e/cs/20210308-metodicky-pokyn-c-12009-o-dodrzovani-etickych-principu-pri-priprave-vysokoskolskych.pdf [1. června 2021]