ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav energetiky

Zdroj pro zásobování Prazdroj a.s. teplem (chladem) a elektrickou energií

Industrial plant of Prazdroj company in Pilsen – cogeneration solution

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetika

Vedoucí práce: prof. Ing. František Hrdlička, CSc.

Jindřich Jalůvka

Praha 2016

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní, Ústav energetiky
Technická 4, 166 07 Praha 6 **Akademický rok: 2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro: **Bc. Jindřich JALŮVKA**

program: **Strojní inženýrství**

obor: **Energetika**

Název tématu: **Zdroj pro zásobování Prazdroj a.s. teplem (chladem) a elektrickou energií**

Title: **Industrial plant of Prazdroj company in Pilsen - cogeneration solution**

Zásady pro vypracování:

Proveďte technickoekonomické porovnání variant kogeneračního zásobování podniku Prazdroj a.s. teplem (alternativně chladem) a elektřinou.

Práce bude obsahovat:

1. **Rešerše kogeneračních a trigeneračních průmyslových zdrojů**
2. **Porovnání základních energetických výstupů kogeneračních zařízení a oddělené výroby elektřiny a tepla (chladu)**
3. **Navrhněte varianty konkrétních řešení pro odběrové diagramy a diagramy trvání elektřiny a tepla (chladu)**
4. **Proveďte ekonomické porovnání variant s ohledem na požadované bilanční a výkonové řešení a s ohledem na požadované technické parametry**

Rozsah grafických prací: **Situační schéma řešení zdroje a diagramy trvání s vyhodnoceným řešením.**

Rozsah průvodní zprávy:

Seznam odborné literatury:
Hrdlička F. a kol. ‚Průmyslová energetika
skripta ČVUT
firemní podklady

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. František Hrdlička, CSc.**

Konzultant/i: **Ing. Jakub Maščuch, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **29. 4. 2016**

Datum odevzdání diplomové práce: **10. 6. 2016**

Neodevzdá-li student/ka bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Posluchač/ka bere na vědomí, že je povinen/povina vypracovat bakalářskou nebo diplomovou práci samostatně bez cizí pomoci s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské nebo diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne: 29.4.2016

Jalůvka

student/ka

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní

doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
vedoucí Ú 12115

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 29. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Zdroj pro zásobování Prazdroj a.s. teplem (chladem) a elektrickou energií“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Františka Hrdličky, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 8. 6. 2016 Jindřich Jalůvka

.....

Anotační list

Jméno autora:	Jindřich Jalůvka
Název BP/DP	Zdroj pro zásobování Prazdroj a.s. teplem (chladem) a elektrickou energií
Anglický název:	Industrial plant of Prazdroj company in Pilsen - cogeneration solution
Akademický rok:	2015/2016
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetické stroje a zařízení
Vedoucí BP/DP:	prof. Ing. František Hrdlička, Csc.
Konzultant:	Ing. Jakub Maščuch, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 85
	Počet obrázků: 45
	Počet tabulek: 19
	Počet příloh: 5
Klíčová slova:	Průmyslová kotelna, kogenerace, akumulace tepla, Plzeňský Prazdroj a.s., parní turbína, plynová turbína
Keyword:	Industrial plant, cogeneration, heat accumulation, Plzeňský Prazdroj a.s., steam turbine, gas turbine
Anotace:	Tato práce se zabývá možnými způsoby výroby a akumulace tepla, elektřiny a chladu pro pivovar Plzeňského Prazdroje a.s. v Plzni. Nejdříve jsou vybrána možná technická řešení, ze kterých jsou vybrána tři nejvhodnější pro ekonomické zhodnocení. Podle ekonomického hodnocení je nakonec vybrána nejvhodnější varianta.
Abstract:	This thesis discusses possible ways of production and accumulation of heat, electric and cooling energy for the brewery Plzensky Prazdroj Inc. in Pilsen. First are selected possible technical solutions, from which are chosen three best for economic evaluation. Based on economic evaluation is in the end chosen best option.

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Františku Hrdličkovi, CSc za odborné vedení práce a cenné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Adámkovi za poskytnuté informace ohledně Plzeňského Prazdroje a.s.. A v neposlední řadě Ing. Petru Jalůvkovi za konzultace a hodnotné rady a Mgr. Haně Jalůvkové za korekci textů.

Obsah

Úvod **13**

1. Typy energetických zdrojů pro průmyslové podniky **14**

1.1. Rozdělení energetických zdrojů pro průmyslové podniky **14**

1.1.1. Výtopna 14

1.1.2. Teplárna 14

1.1.3. Trigenerace 15

1.2. Okruh středotlaké parní kotelny na zemní plyn **16**

1.2.1. Zemní plyn 16

1.2.2. Napájecí nádrž 16

1.2.3. Úpravna vody 17

1.2.4. Napájecí čerpadla 19

1.2.5. Parní kotel 20

1.2.6. Kondenzátní nádrž a čerpadla 22

1.2.7. Akumulátor 25

1.3. Oběh teplárny na zemní plyn s parní turbínou **28**

1.3.1. Kotel 28

1.3.2. Příslušenství 30

1.3.3. Turbína 30

1.4. Oběh s plynovou turbínou a kotlem na odpadní teplo **32**

1.4.1. Kotel na odpadní teplo 33

1.4.2. Plynová turbína a její příslušenství 34

1.4.3. Příslušenství 36

2. Příprava podkladů pro technické řešení **37**

2.1. Stávající situace **37**

2.2. Zpracování naměřených dat **37**

2.2.1. Pára 37

2.2.2. Určení špičky odběru páry 39

2.2.3. Elektřina 42

2.2.4. Současnost odběru elektřiny a tepla 42

3. Technické řešení volených variant **45**

3.1. Shrnutí jednotlivých variant **45**

3.1.1. Varianta 1 – výtopna 45

3.1.2. Varianta 2 – výtopna ... 45
3.1.3. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou ... 45
3.1.4. Varianta 4 – teplárna s parní turbínou ... 45
3.1.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou ... 46
3.2. Specifikace a návrh technického řešení ... 47
3.2.1. Varianta 1 – výtopna ... 47
3.2.2. Varianta 2 – výtopna ... 49
3.2.3. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou ... 51
3.2.4. Varianta 4 – teplárna s parní turbínou ... 53
3.2.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou ... 56
4. Ekonomické hodnocení variant ... 61
4.1. Stanovení cen médií a jejich odhad do budoucna ... 61
4.1.1. Kurz koruny ... 61
4.1.2. Zemní plyn ... 62
4.1.3. Elektrická energie ... 63
4.1.4. Emisní povolenky ... 64
4.1.5. Vodné a stočné ... 65
4.1.6. Pára ... 65
4.2. Stanovení investičních a provozních nákladů ... 65
4.2.1. Výpočet ekonomických hodnotících kritérií ... 66
4.2.2. Stávající situace ... 66
4.2.3. Varianta 1 - výtopna ... 67
4.2.4. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou ... 70
4.2.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou ... 74
4.2.6. Varianta 1 s fixní cenou emisních povolenek ... 77
4.2.7. Určení mezní ceny zemního plynu ... 79
4.2.8. Vyhodnocení ekonomických ukazatelů ... 80
Závěr ... 81

Seznam symbolů

CF	[*Kč*]	Cash flow
$ČSH$	[*Kč*]	Čistá současná hodnota
DS	[-]	Diskontní součinitel
H	[k*Wh/Nm*^{3}]	Výhřevnost zemního plynu
M_A	[*kg*]	Hmotnost vody v akumulátoru
$M_{akumulace}$	[*kg*]	Hmotnost akumulované páry
$\dot{M}_{kotle}$	[*kg/s*]	Parní výkon kotle
M_p	[*kg*]	Hmotnost akumulované páry
$\dot{M}_p$	[*kg/s*]	Hmotnostní průtok páry
M_{voda}	[*kg*]	Hmotnost vody
M_{SV}	[*kg*]	Hmotnost vlhkých spalin
$\dot{M}_{SV}$	[*kg/s*]	Hmotnostní průtok vlhkých spalin
$\dot{M}_{SV_{min}}$	[*kg/s*]	Minimální hmotnostní průtok vlhkých spalin
$\dot{M}_{VV_{min}}$	[*kg/s*]	Minimální hmotnostní průtok vlhkého vzduchu
N_c	[*Kč*]	Celkové náklady na nákup a výrobu médií
$N_{c_{nákup}}$	[*Kč*]	Celkové náklady na nákup médií
N_e	[*Kč*]	Náklady na výrobu elektřiny
$N_{e_{nákup}}$	[*Kč*]	Náklady na nákup elektřiny
N_m	[*Kč*]	Náklady na výrobu médií
N_t	[*Kč*]	Náklady na výrobu tepla
O	[*Kč*]	Odpisy
O_2	[*%*]	Objemová koncentrace kyslíku ve spalinách
O_{Ar}	[m^3]	Objem argonu
O_{CO_2}	[m^3]	Objem oxidu uhličitého
$O_{H_2O}^V$	[m^3]	Objem vody ve vzduchu
$O_{H_2O}^S$	[m^3]	Objem vody ve spalinách
O_{N_2}	[m^3]	Objem dusíku
$O_{O_2\,min}$	[m^3]	Minimální objem kyslíku
O_{SO_2}	[m^3]	Objem oxidu siřičitého

$O_{SS_{min}}$	$[m^3]$	Minimální objem suchých spalin
$O_{SV_{min}}$	$[m^3]$	Minimální objem vlhkých spalin
$O_{VS_{min}}$	$[m^3]$	Minimální objem suchého vzduchu
$O_{VV_{min}}$	$[m^3]$	Minimální objem vlhkého vzduchu
P	$[W]$	Výkon spalinového kotle
P'	$[W]$	Příkon spalinového kotle
P_{SK}	$[W]$	Výkon spalovacího kotle
P_{spal}	$[W]$	Příkon ve spalinách
P_{sv}	$[W]$	Svorkový výkon točivé redukce
$\dot{Q}_{kotel}$	$[W]$	Potřebný výkon kotle
$\dot{Q}_p$	$[W]$	Tepelný výkon páry
$\dot{Q}_{plyn}$	$[W]$	Potřebný výkon zemního plynu
U	$[Kč]$	Uspořené náklady
V	$[m^3]$	Objem vody v kotli
V_A	$[m^3]$	Objem akumulátoru
$V_{ideál}$	$[m^3]$	Objem 1 *kmol* ideálního plynu
$V_{nádrž}$	$[m^3]$	Objem akumulační nádrže
$\dot{V}_{O_2}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok kyslíku ve spalinách
$\dot{V}_{O_{2SK}}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok kyslíku pro spalinový kotel
$\dot{V}_{SV_{min}}$	$[m^3/s]$	Minimální objemový průtok vlhkých spalin
$\dot{V}_{VV}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok vlhkého vzduchu ve spalinách
$\dot{V}_{ZP}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok zemního plynu
$\dot{V}_{ZP_{SK}}$	$[m^3/s]$	Objemový průtok zemního plynu pro spalinový kotel
c_{Fe}	$[kJ/kgK]$	Měrná tepelná kapacita železa
dCF	$[Kč]$	Diskontované cash flow
i''_2	$[kJ/kg]$	Entalpie páry při stavu 2
i'_1	$[kJ/kg]$	Entalpie vody při stavu 1
i'_2	$[kJ/kg]$	Entalpie vody při stavu 2
i_a	$[kJ/kg]$	Entalpie admisní páry

i_e	[*kJ/kg*]	Entalpie emisní páry
i_k	[*kJ/kg*]	Entalpie kondenzátu
i_p	[*kJ/kg*]	Entalpie páry
k	[-]	Konstanta železa u akumulátoru
k_A	[-]	Poměrné zaplnění akumulátoru
m	[-]	Počet atomů uhlíku v uhlovodíku
$\dot{m}_p$	[*kg/s*]	Hmotnostní průtok páry
n	[-]	Počet atomů vodíku v uhlovodíku
o_{Ar}	[*%*]	Koncentrace argonu
o_{CO}	[*%*]	Koncentrace oxidu uhelnatého v zemním plynu
$o_{C_mH_n}$	[*%*]	Koncentrace uhlovodíku v zemním plynu
o_{CO_2}	[*%*]	Koncentrace oxidu uhličitého
o_{H_2}	[*%*]	Koncentrace vodíku v zemním plynu
o_{H_2O}	[*%*]	Koncentrace vody ve spalinách
o_{N_2}	[*%*]	Koncentrace dusíku
o_{O_2}	[*%*]	Koncentrace kyslíku v zemním plynu
o_{SO_2}	[*%*]	Koncentrace oxidu siřičitého
r	[-]	Diskontní sazba
t	[-]	Rok investice
t'_1	[*°C*]	Teplota vody při stavu 1
t'_2	[*°C*]	Teplota vody při stavu 2
α_p	[*kg/kg*]	Akumulační konstanta
α_{SK}	[-]	Přebytek vzduchu pro spalinový kotel
α_t	[-]	Přebytek spalovacího vzduchu ve spalovací turbíně
η_{ele}	[-]	Účinnost výroby elektřiny při kogeneraci
η_{komb}	[-]	Účinnost kombinované výroby tepla a elektřiny
η_{kotel}	[-]	Účinnost kotle
η_{spal}	[-]	Účinnost spalinového kotle
η_{tep}	[-]	Účinnost výroby tepla při kogeneraci
ρ	[kg/m^3]	Hustota vody v napájecí nádrži
$\rho_{stř}$	[kg/m^3]	Střední hodnota hustoty

ρ_{SV}	[kg/m^3]	Hustota spalin
$\tau_{rezerva}$	[s]	Časová rezerva napájecí nádrže
χ_V	[-]	Podíl vodní páry na 1 m^3 vzduchu
Δi	[kJ/kg]	Entalpický spád na turbíně

Úvod

Plzeňský Prazdroj a.s. je velký pivovar ve městě Plzeň, který má velkou spotřebu elektřiny, tepla a chladu. V nynější době všechna média nakupují ze sousední teplárny Plzeňské teplárenské, a.s.. Do budoucna by chtěli snížit provozní náklady tím, že by si postavili svůj vlastní zdroj tepla, případně i elektřiny. Jelikož je investice značná, je potřeba nejdříve teoreticky navrhnout možná řešení a poté vypracovat jejich technicko-ekonomické vyhodnocení.

Průmyslová energetika je odvětví, kde je potřeba brát výrobu všech potřebných médií jako úzce propojenou navzájem. Například, pokud bude klesat potřeba tepla v podniku, tak se to projeví na množství maximálně možné vyrobené elektřiny.

Na základě teoreticky navržených řešení budou vybrány varianty výroby samotného tepla nebo tepla a elektřiny, popřípadě i chladu.

Hlavní cíl je vybrat variantu, která bude nevhodnější z hlediska technického, kde je hlavním kritériem schopnost pokrývat špičky odběru páry a dále ekonomického, kdy bude určeno, jestli se investiční náklady za dobu životnosti investice vrátí. Dalším kritériem také bude spolehlivost a ekologie.

Varianty, které podle technického hodnocení vyjdou jako nejvhodnější, budou poté zkoumány ekonomicky. Hlavním kritériem ekonomické výhodnosti jsou ceny všech nakupovaných médií a snížení nákladů pro obstarání médií po instalování vlastního zdroje energií. Pokud za nynějších podmínek žádná varianta nevyhoví, tak jako další budou zhodnoceny podmínky, kdy by byla investice realizovatelná.

1. Typy energetických zdrojů pro průmyslové podniky

1.1. Rozdělení energetických zdrojů pro průmyslové podniky

Zdroje energie pro průmyslový podnik jsou dnes rozdělovány podle toho, jestli se vyrábí pouze teplo, teplo a elektřina zároveň nebo teplo, elektřina a chlad zároveň, což se nazývá trigenerace. Kvůli ekologii je tlak na výrobu co nejvíce druhů energie zároveň, protože se dosahuje velmi vysoké celkové účinnosti. Bohužel dnešní ekonomická situace tomuto trendu většinou nepřeje. Proto je potřeba vždy jednotlivé případy ekonomicky posoudit a zvážit, jaký zdroj je nejvýhodnější vybudovat.

1.1.1. Výtopna

Slouží pouze pro výrobu tepla pomocí parních nebo teplovodních kotlů. Jako další je dnes používán název průmyslové kotelny. Úkolem výtopny je zajišťovat dostatek tepla pro technologii i při náhlých změnách odběrů.

Teplo pro technologii musí vyšší teplotovou úroveň, než je teplo pro vytápění. Často je teplo dodáváno ve formě páry, jelikož je pára využívána ve velkém množství technologických procesů a má velké poměrné množství přenesené energie oproti teplé vodě. [1]

Pára je po závodě rozváděna na co nejvyšší tlakové úrovni. Pokud technologie na boční větvi parovodu požaduje nižší tlak než je v páteřním rozvodu, je tlak redukován škrcením v redukční stanici. Toto opatření je kvůli menšímu měrnému objemu páry při vyšším tlaku. Z toho plyne, že pára o vyšším tlaku potřebuje menší průměr potrubí, takže se ušetří na investičních nákladech. Další výhoda je možnost zanedbání tlakových ztrát páteřního rozvodu, jelikož je pára stejně redukována na nižší tlak.

Ve větších průmyslových závodech jsou nejčastěji budovány středotlaké parní kotelny, které mají tlak páry vyšší než 0,07 *MPa*. [2]

Elektrickou energii průmyslový závod nakupuje od distributora.

Účinnost přeměny primární energie je vysoká (kolem 90%), ale primární palivo je z exergického pohledu nedostatečně využito, jelikož nebylo využito pro výrobu ušlechtilého typu energie, jako je například elektřina.

1.1.2. Teplárna

Slouží pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Teplo je v průmyslové teplárně vyráběno jako hlavní, elektrická energie je podružná a závislá na výrobě tepla. Teplo je možno opět dodávat ve formě teplé vody nebo páry.

Elektřina lze vyrábět dvěma způsoby. První způsob je oběhαparní turbínou, kdy vyrobená pára expanduje v turbíně a teprve poté proudí k technologii. Nevýhoda tohoto zapojení je silná závislost využití turbíny na potřebě tepla pro technologii. Jelikož pokud není potřeba teplo, tak nefunguje ani turbína. Výhodou jsou nižší pořizovací náklady turbíny.

Druhý způsob výroby elektřiny je výroba v plynové turbíně nebo plynovém motoru. U turbíny je plynné nebo kapalné palivo spáleno přímo v ní a spaliny expandují na

lopatkách. Teplo se získává chlazením turbíny, ze spalin v kotli na odpadní teplo nebo spaliny fungují jako předehřev spalovacího vzduchu pro hořák kotle.

U plynového motoru je elektřina vyráběna spálením paliva v prostoru válce a teplo je získáváno buď chlazením motoru, nebo chlazením spalin. Jenom u opravdu velkých výkonů je teplo odváděno ve formě páry. U menších a středních výkonů je teplo ve formě teplé a horké vody, jelikož motor nemá dostatečný tepelný výkon na vývin páry. Spaliny z motoru nelze použít jako předehřev spalovacího vzduchu, jelikož ve válci je spalování s velmi malým nebo žádným přebytkem vzduchu. [3]

V případě použití parní i plynové turbíny se jedná o oběh paroplynový, kde je elektřina vyráběna jak v parní turbíně, tak i v turbíně plynové. Plynový oběh je předřazen oběhu parnímu. Teplo je dodáváno ve formě páry z oběhu parního. Tato varianta teplárny dosahuje velmi dobré hodnoty celkové účinnosti a teplárenského součinitele. U menších výkonů není paroplynový cyklus vhodný, jelikož má velmi velké investiční náklady a byl by problém s jeho regulací.

Celková účinnost přeměny primární energie je také vysoká, stejně jako u teplárny. Je to dáno tím, že na rozdíl od samostatné výroby elektřiny, kdy je teplo neužitečně mařeno, je u kombinované výroby odpadní teplo z turbíny využíváno. Celková účinnost se tedy skládá z účinnosti výroby elektrické energie a výroby tepla, viz (1). Účinnost je vztažena k výhřevnosti primárního paliva.

$$\eta_{komb} = \eta_{ele} + \eta_{tep} \quad (1)$$

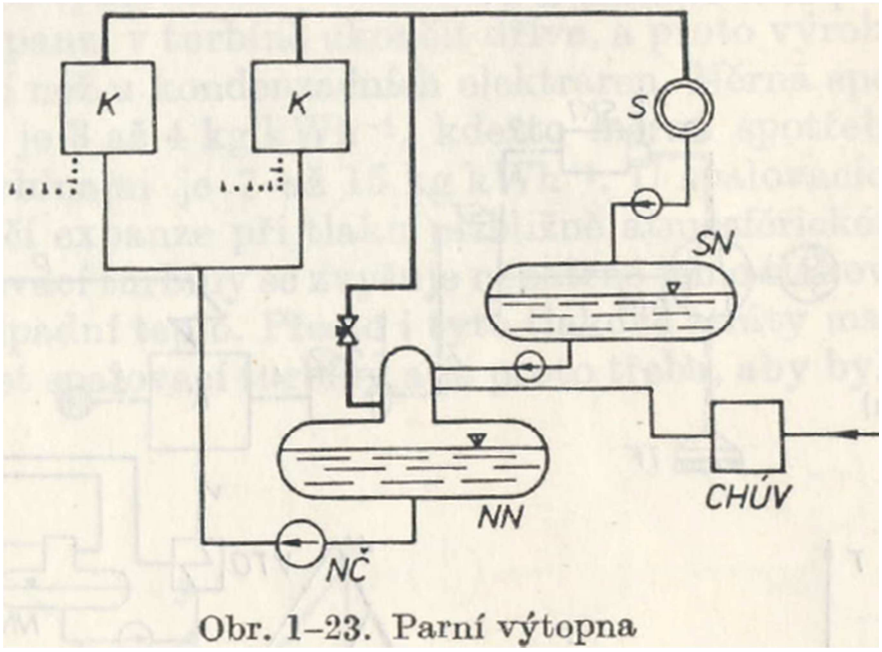
1.1.3. Trigenerace

Hlavním úkolem je výroba elektřiny, tepla a chladu. Elektřina a teplo je vyráběna principiálně stejně jako v teplárně. Rozdíl je v přidaném absorbčním chladicím systému, který z páry nebo teplé vody vyrábí chlad. Chlad je v pivovarech nejčastěji potřeba ve formě studené vody.

U trigenerace se docílí ušetření elektrické energie, jelikož se chlad nevyrábí v kompresorovém okruhu (příkon kompresorů) a zároveň se zvýší výroba elektrické energie turbínou, jelikož je větší odběr tepla a tím pádem větší průtok páry turbínou. Také se dosáhne vyrovnání odběrů tepla v létě a v zimě.

1.2. Okruh středotlaké parní kotelny na zemní plyn

Oběh kotelny v průmyslovém podniku slouží pro výrobu páry pro parní spotřebiče. Pára vyrobená v kotli proudí ke spotřebičům, kde kondenzuje a vrací se zpátky do kotelny. Vrácená voda se opět čerpá do kotle a oběh je uzavřen. Jedná se o typický okruh parní výtopny. Jednoduché schéma parní výtopny je vidět na Obr. 1. [2]



Obr. 1–23. Parní výtopna

Obr. 1 Základní schéma parní výtopny s dvojicí kotlů [4]

Teplo pro spotřebiče je většinou dodáváno ve formě syté vodní páry o tlaku do 1,5 *MPa*. Voda se zpátky vrací ve formě kondenzátu, většinou o teplotě 80-100 *°C*. Hlavní energie je tedy v latentním teplu při kondenzaci syté vodní páry na vodu. Jelikož při vyšších tlacích latentní teplo vody klesá, tak je nežádoucí volit příliš vysoké tlaky páry v systému. Na druhou stranu při nízkém tlaku v systému by musely být kvůli rychlosti v potrubí voleny příliš velké průměry potrubí. Zároveň s rostoucím tlakem rostou i provozní (čerpací práce) a pořizovací náklady kotelny.

1.2.1. Zemní plyn

Patří do kategorie plynných paliv a je to nejčastěji používané palivo v průmyslových kotelnách díky jeho jednoduché přepravě a skladování a nepotřebě složitého palivového hospodářství. „Za plyn je považována každá chemická sloučenina nebo směs sloučenin, která za teploty 0 až 20 °C a za tlaku 98 až 104 kPa není zkapalnitelná.“ [5]

Výhřevnost plynu se určuje buďto rozborem vzorku plynu z plynovodu, kde je plyn odebírán nebo přibližně, kdy se určí, odkud se plyn těží a vezme se průměrná hodnota výhřevnosti dané těžby.

1.2.2. Napájecí nádrž

Základem okruhu je napájecí nádrž. Jedná se obvykle o válcovou nádobu s klenutými dny se zásobou upravené vody pro kotel. Přetlak v nádobě je maximálně 0,5 *bar*. Pokud by byl vyšší, tak by se jednalo o tlakovou nádobu a musela by se navrhovat

a provozovat podle příslušných norem. Napájecí voda do kotle je složená převážně z vráceného kondenzátu od spotřebičů a zbytek je upravená voda z úpravny vody.

Nádrž slouží jako zásobárna vody, k pokrytí nestacionárních provozních režimů a k zajištění dobré funkce napájecích čerpadel. Velikost napájecí nádrže se volí na 5 – 30 minut provozu všech parních kotlů na nominální výkon. [4]

Napájecí voda je v nádrži termicky odplyněna a předehřáta na 103 až 105 °*C*. Ohřátí napájecí vody je zajištěno přívodem redukované topné páry z hlavního parního rozdělovače za kotlem (nebo kotli) obvykle do barbotážní trubky ve spodní části nádrže. Barbotážní trubka je perforovaná a pára je distribuována rovnoměrně do celé napájecí nádrže.

Hlavní odplynění se děje v odplyňovači umístěném na napájecí nádrži. Proti sobě v něm proudí dopouštěná voda nebo kondenzát a vodní pára. Vodní pára svým prouděním strhává plyny rozpuštěné ve vodě (hlavně kyslík, oxid uhličitý a dusík) a následně odchází jako brýdová pára potrubím vyústěným obvykle na střeše kotelny. Pro správné odplynění musí být voda ohřátá na teplotu blízkou teplotě varu při daném tlaku.

„Rozpustnost plynu ve vodě závidí na teplotě (se zvyšující se teplotou klesá) a na parciálním tlaku plynu. Protože ani při relativně vysoké teplotě není rozpustnost nulová, je řešením snížení jeho parciálního tlaku na nulu. Snížit parciální tlak plynu lze dvěma způsoby:

- Atmosféru nad vodou nahradit jiným plynem než je ten, který se má odstranit (desorpce)
- Atmosféru nad vodou nahradit samotnou vodní parou (termické odplynění)

Desorpce se používá v provzdušňovacích věžích pro odstranění CO_2, použitím vzduchu při přípravě přídavné vody v demineralizaci a kyselé dekarbonizaci. V parovodním okruhu se proces desorpce, např. plynným dusíkem, neujal pro vysoké náklady.“ [6]

Termické odplyňovače jsou různých konstrukcí, kde hlavní jsou:

Kaskádový/sprchový odplyňovač – voda proudí seshora po kaskádě přepážek a zespoda proti ní proudí pára.

Rozstřikovací odplyňovač – voda je rozstřikována soustavou trysek do prostoru odplyňovače, kde proti ní opět proudí pára a strhává plyny.

1.2.3. Úpravna vody

V průmyslových kotelnách je v okruhu použita upravená pitná voda z místního vodovodu (provozně dražší řešení) nebo voda z lokální studny (provozně levnější řešení). Jelikož se v obou případech jedná o kvalitnější vodu než povrchovou z řeky, je většinou vodu nutno pouze změkčit. Pokud kvůli výsledné kvalitě vody nestačí pouze změkčení, tak je ještě potřeba vodu dekarbonizovat. Relativně menší nároky na kvalitu vody jsou dány použitím bubnových kotlů, u kterých se kvalita kotlové vody upravuje množstvím odluhu z bubnu. U průtočných kotlů odluh není možný a požadavky na kvalitu kotlové vody jsou přísnější.

Změkčení je snížení tvrdosti vody, aby se zamezilo poškozování vnitřní části technologie a snížilo se množství odluhu z kotle. Tvrdost se snižuje pomocí změkčovacího filtru.

Změkčování vody funguje na principu katexu. Ionty vápníku a hořčíku, jsou nahrazovány ionty sodíku. Sodík v systému nezpůsobuje problémy jako tvrdá voda. [7]

Změkčovací filtr je v principu kyselý katex. Změkčovací stanice se sestává ze vstupního mechanického filtru, dvou změkčovacích filtrů (aby mohla stanice pracovat neustále, když se jeden filtr regeneruje) a zásobníku solanky. Solanka je rozpuštěná tabelární sůl NaCl ve vodě. Změkčovací filtr má omezenou kapacitu, která je závislá na tvrdosti vody (čím tvrdší voda, tím kratší dobu vydrží). Kapacita je udávána v hodinách jako čas do regenerace. Jakmile je kapacita jednoho filtru vyčerpána, tak se přepne na filtr druhý a první je regenerován solankou, aby se opět vrátila jeho filtrační kapacita.

Obr. 2 Změkčovací stanice napájecí vody, dva regenerační filtry, zásobník solanky a dávkovací čerpadlo [8]

Ve všech případech je potřeba změkčit vodu dopouštěnou do systému. Pokud je kvalita vody po změkčení stále nedostačující, tak je doporučeno zařadit za ní dekarbonizaci. Dekarbonizace odstraňuje uhlík, který se ve vodě vyskytuje. Dříve se používala dekarbonizace kyselinou, ale dnes je nahrazena univerzálnější reverzní osmózou.

„Oddělíme-li dva různě koncentrované roztoky membránou, propouštějící pouze rozpouštědlo (vodu), začne přirozenou cestou proudit voda z prostředí zředěnějšího do koncentrovanějšího. Tento děj se nazývá osmóza.“ [6] Pokud na prostředí působíme tlakem větším než je osmotický, tak se průběh děje obrátí, což nám zajistí vyčištění

přívodní vody od nežádoucích příměsí. Reverzní osmóza je velmi šetrná, ale investičně drahá a její výtěžnost je nižší než chemické způsoby úpravy vody. V případech, kdy by měla být kvůli horší kvalitě vody osmóza instalována, ale není, je požadovaná kvalita vody udržována zvýšeným odluhem z kotle (z přibližného 1% s reverzní osmózou na 3-5% bez osmózy).

Obr. 3 Zařízení reverzní osmózy s vysokotlakým čerpadlem [9]

1.2.4. Napájecí čerpadla

Z napájecí nádrže je voda napájecími čerpadly čerpána do kotle. Jsou vždy minimálně dvě, kvůli případnému výpadku jednoho z nich a slouží pro vyvození potřebného tlaku v systému a udržení potřebné hladiny v bubnu kotle. Každý kotel má často svoji dvojici čerpadel (jedno je záložní). Průtok vody do kotle je regulován regulačním ventilem, nebo v poslední době často frekvenčním měničem, který mění frekvenci napájení motoru čerpadla a tím i jeho otáčky. Čerpadla jsou u výtopen středních výkonů poháněna elektricky. Vždy musí být dodržena minimální nátoková výška pro čerpadlo, jinak by docházelo ke kavitaci v sání čerpadla, jelikož čerpaná voda má v sání teplotu blízkou teplotě sytosti při daném tlaku.

Tlak vody za čerpadly musí být větší než tlak potřebný pro spotřebiče, aby byly pokryty tlakové ztráty při dopravě ke spotřebiči. Jedná se například o tlakovou ztrátu na regulačním ventilu napájení, v kotli, tlakovou ztrátu třením v potrubí, tlakovou ztrátu místními odpory a další. „Napájecí zařízení musí zajistit dodávku potřebného množství napájecí vody jednomu nebo několika parním kotlům vzájemně propojeným na parní straně tak, aby byl umožněn jejich jmenovitý výkon i při krátkodobém překročení konstrukčního tlaku (otevření pojistných ventilů).“ [4]

1.2.5. Parní kotel

V parních průmyslových kotelnách se jako zdroj tepla většinou používá středotlaký plamencový žárotrubný parní kotel s hořákem spalujícím zemní plyn. Vodní strana kotle se skládá z bubnu plného vody, v němž je vložen výparník, někdy přehříváku páry a obvykle ekonomizéru na výstupu spalin z kotle. Zemní plyn se spaluje v plynovém hořáku a spalovací vzduch je přiváděn do kotle přetlakově pomocí ventilátoru spalovacího vzduchu.

Ke kotli patří i ostrojení kotle, které obsahuje pojišťovací ventil, hlavní parní ventil, uzavírací a zpětnou armaturu na přívodu napájecí vody, omezovače, systém odluhu a odkalu, systém měření hladiny, tlakoměry a teploměry. [10]

Ve spalovací komoře je spalováno palivo (u malých a středních výkonů převážně zemní plyn, kvůli jeho jednoduché distribuci), které uvolňuje horké spaliny. Spaliny projdou nejdříve plamencem (první tah), otočí se v první obratové komoře, projdou trubkami druhého tahu, opět se na konci tok obrátí a pokračuje do posledního, třetího tahu kotle. Všechny tři tahy jsou součástí výparníku kotle, a slouží pro vypaření vody v bubnu. Obratové komory jsou chlazeny vodou. Díky této konstrukci se dosahuje vysoké účinnosti kotle.

Po průchodu výparníkem spaliny proudí do ekonomizéru, kde předehřejí napájecí vodu před vstupem do bubnu a nakonec odchází do komína. V ekonomizéru se vychladí spaliny na co nejnižší teplotu, která ale musí být nad teplotou rosného bodu spalin, aby nedocházelo ke kondenzaci vodní páry obsažené ve spalinách. V případě potřeby je ještě před komínem umístěn do kouřovodu spalinový tlumič, aby se snížila hladina hluku.

Kouřovod musí být co nejkratší, nejpřímější a stále mírně stoupající, aby měl co nejnižší tlakovou ztrátu. Výška komínu závisí na rozptylu (aby byly rozptýleny na dostatečnou plochu) a někdy i na tlakové ztrátě spalinové cesty, aby byly spaliny odváděny nejlépe přirozeným tahem komína.

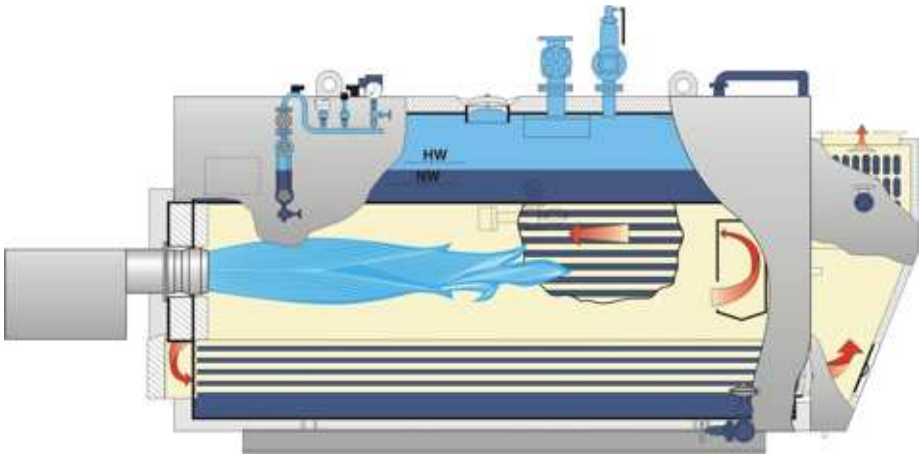
Napájecí voda se před vstupem do samotného bubnu nejdříve předehřeje v ekonomizéru, který je umístěn naproti hořáku. Předehřátá voda vstupuje do bubnu kotle, kde dochází k jejímu odparu za tlaku vyvozeného napájecím čerpadlem.

Hladina v bubnu udržovaná automatikou napájení se hlídá elektronicky čidly měření hladiny, nebo je možno ji zkontrolovat ručně pomocí stavoznaku na kotli. Rozmezí nejvyšší a nejnižší hladiny je poměrně malé, přibližně ±100 *mm*. Přesné rozpětí záleží na velikosti bubnu. Pokud je jeden z limitů překročen, tak je kotel odstaven z provozu.

Při překročení maximálního povoleného tlaku v kotli se otevře pojistný ventil a přebytečná pára je odvedena pojistným potrubím nad střechu kotelny a kotel je odstaven z provozu. Jedná se o havarijní stav.

Vyrobená pára z kotle proudí do parního potrubí a dále do hlavního parního rozdělovače. Rozdělovač sbírá páru ze všech instalovaných kotlů a poté ji rozděluje do jednotlivých větví přívodu ke spotřebičům. Konstrukčně je rozdělovač řešen jako z obou stran zaslepená trubka většího průměru než je parovodní potrubí, aby pára od

kotlů snížila svojí rychlost a lépe pak tekla do jednotlivých větví parního systému. Rozdělovač musí být odvodněn, aby v něm při odstávce systému nezůstával kondenzát a nedocházelo při najíždění k vodním rázům.



Obr. 4 Princip fungování parního plamencového žárotrubného kotle spalujícího zemní plyn [11]

Odluh z kotle byl dříve prováděn ručně obsluhou a byl v řádu procent parního výkonu kotle. Dnes už tomu tak není a je řízen automatikou od vodivosti kotlové vody. Pokud vodivost překročí dovolenou mez, tak se ventil odluhu otevře a zůstane otevřen, dokud vodivost neklesne zpět pod dovolenou mez. Tímto opatřením se výrazně snížil přebytečný odluh z kotle a tím pádem klesla ztráta tepla v odluhu. Odluhuje se ve výšce hladiny vody v bubnu, jelikož u hladiny je voda s nejvyšší koncentrací solí.

Odkal je prováděn v nejnižším místě kotle, jelikož má za úkol odstranit usazeniny ze dna kotle. Odkaluje se periodicky a diskontinuálně. U starších zařízení se odkaluje ručním ventilem. U kotelen s bezobslužným provozem se odkaluje automaticky. Pohon ventilu je často pneumatický, aby mohl být rychle otevřen a zase zavřen. Odkal je zaveden většinou nejdříve do expanderu, aby se pára, vzniklá při expanzi vody z kotle za atmosférického tlaku, oddělila a zbylá voda dále teče do vychlazovací jímky. Pára je vyvedena nad budovu kotelny. Uvolněná pára může být zavedena do napájecí nádrže nebo do rekuperačního výměníku a předehřívat vodu, čímž se sníží tepelné ztráty systému.

Pokud je požadavek maximální účinnosti na úkor investičních nákladů, tak lze ke kotli nainstalovat předehřev spalovacího vzduchu spalinami. Tuto jednotku nelze integrovat do kotle a musí být postavená mimo kotel. Vzduch z prostoru kotelny je nasáván nejdříve do předehřevu a teprve poté je vzduchovodem přiveden k hořáku. Docílí se vyšší teploty nasávaného vzduchu hořákem a tím pádem vyšší teploty spalin za hořákem a sníží se spotřeba paliva.

Akumulace tepla v kotli

Žárotrubný kotel má velký objem vody v parním prostoru a díky tomu je schopen akumulovat velké množství energie v syté kapalině, která může pokrývat krátkodobé špičky odběru páry. Část energie je také akumulována v železe kotle, ale je to poměrově malé množství a nelze ji reálně využít pro rychlé odběry. Základní vzorec na výpočet akumulační konstanty kotle je stejný jako pro akumulaci v akumulátoru (2) [1]. Určuje,

kolik páry vznikne při poklesu tlaku z jednoho kilogramu syté kapaliny. Ve vztahu je *i'* entalpie vody, *i''* entalpie páry a c_{Fe} je měrná tepelná kapacita oceli. Stav jedna je při provozním tlaku a stav dvě při tlaku minimálním.

$$\alpha_p = \frac{i'_1 - i'_2 + k(t'_1 - t'_2)c_{Fe}}{i''_2 - i'_2} \quad (2)$$

Pokud vypočteme pro názorný příklad akumulační konstantu podle vztahu (2) a rozdělíme ji na složku akumulace v syté kapalině (3) a v železe (4), tak je vidět, že v železe je akumulace nepatrná.

Tab. 1 Parametry příkladové akumulace tepla v kotli

Tlak provozní	20	*bar*
Tlak minimální	11	*bar*
Teplota páry při minimálním tlaku	184,1	*°C*
Teplota páry při provozním tlaku	212,4	*°C*
Entalpie páry při minimálním tlaku	2780,7	*kJ/kg*
Entalpie vody při minimálním tlaku	781,2	*kJ/kg*
Entalpie vody při provozním tlaku	908,6	*kJ/kg*
Konstanta k	0,3	
Měrná tepelná kapacita oceli	0,46	*kJ/kgK*

$$\alpha_p = \frac{i'_1 - i'_2}{i''_2 - i'_2} = \frac{908{,}6 - 781{,}2}{2780{,}7 - 781{,}2} = 0{,}064\,\frac{kg}{kg} \quad (3)$$

$$\alpha_p = \frac{k(t'_1 - t'_2)c_{Fe}}{i''_2 - i'_2} = \frac{0{,}3 \cdot (212{,}4 - 184{,}1)}{2780{,}7 - 781{,}2} = 0{,}002\,\frac{kg}{kg} \quad (4)$$

Tlaky nabíjecí, vybíjecí a entalpie jsou vidět v tabulce Tab. 1. Jelikož je poměr množství tepla akumulovaného ve vodě a v mase kotle přibližně 1:32 a protože na pokrytí rychlých špiček bude mít masa kotle minimální vliv, bylo by vhodnější tuto složku zanedbat. Pro přesnost výpočtu je ale v technických výpočtech zachována.

V případě využití kotle jako akumulační jednotky je problém s vyšším přestřikem vody do parního systému, jelikož dochází k velmi rychlému varu vody a lokálním vzedmutím hladiny. Přestřik má špatný vliv na systém, jelikož se jedná o kapky vody letící rychlostí páry, které špatně reagují na změny směru. Negativní dopad vody v parním systému je například vyšlehání armatur.

Ke snížení přestřiku je na výstupu páry z kotle instalován takzvaný demistr. Demistr je zařízení z nerezu, fungující na principu labyrintu. V případě přestřiku je většina vody zastavena tímto prvkem a vrací se do kotle, zatímco pára pokračuje dále do systému. Přestřik se tímto výrazně sníží, ale nezmizí úplně. Demistr se instaluje vždy, když má kotel přehřívák, aby se chránil a prodloužila se jeho životnost. Doporučuje se použít i při velkých odběrech syté páry z kotle.

1.2.6. Kondenzátní nádrž a čerpadla

Kondenzát v systému, kde hlavním médiem je sytá pára, vzniká vždy, když je páře odebráno teplo. Pára nemůže být podchlazená, protože je na mezi sytosti, takže vzniká kondenzát, který je buďto ve vznosu nebo ve vrstvičce na povrchu trubky. Kondenzát

tedy vzniká například při kondenzaci ve spotřebiči, při tepelných ztrátách při proudění potrubím, nebo když je systém odstaven, vychladne a pára v potrubí zkondenzuje. Ve všech těchto případech je potřeba vzniklý kondenzát odvést. Jako sběrná nádoba slouží kondenzátní nádrž, což je válcová nebo hranatá nádoba otevřená do atmosféry. Všechna kondenzátní potrubí jsou vedena ve spádu směrem ke kondenzátní nádrži a pro dopravu kondenzátu tedy slouží jak tlak ostré páry, tak samotíž kapaliny.

Obr. 5 Kondenzátní modul obsahující kondenzátní nádrž firmy BOSCH a kondenzátní čerpadla [12]

Strana páry a strana kondenzátu je oddělena odváděči kondenzátu, zařízeními fungujícími na různém principu, ale všechny se stejnou funkcí. Když přiteče kondenzát, tak akční člen zareaguje a otevře se. Pokud všechen kondenzát odteče a zůstane jenom pára, tak akční prvek člen a páru do kondenzátního systému nepustí. Podle principu se dělí odváděče do hlavních kategorií:

- Plovákové
- Termodynamické
- Termostatické kapslové
- Bimetalové
- Zvonové

V průmyslových kotelnách se nejčastěji používají odváděče kondenzátu plovákové, protože jsou velmi spolehlivé, pracují za velkého rozsahu teplot a mají jednoduchou konstrukci. Jako druhé nejčastější jsou odváděče termodynamické.

V případě, že je požadována 100% suchost páry, tak jsou do potrubí instalovány separátory vlhkosti, které z páry odstraní vodu ve vznosu. Fungují na principu labyrintu, kde pára musí tímto labyrintem projít. Voda má menší hybnost, takže reaguje dobře na změny směru, oproti tomu voda má hybnost větší a tím pádem při náhlé změně toku média pokračuje v původním směru pohybu a narazí a překážku. Následně steče dolů a pokračuje přes odváděč kondenzátu do nádrže.

Pokud je kondenzátní nádrž položená výše než je místo, odkud je odváděn kondenzát, tak se doporučuje použít zvedač kondenzátu, aby byla zajištěna doprava kondenzátu do nádrže.

Zvedač kondenzátu může přepínat mezi režimem zvedače a režimem odváděče a naopak. Pokud je v kondenzátním systému dostatečný tlak, tak funguje jako normální plovákový odváděč kondenzátu. Jestliže ale tlak není dostatečný, tak přepne do režimu zvedače. Hnacím médiem je v tomto režimu hnací pára, přivedená tenkou trubičkou ke zvedači. Důležité je, aby hnací pára měla větší tlak než pára na rozmezí pára/kondenzát. [13]

Protože kondenzát může mít teplotu vyšší než je teplota varu při atmosférickém tlaku, tak při vstupu do nádrže dojde k uvolnění par a snížení teploty zbylé vody na mez sytosti. Množství uvolněné páry je v jednotkách procent celkového objemu kondenzátu a odchází výfukovým potrubím nad kondenzátní nádrž.

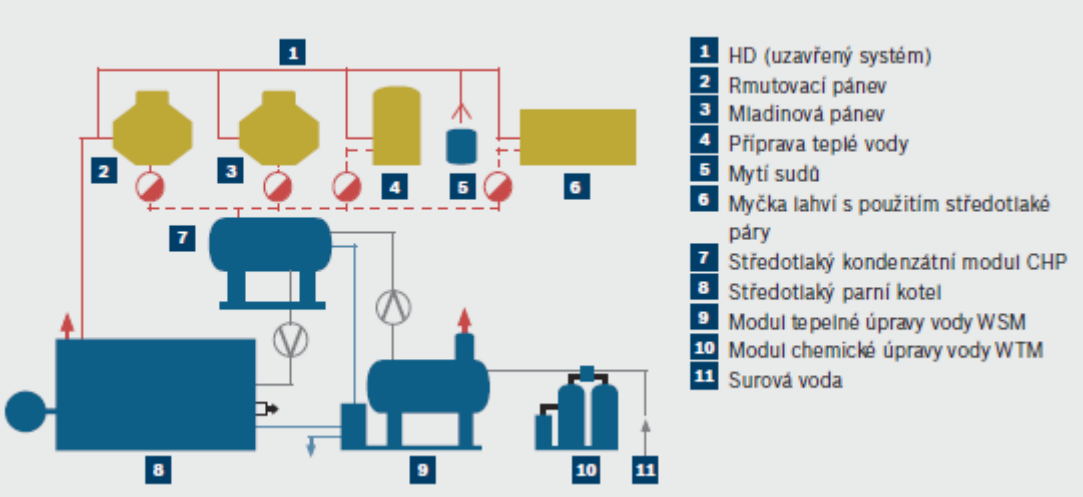
Návratnost kondenzátu není oproti okruhu elektrárny s kondenzační turbínou velká, pohybuje se kolem 60-80 %. Na rozdíl od elektrárny některé spotřebiče páru zapracovávají do výroby a tím pádem se od nich nevrací žádný kondenzát. Zbylé ztráty jsou způsobeny například netěsnostmi potrubí, ucpávkami ventilů a čerpadel, odluhem a odkalem kotle a expanzí kondenzátu při vstupu do napájecí nádrže. Ztráty kondenzátu musí být kompenzovány dopouštěnou vodou z úpravny.

Ve většině případů je velikost kondenzátní nádrže menší než napájecí. Je to dáno ztrátou vody z okruhu. Pokud by byla návratnost kondenzátu přibližně 100%, tak by byly nádrže stejně velké. Obecně se tedy volí velikost nádrže v metrech krychlových stejná jako množství přitékajícího kondenzátu do kotelny v tunách za hodinu.

Kondenzát je přepouštěn obvykle bez jakékoliv úpravy z kondenzátní do napájecí nádrže, kde je zaústěn do odplyňovače společně s přídavnou vodou z úpravny a dojde k jeho odplynění. Některý kondenzát je nutné upravovat podobně jako doplňovací vodu, například v potravinářství. K přepouštění slouží kondenzátní čerpadla, která mají menší výtlačnou výšku než napájecí čerpadla, jelikož slouží jenom k přečerpávání kondenzátu z jedné nádrže do druhé. Kondenzátní čerpadla jsou taky vždy minimálně dvě, aby se zajistil trvalý provoz systému i při poruše jednoho z nich.

U pivovarů a dalších průmyslových podniků, kde může při prasknutí parního výměníku dojít k průniku produktu do kondenzátu je doporučeno instalovat na kondenzátní potrubí systém hlídání kvality kondenzátu, který se sestává z měření vodivosti, trojcestného ventilu a vyhodnocovacího zařízení. V případě, že vodivost náhle vzroste,

tak trojcestný ventil zabrání průtoku znečištěného kondenzátu do systému a přepne na odpadní potrubí, zároveň signalizuje poruchu do velína.



Obr. 6 Koncept výroby páry pro novostavbu středních a velkých pivovarů s uzavřeným kondenzátním systémem [14]

Jak je vidět na Obr. 6, tak v některých případech lze v pivovarech využít systém tlakového kondenzátního systému. Tento systém je investičně dražší, ale snižuje náklady na přídavnou vodu, jelikož nedochází k expanzi páry z kondenzátu v otevřené nádrži. Zároveň stačí nižší výtlačná výška čerpadel dávkující vodu do kotle, protože je celý kondenzátní systém pod stálým tlakem, což má za následek další ušetření provozních nákladů. Veškerý kondenzát je shromažďován ve středotlakém kondenzátním modulu, kde je udržována stálá hladina pomocí dopouštění napájecí vody z modulu tepelné úpravy vody. Kondenzát je již odplyněný a je bez jakékoliv úpravy čerpán do kotle. Funkce napájecích a kondenzátních čerpadel jsou v tomto případě prohozené.

1.2.7. Akumulátor

Akumulace tepla

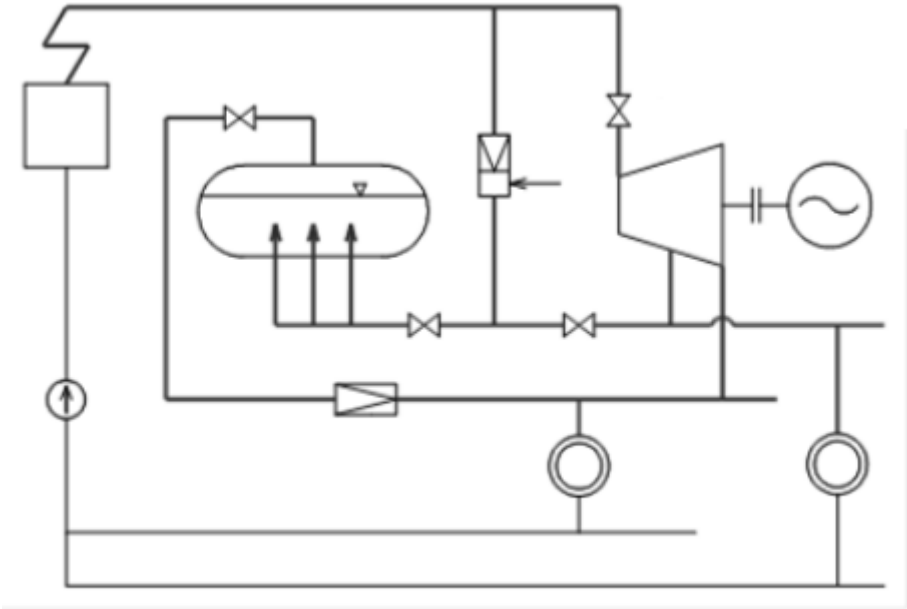
Poslední volitelnou částí okruhu je akumulátor, sloužící pro ukládání tepelné energie v momentě, kdy není potřeba a k uvolňování v případě, kdy potřeba páry přesáhne maximální výkon instalovaných kotlů. Existuje několik druhů akumulátoru, lišících se principem ukládání a uvolňování tepelné energie. Také se dělí podle média, ve kterém se energie ukládá. Existují i akumulátory teplé vody, ale ty zde nebudou zmíněny, jelikož v parním systému nemají využití.

Dělení podle typu média:

- Parní – Pára je natlakovaná do zásobníku a v případě potřeby rovnou teče do systému
- Vodní – energie je uložena v syté kapalině, kde při poklesu tlaku dojde k vývinu páry

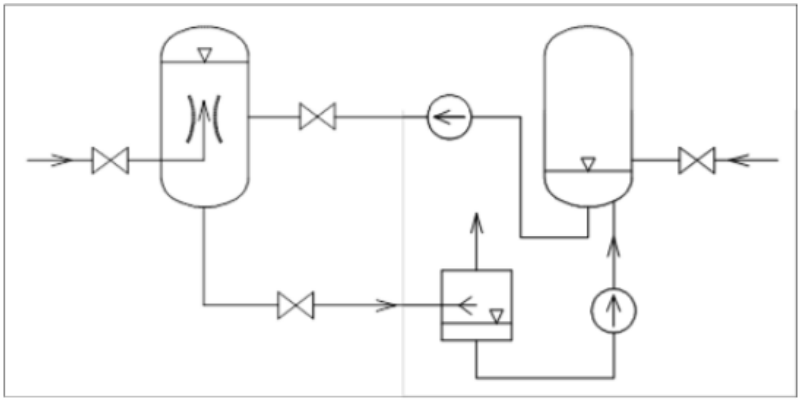
Dělení podle principu ukládání a uvolňování:

- Spádový akumulátor Ruthsův – energie je ukládána v syté vodě o vyšším tlaku, než je tlak potřebným pro spotřebiče. Pokud je přebytek parního výkonu, tak pára proudí do akumulátoru, zvyšuje teplotu vody a tím ho nabíjí. V případě nedostatku je akumulátor spojen s parní sítí a díky rozdílu tlaků se uvolňuje pára ze syté vody. Princip funkce je vidět na Obr. 7. Výhodou tohoto akumulátoru je jeho jednoduchost.



Obr. 7 Oběh teplárny s protitlakou parní turbínou s Ruthsovým spádovým akumulátorem [15]

- Expanzní akumulátor – principem podobný spádovému akumulátoru, s tím rozdílem, že expanze vody se neděje v akumulační nádobě, nýbrž v expanzní komoře. Princip je vidět na Obr. 8. Expanze probíhá při nástřiku syté vody do komory, část vody se nevypaří a putuje zpět do akumulační nádoby. Zde na rozdíl od spádového akumulátoru k dopouštění zásobníku neslouží pouze nabíjecí pára, ale také dopouštěná voda. Nevýhodou je potřeba čerpadla.



Obr. 8 Soustava s expanzním akumulátorem [15]

Jestliže akumulace v kotli bude dostatečná na pokrytí špiček odběru páry, tak není potřeba instalovat dodatečný akumulátor, jelikož kotel jako takový má i funkci akumulátoru. Průtočný kotel takovouto funkci nemá a pro akumulaci je vždy nutno instalovat akumulátor.

Akumulace chladu

Další možností akumulování tepla páry je akumulace do chladu díky absorbčnímu chladícímu zařízení. Absorbční chlazení vyrábí svým oběhem z vodní páry na jedné straně studenou vodu na straně druhé.

Akumulace je možná buďto do studené vody nebo do akumulačních modulů.

Studená voda musí mít o cca dva stupně nižší teplotu než je voda potřebná spotřebiči chladu, aby byla zajištěna schopnost akumulace. Akumulátor je izolovaná nádoba s velkým obsahem vody. Nádoba bude velkých objemů, takže bude postavena vždy mimo prostor kotelny (snížení nákladů na obestavěný prostor).

Akumulace do akumulačních modulů využívá speciální akumulační nádoby naplněné kulovými moduly s teplonosnou látkou. Většinu objemu zabírají kulové moduly a zbytek objemu vyplňuje teplonosná kapalina (například monoethylenglykol). [16]

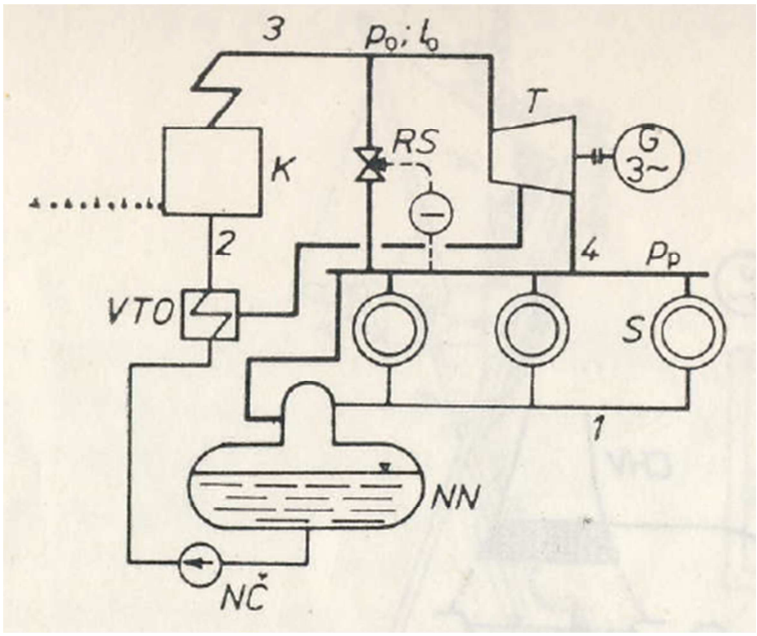
V případě absorpčního chlazení je teplonosná kapalina voda. Teplonosná látka uvnitř koulí mění své skupenství a tím akumuluje energii. Podle teploty v oběhu a teploty, kdy modul mění fázi, se určí typ teplonosné látky. Vybírá se z tabulky Tab. 2.

Tab. 2 Specifická data pro 1m^3 modulů akumulátoru chladu [16]

Typ modulu	Teplota změny fáze	Latentní teplo	Citelné teplo		Faktor přenosu tepla		Hmotnost modulů	Toxicita LD50	Limitní operační teploty
	Tst	Ql	Solid Qss	Liquid Qsl	cristallisation Kvcr	fusion Kvfu			
	°C	kWh	kWh/°C	kWh/°C	kW/°C	kW/°C	Kg	mg/Kg	°C
SN.33	-33	44,6	0,7	1,08	1,6	2,2	724	2600	-40
SN.29	-28,9	39,3	0,8	1,15	1,6	2,2	681	1200	
SN.26	-26,2	47,6	0,85	1,2	1,6	2,2	704	1200	
SN.21	-21,3	39,4	0,7	1,09	1,6	2,2	653	1300	
SN.18	-18,3	47,5	0,9	1,24	1,6	2,2	706	2700	60
AN.15	-15,4	46,4	0,7	1,12	1,15	1,85	602	8400	
AN.12	-11,7	47,7	0,75	1,09	1,15	1,85	620	5000	
AN.10	-10,4	49,9	0,7	1,07	1,15	1,85	617	11000	-25
AN.06	-5,5	44,6	0,75	1,1	1,15	1,85	625	18000	
AN.03	-2,6	48,3	0,8	1,2	1,15	1,85	592	58000	
AC.00	0	48,4	0,7	1,1	1,15	1,85	560	85000	60
AC.27	27	44,5	0,86	1,04	1,15	1,85	867	2500	

1.3. Oběh teplárny na zemní plyn s parní turbínou

Oběh teplárny zahrnuje jak výrobu tepla, tak i elektřiny. Jedná se o Rankin–Clausiův cyklus, kde pára z kotle vstupuje do turbíny, expanduje a poté proudí ke spotřebičům. Zpátky se vrací ve formě kondenzátu a přes vodní hospodářství se opět čerpá do kotle. Ve většině případů je elektřina vyráběna jenom pro svoji potřebu, jelikož se při dnešních cenách málo kdy vyplatí elektřinu dodávat do sítě a v průmyslových podnicích je turbína regulována podle potřebného tepelného výkonu parních spotřebičů, nikoliv na maximální výrobu elektřiny. Základní okruh teplárny je vidět na Obr. 9.

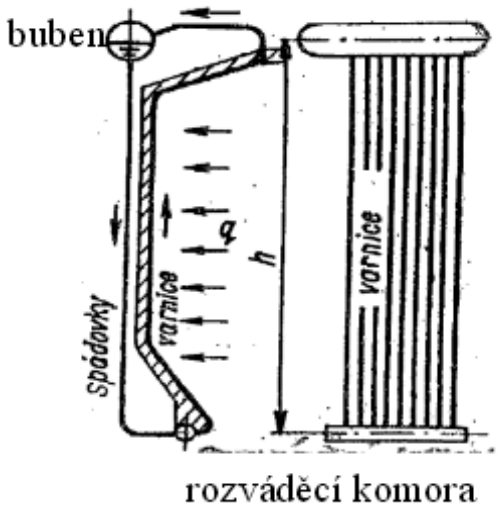


Obr. 9 Schéma teplárny s protitlakovou parní turbínou [4]

1.3.1. Kotel

Základem je obvykle kotel vodotrubný s přirozenou cirkulací vody vyrábějící páru o tlaku v řádu až jednotek MPa. Kotel má vždy přehřívák páry pro zvýšení teploty výstupní páry z kotle na co nejvyšší hodnotu. Vysoký tlak a teplota jsou z důvodu co nejvyššího entalpického spádu na turbíně a tím vyšší účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou.

Nejběžnější typ kotle na výrobu přehřáté páry v průmyslovém podniku je vodotrubný kotel. Jedná se o kotel s integrovaným přehřívákem páry a ekonomizérem. Teplo je dodáváno spalováním zemního plnu v hořáku. K pohybu vody ve výparníku slouží přirozená cirkulace vody způsobená rozdílem hustot v horní a dolní části kotle.



Obr. 10 Schéma okruhu výparníku s přirozeným oběhem vody [17]

Hlavní částí kotle je výparník, který se sestává z bubnu, spádových trubek, rozváděcích komor a varných trubek. Do spodní části bubnu je přiváděna napájecí voda z ekonomizéru, aby byl podpořen přirozený oběh vody. Spádovými trubkami proudí voda do spodní části výparníku (rozváděcí komory) a teprve při cestě zpátky do bubnu varnicemi se odpařuje. Na jeden oběh se neodpaří celý objem přidané vody, takže voda oběhne několikrát, než se odpaří. Pára se odděluje od vody v bubnu a proudí dále do přehříváku. [17]

Voda nejdříve proteče ekonomizérem, poté se vypaří ve výparníku a nakonec proudí do přehříváku, kde se zvýší její teplota na požadovanou hodnotu. Na rozdíl od velkoprostorového kotle, který se používá v středotlakých kotelnách, má vodotrubný kotle menší vodní objem, což znamená i menší akumulační schopnost samotného kotle. Pro zvýšení účinnosti lze i zde instalovat předehřev spalovacího vzduchu.

Ostrojení kotle obsahuje stejné části jako u kotle středotlakého. Odluhuje se z bubnu, odkal je řešen v nejnižším místě výparníku.

Na obrázku Obr. X je přepravitelný kotel typu OKP, který je vodotrubný, ale má dva bubny s vodou. Je to ideální kotel pro průmyslové teplárny kvůli své jednoduché přepravitelnosti, kompaktním rozměrům a široké výkonové řadě. Jeho dva bubny jsou uloženy podélně, propojení membránovými stěnami tvoří spalovací komoru ve tvaru „D“. Spalovací komora je dokonale těsná, čímž umožňuje přetlakové spalování zemního plynu. [18]

Obr. 11 Vodotrubný kotel na přehřátou páru s přirozenou cirkulací. Typ OKP, výrobce DUKLA STROJÍRNY [19]

1.3.2. Příslušenství

Příslušenství teplárny se v principu neliší od středotlaké parní kotelny. Bude obsahovat napájecí nádrž, napájecí čerpadla, úpravnu vody, kondenzátní nádrž a případně akumulátor páry a další doplňkové zařízení pro provoz turbíny. Rozdíl bude v potřebné výtlačné výšce napájecích čerpadel pro kotel. Pokud bude instalována redukce přehřáté páry vstřikem vody do proudu páry, tak bude potřeba vybavit úpravnu vody zařízením, které je schopno vyrábět demineralizovanou vodu, jelikož požadavky na kvalitu vody pro zástřik jsou přísnější než pro vodu kotlovou.

1.3.3. Turbína

Základní princip parní turbíny je expanze přehřáté vodní páry na lopatkách turbíny, čímž se transformuje tepelná energie na energii mechanickou a následně ji generátor, který je spojený hřídelí s turbínou, mění na energii elektrickou. Otáčky turbíny i generátoru jsou synchronní se sítí, což je 3000 ot/min.

Výkon a tepelná účinnost tepelného celku závisí hlavně na entalpickém spádu na turbíně. Zjednodušeně lze říct, že pokud budeme zvyšovat tlak a teplotu na vstupu do turbíny a snižovat tlak na výstupu, tak bude entalpický spád růst a tím bude růst i tepelná účinnost a výkon tepelného celku. [20]

Parní turbíny v teplárně se používají dvou druhů podle tlaku za turbínou. Jedná se o turbínu protitlakou a turbínu kondenzační odběrovou. O tom, kterou turbínu je vhodné instalovat, rozhoduje požadavek na přednost výroby elektřiny nebo tepla. Pokud je větší důraz na výrobu elektřiny, tak se používá turbína kondenzační odběrová. Jestliže

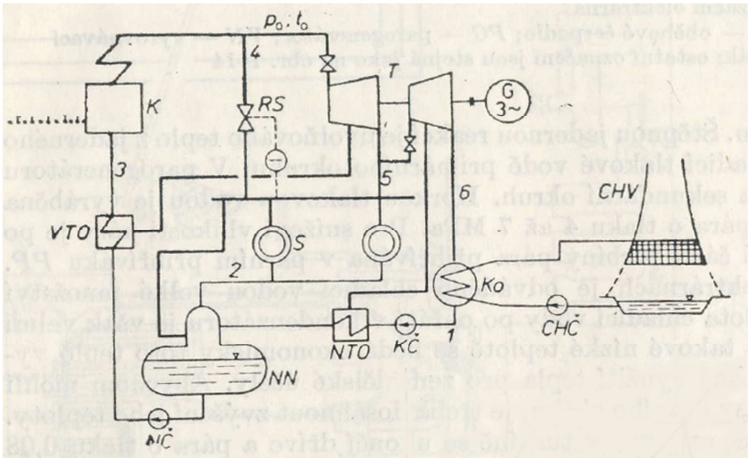
naopak potřebujeme regulovat turbínu podle požadované dodávky tepla, tak je vhodnější turbína protitlaková. [5]

Protitlaková parní turbína

Turbína používaná při přednostní potřebě tepla, příklad oběhu s protitlakou turbínou je na Obr. 9. Na výstupu z turbíny je tlak, který potřebují spotřebiče pro svůj provoz. U pivovarů je to přibližně 1,2-1,5 *MPa*. Pára na výstupu z turbíny je sytá, jelikož se veškeré přehřátí využije pro výrobu elektřiny. Množství vyrobené elektřiny je nižší než u kondenzační turbíny, ale není potřeba kondenzátoru a chladícího okruhu. Pokud je množství vyrobené elektřiny v řádu stovek kilowatt, tak se turbína nazývá točivá redukce páry, jelikož její hlavní funkcí je snížení tlaku páry.

Kondenzační odběrová parní turbína

Kondenzační turbína se používá při přednostní potřebě elektřiny. Expanze v turbíně probíhá stejně jako u protitlakové turbíny, ale výstupní pára je sytá nebo i mokrá, aby se dosáhlo co největšího výkonu turbíny. Ihned po expanzi proudí pára do kondenzátoru, kde je chlazena chladící vodou a kondenzuje. Kondenzát se poté vrací do kondenzátní nádrže.



Obr. 12 Oběh s kondenzační odběrovou parní turbínou, chladící okruh s chladící věží [4]

Odběr nebo odběry z turbíny slouží pro dodávku páry na určité tlakové úrovni. Odběrová pára expanduje pouze částí turbíny a poté je odvedena do parního systému průmyslového podniku. Odběrem páry z turbíny se sníží množství vyráběné elektřiny. Pokud je potřeba pouze elektřiny, tak jsou odběry zavřeny a pára protéká celou turbínou.

Pro chlazení páry je potřeba chladící okruh. Chladit lze buďto vodou nebo vzduchem. Vzduch má nízkou tepelnou kapacitu a je tedy potřeba velkých teplosměnných ploch, proto se častěji používá chlazení vodou. Vodní hospodářství potřebuje oběhová čerpadla a chladící věž. Také je potřeba chladící vodu upravovat, takže je nutno zvětšit kapacitu úpravny vody.

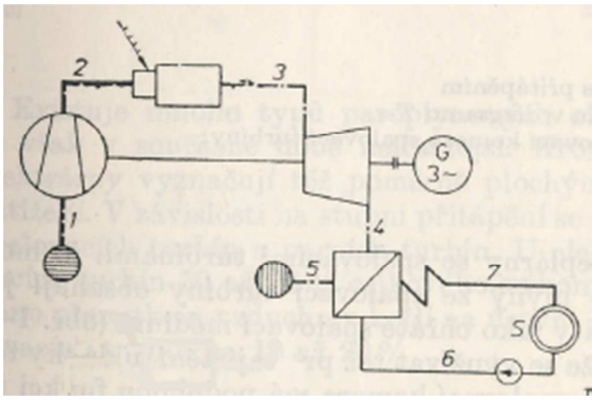
Jelikož je v pivovaru hlavní potřeba tepla, tak odběrová kondenzační turbína není vhodná.

1.4. Oběh s plynovou turbínou a kotlem na odpadní teplo

Oběh vyrábí elektřinu i teplo a tyto dvě složky na sobě mohou být částečně nezávislé, na rozdíl od oběhu s parní turbínou. Elektřina je vyráběna v plynové turbíně, poháněcím médiem jsou horké spaliny, které vznikají spálením zemního plynu ve spalovací komoře. Oběh výroby elektřiny je Ericsson-Braytonův. Po průchodu turbínou proudí spaliny do kotle na odpadní teplo, kde předají zbytek tepla v nich obsaženého.

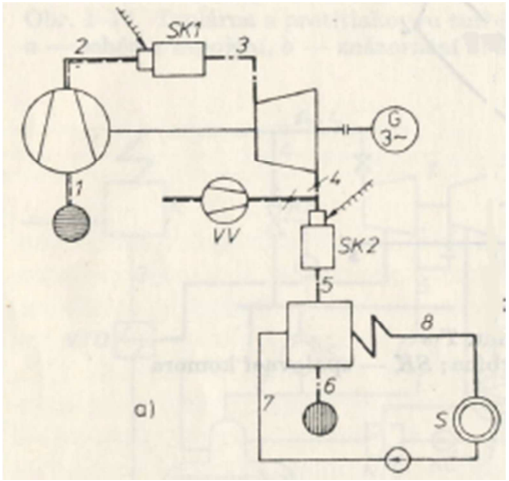
Pára je tedy vyráběna v kotli na odpadní teplo. Kvalita a množství vyrobené páry přímo závisí na teplotě a množství spalin vystupujících z turbíny. V případě větší potřeby tepla než obsahují spaliny je nutno použít přídavný hořák mezi kotlem a turbínou, který přivádí palivo. Palivo společně s přebytečným vzduchem ve spalinách shoří a tím zvýší teplotu spalin vstupujících do kotle.

Výhoda tohoto uspořádání je v nezávislosti elektrického výkonu na tepelném. Maximální výkon turbíny se navrhuje podle diagramu roční potřeby elektrické energie.



Obr. 13 Oběh teplárny se spalovací turbínou a kotlem na odpadní teplo, dodávka tepla v páře. [4]

V případě malého tepelného výkonu ve spalinách z turbíny oproti výkonu kotle jsou spaliny brány jenom jako předehřev spalovacího vzduchu pro kotel. Toto je umožněno velkým přebytkem spalovacího vzduchu na výstupu z turbíny. Kotel má tedy vlastní kombinovaný hořák na zemní plyn, který pracuje jak se spalinami z turbíny, tak vzduchem z kotelny a upravuje poměr mezi nimi pro ideální spalovací podmínky. Příklad tohoto oběhu je na obrázku Obr. 13.



Obr. 14 Oběh s plynovou turbínou s přitápěním, celek kotle běžně obsahuje hořák i teplosměnné plochy na výrobu páry [4]

1.4.1. Kotel na odpadní teplo

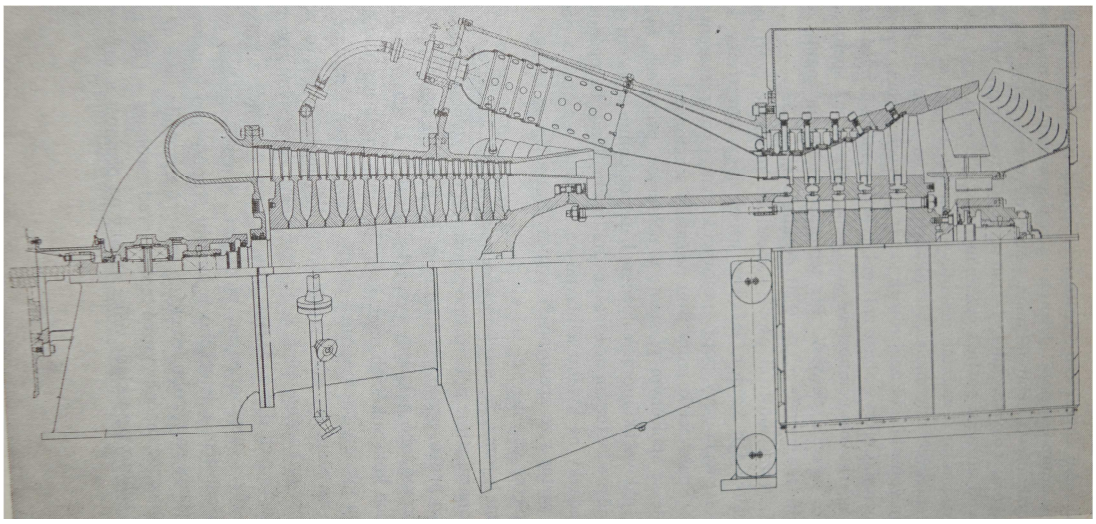
Konstrukčně je kotel realizován stejně jako středotlaký kotel pro výtopnu. Jedná se tedy o plamencový žárotrubný kotel s velkým vodním objemem. Příklad, jak takový kotel vypadá, je na Obr. 15. Jedná se o kotel od firmy BOSCH. Spaliny jsou zaústěny do plamence a automatika kotle se stará o správný přebytek spalovacího vzduchu a teplotu plamene.

Obr. 15 Spalinový kotel s vlastním spalováním od firmy BOSCH [21]

Hořák na kotli má vlastní přívod zemního plynu, který zajišťuje dostatečný tepelný výkon kotle i v případě, kdy spaliny z turbíny požadovaný výkon nedodávají. Kotel může fungovat i v případě, kdy je úplně odstavená plynová turbína.

1.4.2. Plynová turbína a její příslušenství

Základní jednotka oběhu, vyrábějící pomocí generátoru elektrickou energii z kinetické energie spalin. Obsahuje kompresor, spalovací komoru a lopatky turbíny. Příklad běžného modelu celku spalovací turbíny je na obrázky Obr. 16. Pro zvýšení účinnosti celku je vhodné instalovat regenerační výměník, který spalinami z turbíny předehřívá vzduch před vstupem do spalovací komory.



Obr. 16 Řez spalovací turbínou o výkonu 6,4 až 7,6 MW_e [22]

Při rozbíhání spalovací turbíny je potřeba celek turbíny roztočit na minimální otáčky, aby se mohlo zahájit spalování paliva a byl dodáván stlačený vzduch z kompresoru. Toho se docílí buďto provozem generátoru v motorovém režimu, takže spotřebovává elektrickou energii místo její výroby, nebo využitím tlakového vzduchu z externího zdroje, který se přivádí do spalovací komory.

U plynové turbíny je potřeba kvůli vysokým investičním nákladům (přibližně 50 – 100 tisíc korun na instalovanou kilowatu) dosahovat co nejvyššího ročního využití. Doporučovaná hodnota je 7 500 *h/rok*. Pokud by bylo využití nižší, tak by se nepříjemně prodlužovala návratnost investice.

Spalovací turbína může pracovat jak s plynnými palivy, tak i s kapalnými palivy. V případě kapalných paliv je potřeba zařadit za turbínu čištění spalin.

Kompresor

Vzduch je nasáván z prostoru kotelny do kompresoru. Kompresor je axiální a je na stejné hřídeli jako turbína, takže pro jeho pohon je použita část vyrobené mechanické energie. V kompresoru dojde ke stlačení a zahřátí vzduchu před vstupem do spalovací komory.

Kompresor je vícestupňový, což znamená, že má větší počet rotorů a statorů, toto je dobře vidět v levé části obrázku Obr. 16. Více stupňů je potřeba v momentě, kdy jeden stupeň nedosáhne požadovaného stlačení vzduchu a počet stupňů roste společně s výkonem celku turbíny. [23]

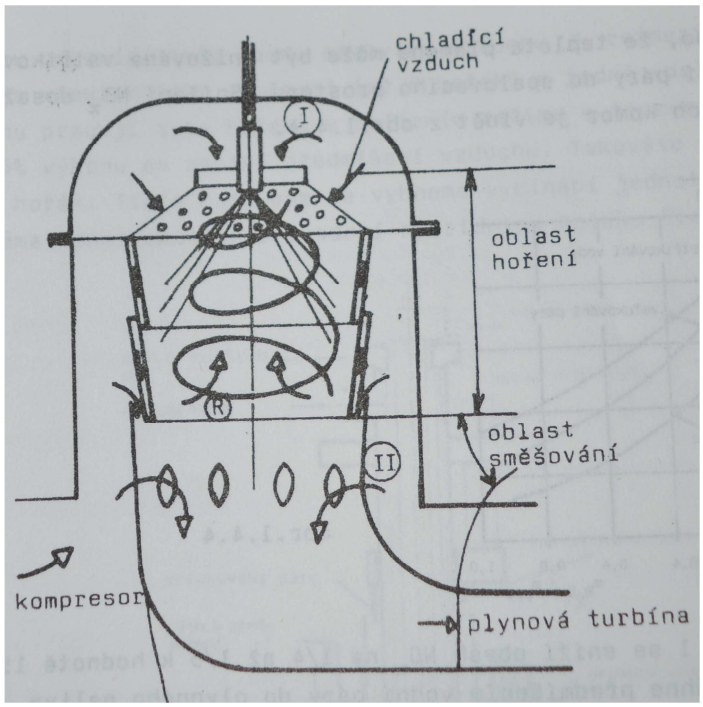
Hlavní parametr kompresoru je kompresní poměr, který udává poměr tlaků vzduchu před a za kompresorem. Jako další parametr je poměr teplot na sání kompresoru a na sání turbíny. Poměr teplot výrazně mění celkovou účinnost plynové turbíny.

Axiální kompresor je největším spotřebičem vyrobené energie turbínou. Může spotřebovávat až 70% výkonu plynové turbíny.

Spalovací komora

Spalovací komory jsou umístěny mezi kompresorem a turbínou po obvodu stroje. Je jich větší počet, pro lepší řízení spalování. Stlačený vzduch proudí do komory, kde je smíchán s palivem a společně spálen. Vznikají horké spaliny, jejichž teplota je regulována množstvím přebytku vzduchu. Teplota se reguluje kvůli materiálu lopatek turbíny, které by se při příliš vysoké teplotě spálily.

Na začátku komory se udržuje malý přebytek vzduchu, aby se zahájilo hoření směsi plynu a vzduchu, většina paliva se spálí a následně se ve směšovací komoře upraví teplota výstupních spalin přimícháním sekundárního vzduchu z kompresoru. Komora je chlazena zvenku, proudícím spalovacím vzduchem. Princip funkce spalovací komory je na obrázku Obr. 17. [24]



Obr. 17 Schéma spalovací komory s jedním hořákem [24]

Turbína

Turbína se skládá z oběžných lopatek a statorových lopatek, které leží proti sobě. Horké spaliny expandují a turbínu roztáčí, čímž pohání generátor vyrábějící elektrickou energii. Turbína je axiální, stejně jako kompresor. Princip funkce je tedy stejný jako u parní turbíny, s rozdílem poháněcího média. U plynové turbíny nehrozí eroze lopatek kapičkami vody, jelikož spaliny nemění v průběhu fázi, takže má delší životnost.

Turbína má oproti kompresoru menší počet stupňů, jelikož lze dosahovat velkých účinností přeměny energie na lopatkách, lopatky jsou schopny zpracovávat velké

entalpické spády ve stupních a tyto spády jsou potřeba kvůli snížení teploty hnacích plynů. [24]

Regenerační výměník

Výměníky se používají rekuperační, kdy je teplosměnnou plochou oddělen vzduch od spalin. Výjimečně se používají výměníky regenerační, kdy obě média smáčí střídavě stejnou plochu.

Rekuperační výměníky jsou většinou deskové konstrukce a desky jsou poskládány po obvodu kruhu a mají evolventní zakřivení. To je z důvodu stále stejného průřezu mezery mezi deskami. Příklad deskového výměníku z turbíny Capstone je na obrázku Obr. 18. [25]

Obr. 18 Deskový regenerační výměník z plynové turbíny Capstone [25]

Spalovací mikroturbíny do 1 MW_e mají hřídel axiálního kompresoru a turbíny na vzduchovém ložisku, čímž odpadá hospodářství chlazení ložisek a tím se sníží investiční a provozní náklady. Průkopníkem a dominantním výrobcem mikroturbín je společnost Capstone Turbine Corporation.

1.4.3. Příslušenství

Příslušenství teplárny se také v principu neliší od středotlaké parní kotelny. Opět bude obsahovat napájecí nádrž, napájecí čerpadla, úpravnu vody, kondenzátní nádrž a případně akumulátor páry a další doplňkové zařízení pro provoz turbíny. Je zde menší pravděpodobnost nutnosti použití akumulátoru páry, jelikož můžou být pro akumulaci využity kotle.

2. Příprava podkladů pro technické řešení

2.1. Stávající situace

Stávajícím zdrojem páry pro celý areál je parovod ze sousední teplárny. Parametry přehřáté páry měřené na vstupu do areálu:

Rozmezí tlaku nakupované páry: 1,18 až 1,24 *MPa*

Rozmezí teploty nakupované páry: 220 °*C* až 265 °*C*

Parní potrubí je za měřicím místem rozvedeno několika nadzemními trasami do míst spotřeby, kde jsou instalovány spotřebiče, převážně výměníky tepla. Přívody páry k namátkou vybraným prohlédnutým výměníkům jsou před regulační armaturou opatřeny samočinným odvodněním. Menší množství páry je využíváno přímo bez použití výměníku a tedy i bez návratu kondenzátu. Při poklesu tlaku pod minimální požadovaný už některé technologie vypadávají.

Minimální požadovaný tlak páry: 1,1 *MPa*

Teplota dle min. tlaku syté páry: 184 °*C*

Kondenzátní potrubí zhruba kopíruje areálový rozvod páry. Pro shromažďování kondenzátu jsou v areálu instalovány kondenzátní nádrže, ze kterých je kondenzát čerpán do hlavní kondenzátní nádrže a pak dále zpět do teplárny.

Průměrná teplota kondenzátu: 80 °*C*

Elektrická energie je přivedena z veřejné distribuční sítě o napětí 22 *kV* a v areálu je dále transformována na nízké napětí 400/230 *V*.

Chlad je po pivovaru rozváděn z centrální výrobny chladu, která je na pozemku Plzeňského Prazdroje, ale je ve vlastnictví Plzeňské Teplárenské. Jedná se o dvě jednotky absorpčního chlazení. Chladicí věže jsou axiální otevřené. Pro výrobu chladu je z teplárny přiváděna teplá voda o teplotě cca 110 °*C*. Zpátečka je vracena zpátky do teplárny.

Výkon absorpčních chladících jednotek: 2 x 1,5 *MW*

Teplotní spád chladící vody: 6/12 °*C*

2.2. Zpracování naměřených dat

2.2.1. Pára

Naměřená data pro páru jsou: tlak páry z teplárny, její teplota a hmotnostní průtok. Data jsou naměřena za celý jeden rok po hodinách. Pokud byly naměřené hodnoty chybné nebo záporné, tak jsou nahrazeny nulou, což pouze minimálně snižuje celkovou reprezentativnost. Naměřené hodnoty průtoku páry jsou pro páru přehřátou dodávanou z teplárny.

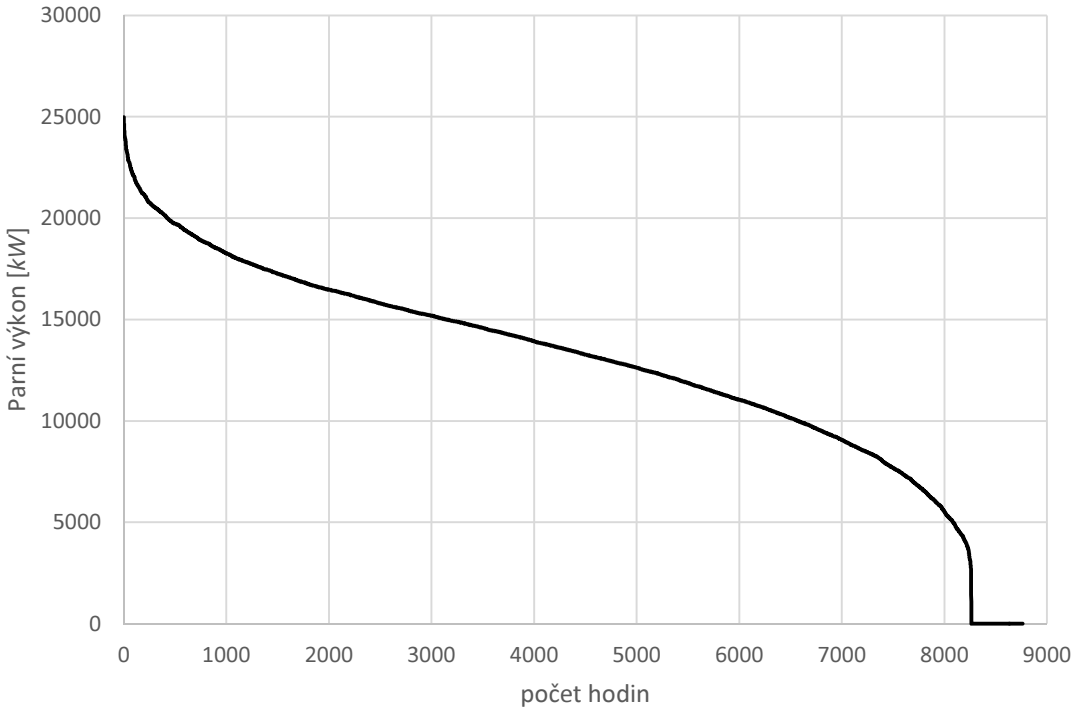
Pro jednodušší porovnávání je potřeba nejdříve přepočítat dodávanou páru na tepelný výkon podle jejího hmotnostního průtoku, entalpie páry a entalpie vratného kondenzátu. Entalpie kondenzátu je uvažována konstantní při teplotě 80 °C a tlaku 1 bar

(kondenzátní nádrž je otevřená do atmosféry). Hmotnostní průtok a entalpie páry jsou proměnné. Výsledný tepelný výkon se pak vypočte podle vzorce (5).

Entalpie kondenzátu: 335,05 *KJ/kg*

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) \quad (5)$$

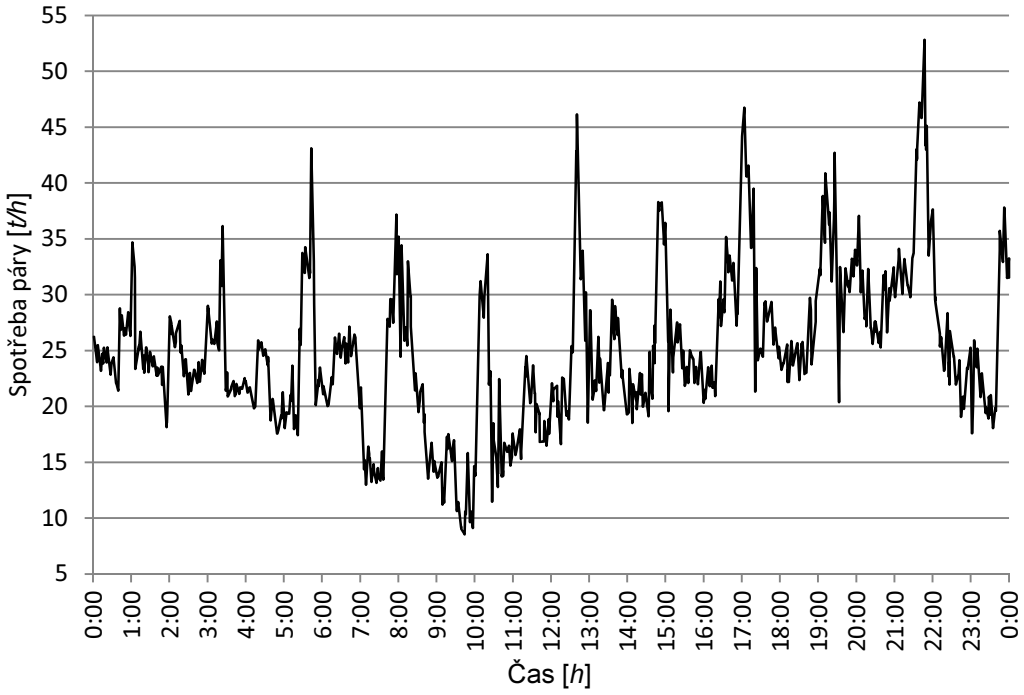
Dodávaný tepelný výkon je poté seřazen od největšího po nejmenší a vynesen do grafu Obr. 19. V grafu na ose x je doba trvání daného výkonu po celý rok, přičemž maximální výkon má dobu trvání jenom jednu hodinu a minimální teoreticky celý rok, což v tomto případě není pravda, jelikož nejmenší výkon je nulový a vzniknul náhradou chybných měření. Proto jako nejmenší výkon je brán nejmenší nenulový a jeho trvání je jen o málo menší než celý rok.



Obr. 19 Diagram ročního trvání tepelného výkonu

Dále je potřeba zjistit, kdy byl naměřen den s maximálním odběrem páry z teplárny. Naměřený maximální den byl 2. 12. Hmotnostní průtok páry je naměřen pro páru přehřátou, takže je nejdříve potřeba ho převést na průtok páry na mezi sytosti. Toho je docíleno tak, že je nejdříve převeden průtok páry přehřáté na potřebný tepelný výkon podle vztahu (5) a poté je výkon převeden zpět na hmotnostní průtok páry, ale na mezi sytosti při stejném tlaku jako je naměřený v danou hodinu, viz vzorec (6). Pak je průběh odběru syté páry v čase vynesen do grafu Obr. 20.

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{Q}_p}{(i_p - i_k)} \quad (6)$$



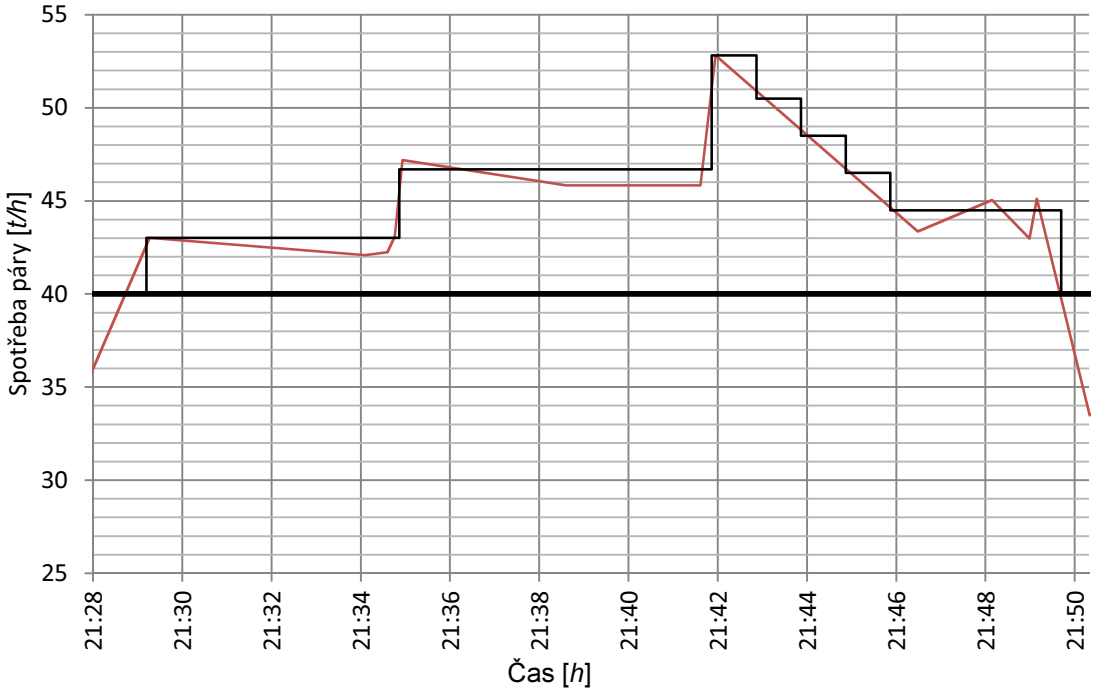
Obr. 20 Průběh odběru syté páry v čase v maximálním dnu (2. 12.)

2.2.2. Určení špičky odběru páry

Pro určení, jestli pro akumulaci tepla budou stačit pouze velkoprostorové kotle nebo bude potřeba akumulátor, případně jak velký, je potřeba určit špičku odběru syté páry. Špička bude menší, pokud se instalují kotle o větším parním výkonu a naopak. Z grafu Obr. 20 je vidět, že špička je ve dni s maximálním odběrem páry a to přibližně před 22. hodinou.

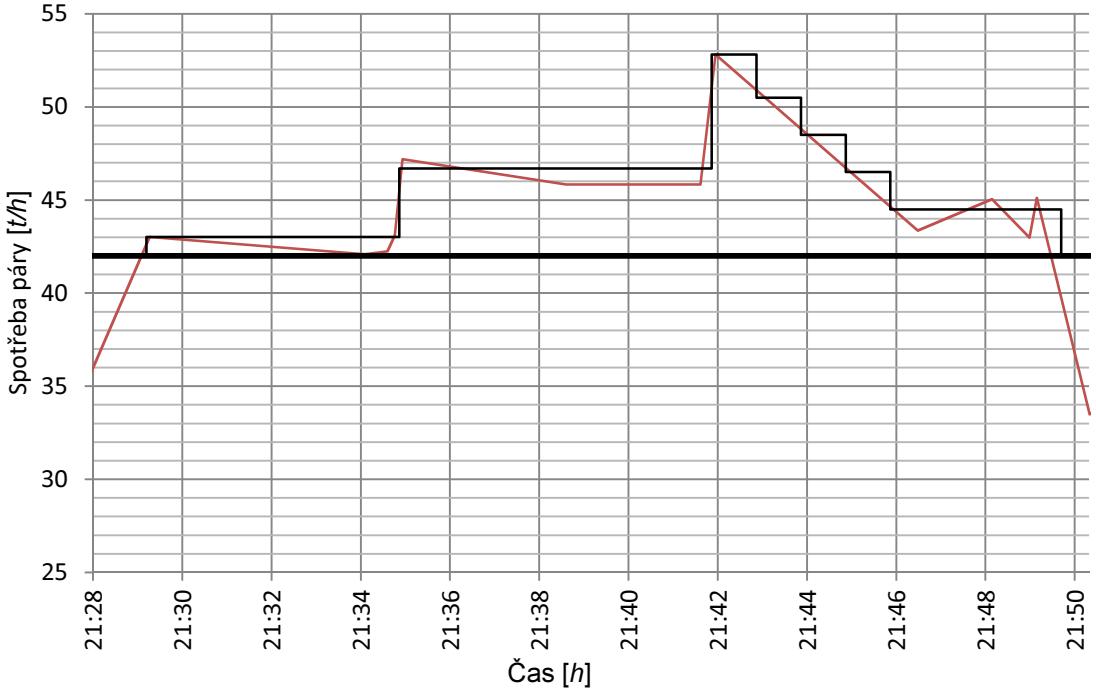
Po přiblížení je špička lépe viditelná na Obr. 21 a dá se určit, jaká energie bude potřeba k jejímu pokrytí. Při určování potřeby akumulované páry jsou časové úseky proloženy střední hodnotou a poté jsou plochy pod nimi sečteny.

Pro výkon kotlů 2 x 20 t_p/h je potřeba akumulovat 2 tuny syté páry.



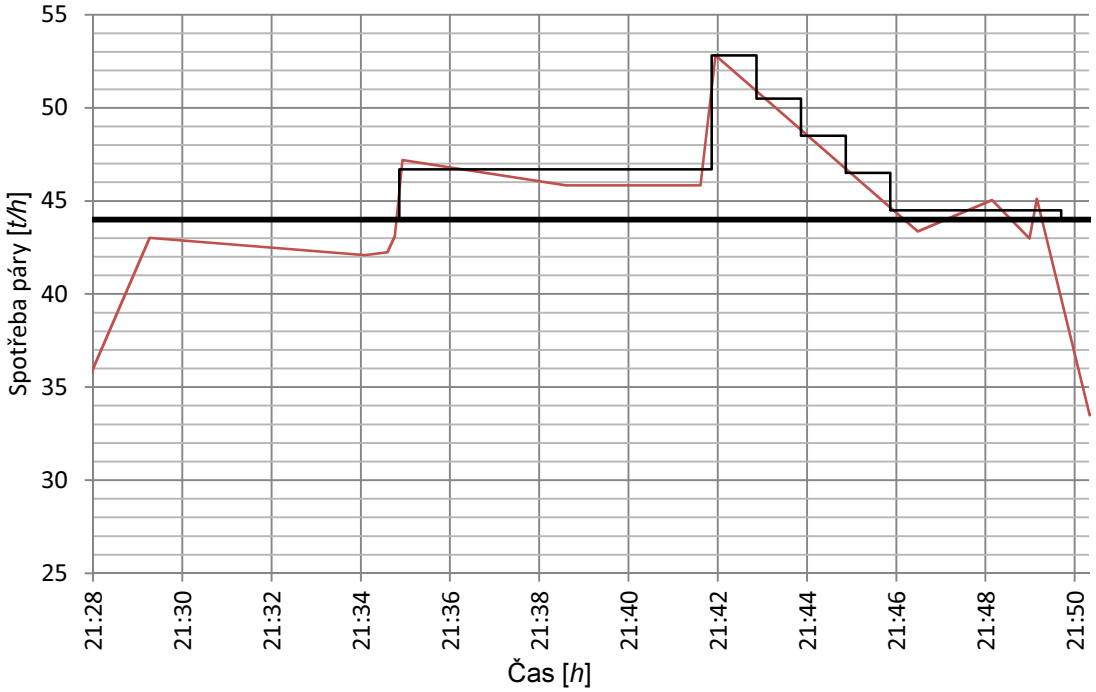
Obr. 21 Diagram špičky odběru páry sloužící k určení potřebné akumulované energie pro výkon kotlů 2 x 20 t_p/h

Pro výkon kotlů 2 x 21 t_p/h je potřeba akumulovat 1,31 tuny syté páry.



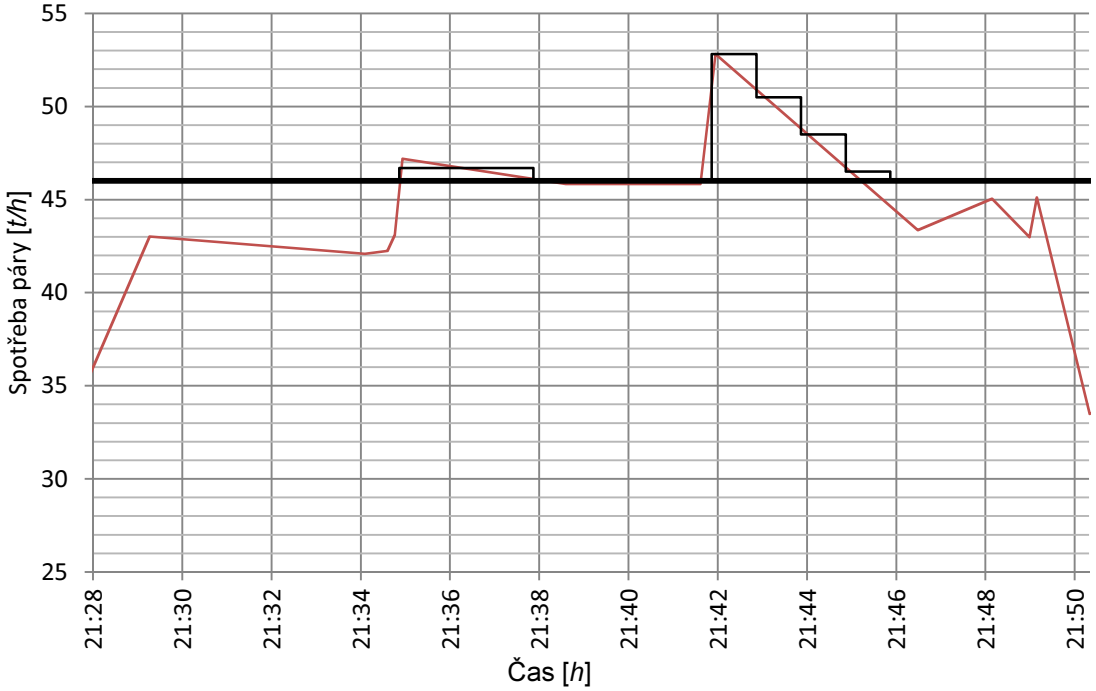
Obr. 22 Diagram špičky odběru páry sloužící k určení potřebné akumulované energie pro výkon kotlů 2 x 21 t_p/h

Pro výkon kotlů 2 x 22 t_p/h je potřeba akumulovat 0,72 tuny syté páry.



Obr. 23 Diagram špičky odběru páry sloužící k určení potřebné akumulované energie pro výkon kotlů 2 x 22 t_p/h

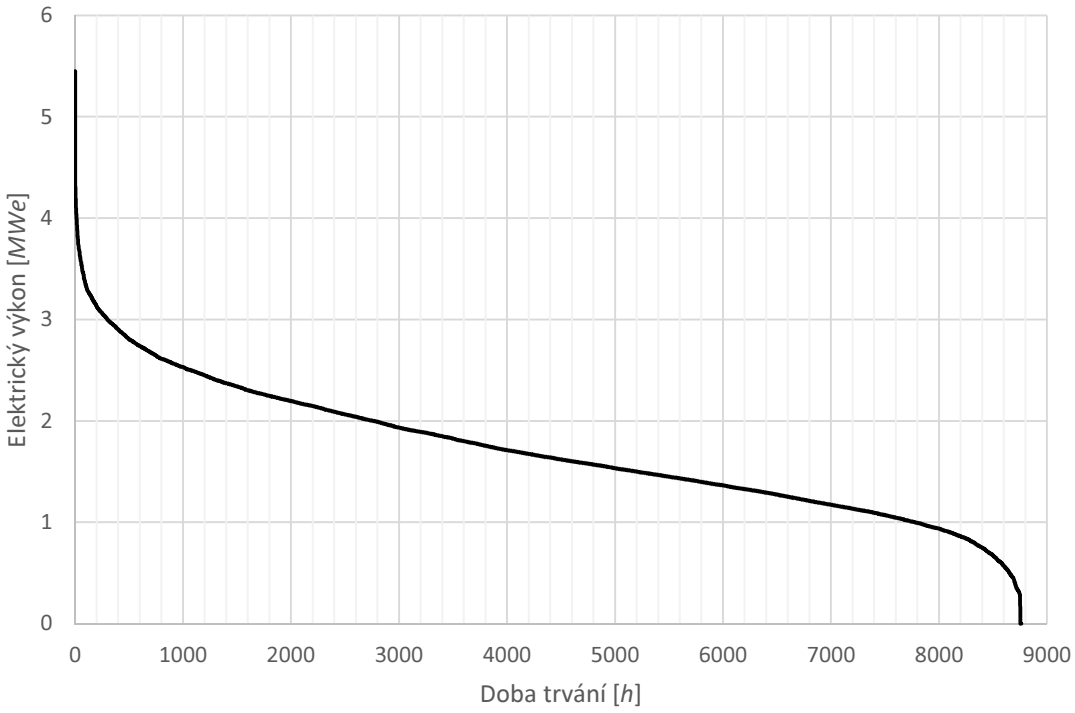
Pro výkon kotlů 2 x 23 t_p/h je potřeba akumulovat 0,27 tuny syté páry.



Obr. 24 Diagram špičky odběru páry sloužící k určení potřebné akumulované energie pro výkon kotlů 2 x 23 t_p/h

2.2.3. Elektřina

Pro elektřinu je naměřen průběh potřebného výkonu v čase pro celý rok po hodinách. Odběry elektřiny měřené po hodinách většinu roku kolísají v rozmezí 1 – 3 *MW* mimo období září – říjen a období na přelomu roku, kdy minima odběru klesají i pod 1 *MW*. V období červen – srpen je občas naměřen odběr i přes 4 *MW*. Průběh ročního trvání elektrického výkonu je vynesen do grafu Obr. 25.

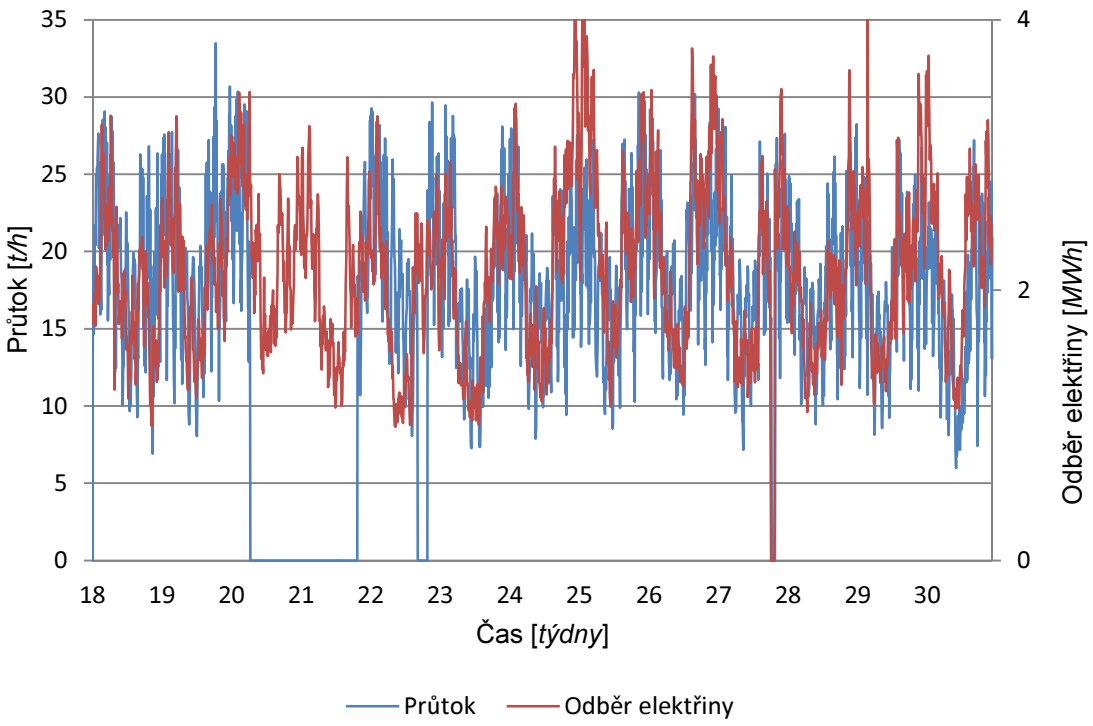


Obr. 25 Diagram ročního trvání elektrického výkonu

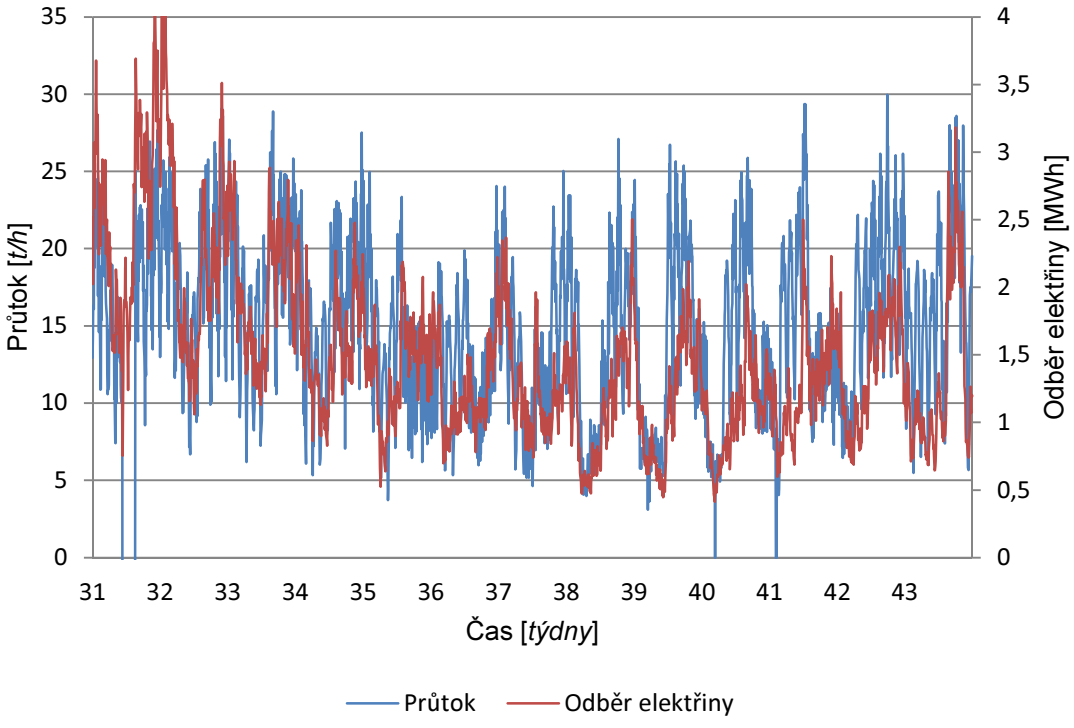
2.2.4. Současnost odběru elektřiny a tepla

Pro zjištění současnosti potřeby jak tepelného, tak elektrického výkonu jsou obě dvě potřeby vyneseny do společného grafu. Pro přehlednost je rok rozdělen na čtvrtletí a vykreslen do čtyř grafů, kde čas je po týdnech. Z grafů je vidět, že přibližně je potřeba tepla a elektřiny souběžná. Na levé ose je parní průtok a na pravé je elektrický výkon.

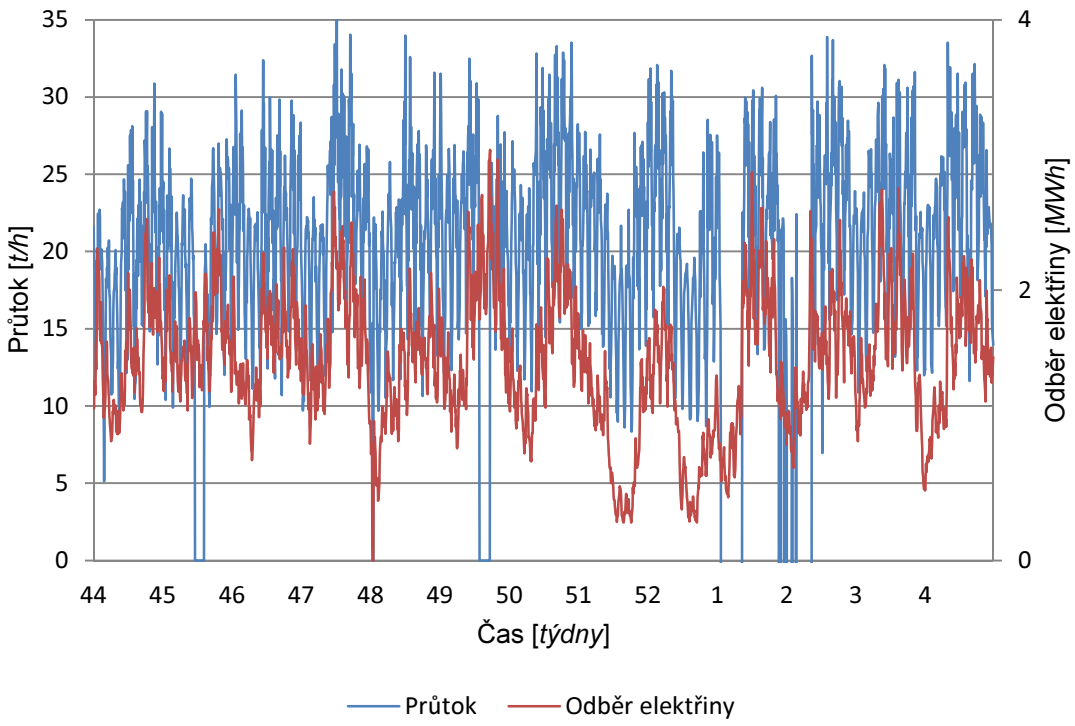
Grafy jsou seřazeny za sebou chronologicky a začínají od 18. týdne, jelikož naměřená data jsou od 1. 5. 2013 do 1. 5. 2014.



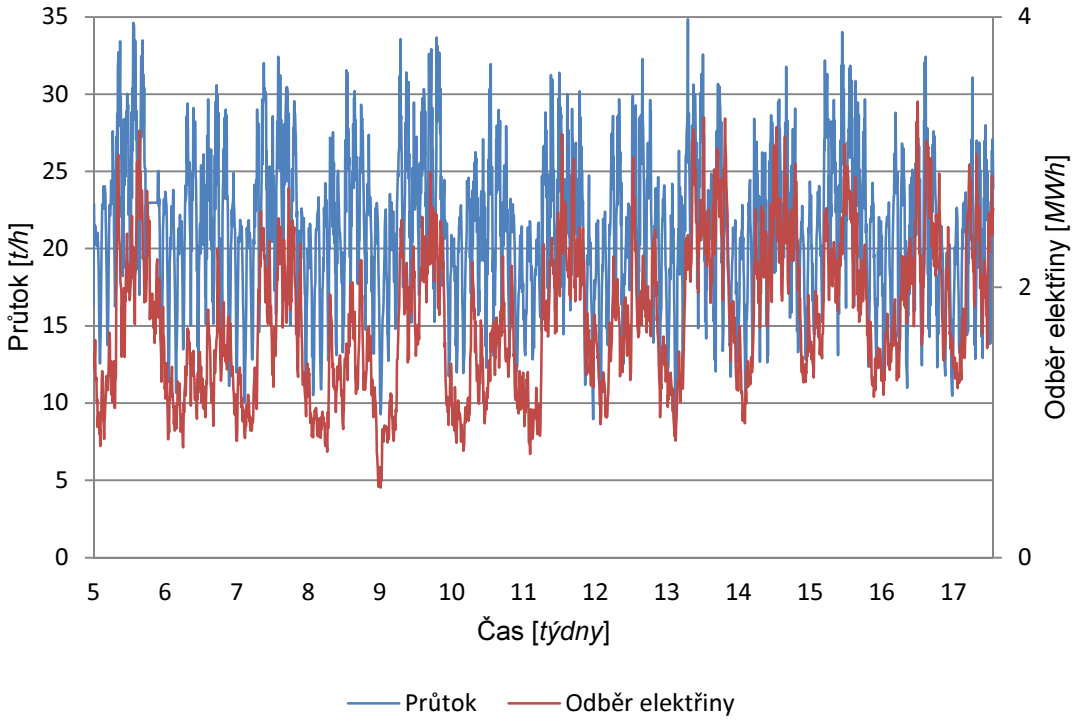
Obr. 26 Graf souběžnosti potřeby tepelného a elektrického výkonu pro týdny 18 až 30



Obr. 27 Graf souběžnosti potřeby tepelného a elektrického výkonu pro týdny 31 až 43



Obr. 28 Graf souběžnosti potřeby tepelného a elektrického výkonu pro týdny 44 až 4



Obr. 29 Graf souběžnosti potřeby tepelného a elektrického výkonu pro týdny 5 až 17

3. Technické řešení volených variant

3.1. Shrnutí jednotlivých variant

Ve všech navrhovaných řešeních není počítáno se změnou chladicího zařízení, jelikož stávající plně vyhovuje požadavkům pivovaru a nový návrh by se tedy snažil pouze co nejvíce napodobit stávající stav. Jediný rozdíl by byl v ohřevném médiu, kde by místo horké vody byla použita sytá pára. Toto také znemožňuje využití akumulace chladu pro zvýšení ročního využití turbíny.

3.1.1. Varianta 1 – výtopna

Nejjednodušší varianta, která počítá pouze s výrobou a dodávkou tepla v syté páře o minimálním tlaku 1,1 *MPa*. Uvažované kotle jsou žárotrubné plamencové kotle od firmy BOSCH. Kotle jsou dva a mají pracovní tlak 1,4 *MPa* a výkon 2 x 23 t_p/h. Tento tlak je u středotlakých kotelen běžný, což zajišťuje nižší cenu instalovaných kotlů.

3.1.2. Varianta 2 – výtopna

Druhá nejjednodušší varianta. Kotelna je opět schopna dodávat pouze teplo pro pivovar ve formě páry. Kotle jsou shodné konstrukce a počtu jako ve variantě 1. Zde jsou voleny kotle o vyšším pracovním tlaku, aby každý kotel měl vyšší akumulační schopnost při menším parním výkonu. Zvolené kotle jsou o výkonu 2 x 20 t_p/h. Při nižším maximálním výkonu kotlů se dosáhne jejich vyššího využití přes celý rok.

3.1.3. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou

Třetí řešená varianta už je principem teplárna s dodávkou tepla i elektřiny. Elektřina je vyráběna pouze pro vlastní spotřebu, teplo opět dodáváno v syté páře. Varianta obsahuje jako hlavní prvky točivou redukci o elektrickém výkonu 0,5 MW_e a dva parní plynové kotle s přehříváky, které vyrábějí mírně přehřátou páru o provozním tlaku 2 *MPa* a výkonu 2 x 20 t_p/h. Veškerá vyrobená pára o tlaku 2 *MPa* by nejdříve proudila skrz točivou redukci a po zredukování na tlak 1,4 *MPa* by teprve pokračovala dále k technologii. O akumulaci by se postaral instalovaný akumulátor za turbínou, který by byl nabíjen tlakem 2,0 *MPa* a vybíjen při tlaku 1,1 *MPa*. Redukce má zvolený takový elektrický výkon, aby mohla pracovat pouze v závislosti na potřebě tepla a pokrývala část potřeby elektrické energie pivovaru.

3.1.4. Varianta 4 – teplárna s parní turbínou

Tato varianta opět uvažuje s dodávkou tepla a elektřiny. Elektřina je vyráběna pouze pro vlastní spotřebu, teplo opět dodáváno v syté páře. Obsahuje točivou redukci, ale v tomto případě o elektrickém výkonu 530,9 kW_e. Dále dva kotle a akumulátor. Jeden kotel je vodotrubný s přehřívákem a vyrábí přehřátou páru o tlaku 3,5 *MPa* a teplotě 293 °*C*, což oproti teplotě na mezi sytosti při daném tlaku je přehřátí o 50 °*C*. Tato pára proudí protitlakou turbínou a je poté zredukována na minimální požadovaný tlak pro technologii a to je 1,1 *MPa*. Uvažuje se s výstupem z kotelny v syté páře. Využití této turbíny je přibližně 5 500 hodin ročně. Zbylý kotel je středotlaký a společně s akumulátorem zajišťuje dodávku páry pro technologii při větší potřebě páry než je maximum pro turbínu.

3.1.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou

Poslední řešená varianta obsahuje jako hlavní prvek plynovou turbínu. Kotelna bude vyrábět teplo i elektřinu. Elektřina je vyráběna pouze pro vlastní spotřebu, teplo opět dodáváno v syté páře. Elektrický výkon turbíny je 1 MW_e. Kotelna dále obsahuje dva kotle konstrukčně shodné jako v první variantě o pracovním tlaku 1,4 MPa a výkonu 2 x 23 t_p/h. Jeden z kotlů obsahuje kombinovaný hořák, který umožňuje využívat spaliny z turbíny. Plynová turbína má vysoké roční využití.

3.2. Specifikace a návrh technického řešení

3.2.1. Varianta 1 – výtopna

Výběr velikosti kotlů

Nejdříve je potřeba vypočítat akumulační schopnost kotlů při provozním tlaku. Vypočte se podle stejného vzorce jako akumulační schopnost akumulátoru (2).

Potřebné údaje pro výpočet jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.

Tab. 3 Parametry středotlakého kotle pro výtopnu, 14 bar

Tlak provozní	14	*bar*
Tlak minimální	11	*bar*
Teplota páry při minimálním tlaku	184,1	*°C*
Teplota páry při provozním tlaku	195,0	*°C*
Entalpie páry při minimálním tlaku	2780,7	*kJ/kg*
Entalpie vody při minimálním tlaku	781,2	*kJ/kg*
Entalpie vody při provozním tlaku	830,1	*kJ/kg*
Konstanta k	0,3	
Měrná tepelná kapacita oceli	0,46	*kJ/kgK*

$$\alpha_p = \frac{i'_1 - i'_2 + k(t'_1 - t'_2)c_{Fe}}{i''_2 - i'_2} = \frac{830{,}1 - 781{,}2 + 0{,}3(195 - 184{,}1)0{,}46}{2780{,}7 - 781{,}2} = 0{,}02523\,\frac{kg}{kg} \qquad (7)$$

Akumulace tedy při stejném pracovním tlaku závisí pouze na vodním objemu kotle.

Kotle v rozmezí výkonu 20 až 23 t_p/h jsou velikostí vodního objemu shodné a liší se pouze výkonem hořáku. Vodní objem kotle je 28,3 m^3, je to hodnota při nejnižší povolené hladině, ale jinou hodnotu výrobce bohužel neudává. Ovšem pokud kotel vyhoví i s tímto vodním objemem, tak je jisté, že vyhoví i s objemem při provozní hladině.

Objem vody se přepočte na hmotnost podle vztahu (8), kde V je objem vody v kotli a $\rho_{stř}$ je střední hodnota hustoty mezi tlaky 1,4 *MPa* a 1,1 *MPa*.

$$M_{voda} = V \cdot \rho_{stř} = 28{,}3 \cdot 876{,}5 = 24805\ kg \qquad (8)$$

Při této hmotnosti vody je množství akumulované páry pro jeden kotel vypočteno dle (9).

$$M_{akumulace} = \alpha_p \cdot M_{voda} = 0{,}02523 \cdot 24805 = 625{,}9\ kg \qquad (9)$$

Jeden kotel je tedy schopen naakumulovat 625,9 *kg* syté páry v syté kapalině. Tato pára by se uvolnila při poklesu tlaku v kotli ze 1,4 *MPa* na 1,1 *MPa*. Akumulační schopnost dvou kotlů je 1251,8 *kg*.

Dva kotle pracující souběžně jsou tedy schopné pokrýt naměřenou špičku páry při výkonu kotlů 2 x 22 t_p/h. Vybrány budou ovšem kotle o výkonu 2 x 23 t_p/h, jelikož jsou schopné pokrýt i větší špičky, které mohly vzniknout v jiných letech a nikoli v měřeném roce. Dále se docílí menšího přestřiku vody do parního systému a tím se docílí delší životnosti zařízení. Změna investičních nákladů při zvýšení výkonu bude minimální.

Návrh napájecí nádrže

Napájecí nádrž s kaskádovým termickým odplyněním je navrhována pro 30 minut plného výkonu kotlů. Hustota vody je pro tlak v napájecí nádrži 0,3 *bar*.

$$V_{nádrž} = \frac{\dot{M}_{kotle} \cdot \tau_{rezerva}}{\rho} = \frac{46000 \cdot 0{,}5}{978{,}26} = 23{,}5\ m^3 \qquad (10)$$

Nádrž se volí nejbližší větší, což je velikost 25 m^3.

Odplynění se navrhuje na celkový maximální výkon obou kotlů, což je v tomto případě 46 t_p/h. Odplynění je podle výkonové řady voleno o kapacitě 80 *t/h*, minimální výkon odplynění je 10 % maximálního.

Návrh napájecích čerpadel

Většinou dnes napájecí čerpadla navrhuje výrobce kotle. Pro určení ceny investice je ovšem potřeba určit, která se budou instalovat. Čerpadlo bude obsahovat frekvenční měnič pro plynulou regulaci otáček.

Průtok jedním čerpadlem je navrhován o 10 - 20 % větší, než je maximální potřebný průtok pro jeden kotel. Pro kotel v této variantě se tedy jedná o 26 m^3/h. Potřebná dopravní výška čerpadla je 180 metrů.

Těmto parametrům nejlépe odpovídá čerpadlo firmy Grundfos CR 32-13. Jedná se o třináctistupňové radiální čerpadlo.

Čerpadla budou instalována dvě pro každý kotel, aby nedošlo k přerušení provozu kotelny při výpadku jednoho čerpadla.

Návrh kondenzátní nádrže

Nádrž se navrhuje podle množství přitékaného kondenzátu do kotelny. Uvažuji návrat kondenzátu 80 %, což je vysoká návratnost, a nádrž je tedy volena stejné velikosti jako napájecí nádrž. Velikost kondenzátní nádrže je 25 m^3.

Návrh kondenzátních čerpadel

Kondenzátní čerpadla slouží pouze k přečerpání vody z kondenzátní nádrže do napájecí nádrže. Je zvoleno čerpadlo firmy Grundfos CR 45-2. Toto čerpadlo zvládá průtok 37 m^3/h při výtlačné výšce přibližně 40 *m* vodního sloupce.

Čerpadla jsou instalována dvě pro zajištění spolehlivého provozu.

3.2.2. Varianta 2 – výtopna

Výběr velikosti kotlů

Pro kotle o vyšším tlaku je potřeba opět nejdříve vypočítat akumulační konstantu při provozním tlaku.

Tab. 4 Parametry středotlakého kotle pro výtopnu, 20 bar

Tlak provozní	20	*bar*
Tlak minimální	11	*bar*
Teplota páry při minimálním tlaku	184,1	*°C*
Teplota páry při provozním tlaku	212,4	*°C*
Entalpie páry při minimálním tlaku	2780,7	*kJ/kg*
Entalpie vody při minimálním tlaku	781,2	*kJ/kg*
Entalpie vody při provozním tlaku	908,6	*kJ/kg*
Konstanta k	0,3	
Měrná tepelná kapacita oceli	0,46	*kJ/kgK*

$$\alpha_p = \frac{i'_1 - i'_2 + k(t'_1 - t'_2)c_{Fe}}{i''_2 - i'_2} = \frac{908{,}6 - 781{,}2 + 0{,}3(212{,}4 - 184{,}1)0{,}46}{2780{,}7 - 781{,}2} = 0{,}06568\,\frac{kg}{kg} \quad (11)$$

Vodní objem kotlů pro tlak 2,0 *MPa* a 1,4 *MPa* se neliší a je tedy 28,3 m^3.

$$M_{voda} = V \cdot \rho_{stř} = 28{,}3 \cdot 876{,}5 = 24805\ kg \quad (12)$$

Při této hmotnosti vody je množství akumulované páry pro jeden kotel vypočteno dle (13).

$$M_{akumulace} = \alpha_p \cdot M_{voda} = 0{,}06568 \cdot 24805 = 1629{,}2\ kg \quad (13)$$

Jeden kotel je tedy schopen naakumulovat 1629,2 *kg* syté páry v syté kapalině. Tato pára by se uvolnila při poklesu tlaku v kotli z 2 *MPa* na 1,1 *MPa*. Akumulační schopnost dvou kotlů je 3258,4 *kg*.

Při této schopnosti akumulace v kotli postačují kotle o parním výkonu 2 x 20 t_p/h. Rozhodnutí o volbě velikosti kotlů je na základě špičky odběru páry pro sytou páru o tlaku 1,4 *MPa*. Důvod je, že při nižším tlaku je množství potřebné páry vyšší a tím pádem je návrh pro vyšší tlaky na straně bezpečnosti.

Návrh napájecí nádrže

Napájecí nádrž s kaskádovým termickým odplyněním je navrhována pro 30 minut plného výkonu kotlů. Hustota vody je pro tlak v napájecí nádrži 0,3 *bar*.

$$V_{nádrž} = \frac{\dot{M}_{kotle} \cdot \tau_{rezerva}}{\rho} = \frac{40000 \cdot 0{,}5}{978{,}26} = 20{,}4\ m^3 \quad (14)$$

Nádrž se volí nejbližší větší, což je velikost 25 m^3.

Odplynění se opět navrhuje na celkový maximální výkon obou kotlů, což je v tomto případě 40 t_p/h. Odplynění je podle výkonové řady voleno o kapacitě 40 *t/h*, minimální výkon odplynění je 10 % maximálního.

Návrh napájecích čerpadel

Průtok jedním čerpadlem je navrhován o 10 - 20 % větší, než je maximální potřebný průtok pro jeden kotel. Pro kotel v této variantě se jedná o 23 m^3/h. Potřebná dopravní výška čerpadla je 240 metrů.

Těmto parametrům nejlépe odpovídá čerpadlo firmy Grundfos CR 32-14. Jedná se o čtrnáctistupňové radiální čerpadlo.

Čerpadla budou opět instalována dvě pro každý kotel, aby nedošlo k přerušení provozu kotelny při výpadku jednoho čerpadla.

Návrh kondenzátní nádrže

Kvůli vysoké návratnosti kondenzátu 80 % je volena velikost shodná s napájecí nádrží.

Velikost kondenzátní nádrže je 25 m^3.

Návrh kondenzátních čerpadel

Čerpadlo je voleno podle stejného principu jako u varianty 1. Je zvoleno čerpadlo firmy Grundfos CR 45-2. Toto čerpadlo zvládá průtok 32 m^3/h při výtlačné výšce kolem 45 *m* vodního sloupce.

Čerpadla jsou instalována dvě pro zajištění spolehlivého provozu.

3.2.3. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou

Určení entalpického spádu na točivé redukci:

Entalpický spád určíme podle vzorce (15) jako poměr elektrického výkonu k hmotnostnímu průtoku páry a součinu všech účinností točivé redukce. Za hmotnostní průtok páry je dosazen maximální průtok podle naměřených dat po hodinách.

Účinnost mechanická	0,99
Účinnost generátoru	0,99
Účinnost převodu	0,97
Účinnost termodynamická	0,7

$$\Delta i = \frac{P_{sv}}{\dot{M}_p \cdot \sum \eta} = \frac{500}{10{,}207 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}7} = 73{,}6\ kJ/kg \qquad (15)$$

Určení admisní entalpie točivé redukce:

Admisní entalpii určíme přičtením entalpického spádu k emisní entalpii z redukce viz (16).

Emisní entalpie na mezi sytosti při tlaku 1,4 *MPa* je 2788,9 *kJ/kg*.

$$i_a = i_e + \Delta i = 2788{,}9 + 73{,}6 = 2862{,}5\ kJ/kg \qquad (16)$$

Volba tlaku a teploty admisní páry:

Pro entalpii 2862,5 *kJ/kg* nelze najít takový tlak, aby byla pára na mezi sytosti, protože maximální entalpie na mezi sytosti je cca 2803 *kJ/kg* při tlaku 3,1 *MPa*. Při vyšším tlaku začíná entalpie opět klesat. Je proto nutno volit páru přehřátou. Výsledný volený tlak je 2,0 *MPa* a teplota 235 °*C*. Pára je přehřátá o 23 °*C*.

Návrh velikosti kotlů a akumulátoru:

Nabíjecí tlak akumulátoru je zvolen 1,4 *MPa* a vybíjecí je 1,1 *MPa*. Typ akumulátoru je Ruthsův a je navrhován tak, aby pokryl špičku odběru naměřenou dne 2. 12. při výkonu kotlů 2 x 20 t_p/h. Potřeba páry z akumulátoru je tedy 2000 *kg*.

Akumulační schopnost při tlakovém spádu 0,3 *MPa* je vypočtena podle vztahu (17), kde je uvažována jak akumulace v syté vodě, tak akumulace v železe (ta je ovšem vcelku zanedbatelná). Stav jedna je při tlaku 1,4 *MPa* a stav dvě je při tlaku 1,1 *MPa*.

$$\alpha_p = \frac{i'_1 - i'_2 + k(t'_1 - t'_2)c_{Fe}}{i''_2 - i'_2} = \frac{830{,}1 - 781{,}2 + 0{,}3(195 - 184{,}1)0{,}46}{2780{,}7 - 781{,}2} = 0{,}02523\ kg/kg \qquad (17)$$

V tomto případě nemůžeme využít akumulační schopnost kotlů, jelikož jsou v soustavě před turbínou a tím pádem nemůžou nijak reagovat na pokles tlaku. Bylo by to možné pouze při otevřeném obtoku turbíny, což by zamezovalo výrobě elektřiny. Velikost akumulátoru je vypočtena podle vztahu (18). Je to podíl potřebného množství akumulované páry k akumulační schopnosti.

$$M_A = \frac{M_p}{\alpha_p} = \frac{2000}{0{,}02523} = 79266{,}5\ kg \qquad (18)$$

Výsledný objem je poté vypočten z (19), přičemž je uvažováno 90% zaplnění akumulátoru vodou. Hustota je brána jako střední hodnota mezi dvěma použitými tlaky.

$$V_A = \frac{M_p}{\alpha_p \cdot k_A \cdot \rho_{stř}} = \frac{2000}{0{,}02523 \cdot 0{,}9 \cdot 876{,}5} = 100{,}5\ m^3 \quad (19)$$

Akumulátor je podle prvních výsledků výpočtu uvažován o velikosti 100 m^3.

Jelikož akumulátor vychází příliš velký, bylo by vhodné zvolit vyšší nabíjecí tlak akumulátoru. Zvýšením nabíjecího tlaku (tlaku za turbínou) by se snížil entalpický spád na turbíně. To by mělo za následek menší množství vyrobené elektřiny.

Pro zmenšení velikosti akumulátoru je možné jej zapojit paralelně s turbínou, takže by byl nabíjen tlakem admisní páry turbíny. Zvětší se rozdíl tlaků a výrazně se zmenší velikost. Při nabíjení akumulátoru se obtokem sníží průtok páry turbínou. Využití turbíny se sníží minimálně, jelikož špičky odběru páry jsou velmi krátkodobé.

Nová velikost se vypočítá dle (20). Akumulační konstanta je rovna 0,06568 *kg/kg* a je shodná s variantou 2. Velikost hustoty je střední hodnota mezi tlakem 2 a 1,1 *MPa*.

$$M_A = \frac{M_p}{\alpha_p} = \frac{2000}{0{,}06568} = 30449\ kg \quad (20)$$

$$V_A = \frac{M_p}{\alpha_p \cdot k_A \cdot \rho_{stř}} = \frac{2000}{0{,}06568 \cdot 0{,}9 \cdot 866{,}2} = 39{,}06\ m^3 \quad (21)$$

Velikost akumulátoru při nabíjení párou o admisním tlaku je 40 m^3.

V případě výpadku turbíny a otevřeném obtoku by byl akumulátor odstaven mimo provoz a akumulaci páry by zajišťovaly pouze kotle.

Návrh napájecí nádrže

Napájecí nádrž s kaskádovým termickým odplyněním je navrhována pro 30 minut plného výkonu kotlů. Velikost nádrže je shodná jako ve variantě 2, jelikož je výkon kotlů stejný.

Velikost nádrže je 25 m^3.

Maximální součtový výkon obou kotlů je 40 t_p/h. Kapacita odplynění je shodná s variantou 2, což je 40 *t/h*, minimální výkon odplynění je opět 10 % maximálního.

Návrh napájecích čerpadel

Návrh postupuje podle stejných zásad jako ve variantě 2. Voleno je čerpadlo firmy Grundfos CR 32-14. Jedná se o čtrnáctistupňové radiální čerpadlo.

Čerpadla budou instalována dvě pro každý kotel, aby nedošlo k přerušení provozu kotelny při výpadku jednoho čerpadla.

Návrh kondenzátní nádrže

Kvůli vysoké návratnosti kondenzátu 80 % je volena velikost shodná s napájecí nádrží.

Velikost kondenzátní nádrže je 25 m^3.

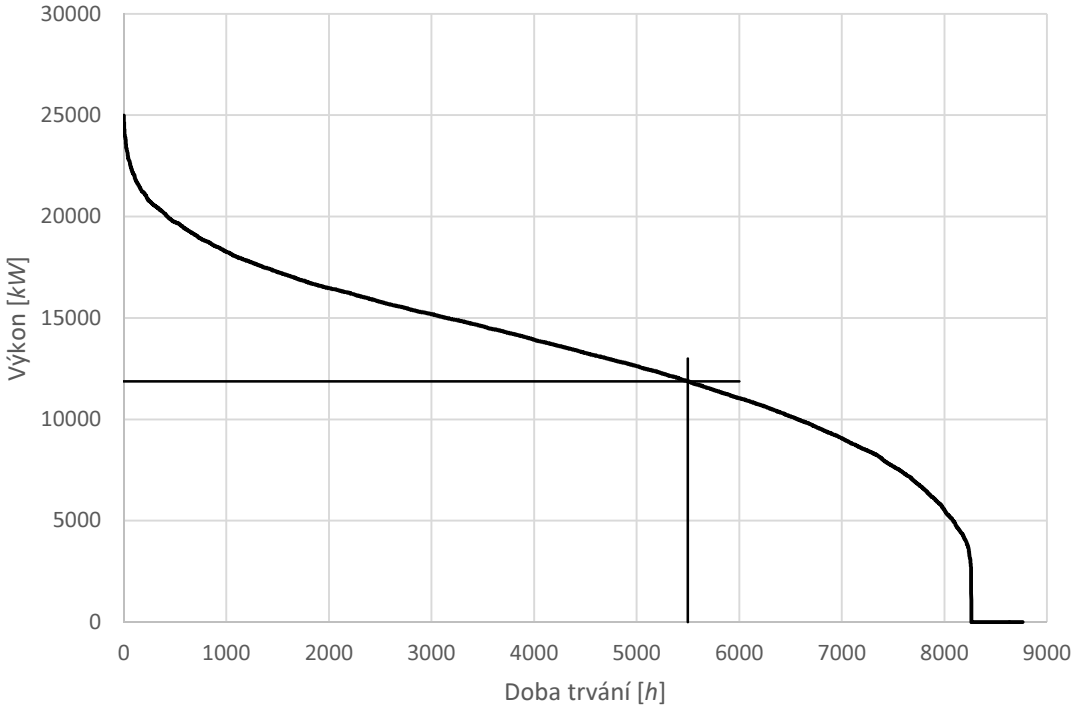
Návrh kondenzátních čerpadel

Čerpadlo je voleno stejného principu jako u varianty 2. Je zvoleno čerpadlo firmy Grundfos CR 45-2. Toto čerpadlo zvládá průtok 32 m^3/h při výtlačné výšce kolem 45 *m* vodního sloupce. Čerpadla jsou instalována dvě pro zajištění spolehlivého provozu.

3.2.4. Varianta 4 – teplárna s parní turbínou

Určení parního průtoku pro turbínu:

Roční využití turbíny je zvoleno 5 500 hodin. Tato hodnota se vynese do grafu ročního trvání tepelného výkonu, viz Obr. 30, a poté se odečte potřebný tepelný výkon, který se následně přepočte na potřebný hmotnostní průtok páry o zvoleném tlaku 3,5 *MPa* a teplotě 293 *°C*.



Obr. 30 Určení parního výkonu pro točivou redukci

Potřebný tepelný výkon je tedy 11871 *kW* a po přepočtení na páru podle (6) je hmotnostní průtok páry 16,06 t_p/h.

Určení entalpického spádu na točivé redukci:

Entalpie výstupní (emisní) páry: 2 780,7 *kJ/kg*

Entalpie vstupní (admisní) páry: 2 959,5 *kJ/kg*

Entalpický spád určíme jako rozdíl admisní a emisní entalpie na turbíně, viz (22).

$$\Delta i = i_a - i_e = 2959{,}5 - 2780{,}7 = 178{,}8\ kJ/kg \quad (22)$$

Určení elektrického výkonu na točivé redukci:

Účinnost mechanická: 0,99

Účinnost generátoru: 0,99

Účinnost převodu: 0,97

Účinnost termodynamická: 0,7

Svorkový výkon generátoru vypočítáme podle jednoduchého vztahu (23). Je potřeba znát entalpický spád na turbíně, účinnosti převodu tepla na elektrickou energii a hmotnostní průtok páry na turbíně.

$$P_{sv} = \frac{\dot{M}_p \cdot \Delta i \cdot \sum \eta}{3,6} = \frac{16,06 \cdot 178,8 \cdot (0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,7)}{3,6} = 530,9\ kW \quad (23)$$

Návrh velikosti kotlů a akumulátoru:

Instalovány budou dva kotle, jeden vysokoparametrový o parním výkonu 17 t_p/h a druhý na sytou páru o tlaku 1,4 *MPa* o výkonu 23 t_p/h. U kotle na sytou páru je uvažována akumulační schopnost jako u varianty 1, a to je 0,02523 *kg/kg*. Potřebné množství celkové naakumulované páry je 2 000 *kg*.

Objem akumulátoru je potřeba navrhnout pouze pro akumulaci páry, kterou není schopen dodat středotlaký kotel. Středotlaký kotel akumuluje podle vzorce (9) 625,9 *kg* páry. Pro akumulátor tedy zbývá pokrýt 1 374,1 *kg* páry.

$$M_A = \frac{M_p}{\alpha_p} = \frac{1374,1}{0,02523} = 54460\ kg \quad (24)$$

$$V_A = \frac{M_A}{k_A \cdot \rho_{stř}} = \frac{54460}{0,9 \cdot 876,5} = 69\ m^3 \quad (25)$$

Jelikož při této velikosti je potřeba akumulátor vyrábět na zakázku, tak je velikost akumulátoru volena 70 m^3. Akumulátor je velmi velký, jako jedno z opatření je zvýšení nabíjecího tlaku, což zde kvůli protitlaku turbíny není možné.

Druhá možnost je zvýšení výkonu středotlakého kotle. Když bude výkon kotle 25 t_p/h, tak je potřeba pokrýt pouze špičku o velikosti 1 310 *kg*. Kotel je schopen pokrýt 625,9 *kg*, takže akumulátor musí akumulovat pouze 684,1 *kg* páry.

$$M_A = \frac{M_p}{\alpha_p} = \frac{684,1}{0,02523} = 27113\ kg \quad (26)$$

$$V_A = \frac{M_A}{k_A \cdot \rho_{stř}} = \frac{27113}{0,9 \cdot 876,5} = 34,4\ m^3 \quad (27)$$

Při vyšším výkonu kotle je akumulátor zvolen 40 m^3, což už je výrobci běžně vyráběná velikost akumulátoru. Hlavní výhoda je v menším zastavěném prostoru při využití menšího akumulátoru.

Návrh napájecí nádrže

Napájecí nádrž s kaskádovým termickým odplyněním je navrhována pro 30 minut plného výkonu kotlů.

$$V_{nádrž} = \frac{\dot{M}_{kotle} \cdot \tau_{rezerva}}{\rho} = \frac{42000 \cdot 0,5}{978,26} = 21,5\ m^3 \quad (28)$$

Velikost nádrže je zvolena 25 m^3.

Maximální součtový výkon obou kotlů je 42 t_p/h. Kapacita odplynění je volena 80 *t/h*, minimální výkon odplynění je opět 10 % maximálního.

Návrh napájecích čerpadel

Napájecí čerpadla budou odlišná pro kotel na přehřátou páru a středotlaký kotel.

Pro středotlaký kotel je navrženo čerpadlo jako ve variantě 1 od firmy Grundfos CR 32-13. Jedná se o třináctistupňové radiální čerpadlo.

Pro kotel na přehřátou páru musí přesný návrh čerpadla udělat výrobce kotle, jelikož není známá tlaková ztráta kotle.

Čerpadla budou instalována dvě pro každý kotel, aby nedošlo k přerušení provozu kotelny při výpadku jednoho čerpadla.

Návrh kondenzátní nádrže

Kvůli vysoké návratnosti kondenzátu 80 % je volena velikost shodná s napájecí nádrží.

Velikost kondenzátní nádrže je 25 m^3.

Návrh kondenzátních čerpadel

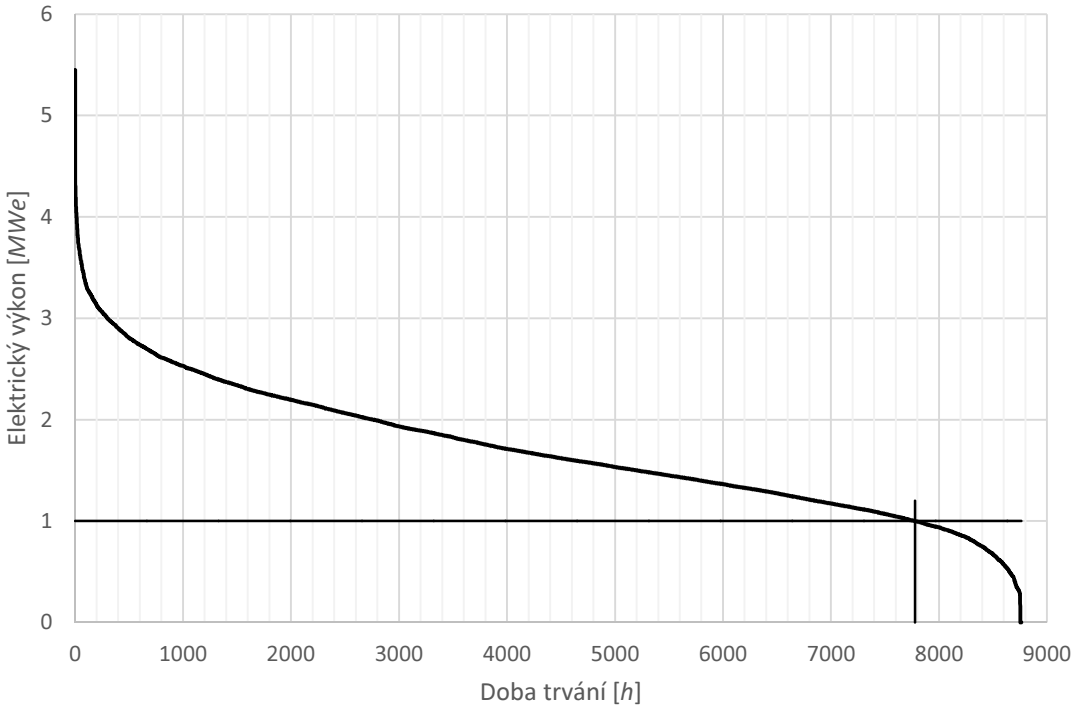
Čerpadlo je voleno podle stejného principu jako u varianty 3. Je zvoleno čerpadlo firmy Grundfos CR 45-2. Toto čerpadlo zvládá průtok 34 m^3/h při výtlačné výšce kolem 45 *m* vodního sloupce.

Čerpadla jsou instalována dvě pro zajištění spolehlivého provozu.

3.2.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou

Výběr velikosti plynové turbíny

Plynová turbína se dimenzuje podle diagramu potřeby elektřiny a je snaha dosáhnout nejvyššího možného ročního využití turbíny. Turbíny od firmy Capstone se vyrábějí ve výkonech 200, 400, 600, 800 a 1 000 kW_e. Je zvolen obrácený postup při výběru turbíny než u turbíny parní. Nejdříve je zvolen elektrický výkon a poté je zkontrolováno, jestli má turbína dostatečné roční využití. Jako první je zvolena turbína o výkonu 1 000 kW_e, určení ročního využití je vidět na obrázku Obr. 31 a vychází přibližně na 7 770 hodin ročně. Při menším elektrickém výkonu by se sice dosáhlo zvýšení ročního využití, ale celková vyrobená energie za rok by nevzrostla, proto je tato turbína nejvhodnější.



Obr. 31 Diagram určení maximálního elektrického výkonu plynové turbíny

Tepelný výkon ve spalinách této turbíny je 1,95 MW_t. V diagramu Obr. 19 je zkontrolováno, jestli nebude muset turbína někdy fungovat bez kotle. Tepelný výkon turbíny je potřeba téměř po celý rok a z předpokladu, že odběry elektřiny a tepla jsou souběžné, lze říct, že turbína bude vždy dodávat spaliny do kotle.

Určení přebytku spalovacího vzduchu a obsahu kyslíku ve spalinách

Přebytek vzduchu se určí podle vzorce (29). Pro výpočet je potřeba znát reálný hmotnostní průtok spalin a minimální hmotnostní průtok spalin vznikající při spálení zemního plynu ve spalovací komoře. K určení minimálního průtoku jsou potřeba pomocné výpočty, které jsou uvedeny níže.

$$\alpha_t = 1 + \frac{\dot{M}_{SV} - \dot{M}_{SV_{min}}}{\dot{M}_{VV_{min}}} \tag{29}$$

$$O_2 = 21 - \frac{21}{\alpha_t} \tag{30}$$

Pro výpočet minimálního objemu vlhkého vzduchu je potřeba provést stechiometrické výpočty pro daný zemní plyn. Zemní plyn v Plzni je tranzitní a jeho chemické složení je v tabulce Tab. 5.

Tab. 5 Chemické složení tranzitního zemního plynu [26]

Složka paliva	Objemový podíl paliva [%]
CH_4	98,39
C_2H_6	0,44
C_3H_8	0,16
C_4H_{10}	0,07
C_5H_{12}	0,03
N_2	0,84
CO_2	0,07

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm^3 paliva:

$$O_{O_2 min} = 0{,}5 \cdot o_{H_2} + 0{,}5 \cdot o_{CO} + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot o_{C_mH_n} - o_{O_2} = 1{,}998 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (31)$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm^3 paliva:

$$O_{VS\,min} = \frac{O_{O_2 min}}{0{,}21} = \frac{1{,}998}{0{,}21} = 9{,}5126 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (32)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 Nm^3 paliva:

$$O_{VV\,min} = \chi_V \cdot O_{VS\,min} = 1{,}02 \cdot 9{,}5126 = 9{,}703 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (33)$$

χ_V je podíl vodní páry na 1 m^3 vzduchu

Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení 1 Nm^3 paliva:

$$O_{SS\,min} = O_{CO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} + O_{SO_2} \quad (34)$$

$$O_{SO_2} = o_{SO_2} = 0 \quad (35)$$

$$O_{CO_2} = o_{CO_2} + 0{,}994 \cdot \left(o_{CO} + \sum m \cdot o_{C_mH_n}\right) + 0{,}0003 \cdot O_{VS\,min} = 0{,}999 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (36)$$

$$O_{N_2} = o_{N_2} + 0{,}7805 \cdot O_{VS\,min} = 0{,}84 + 0{,}7805 \cdot 9{,}5126 = 7{,}433 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (37)$$

$$O_{Ar} = o_{Ar} + 0{,}0092 \cdot O_{VS\,min} = 0 + 0{,}0092 \cdot 9{,}75126 = 0{,}088 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (38)$$

$$O_{SS\,min} = 0{,}999 + 7{,}433 + 0{,}088 + 0 = 8{,}52 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (39)$$

Minimální objem vlhkých spalin při dokonalém spálení 1 Nm^3 paliva:

$$O_{SV\,min} = O_{SS\,min} + O^S_{H_2O} \quad (40)$$

$$O^S_{H_20} = o_{H_2O} + o_{H_2} + \sum \frac{n}{2} \cdot o_{C_mH_n} + O^V_{H_2O} = 2{,}183 \ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (41)$$

$$O_{H_2 0}^{V} = O_{VV\,min} - O_{VS\,min} = 9{,}703 - 9{,}5126 = 0{,}1903\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (42)$$

$$O_{SV\,min} = 8{,}52 + 2{,}183 = 10{,}7\ \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (43)$$

Údaje od výrobce jsou pouze hmotnostní průtok spalin $\dot{M}_{SV}$ a objemový průtok zemního plynu $\dot{V}_{ZP}$. [27]

$$\dot{M}_{SV} = 6{,}7\ \frac{kg}{s} \quad (44)$$

$$\dot{V}_{ZP} = 303{,}83\ \frac{Nm^3}{h} = 0{,}0844\ \frac{Nm^3}{s} \quad (45)$$

Množství spalin vznikající při spalování daného množství plynu se vypočítá podle (46).

$$\dot{V}_{SV_{min}} = \dot{V}_{ZP} \cdot O_{SV\,min} = 0{,}0844 \cdot 10{,}7 = 0{,}903\ \frac{Nm^3}{s} \quad (46)$$

Pro přepočet na hmotnostní průtok je potřeba zjistit hustotu spalin. Hustota se zjistí tak, že nejdříve určíme objemové koncentrace složek ve spalinách, poté je pomocí molárních hmotností přepočteme na hmotnosti jednotlivých složek a nakonec celkovou hmotnost směsi podělíme objemem jednoho kilomolu ideálního plynu (22,4 $Nm^3/kmol$). Výsledky jednotlivých kroků jsou v tabulce Tab. 6. Vychází se z předpokladu, že objemová koncentrace se rovná molové koncentraci.

Tab. 6 Určení hmotností složek spalin a jejich celkové hmotnosti

Složka	Molová koncentrace	Molární hmotnost složky [*kg/kmol*]	Hmotnost složky [*kg*]
CO_2	0,0934	44	4,11
N_2	0,6945	28	19,45
Ar	0,0082	40	0,33
H_2O	0,2040	18	3,67
		Suma hmotností	27,55

$$\rho_{SV} = \frac{M_{SV}}{V_{ideál}} = \frac{27{,}55}{22{,}4} = 1{,}23\ \frac{kg}{Nm^3} \quad (47)$$

$$\dot{M}_{SV_{min}} = \rho_{SV} \cdot \dot{V}_{SV_{min}} = 1{,}23 \cdot 0{,}903 = 1{,}111\ \frac{kg}{s} \quad (48)$$

$$\dot{M}_{VV_{min}} = \rho_{V} \cdot O_{VV_{min}} \cdot \dot{V}_{ZP} = 1{,}2 \cdot 9{,}703 \cdot 0{,}0844 = 0{,}983\ \frac{kg}{s} \quad (49)$$

Přebytek spalovacího vzduchu se poté vypočte jako poměr rozdílu skutečného hmotnostního průtoku spalin a minimálního průtoku vlhkého spalovacího vzduchu.

$$\alpha_t = 1 + \frac{\dot{M}_{SV} - \dot{M}_{SV_{min}}}{\dot{M}_{VV_{min}}} = \frac{6{,}7 - 1{,}111}{0{,}983} = 6{,}69 \quad (50)$$

$$O_2 = 21 - \frac{21}{6{,}69} = 17{,}86\ \% \quad (51)$$

Jak je z výpočtů vidět, je přebytek vzduchu velký a spaliny jsou vhodné pro dopálení ve spalinovém kotli při přidání zemního plynu.

Návrh velikosti kotlů

Kotle zde slouží pro dodávku tepla nezávisle na výrobě elektrické energie. Pro jednoduchost řešení se nepočítá s instalací akumulátoru páry a akumulaci zajišťují pouze dva kotle. Tlak pro kotle je vybrán 1,4 *MPa*, takže akumulační schopnost a velikost kotlů se řeší stejně jako ve variantě 1. Zvoleny tedy jsou dva kotle o součtovém výkonu 2 x 23 t_p/h.

Spalinový kotel

Do kotle jsou přiváděny spaliny ze spalovací turbíny a slouží jako spalovací vzduch pro přivedený spalovací vzduch.

Výkon spalovacího kotle P‘ je 15047 kW_t *a* účinnost η_{spal} má zvolenou 93 %.

Pro daný výkon je potřeba přivést v plynu 16179,6 *kW*.

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{P\prime}}{\eta_{\mathrm{spal}}} = \frac{15047}{0{,}93} = 16179{,}6\ kW \tag{52}$$

Z turbíny proudí spaliny, které mají tepelný výkon P_{spal} = 1950 kW_t [27]. Po odečtení od celkového potřebného výkonu v plynu vyjde potřebný výkon v plynu pro spalinový kotel P_{SK}.

$$\mathrm{P_{SK}} = \mathrm{P} - \mathrm{P_{spal}} = 16179{,}6 - 1950 = 14229{,}6\ kW \tag{53}$$

Pro daný výkon je potřeba 0,397 m^3/s zemního plynu o výhřevnosti 9,964 kWh/m^3.

$$\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{ZP_{SK}}} = \frac{\mathrm{P_{SK}}}{\mathrm{H}\cdot 3600} = \frac{14229{,}6}{9{,}964\cdot 3600} = 0{,}397\ m^3/s \tag{54}$$

V turbíně se spaluje 0,0844 m^3/s zemního plyn a na jeden m^3 je potřeba 9,5126 m^3 vzduchu.

$$\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{VV}} = (\alpha_{\mathrm{t}} - 1)\cdot\left(\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{ZP}}\cdot \mathrm{O}_{\mathrm{VS\,min}}\right) \tag{55}$$

$$\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{VV}} = (6{,}687 - 1)\cdot(0{,}0844\cdot 9{,}5126) = 4{,}566\ m^3/s$$

Množství kyslíku ve spalinách se určí z množství vzduchu vycházejícího z turbíny a obsahu kyslíku v nich, viz (45).

$$\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{O_2}} = \dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{VV}}\cdot 0{,}21 = 4{,}566\cdot 0{,}21 = 0{,}959\ m^3/s \tag{56}$$

Spotřeba kyslíku na pro spálení zemního plynu v kotli se vypočítá dle (57), kde figuruje potřeba zemního plynu pro kotel a minimum kyslíku pro spálení jednoho Nm^3 zemního plynu.

$$\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{O_{2SK}}} = \dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{ZP_{SK}}}\cdot \mathrm{O}_{\mathrm{O_2 min}} = 0{,}397\cdot 1{,}998 = 0{,}793\ m^3/s \tag{57}$$

Přebytek spalovacího vzduchu se vypočítá podle vztahu (58), jelikož v kotli spaliny z turbíny slouží jako spalovací vzduch.

$$\alpha_{\mathrm{SK}} = \frac{\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{O_{2SK}}}}{\dot{\mathrm{V}}_{\mathrm{O_2}}} = \frac{0{,}959}{0{,}793} = 1{,}21 \tag{58}$$

Přebytek vzduchu je dostačující pro spálení přidaného zemního plynu při maximálním výkonu turbíny a kotle.

Návrh napájecí nádrže

Napájecí nádrž s kaskádovým termickým odplyněním je navrhována stejně jako ve variantě 1.

Nádrž se volí ve velikosti 25 m^3.

Odplynění je voleno o kapacitě 80 *t/h*, minimální výkon odplynění je 10 % maximálního.

Návrh napájecích čerpadel

Zvolené čerpadlo je shodné jako ve variantě 1. Jedná se o čerpadlo firmy Grundfos CR 32-13. Je to třináctistupňové radiální čerpadlo s frekvenčním měničem.

Čerpadla budou instalována dvě pro každý kotel, aby nedošlo k přerušení provozu kotelny při výpadku jednoho čerpadla.

Návrh kondenzátní nádrže

Velikost kondenzátní nádrže je shodná s variantou 1, 25 m^3.

Návrh kondenzátních čerpadel

Kondenzátní čerpadla jsou také stejná jako ve variantě 1. Je zvoleno čerpadlo firmy Grundfos CR 45-2. Toto čerpadlo zvládá průtok 37 m^3/h při výtlačné výšce přibližně 40 *m* vodního sloupce.

Čerpadla jsou instalována dvě pro zajištění spolehlivého provozu.

4. Ekonomické hodnocení variant

Z pěti zvolených variant budou ekonomicky zpracovávány pouze tři, jelikož dvě varianty jsou z technického hlediska nevhodné. Dále budou tedy porovnávány následující varianty:

- Varianta 1 – výtopna
- Varianta 3 – teplárna s parní turbínou
- Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou

Varianta 2 je velmi podobná variantě jedna, liší se pouze tlakem a velikostí kotlů, proto je vybrána pouze jedna z nich. Varianta 4 s vodotrubným kotlem je technicky nevhodná právě kvůli vodotrubnému kotli, který by byl investičně velmi náročný, a varianta by nebyla konkurenceschopná. Dále kvůli tomu, že obsahuje velký středotlaký kotel a k tomu akumulátor páry.

Všechny varianty budou porovnávány se stávající situací, kdy je pára nakupována ze sousední teplárny.

4.1. Stanovení cen médií a jejich odhad do budoucna

Ceny zemního plynu a elektřiny má Plzeňský Prazdroj domluveny vždy na dva roky. Ceny páry jsou dohodnuty na deset let dopředu. Všechny ceny jsou stanoveny pro rok 2016 a pak odhadovány dále do budoucna.

Odhadování budoucích cen jednotlivých potřebných médií pro průmyslovou kotelnu je otázka mnoha proměnných a tím pádem je to téměř nemožné. Mnou odhadnutý vývoj cen je s velkou pravděpodobností velmi nepřesný.

4.1.1. Kurz koruny

Některé položky jsou obchodovány celosvětově (například emisní povolenky) a ne pouze lokálně, takže jsou jejich ceny udávány v jiných měnách než v korunách. Celková koncová cena variant je ovšem v korunách, takže je potřeba všechny ceny sjednotit.

Kurz eura ke dni 13. 5. 2016 je 27,02 Kč = 1 EUR. [28]

Obr. 32 Vývoj kurzu eura vůči koruně od roku 2014 do současnosti [29]

Podle grafu na Obr. 32 je v posledním roce kurz eura relativně stálý kolem 27 korun za euro. Nepředpokládám do blízké budoucnosti žádnou výraznou změnu a vzdálenější budoucnost nejsem schopen odhadnout, proto je uvažován kurz po celou dobu životnosti investice stejný a to je 27 korun za euro.

4.1.2. Zemní plyn

Dnes je cena zemního plynu 8,66 *Kč/Nm*^{3}.

Cena se skládá z hodnoty samotného média a dále ceny distribuce a rezervovaného objemu. Částka za rezervovaný objem závisí na instalovaném maximálním výkonu kotelny. Jelikož se jednotlivé varianty liší pouze minimálně, tak je tato složka brána pro všechny varianty stejná.

Poplatek za distribuci bude v celé době životnosti uvažován stejný, měnit se bude pouze hodnota zemního plynu.

Výsledná cena zemního plynu je vztažená na normální metr krychlový. Osobně bych cenu raději uváděl za *MJ* a nikoli za m^3, jelikož je problém s objemem zemního plynu, který se při odlišných teplotách a tlaku mění. Také se spotřeba plynu v m^3 mění v závislosti na výhřevnosti. Spotřeba plynu v *MJ* se tedy vypočte z výkonu kotle, který se podělí jeho účinností, viz (59).

$$\dot{Q}_{plyn} = \frac{\dot{Q}_{kotel}}{\eta_{kotel}} \tag{59}$$

Obr. 33 Vývoj ceny 1 m^3 zemního plynu za posledních dvanáct let (2004-2016) [30]

Na obrázku Obr. 33 je vidět graf vývoje hodnoty zemního plynu. Od roku 2014 do března roku 2016 hodnota konstantně klesala, nyní je na vzestupu a podle prognóz by měla dále stoupat. Uvažuji tedy, že hodnota bude každé dva roky stoupat o 3 %.

Nad grafem je vidět cena zemního plynu ke dni 12. 5. 2016, která činí 1,704 *Kč* za metr krychlový.

Uvažovaná celková cena nákupu zemního plynu pro rok 2016 a 2017 za 1 m^3 je 8,66 *Kč*.

4.1.3. Elektrická energie

Dnes je cena elektrické energie 2 200 *Kč/MWh*.

Uvažované varianty ani v jednom případě nepočítají s prodejem elektřiny do sítě, jelikož se to v dnešní době většinou ekonomicky nevyplatí, a tak je nutno pouze určit nákupní cenu elektřiny a příspěvky na obnovitelné zdroje elektřiny pro případ výroby elektřiny pro svoji potřebu.

Příspěvky na obnovitelné zdroje se účtují za každou spotřebovanou *MWh*. Nezávisejí na tom, jestli je elektřina vyrobena nebo se kupuje. V minulých letech zaznamenaly hodnoty příspěvků obrovský růst. Za poslední tři roky se cena ustálila a do budoucna budu předpokládat stejnou hodnotu ve všech letech životnosti. V roce 2015 byl strop příspěvků 495 *Kč/MWh*, což je bráno jako hodnota pro výpočet po celou dobu životnosti.

Cena elektřiny dlouhodobě klesala, ale v posledních měsících zaznamenává nárůst. Do budoucna předpokládám růst ceny každé dva roky o 1 %.

Cena elektřiny v grafu Obr. 34 je pouze za elektřinu jako takovou, bez veškerých služeb a příspěvků na obnovitelné zdroje, ale pomáhá odhadnout průběh ceny do budoucna.

Obr. 34 Vývoj ceny 1 MWh elektrické energie za posledních osm let (2008-2016) [31]

4.1.4. Emisní povolenky

Jelikož bude nový zdroj energie plně ve vlastnictví Plzeňského Prazdroje a při spalování zemního plynu vzniká CO_2, je nutno mít nakoupené povolenky pro možnost vypouštění CO_2 do atmosféry. Povolenky se nakupují na celosvětovém trhu a jejich cena je udávána v eurech na jednu tunu vypuštěného CO_2.

Obr. 35 Historie ceny emisních povolenek CO_2 od roku 2013 do současnosti, ceny jsou v eurech [32]

Z grafu Obr. 35 je vidět, že v posledních letech dochází pouze ke konstantnímu růstu ceny povolenek kromě náhlého zlevnění na začátku roku 2016. Prognózy do budoucna zahrnují konstantní zdražování, takže bude uvažován růst ceny povolenek 20 % ročně do té doby, dokud nedosáhnou maxima, kterého kdy bylo dosaženo, což je 17,5 eura za tunu.

Emise CO_2 daného zdroje tepla se vypočte podle vyhlášky [33], kde jedné ročně spotřebované *MWh* tepla ve výhřevnosti zemního plynu odpovídá 0,2 *t* CO_2.

V některých zemích Evropské unie jsou v dnešní době zaváděny pevné ceny emisních povolenek. Jedna varianta bude proto vypočítána s předpokladem ceny emisních povolenek 20 euro za tunu, aby bylo vidět, jestli to výsledek ovlivní markantně či nikoli.

4.1.5. Vodné a stočné

Dnešní cena vodného a stočného pro Plzeň je 89,76 *Kč/m*^{3}. [34]

Cena se za poslední roky zvedla pouze minimálně a je tedy uvažováno zdražování pouze o 1 % každý rok.

4.1.6. Pára

V aktuální situaci je mírně přehřátá pára potřebná pro technologii nakupována ze sousední teplárny patřící Plzeňské Teplárenské. Cena nákupu páry je nyní 1 008 *Kč/MWh*. Cena je garantována na deset let dopředu, ale během období se liší podle více proměnných, kde hlavní váhu má cena uhlí na trhu. Po dobu životnosti je předpokládán růst ročně o 1 % z dnešní ceny.

4.2. Stanovení investičních a provozních nákladů

Všechny investice jsou vyhodnocovány po dobu deseti let, jelikož turbíny mají garantovanou životnost 8 000 hodin, což u plynové turbíny s využitím skoro 8 000 hodin ročně znamená životnost cca 10 let. Všechny uvedené náklady jsou náklady roční.

V roce 2018 dojde k vypršení garantované ceny nakupované páry, což by mohlo mít za následek její zdražení, tím by se staly všechny varianty konkurenceschopné. Bohužel není možné novou cenu v dnešní době odhadnout, proto jsou investice vyhodnocovány při garantované ceně páry po celou dobu životnosti.

Tab. 7 Tabulka cen jednotlivých médií pro každý rok

Rok	Kurz eura [*Kč*]	Zemní plyn [*Kč/Nm*^{3}]	Elektřina [K*č/MWh*]	Příspěvek na OZE [*Kč/MWh*]	Emisní povolenky [*eur/t*]	Emisní povolenky [*Kč/MWh*]	Vodné a stočné [*Kč/m*^{3}]	Pára [*Kč/MWh*]
1	27	8,66	2 200	495	5,82	31,43	89,76	1 008,0
2	27	8,66	2 200	495	6,98	37,71	90,66	1 018,1
3	27	8,92	2 222	495	8,38	45,26	91,56	1 028,2
4	27	8,92	2 222	495	10,06	54,31	92,48	1 038,2
5	27	9,19	2 244	495	12,07	65,17	93,40	1 048,3
6	27	9,19	2 244	495	14,48	78,20	94,34	1 058,4
7	27	9,46	2 267	495	17,38	93,84	95,28	1 068,5
8	27	9,46	2 267	495	17,50	94,50	96,23	1 078,6
9	27	9,75	2 289	495	17,50	94,50	97,20	1 088,6
10	27	9,75	2 289	495	17,50	94,50	98,17	1 098,7

4.2.1. Výpočet ekonomických hodnotících kritérií

Cash flow

Cash flow, dále jen CF, je potřeba vypočítat pro určení statické návratnosti investice a vypočítá se podle vztahu (60), kde U je ušetřené množství peněz ročně a O jsou roční odpisy zařízení.

$$\mathrm{CF} = \mathrm{U} + \mathrm{O} \tag{60}$$

Zařízení spadá do 3. odpisové skupiny a proto se v prvním roce odepisuje 5,5 % z ceny investice a v dalších letech 10,5 % z ceny.

Kumulované cash flow

Kumulované CF se spočítá součtem všech CF až do požadovaného roku, přičemž v nultém roce je CF záporná cena investice.

Statická návratnost

Statická návratnost je časový údaj, kdy kumulované CF je rovno nule. Jelikož CF není ve všech letech konstantní, tak je návratnost určována graficky z časového průběhu kumulovaného CF, např. Obr. 36.

Diskontní součinitel

Zohledňuje časovou hodnotu peněz. Závisí na diskontní sazbě daného podniku a roku, který je vyhodnocován. Vypočítá se ze vztahu (61), kde r je diskontní sazba a t je zkoumaný rok investice.

$$\mathrm{DS} = \frac{1}{1+\mathrm{r}^{\mathrm{t}}} \tag{61}$$

Diskontované CF

Hodnota diskontovaného CF, dále jen dCF, je vždy menší než hodnota CF, což je dáno tím, že koruna dnes má vyšší hodnotu než koruna zítra. Hodnota dCF je vypočtena dle vztahu (62).

$$\mathrm{dCF} = \mathrm{CF} \cdot \mathrm{DS} \tag{62}$$

Kumulované dCF a čistá současná hodnota (ČSH)

Kumulované dCF se vypočte opět jako suma dCF do požadovaného roku investice. Pokud se součet provede pro všechny roky investice, tak se dostane čistá současná hodnota, která určuje, kolik peněz za svoji životnost investice vydělá nebo prodělá. Pokud je ČSH záporné, tak se investice nevyplatí realizovat.

$$\mathrm{ČSH} = \sum_{\mathrm{t}=0}^{\mathrm{n}} \mathrm{dCF_t} \tag{63}$$

Dynamická návratnost

Určuje se graficky a stejně jako statická návratnost, pouze s rozdílem, že je použit graf časového průběhu kumulovaného dCF.

4.2.2. Stávající situace

Pára a elektřina jsou nakupovány. Pára ze sousední teplárny a elektřina ze sítě.

Celkové ročně spotřebované teplo je určeno sečtením denních spotřebovaných tepel za celý naměřený rok. Celková ročně spotřebovaná elektřina je určena stejným způsobem.

Náklady vypočítané pro nákup obou médií slouží k porovnání, jestli se vlastní výrobou páry a elektřiny ušetří nebo naopak pivovar bude tratit.

Tab. 8 Tabulka určení stávajících nákladů na nákup elektřiny a tepla

Rok	Cena elektřiny [*kč/MWh*]	Cena páry [*kč/MWh*]	Spotřebované teplo [*MWh*]	Náklady na nákup páry [*tis.Kč*]	Spotřebovaná elektřina [*MWh*]	Náklady na nákup elektřiny [*tis.Kč*]	Náklady na nákup médií [*tis.Kč*]
1	2 200	1 008	111 726	112 620	15 085	33 187	145 807
2	2 200	1 018	111 726	113 746	15 085	33 187	146 933
3	2 222	1 028	111 726	114 872	15 085	33 519	148 391
4	2 222	1 038	111 726	115 998	15 085	33 519	149 517
5	2 244	1 048	111 726	117 124	15 085	33 854	150 979
6	2 244	1 058	111 726	118 251	15 085	33 854	152 105
7	2 267	1 068	111 726	119 377	15 085	34 193	153 570
8	2 267	1 079	111 726	120 503	15 085	34 193	154 696
9	2 289	1 089	111 726	121 629	15 085	34 535	156 164
10	2 289	1 099	111 726	122 755	15 085	34 535	157 290

4.2.3. Varianta 1 - výtopna

Vstupní parametry

V tabulce Tab. 9 je vidět výsledná cena investice při výstavbě kotelny se dvěma středotlakými kotli vyrábějícími sytou páru o tlaku 1,4 *MPa*.

Tab. 9 Tabulka určení ceny investice pro variantu 1

Zařízení	Množství	Jednotková cena [*Kč*]	Celková cena [*Kč*]
Kotel 23 t_p/h , 1,4 *MPa*	2	10 640 000	21 280 000
KN 25 m^3 + 2 čerpadla	1	500 000	500 000
NN 25 m^3 + odplyňovač + 4 čerpadla	1	4 300 000	4 300 000
Montáž	1	500 000	500 000
Stavební práce (hala, základy, ocelové konstrukce, komín)	1	21 000 000	21 000 000
Přípojky páry, kondenzátu, vody, plynu, elektřiny	1	1 000 000	1 000 000
Projekt	1	3 000 000	3 000 000
		Součet	**51 580 000**

V další tabulce Tab. 10 je souhrn údajů potřebných pro určení ročních nákladů na výrobu tepla a také samotná výše ročních nákladů.

Účinnost kotle je 97,3 % a výhřevnost zemního plynu je 9,964 kW/Nm^3. Diskontní sazba je zvolena 12 %.

Spotřebovaný zemní plyn se zjistí tak, že se roční potřebný výkon podělí výhřevností zemního plynu a účinností kotlů. Náklady na vodu jsou pro potřebu doplňování 20 % kvůli návratnosti kondenzátu 80 %.

Tab. 10 Souhrnná tabulka nákladů pro výrobu tepla ve variantě 1

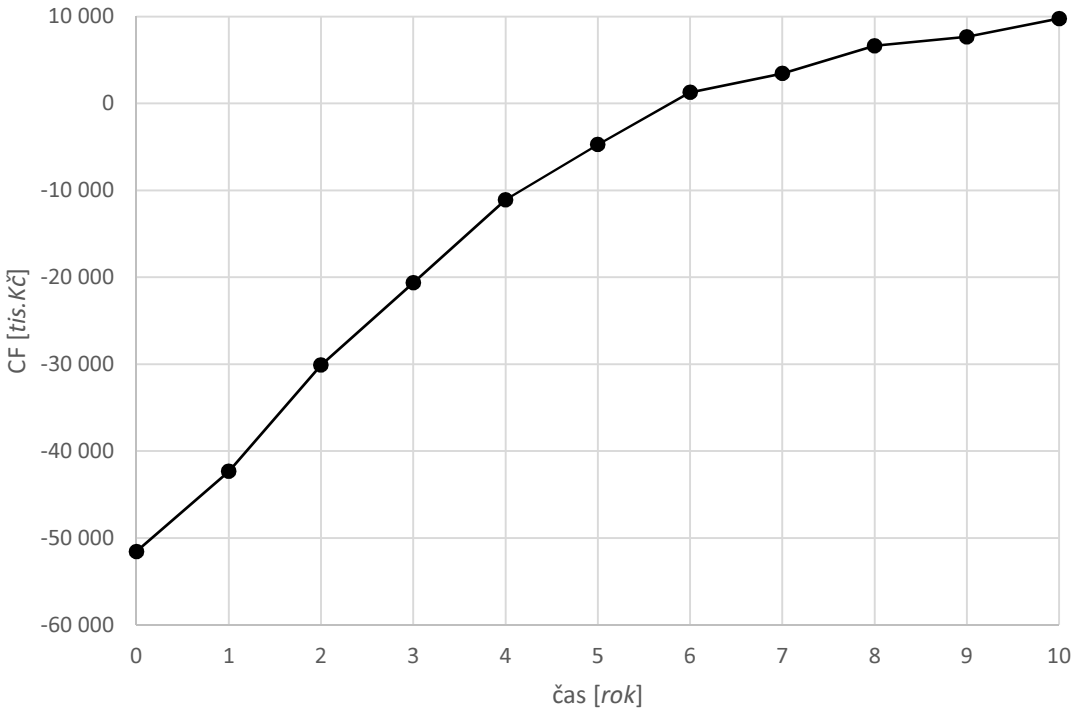
Rok	Potřebné množství páry [m^3]	Potřebný tepelný výkon [*MWh*]	Spotřebovaný zemní plyn [m^3]	Náklady na zemní plyn [*tis.Kč*]	Náklady na emisní povolenky [*tis.Kč*]	Náklady na vodu [*tis.Kč*]	Náklady na výrobu tepla [*tis.Kč*]
0	0	0	0	0	0	0	0
1	161 782	111 726	11 524 231	99 800	3 511	2 904	106 215
2	161 782	111 726	11 524 231	99 800	4 214	2 933	106 947
3	161 782	111 726	11 524 231	102 794	5 056	2 963	110 813
4	161 782	111 726	11 524 231	102 794	6 068	2 992	111 854
5	161 782	111 726	11 524 231	105 878	7 281	3 022	116 181
6	161 782	111 726	11 524 231	105 878	8 737	3 052	117 667
7	161 782	111 726	11 524 231	109 054	10 485	3 083	122 622
8	161 782	111 726	11 524 231	109 054	10 558	3 114	122 726
9	161 782	111 726	11 524 231	112 326	10 558	3 145	126 029
10	161 782	111 726	11 524 231	112 326	10 558	3 176	126 060

V Tabulce Tab. 11 jsou vidět postupné hodnoty při výpočtu cash flow investice a diskontovaného cash flow. Ročně ušetřené teplo je rozdíl nákladů na nákup tepla a na výrobu.

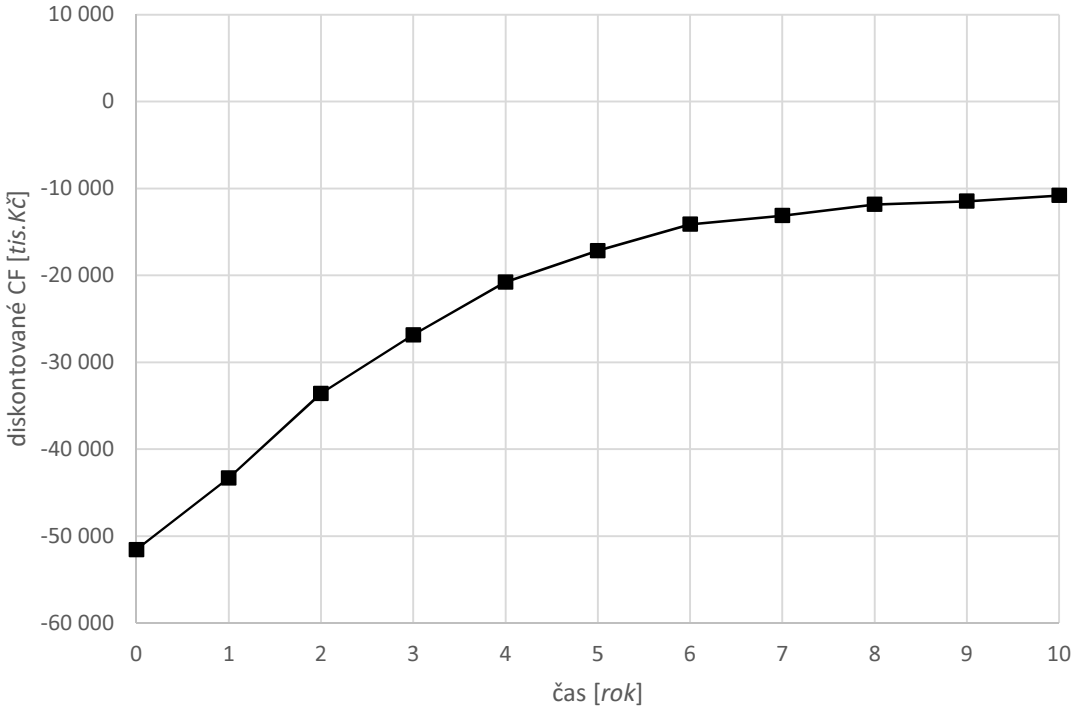
Tab. 11 Tabulka cash flow a čisté současné hodnoty pro variantu 1

Rok	Náklady na výrobu tepla [*tis.Kč*]	Odpisy [*tis.Kč*]	Ušetřeno za teplo [*tis.Kč*]	CF [*tis.Kč*]	Kumulované CF [*tis.Kč*]	DS	Diskontované CF [*tis.Kč*]	Kumulované diskontované CF [*tis.Kč*]
0	0	0	0	-51 580	-51 580	1,00	-51 580	-51 580
1	106 215	2 837	6 404	9 241	-42 339	0,89	8 251	-43 329
2	106 947	5 416	6 799	12 215	-30 124	0,80	9 738	-33 591
3	110 813	5 416	4 059	9 475	-20 649	0,71	6 744	-26 847
4	111 854	5 416	4 145	9 560	-11 088	0,64	6 076	-20 771
5	116 181	5 416	943	6 359	-4 729	0,57	3 608	-17 163
6	117 667	5 416	583	5 999	1 270	0,51	3 039	-14 123
7	122 622	5 416	-3 245	2 171	3 441	0,45	982	-13 141
8	122 726	5 416	-2 223	3 193	6 634	0,40	1 290	-11 852
9	126 029	5 416	-4 399	1 016	7 651	0,36	367	-11 485
10	126 060	5 416	-3 305	2 111	9 762	0,32	680	-10 805

Z grafu Obr. 36 je vidět, že statická návratnost je téměř 6 let. Z grafu Obr. 37 je poté vidět, že při uvažování změny hodnoty peněz v čase se tato varianta nevyplatí. I pokud by zařízení fungovalo déle než 10 let, tak se nesplatí, jelikož po 10 letech je odepsáno a cash flow by poté bylo náhle záporné.



Obr. 36 Časový průběh kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro první variantu



Obr. 37 Časový průběh diskontovaného kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro první variantu

4.2.4. Varianta 3 – teplárna s parní turbínou

V tabulce Tab. 12 je vidět výsledná cena investice při výstavbě kotelny se dvěma kotli na mírně přehřátou páru o tlaku 2,0 *MPa* a točivou redukcí o elektrickém výkonu 500 kW_e. Cena investice je vyšší než u varianty 1 kvůli turbíně a vyššímu pracovnímu tlaku kotlů.

Tab. 12 Tabulka určení ceny investice varianty 3

Zařízení	Množství	Jednotková cena [*Kč*]	Celková cena [*Kč*]
Turbína 500 kW_e	1	7 000 000	7 000 000
Kotel 20 t_p/h, 2,0 *MPa*, 235 °*C*	2	12 000 000	24 000 000
Akumulátor páry 40 m^3	1	6 000 000	6 000 000
KN 25 m^3 + 2 čerpadla	1	500 000	500 000
NN 25 m^3 + odplyňovač + 4 čerpadla	1	4 500 000	4 500 000
Montáž	1	700 000	700 000
Stavební práce (hala, základy, ocelové konstrukce, komín)	1	23 000 000	23 000 000
Přípojky páry, kondenzátu, vody, plynu, elektřiny	1	1 000 000	1 000 000
Projekt	1	3 500 000	3 500 000
		Součet	**70 200 000**

V následující tabulce Tab. 13 je souhrn údajů potřebných pro určení ročních nákladů na výrobu tepla a také obsahuje samotnou výši ročních nákladů. Náklady na emisní povolenky jsou vyšší než u první varianty, jelikož je do nich započtena i energie potřebná pro výrobu elektřiny. Vody je využito stejné množství, proto jsou náklady na vodu stejné.

Účinnost kotle je 97,3 % a výhřevnost zemního plynu je 9,964 kW/Nm^3. Diskontní sazba je volena 12 %.

Tab. 13 Souhrnná tabulka nákladů pro výrobu tepla ve variantě 3

Rok	Potřebné množství páry [m^3]	Potřebný tepelný výkon [*MWh*]	Spotřebovaný zemní plyn [m^3]	Náklady na zemní plyn [*tis.Kč*]	Náklady na emisní povolenky [*tis.Kč*]	Náklady na vodu [*tis.Kč*]	Náklady na teplo [*tis.Kč*]
0	0	0	0	0	0	0	0
1	161 782	111 726	11 524 231	99 800	3 617	2 904	106 321
2	161 782	111 726	11 524 231	99 800	4 340	2 933	107 073
3	161 782	111 726	11 524 231	102 794	5 208	2 963	110 965
4	161 782	111 726	11 524 231	102 794	6 250	2 992	112 036
5	161 782	111 726	11 524 231	105 878	7 500	3 022	116 400
6	161 782	111 726	11 524 231	105 878	9 000	3 052	117 930
7	161 782	111 726	11 524 231	109 054	10 800	3 083	122 937
8	161 782	111 726	11 524 231	109 054	10 876	3 114	123 043
9	161 782	111 726	11 524 231	112 326	10 876	3 145	126 346
10	161 782	111 726	11 524 231	112 326	10 876	3 176	126 378

Pro výpočet spotřeby zemního plynu na výrobu elektřiny je nejdříve potřeba určit množství vyrobené elektřiny. To je určeno z předpokladu, že při maximálním naměřeném průtoku má turbína výkon 500 kW_e a při nižším průtoku má poměrově menší elektrický výkon. Následně je roční množství vyrobené elektřiny poděleno součinem účinností turbíny a vyjde potřebná energie v plynu pro výrobu elektřiny.

Energie pro výrobu elektřiny se převede na množství zemního plynu a z toho se určí náklady na plyn pro elektřinu. Následně se přičtou příspěvky na OZE za každou vyrobenou *MWh* a tím se dostanou celkové náklady na výrobu elektřiny.

Všechny dílčí hodnoty a celkové náklady na výrobu elektřiny jsou v tabulce Tab. 14.

Tab. 14 Souhrnná tabulka nákladů pro výrobu elektřiny ve variantě 3

Rok	Potřebný elektrický výkon [*MWh*]	Množství vyrobené elektřiny [*MWh*]	Množství energie v plynu pro výrobu elektřiny [*MWh*]	Množství plynu pro výrobu elektřiny [m^3]	Náklady na plyn pro elektřinu [*tis.Kč*]	Náklady na vyrobenou elektřinu [*tis.Kč*]
0	0	0	0	0	0	0
1	15 085	2 236	3 360	346 579	3 001	4 108
2	15 085	2 236	3 360	346 579	3 001	4 108
3	15 085	2 236	3 360	346 579	3 091	4 198
4	15 085	2 236	3 360	346 579	3 091	4 198
5	15 085	2 236	3 360	346 579	3 184	4 291
6	15 085	2 236	3 360	346 579	3 184	4 291
7	15 085	2 236	3 360	346 579	3 280	4 387
8	15 085	2 236	3 360	346 579	3 280	4 387
9	15 085	2 236	3 360	346 579	3 378	4 485
10	15 085	2 236	3 360	346 579	3 378	4 485

Pokud se sečtou náklady na výrobu tepla N_t *a* elektřiny N_e, tak vyjdou celkové náklady na výrobu médií N_m, viz (64). K nim se přičtou náklady na nákup zbylé potřebné elektřiny $N_{e_{nákup}}$ a toto celé se následně odečte od nákladů při nákupu obou médií, jak je vidět ve vztahu (66), čímž se dostane množství ušetřených peněz ročně U. Poté se vypočítají zbylé ekonomické veličiny podle (60), (62) a (63) a vynesou se do tabulky Tab. 15.

$$\mathrm{N_m} = \mathrm{N_t} + \mathrm{N_e} \tag{64}$$

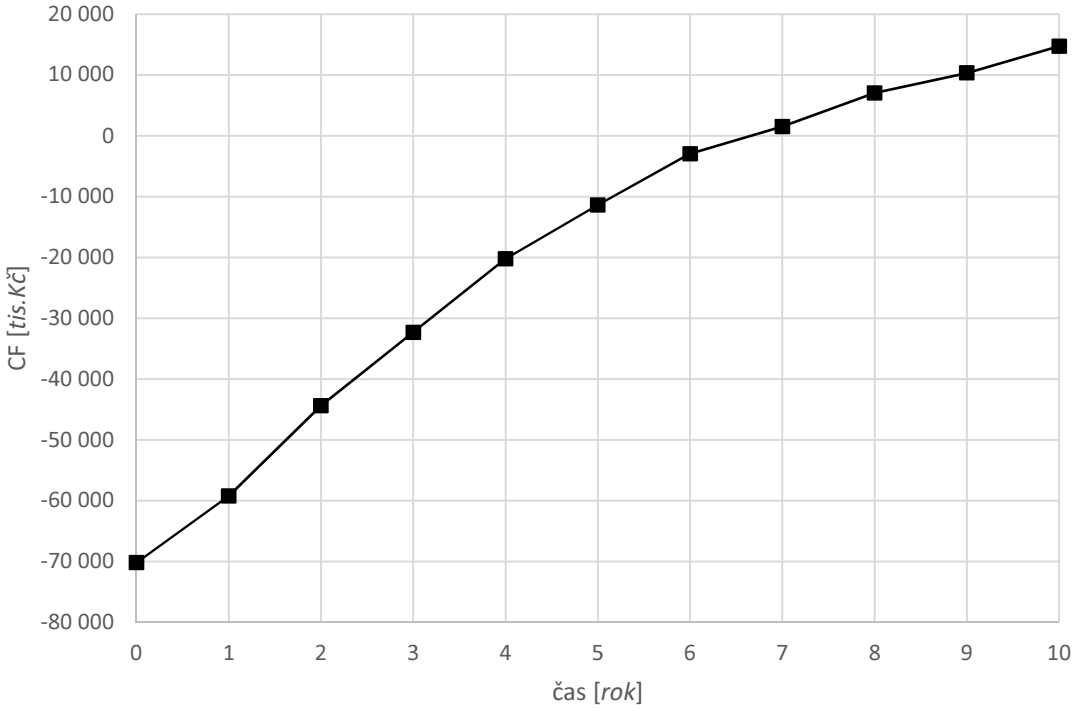
$$\mathrm{N_c} = \mathrm{N_m} + \mathrm{N_{e_{nákup}}} \tag{65}$$

$$\mathrm{U} = \mathrm{N_{c_{nákup}}} - \mathrm{N_c} \tag{66}$$

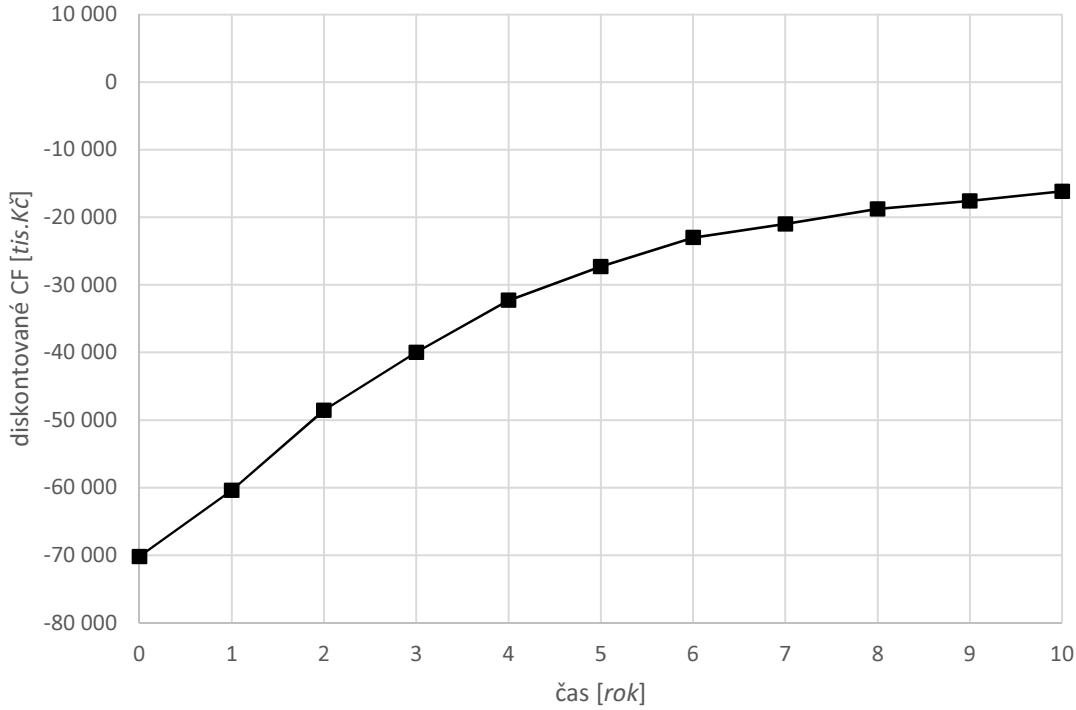
Tab. 15 Tabulka cash flow a čisté současné hodnoty pro variantu 3

Náklady na výrobu médií a nákup elektřiny [*tis.Kč*]	Ušetřené náklady výrobou médií [*tis.Kč*]	Odpisy [*tis.Kč*]	CF [*tis.Kč*]	Kumulované CF [*tis.Kč*]	DS	Diskontované CF [*tis.Kč*]	Kumulované diskontované CF [*tis.Kč*]
0	0	0	-70 200	-70 200	1,00	-70 200	-70 200
138 697	7 110	3 861	10 971	-59 229	0,89	9 795	-60 405
139 449	7 483	7 371	14 854	-44 375	0,80	11 842	-48 563
143 714	4 677	7 371	12 048	-32 326	0,71	8 576	-39 987
144 785	4 732	7 371	12 103	-20 223	0,64	7 692	-32 295
149 527	1 452	7 371	8 823	-11 400	0,57	5 006	-27 289
151 057	1 048	7 371	8 419	-2 982	0,51	4 265	-23 024
156 448	-2 878	7 371	4 493	1 511	0,45	2 032	-20 991
156 554	-1 859	7 371	5 512	7 024	0,40	2 226	-18 765
160 247	-4 083	7 371	3 288	10 312	0,36	1 186	-17 579
160 278	-2 988	7 371	4 383	14 695	0,32	1 411	-16 168

Z grafu Obr. 38 je vidět, že statická návratnost je kolem 6,7 roku. Z grafu Obr. 39 je dále vidět, že při uvažování změny hodnoty peněz v čase se tato varianta také nevyplatí.



Obr. 38 Časový průběh kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro třetí variantu



Obr. 39 Časový průběh diskontovaného kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro třetí variantu

4.2.5. Varianta 5 – teplárna s plynovou turbínou

Tato varianta je investičně nejnáročnější převážně kvůli plynové turbíně, ale také kvůli kotli na odpadní teplo. V tabulce Tab. 16 je vidět celková cena investice.

Tab. 16 Tabulka určení ceny investice pro variantu 5

Zařízení	Množství	Jednotková cena [*Kč*]	Celková cena [*Kč*]
Plynová turbína 1 MW_e	1	50 000 000	50 000 000
Kotel 23 t_p/h , 1,4 *MPa*	1	10 640 000	10 640 000
Spalinový kotel 23 t_p/h , 1,4 *MPa*	1	12 000 000	12 000 000
KN 25 m^3 + 2 čerpadla	1	500 000	500 000
NN 25 m^3 + odplyňovač + 4 čerpadla	1	4 300 000	4 300 000
Montáž	1	1 000 000	1 000 000
Stavební práce (hala, základy, ocelové konstrukce, komín)	1	23 000 000	23 000 000
Přípojky páry, kondenzátu, vody, plynu, elektřiny	1	1 000 000	1 000 000
Projekt	1	3 700 000	3 700 000
		Součet	**106 140 000**

Účinnost kotle je 97,3 % a výhřevnost zemního plynu je 9,964 kW/Nm^3. Diskontní sazba je volena 12 %. Účinnost spalinového kotle je zvolena 93 %.

Množství spotřebovaného zemního plynu je vypočítáno při polovině potřebného tepla vyráběného v normálním kotli na zemní plyn a polovině vyráběné ve spalinovém kotli. Ve výsledku vyjdou náklady na teplo vyšší než u předešlých variant kvůli nižší účinnosti výroby.

Tab. 17 Souhrnná tabulka nákladů pro výrobu tepla ve variantě 5

Rok	Potřebné množství páry [m^3]	Potřebný tepelný výkon [*MWh*]	Spotřebovaný zemní plyn [m^3]	Náklady na zemní plyn [*tis.Kč*]	Náklady na emisní povolenky [*tis.Kč*]	Náklady na vodu [*tis.Kč*]	Náklady na teplo [*tis.Kč*]
0	0	0	0	0	0	0	0
1	161 782	111 726	11 790 651	102 107	3 780	2 904	108 791
2	161 782	111 726	11 790 651	102 107	4 536	2 933	109 576
3	161 782	111 726	11 790 651	105 170	5 443	2 963	113 576
4	161 782	111 726	11 790 651	105 170	6 531	2 992	114 694
5	161 782	111 726	11 790 651	108 325	7 837	3 022	119 185
6	161 782	111 726	11 790 651	108 325	9 405	3 052	120 783
7	161 782	111 726	11 790 651	111 575	11 286	3 083	125 944
8	161 782	111 726	11 790 651	111 575	11 365	3 114	126 054
9	161 782	111 726	11 790 651	114 922	11 365	3 145	129 432
10	161 782	111 726	11 790 651	114 922	11 365	3 176	129 463

Nejdříve je potřeba určit množství vyrobené elektřiny. To je určeno z diagramu určení maximálního elektrického výkonu plynové turbíny Obr. 31. Po většinu roku turbína pracuje na maximální výkon. Všechny hodinové výkony se sečtou a tím dostaneme množství vyrobené elektřiny. Dále se postupuje obdobně jako ve variantě 3.

Všechny dílčí hodnoty a celkové náklady na výrobu elektřiny jsou v tabulce Tab. 18.

Tab. 18 Souhrnná tabulka nákladů pro výrobu elektřiny ve variantě 5

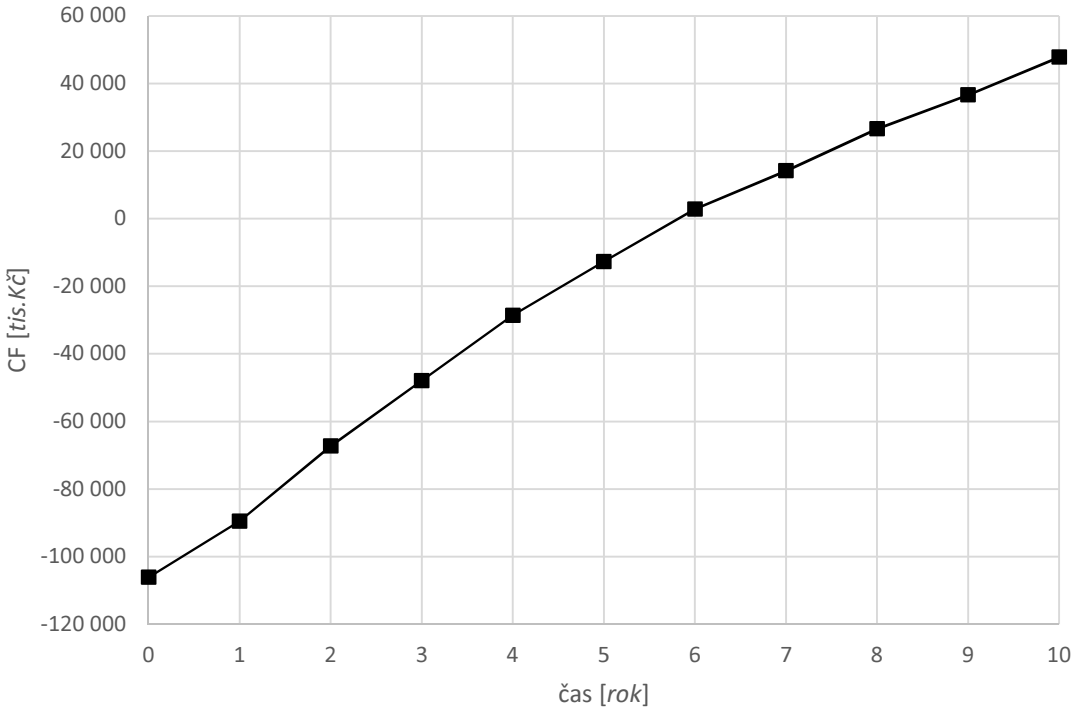
Rok	Potřebný elektrický výkon [*MWh*]	Množství vyrobené elektřiny [*MWh*]	Množství plynu pro elektřinu [m^3]	Náklady na ZP pro elektřinu [*tis.Kč*]	Náklady na vyrobenou elektřinu [*tis.Kč*]
0	0	0	0	0	0
1	15 085	8 536	879 907	7 620	11 845
2	15 085	8 536	879 907	7 620	11 845
3	15 085	8 536	879 907	7 849	12 074
4	15 085	8 536	879 907	7 849	12 074
5	15 085	8 536	879 907	8 084	12 309
6	15 085	8 536	879 907	8 084	12 309
7	15 085	8 536	879 907	8 327	12 552
8	15 085	8 536	879 907	8 327	12 552
9	15 085	8 536	879 907	8 576	12 802
10	15 085	8 536	879 907	8 576	12 802

Všechny ekonomické ukazatele se vypočítají stejně jako ve variantě 5. Dílčí výsledky jsou vyneseny do tabulky Tab. 19.

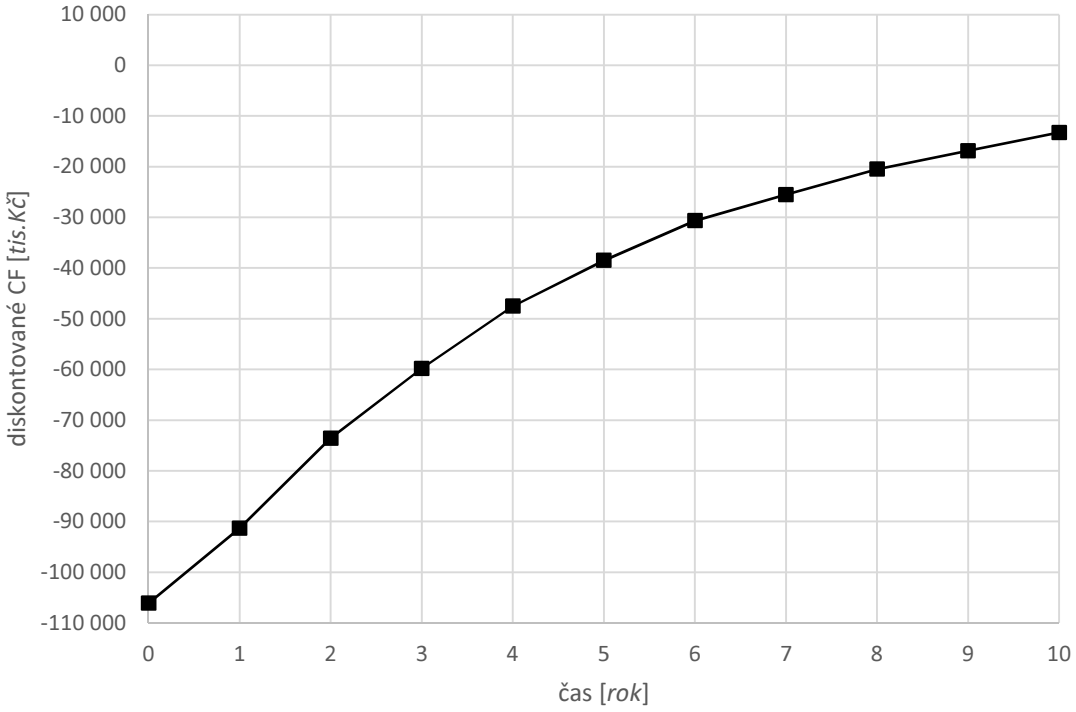
Tab. 19 Tabulka cash flow a čisté současné hodnoty pro variantu 5

Náklady na výrobu médií a nákup elektřiny [*tis.Kč*]	Ušetřené náklady výrobou médií [*tis.Kč*]	Odpisy [*tis.Kč*]	CF [*tis.Kč*]	Kumulované CF [*tis.Kč*]	DS	dCF [*tis.Kč*]	Kumulované dCF [*tis.Kč*]
0	0	0	-106 140	-106 140	1,00	-106 140	-106 140
135 044	10 762	5 838	16 600	-89 540	0,89	14 821	-91 319
135 829	11 104	11 145	22 248	-67 292	0,80	17 736	-73 582
140 202	8 189	11 145	19 334	-47 958	0,71	13 762	-59 821
141 320	8 197	11 145	19 342	-28 616	0,64	12 292	-47 529
146 192	4 786	11 145	15 931	-12 685	0,57	9 040	-38 489
147 790	4 315	11 145	15 460	2 775	0,51	7 832	-30 657
153 341	229	11 145	11 374	14 149	0,45	5 145	-25 512
153 450	1 245	11 145	12 390	26 539	0,40	5 004	-20 508
157 227	-1 063	11 145	10 082	36 620	0,36	3 636	-16 872
157 258	32	11 145	11 176	47 797	0,32	3 598	-13 274

Z grafu Obr. 40 je vidět, že statická návratnost je téměř 6 let. Z grafu Obr. 41 je vidět, že při uvažování změny hodnoty peněz v čase se i tato varianta nevyplatí.



Obr. 40 Časový průběh kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro pátou variantu



Obr. 41 Časový průběh diskontovaného kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro pátou variantu

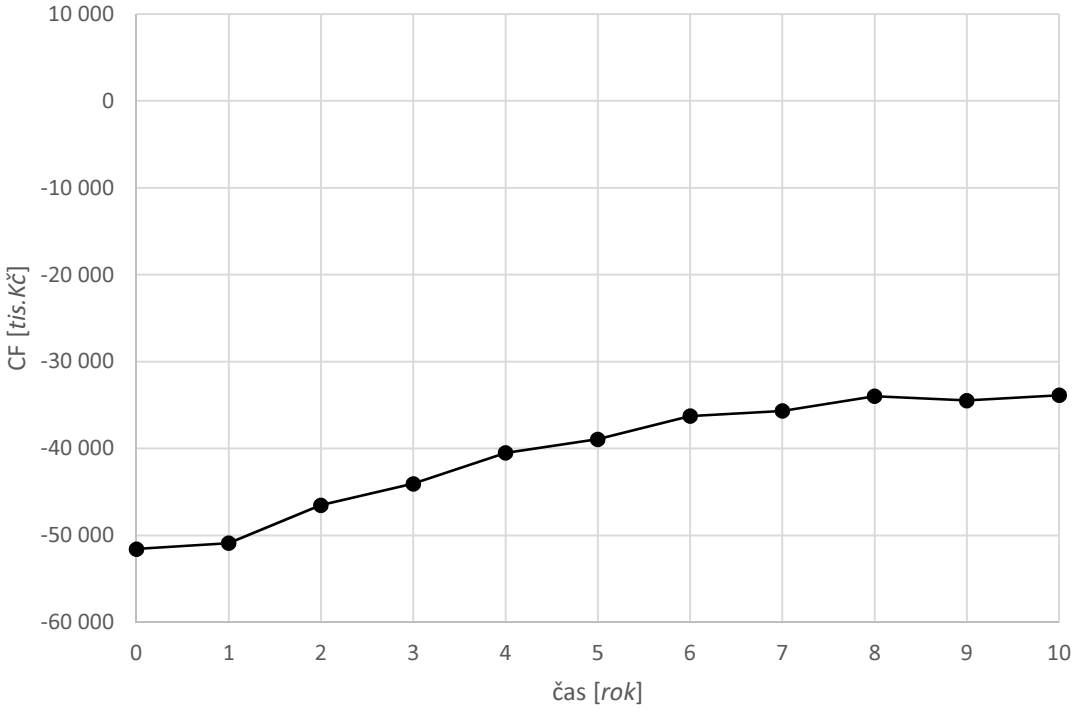
4.2.6. Varianta 1 s fixní cenou emisních povolenek

V případě zavedení fixní ceny emisních povolenek vzrostou náklady na výrobu tepla v kotelně. V každém roce budou náklady na emisní povolenky 12 066 tis. *Kč* oproti například prvnímu roku, kdy u varianty 1 byly náklady jenom 3 511 tis. *Kč*.

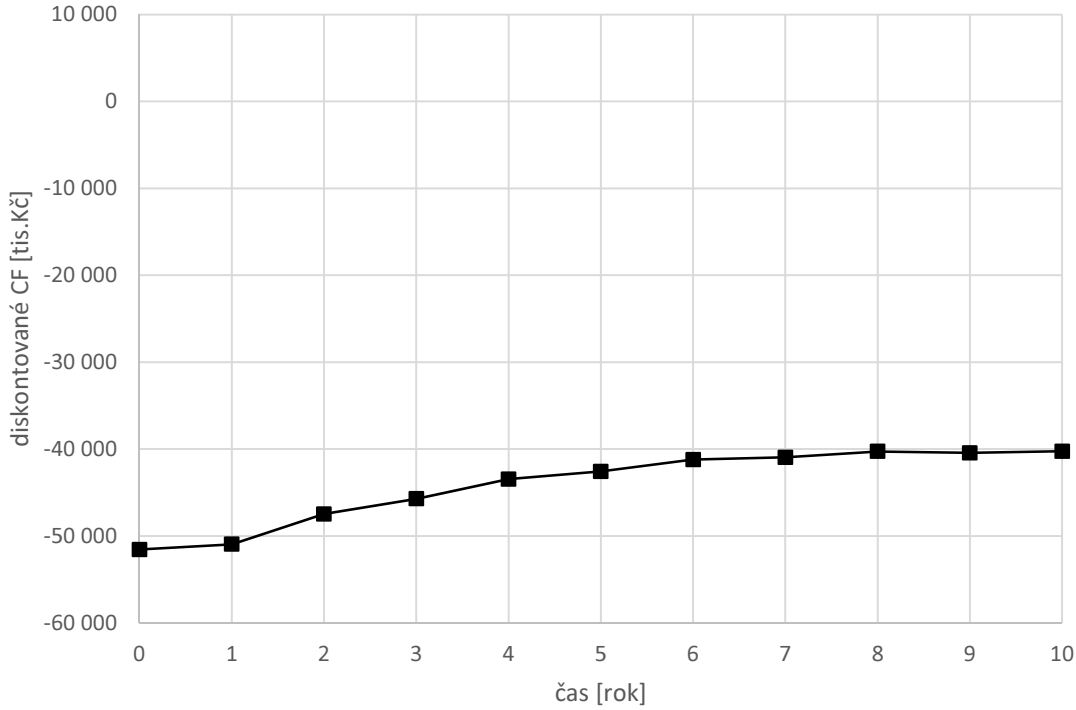
Výpočet je úplně stejný jako pro variantu 1, proto jsou zde pouze ukázány grafy časového průběhu CF a dCF, viz Obr. 42 a Obr. 42. Z grafů je vidět, že ani bez uvažování časové hodnoty peněz se varianta nevyplatí.

Jediné, co by mohlo pomoci, je předpoklad, že při zvýšení ceny povolenek se zvedne i cena nakupované páry z teplárny. To zde kvůli nemožnosti odhadu není postihnuto.

Tato varianta slouží pouze pro ilustraci, jak moc by fixní cena povolenek postihla výslednou konkurenceschopnost variant, proto nebude dále zkoumána.



Obr. 42 Časový průběh kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro první variantu s fixní cenou povolenek



Obr. 43 Časový průběh diskontovaného kumulovaného cash flow po dobu deseti let pro první variantu s fixní cenou povolenek

4.2.7. Určení mezní ceny zemního plynu

Jelikož ČSH všech variant je po deseti letech záporná, tak jako další ukazatel bude určena cena zemního plynu, při které je ČSH rovna nule a varianta se tedy za dobu svojí životnosti splatí. Pokud by cena dále klesala, tak by se zkracovala návratnost investice a zvyšoval by se její přínos za dobu životnosti.

Postupuje se iteračním výpočtem, kdy se mění cena zemního plynu a následně se kontroluje, jestli je ČSH rovna nule.

Varianta 1

Pro tuto variantu je mezní hodnota ceny zemního plynu 8,5 *Kč/Nm*^{3}.

Při této ceně je statická doba návratnosti přibližně 4,4 roku.

Varianta 3

Zde je mezní hodnota ceny zemního plynu 8,43 *Kč/Nm*^{3}.

Při této ceně je statická doba návratnosti přibližně 4,8 roku.

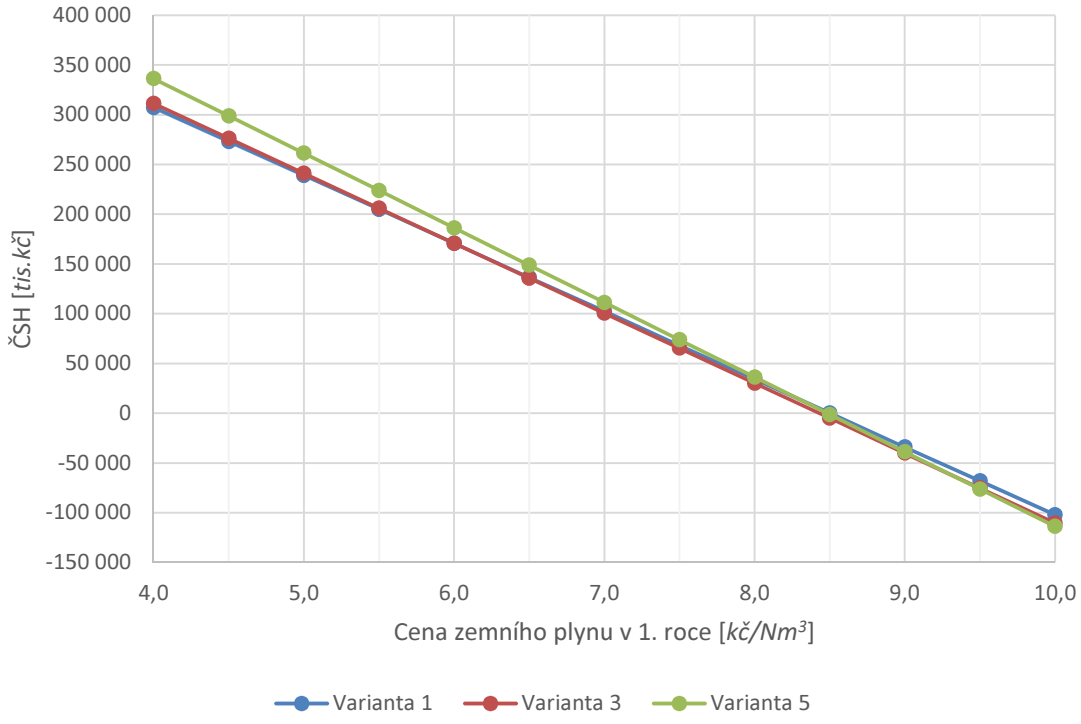
Varianta 5

Pro poslední variantu je mezní hodnota ceny zemního plynu 8,48 *Kč/Nm*^{3}.

Při této ceně je statická doba návratnosti přibližně 5,0 roku.

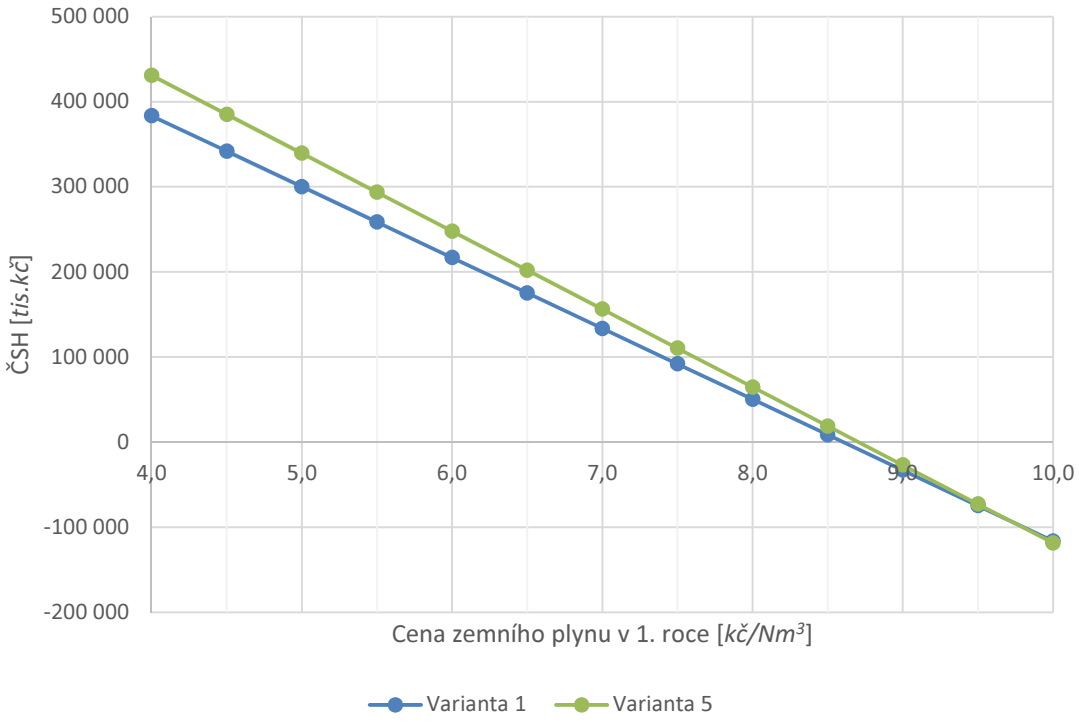
Závislost ČSH na ceně zemního plynu

Na první pohled je podle mezní hodnoty ceny zemního plynu nejvýhodnější první varianta vyrábějící pouze teplo. Podle grafu Obr. 44 není ovšem rozhodnutí tak jednoduché. Všechny varianty jsou si podobné.



Obr. 44 Závislost ČSH na ceně zemního plynu pro diskontní sazbu 12 %

Pro úplnost je do grafu Obr. 45 zanesena závislost ČSH na ceně zemního plynu při diskontní sazbě rovné 7,5 %. Zaneseny jsou pouze varianty 1 a 5, jelikož varianta 3 je ekonomicky nevýhodná.



Obr. 45 Závislost ČSH na ceně zemního plynu pro diskontní sazbu 7,5 %

4.2.8. Vyhodnocení ekonomických ukazatelů

Ani jedna z ekonomicky zkoumaných variant při dnešní ceně zemního plynu a uvažované časové hodnotě peněz se nevyplatí. Je to převážně dáno vysokou nákupní cenou zemního plynu a naopak nízkou cenou nakupované páry z teplárny. Varianta 3 s parní turbínou se zdá jako nejméně vhodná. Nejblíže k tomu, že se za deset let splatí, je podle většiny ukazatelů varianta 1 bez výroby elektřiny.

Podle ekonomických ukazatelů si jsou uvedené varianty velmi podobné, jedině varianta 3 s parní turbínou vychází při nynější ceně zemního plynu podle ČSH jako nejhorší.

Podle mezní ceny zemního plynu vychází nejlépe varianta 1 s výrobou pouze tepla.

Pokud se přihlédne k závislosti ČSH na ceně zemního plynu, viz Obr. 44, je vidět, že varianta 1 vyhrává pouze při poklesu ceny zemního plynu do 8,3 *Kč/Nm*^{3}. V případě většího poklesu ceny by začala být výhodnější varianta 5 s plynovou turbínou, která by za dobu životnosti vydělala více peněz.

Při nižší diskontní sazbě by podle závislosti ČSH na ceně zemního plynu byla nejvýhodnější varianta 5 s plynovou turbínou. Dokonce by se za deset let splatila. V příkladu je zvolena sazba 7,5 %. Při dalším snižování diskontní sazby se zvyšuje výhodnost páté varianty oproti ostatním.

Závěr

Podle teoretických poznatků a poskytnutých naměřených dat páry a elektřiny byly vybrány možné varianty samotné výroby tepla nebo kombinované výroby tepla a elektřiny. Tyto varianty byly technicky zhodnoceny, hlavně podle možnosti pokrytí špiček odběru tepla, kdy se jako nejvhodnější ukázalo pět variant.

První byla pouze výroba tepla ve dvou středotlakých kotlích o výkonu 2 x 23 t_p/h (tlak 1,4 *MPa*). Druhá byla také pouze výroba tepla, ale ve dvou kotlích o výkonu 2 x 20 t_p/h (tlak 2,0 *MPa*). Třetí byla kombinovaná výroba tepla a elektřiny s točivou redukcí páry o výkonu 500 kW_e a kotli o výkonu 2 x 20 t_p/h (tlak 2,0 *MPa*, teplota 235 °*C*), pro akumulaci tepla zde slouží akumulátor o velikosti 40 m^3. Čtvrtá byla opět kombinovaná výroba tepla a elektřiny, ovšem s parní turbínou o výkonu 530,9 kWe, k ní kotel o výkonu 17 t_p/h (tlak 3,5 MPa, teplota 293 °*C*) a dále kotel o výkonu 25 t_p/h (tlak 1,4 *MPa*) a akumulátor o velikosti 40 m^3. Poslední, pátá, byla varianta s plynovou turbínou o elektrickém výkonu 1 MW_e a středotlakými kotli o výkonu 2 x 23 t_p/h (tlak 1,4 *MPa*).

Následně byly tři technicky nejvhodnější varianty (varianta 1,3,5) zhodnoceny ekonomicky podle kritéria čisté současné hodnoty, statické a dynamické návratnosti. Výpočtová životnost všech variant byla zvolena deset let. Podle těchto ekonomických ukazatelů se ani jedna z variant neukázala jako vhodná, jelikož za dobu své životnosti neuspořily dostatek peněz, aby pokryly investiční náklady. Podle zvolených kritérií byla k tomu být výhodnou nejblíže Varianta 1 - výtopna se středotlakými kotli, která na konci své živostnosti měla čistou současnou hodnotu -10 805 tis. *Kč*.

Kvůli nevýhodnosti všech variant při stávajících podmínkách byly zkoumány mezní hodnoty zemního plynu, kdy by se varianty začaly vyplácet a bylo by vhodné do nich investovat. U varianty se středotlakými kotli je mezní cena zemního plynu 8,5 $Kč/Nm^3$. U varianty s parní turbínou je mezní cena 8,43 $Kč/Nm^3$. a u poslední varianty s plynovou turbínou je mezní cena zemního plynu 8,48 $Kč/Nm^3$.

Z toho vyplívá, že při stávající ceně zemního plynu nedoporučuji investovat do vlastního zdroje. Ovšem při zlevnění ceny zemního plynu nebo výraznějším zdražení ceny nakupované páry ze sousední teplárny doporučuji investovat do stavby vlastního zdroje tepla podle varianty 1 nebo zdroje tepla a elektřiny podle varianty 5.

Použitá literatura

[1] HRDLIČKA, František. *Průmyslová energetika*. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 8001028836.

[2] MUŽÍK, Václav. *Zdroje tepla - kotelny*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 1999. Sešit projektanta - pracovní podklady (Společnost pro techniku prostředí). ISBN 80-020-1331-X.

[3] BAŠTA, Jiří. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě*. Praha: GAS, 2001. ISBN 80-861-7682-7.

[4] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984, 607 s.

[5] IBLER, Zdeněk. *Technický průvodce energetika*. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 8073000261.

[6] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. Vyd. 1. v Praze: VŠCHT, 2010, 296 s. ISBN 9788070807460.

[7] Změkčovače. *EUROWATER - průmyslová úprava vody* [online]. b.r. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.eurowater.cz/produkty/standardní_produkty/změkčovače.aspx

[8] ABUV2-1. In: *Úprava vody | Deto Brno, spol. s r.o. - Úprava vody, změkčovače vody* [online]. b.r. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://deto.cz/uploads/images/ABUV2-1.JPG

[9] Reverzní osmózy (RO jednotky). *EUROWATER - průmyslová úprava vody* [online]. b.r. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.eurowater.cz/produkty/standardn%C3%AD_produkty/reverzn%C3%AD_osm%C3%B3zy.aspx

[10] *Válcové kotle - Část 6: Požadavky na výstroj kotle*. 1-9-2011. 2011.

[11] Parní kotle UL-S, UL-SX. *Termická průmyslová zařízení Bosch - Parní kotle, horkovodní kotle, kogenerační jednotky...* [online]. Bosch Industriekessel, 2016 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.bosch-industrial.com/cz/stranka-produkty/parny-kotle/uls-ulsx.html

[12] Kondenzátní modul CSM. *Termická průmyslová zařízení Bosch - Parní kotle, horkovodní kotle, kogenerační jednotky...* [online]. Bosch Industriekessel, 2016 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.bosch-industrial.com/cz/stranka-produkty/komponenty/komponenty-pro-parny-kotle/csm.html

[13] Automatický kombinovaný zvedač/ odvaděč kondenzátu APT14 a APT10 - 07/03/2009 - Řízení a údržba průmyslového podniku. *Hlavní strana - Řízení a*

údržba průmyslového podniku [online]. Trade Media International, 2009 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/automaticky-kombinovany-zvedac-odvadec-kondenzatu-apt14-a-apt10/]

[14] LOOS, Jochen a Markus TUFFNER. Výroba páry a tepla v pivovarech. In: *Termická průmyslová zařízení Bosch - Parní kotle, horkovodní kotle, kogenerační jednotky...* [online]. Bosch Industriekessel, 2012 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.bosch-industrial.com/files/mng/fb025_cz.pdf

[15] DLOUHÝ, Tomáš. ZT p7. In: *Pro studenty - Ústav energetiky* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/files/ZT%20p7.pdf

[16] GAVERNÍK, Michal. *Návrh zdroje chladu pro konkrétní aplikaci*. Brno, 2008, 61 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Zdeněk Jegla.

[17] POLACH, Vladislav. *INOVACE ODBORNÉHO VZDĚLÁVÁNÍ NA STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH ZAMĚŘENÉ NA VYUŽÍVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZDROJŮ PRO 21. STOLETÍ A NA JEJICH DOPAD NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ: Parní kotle*. b.r.. Dostupné také z: https://kke.zcu.cz/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf

[18] SENJUK, Leoš a Bohuslav FECHTNER. *Mezinárodní katalog kotlů*. Praha: Ústav racionalizace ve stavebnictví, 1989. ISBN 80-900-0127-0.

[19] 2f670032a6. *Dukla: Přepravitelné kotle typu OKP* [online]. DUKLA STROJÍRNY, b.r. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: http://www.duklastrojirny.cz/cz/produkty

[20] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku. *Transformační technologie* [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2011, 2016-03-08 [cit. 2016-04-24]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: http://www.transformacni-technologie.cz/parni-turbina-v-technologickem-celku.html

[21] Spalinové kotle s vlastním spalováním. *Termická průmyslová zařízení Bosch - Parní kotle, horkovodní kotle, kogenerační jednotky...* [online]. Bosch Industriekessel, 2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.bosch-industrial.com/cz/stranka-produkty/systemy-pro-spalinove-teplo/spalinove-kotle-s-vlastnym-spalovanym.html

[22] KOUSAL, Milan. *Spalovací turbíny stacionární: Teorie a výpočty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965.

[23] KONEČNÝ, Václav a Miloš ZACHYSTAL. *Návrh paroplynového zařízení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. ISBN 9788070435328.

[24] ŠŤASTNÝ, Miroslav. *Paroplynová zařízení pro elektrárny a teplárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 8001010171.

[25] ŠKORPÍK, Jiří. Plynová turbína v technologickém celku. *Transformační technologie* [online]. Brno: Jiří Škorpík, 2011, 2015-03 [cit. 2016-05-09]. ISSN 1804-8293.

[26] FÍK, Josef. Základní fyzikální vlastnosti ZP (I). In: *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Topinfo, 2004 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/1921-zakladni-fyzikalni-vlastnosti-zp-i

[27] GASCONTROL. *Capstone C1000: Plynová mikroturbína*. Havířov-Suchá, b.r.. Dostupné také z: http://www.gascontrol.cz/technicke_listy/mikroturbina-capstone-c1000.pdf

[28] *Česká národní banka - Česká národní banka* [online]. Česká národní banka, 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.cnb.cz/cs/index.html

[29] *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz: Graf EUR / Kč od 14.5.2014 do 13.5.2016, ČNB, grafy kurzů měn* [online]. 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/nr/CZK-EUR/od-14.5.2014/

[30] *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz: Zemní plyn - aktuální a historické ceny zemního plynu, graf vývoje ceny zemního plynu - od 29.9.2003 - měna CZK 1 m3* [online]. 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.kurzy.cz/komodity/zemni-plyn-graf-vyvoje-ceny/nr_index.asp?A=5&idk=43&od=29.9.2003&curr=CZK&default_curr=USD&unit=1%20m3&lg=1

[31] *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz: Elektřina - aktuální a historické ceny elektřiny, graf vývoje ceny elektřiny - od 29.9.2003 - měna CZK* [online]. 2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektriny-graf-vyvoje-ceny/nr_index.asp?A=5&idk=142&od=29.9.2003&curr=CZK&default_curr=EUR&unit=&lg=1

[32] *Emisní povolenky (CO2) - Komodity - Investičníweb.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.investicniweb.cz/kurzy/detail/eex-european-energy-exchange/carbon-dioxide-eua/eur/233/

[33] Vyhláška: o energetickém auditu a energetickém posudku. In: *Sbírka zákonů*. b.r., ročník 2012, částka 182, číslo 480.

[34] Schválené ceny vodné a stočné pro rok 2016 - VODÁRNA PLZEŇ a.s.. *VODÁRNA PLZEŇ a.s. - VODÁRNA PLZEŇ a.s.* [online]. 2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://www.vodarna.cz/zakaznici/fakturace-a-ceny/schvalene-ceny-vodne-a-stocne-pro-rok-2016/

Seznam příloh

Příloha 1 – Schéma varianty 1 – výtopna

Příloha 2 – Schéma varianty 2 – výtopna

Příloha 3 – Schéma varianty 3 – teplárna s parní turbínou

Příloha 4 – Schéma varianty 4 – teplárna s parní turbínou

Příloha 5 – Schéma varianty 5 – teplárna s plynovou turbínou