

ČVUT PRAHA



Fakulta strojní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ZEVO

Využití tepla z plánovaného ZEVO Mělník pro horkovod Praha

Zpracoval: Bc. Miroslav Pavlíček

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Energetika

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Bartoš, PhD., ústav energetiky FS

Praha 2019

Poděkování

Za cenné připomínky a rady, bych zde rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Ondřeji Bartošovi Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Ondřeje Bartoše Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze, dne 31.5. 2019

.....

podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Miroslav Pavlíček
Název DP:	Využití tepla z plánovaného ZEVO Mělník pro horkovod Praha
Anglický název:	The use of heat from the planned ZEVO Mělník for the Prague heating system
Akademický rok:	2018/2019
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetika
Vedoucí DP:	Ing. Ondřej Bartoš, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 89 Počet obrázků: 35 Počet tabulek: 77 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Zařízení pro energetické využití odpadů, parní turbína
Keywords:	Equipment for energy recovery of waste, steam turbine
Anotace:	Práce se zabývá možností využití tepla z plánované spalovny odpadu v areálu elektrárny Mělník pro horkovod Praha.
Abstract:	The work deals with the possibility of using heat from the planned waste incinerator in the area of the Mělník power plant for the Prague hot water pipeline.

Obsah:

1	SEZNAM ZKRATEK	6
2	ÚVOD	8
3	NAKLÁDÁNÍ S KOMUNÁLNÍM ODPADEM V EU A ČR	10
3.1	Technologie a způsoby spalování odpadů	13
3.1.1	Příklad ZEVO V EU	14
3.1.2	Spalování odpadů v ČR	17
3.1.2.1	ZEVO Praha-Malešice	19
3.1.2.2	SAKO Brno	21
3.1.2.3	Termizo Liberec	23
3.1.2.4	Chotíkov Plzeň	24
4	POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU ZAŘÍZENÍ – LOKALITA ELEKTRÁRNA MĚLNÍK	28
4.1	Horkovodní potrubí Energotrans – Třeboradice	28
4.2	Technologie EMĚ I	32
4.2.1	Parní kotel a sps	32
4.2.2	Parní protitlaká turbína	33
4.2.3	Parní kondenzační turbína	35
4.2.4	Třetí stupeň ohřevu	37
4.3	Technologie EMĚ II	38
4.3.1	Parní kotel	38
4.3.2	Kondenzační turbína	39
4.3.3	Ohříváky topné vody (OTV)	41
5	TECHNICKÉ ŘEŠENÍ – ZEVO	43
5.1	Parní kotel s příslušenstvím	44
5.1.1	Výkon parního kotle	47
5.2	Turbína pro parní oběh ZEVO	49
5.2.1	Varianta 1	49
5.2.2	Varianta 2	53
6	VYHODNOCENÍ VARIANT ZAPOJENÍ PARNÍCH TURBÍN	56
6.1	Porovnání rozdílu investičních nákladů variantního řešení vyvedení tepla ze strojovny ZEVO	56
6.2	Porovnání nákladů provozních médií ZEVO	56
6.3	Celková účinnost zařízení ZEVO	57
6.4	Rozdíl množství vyrobeného tepla v kondenzačním a protitlakém oběhu	57
6.5	Využití vyrobeného tepla v ZEVO v rámci lokality Mělník	58
7	TECHNOLOGICKÝ VÝPOČET PROTITLAKÉ TURBÍNY	60
7.1	Výpočet protitlaké turbíny:	60
7.1.1	Výpočet regulačního rovnotlakého stupně	61
7.1.2	Výpočet stupňové části	67
7.2	Nenávrhové provozní režimy	76
7.2.1	Průtok regulačním stupněm	76
7.2.2	Průtok stupňovou částí	76
8	ZÁVĚR	81

9	LITERATURA A PRAMENY.....	84
9.1	On-line prameny.....	84
9.2	Odborná literatura	85
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	87
10.1	Seznam obrázků	87
10.2	Seznam tabulek.....	88

1 SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Jednotky	Popis/Název
BREF	-	Best available techniques reference
CEWEP	-	Confederation of European Waste-to-Energy Plants
CT	-	Program Cycle-Tempo
CZT	-	Centrální zásobování teplem
D	m	Průměr
DN	-	Jmenovitá světlost potrubí
EGT	-	Energotrans, a.s.
EMĚ	-	Elektrárna Mělník
EU	-	Evropská unie
EVO	-	Energetické využití odpadů
H	J/kg	Výhřevnost
H, h	J, J/kg	Entalpie, měrná entalpie
KVET	-	Kombinovaná výroba elektřina a tepla
LTO	-	Lehký topný olej
m	kg	Hmotnost
NN	-	Napájecí nádrž
NT	-	Nízkotlaká turbína
NTO	-	Nízkotlaký ohřívák
OTV	-	Ohřívák topné vody
P	W	Výkon
PPT	-	Parní a plynové turbíny
Q	J	Teplo
S, s	J/K, J/kgK	Entropie, měrná entropie

Zkratka	Jednotky	Popis/Název
SCR	-	Katalytické čištění spalin
SKO	-	Směsný komunální odpad
SNCR	-	Nekatalytické čištění spalin
SPS	-	Společná parní sběrna
ST	-	Středotlaká turbína
TG	-	Turbogenerátor
TUV	-	Teplá užitková voda
VS	-	Výměňiková stanice
VT	-	Vysokotlaká turbína
ZEVO	-	Zařízení pro energetické využití odpadů
ρ	kg/m ³	Hustota
τ	s	Čas
η	-	Účinnost

2 ÚVOD

Na základě evropské směrnice 99/31/ES Evropská unie požaduje radikální omezení skládkování a poté i jeho ukončení.

Jsou stanoveny i termíny týkající se množství odpadu určeného ke skládkování: [1]

- 2010 o 25% méně biologicky rozložitelných odpadů než v roce 1995
- 2013 o 50% méně biologicky rozložitelných odpadů než v roce 1995
- 2020 o 65% méně biologicky rozložitelných odpadů než v roce 1995

V České republice podle zákona č. 185/2001 Sb., ze dne 15. května 2001 o odpadech a o změně některých dalších zákonů na základě ustanovení Evropské komise, bylo stanoveno konečné datum zákazu skládkování k roku 2024. [2]

V současnosti je ve fázi legislativního projednávání nový Zákon o odpadech, který potvrzuje termín zákazu skládkování k roku 2024, ale rovněž zavádí konkrétní finanční nástroje pro investiční návratnost projektů na vyšších stupních hierarchie nakládání s odpady, mezi které patří energetické využití odpadů (EVO).

Rozdíl mezi spalováním odpadů a energetickým využitím odpadů definuje Zákon o odpadech. Tento zákon stanoví pro energetické využití odpadů nejnižší možnou energetickou účinnost zařízení pro spalování směšného komunálního odpadu 65 %.

Pokud budeme směšný komunální odpad spalovat tak, abychom z něj získali nejméně 65 % energie, jedná se o energetické využití odpadů (EVO), které probíhá v zařízení pro energetické využití odpadů (ZEVO).

Tato práce se bude zabývat hledáním optimálního využití tepla z projektovaného zařízení pro energetické využití odpadů v lokalitě Elektrárny Mělník s maximálním využitím praxí prověřených technických řešení jednotlivých technologií, instalovaných v ČR.

Cílem práce je zhodnotit možnosti využití tepla z plánované spalovny odpadu v areálu elektrárny Mělník pro horkovod Praha.

Práce bude obsahovat:

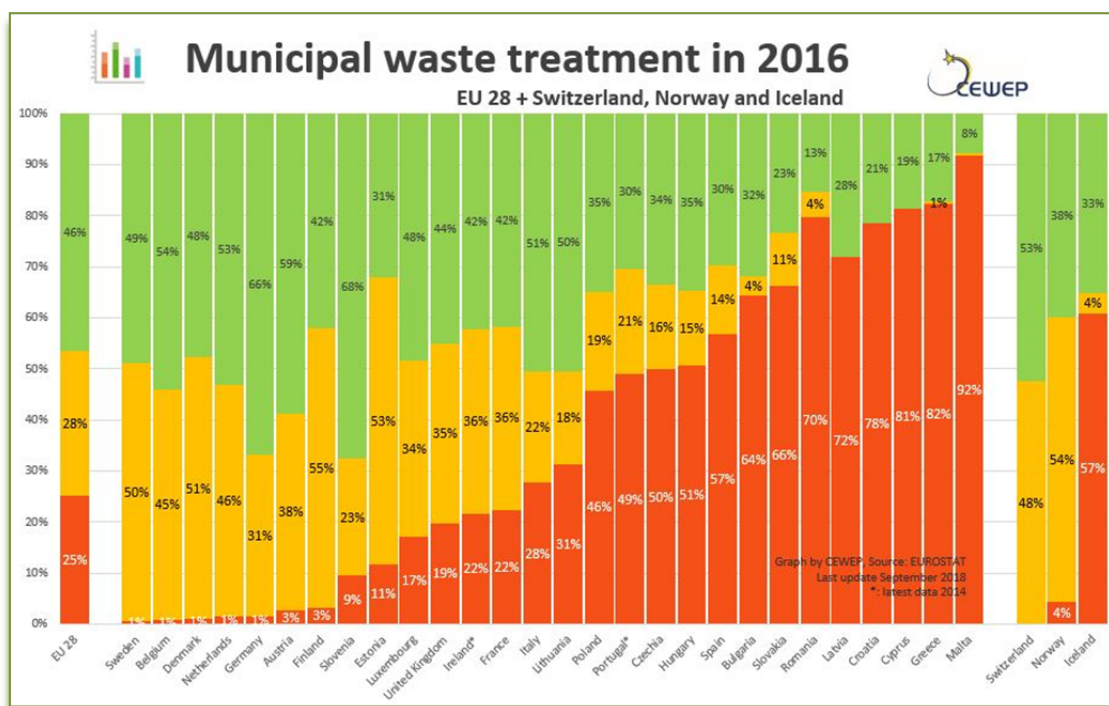
- rešerše současného stavu energetického využití odpadu
- popis celého systému CZT a návrh variant zapojení ZEVO Mělník
- posouzení jednotlivých variant a pro nejlepší variantu detailnější výpočet vybrané komponenty

3 NAKLÁDÁNÍ S KOMUNÁLNÍM ODPADEM V EU A ČR

Celkové množství odpadu vytvořeného v EU kleslo v období let 2004 až 2012 o více než 1 % v absolutním vyjádření a více než 3 % na osobu. V EU v roce 2012 vzniklo 2,5 miliard tun odpadů, což v průměru znamená 5 tun odpadu na osobu.

V zařízeních určených k energetickému využití odpadů, dochází spálením odpadů k produkci tepelné energie. Tato energie je využívána zejména v systémech centrálního zásobování teplem, nebo produkci páry k pohonu parních turbín na výrobu elektrické energie. Takto lze získat jednak zdroj tepelné energie pro zásobování spotřebitelů této energie zejména ve městech a zároveň elektrickou energii, která je pak předávána do elektrické rozvodné sítě.

Na přiloženém grafu je znázorněn podíl jednotlivých způsobů (skládkování, recyklace a spalování) nakládání s odpady v jednotlivých státech Evropy.



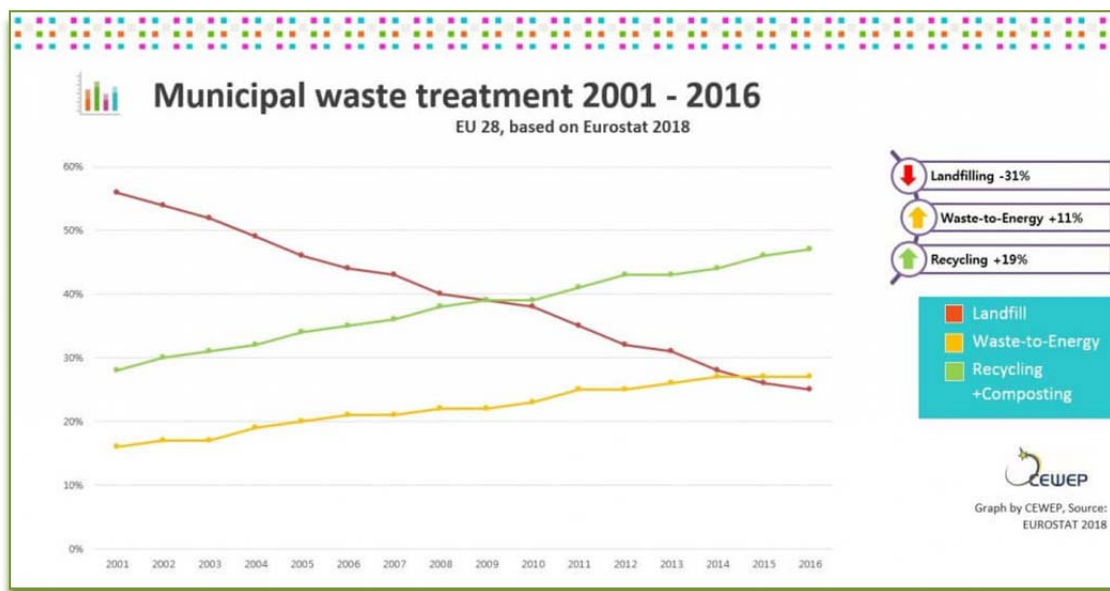
Obrázek č. 1. - Způsob nakládání s odpadem v EU [3]

Znázorněno:

- červená barva skládkování
- žlutá barva spalování
- zelená barva recyklace

Z grafu je také patrné, který ze států EU nejvíce energeticky odpad využívá.

Na dalším obrázku je znázorněn trend zpracování komunálního odpadu v EU + přidružených státech – Švýcarsko, Norsko a Island.



Obrázek č. 2. - Trend zpracování komunálního odpadu [3]

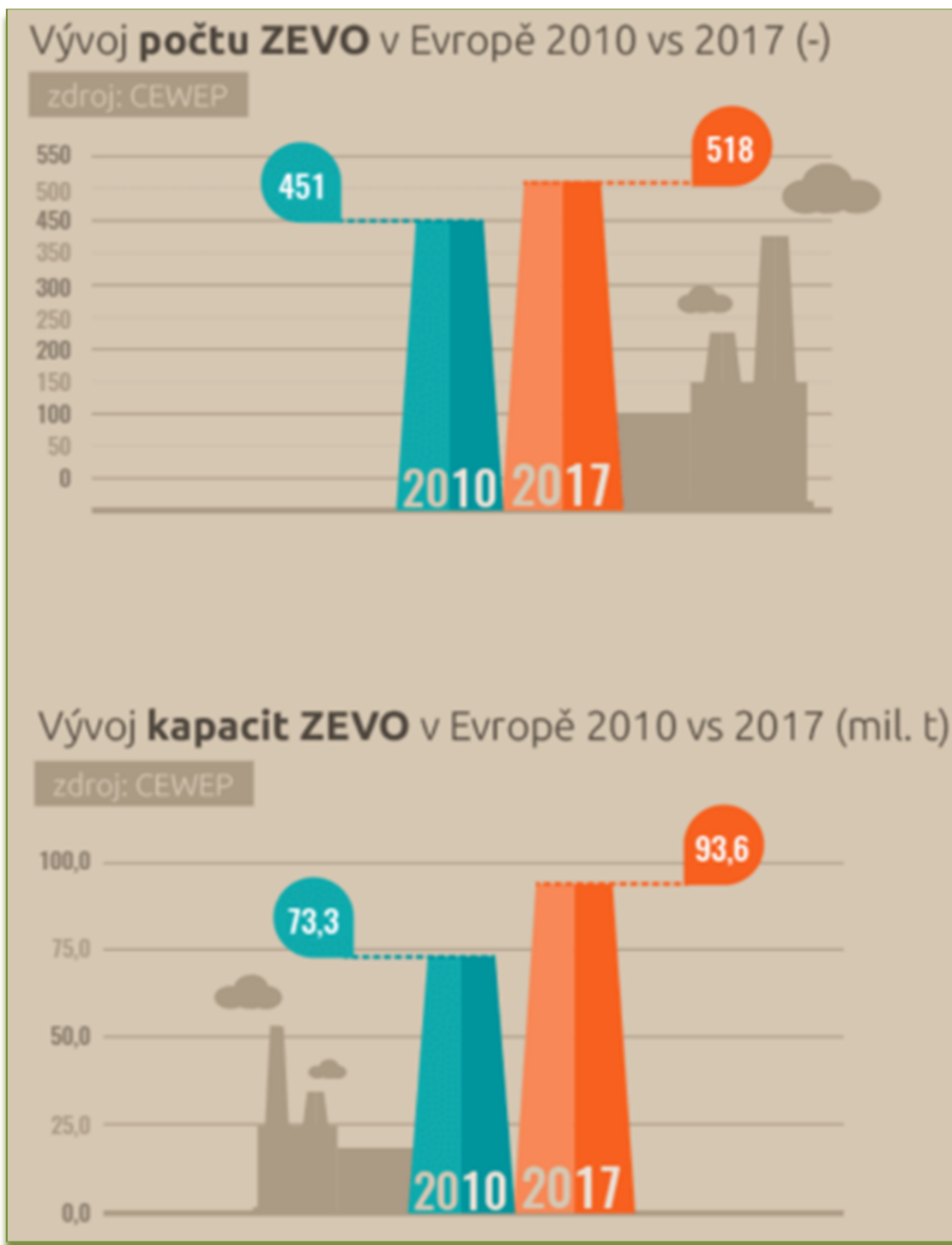
Podle grafu je patrné, že podíl skládkovaného komunálního odpadu se za patnáct let snížil o 31 %.

Vzrostl podíl recyklace o 19 % a podíl energetického využití komunálního odpadu vzrostl o 11 %.

Podle aktuálních dat evropského svazu CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants) bylo ke konci roku 2017 v Evropě v provozu 518 ZEVO s celkovou roční kapacitou 93,6 mil. tun odpadu.

Oproti roku 2010 se počet ZEVO zvýšil o přibližně 15 % z 451 zařízení využívající energii komunálního odpadu na 518 zařízení a celková roční kapacita tohoto zařízení v Evropě vzrostla o téměř 30 %, z 73,3 na 93,6 mil. tun komunálního odpadu.

Na obrázku č. 3 je tento vývoj znázorněn.



Obrázek č. 3. - Vývoj kapacit ZEVO v Evropě [4]

Nejvíce ZEVO je aktuálně v provozu ve Francii (126 zařízení) a Německu (121 zařízení). Největší celkovou roční kapacitu mají ZEVO v Německu (26 mil. t/rok), Francii (14,7 mil. t/rok) a ve Spojeném království (9,5 mil. t/rok).

Pokud kapacitu ZEVO vztáhneme na jednoho obyvatele, tak je na prvním místě Dánsko (0,62 t/obyvatele), následované Švédskem (0,56 t/obyvatele), Švýcarskem (0,46 t/obyvatele) a Nizozemskem (0,44 t/obyvatele).

Z obrázku č. 4 je patrná produkce komunálního odpadu na jednoho obyvatele, počet ZEVO v jednotlivých státech a kapacita ZEVO na jednoho obyvatele.



Obrázek č. 4. - Energetické využití odpadu v Evropě [4]

3.1 Technologie a způsoby spalování odpadů

Pro spalování odpadů lze použít několika způsobů a technologií:

- kotle s pevným nebo posuvným roštem
- rotační pece
- muflové pece
- etážové pece
- spalování ve fluidním loži

- termální desorpce
- spalování v plazmovém oblouku

Pro spalování komunálního odpadu se nejvíce používají kotle s pevným nebo posuvným roštem:

- pevné rovinné rošty jsou určeny převážně pro spalování malého množství paliva
- pohyblivé rošty jsou určeny pro spalovací jednotky o výkonech desítek MW

Jako nejvýhodnější pro EVO je KVET, kdy páru vyrobenou v kotli využijeme v parní turbíně.

Dle způsobu využití můžeme použít parní turbínu protitlakou, nebo odběrovou kondenzační.

3.1.1 Příklad ZEVO V EU¹

Největší spalovnu v EU provozuje Odpadová a energetická společnost Amsterdam, Nizozemí.

ZEVO AEB je s celkovou kapacitou 1 400 000 t ročně největší zařízením pro zpracování komunálního odpadu na světě.

Společnost se skládá ze 4 samostatných obchodních jednotek, z nichž 2 jednotky spalují komunální odpad, jedna má na starosti skládku nebezpečného odpadu a poslední je regionální řídicí stanice.

Vyobrazená spalovna na obr. č. 5 je navržena tak, že účinnost výroby elektrické energie z komunálního odpadu dosahuje 30 %. Je to nejvyšší účinnost výroby elektrické energie na světě. Každoročně je vyrobeno až 1 mil. MWh elektrické energie.

Při spalování komunálního odpadu vzniká také hodně tepla. Pro vytápění a ohřev TUV je dodáno do tepelné sítě až 600 000 GJ tepla ročně.

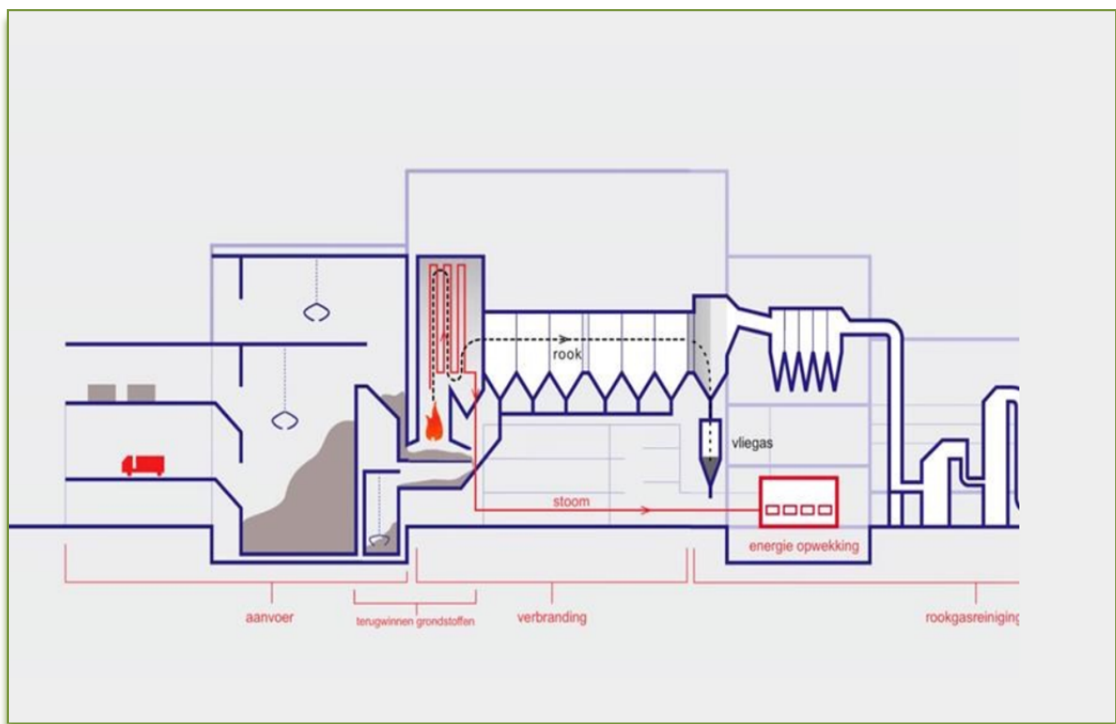
Zařízení zpracovává 530 000 t komunálního odpadu ročně.

¹ Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti AEB. [5]



Obrázek č. 5. - Fotografie AEB umístěné v části Amsterdamu[5]

Další obrázek znázorňuje technologii ZEVO AEB



Obrázek č. 6. - Technologie AEB [5]

Na obrázku je znázorněna nejrozšířenější technologie spalování komunálního odpadu.

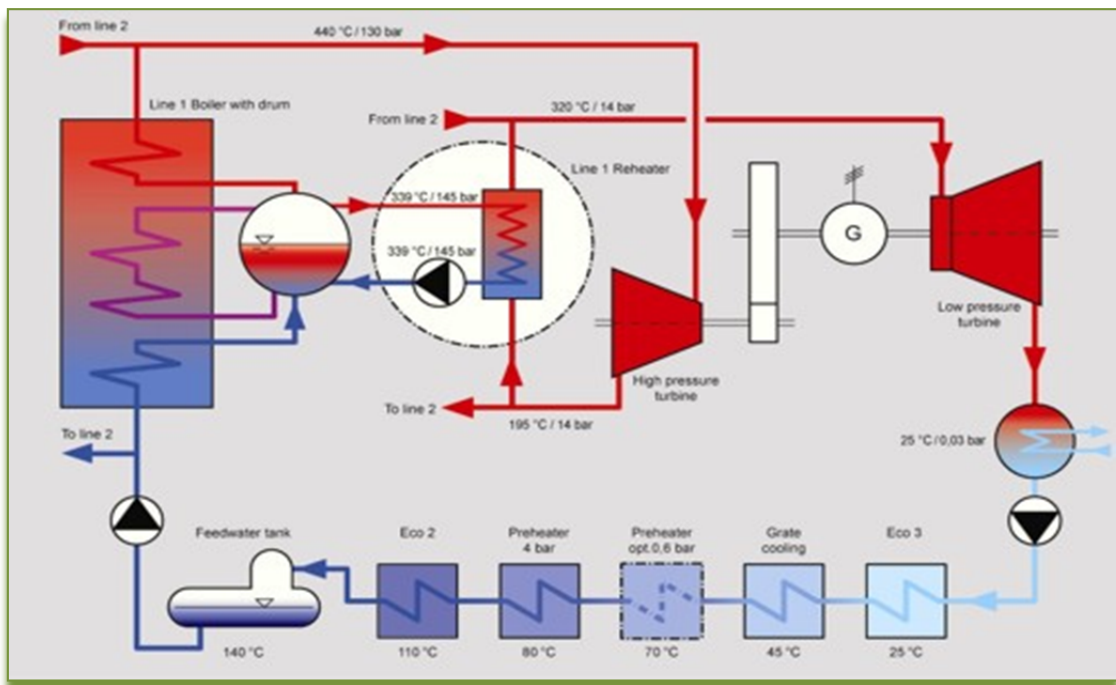
Komunální odpad je přivezen svozovými auty a uložen v zásobníku komunálního odpadu. V zásobníku je odpad částečně roztríděn a velké kusy komunálního odpadu jsou rozdrceny v drtiči.

Ze zásobníku je komunální odpad pomocí drapákového jeřábu přenesen do násypného zásobníku, ze kterého padá na posuvný rošt.

Posuvný rošt je součástí parního kotle, ve kterém se komunální odpad spaluje.

Vyrobená pára je použita v parním okruhu, znázorněném na dalším obrázku, spaliny projdou technologií, kde se zbaví všech nebezpečných látek.

Odpad ze spalování – popílek ze spalin a škvára je použita při další výrobě, např. ve stavebnictví, nebo je uskladněna na skládce.



Obrázek č. 7. - Parní cyklus spalovny [5]

Na obrázku je znázorněn parní okruh zařízení pro spalování komunálního odpadu provozované firmou AEB.

Základem je parní bubnový kotel s přirozenou cirkulací.

Napájecí čerpadlo napájí parní kotel napájecí vodou z napájecí nádrže o teplotě 140 °C. Napájecí voda je před vstupem do parního bubnu ohřívána v ekonomizéru. Z parního bubnu teče voda do spodní zavodňovací komory výparníku kde se kotelní voda mění na páru.

Pára je dále přehřívána v přehříváku páry na teplotu 440 °C o tlaku páry 130 barr.

Přehřátá pára se zpracovává ve vysokotlakém dílu turbíny, který je s generátorem spojen přes převodovku.

Z vysokotlakého dílu turbíny pára vystupuje o teplotě 195 °C a tlaku 14 barr. V kotli je přehřívána parou z bubnu na teplotu 320 °C a tlaku 14 barr. Nízkotlaká pára je zpracována v nízkotlakém dílu turbíny napřímo spojeném s generátorem. Výstupní pára je zavedena do kondenzátoru, kde je ochlazována chladicí vodou o teplotě 25 °C.

Ochlazený kondenzát je čerpán kondenzátním čerpadlem přes nízkotlaké ohříváky do napájecí nádrže.

3.1.2 Spalování odpadů v ČR

Podle závazků plynoucích ze evropské směrnice 99/31/ES Evropské unie by ČR měla naložit z odpady podle následující tabulky.

V tabulce z roku 2008 je znázorněna produkce smíšeného komunálního odpadu po vyřídění využitelných složek a bioodpadu.

Zároveň je v tabulce znázorněno množství odpadu, které můžeme uložit na skládku a množství odpadu určenému převážně ke spálení.

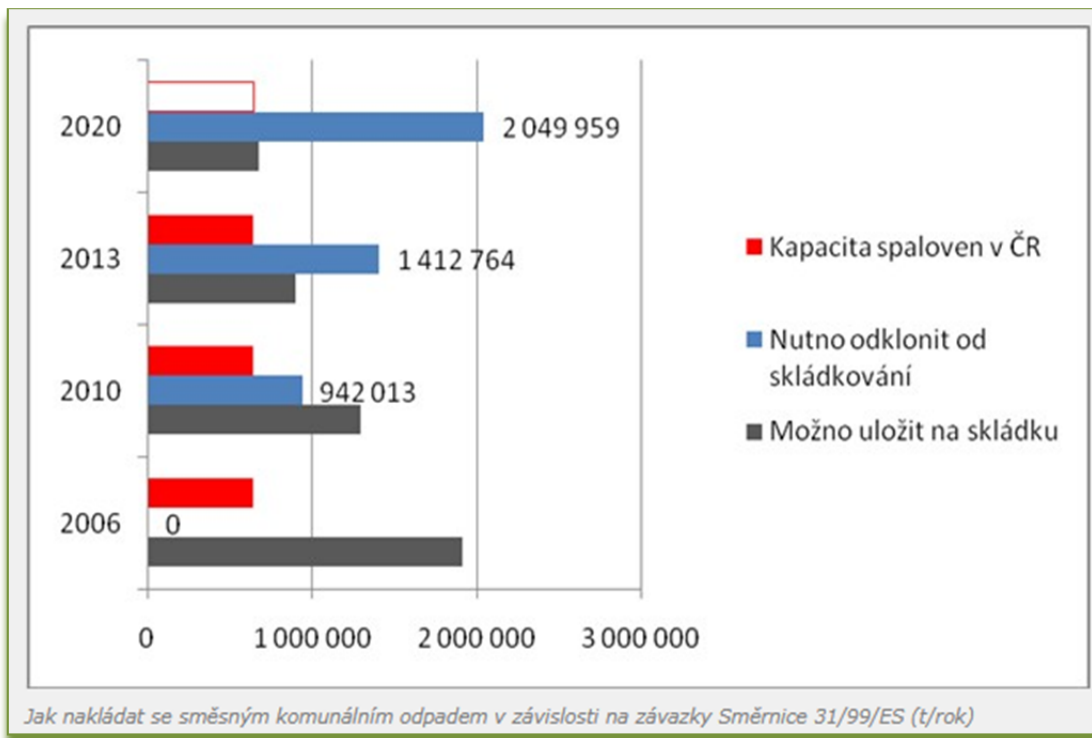
Tabulka č. 1. - Základní bilance odpadu [1]

Základní bilance	2006	2010	2013	2020
Produkce SKO*	2 208 034	2 243 465	2 318 923	2 726 380
Nutno odklonit od skládkování		942 013	1 412 764	2 049 959
Možno uložit na skládku	1 920 990	1 301 452	906 159	676 421

V České republice však k dnešnímu datu existují pouze 4 velké spalovny komunálního odpadu, v Praze-Malešicích, Brně, Liberci, Plzni a vedle nich řada menších spaloven většinou nebezpečného odpadu.

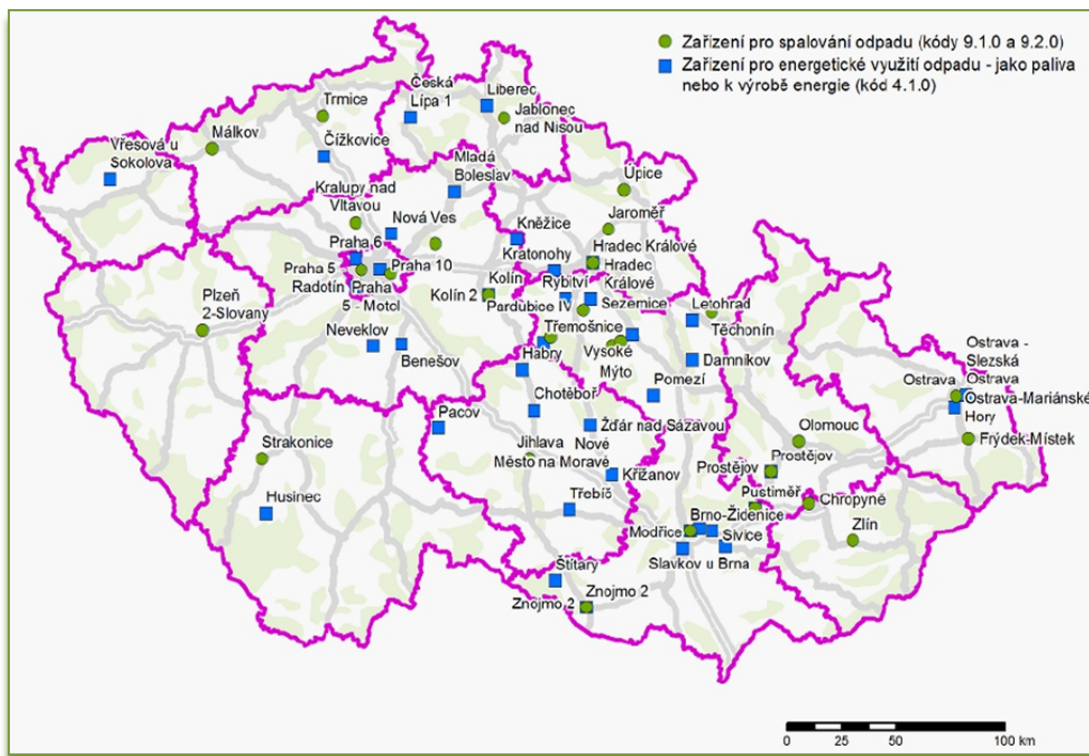
Kapacita 4 ZEVO v současné době nainstalovaných a provozovaných je 731 kt/r zpracování komunálního odpadu.

Graf na obr. č. 8 nám ukazuje možný deficit kapacit pro energetické využití odpadů do roku 2020.



Obrázek č. 8. - Deficit kapacit pro energetické využití odpadu [1]

Na obrázku č. 9 je znázorněna mapa České republiky s vyznačením zařízení pro spalování odpadu a zařízení pro energetické využití odpadu – jako paliva, nebo k výrobě energie.



Obrázek č. 9. - Mapový přehled zařízení pro spalování odpadů v ČR [6]

Na následujícím obrázku č. 10 jsou vyznačeny zařízení pro energetické využití odpadu stávající a uvažované.

Uvažovaný celkový objem zpracování komunálního odpadu je podle výhledu 2 464 kt/ročně.



Obrázek č. 10. - Stávající a uvažované ZEVO v ČR [1]

3.1.2.1 ZEVO Praha-Malešice ²

ZEVO Praha-Malešice je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké vody.

Projektovaná kapacita spalovny: 320 000 t/rok komunálního odpadu.

Základem spalovacího zařízení jsou:

1) čtyři kotle s válcovými rošty

- nominální parní výkon kotle: 36 t/h
- nominální tlak přehřáté páry: 13,7 bar (a)
- nominální teplota přehřáté páry: 235 °C

² Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti Pražské služby [8]

2) Kondenzační parní turbína

Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké vody.

- horká voda o parametrech 135 °C/70 °C je dodávána do sítě
- celkový elektrický instalovaný výkon je 17,6 MWe

Na obrázku č. 11 je znázorněno je znázorněno zapojení jednotlivých zařízení, vyvedení tepla a technologie čištění spalin.

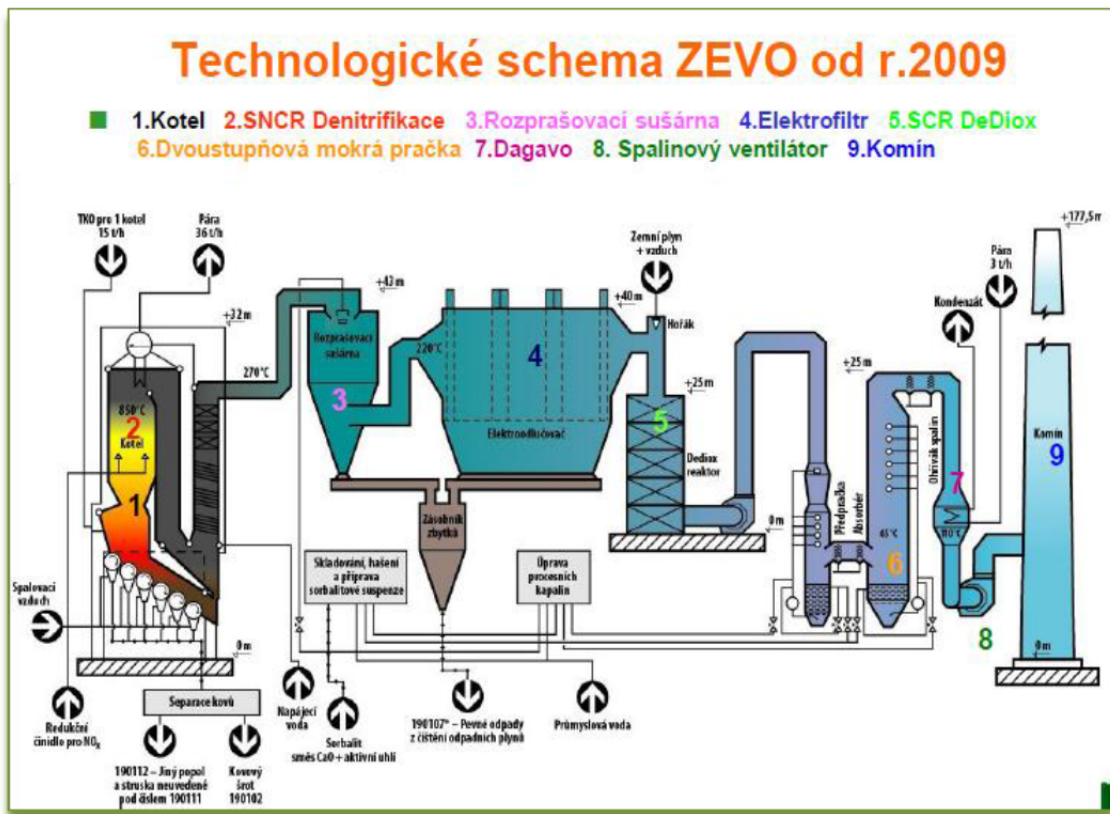
Základem technologie je parní kotel s válcovým roštem určený ke spalování tuhého komunálního odpadu.

Součástí zařízení technologie je čištění spalin:

- za spalovací komorou je první část čištění spalin, tzv. SNCR - nekatalytické čištění spalin – denitrifikace
- za kotlem je rozprašovací sušárna a elektrofiltr určených k zachytávání tuhých zbytků
- za elektrofiltry je SCR DeDiox pro zachycení NOX a dioxinů
- následuje dvoustupňová mokrá pračka sloužící k zachycení těžkých kovů a dalších nebezpečných látek
- před spalinovým ventilátorem je umístěn ohřívák vzduchu sloužící k jeho ohřátí před vstupem do komínu

Zařízení výroby elektrické energie , turbína a generátor, není na schématu znázorněno.

Zároveň není na schématu vyznačeno vyvedení a zapojení tepelné soustavy.



Obrázek č. 11. - Technologie ZEVO Malešice

3.1.2.2 SAKO Brno³

ZEVO Brno je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké páry.

Projektovaná kapacita spalovny: 224 000 t/rok komunálního odpadu

Základem spalovacího zařízení jsou:

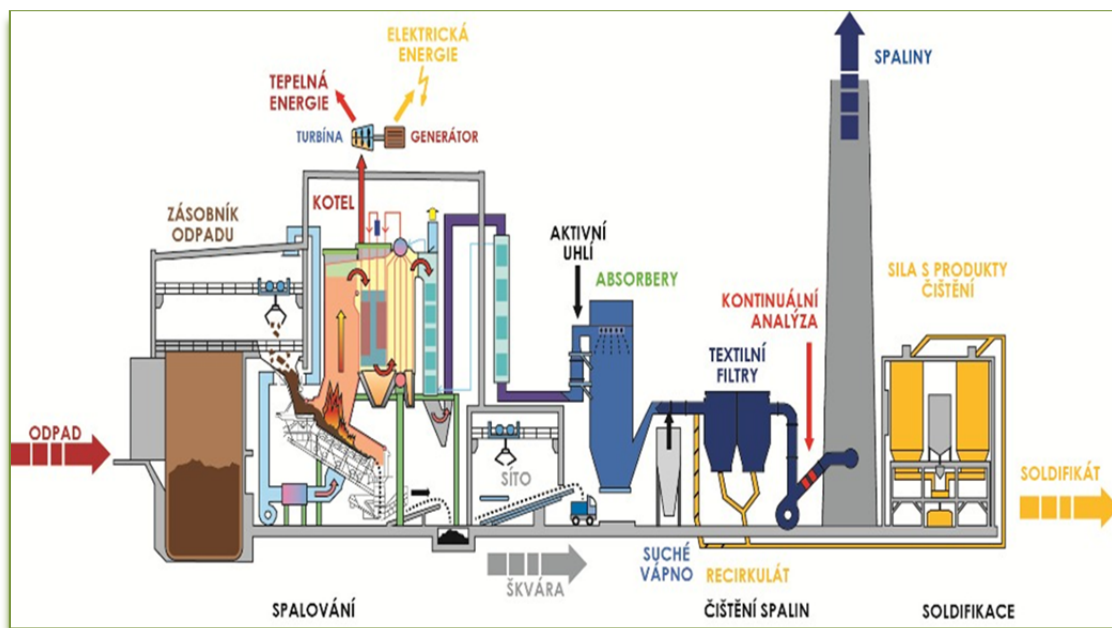
1) dva spalovací kotle s roštovým ohništěm

- nominální parní výkon kotle: 52,3 t/h.
- nominální tlak přehřáté páry: 41 bar (a)
- nominální teplota přehřáté páry: 400 °C

2) kondenzační parní turbína – typ SST-300

Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké páry.

³ Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti SAKO Brno a.s. [9]



Obrázek č. 12. - Technologie SAKO Brno

Na schématu je znázorněn vstup komunálního odpadu do bunkru určeného pro skladování, vybaveného drapákovým jeřábem.

Dále je znázorněno roštové ohniště s navazujícím parním kotlem – spalování komunálního odpadu probíhá na roštovém topeništi, kde je odpad prohříván, sušen, zplyňován, zapalován a odhořívá, uvolněné teplo se předává v systému teplosměnných trubek v kotli s přirozenou cirkulací.

Čištění spalin

Nezbytnou součástí technologického procesu spalování odpadů je pěti stupňový systém čištění spalin.

- První stupeň čištění spalin je instalován přímo do spalovací komory kotle. Chemické reakce zajistí výraznou redukci množství oxidů dusíku ve spalinách.
- Druhým stupněm čištění spalin je adsorbce těžkých kovů a perzistentních organických polutantů typu PCDD/F, PCB a PAU.
- Třetí stupeň čištění spalin spočívá v nástřiku jemně rozprášené vodní vápenné suspenze do proudu spalin. Plynné spaliny z kotlů jsou přivedeny kouřovody do absorberů, kde probíhá vyčištění spalin.

- Do kouřovodu mezi absorbery a textilní filtry je instalován čtvrtý stupeň čištění spalin, který je založen na suché vápenné metodě, spočívající v přidavku suchého hašeného vápna do proudu spalin. Tento systém čištění se spouští automaticky v případě zvýšených koncentrací kyselých složek spalin.
- Pátým stupněm čištění spalin jsou textilní filtry, které slouží k odloučení veškerých mechanických nečistot a pevných reakčních produktů ze spalin. Konečný produkt z čištění spalin je složen z vápenatých solí, popílku, aktivního uhlí a přebytku reagentů. Celý proces čištění spalin je ovládán řídicím systémem automaticky tak, aby na výstupu ze systému čištění spalin byl zbytkový obsah sledovaných škodlivin nižší, než jsou přípustné emisní limity. Účinnost čištění spalin je u znečišťujících látek na úrovni 99 %. Před vstupem do komínu jsou spaliny kontinuálně monitorovány a vyhodnocovány.

Využití tepelné energie ve složení:

Strojovna turbogenerátoru – pára vzniklá v kotli zde expanduje a přeměňuje svou tlakovou energii na energii elektrickou a část páry se odebírá v regulovaném i neregulovaném odběru turbíny k teplárenským účelům.

3.1.2.3 Termizo Liberec⁴

ZEVO Liberec je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla.

Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké páry.

Projektovaná kapacita spalovny:

- 96 000 t/rok komunálního odpadu

Základem spalovacího zařízení je:

1) parní kotel s roštovým ohništěm.

- Nominální parní výkon kotle: 43 t/h
- Jmenovitý tlak přehřáté páry: 43 bar (a)
- Jmenovitá teplota přehřáté páry: 400 °C

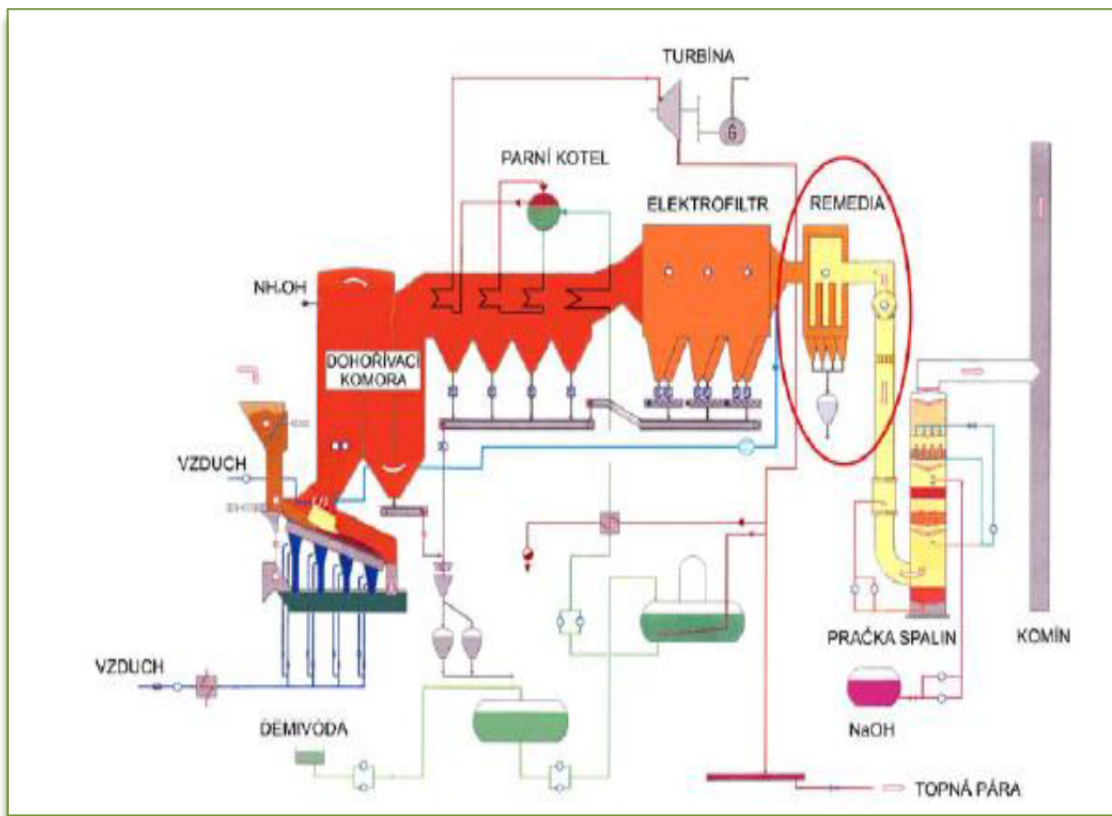
⁴ Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti TERMIZO a.s. [10]

2) Kondenzační parní turbína

- Elektrický výkon turbíny: 3,5 MW + 1 MW

Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké páry. Elektrická energie se primárně spotřebovává pro vlastní spotřebu a zbytek generované elektrické energie je vyvedena do distribuční sítě.

Vyrobená horká pára o parametrech 0,75 MPa, 230 °C je dodávána do teplárenské soustavy.



Obrázek č. 13. - Technologie TERMIZO Liberec

3.1.2.4 Chotíkov Plzeň⁵

ZEVO Chotíkov je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké vody.

Projektovaná kapacita spalovny: 100 000 t/rok komunálního odpadu

⁵ Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti Plzeňská teplárenská a.s. [11]

Základem spalovacího zařízení je:

1) klasický parní kotel s roštovým ohništěm.

- nominální parní výkon kotle (bez odběru páry pro čištění spalin 1,5 t/h) 43 t/h.
- jmenovitý tlak přehřáté páry: 51 bar (a)
- jmenovitá teplota přehřáté páry: 425 °C
- účinnost kotle (základně znečištěný): 83,9 %

2) kondenzační parní turbína - typ SST-300

Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké vody. Elektrická energie se primárně spotřebovává pro vlastní spotřebu a zbytek generované elektrické energie je vyvedena do distribuční sítě o napětí 22 kV.

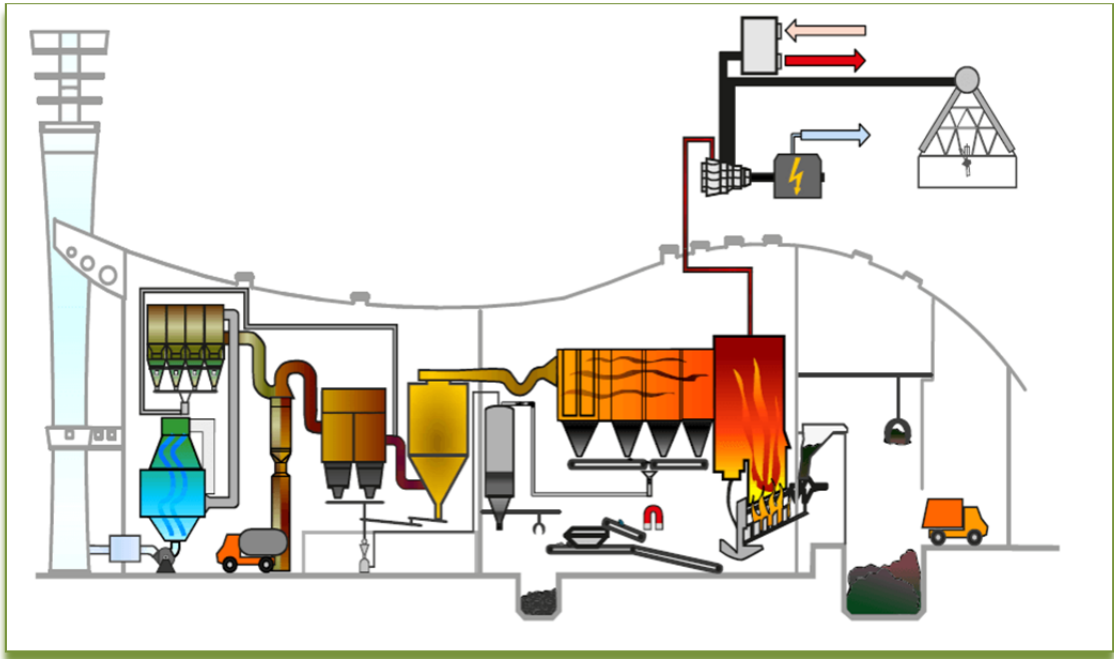
Horká voda o parametrech 135 °C/70 °C je dodávána do sítě CZT Plzeňské teplárenské přípojkou o jmenovité světlosti potrubí DN250. V ZEVO Chotíkov je instalovaný maximální tepelný výkon 22 MWt a celková výroba tepla se předpokládá v objemu 396 769 GJ/rok.

Celkový elektrický instalovaný výkon je 10,5 MWe.

Vlastní spotřeba elektrické energie činí 18 157 MWh/rok a do sítě bude dodáváno 36 041 MWh/rok.

Na schématu je znázorněna doprava komunálního odpadu do bunkru určeného pro skladování, vybaveného dvěma drapákovými jeřáby a hydraulickým drtičem na rozrušení velkoobjemového odpadu.

Dále je znázorněno roštové ohniště s navazujícím parním kotlem – spalování komunálního odpadu probíhá na roštovém topeništi, kde je odpad prohříván, sušen, zplyňován, zapalován a odhořívá, uvolněné teplo se předává v systému teplosměnných trubek v kotli s přirozenou cirkulací.



Obrázek č. 14. - Technologie ZEVO Chotíkov Plzeň

Za kotlem probíhá čištění spalin ve složení:

- rozprašovací sušárna s nástřikem odpadní vody – hlavní funkcí je odpar zahuštěné suspence z praček spalin
- tkaninový filtr – dochází k zachycování pevných částic ve spalinách
- dvoustupňová pračka spalin, odlučovač kapek a aerosolů – dochází k zachycení rozhodujícího podílu kyselých složek a těžkých kovů
- pojistný filtr – má stejnou funkci jako tkaninový filtr a dochází k dalšímu zachycování pevných částic
- katalytický reaktor pro destrukci NO_x (metoda SCR) a dioxinů – slouží k účinnému rozkladu oxidů uhlíku pomocí katalytické reakce (SCR)
- Spalinový ventilátor

Využití tepelné energie ve složení:

- strojovna turbogenerátoru – pára vzniklá v kotli zde expanduje a přeměňuje svou tlakovou energii na energii elektrickou a část páry se odebírá v regulovatelných odběrech turbíny k teplotěnským účelům
- vzduchový kondenzátor – k dochlazení výstupní páry se nepoužívá vodní chlazení, ale ventilátorové chlazení
- výměňková stanice horkovodu – odebraná pára z oběhu slouží k výrobě horké vody
- vyvedení elektrického výkonu a zásobování el. energií – vyrobená elektrické energie a teplo jsou v první řadě použity pro vlastní spotřebu a zbytek je vyveden do veřejné soustavy

4 POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU ZAŘÍZENÍ – LOKALITA ELEKTRÁRNA MĚLNÍK

Pro dodávky tepla z areálu Elektrárny Mělník do Prahy je postaveno horkovodní potrubí o celkové délce 34 km.

Areál elektrárny provozuje předávací stanici se systémem ohříváků vody, kde se teplo předává do horkovodního okruhu horkovodu.

V lokalitě Elektrárny Mělník se na zásobování teplem, ohřevu vody v horkovodu podílí dva samostatné obchodní subjekty.

Jedná se o společnosti Energotrans, a.s. a ČEZ, a. s.

Horkovodní potrubí je majetkem společnosti Energotrans, a.s.

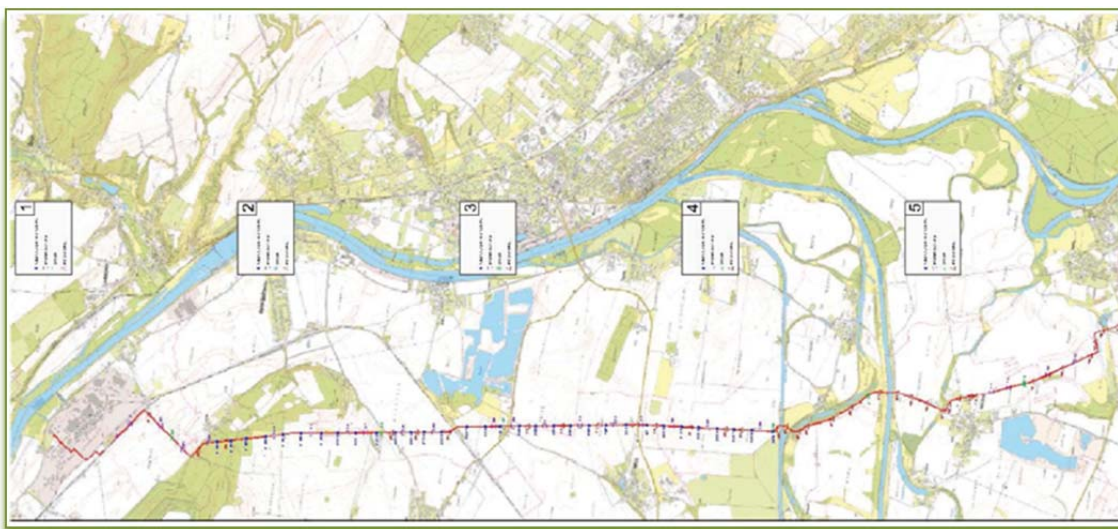
4.1 Horkovodní potrubí Energotrans – Třeboradice

Horkovodní potrubí o jmenovité světlosti DN 1200 mm je vyvedeno z výměňikové stanice v majetku Energotrans, a.s. o celkovém výkonu 650 MWt při tlaku 2,5 MPa a maximální teplotě 140 °C.

Vratná voda se pohybuje v rozmezí teplot 55÷70 °C.

Maximální průtok vody je 7800 t/h.

Na obrázku č. 15 a č. 16 je znázorněna celá trasa horkovodu z lokality Elektrárny Mělník po předávací místo v Areálu Třeboradice.



Obrázek č. 15. - Trasa horkovodu z lokality EMĚ do Prahy část 1



Obrázek č. 16. - Trasa horkovodu z lokality EMĚ do Prahy část 2

Z této trasy je vyvedeno ještě několik menších odboček pro vytápění dalších obytných budov.

Největší je odbočka pro vytápění města Neratovic. Průměr potrubí je DN 250.

Horkovod je připojen ke stávající technologii umožňující využití tří stupňů ohřevu.

Podle způsobu zapojení můžeme do horkovodu Praha dodávat vodu o těchto teplotách:

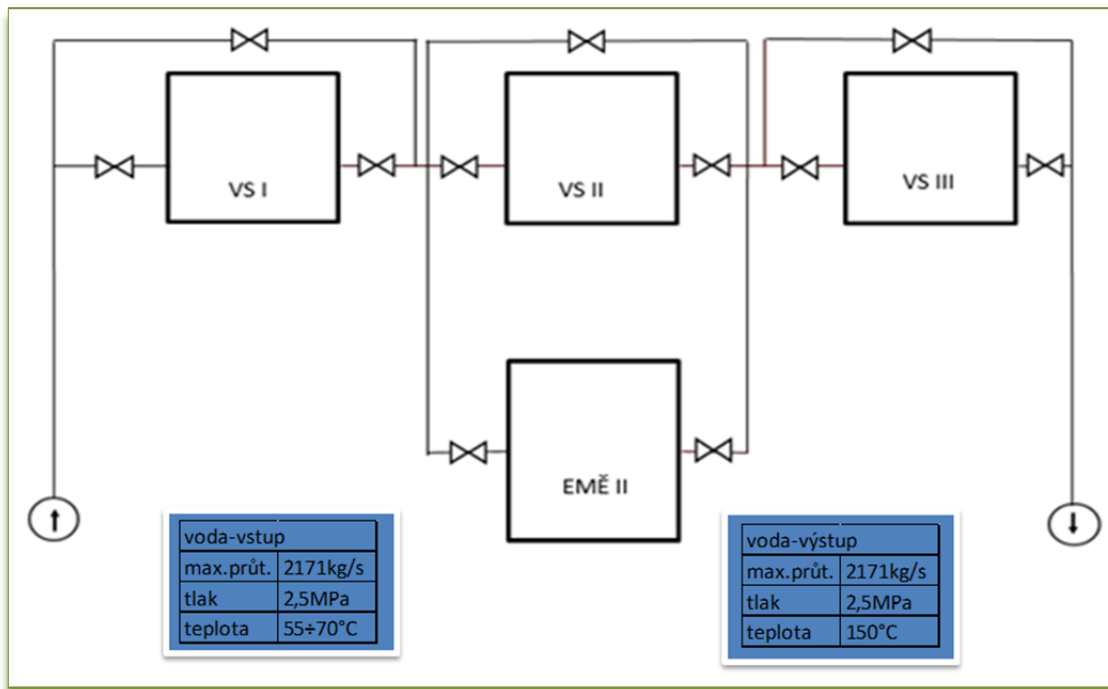
- I. stupeň ohřevu 55÷70-120 °C
- II. stupeň ohřevu 120-140 °C
- III. stupeň ohřevu 55÷70-140 °C

Na obrázku č. 17 je znázorněno zapojení jednotlivých skupin zařízení, podle tabulky číslo 2 - základních údajů k jednotlivým ohřívákům.

Tabulka č. 2. - Základní údaje k jednotlivým ohřívákům

<p>VS I. 2 x 2 ZO</p> <p style="text-align: center;">Základní ohřívák</p> <table border="0"> <tr> <td>pára</td> <td>max. průt.</td> <td>36,1 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>0,5 Mpa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>300 °C</td> </tr> <tr> <td>voda</td> <td>max. průt.</td> <td>805,5 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>max. 2,5 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>max. 120 °C</td> </tr> </table>	pára	max. průt.	36,1 kg/s		tlak	0,5 Mpa		teplota	300 °C	voda	max. průt.	805,5 kg/s		tlak	max. 2,5 MPa		teplota	max. 120 °C	<p>VS II. 2 x 2 ŠO</p> <p style="text-align: center;">Špičkový ohřívák</p> <table border="0"> <tr> <td>pára</td> <td>max. průt.</td> <td>36,1 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>0,6 Mpa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>240 °C</td> </tr> <tr> <td>voda</td> <td>max. průt.</td> <td>694,5 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>max. 2,5 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>max. 140 °C</td> </tr> </table>	pára	max. průt.	36,1 kg/s		tlak	0,6 Mpa		teplota	240 °C	voda	max. průt.	694,5 kg/s		tlak	max. 2,5 MPa		teplota	max. 140 °C
pára	max. průt.	36,1 kg/s																																			
	tlak	0,5 Mpa																																			
	teplota	300 °C																																			
voda	max. průt.	805,5 kg/s																																			
	tlak	max. 2,5 MPa																																			
	teplota	max. 120 °C																																			
pára	max. průt.	36,1 kg/s																																			
	tlak	0,6 Mpa																																			
	teplota	240 °C																																			
voda	max. průt.	694,5 kg/s																																			
	tlak	max. 2,5 MPa																																			
	teplota	max. 140 °C																																			
<p>EMĚ II. 1 x ZO, 1 x ŠO</p> <p style="text-align: center;">Základní/-špičkový ohřívák</p> <table border="0"> <tr> <td>pára</td> <td>max. průt.</td> <td>pro. diagram</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>pro. diagram</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>pro. diagram</td> </tr> <tr> <td>voda</td> <td>max. průt.</td> <td>1111,2 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>max. 2,5 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>max. 140 °C</td> </tr> </table>	pára	max. průt.	pro. diagram		tlak	pro. diagram		teplota	pro. diagram	voda	max. průt.	1111,2 kg/s		tlak	max. 2,5 MPa		teplota	max. 140 °C	<p>VS III. 2 x ŠO</p> <p style="text-align: center;">Špičkový ohřívák</p> <table border="0"> <tr> <td>pára</td> <td>max. průt.</td> <td>41,7 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>0,4-0,75 Mpa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>210 °C</td> </tr> <tr> <td>voda</td> <td>max. průt.</td> <td>1041,7 kg/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td>tlak</td> <td>max. 2,5 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>teplota</td> <td>max. 150 °C</td> </tr> </table>	pára	max. průt.	41,7 kg/s		tlak	0,4-0,75 Mpa		teplota	210 °C	voda	max. průt.	1041,7 kg/s		tlak	max. 2,5 MPa		teplota	max. 150 °C
pára	max. průt.	pro. diagram																																			
	tlak	pro. diagram																																			
	teplota	pro. diagram																																			
voda	max. průt.	1111,2 kg/s																																			
	tlak	max. 2,5 MPa																																			
	teplota	max. 140 °C																																			
pára	max. průt.	41,7 kg/s																																			
	tlak	0,4-0,75 Mpa																																			
	teplota	210 °C																																			
voda	max. průt.	1041,7 kg/s																																			
	tlak	max. 2,5 MPa																																			
	teplota	max. 150 °C																																			

Obrázek č. 17. - Zapojení jednotlivých skupin ohříváků

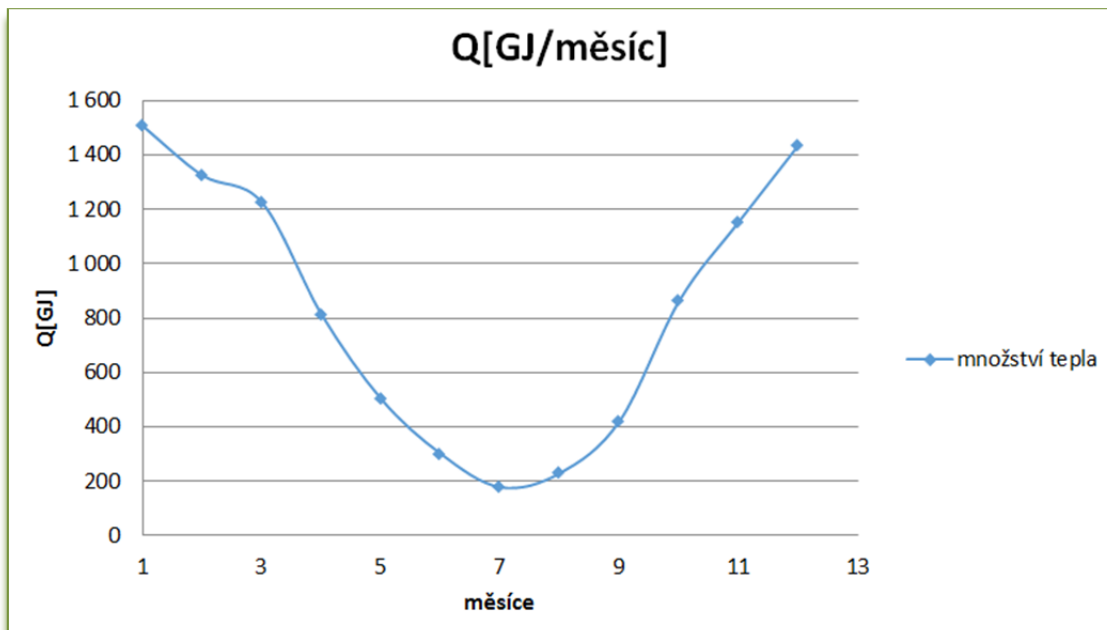


Pro představu je v tabulce předložena velikost dodávek tepla po jednotlivých měsících v r. 2018 dodávek do horkovodu Praha.

Jednotlivá data jsou vzata z provozních měření.

Tabulka č. 3. - Plán dodávek tepla do horkovodu Praha

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
[GJ/měs]	1 506,6	1 324,85	1 225,2	813,4	502,4	300,8
Měsíc	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
[GJ/měs]	178	230	421,7	864	1 154,7	1 436,1



Obrázek č. 18. - Plán dodávek tepla do horkovodu Praha

4.2 Technologie EMĚ I.

4.2.1 Parní kotel a sps

Základem technologie je šest granulačních kotlů G 230, výrobce Vítkovice a.s.

Kotle jsou výkonově k dnešnímu dni přetypovány na kotle 250 t/h.

Provozní přetlak kotlů je 10 MPa, pracovní teplota 535 °C.

Pára z těchto kotlů je zavedena do společné parní sběrný – SPS – která je složena ze dvou sběrnic s připojením zdrojů ostré páry.

Odběry ze SPS jsou pro dvě samostatné protitlaké, dvě samostatné odběrové kondenzační turbíny a čtyři špičkové ohříváky umístěných na výměňkové stanici VS - Praha.

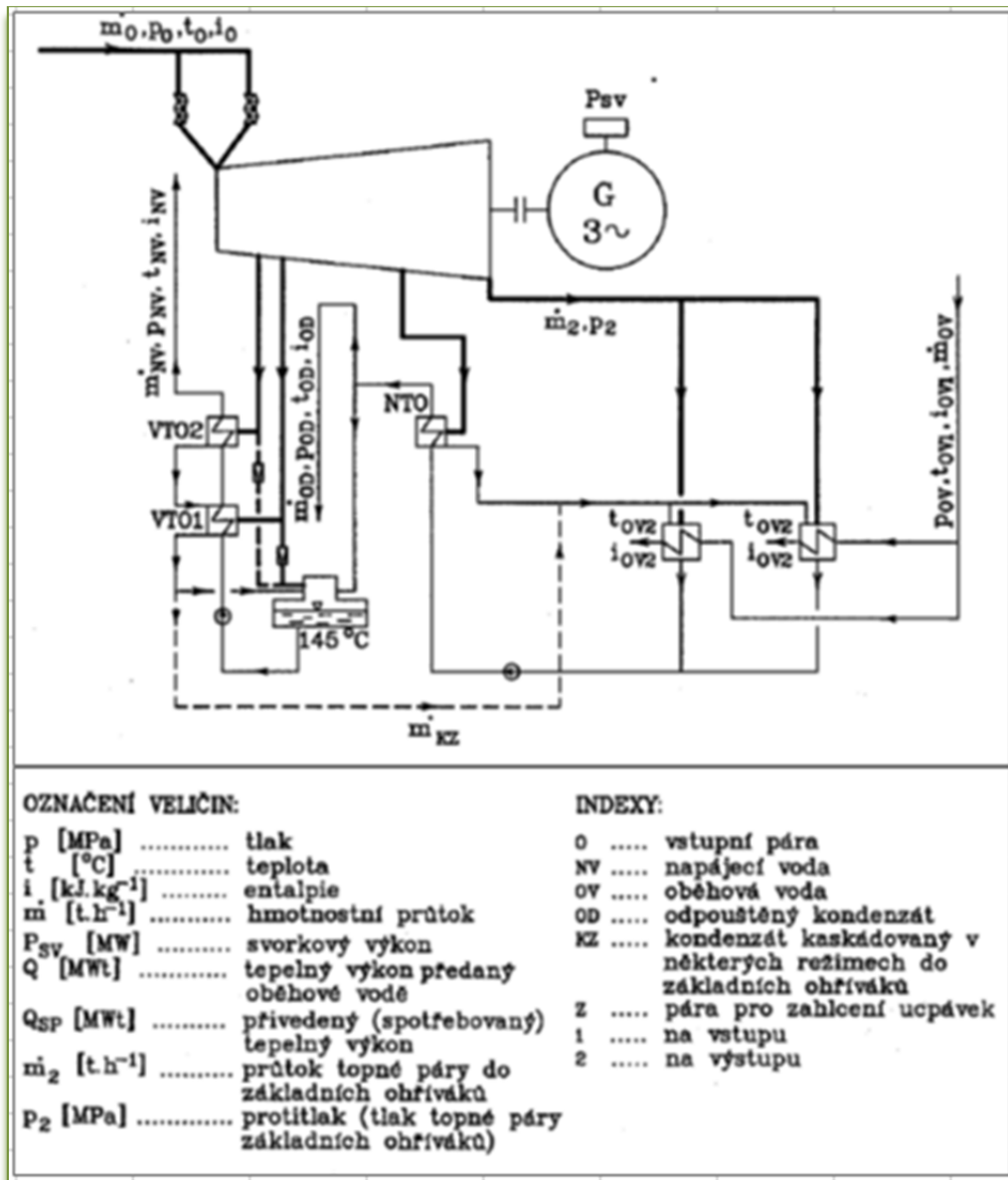
4.2.2 Parní protitlaká turbína

Ve strojovně jsou umístěny dvě turbíny typu R60-A0 pro pohon alternátoru s přestavitelným protitlakem v rozsahu 0,03 MPa až 0,25 MPa, přičemž jmenovitá hodnota protitlaku je 0,06 MPa.

- jmenovitý výkon turbíny na svorkách je 60 MW
- jmenovité otáčky turbíny jsou 3000 ot/min
- jmenovitý tlak vstupní páry je 8,826 MPa
- jmenovitá teplota vstupní páry je 535 °C
- jmenovitý průtok vstupní páry je 266 t/h
- maximální přípustná hlnost turbíny je 300 t/h

Turbína je konstruována jako přetlaková, přímo spojená, jednotělesová. Skříň turbíny je horizontálně dělená s našroubovanými ventilovými komorami.

Regulace protitlaku je 10 kPa jmenovitého tlaku. Trvalá poměrná změna protitlaku je max. 10 kPa jmenovitého tlaku.



Obrázek č. 19. - Parní protitlaká turbína s popisem

Na obrázku je znázorněno zapojení parní protitlaké turbíny s jednotlivými odběry pro základní ohříváky, vysokotlaké ohříváky, napájecí nádrž a nízkotlaký ohřívák.

4.2.3 Parní kondenzační turbína

Ve strojovně jsou umístěny dvě turbíny typu T60 - A0 pro pohon alternátoru s přestavitelným tlakem regulovaného odběru v rozsahu 0,06 MPa až 0,4 MPa abs.

- jmenovitý výkon turbíny na svorkách je 60 MW
- jmenovité otáčky turbíny jsou 3000 ot/min
- jmenovitý tlak vstupní páry je 8,826 MPa
- jmenovitá teplota vstupní páry je 535 °C
- jmenovitý průtok vstupní páry je 320 t/h
- maximální přípustná hlnost turbíny je 325 t/h

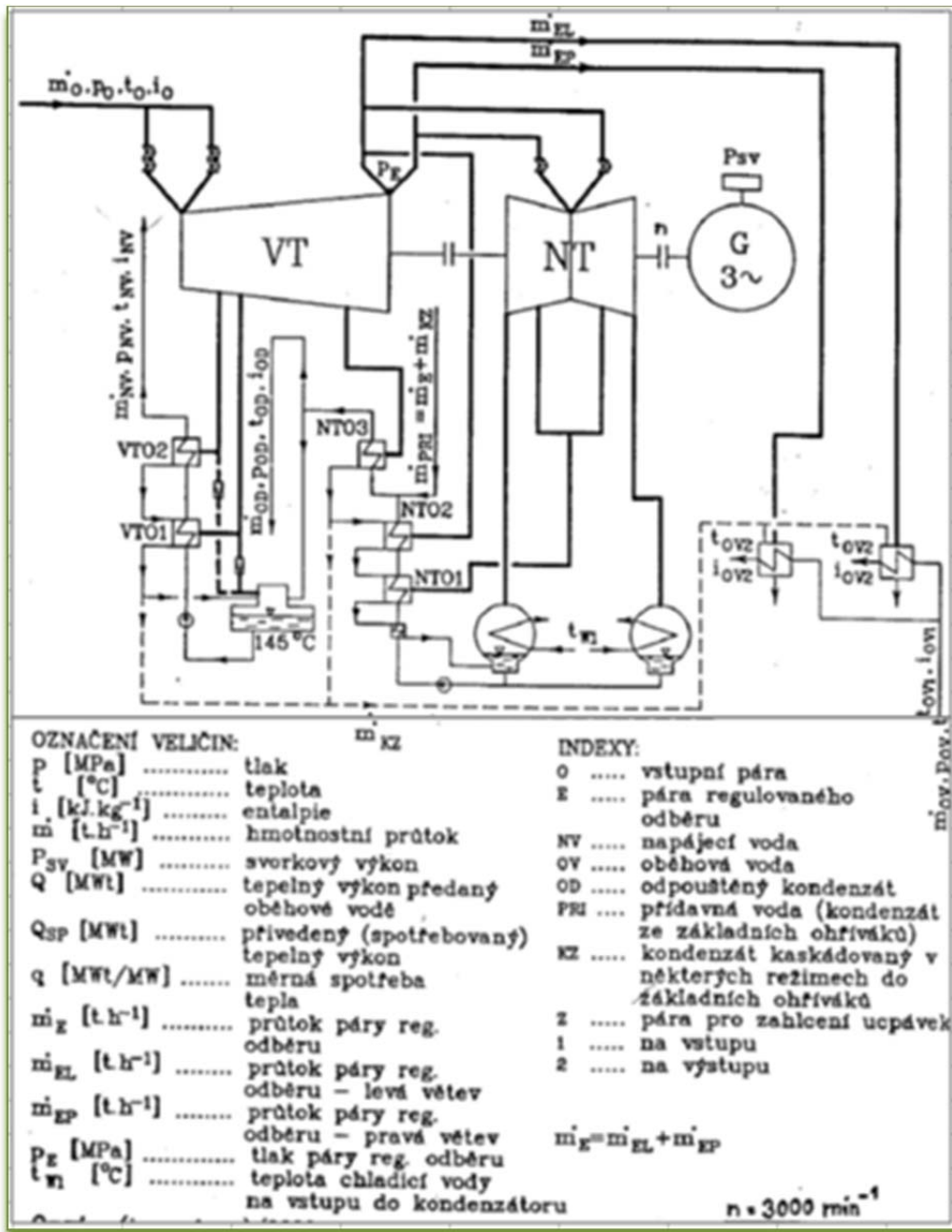
Turbína je dvoutělesová, přetlaková s nízkotlakým dílem. V nízkotlakém tělese jsou 2 x 3 kola, uspořádána ve dvouproudu. Skříň turbíny je horizontálně dělená s našroubovanými ventilovými komorami.

Turbína je vybavena celkem 5-ti odběry páry:

- odběry číslo 5., 4., a 3. jsou neregulované, vyvedené z VT- části
- odběr číslo 2. je regulovaný. Tento odběr je vyveden z převáděcích potrubí mezi VT a NT dílem v prostoru před nízkotlakými regulačními clonami
- odběr číslo 1. vyvedený z NT dílu je neregulovaný

Na obrázku je znázorněno zapojení parní kondenzační turbíny s jednotlivými odběry pro základní ohříváky, vysokotlaké ohříváky, napájecí nádrž a nízkotlaké ohříváky.

Pára z výstupu NT dílu je ochlazována chladicí vodou z řeky, čerpanou čerpadly umístěnými v čerpací stanici.



Obrázek č. 20. - Parní kondenzační turbína s popisem

Na obrázku je znázorněno zapojení parní kondenzační turbíny s jednotlivými odběry pro základní ohříváky, vysokotlaké ohříváky, napájecí nádrž a nízkotlaké ohříváky.

Pára z výstupu NT dílu je ochlazována chladicí vodou z řeky, čerpanou čerpadly umístěnými v čerpací stanici.

4.2.4 Třetí stupeň ohřevu

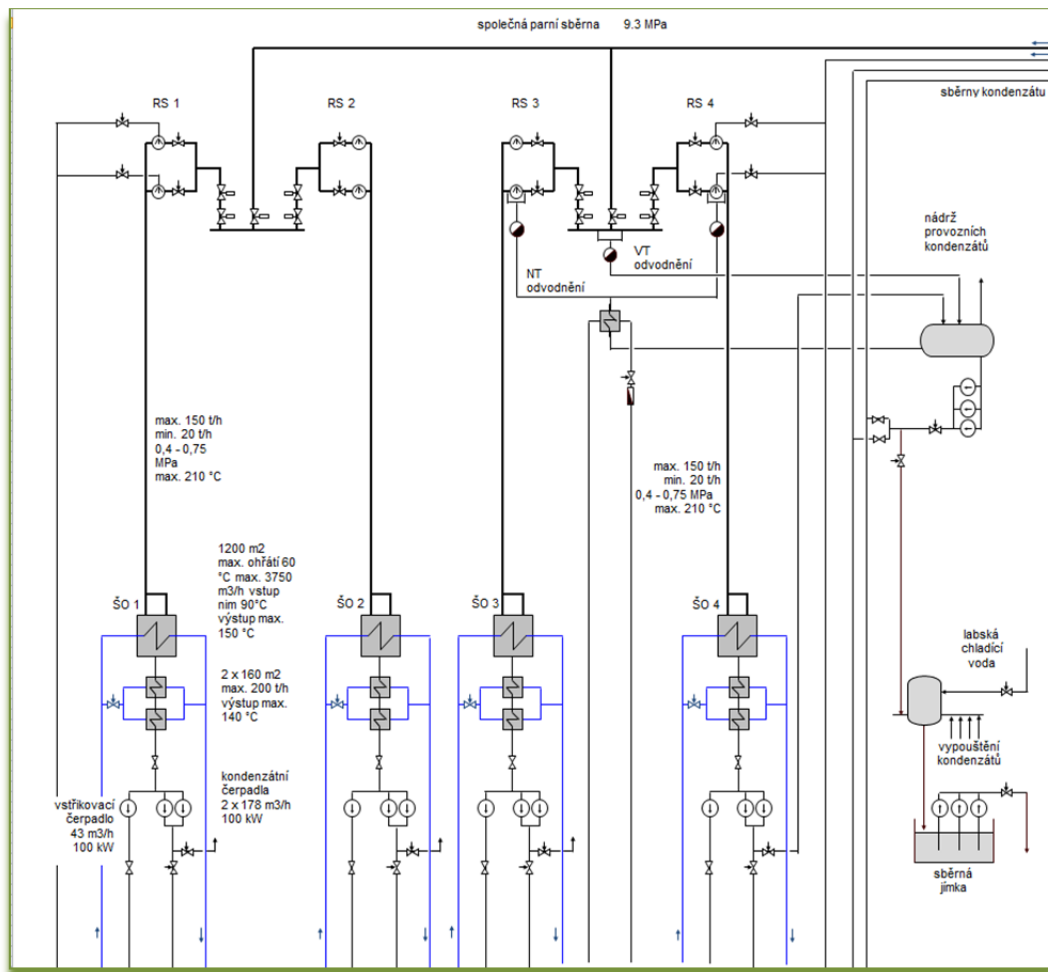
Ve třetím stupni ohřevu se ohřívá oběhová voda teplem vyvedeným přímo z parní sběrné ostré páry bez vedlejší výroby elektřiny.

Při provozu jednoho špičkového ohříváku je možné dosažení výkonu 125 MWt při odběru páry v objemu 160 t/h. Tlak ostré páry před redukčními ventily je v tomto případě 9,0 MPa a oteplení oběhové vody na špičkovém ohříváku dosahuje 50 °C.

Při provozu dvou špičkových ohříváků je možné dosažení výkonu 215 MWt při odběru páry v objemu 210 t/h. Tlak ostré páry před redukčními ventily obou špičkových ohříváků je v tomto případě 8,6 MPa a oteplení oběhové vody dosahuje u jednoho špičkového ohříváku 54 °C a u druhého špičkového ohříváku 50 °C. Po celou dobu tohoto provozu je třeba udržovat tlak v parních sběrnách EMĚ 1 na hodnotě 9,3 MPa.

Uváděné hodnoty byly prověřeny funkční zkouškou tohoto zařízení.

Zapojení je znázorněno na obrázku č. 21 - čerpací a výměňkové stanice Praha – III. Stupeň ohřevu.



Obrázek č. 21. - Čerpací a výměňková stanice VS III

4.3 Technologie EMĚ II

Technologie zařízení EMĚ II. je vzhledem ke skutečnosti, že primárním posláním je výroba elektrické energie, postavena v monoblokovém uspořádání. Při tomto uspořádání napájí kotel vyrobenou parou přímo turbínu na tento kotel připojenou.

4.3.1 Parní kotel

Parní kotel je dvoutahový, jednobubnový s přirozenou cirkulací. Je vybaven čtyřmi ventilátorovými mlýny s přímým foukáním uhelného prášku do hořáků. Sušení uhlí před vstupem do ventilátorových mlýnů se děje horkými spalinami o teplotě cca 1000 °C odsávanými z prostoru ohniště.

Parní kotel je složen z:

- výparníkem kotle tvořeným membránovými stěnami
- pětídílným přehřívákem rozděleným následovně:
 - První díl je sálavý stěnový
 - Druhý , čtvrtý a pátý je konvekční
 - Třetí díl je sálavý deskový
- dvoudílným přihřívákem

Teplota přehřáté a přihřáté páry je regulována vstříky napájecí vody:

- jmenovité množství vyrobené páry v kotli je 350 t/h
- jmenovitý přetlak kotlů admisní páry je 13,63 MPa
- jmenovitá teplota přehřáté páry na vstupu do turbíny je 540 °C
- výstupní přetlak přihřáté páry z kotle je 3,1 MPa
- jmenovitá teplota přihřáté páry na výstupu z kotle je 540 °C

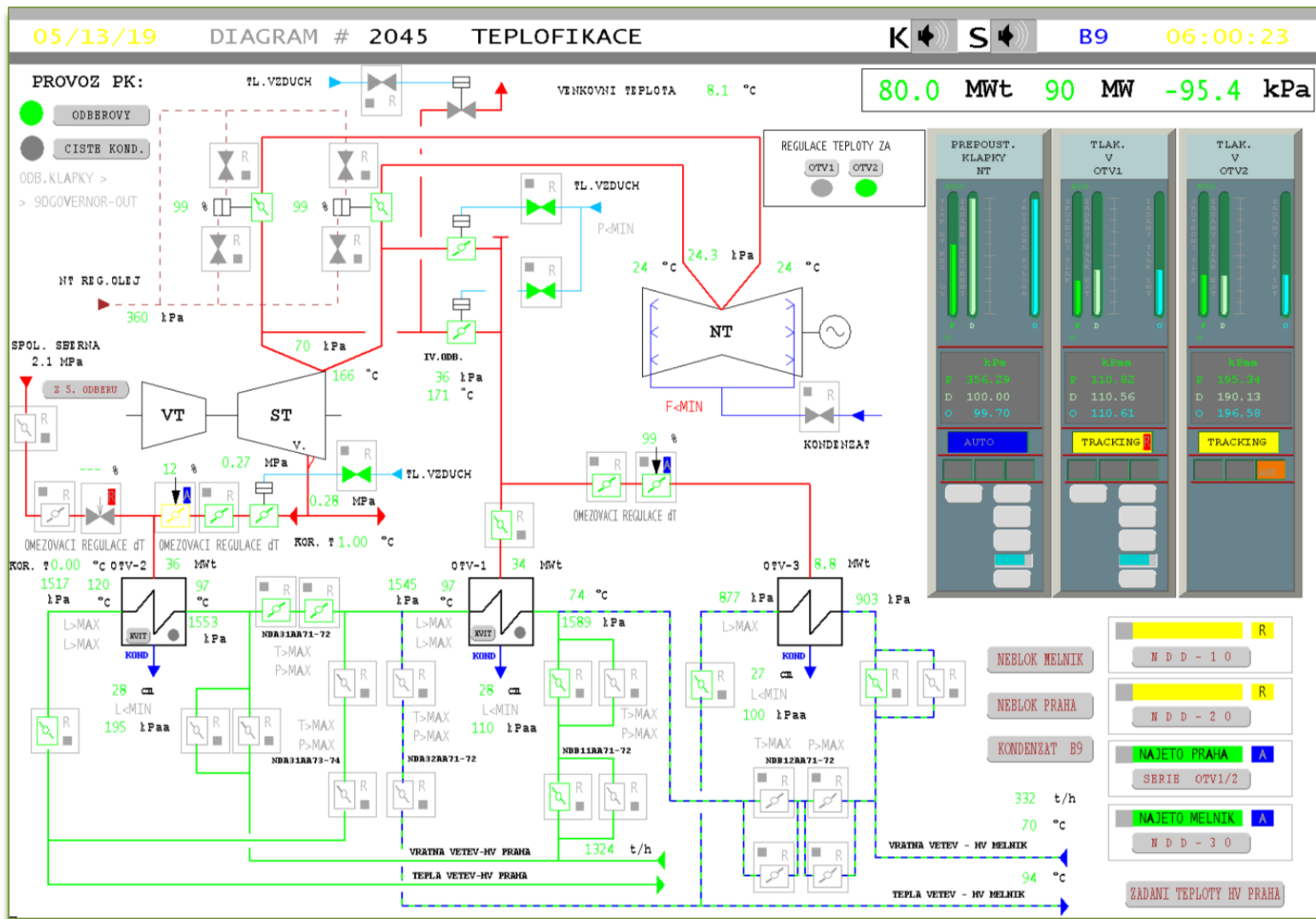
4.3.2 Kondenzační turbína

Parní turbína je třítelesová, kondenzační s jedním regulovaným odběrem pro teplofikaci, šesti odběry pro ohřev kondenzátu a dvěma odběry pro ohřev napájecí vody.

Turbína je konstruována pro čistě kondenzační provoz s alternativou provozu s regulovaným odběrem páry pro teplofikaci.

Na obrázku, který vidí operátor bloku v řídicím systému a slouží mu k ovládání je znázorněno vyvedení tepelného výkonu z parní kondenzační turbíny o jmenovitém maximálním elektrickém výkonu 110 MW a maximálním tepelném výkonu 140 MW_t.

Pro vyvedení tepla do horkovodu Praha slouží ohříváky topné vody OTV 1 a 2.



Obrázek č. 22. - Parní kondenzační turbína o jmenovitém výkonu 110 MW

4.3.3 Ohříváky topné vody (OTV)

Ohříváky topné vody (OTV) pro ohřev vody v horkovodu, jsou umístěny na ocelové konstrukci na strojovně vedle turbíny.

Na jednom výrobním bloku jsou tři samostatné ohříváky, jejichž provoz je možné kombinovat dle potřeb ohřevu oběhové vody do dvou samostatných horkovodů.

- 1) Horkovod pro Mělník, Horní Počaply
- 2) Horkovod pro Prahu

Výměňkové stanice obou bloků jsou stejné a jsou tvořeny dvěma identickými za sebou zapojenými ohříváky topné vody.

OTV 1 je prvním stupněm ohřevu a je zásobován parou z nově instalovaného IV. odběru na obou větvích převáděcího potrubí mezi ST a NT dílem.

Při ohřevu vody pod 100 °C zejména v letním období je výhodnější regulovat výstupní teplotu vody do horkovodu směřováním s chladnou vratnou vodou přepouštěním regulovaným ochozem OTV osazeným regulační armaturou.

Okruh horkovodu je vybaven akumulací (expanzní) nádobou, která kompenzuje tepelnou objemovou roztažnost vody.

Při ohřátí vody v horkovodu ze 60 °C na 120 °C dojde vlivem změny měrného objemu k nárůstu objemu vody asi 69 m³/h. Toto množství musí zachytit expanzní nádrž, v případě vyčerpání kapacity nádrže je cesta vratné vody z horkovodu za regulačním ventilem přesměrována třicestnou armaturou do vychlazovací jímky.

Výměňky označované OTV1 a OTV2 jsou z hlediska konstrukce i materiálu stejné. Výměňky jsou vertikálního provedení, teplosměnnou plochu tvoří trubky ve tvaru „U“ na obou koncích zaválcované do trubkovnice. Vodní komora je přivařena k plášti a uvnitř je opatřena přepážkou, která vytváří dva tahy vody. Ve spodní části pláště je shromažďován kondenzát, který se vrací zpět do okruhu.

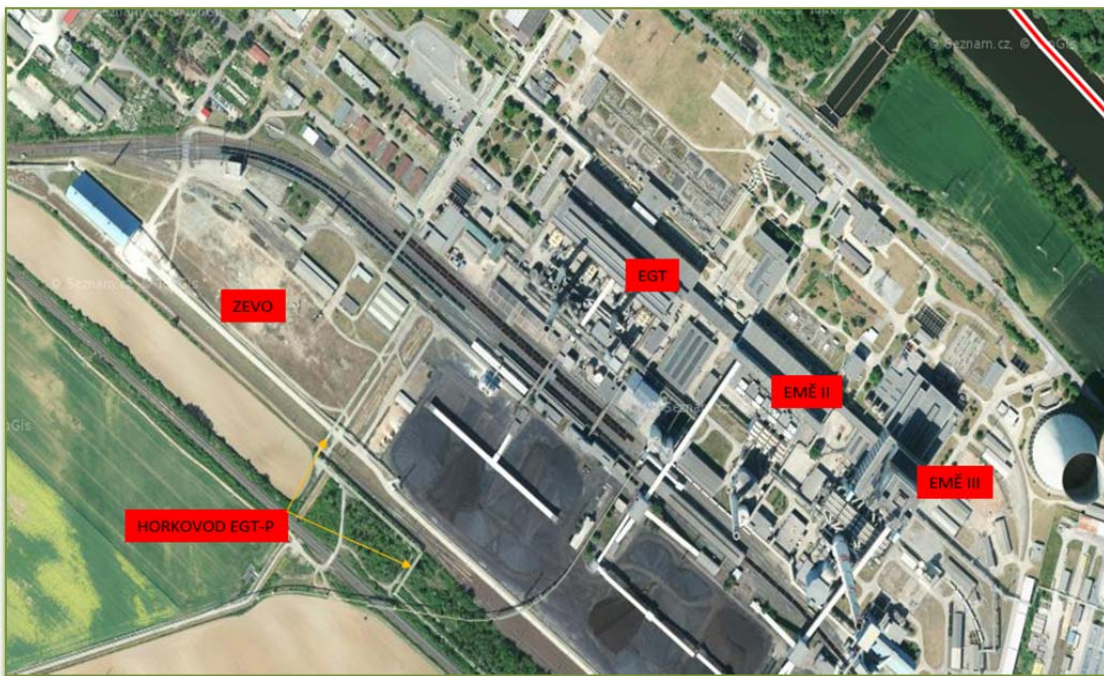
Tabulka č. 4. - Parametry OTV

OTV	parametry
typ	K – 1255-S
počet	2 ks
počet trubek	1804 ks
teplosměnná plocha	1225 m ²
trubky rozměr	Ø20 x 1 mm
tlaková ztráta při průtoku 388,3 kg/s	49 kPa
materiál trubky	nerez
Materiál ostatní	uhlíková ocel
hmotnost celková	27 882 kg
pojistné ventily parního prostoru	0,5 MPa

5 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ – ZEVO⁶

Předpokládaný záměr řeší výstavbu nového zařízení pro energetické využití odpadu.

Napojení na horkovod EMĚ – Praha bude provedeno na potrubí horké vody v prostoru vrátnice u hradla za EGT, viz obrázek č. 23.



Obrázek č. 23. - Letecký pohled na lokalitu elektrárny Mělník

ZEVO Mělník je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké páry.

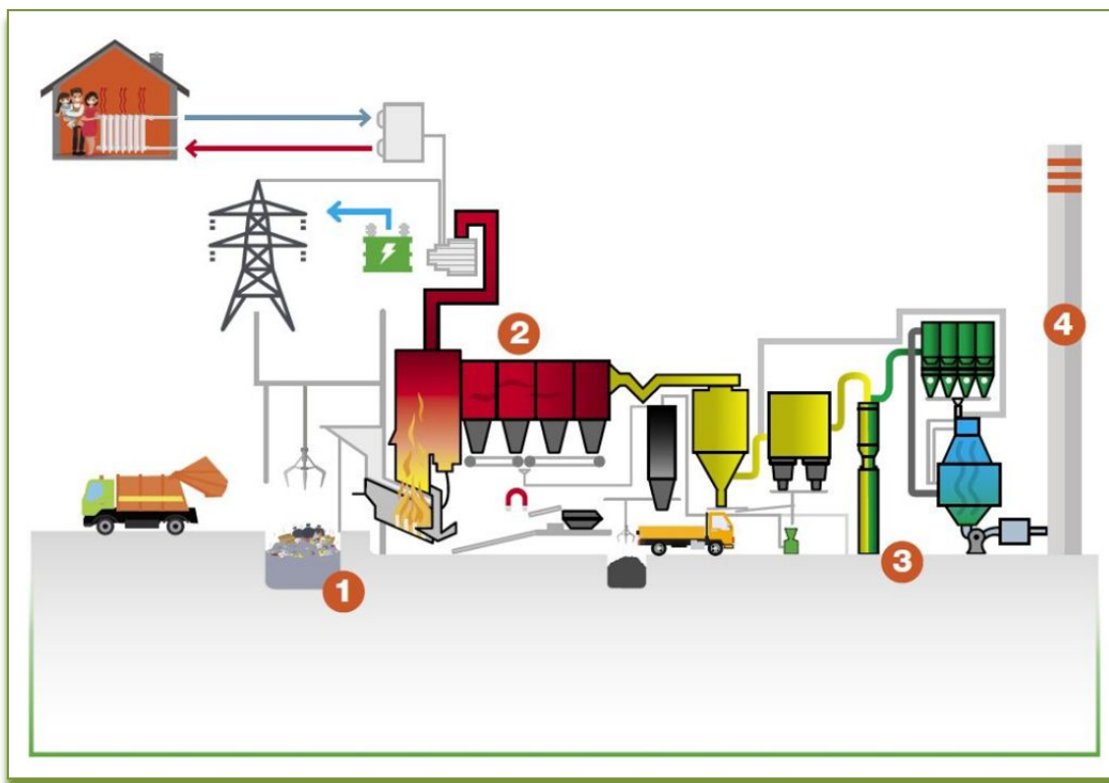
Projektovaná kapacita spalovny je 160 000 t/ročně.

Základem spalovacího zařízení je:

- parní kotle s roštovým ohništěm a příslušenstvím
- parní turbína s příslušenství a výměník tepla

⁶ Veřejně dostupné informace na stránkách společnosti CEZ a.s. [12]

Zobrazení ZEVO Mělník na obrázku č. 24.



Obrázek č. 24. - Technologické schéma ZEVO Mělník

5.1 Parní kotel s příslušenstvím

Zásobník

Vstupním místem odpadu do ZEVO je nákladová vrátnice s mostovou vahou a detektorem ionizujícího záření. Ten zajišťuje, že se do kotle nedostanou žádné radioaktivní látky. Velkoobjemový odpad se v případě potřeby rozdrťí na drobnější strukturu. Kapacita zásobníku je projektovaná tak, aby byla zajištěna zásoba paliva na cca 1 týden. Mostový drapákový jeřáb odpad v zásobníku neustále promíchává, aby byla zajištěna jeho rovnoměrná výhřevnost, a průběžně nakládá do násypky kotle. Vana zásobníku je vodotěsná a vnitřní povrch má vysokou odolnost proti mechanickému poškození.

Během provozu kotle odsává primární ventilátor vzduch z prostor zásobníku do kotle. Tím udržuje v zásobníku mírný podtlak, což zabraňuje šíření zápachu do okolí.

Kotel

Základem je vodotrubný parní kotel s přirozenou cirkulací a roštovým ohništěm.

- jmenovitý parní výkon kotle 65 t/h
- jmenovitý tlak přehřáté páry 40 MPa
- jmenovitá teplota přehřáté páry 400 °C
- výhřevnost SKO 7÷14 MJ/kg

Pro roštové ohniště je zvolen přesuvný rošt, u kterého je dávkování odpadu nezávislé na kvalitě komunálního odpadu.

Podavač paliva dávkuje potřebné množství odpadu na roštové topeniště, kde dojde k jeho předsušení a následnému samozapálení. Na roštu teplota dosahuje 850 – 1 100 °C. Plně automatická regulace procesu hoření zajišťuje optimální vyhoření odpadu, a vysokou kvalitu strusky. Zároveň vzniká jen minimální množství poléťavého prachu a popílku. Kotel je zásobován napájecí vodou, z níž následně vyrobí přehřátou páru o parametrech potřebných pro turbínu (4 MPa, 400 °C). Tato pára dodává teplo do Prahy a současně vyrábí elektrickou energii. Škvára po vyhořelém odpadu na konci roštu končí ve vodní lázni. Článekový vynašeč ji následně dopraví do zásobníku škváry. Lze ji běžně použít ke stavebním účelům.

Parní kotel je vybaven všemi potřebnými regulačními a zabezpečovacími prvky, hlavně kvalitní regulací řízení spalovacího procesu.

Součástí je i důležitá analýza vzorků vody a páry v kotli, která zabezpečuje dlouhodobý chod kotle a turbíny.

Velice důležité pro ZEVO je kontinuální měření O₂, CO, C, NO_x, zajišťující regulaci spalovacího výkonu pomocí moderního hardware a bezpečný software musí být standart každého spalovacího zařízení pro SKO.

Součástí tepelného oběhu je jedna napájecí nádrž o objemu cca 40 m³. Napájecí nádrž je vybavena odplyňovákem, nutným pro odstranění nezkodenzovatelných plynů.

Napájecí voda je předeřívána v NTO parou z regulovaného odběru TG na teplotu cca 100 °C a dohřívána při odplynění parou z neregulovaného odběru TG. Teplota v napájecí nádrži (teplota odplynění) je předpokládána 130 °C. Kotel je vybaven dvěma napájecími 100% čerpadly v zapojení 1+1.

Pro najíždění a stabilizaci je kotel vybaven stabilizačními hořáky na LTO, které jsou v provozu až do 850 °C. Nad 850 °C není potřeba stabilizace.

Čištění spalin

Česká i evropská legislativa stanovuje pro ZEVO přísné ekologické parametry. ZEVO Mělník bude naplňovat nejen stávající emisní limity, ale rovněž ty, které jsou připravovány s výhledem do budoucna v rámci dokumentace BREF. Jejich hodnoty jsou ve srovnání s konvenčními spalovacími zařízeními (uhlí, plyn, biomasa) mnohem přísnější a rovněž počet kontinuálně měřených škodlivin je rozsáhlejší. Zařízení ZEVO tedy produkuje výrazně nižší emise než konvenční zařízení na výrobu elektřiny a tepla.

Čištění spalin se skládá ze čtyř hlavních technologických kroků:

1) redukce oxidů dusíku (NO_x)

- Redukce oxidů dusíků je možno dosáhnout dvěma základními způsoby. Buď přímo ve spalovací komoře, kde probíhá selektivní nekatalytická redukce (SNCR), při dávkování roztoku čpavkové vody nebo močoviny. Nebo pak v reaktoru selektivní katalytickou metodou pomocí redukčního činidla.

2) zachycení popílku

- Popílek obsažený ve spalinách bude zachycován v elektrostatickém, nebo tkaninovém filtru. Zachycený popílek bude dopravován do sila popílku.

3) redukce organických látek typu PCDD/F

- Redukce obsahu PCDD/F může být realizována za použití katalyzátorů, nebo adsorbční metodou, kdy adsorbent (aktivní uhlí) zachytí nejen organické látky typu dioxinů a furanů, ale i těžké těžké kovy.

4) čištění anorganických složek spalin

- Pro zachycení kyselých složek existují tři základní procesy: Suchý proces s použitím suchého sorpčního činidla (např. vápna). Polosuchý/polomokrý proces, kdy je do spalin vstřikován reakční absorbent. A mokřý proces, kdy je proud spalin zaveden do sestavy praček spalin. Reagentem mohou být např. hydroxid sodný nebo vápno.

5.1.1 Výkon parního kotle

Předpokládaná roční kapacita zpracování tuhého komunálního odpadu je 160 000 t.

Předpokládaný provoz zařízení je 8 000 h/rok s ohledem na pravidelné odstávky vynucené preventivní, případně nahodilou údržbou.

Hodinová spotřeba komunálního odpadu viz tabulka č. 5:

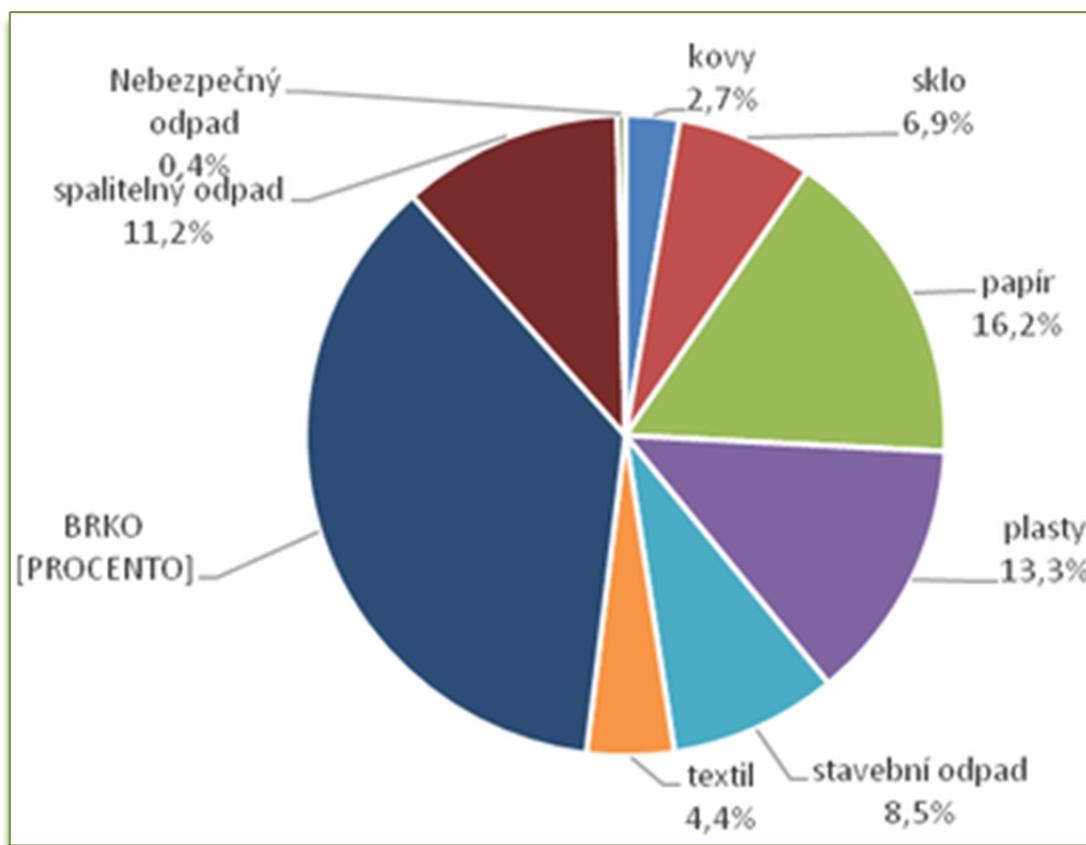
Tabulka č. 5. - Hodinová spotřeba komunálního odpadu

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$m_{KO} = \frac{m_{KOR}}{\tau}$	(1)
$m_{KO} = \frac{160000t}{8000h}$	(2)
$m_{KO} = 20t/h$	(3)

Pro další výpočet byla zvolena výhřevnost SKO 10 MJ/kg, podle výhřevnosti složek komunálního odpadu. Výhřevnost každé jednotlivé složky je znázorněna v tabulce č. 5. Přibližné složení komunálního odpadu je vidět na následujícím obrázku č. 25. Základní vlastnosti komunálního odpadu jako paliva jsou v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6. - Výhřevnost složek paliva

Druh odpadu	Výhřevnost [MJ/kg]
Papír	15,7
Plasty	32,7
Polyetylen	43,4
Polystyren	38,0
PVC	22,5
Textil	18,3
Potraviny	3,2
Smetky	6,0
Štěpka, dřevo	12,4
Sklo	0,2



Obrázek č. 25. - Přibližné složení komunálního odpadu

Tabulka č. 7. - Přehled základních vlastností komunálního odpadu

Vlastnost	
výhřevnost	kolísá mezi 7,5 MJ/kg až 10,5 MJ/kg,
vlhkost	15–40 %
obsah popele	20–35 %
granulometrie	velikost částic je velice rozdílná, od nejmenějšího prachu po velké kusy
prvkové složení	
sypaná hmotnost	velice rozdílná 60–300 kg/m ³ , průměrně kolem 120 kg/m ³
charakteristické teploty popele	velice různé, většinou nižší než 800 °C

Podle předchozích tabulek činí tepelný příkon kotle kdy při 20 t/h SKO 200 GJ/h (cca 55 MW_t) viz tabulka č. 8 a 9.

Tabulka č. 8. - Výhřevnost komunálního odpadu

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Q = m_{KO} * H$	(4)
$Q = 20\,000\text{kg} * 10\text{MJ/kg}$	(5)
$Q = 200\text{GJ}$	(6)

Výkon parovodního kotle

Tabulka č. 9. - Výkon parovodního kotle

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$P = \frac{Q}{3600}$	(7)
$P = \frac{200GJ}{3600}$	(8)
$P = 55,56MW$	(9)

Při účinnosti kotle 85 % je tepelný výkon předaný do páry

Tabulka č. 10. - Tepelný výkon předaný do páry

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$P = 55,56MW * 0,85$	(10)
$P = 47,22MW$	(11)

5.2 Turbína pro parní oběh ZEVO

5.2.1 Varianta 1

Podle varianty 1 za parní kotel představený v předchozí kapitole zapojíme kondenzační odběrovou turbínu s vodou chlazeným kondenzátorem, se dvěma neregulovanými a jedním regulovaným odběrem.

Z turbíny je vyvede částečně neregulovaný odběr páry pro ohřev vody v NN o výstupní teplotě 130 °C z NN a o stejných parametrech regulovaný odběr pro technologické potřeby.

Druhý neregulovaný odběr je pro ohřev kondenzátu v NTO o výstupní teplotě kondenzátní vody za NTO 99 °C.

Hlavní regulovaný odběr je zaveden od OTV kdy tepelný výkon předaný do horkovodu je přibližně 27 MWt při teplotě 60/120 °C a průtoku 375 t/h vody.

K tomuto odběru je možno připojit OTV nainstalovaný na strojovně EMĚ II.

Kondenzační turbína při max. odběru tepla dodá do elektrické sítě elektrický výkon o velikosti přibližně 10 MW_e.

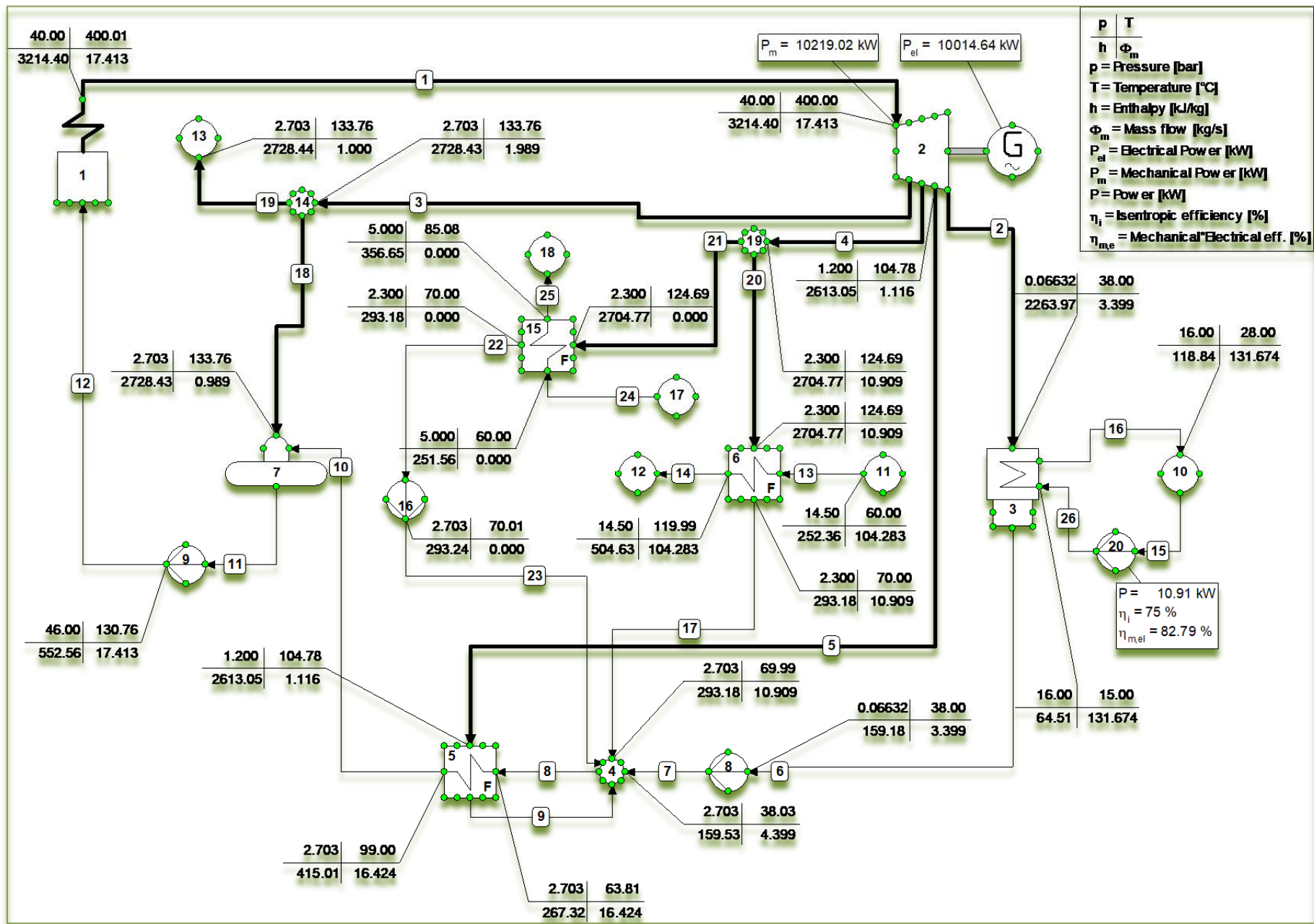
Na obrázku č. 26 je vidět zapojení tepelného oběhu zobrazeného v programu CYCLE TEMPO, ve kterém byl proveden i výpočet hodnot tepelného oběhu.

V tabulce č. 11 je vyčíslen dodaný příkon energie v palivu, tuhému komunálnímu odpadu, a vyvedený elektrický výkon s účinností turbíny.

Účinnost s ohřevem vody do horkovodu při dodávce 27 MWt tepla do horkovodu vzroste o 48 % na celkovou účinnost zařízení 66,6 %.

Tabulka č. 11. - Výkony a účinnosti z programu CT pro kondenzační turbínu

cv3: System efficiencies					
	No.	Apparatus	Type	Energy	Totals
				[kW]	[kW]
Absorbed	1	Boiler	1	54529.41	
power					54529.41
Delivered	1	Generator	G	10014.64	
gross power					10014.64
Aux. power	8	Pump	8	172.58	
consumption	9	Pump	8	115.49	
	16	Pump	8	0.00	
	20	Pump	8	-10.91	
					277.16
Delivered					
net power					9737.48
Efficiencies	gross			18.366 %	
	net			17.857 %	



Obrázek č. 26. - Tepelné schéma parovodního okruhu s kondenzační odběrovou turbínou

Tabulka č. 12. - Parní kondenzační turbína

Parametr	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý výkon	MW _e	15
Hltnost	t/h	63
Tlak ostré páry	MPa	4,0
Teplota ostré páry	°C	400
Nominální tlak v neregulovaném odběru	MPa (a)	0,27
Nominální tlak v regulovaném odběru	MPa (a)	0,23

Základní ohřívák

Výměník tepla pro ohřev vody horkovodu je vertikálního provedení s teplosměnnou plochou tvořenou nerezovými trubkami ve tvaru „U“.

Základní parametry jsou uvedeny v tabulce hodnot.

Tabulka č. 13. - Základní parametry výměníku

Název	hodnota
Jmenovité parametry horké vody (°C)	120/60
Výkon VS (MWt)	27
Jmenovitý průtok horké vody (t/h)	375
Jmenovitý výtlač oběhových čerpadel (MPa)	1,4
Tlak páry vytápějící základní výměník (MPa)	0,23

5.2.2 Varianta 2

Protitlaká turbína s jedním neregulovaným odběrem.

Podle varianty 2 za parní kotol představený v předchozí kapitole zapojíme protitlakou parní turbínu se dvěma neregulovanými odběry.

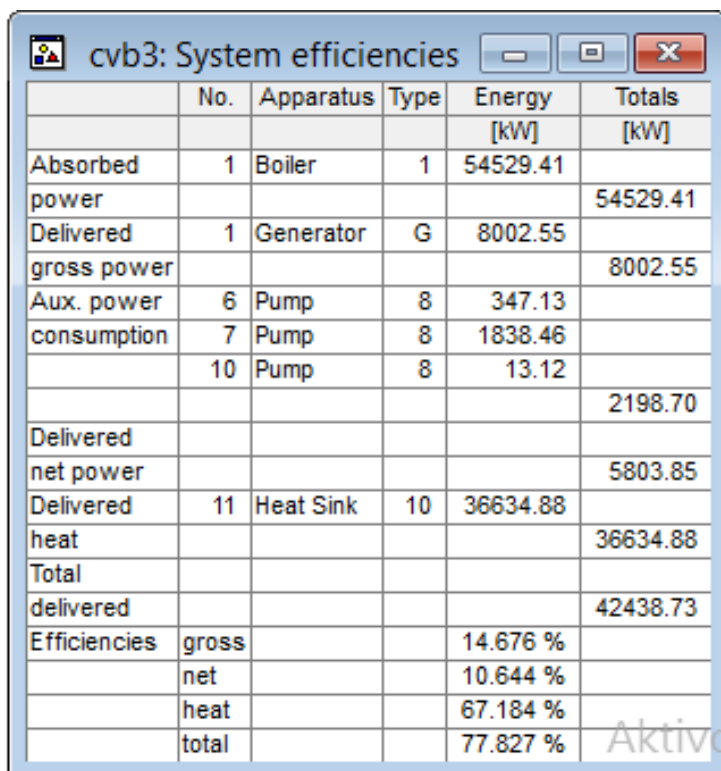
Z turbíny je vyvede částečně neregulovaný odběr páry pro ohřev vody v NN a o stejných parametrech regulovaný odběr pro technologické potřeby.

Druhý neregulovaný odběr je pro ohřev kondenzátu v NTO.

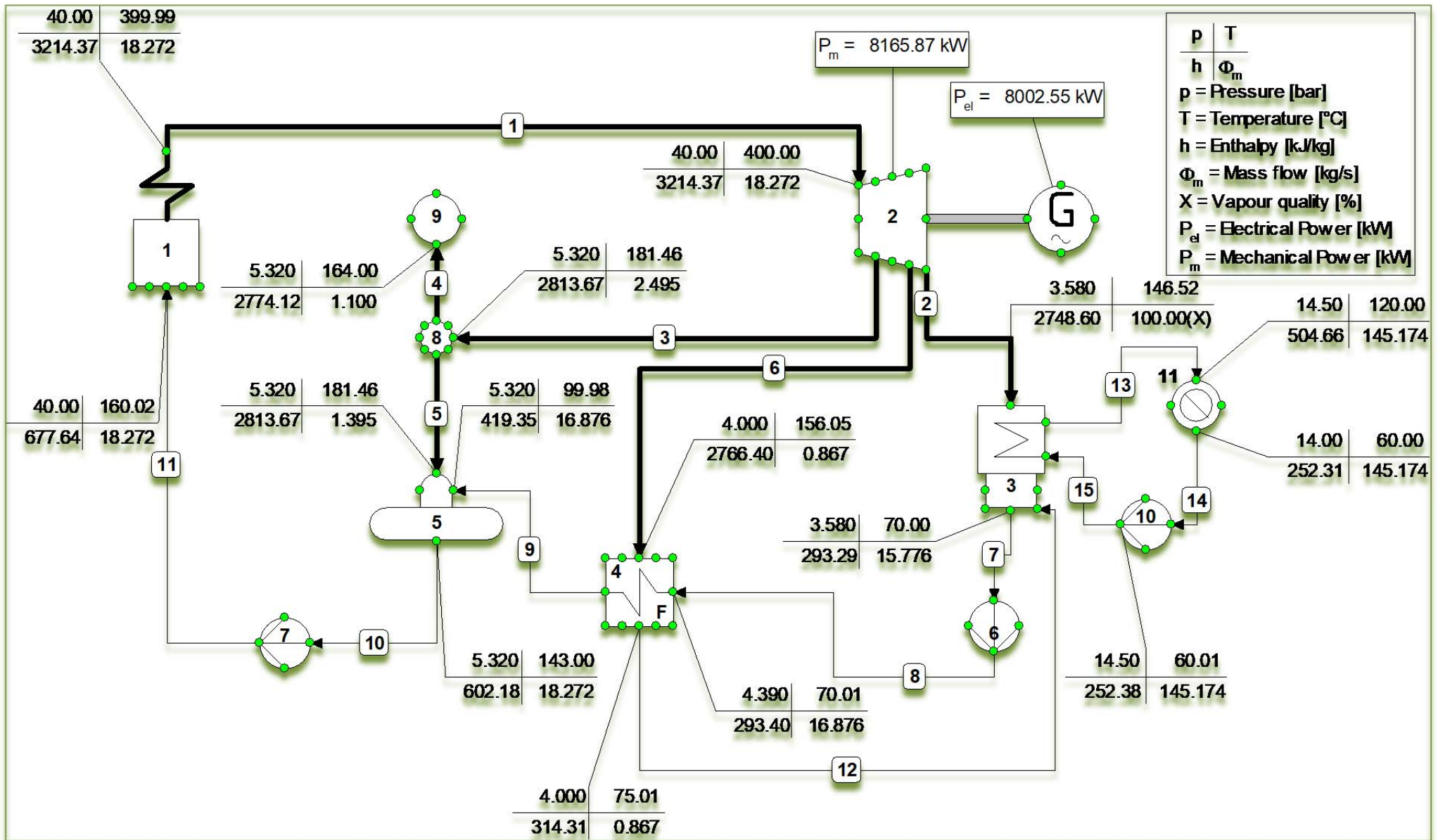
Hlavní výstup za turbínou je zaveden od OTV, základního ohříváku, kdy tepelný výkon předaný do horkovodu je 38 MW_t při teplotě 60/120 °C a průtoku 510 t/h vody.

Na obr. č. 27 je vidět zapojení tepelného oběhu. V tabulce č. 14 je vyčíslen dodaný příkon energie v palivu, tuhému komunálnímu odpadu, a vyvedený elektrický výkon s účinností turbíny.

Tabulka č. 14. - Výkony a účinnosti z programu CT pro protitlakou turbínu



	No.	Apparatus	Type	Energy [kW]	Totals [kW]
Absorbed power	1	Boiler	1	54529.41	54529.41
Delivered gross power	1	Generator	G	8002.55	8002.55
Aux. power consumption	6	Pump	8	347.13	
	7	Pump	8	1838.46	
	10	Pump	8	13.12	
					2198.70
Delivered net power					5803.85
Delivered heat	11	Heat Sink	10	36634.88	36634.88
Total delivered					42438.73
Efficiencies gross				14.676 %	
net				10.644 %	
heat				67.184 %	
total				77.827 %	



Obrázek č. 27. - Tepelné schéma parovodního okruhu s protitlakou turbínou

Tabulka č. 15. - Parní protitlaká turbína

Parametr	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý výkon	MW _e	10
Hltnost	t/h	66
Tlak ostré páry	MPa	4,0
Teplota ostré páry	°C	400
Nominální tlak v neregulovaném odběru	MPa (a)	0,5/0,4
Nominální tlak na výstupu	kPa (a)	350

Základní ohřívák

Výměník tepla pro ohřev vody horkovodu je horizontálního provedení s teplosměnnou plochou tvořenou nerezovými trubkami ve tvaru „U“.

Základní parametry jsou uvedeny v tabulce hodnot.

Tabulka č. 16. - Základní parametry výměníku

název	hodnota
Jmenovité parametry horké vody (°C)	120/60
Výkon VS (MWt)	37
Jmenovitý průtok horké vody (t/h)	520
Jmenovitý výtlač oběhových čerpadel (MPa)	1,4
Tlak páry vytápějící základní výměník (MPa)	0,35

6 VYHODNOCENÍ VARIANT ZAPOJENÍ PARNÍCH TURBÍN

6.1 Porovnání rozdílu investičních nákladů variantního řešení vyvedení tepla ze strojovny ZEVO

Z investičního hlediska stačí pouze porovnat zařízení na straně strojovny. Kotelna, zařízení přípravy paliva a zařízení emisí zůstává stejné pro obě typy turbín.

U kondenzačního stroje oproti protitlakému je potřeba zařízení pro dochlazení páry – kondenzátor, potrubí chladicí vody, čerpadla chladicí vody, armatury.

Tabulka č. 17. - Cenový odhad rozdílného zařízení strojoven

Zařízení	Počet kusu	Cena [mil Kč]
Kondenzátor	1	30
Chladicí čerpadla	2	20
Potrubí, včetně konstrukcí (pár)	1	40
Armatury	4	10

6.2 Porovnání nákladů provozních médií ZEVO

Provozní rozdíl mezi oběma variantami je pouze ve spotřebě chladicí vody potřebné pro dochlazení páry v kondenzátoru a elektrické energie potřebné pro provoz chladících čerpadel – hodnoty převzaty ze schématu vytvořeného v programu Cycle-Tempo.

Tabulka č. 18. - Spotřeba chladicí pro dochlazení páry v kondenzátoru

Časový interval [h]	Množství vody [m ³]	Předpokládaná cena [0,79Kč/m ³]
1	474	375
24	11 375	9 000
8000	3 792 000	3 000 000
160000	75 840 000	60 000 000

Cena chladicí vody Kč/m³ je vzata z ceníku dle aktuálního roku 2019.

Tabulka č. 19. - Spotřeba elektrické energie pro pohon chladících čerpadel

Časový interval [h]	Spotřeba el. energie [kW]	Předpokládaná cena [0,882Kč/kW] [15]
1	19	16,8
24	456	402,2
8000	152 000	134 400
160000	3 040 000	2 688 000

Cena elektrické energie Kč/kW je vzata z ceníku dle aktuálního roku 2019.

6.3 Celková účinnost zařízení ZEVO

Jednotlivé účinnosti nám vycházejí z tepelného oběhu spočítaného pomocí programu Cycle-Tempo viz kap. 5.2.1 a 5.2.2.

Tabulka č. 20. - Účinnost zařízení ZEVO

Účinnost	Kondenzační turbína Účinnost - [%]	Protitlaká turbína Účinnost - [%]
η_E	18,36	14,92
η_Q	48,23	67,48
η_C	66,59	82,4

6.4 Rozdíl množství vyrobeného tepla v kondenzačním a protitlakém oběhu

Rozdíl v množství vyrobeného tepla mezi kondenzační turbínou a protitlakou turbínou činí 10 MWt, v přepočtu 36 GJ dodaného tepla do horkovodu.

V tabulce je znázorněna cena rozdílu při vyšším využitím tepla z protitlaké turbíny.

Pro výpočet je použita průměrná cena 250 Kč/GJ tepla.

Cena za 1 GJ tepla se pohybuje podle ročního období a podle toho, z kterého výrobního zařízení je teplo dodané.

Tabulka č. 21. - Vyčíslený rozdíl vyrobeného tepla

Časový interval [h]	Množství tepla [GJ]	Celkem cena za 10 MWt [mil Kč]
1	36	0,009
24	864	0,216
8000	288 000	72
160000	5 760 000	1 440

6.5 Využití vyrobeného tepla v ZEVO v rámci lokality Mělník

Specifikem lokality Elektrárny Mělník je velikost dodávaného množství tepla do horkovodu Energotrans – Praha nejen v zimních měsících, ale i během letního období. Při minimálním výkonu cca 50 MWt do horkovodu nám umožňuje ZEVO provozovat jako základní zdroj při dodávkách tepla ze dvou zařízení o celkovém výkonu 37 MWt z protitlaké turbíny. Doregulování tepelného výkonu v letních měsících je možné ze zdrojů EMĚ I., nebo EMĚ II. Nasazení těchto zdrojů bude však záviset na aktuálních podmínkách provozování nejenom tepelné soustavy, ale i soustavy elektrické. Ze zdrojů EMĚ I. a II. je možné získat vyrobenou energii s větší účinností.

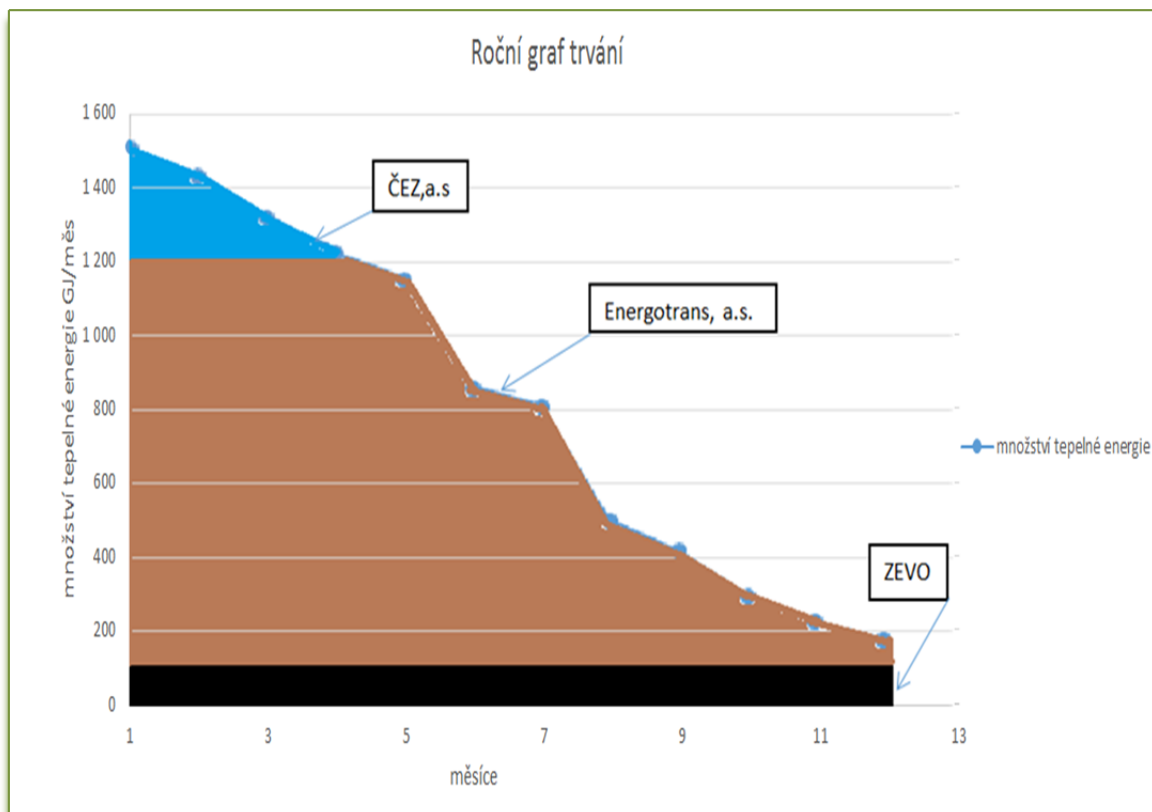
Pokud však budeme uvažovat lokalitu Elektrárny Mělník jako celek, pak vyrobené teplo z komunálního odpadu sníží množství spotřebovaného paliva pro ostatní zdroje. Zároveň dojde ke snížení ekologické zátěže při těžbě uhlí a jeho dopravě na Elektrárnu Mělník.

V následujícím grafu je patrné roční využití tepla z jednotlivých zdrojů (rozděleno dle společnosti provozující zařízení) v případě provozu ZEVO na jmenovitých parametrech.

Na obr. č. 28 je znázorněn graf ročního trvání pro který byla použita data vyrobeného a dodaného tepla z roku 2018.

Jako základní ohřev vody v horkovodu použijeme teplo vyrobené z komunálního odpadu, zařízení ZEVO. Pak dle okolních podmínek využijeme teplo z parních protitlakých, nebo kondenzačních turbín společnosti Energotrans, a.s.

Pro špičkové dohřátí je použito teplo z kondenzačních odběrových turbín společnosti ČEZ, a. s.



Obrázek č. 28. - Využití tepla z jednotlivých zdrojů

7 TECHNOLOGICKÝ VÝPOČET PROTITLAKÉ TURBÍNY

Výpočet lopatkového plánu turbíny. Jako vzor byl použit návod ze cvičení PPT.

Práce bude obsahovat – zprávu s výpočty, rychlostní trojúhelníky všech stupňů, lopatkový plán a průběh expanzního spádu.

7.1 Výpočet protitlaké turbíny:

Zadané základní parametry pro výpočet protitlaké parní turbíny najdeme v tabulce č. 19.

Jednotlivé výpočty v tabulce č. 19 provedeme podle vzorců, viz níže, odečty entalpií viz IAPWS – IF97

Tabulka č. 22. - Základní parametry pro výpočet protitlaké turbíny

Protitlaká turbína	Parametry	
svorkový výkon	8,5	MW
tlak admisní páry	40	bar
teplota admisní páry	400	°C
tlak emisní páry	3,5	bar
otáčky	75	ot/s
tlaková ztráta na ventilech	0,04	%
tlak před regulačním stupněm	38,4	bar
h(a)	3 217,16	kJ/kg
h(e)	2 671,46	kJ/kg
h(a)-h(e)	545,69	kJ/kg
s	6,79	kJ/kgK
účinnost TD	0,86	-
účinnost mechanická	0,99	-
účinnost generátoru	0,96	-
účinnost spojky	0,99	-
množství páry do TG	19,18	kg/s
hustota $\rho(a)$	13,04	kg/m ³
výstupní úhel $\alpha_1=13^\circ$	0,22	rad
rychlostní součinitel rozváděcí mříže ϕ	0,98	-

Protitlaká turbína	Parametry	
průtokový součinitel rozváděcího kola μ_1	0,97	-
D1	0,8	m
rychlostní součinitel oběžné mříže ψ	0,97	-
průtokový součinitel oběžného kola μ_2	0,95	-
zvolíme $u/c(ad)$	0,4	-

Tabulka č. 23. - Tlaková ztráta na ventilech

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_V + \xi_D = 0,04$	(12)
$p_D = 0,96 * p_a = 0,96 * 40 = 38,4\text{bar}$	(13)

Ztráta na ventilech a v převaděcím potrubí se počítají v rozmezí 3÷5 %.

Tabulka č. 24. - Celkový tlakový spád

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$H_{ad} = h_a - h_e$	(14)
$H_{ad} = 3\,217,1633 - 2\,671,4697 = 545,6936 \text{ kJ/kg}$	(15)

Tabulka č. 25. - Průtok páry parní turbínou

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$M = \frac{P_{SV}}{H_{ad} * \eta_{TD} * \eta_m * \eta_g * \eta_s}$	(16)
$M = 19,1815 \text{ kg/s}$	(17)

7.1.1 Výpočet regulačního rovnotlakého stupně

Pro rovnotlaký stupeň platí

Tabulka č. 26. - Rychlostní poměr

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\left(\frac{u}{c_{ad}}\right) = \frac{\varphi * \cos\alpha_1}{2}$	(18)
$\left(\frac{u}{c_{ad}}\right) = 0,477$	(19)
Volíme rychlostní poměr $u/c(ad)$ z optimální meze.	
$\left(\frac{u}{c_{ad}}\right) = 0,4$	(20)

Pro první návrh volíme střední průměr lopatkování $D=0,8$ m z důvodu $u < 200$ m/s

Tabulka č. 27. - Spočítáme obvodovou rychlost

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$u = \pi * D * n$	(21)
$u = 188,4955$ m/s	(22)

Další výpočty dle vzorců, výsledek v tabulce č.31, počítáno pro $e=0,4545$

Tabulka č. 28. - Výpočet rychlosti rychlost c_{1ad}

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_{1ad} = \frac{u}{c_{ad}}$	(23)

Tabulka č. 29. - Výpočet entalpického spádu na RK

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$H_{RK} = \frac{c_{1ad}^2}{2}$	(24)

Tabulka č. 30. - Výpočet poměru entalpického spádu na RK ku celkovému spádu

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\frac{H_{RK}}{H_{ad}}$	(25)

dle tabulek odečten tlak p_1 a hustota ρ_1

Tabulka č. 31. - Překontrolován tlakový poměr β

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\beta^* = 0,52 < \beta = \frac{p_1}{p_a}$	(26)

Kritický tlakový poměr β^* z výpočtu pro vzduch a dvouatomové plyny je roven 0,52.

Tabulka č. 32. - Proveden výpočet délky lopatky l_1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$l_1 = \frac{M}{\rho_1 * \pi * D_1 * c_{1ad} * \mu_1 * \sin\alpha}$	(27)

Tabulka č. 33. - Délku lopatky l_2 dle normy zvolíme

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$l_2 = l_1 + 0,003$ mm	(28)

Tabulka č. 34. - Výpočet rychlosti c_1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_1 = \varphi * c_{1ad}$	(29)

Tabulka č. 35. - Výpočet rychlosti w1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$w_1 = w_{2ad} = \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2 * c_1 * u * \cos\alpha}$	(30)

Tabulka č. 36. - Výpočet rychlosti w2

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$w_2 = \psi * w_{2ad}$	(31)

Tabulka č. 37. - Spočítáme úhel β

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\beta = \arcsin \frac{M}{\rho_1 * \pi * D_2 * l_2 * w_{2ad} * \mu_2 * e}$	(32)

Tabulka č. 38. - Výpočet rychlosti c2

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_2 = \sqrt{w_{2ad}^2 + u^2 - 2 * w_{2ad} * u * \cos\beta}$	(33)

spočítáme vnitřní účinnost stupně:

Tabulka č. 39. - Spočítáme ztrátu na rozváděcím kole

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_r = \frac{c_{1ad}^2}{2} * (1 - \varphi^2)$	(34)

Tabulka č. 40. - Spočítáme ztrátu na oběžném kole

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_o = \frac{w_{1ad}^2}{2} * (1 - \psi^2)$	(35)

Tabulka č. 41. - Spočítáme ztrátu výstupní rychlosti

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_v = \frac{c_2^2}{2}$	(36)

Tabulka č. 42. - Spočítáme obvodovou účinnost

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\eta_u = \frac{H_{RK} - Z_r - Z_o - Z_v}{H_{RK}}$	(37)

Tabulka č. 43. - Hodnoty regulačního rovnotlakého stupně

název parametru	hodnota	jednotka
D	0,8	m
u	188,49	m/s
c1ad	471,23	m/s
Hrk	111,03	kJ/kg
Hrk/Had	0,2035	-
h za A kolem	3 106,13	kJ/kg
p1	25,89	bar
ρ_1	9,60	kg/m ³
tlakový poměr β	0,67	-
l1	0,0077	m
l1nor	0,02	m
částečný ostřík e	0,4545	-
l2	0,023	m
c1	461,81	m/s
w1=w2ad	281,36	m/s
w2	272,92	m/s
úhel β	0,2883	rad
úhel β	16,51	°
c2	114,02	m/s
Zr	4 396,90	J/kg
Zo	2 339,33	J/kg
Zv	6 501,33	J/kg
η_u	0,8808	-

Výpočet ztrát a termodynamické účinnosti podle níže uvedených vzorců u různého „e“.

Výsledky viz tabulka č. 46.

Tabulka č. 44. - Ztráta okrajová⁷

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_0 = \frac{9,9 * \left(\frac{u}{c_{ad}}\right)^2}{l_1}$	(38)

Tabulka č. 45. - Ztráta částečným ostřikem

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_{\zeta_0} = 0,25 * \frac{b_2 * l_2}{S_1} * \left(\frac{u}{c_{ad}}\right) * \eta_u$	(39)
$S_1 = \pi * D_1 * l_1 * \sin\alpha_1 * e$	(40)

Tabulka č. 46. - Ztráta neostříknutými lopatkami

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_L = \left(0,04 + 0,5 * \frac{l_1}{D_1}\right) * \frac{1 - e}{e * \sin\alpha_1} * \left(\frac{u}{c_{ad}}\right)^2$	(41)

Tabulka č. 47. - Ztráta vějířová

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_V = 0,77 * \left(\frac{l_2}{D_2}\right)^2$	(42)

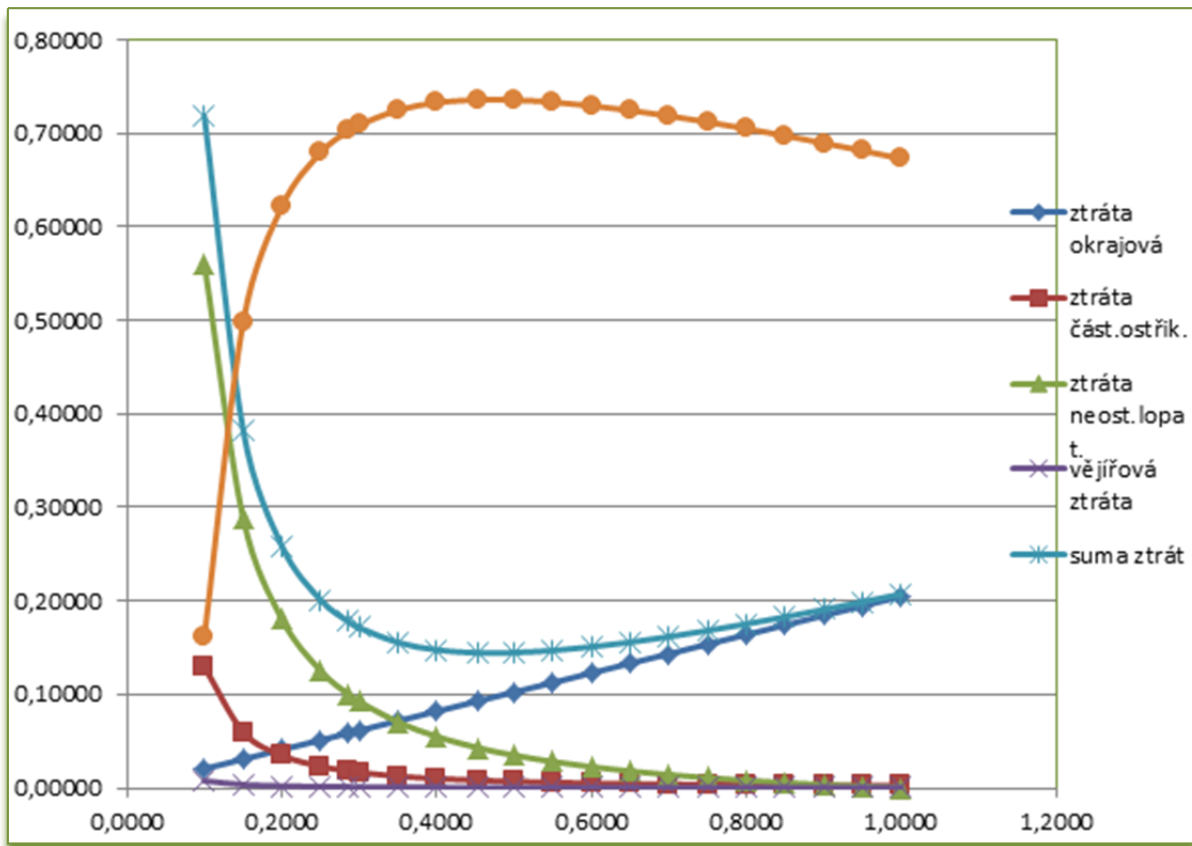
Tabulka č. 48. - Celková účinnost termodynamická

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\eta_{TDRK} = \eta_u - \xi_0 - \xi_{\zeta_0} - \xi_L - \xi_V$	(43)

⁷ l_1 počítáno v mm

Tabulka č. 49. - Výpočet regulačního rovnotlakého stupně

l2	l ₁	e	ξ0	S1	ξč0	ξL	ξv	sumaξ	ηtd
0,0803	0,0773	0,1000	0,02050	0,00436836	0,12990	0,56035	0,00775	0,71851	0,16227
0,0545	0,0515	0,1500	0,03075	0,00436836	0,05991	0,28849	0,00358	0,38273	0,49805
0,0416	0,0386	0,2000	0,04100	0,00436836	0,03495	0,18094	0,00209	0,25897	0,62181
0,0339	0,0309	0,2500	0,05125	0,00436836	0,02318	0,12549	0,00138	0,20130	0,67948
0,0300	0,0270	0,2863	0,05869	0,00436836	0,01813	0,09997	0,00108	0,17787	0,70290
0,0288	0,0258	0,3000	0,06150	0,00436836	0,01667	0,09230	0,00099	0,17147	0,70931
0,0251	0,0221	0,3500	0,07175	0,00436836	0,01268	0,07045	0,00076	0,15564	0,72514
0,0223	0,0193	0,4000	0,08200	0,00436836	0,01004	0,05508	0,00060	0,14772	0,73305
0,0200	0,0170	0,4545	0,09317	0,00436836	0,00807	0,04285	0,00048	0,14457	0,73621
0,0185	0,0155	0,5000	0,10250	0,00436836	0,00687	0,03502	0,00041	0,14480	0,73598
0,0170	0,0140	0,5500	0,11275	0,00436836	0,00586	0,02814	0,00035	0,14711	0,73367
0,0159	0,0129	0,6000	0,12300	0,00436836	0,00508	0,02259	0,00030	0,15098	0,72980
0,0149	0,0119	0,6500	0,13325	0,00436836	0,00447	0,01801	0,00027	0,15600	0,72478
0,0140	0,0110	0,7000	0,14350	0,00436836	0,00397	0,01417	0,00024	0,16189	0,71889
0,0133	0,0103	0,7500	0,15375	0,00436836	0,00357	0,01092	0,00021	0,16845	0,71233
0,0127	0,0097	0,8000	0,16400	0,00436836	0,00323	0,00812	0,00019	0,17554	0,70523
0,0121	0,0091	0,8500	0,17425	0,00436836	0,00295	0,00568	0,00018	0,18306	0,69772
0,0116	0,0086	0,9000	0,18450	0,00436836	0,00271	0,00355	0,00016	0,19093	0,68985
0,0111	0,0081	0,9500	0,19475	0,00436836	0,00250	0,00167	0,00015	0,19908	0,68170
0,0107	0,0077	1,0000	0,20500	0,00436836	0,00232	0,00000	0,00014	0,20746	0,67331



Obrázek č. 29. - Grafické znázornění výpočtu regulačního rovnotlakého stupně

7.1.2 Výpočet stupňové části

Základní parametry pro stupňovou část viz tabulka č. 50.

Jednotlivé výpočty v tabulce č. 72 provedeme podle vzorců, viz níže, odečty entalpií viz IAPWS – IF97.

Tabulka č. 50. - Hodnoty stupňové části

název parametru	hodnota	jednotka
H (RK) zpracování	111,03	kJ/kg
η_u	0,88	%
η_{TD}	0,73	%
h(a)	3 217,16	kJ/kg
h0	3 135,41	kJ/kg
p0	25,89	bar
s0	6,8403	kJ/kgK
ρ_0	9,37	kg/m ³
zvolíme u/c1(ad)	0,8	-
D1	0,6	m
stupeň reakce R	0,5	-
otáčky	75	ot/s
průtokový součinitel rozváděcího kola μ_1	0,97	-
průtokový součinitel oběžného kola μ_2	0,95	-
rychlostní součinitel rozváděcí mříže ϕ	0,98	-
rychlostní součinitel oběžné mříže ψ	0,97	-
úhel α_1	0,31	rad
úhel β_1	0,31	rad
množství páry do TG	18,96	kg/s
π	3,14	-
h(e)	2 671,46	kJ/kg
I spád stup. části	463,95	kJ/kg

Nejprve provedeme odhad stupňů pro přetlakovou část

Tabulka č. 51. - Odhad stupňů stupňové části – výpočet průměru H_{ad}

D	u	R	c_0	H_{ad}	c_{ad}
0,60	141,37	0,50	0,00	31,23	176,71
0,62	146,08	0,50	50,00	30,84	182,61
0,64	150,80	0,50	50,00	33,03	188,50
0,68	160,22	0,50	50,00	37,61	200,28
průměr				33,1784661	

Tabulka č. 52. - Odhad stupňů stupňové části

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$y = \frac{\Delta i * 1,01}{\phi H_{ad}}$	(44)
$y = \frac{463,9501 * 1,01}{33,1784}$	(45)
$y = 14,12 \text{ stupně}$	(46)

Počet stupňů v přetlakové části podle výpočtu 14

Tabulka č. 53. - Pro přetlakový stupeň volíme rychlostní poměr

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\left(\frac{u}{c_{ad}}\right) = 0,8$	(47)

Pro první návrh volíme střední průměr lopatkování $D=0,65$ m z důvodu optimálního využití entalpického spádu.

Volíme rychlostní poměr $u/c(ad)$ z optimální meze.

Volíme také úhel $\alpha = \beta = 18^\circ$ z optima $18^\circ \div 22^\circ$

Další výpočty dle vzorců, výsledek v tabulce č.69*

Tabulka č. 54. - Spočítáme obvodovou rychlost

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$u = \pi * D * n$	(48)

Tabulka č. 55. - Výpočet rychlost c_{1ad}

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_{1ad} = \frac{u}{c_{ad}}$	(49)

Tabulka č. 56. - Výpočet entalpického spádu na stupni

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$H_{RK} = \frac{c_{1ad}^2}{2}$	(50)

dle tabulek podle entalpie odečteme tlak p_1 a hustota ρ_1 a vypočítáme délku lopatky

Tabulka č. 57. - Výpočet délky lopatky l_1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$l_1 = \frac{M}{\rho_1 * \pi * D_1 * c_{1ad} * \mu_1 * \sin\alpha}$	(51)

Tabulka č. 58. - Výpočet rychlosti c_1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_1 = \varphi * c_{1ad}$	(52)

Tabulka č. 59. - Výpočet rychlosti w_1

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$w_1 = w_{2ad} = \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2 * c_1 * u * \cos\alpha}$	(53)

Tabulka č. 60. - Výpočet rychlosti w_{2ad}

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$w_{2ad} = \sqrt{w_1^2 + 2 * R * H_{ad}}$	(54)

Tabulka č. 61. - Výpočet rychlosti w_2

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$w_2 = \psi * w_{2ad}$	(55)

dle tabulek podle entalpie odečten tlak p_2 a hustota ρ_2

Tabulka č. 62. - Výpočet délky lopatky l_2

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$l_2 = \frac{M}{\rho_2 * \pi * D_1 * w_1 * \mu_2 * \sin\beta}$	(56)

Tabulka č. 63. - Výpočet rychlosti c_2

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$c_2 = \sqrt{w_{2ad}^2 + u^2 - 2 * w_{2ad} * u * \cos\beta}$	(57)

Výpočet ztrát a termodynamické účinnosti podle níže uvedených vzorců.

Tabulka č. 64. - Spočítáme ztrátu na rozváděcím kole

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_r = \frac{c_{1ad}^2}{2} * (1 - \varphi^2)$	(58)

Tabulka č. 65. - Spočítáme ztrátu na oběžném kole

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_o = \frac{w_{1ad}^2}{2} * (1 - \psi^2)$	(59)

Tabulka č. 66. - Ztráta výstupní rychlostí, počítá se jen u posledního stupně

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$Z_v = \frac{c_2^2}{2}$	(60)

Tabulka č. 67. - Obvodová účinnost

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\eta_u = \frac{H_{RK} - Z_r - Z_o - Z_v}{H_{RK}}$	(61)

Tabulka č. 68. - Ztráta okrajová⁸

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_o = \frac{1,5 * (0,25 + 0,85 * D_1)}{\sin\alpha * l_1}$	(62)

Tabulka č. 69. - Ztráta vějířová

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\xi_v = 0,77 * \left(\frac{l_2}{D_2}\right)^2$	(63)

Tabulka č. 70. - Celková účinnost termodynamická

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\eta_{TDSC} = \eta_u - \xi_o - \xi_{co} - \xi_L - \xi_v$	(64)

U posledního stupně se počítá celková termodynamická účinnost stroje.

⁸ l_1 - počítáno v mm

U stupňů za kterými jsou odběry se počítá ztráta výstupní rychlostí. Její velikost max. 1-2 %.

Z důvodu provozní spolehlivosti jsou odběry pro NN a NTO vyvedeny z turbíny samostatně.

Za stupněm 11 je vyveden odběr pro NN a za stupněm 12 pro NTO.

Zv 11, 12, 13 jsou ztráty za stupni 11, 12, 13.

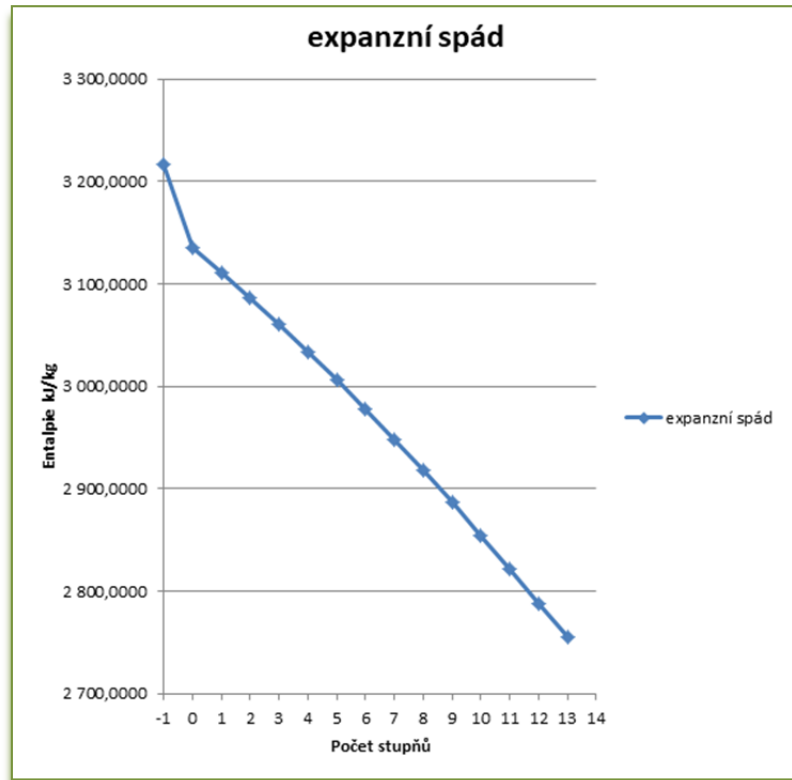
Tabulka č. 71. - Ztráta výstupní rychlostí a celková termodynamická účinnost

Zv 11	2438,87	J/kg	0,53	%
Zv 12	2483,41	J/kg	0,54	%
Zv 13	2528,36	J/kg	0,54	%
had	463,95	kJ/kg		
η_{td} celková	0,83			%

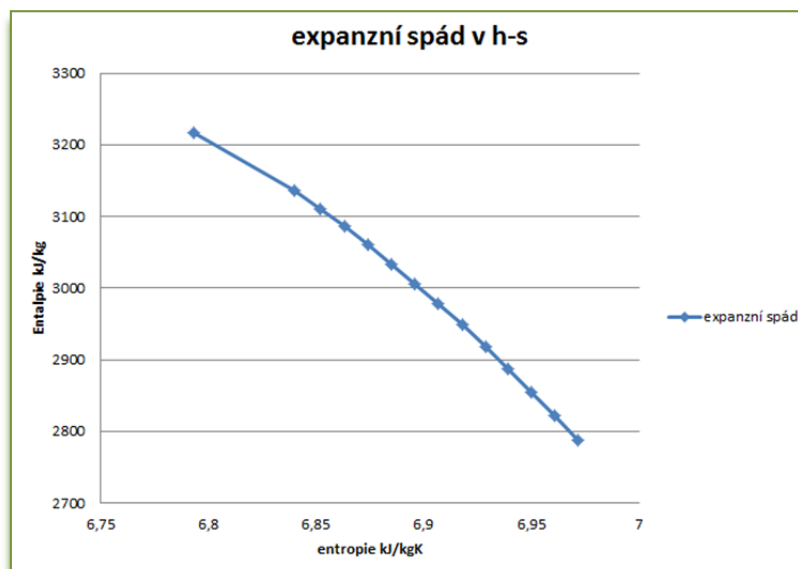
Tabulka č. 72. - Tabulka výpočtů stupňové části

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
D	0,600	0,606	0,612	0,618	0,624	0,630	0,636	0,642	0,648	0,654	0,660	0,666	0,672
u	141,37	142,79	144,20	145,61	147,03	148,44	149,85	151,27	152,68	154,10	155,51	156,92	158,34
c0	0,00	63,49	64,13	64,76	65,40	66,03	66,67	67,30	67,94	68,57	69,21	0,00	0,00
c1ad	176,71	178,48	180,25	182,02	183,78	185,55	187,32	189,08	190,85	192,62	194,39	196,15	197,92
R	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Had	31,2280	31,8557	32,4896	33,1298	33,7762	34,4289	35,0878	35,7530	36,4244	37,1020	37,7859	38,4761	39,1724
had	15,6140	15,9279	16,2448	16,5649	16,8881	17,2145	17,5439	17,8765	18,2122	18,5510	18,8930	19,2380	19,5862
i1	3 119,8058	3 095,3854	3 070,1086	3 043,9635	3 016,9420	2 989,0391	2 960,2470	2 930,5568	2 899,9724	2 868,4947	2 836,1319	2 802,8975	2 768,8130
p1	24,49895	21,8048	19,3124	17,02305	14,93345	13,0167	11,2645	9,67895	8,2533	6,98055	5,8507	4,855	3,98505
p1	8,9796	8,1558	7,3807	6,6563	5,9829	5,3515	4,7573	4,2119	3,7056	3,2405	2,8146	2,4264	3,7647
l1	0,0212	0,0228	0,0247	0,0269	0,0294	0,0322	0,0355	0,0394	0,0439	0,0493	0,0558	0,0635	0,0402
c1	173,18	174,91	176,64	178,38	180,11	181,84	183,57	185,30	187,03	188,77	190,50	192,23	193,96
w1	58,38	58,96	59,55	60,13	60,72	61,30	61,88	62,47	63,05	63,64	64,22	64,80	65,39
w2ad	186,11	187,97	189,83	191,69	193,55	195,41	197,27	199,14	201,00	202,86	204,72	206,58	208,44
w2	180,53	182,33	184,14	185,94	187,75	189,55	191,36	193,16	194,97	196,77	198,58	200,38	202,19
i2	3 104,1918	3 079,4576	3 053,8638	3 027,3986	3 000,0538	2 971,8247	2 942,7031	2 912,6803	2 881,7602	2 849,9437	2 817,2389	2 783,6594	2 749,2268
p2	23,100	20,5099	18,1149	15,9312	13,9357	12,0977	10,4313	8,9266	7,58	6,3811	5,3203	4,3897	3,5804
p2	8,5773	7,7763	7,022	6,3227	5,6709	5,0558	4,4848	3,9557	3,4691	3,0229	2,615	2,2445	1,9097
l2	0,0222	0,0240	0,0261	0,0284	0,0311	0,0342	0,0378	0,0421	0,0471	0,0531	0,0603	0,0690	0,0796
i*ηtd	3111,3133	3 086,3534	3 060,5284	3 033,8301	3 006,2536	2 977,7909	2 948,4332	2 918,1846	2 887,0457	2 855,0248	2 822,1355	2 788,3992	2 755,5922
s	6,8403	6,8518	6,8633	6,8742	6,8848	6,8959	6,9069	6,9178	6,9287	6,9394	6,9501	6,9608	6,9715
e	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c2	63,49	64,13	64,76	65,40	66,03	66,67	67,30	67,94	68,57	69,21	69,84	70,48	71,11
Zr	618,3150	630,7432	643,2950	655,9704	668,7695	681,6923	694,7388	707,9089	721,2027	734,6201	748,1612	761,8260	775,6144
Zo	1 023,5046	1 044,0770	1 064,8542	1 085,8360	1 107,0226	1 128,4138	1 150,0098	1 171,8104	1 193,8158	1 216,0258	1 238,4406	1 261,0600	1 283,8842
Zv											2438,8704	2483,415	2528,362813
ηu	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474	0,9474
ξo	0,1744	0,1627	0,1512	0,1399	0,1291	0,1184	0,1080	0,0981	0,0885	0,0793	0,0706	0,0624	0,0991
ξL													
ξv	0,0011	0,0012	0,0014	0,0016	0,0019	0,0023	0,0027	0,0033	0,0041	0,0051	0,0064	0,0083	0,0108
sumaξ	0,1755	0,1639	0,1526	0,1416	0,1310	0,1207	0,1107	0,1014	0,0925	0,0844	0,0770	0,0706	0,1099
ηtd	0,7720	0,7835	0,7949	0,8059	0,8164	0,8267	0,8367	0,8460	0,8549	0,8630	0,8704	0,8768	0,8375

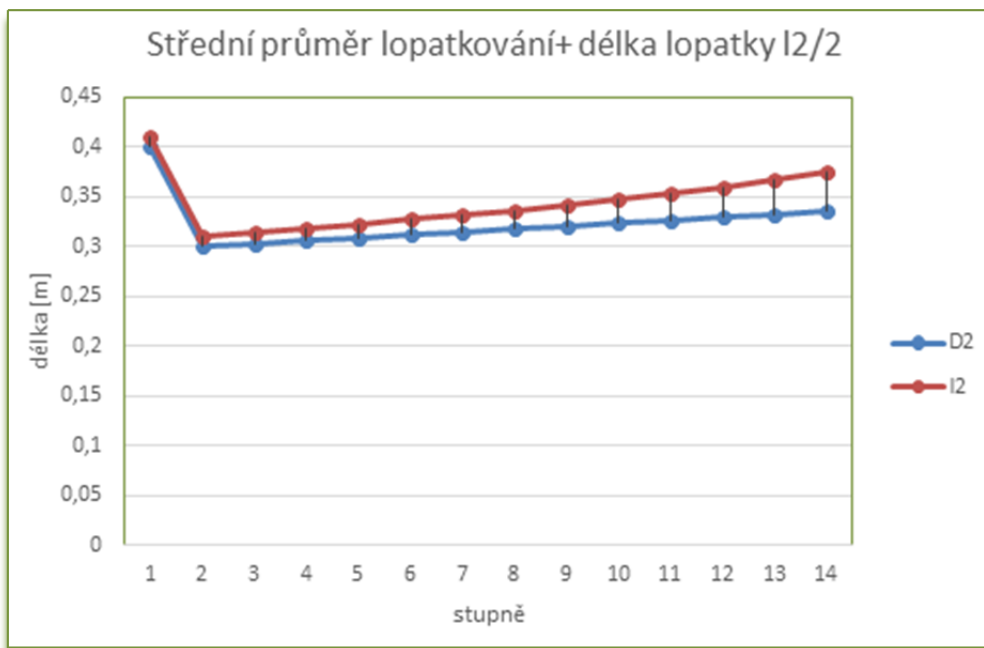
Na dalších obrázcích je znázorněn graf expanze páry v turbíně, průběh lopatkování a rychlostní trojúhelníky



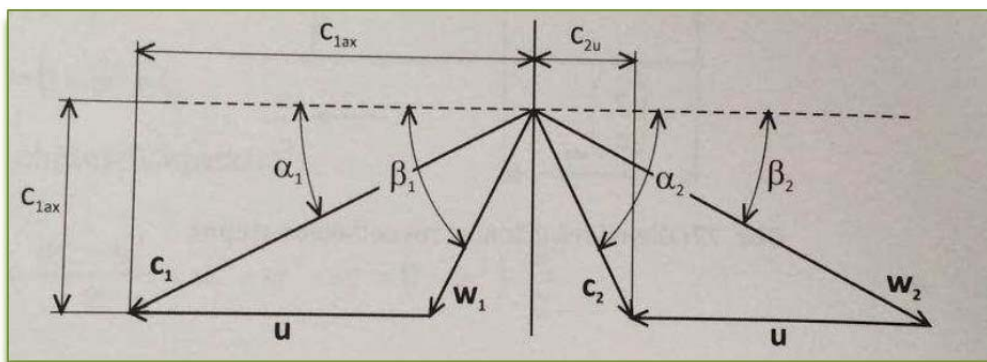
Obrázek č. 30. - Expanze páry v turbíně na jednotlivé stupně



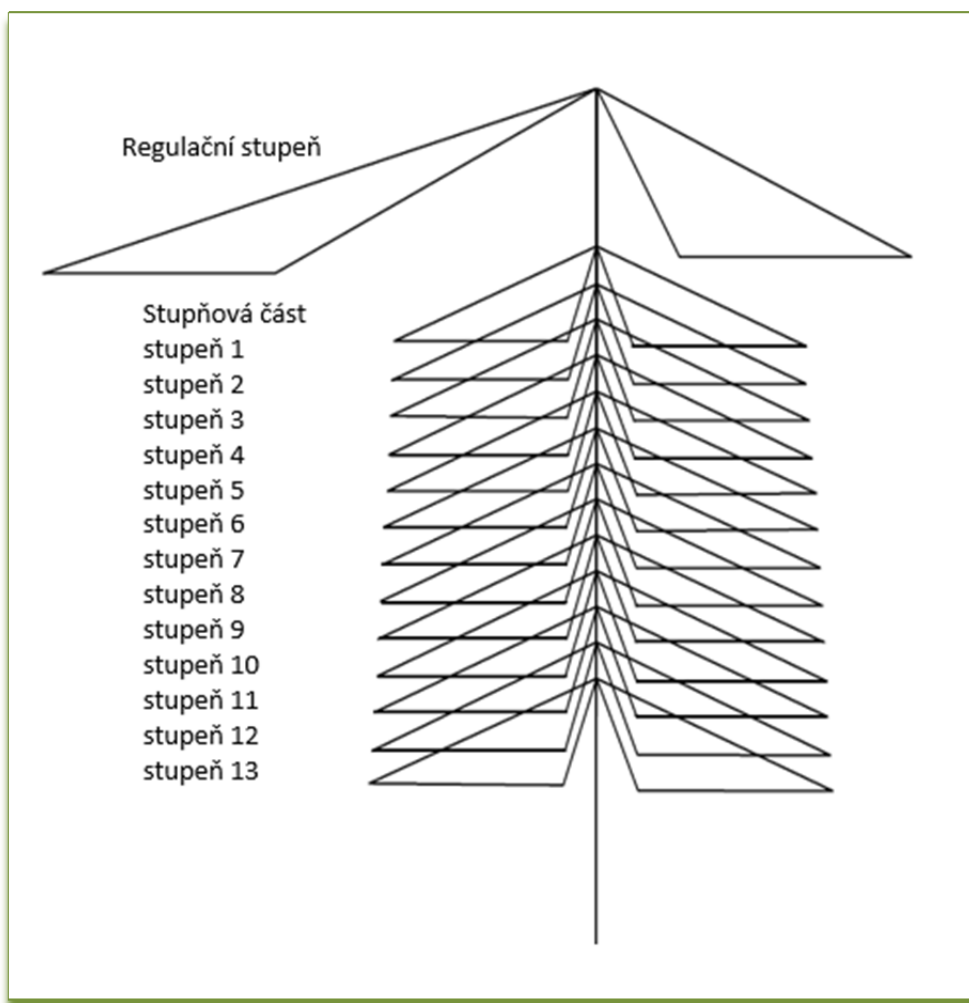
Obrázek č. 31. - Expanze páry v turbíně v diagramu h-s



Obrázek č. 32. - Střední průměr lopatkování a délka lopatky I₂



Obrázek č. 33. - Rychlostní trojúhelníky přetlakového stupně – popis



Obrázek č. 34. - Rychlostní trojúhelníky

7.2 Nenávrhové provozní režimy

Návrh parní turbíny se dělá pro jmenovité parametry. Skutečný provoz se ale liší. Přepočtem je možno zjistit skutečné provozní poměry v libovolném místě turbíny. Provozní režimy se řeší zvlášť pro regulační stupeň a zvlášť pro stupňovou část.

7.2.1 Průtok regulačním stupněm

Průtok regulačním stupněm řešíme jako průtok dýzou. V případě potřeby je možno množství páry regulovat.

7.2.2 Průtok stupňovou částí

Nenávrhové provozní režimy pro stupňovou část řešíme pomocí Stodolovi rovnice, pro stejné množství proudící páry – vzorec 65.

Protože se teplota T při regulaci škrcením málo mění, je možné pro nenávrhové provozní režimy stupňové části používat vzorec 66.

Tabulka č. 73. - Stodolova rovnice

Vzorec	pořadové číslo vzorce
$\left(\frac{M}{M_j}\right)^2 = \frac{p_1^2 - p_z^2}{p_{1j}^2 - p_{zj}^2} * \frac{T_{1j}}{T_1}$	(65)
$\left(\frac{M}{M_j}\right)^2 = \frac{p_1^2 - p_z^2}{p_{1j}^2 - p_{zj}^2}$	(66)

Při snížení výhřevnosti paliva při stejném objemu naváženého paliva získáme tepelný výkon v páře 33 MWt.

To nám dává dle programu CT množství páry do turbíny 13 kg/s.

V tabulce je vidět rozdíl snížení tlaku v turbíně před vstupem do stupňové části a za 11 a 12 kolem.

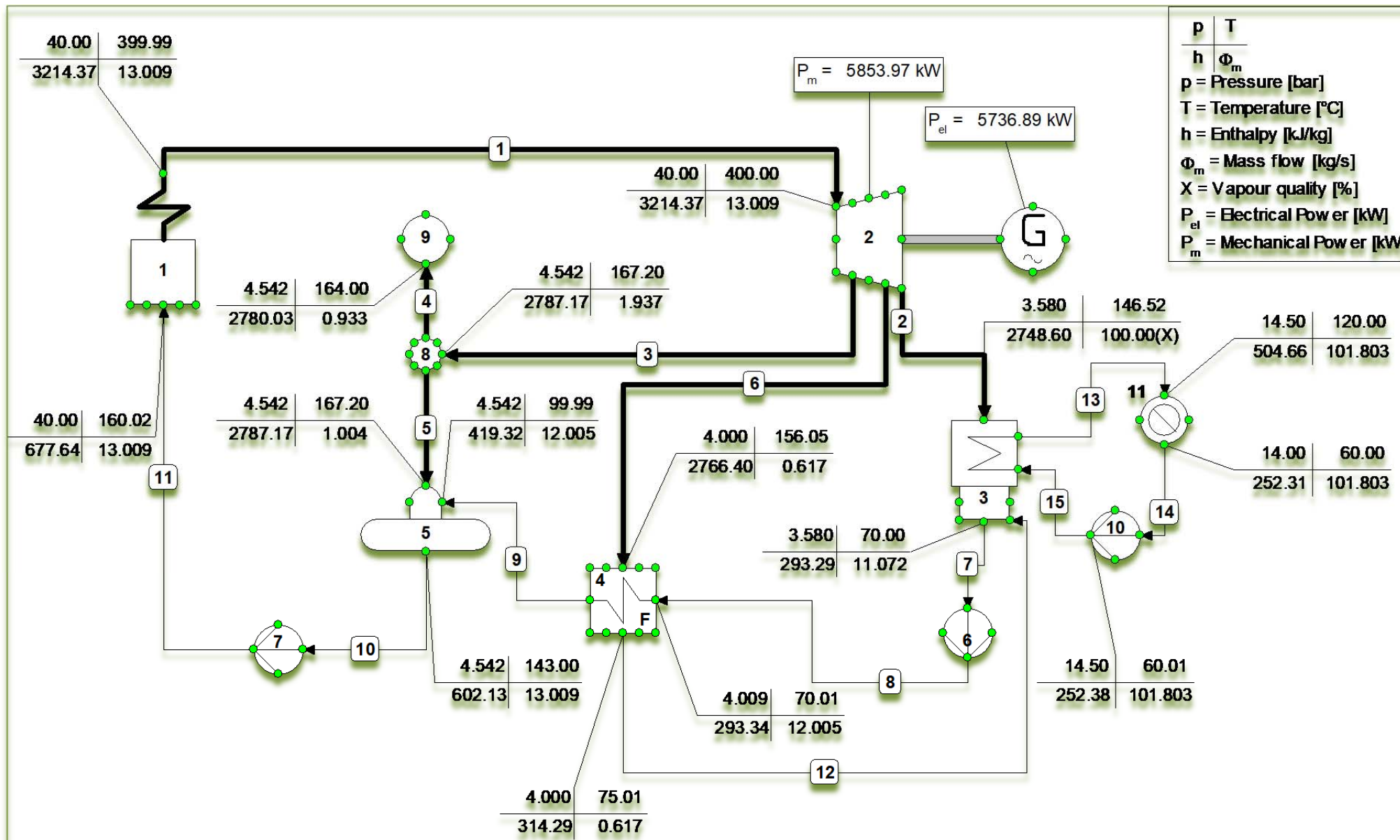
Množství páry do NN a NTO dle obrázku č. 27 při jmenovitém výkonu použit pro výpočet hodnot sníženého výkonu.

Tabulka č. 74. - Porovnání hodnot při jmenovitém a sníženém výkonu

Název	Hodnota jmenovitý výkon	Hodnota snížený výkon
Průtok stupňovou částí č.1 [kg/s]	18,27	13
Průtok stupňovou částí č.2 [kg/s]	16,89	11,61
Průtok stupňovou částí č.3 [kg/s]	16,4	10,74
Průtok – pára do NN [kg/s]	1,39	1
Průtok – pára do NTO [kg/s]	0,86	0,61
Stupňová část č. 1 tlak na vstupu [barr]	25,89	18,57
Stupňová část č. 1 tlak na výstupu [barr]	5,32	4,47
Stupňová část č. 2 tlak na vstupu [barr]	5,32	4,47
Stupňová část č. 2 tlak na výstupu [barr]	4,38	3,96
Stupňová část č. 3 tlak na vstupu [barr]	4,38	3,96
Stupňová část č. 3 tlak na výstupu [barr]	3,58	3,58

Vypočtené hodnoty tlaku za jednotlivými Stodolovými kužely jsem použil v programu CT, viz obrázek č. 34.

V tabulce č. 75 je pak znázorněn pokles celkové účinnosti oproti jmenovité účinnosti na 76,8 %.



Obrázek č. 35. - Schéma – Tepelný oběh při snížení výhřevnosti paliva

Tabulka č. 75. - Výkony a účinnosti z programu CT při snížení výhřevnosti paliva

cvb3: System efficiencies					
	No.	Apparatus	Type	Energy [kW]	Totals [kW]
Absorbed	1	Boiler	1	38823.53	
power					38823.53
Delivered	1	Generator	G	5736.89	
gross power					5736.89
Aux. power	6	Pump	8	293.72	
consumption	7	Pump	8	1309.80	
	10	Pump	8	9.20	
					1612.71
Delivered					
net power					4124.18
Delivered	11	Heat Sink	10	25690.05	
heat					25690.05
Total					
delivered					29814.23
Efficiencies	gross			14.777 %	
	net			10.623 %	
	heat			66.171 %	
	total			76.794 %	

V další tabulce je znázorněna změna celkové účinnosti při změně požadované výstupní teploty.

Min teplota 90 °C při letním provozu, max. teplota 139 °C při zimním provozu.

Tabulka č. 76. - Změna účinnosti při různých výstupních teplotách

Výstupní teplota [°C]	Výkon ZO [MW]	Účinnost [%]
90	36,8	78,198
100	36,79	78,201
110	36,79	78,203
120	36,78	78,204
130	36,78	78,205
139	36,78	78,205

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo řešení projektu optimálního využití tepla ze zařízení pro energetické využití odpadů v lokalitě Elektrárny Mělník s maximálním využitím prověřených technických řešení jednotlivých technologií, instalovaných v ČR.

Na základě evropské směrnice 99/31/ES Evropská unie požaduje radikální omezení skládkování a poté i jeho ukončení. V České republice podle zákona č. 185/2001 Sb., ze dne 15. května 2001 o odpadech a o změně některých dalších zákonů na základě ustanovení Evropské komise, bylo stanoveno, že od roku 2024 bude platit zákaz skládkování komunálního odpadu, který lze recyklovat nebo energeticky využít. Na základě bilancí z roku 2008 bude nutné odklonit od skládkování přes 2 mil. tun komunálního odpadu což přináší možnost využít tento odpad pro energetické zařízení určené pro výrobu elektřiny a tepla.

Rozdíl mezi spalováním odpadů a energetickým využitím odpadů definuje Zákon o odpadech. Tento zákon stanoví pro energetické využití odpadů nejnižší možnou energetickou účinnost zařízení pro spalování směšného komunálního odpadu 65 %.

Nezávislé studie zadané samosprávou Středočeského kraje vyhodnotily lokalitu elektrárny Mělník jako vhodnou pro realizaci koncového zařízení ZEVO – zařízení pro energetické využití odpadů z důvodu dodávek tepla do hlavního města v dostatečném objemu cca 50 MW_t v letních měsících a až 650 MW_t v zimních měsících. Na tomto předpokladu je rovněž postaven Plán odpadového hospodářství (POH) Středočeského kraje, který vychází ze závazné části Plánu odpadového hospodářství České republiky.

Pro splnění nároků na vysokou energetickou účinnost ZEVO je však nutné začlenit ZEVO do systému zásobování teplem. Lokalita Mělník jedním horkovodem zásobuje teplem města Prahu a Neratovice, druhým horkovodem Mělník a okolní obce.

V lokalitě Mělník je v souvislosti s odstavováním starých, dosluhujících zařízení vytvořen prostor pro výstavbu nového, moderního zdroje a není tak ohrožen zemědělský půdní fond. ZEVO Mělník je koncipováno jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Výstupy jsou elektrická energie a teplo ve formě horké vody. Výhodou

ZEVO je možnost zapojení výstupu přímo do topné větve, kdy můžeme vodu ohřát podle navrženého zařízení až na 139 °C.

Posuzovaným zařízením ve variantním řešení byla parní turbína s příslušenstvím. Zdroj tepla byl pro obě varianty shodný, jedná se o roštový spalovací kotel běžně používaný jak v ČR tak v zahraničí.

Podle varianty 1 za parní kotel zapojíme kondenzační odběrovou turbínu s vodou chlazeným kondenzátorem, se dvěma neregulovanými a jedním regulovaným odběrem. Tepelný výkon předaný do horkovodu je přibližně 27 MWt.

Podle varianty 2 za parní kotel představený v předchozí kapitole zapojíme protitlakou parní turbínu se dvěma neregulovanými odběry. Tepelný výkon předaný do horkovodu je 37 MWt.

Pro výběr konečné varianty byly znázorněny rozdíly mezi kondenzační turbínou a protitlakou turbínou:

- Po započtení spotřeby chladicí vody určené pro dochlazení páry v kondenzátoru a elektrické energie potřebné pro provoz čerpadel chladicího okruhu vychází varianta s protitlakou turbínou v provozních prostředích úspornější o cca 63 mil. Kč za 20 let.
- Z investičního hlediska jsou hlavním kritériem pro ekonomické zhodnocení náklady na dodávku chladicího okruhu a jeho hlavních čerpadel. Investičních náklady kondenzační turbíny jsou o 100 mil. Kč vyšší.
- Největším přínosem protitlaké turbíny je rozdíl finančních prostředků z prodeje dodaného tepla do soustavy vytápění Prahy. Tento rozdíl dosahuje za 20 let provozu zařízení hodnoty 1 440 mil. Kč, čímž se zlepšuje ekonomická návratnost celého zařízení.

Porovnání rozdílů finančních prostředků kondenzační a protitlaké turbíny je znázorněno v tabulce .Výpočty nákladů jsou podrobně popsány v kapitole č. 6.

Tabulka č. 77. - Srovnání rozdílů ekonomických nákladů

název	cena (mil. Kč/20let)
investiční prostředky kondenzačního stroje vyšší o	100
provozní prostředky kondenzačního stroje vyšší o	63
cena rozdílu dodaného tepla z protitlakého stroje vyšší o	1 440

Z energetického hlediska je výhodnější varianta s kondenzační odběrovou TG z důvodu nezávislého provozu na horkovodu.

Z ekonomického hlediska, s důrazem na vyvedení tepla ze zařízení do horkovodu Praha lze však jednoznačně zvolit jako výhodnější variantu s protitlakou turbínou.

Zároveň byl v práci proveden přepočítaný výkon protitlaké turbíny na snížený výkon kotle o cca 30 % z důvodu horší výhřevnosti komunálního odpadu. I v tomto případě celková účinnost zařízení dosahuje 76,7 % a dodaný tepelný výkon do horkovodu dosahuje 25 MW_t.

9 LITERATURA A PRAMENY

9.1 On-line prameny

pořadí	odkaz	datum	strana
1	http://www.odpadjeenergie.cz/svet-a-cr/cr-a-evropa/pozadavky-evropske-unie	27.4.2019 20:00	8, 17, 18, 19
2	https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/8fc3e5c15334ab9dc125727b00339581?OpenDocument	27.4.2019 20:00	8
3	http://www.cewep.eu/2018/07/05/municipal-waste-treatment-2016/	27.4.2019 20:00	10, 11
4	https://oenergetice.cz/zivotni-prostredi/infografika-energeticke-vyuziti-odpadu-evrope-ceske-republice/	27.4.2019 20:00	12
5	https://www.aebamsterdam.com/	27.4.2019 20:01	14
6	https://www.siegl.cz/blog/likvidace/jak-funguji-spalovny-odpadu-a-kde-je-v-cr-najdete	27.4.2019 20:02	18
7	https://www.esfcr.cz/ Ing. Vladimír Koštoval, prezentace		
8	https://www.psas.cz/ https://www.psas.cz/psas/assets/File/NEW%20SCH%20EMA%20KOGENERACE.pdf	12.5.2019 20:00	19
9	https://www.sako.cz/pro-brnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu/	27.4.2019	21
10	http://tmz.mvv.cz/	27.4.2019 20:05	23

pořadí	odkaz	datum	strana
11	https://www.zevoplzen.cz/princip	27.4.2019 20:00	24
12	https://www.cez.cz/cs/zevo/zevo-melnik.html	27.4.2019 19:58	43
13	https://www.zakonyprolidi.cz/	27.4.2019 19:57	
14	http://knihovna.cvut.cz/seminare-a-vyuka/jak-psat/jak-psat-zaverecnou-praci	27.4.2019 21:47	
15	https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/blokovy-trh?product_type=B&date=2019-04-01	28.4.2019 12:31	57
16	https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo	12.5.2019 20:22	47

9.2 Odborná literatura

pořadí	literatura
1	Přednáška: “Tepelné oběhy v energetice” - <i>Profesor Ing. Václav Petr DrSc.</i>
2	Přednáška: “Turbíny” - <i>Profesor Ing. Václav Petr DrSc.</i>
3	Tepelné turbíny, <i>Profesor Ing. Josef Bečvář a kolektiv</i> , vydavatelství SNTL, Praha 1968
4	MPP Tepelný napáječ EMĚ I-Třeboradice, zpracovatel: <i>ENERGOPROJEKTA Přerov, spol.s r.o.</i> , garant dokumentu: <i>Ing. Havlíček Zdeněk</i>
5	MPP kotle K1-K6, zpracovatel: <i>Beroušek Petr</i> , garant dokumentu: <i>Šabatka Jaroslav</i>

6	MPP TG 1+2, zpracovatel:Šenkýř Petr, Bc.Kutiš Petr, garant dokumentu: Ing. Vik Ladislav
7	MPP TG 3+4, zpracovatel:Šenkýř Petr, Bc.Kutiš Petr, garant dokumentu: Ing. Vik Ladislav
8	MPP Třetí stupeň ohřevu, zpracovatel:Šenkýř Petr, Bouška Petr, garant dokumentu: Ing. Vik Ladislav
9	MPP Kotelna EMĚ II., zpracovatel: Křížek František, garant: dokumentu: Ing.Hudousek Vladimír
10	MPP Strojovna EMĚ II, zpracovatel: Nejedlý Vladimír, garant dokumentu: Bc. Pavlíček Miroslav
11	MPP Teplárství EMĚ II, zpracovatel: Bc. Pavlíček Miroslav, garant dokumentu: Ing. Vik Ladislav
12	Mapa trasy horkovodu, správce GIS; Pátra Petr
13	Programová podpora IAPWS – IF97
14	Programová podpora CYCLE-TEMPO

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam obrázků

Obrázek č. 1. -	Způsob nakládání s odpadem v EU [3]	10
Obrázek č. 2. -	Trend zpracování komunálního odpadu [3].....	11
Obrázek č. 3. -	Vývoj kapacit ZEVO v Evropě [4]	12
Obrázek č. 4. -	Energetické využití odpadu v Evropě [4].....	13
Obrázek č. 5. -	Fotografie AEB umístěné v části Amsterdamu[5]	15
Obrázek č. 6. -	Technologie AEB [5].....	15
Obrázek č. 7. -	Parní cyklus spalovny [5].....	16
Obrázek č. 8. -	Deficit kapacit pro energetické využití odpadu [1].....	18
Obrázek č. 9. -	Mapový přehled zařízení pro spalování odpadů v ČR [6]	18
Obrázek č. 10. -	Stávající a uvažované ZEVO v ČR [1]	19
Obrázek č. 11. -	Technologie ZEVO Malešice	21
Obrázek č. 12. -	Technologie SAKO Brno	22
Obrázek č. 13. -	Technologie TERMIZO Liberec.....	24
Obrázek č. 14. -	Technologie ZEVO Chotíkov Plzeň.....	26
Obrázek č. 15. -	Trasa horkovodu z lokality EMĚ do Prahy část 1.....	28
Obrázek č. 16. -	Trasa horkovodu z lokality EMĚ do Prahy část 2.....	29
Obrázek č. 17. -	Zapojení jednotlivých skupin ohříváků	31
Obrázek č. 18. -	Plán dodávek tepla do horkovodu Praha	32
Obrázek č. 19. -	Parní protitlaká turbína s popisem.....	34
Obrázek č. 20. -	Parní kondenzační turbína s popisem.....	36
Obrázek č. 21. -	Čerpací a výměňková stanice VS III	38
Obrázek č. 22. -	Parní kondenzační turbína o jmenovitém výkonu 110 MW.....	40
Obrázek č. 23. -	Letecký pohled na lokalitu elektrárny Mělník	43
Obrázek č. 24. -	Technologické schéma ZEVO Mělník	44
Obrázek č. 25. -	Přibližné složení komunálního odpadu.....	48
Obrázek č. 26. -	Tepelné schéma parovodního okruhu s kondenzační odběrovou turbínou ..	51
Obrázek č. 27. -	Tepelné schéma parovodního okruhu s protitlakou turbínou	54
Obrázek č. 28. -	Využití tepla z jednotlivých zdrojů	59
Obrázek č. 29. -	Grafické znázornění výpočtu regulačního rovnotlakého stupně	67
Obrázek č. 30. -	Expanze páry v turbíně na jednotlivé stupně	74
Obrázek č. 31. -	Expanze páry v turbíně v diagramu h-s.....	74
Obrázek č. 32. -	Střední průměr lopatkování a délka lopatky l_2	75
Obrázek č. 33. -	Rychlostní trojúhelníky přetlakového stupně – popis	75
Obrázek č. 34. -	Rychlostní trojúhelníky	76
Obrázek č. 35. -	Schéma – Tepelný oběh při snížení výhřevnosti paliva	79

10.2 Seznam tabulek

Tabulka č. 1. -	Základní bilance odpadu [1]	17
Tabulka č. 2. -	Základní údaje k jednotlivým ohřívákům	30
Tabulka č. 3. -	Plán dodávek tepla do horkovodu Praha	31
Tabulka č. 4. -	Parametry OTV	42
Tabulka č. 5. -	Hodinová spotřeba komunálního odpadu	47
Tabulka č. 6. -	Výhřevnost složek paliva	47
Tabulka č. 7. -	Přehled základních vlastností komunálního odpadu	48
Tabulka č. 8. -	Výhřevnost komunálního odpadu	48
Tabulka č. 9. -	Výkon parovodního kotle	49
Tabulka č. 10. -	Tepelný výkon předaný do páry	49
Tabulka č. 11. -	Výkony a účinnosti z programu CT pro kondenzační turbínu	50
Tabulka č. 12. -	Parní kondenzační turbína	52
Tabulka č. 13. -	Základní parametry výměníku	52
Tabulka č. 14. -	Výkony a účinnosti z programu CT pro protitlakou turbínu	53
Tabulka č. 15. -	Parní protitlaká turbína	55
Tabulka č. 16. -	Základní parametry výměníku	55
Tabulka č. 17. -	Cenový odhad rozdílného zařízení strojoven	56
Tabulka č. 18. -	Spotřeba chladící pro ochlazení páry v kondenzátoru	56
Tabulka č. 19. -	Spotřeba elektrické energie pro pohon chladících čerpadel	57
Tabulka č. 20. -	Účinnost zařízení ZEVO	57
Tabulka č. 21. -	Vyčíslený rozdíl vyrobeného tepla	58
Tabulka č. 22. -	Základní parametry pro výpočet protitlaké turbíny	60
Tabulka č. 23. -	Tlaková ztráta na ventilech	61
Tabulka č. 24. -	Celkový tlakový spád	61
Tabulka č. 25. -	Průtok páry parní turbínou	61
Tabulka č. 26. -	Rychlostní poměr	61
Tabulka č. 27. -	Spočítáme obvodovou rychlost	62
Tabulka č. 28. -	Výpočet rychlosti rychlost c_{1ad}	62
Tabulka č. 29. -	Výpočet entalpického spádu na RK	62
Tabulka č. 30. -	Výpočet poměru entalpického spádu na RK ku celkovému spádu	62
Tabulka č. 31. -	Překontrolován tlakový poměr β	62
Tabulka č. 32. -	Proveden výpočet délky lopatky l_1	62
Tabulka č. 33. -	Délku lopatky l_2 dle normy zvolíme	62
Tabulka č. 34. -	Výpočet rychlosti c_1	62
Tabulka č. 35. -	Výpočet rychlosti w_1	63
Tabulka č. 36. -	Výpočet rychlosti w_2	63
Tabulka č. 37. -	Spočítáme úhel β	63
Tabulka č. 38. -	Výpočet rychlosti c_2	63
Tabulka č. 39. -	Spočítáme ztrátu na rozváděcím kole	63
Tabulka č. 40. -	Spočítáme ztrátu na oběžném kole	63
Tabulka č. 41. -	Spočítáme ztrátu výstupní rychlostí	63
Tabulka č. 42. -	Spočítáme obvodovou účinnost	63
Tabulka č. 43. -	Hodnoty regulačního rovnotlakého stupně	64
Tabulka č. 44. -	Ztráta okrajová	65
Tabulka č. 45. -	Ztráta částečným ostříkem	65
Tabulka č. 46. -	Ztráta neostříknutými lopatkami	65
Tabulka č. 47. -	Ztráta vějířová	65
Tabulka č. 48. -	Celková účinnost termodynamická	65
Tabulka č. 49. -	Výpočet regulačního rovnotlakého stupně	66
Tabulka č. 50. -	Hodnoty stupňové části	68
Tabulka č. 51. -	Odhad stupňů stupňové části – výpočet průměru H_{ad}	69
Tabulka č. 52. -	Odhad stupňů stupňové části	69

Tabulka č. 53. -	Pro přetlakový stupeň volíme rychlostní poměr	69
Tabulka č. 54. -	Spočítáme obvodovou rychlost	69
Tabulka č. 55. -	Výpočet rychlost c_{1ad}	70
Tabulka č. 56. -	Výpočet entalpického spádu na stupni	70
Tabulka č. 57. -	Výpočet délky lopatky l_1	70
Tabulka č. 58. -	Výpočet rychlosti c_1	70
Tabulka č. 59. -	Výpočet rychlosti w_1	70
Tabulka č. 60. -	Výpočet rychlosti w_{2ad}	70
Tabulka č. 61. -	Výpočet rychlosti w_2	70
Tabulka č. 62. -	Výpočet délky lopatky l_2	70
Tabulka č. 63. -	Výpočet rychlosti c_2	70
Tabulka č. 64. -	Spočítáme ztrátu na rozváděcím kole	71
Tabulka č. 65. -	Spočítáme ztrátu na oběžném kole	71
Tabulka č. 66. -	Ztráta výstupní rychlostí, počítá se jen u posledního stupně	71
Tabulka č. 67. -	Obvodová účinnost	71
Tabulka č. 68. -	Ztráta okrajová	71
Tabulka č. 69. -	Ztráta vějířová	71
Tabulka č. 70. -	Celková účinnost termodynamická	71
Tabulka č. 71. -	Ztráta výstupní rychlostí a celková termodynamická účinnost	72
Tabulka č. 72. -	Tabulka výpočtů stupňové části	73
Tabulka č. 73. -	Stodolova rovnice	77
Tabulka č. 74. -	Porovnání hodnot při jmenovitém a sníženém výkonu	78
Tabulka č. 75. -	Výkony a účinnosti z programu CT při snížení výhřevnosti paliva	80
Tabulka č. 76. -	Změna účinnosti při různých výstupních teplotách	80
Tabulka č. 77. -	Srovnání rozdílů ekonomických nákladů	83