

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Analýza vlivu parametrů páry na ZEVO

Analysis of Steam Parameters for ZEVO

Autor práce : Bc. Jiří Chromek

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Konvička, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Chromek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Analýza vlivu parametrů páry na ZEVO**
Analysis of Steam Parameters for ZEVO
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis spalovny SAKO Brno - zaměření na kotel
2. Stechiometrické výpočty, účinnost kotle
3. Vliv parametrů páry na výrobní teplo a bilanci ploch
4. Vliv parametrů páry na výrobu elektřiny
5. Vliv zvýšené výroby elektřiny na produkci škodlivin a CO₂ z pohledu legislativy
6. Schéma uspořádání teplosměnných ploch kotle s vyššími parametry páry.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02591-8
Firemní literatura VPE
Waste Fired Power Plant. The New Standard For Recovery Of Sustainable Energy, Metals And Building Materials From Urban Waste. In City Of Amsterdam, Waste And Energy Company, 3/2006

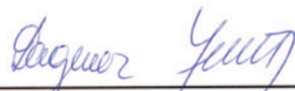
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Konvička, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou vlivu parametrů páry na ZEVO a její následné porovnání s hnědouhelnou elektrárnou. Práce je rozdělená na několik kapitol, z nichž první popisuje SAKO Brno a její princip. Na tuto teoretickou část dále navazují nezbytné výpočty. Na závěr jsou přiloženy schematické výkresy pro ZEVO, aby zařízení vyhovovalo změněným parametrům páry.

KLÍČOVÁ SLOVA

ZEVO, odpad, pára

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the analysis of steam for ZEVO and its following comparison with brown coal power plant. The work is divided into several chapters, the first describes SAKO Brno and its principle. This theoretical part continues with the necessary calculations. In conclusion are attached schematic drawings for ZEVO to suit the changed vapor parameters.

KEYWORDS

ZEVO, waste, steam

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHROMEK, J. *Analýza vlivu parametrů páry na ZEVO*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, Fakulta strojní, 2016. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Konvička, Ph.D.

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě archivována v Ústřední knihovně VŠB-TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že bibliografické údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo, diplomovou (bakalářskou) práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne

.....

jméno a příjmení studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Konvičky, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

OBSAH

1	Seznam použitých zkratk a symbolů	9
2	Úvod	13
3	Spalovna SAKO Brno	17
3.1	Historie.....	17
3.2	Současnost	18
3.3	Princip.....	20
3.3.1	Zásobník	20
3.3.2	Kotel	21
3.3.3	Turbína	23
3.3.4	Čištění spalin	24
4	Legislativa	25
4.1	Směrnice evropské unie	25
4.1.1	Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech	25
4.1.2	Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES o spalování odpadu.....	25
4.2	Legislativa v České republice	25
4.2.1	SEK – státní energetická koncepce	26
4.2.2	Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb.....	26
4.2.3	Zákon 354/2002 Sb. o emisních limitech a dalších podmínkách při spalování odpadu	26
4.3	Porovnání emisních limitů	26
5	Výpočty - ZEVO	28
5.1	Stechiometrické výpočty.....	29
5.2	Základní tepelná bilance kotle	32
5.3	Bilanční tepelné výkony pro jednotlivé části kotle.....	36
6	Vliv parametrů páry na výrobu elektřiny	40
7	Srovnání s elektrárnou Tušimice	42
7.1.1	Objem látek ve spalinách.....	43
7.1.2	Vypočítané množství ušetřených spalin za rok	46
7.1.3	Hmotnost vyprodukovaných látek na 1 kg (z garančního měření).....	48
7.1.4	Množství ušetřených látek za 1 rok (z garančního měření).....	49
8	Schéma zařízení pro zvýšené parametry páry	51
9	Závěr.....	54
	Poděkování	55
	Použité informační zdroje.....	56
	Seznam příloh.....	58

1 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Q_i^r	[kJ/kg _p]	Výhřevnost
i_{pv}	[kJ/kg _p]	Entalpie fyzického tepla v palivu
M_{pal}	[kT/rok]	Množství paliva
C	[%]	Obsah uhlíku
N	[%]	Obsah dusíku
O	[%]	Obsah kyslíku
S	[%]	Obsah síry
H	[%]	Obsah vodíku
a_u	[%]	Úlet popílku
A^f	[%]	Obsah popeloviny
W^r	[%]	Obsah vody
α	[-]	Přebytek vzduchu ve spalovací komoře
T_{NV}	[°C]	Teplota napájecí vody
O_{O_2min}	[mN ³ /kg _p]	Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva
$O_{VSmín}$	[mN ³ /kg _p]	Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva
$O_{VVMín}$	[mN ³ /kg _p]	Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva
χ_v	[-]	Podíl vodní páry na 1 mN ³ suchého vzduchu
$O_{H_2O}^V$	[mN ³ /kg _p]	Objem vodní páry
O_{CO_2}	[mN ³ /kg _p]	Objem oxidu uhličitého
O_{SO_2}	[mN ³ /kg _p]	Objem oxidu uhličitého
O_{N_2}	[mN ³ /kg _p]	Objem dusíku
O_{Ar}	[mN ³ /kg _p]	Objem argonu a dalších vzácných plynů
$O_{H_2O}^S$	[mN ³ /kg _p]	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin
O_{SS}	[mN ³ /kg _p]	Objem suchých spalin
O_{SVmin}	[mN ³ /kg _p]	Minimální objem vlhkých spalin
O_{SV}	[mN ³ /kg _p]	Objem spalin z 1kg paliva při spalování (s přebytkem vzduchu)
Z_c	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem
Z_{cs}	[%]	Ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce
Z_{cp}	[%]	Ztráta nedopalem v popílku
$Z_{cú}$	[%]	Ztráta nedopalem v úletu
Z_{cr}	[%]	Ztráta nedopalem v roštovém propadu
Z_{cb}	[%]	Ztráta uhelným práškem v brýdách

Z_{CO}	[%]	Ztráta chemickým nedopalem
$mgCO$	[%]	Ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce
O_{2ref}	[%]	Ztráta nedopalem v popílku
$Q_{i\ red}$	[%]	Ztráta nedopalem v úletu
Z_{sv}	[%]	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí
Z_{sv}^o	[%]	Ztráta sdílením v ohništi
Z_{sv}^{pk}	[%]	Ztráta sdílením v přehříváku
Z_{sv}^{mp}	[%]	Ztráta sdílením v přehříváku
Z_{sv}^{eko}	[%]	Ztráta sdílením v ekonomizéru
Z_{sv}^{OZV}	[%]	Ztráta sdílením v ohříváku vzduchu
Z_f	[%]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
c_i	[kJ * kg ⁻¹ * K]	Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků
t_i	[K]	Teplota tuhých zbytků
Z_k	[%]	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)
$I_s^{t_k, \alpha_k}$	[kJ * kg ⁻¹ * K]	Entalpie spalin při teplotě t_k
η_k	[%]	Termická účinnost kotle
Q_p^p	[kJ/kg]	Teplo přivedené do kotle
Q_v	[kJ/s]	Tepelný výkon kotle – vyrobené teplo páry
$i_{páry}^{400}$	[kJ/kg]	Entalpie přehřáté páry pro 400°C / 4 MPa
i'^{400}	[kJ/kg]	Entalpie na výstupu z ohříváku pro 400°C / 4 MPa
i''^{400}	[kJ/kg]	Entalpie na výstupu z výparníku pro 400°C / 4 MPa
$i_{páry}^{500}$	[kJ/kg]	Entalpie přehřáté páry pro 500°C / 9 MPa
i'^{500}	[kJ/kg]	Entalpie na výstupu z ohříváku pro 500°C / 9 MPa
i''^{500}	[kJ/kg]	Entalpie na výstupu z výparníku pro 500°C / 9 MPa
$M_{páry}^{400}$	[kg/s]	Parní výkon kotle pro 400°C / 4 MPa
$M_{páry}^{500}$	[kg/s]	Parní výkon kotle pro 500°C / 9 MPa
M_o^{400}	[kg/s]	Množství odluhu pro 400°C / 4 MPa
Q_{EKO}^{400}	[kW]	Tepelný výkon ohříváku 400°C / 4 MPa
Q_{VYP}^{400}	[kW]	Tepelný výkon výparníku 400°C / 4 MPa
Q_{PR}^{400}	[kW]	Tepelný výkon přehříváku 400°C / 4 MPa
Q_B^{400}	[kW]	Součet tepelných výkonů pro 400°C / 4 MPa
M_o^{500}	[kg/s]	Množství odluhu pro 500°C / 9 MPa
Q_{EKO}^{500}	[kW]	Tepelný výkon ohříváku 500°C / 9 MPa

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Q_{VYP}^{500}	[kW]	Tepelný výkon výparníku 500°C / 9 MPa
Q_{PR}^{500}	[kW]	Tepelný výkon přehříváku 500°C / 9 MPa
Q_B^{500}	[kW]	Součet tepelných výkonů pro 500°C / 9 MPa
η_e^{400}	[%]	Elektrická účinnost pro 400°C / 4 MPa
η_e^{500}	[%]	Elektrická účinnost pro 500°C / 9 MPa
E^{400}	[kW _e]	Množství vyrobené elektrické energie pro 400°C / 4 MPa
E^{500}	[kW _e]	Množství vyrobené elektrické energie pro 500°C / 9 MPa
E^{ZEVO}	[GWh _e]	Rozdíl množství vyrobené elektrické energie
E^T	[MW _e]	Elektrický výkon Tušimice
M_{pary}^{TU}	[t/hod]	Množství páry Tušimice
Q_v^T	[MW _t]	Tepelný výkon Tušimice
Q_p^T	[MW _t]	Tepelný příkon Tušimice
Q_i^{rT}	[MJ/kg _p]	Výhřevnost Tušimice
O_2	[%]	Přítomnost kyslíku Tušimice
C^T	[%]	Obsah uhlíku Tušimice
H^T	[%]	Obsah vodíku Tušimice
N^T	[%]	Obsah dusíku Tušimice
O^T	[%]	Obsah kyslíku Tušimice
S^T	[%]	Obsah síry Tušimice
$Q_v^{T'}$	[MW _t]	Tepelný výkon na 1MW elektrické energie Tušimice
Q_v^{TU}	[MW _t]	Ušetřený tepelný výkon Tušimice
M_{pal}^{TU}	[kg/s]	Množství ušetřeného paliva Tušimice
$O_{O_2min}^T$	[mN ³ /kg _p]	Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva Tušimice
O_{VSmin}^T	[mN ³ /kg _p]	Min. objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva Tušimice
O_{VVmin}^T	[mN ³ /kg _p]	Min. objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva Tušimice
α^T	[-]	Součinitel přebytku vzduchu Tušimice
$O_{H_2O}^{VT}$	[mN ³ /kg _p]	Objem vodní páry Tušimice
$O_{CO_2}^T$	[mN ³ /kg _p]	Objem oxidu uhličitého Tušimice
$O_{SO_2}^T$	[mN ³ /kg _p]	Objem oxidu uhličitého Tušimice
$O_{N_2}^T$	[mN ³ /kg _p]	Objem dusíku Tušimice
O_{Ar}^T	[mN ³ /kg _p]	Objem argonu a dalších vzácných plynů Tušimice
$O_{H_2O}^{ST}$	[mN ³ /kg _p]	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin Tušimice
O_{SSmin}^T	[mN ³ /kg _p]	Objem suchých spalin Tušimice

$O_{SV_{min}}^T$	[mN ³ / kg _p]	Minimální objem vlhkých spalin Tušimice
O_{SV}^T	[mN ³ / kg _p]	Objem spalin z 1kg paliva při spalování (s přebytkem vzduchu)
α^T	[-]	Součinitel přebytku vzduchu Tušimice
ρ_{CO_2}	[kg/m ³]	Hustota CO ₂
ρ_{SO_2}	[kg/m ³]	Hustota SO ₂
ρ_{N_2}	[kg/m ³]	Hustota N ₂
ρ_{Ar}	[kg.m ⁻³]	Hustota Ar
$m_{CO_2}^{TU}$	[t/rok]	Ušetřená hmotnost oxidu uhličitého Tušimice za 1 rok
$m_{SO_2}^{TU}$	[t/rok]	Ušetřená hmotnost oxidu siřičitého Tušimice za 1 rok
$m_{N_2}^{TU}$	[t/rok]	Ušetřená hmotnost dusíku Tušimice za 1 rok
m_{Ar}^{TU}	[t/rok]	Ušetřená hmotnost argonu a dalších vzácných plynů Tušimice za 1 rok
m_{SS}^{TU}	[t/rok]	Celková ušetřená hmotnost suchých spalin Tušimice za 1 rok
O_{TZL}^T	[mg/mN ³]	Obsah TZL Tušimice
$O_{SO_2}^T$	[mg/mN ³]	Obsah SO ₂ Tušimice
$O_{SO_3}^T$	[mg/mN ³]	Obsah SO ₃ Tušimice
$O_{NO_x}^T$	[mg/mN ³]	Obsah NO _x Tušimice
O_{CO}^T	[mg/mN ³]	Obsah CO Tušimice
m_{TZL}^T	[mg/kg _p]	Hmotnost vyprodukovaného TZL z 1 kg paliva
$m_{SO_2}^T$	[mg/kg _p]	Hmotnost vyprodukovaného SO ₂ z 1 kg paliva
$m_{SO_3}^T$	[mg/ kg _p]	Hmotnost vyprodukovaného SO ₃ z 1 kg paliva
$m_{NO_x}^T$	[mg/ kg _p]	Hmotnost vyprodukovaného NO _x z 1 kg paliva
m_{CO}^T	[mg/ kg _p]	Hmotnost vyprodukovaného CO z 1 kg paliva
m_{TZL}^{TU}	[mg/kg _p]	Hmotnost ušetřeného TZL za 1 rok
$m_{SO_2}^{TU}$	[mg/kg _p]	Hmotnost ušetřeného SO ₂ za 1 rok
$m_{SO_3}^{TU}$	[mg/ kg _p]	Hmotnost ušetřeného SO ₃ za 1 rok
$m_{NO_x}^{TU}$	[mg/ kg _p]	Hmotnost ušetřeného NO _x za 1 rok
m_{CO}^{TU}	[mg/ kg _p]	Hmotnost ušetřeného CO za 1 rok

2 ÚVOD

Podle údajů Ministerstva životního prostředí se v roce 2012 změnil klesající trend produkce odpadů v České republice na rostoucí. Nejhorší situace je v hlavním městě Praha následovaným Moravskoslezským krajem. Právě zde připadá na jednoho obyvatele alarmujících 3505kg odpadu ročně. I přes tuto skutečnost se v Evropské unii řadíme spíše mezi menší producenty odpadu. Paradoxně nejhorší situace je tam, kde by ji člověk nejméně očekával, a to v Dánsku, Německu a na Kypru.

Odpad se může řadit do několika kategorií, avšak tato diplomová práce se zabývá zejména odpadem komunálním. Jejich dělení je následující:

- Průmyslový
- Komunální
- Zemědělský
- Zdravotnický
- Jaderný
- Ostatní

I když je hlavní prioritou odpadového hospodářství minimalizace až úplně zamezení produkce odpadů, přesto jeho vzniku nelze zcela zabránit.

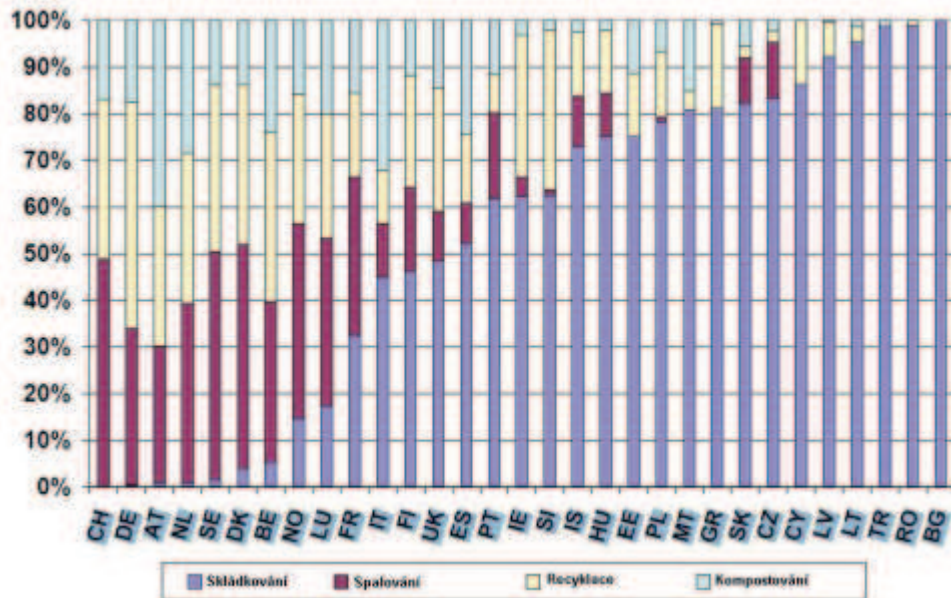
Způsobů, jak se s tímto problémem vypořádat, je několik :

- Recyklace
- Skládkování
- Energetické využití odpadů
- Opětovné použití

Patrně nejstarším, nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem odstraňování odpadů v České republice představuje skládkování. Jeho hlavním úkolem je separace komunálních odpadů od okolního prostředí a zachycení nebezpečných látek. Z ekonomického a ekologického hlediska se jedná o nejméně uspokojivý způsob nakládání s odpadem, jelikož přicházíme o materiálové a energetické zdroje v něm uložené. Snahou by tedy mělo být zajištění jiného zpracování a využití, na kterém se mohou individuálně podílet i samotní občané, což vyplývá ze zákona o odpadech, a tím i minimalizovat počet skládek.

Tímto způsobem je právě recyklace, čili opětovné použití materiálu výrobků. Během posledních 15ti let se na území české republiky začalo ve velké míře skloňovat třídění odpadu. V každé vesnici i městě je možné vidět několik stanovišť s barevnými kontejnery, které slouží právě k třídění odpadu na plasty, sklo, papír, textil, popřípadě oblečení, elektroniku a popřípadě i bio odpad. Odtud proudí k dalšímu roztrídění a popřípadě je jejich materiál opětovně použit - recyklován. Tato metoda tak výrazně šetří obnovitelné i neobnovitelné zdroje a je šetrná k životnímu prostředí. V případě, že odpad nejde opětovně použit, je převážen do zařízení na energetické využití odpadů, nebo-li ZEVO, kde podstupuje termicko-oxidační zpracování a jeho energetický potenciál je dále využíván. Poměrné

zobrazení využívaných způsobů nakládání s komunálním odpadem ve vybraných zemích Evropy jsou zobrazeny v grafu níže (Graf 1) [6].



Graf 1 - Nakládání s odpady v zemích Evropy [6]

Dle evropské směrnice o odpadech (75/442/ES) má Česká republika povinnost snížit podíl skládkování a zároveň zvýšit procento komunálního odpadu, který je energeticky využit. Oproti ostatním státům Evropské unie máme těchto zařízení 31 a z toho pouze 3, kde jako palivo slouží komunální odpad. Jejich počet by měl však v nejbližší době růst a tak bychom se měli přiblížit našim sousedům. Počet zařízení ZEVO v několika vybraných státech Evropy je následující. (Tab. 1) [10].

Země	Počet spaloven	Kapacita [mil. t/rok]
Česká republika	3	0,656
Slovenská republika	2	0,02
Polská republika	1	0,04
Republika Slovinsko	1	0,02
Maďarská republika	1	0,4
SRN	70	19,1
Francie	130	13,7
Belgie	16	2,8
Švýcarsko	28	3,6
Itálie	49	4,5
Švédsko	31	4,7
Dánsko	31	3,5
Španělsko	10	2,2
Rakousko	11	2,3
Velká Británie	23	3,4
Holandsko	12	6,3
Norsko	20	1
Finsko	3	0,3

Tab. 1 – Počet spaloven komunálního odpadu v Evropě [10]

V zařízeních ZEVO lze spalovat odpad komunální, průmyslový, zdravotnický a rovněž i nebezpečné odpady jako freony, pesticidy DDT a polychlorované bifenyly. Jak je známo, spalovna energii nevytváří, ale pouze přeměňuje chemické složení, toxicitu a objem odpadu.

Je důležité si proto uvědomit, že komunální odpad je naprosto plnohodnotný zdroj energie, jehož výhřevnost 6 až 12 MJ/kg je téměř srovnatelná s výhřevností hnědého uhlí (Tab. 2) [2].

Palivo	Výhřevnost
Zemní plyn	33,48 MJ/m ³
Palivové dřevo	14,62 MJ/kg
Hnědé uhlí	13,2 MJ/kg
Černé uhlí	29,21 MJ/kg
Obilná sláma	15,50 MJ/kg

Tab. 2 – Výhřevnost různých typů paliva [2]

Oproti zařízením spalující fosilní paliva jsou nyníjší spalovny ZEVO moderní a ekologicky šetrné. Evropská unie stanovuje nejpřísnější legislativní normy EU 76/2000 o spalování odpadů, které příkazují nastavené limity dodržovat a nesmí je překročit, jinak mohou dostat velmi vysoké pokuty a jejich činnost být vyřazena z provozu.

Cílem této diplomové práce je popis činnosti spalovny SAKO Brno a analýza vlivu parametrů jeho páry na množství vyrobeného tepla a elektrické energie. Zvláštní pozornost je rovněž věnována výpočtu objemů a roční produkce emisí a skleníkových plynů a jejich následné porovnání s Tušimickou elektrárnou. Součástí práce je rovněž schéma spalovny změněné tak, aby odpovídala změněným parametrům páry.

3 SPALOVNA SAKO BRNO

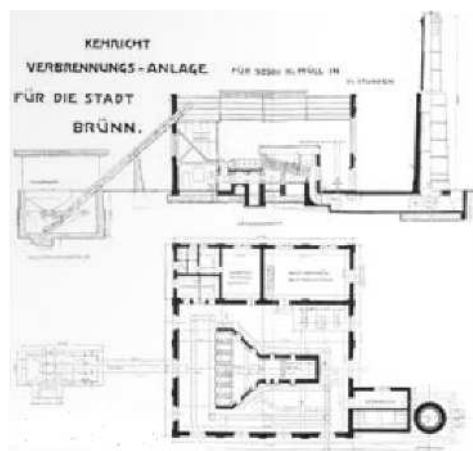
3.1 HISTORIE

Na začátku 20. století byly jedním z mnoha problémů Rakouska-Uherska nemoci jako tyfus a cholera, pocházející ze záplavy odpadků povalujících se po městě. Tuto situaci začal v městě Brně řešit městský radní, profesor Max Hömig. Po podrobném prozkoumání místního odpadu zjistil, že 30 až 40% objemu materiálu lze spálit bez přidávání dalšího paliva. Jelikož bylo toto procento daleko vyšší než v Německých městech, kde již spalovny fungovaly, dostala výstavba spalovny zelenou. Brněnští radní se tak rozhodli oslovit rakouskou firmu Alfons Custodis, a výstavba první spalovny v Rakousku-Uhersku, oficiálně nazvaná „Smetárna“, mohla začít.

Základní kámen byl položen roku 1904 a již o pouhý rok později zařízení dodávalo elektrickou energii vytvořenou z odpadu 115 000 obyvatel města Brna. Zařízení obsluhovalo 6 až 8 členný tým, kterému se při 11 hodinovém provozu průměrně dařilo spálit 27,45 tuny materiálu. Toto číslo bylo velmi uspokojivé, protože dle předchozích výpočtů měla spalovna dosahovat spotřeby až 52,5 tuny za 24 hodin. Podle svědectví pamětníků byli zástupci městského stavebního úřadu a ředitelství sousední městské elektrárny se spalovnou velmi spokojeni



Obr. 1 Spalovna 1905 [3]



Obr. 2 Schéma spalovny 1905 [3]

Celý proces přeměny energie probíhal v zařízení 20 x 20 metrů. Nacházely se zde spalovací pece se sedmi spalovacími komorami, Babcock-Wilcoxův parní kotel, Parsonova turbína, sklad a další sociální zařízení pro dělníky. Celé zařízení dodávalo do městské elektrické sítě střídavý proud o výkonu 220kW při napětí 2 200V. V roce 1909 se jednalo až o 12% její celkové produkce. V pozdějších letech toto procento dále rostlo.

Slibný začátek byl bohužel zastaven nacistickou okupací a dále spojeneckým bombardováním v dubnu roku 1944. Stavba nové spalovny začala v roce 1984 a byla

dokončena o pět let později. Později pak prodělala několik dalších rekonstrukcí, poslední z nich se uskutečnila v roce 2011, díky níž se stala nejmodernějším zařízením tohoto druhu v České republice.



Obr. 3 Budování nové spalovny [3]

3.2 SOUČASNOST

Zařízení pro energetické využití odpadu patřící akciové společnosti SAKO Brno, a.s. bylo založeno roku 1994 za účelem využití komunálního odpadu jako paliva pro získání elektrické a tepelné energie. Společnost se momentálně dělí na 3 divize.

- Správní
- Svoz odpadu
- Spalovna

Kromě spalování a svozu odpadu se rovněž zabývá i pronájmem kontejnerů, poradenskou činností a provozováním sběrných středisek odpadu, kterých je momentálně 37 po celém Brně. Odpad je však svážen i z celého Jihomoravského kraje, Olomouckého kraje a Vysočiny. O provoz společnosti se celkem stará 380 zaměstnanců.



Obr. 4 SAKO Brno [11]

Při poslední rekonstrukci v roce 2011 byly původní 3 kotle s válcovými rošty nahrazeny 2 kotly s roštovým ohništěm Martin. Rovněž byl nainstalován nový systém třídění a separace železa a hliníku.

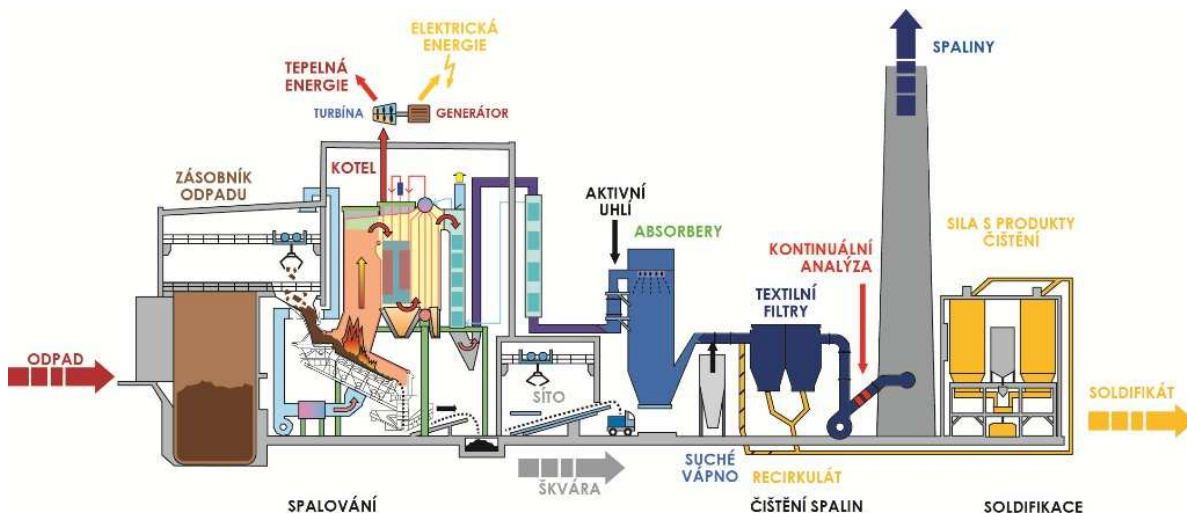
Oficiální stránka spalovny SAKO Brno uvádí následující technické parametry. [15]

Maximální spalovací výkon roštu	16 t/h
Minimální spalovací výkon	8 t/h
Maximální parní výkon	55 t/h
Jmenovitý parní výkon	45 t/h
Jmenovitý tlak přehřáté páry	4MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	400 °C
Jmenovitá teplota napájecí vody	160°C
Kapacita spalovny	24800 t/rok

Tab.3 Parametry SAKO Brno [15]

3.3 PRINCIP

Následující kapitola se zabývá principem ZEVO a popisuje jeho hlavní části, které spalují přivážený odpad a přeměňují tak jeho vnitřně uloženou energii na energii elektrickou. Zjednodušené schéma spalovny je na níže uvedeném obrázku (Obr. 5) [11].



Obr. 5 Schéma [11]

3.3.1 ZÁSOBNÍK

Veškerý odpad, který je do spalovny přivážen sběrnými popelářskými vozy, je nejprve důkladně zkontrolován speciálními radiačními senzory systému Exploranium GR123, které dokážou detekovat sebemenší stopy gama záření, jež by se mohlo v opadu ukrývat, a následně zvážen na váhovně s přesností na 20kg. Směsný komunální odpad se netřídí a putuje přes drtiče rovnou do železobetonových bunkrů s kapacitou až 5000 tun, kde je udržován nepřetržitý podtlak, kvůli zápachu a prašnosti.

Předtříděný odpad se naváží na dotřídňovací linku. Její výstavba byla součástí modernizace zařízení v roce 2011. Svážené nápojové kartony, plechovky, PET lahve a papír je dotřídňován a separován. Po odstranění nežádoucích příměsí a roztřídění lze tento odpad využít k dalším účelům a zpracování.



Obr.6 Navážení odpadu [12]



Obr.7 Drapák [12]

3.3.2 KOTEL

Před rekonstrukcí byla spalovna vybavena třemi kotli s válcovými rošty, jež spalovaly 15 tun odpadu za hodinu. Avšak kvůli časté poruchovosti pracoval pouze jeden, takže celková kapacita spalovny byla pouze třetinová. Nyní je modernizovaná spalovna SAKO Brno vyzbrojena dvěma novými kotli s vratisuvným roštem společnosti MARTIN, jež byly součástí rekonstrukce v roce 2011 společností CNIM. Třetí kotel neprošel touto renovací a slouží pouze jako studená záloha.

Odpad ze vstupní násypky kotle se vlastní hmotností posunuje na podávací stůl, který jej automaticky dávkuje na rošt kotle. Vratisuvný rošt (reverzní) je plně začleněn do parní komory a nalézá se v jeho spodní části.

Samotný tvar roštu připomíná schodiště přičemž jeho roštnice jsou skloněny pod úhlem 26°. Každý druhý schod vykonává vratisuvný pohyb proti směru sklonu roštu. Plocha jednoho roštu činí 45,5m² a odpad zde setrvá průměrně 20 minut. Tento systém usnadňuje promíchávání, které hraje důležitou roli z hlediska zápalnosti.

Nejdůležitějšími parametry, které ovlivňují spalování jsou dávkování odpadu na rošt, jeho pohyb na roštu a množství dodaného vzduchu.



Obr.8 Schéma roštu [4]

Odpad podávaný na rošt je mísen s již hořícím odpadem při teplotě mezi 1 000 až 1 100°C a dochází tak k exotermické reakci za uvolnění maximálního množství tepelné energie.

Celá plocha roštu je díky pohybu roštnic proti směru pohybu odpadu vždy pokryta dohořívajícím palivem. Díky tomu jsou roštnice chráněny vůči nadměrnému tepelnému namáhání a jejich životnost se pohybuje okolo 50 000 provozních hodin.

Při rekonstrukci byl zachován pouze jeden kotel. Prostor prvních dvou kotlů tak musel postačit pro vestavění nové technologie. Byla však zvolena klasická koncepce kde první 3 tahy jsou řešeny jako výparník z membránových stěn a v dalších 2 se nachází ekonomizér.

- První tah je složen z hladkých membránových trubek, které jsou ve spodní části pokryty šamotovými cihlami. Výstupní teplota spalin je v této části zhruba 900°C.
- Druhý tah je tvořen deskovým přehřívákem se speciálním protikorozním návarem o ploše 270m². Výstupní teplota se pohybuje okolo 620°C.
- Výparník, propojující horní a dolní kotlový buben, se nachází ve třetím tahu. Je složen z 50 trubek s plochou 1174m². Teplota na výstupu z tohoto tahu je cca 425°C.

Za tahy kotle se nachází dvoustupňový ekonomizér. První část o ploše 1452 m² je umístěna horizontálně, tedy kolmo k toku spalin, v kotelně. Teplota vycházejících spalin je 250 °C. Druhá část ekonomizéru je rovněž umístěna horizontálně, avšak je situována na střechu škvárovny. Teplota spalin, které dále jdou do dalších částí je 190 °C. Tato koncepce umožnila ideální poměr rozměrů k dostatečně vysokému výkonu kotle, který se pohybuje okolo 51t přehřáté páry za hodinu pro každý kotel.

Díky konstrukci kotle je zajištěno maximální snížení a průtočných rychlostí spalin vyhříványými plochami a zároveň maximální parní výkon. Jeho chod je řízen z velínu zařízení. Při najíždění ze studeného stavu je potřeba kotel nejprve zahřát na teplotu 850 °C za pomoci hořáků na zemní plyn. Při vložení odpadu pak palivo samo vzplane a kotel nepotřebuje již žádné přídavné palivo.

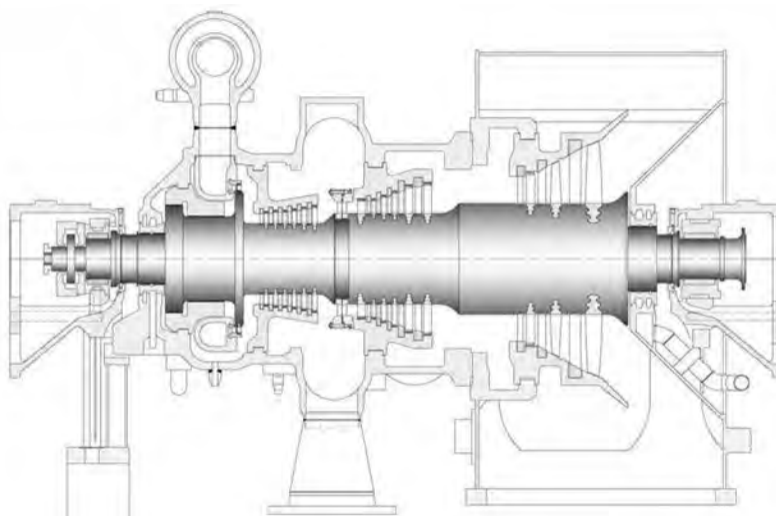
Nespálené tuhé zbytky ze spalování – škvára, je z kotle vynášena mokrým vynašečem, kde je uhašena, zchlazena a dále dopravována do betonového bunkru pomocí pásových dopravníků. Škvára je pomocí vibračního třídiče a dalších magnetických separátorů zbavena železných a neželezných kovů, které se dále dopravují k opětovnému použití.

3.3.3 TURBÍNA

Přehřátá pára o jmenovitém tlaku 4,0 MPa a teplotě 400°C se dále přivádí do parní odběrové kondenzační turbíny SST 300 od firmy Siemens. Na lopatkách rotoru dochází k expanzi a přeměně tlakové a tepelné energie na energii mechanickou, díky níž se rotor otáčí proti směru hodinových ručiček.

Přísun páry do centrálních rozvodů a výrobu elektrické energie zajišťuje regulovaný a neregulovaný odběr. Vysokotlaký regulační díl je řešen jako rovnotlaké (akční) kolo, neboli A-kolo. Na něj navazuje nízkotlaká regulační clona s 5 stupni za kterými je neregulovaný odběr. Poslední jsou 3 nízkotlaké stupně, za nimiž pára odchází do kondenzátoru. Lopatkování nízkotlakého stupně je přetlakové.

Rotor turbíny je spřažen s převodovkou a generátorem, který vyrábí elektrickou energii.



Obr.9 Turbína SST 300 [5]

3.3.4 ČIŠTĚNÍ SPALIN

Podle legislativy EU a jejich norem je důležité odstranění mnohých nebezpečných látek, které během spalování vznikají, proto je celý systém čištění spalin navrhnut tak, aby byl na výstupu obsah sledovaných zbytkových škodlivin nižší, než jsou přístupné emisní limity. Ty udává vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejich zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší č. 415/2012. Celý proces je ovládán automaticky a jeho konečný produkt je složen z vápenatých solí, popílku, aktivního uhlí a přebytku reagentů.

Systém čištění se skládá z 5 základních stupňů:

- Vstřikování močoviny přímo do procesu spalování ve spalovací komoře kotle. Močovina chemicky reaguje s oxidem dusnatým (NO) přičemž vzniká dusík, vodní pára a oxid uhličitý. Účinnost odstranění NO_x, tohoto stupně, se pohybuje okolo 50 až 60%.
- Absorpce těžkých kovů a perzistentních organických polutantů typu PCDD/F, PCB a PAU.
- Nástřik rozprášené vodní vápenné suspenze do proudu spalin.
- Dávkování suchého vápenného hydrátu do proudu spalin. Ty jsou pak vedeny z kotlů do absorberů, kde probíhá samotné čištění. Tento systém je používán automaticky při vyšší koncentraci kyselých složen spalin.
- Čištění mechanických nečistot pevných reakčních produktů ze spalin pomocí textilních filtrů. Účinnost čištění spalin stoupá až k 99%.

4 LEGISLATIVA

4.1 SMĚRNICE EVROPSKÉ UNIE

Směrnice Evropské unie jsou právním předpisem, stanovující společný cíl všech členských států, který musí být splněn, aniž by diktovaly, jakými prostředky toho dosáhnout.

4.1.1 SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2008/98/ES O ODPADECH

Tato směrnice, platící od roku 2008, upravuje problematiku odpadového hospodářství za účelem kontroly životního cyklu odpadu od jeho vzniku až po jeho konečné zpracování. Klade důraz na maximální využití recyklace, ochranu životního prostředí a zároveň na sociální únosnost a ekonomickou udržitelnost. Upraveny jsou rovněž práva a povinnosti osob a orgánů při nakládání s odpadem. [16]

Směrnice definuje následující pojmy:

- Předcházení vzniku odpadu
- Nakládání s odpadem
- Využití odpadu
- Recyklace

4.1.2 SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2000/76/ES O SPALOVÁNÍ ODPADU

Smyslem této směrnice je předcházet nežádoucím účinkům spalování odpadu, mezi které patří znečištění ovzduší, vody a půdy, nebo tyto účinky alespoň minimalizovat. Rovněž stanovuje mnoho dalších charakteristik, které tyto zařízení musejí splňovat. Mezi ně patří mezní hodnoty emisí pro některé látky vypouštěné do ovzduší a vody nebo například minimální teplota spalování 850° C po dobu 2 sekund. Výsledek spalovacího procesu by mělo být co nejlépe využita získaná tepelná energie za co nejnižšího množství tuhých zbytků. Ty musejí být zároveň v co největší míře dále recyklovány. [17]

Směrnice definuje následující pojmy:

- Spalovací zařízení – zařízení určené k tepelnému zpracování odpadu s využitím tepla vzniklého spalováním
- Spoluspalovací zařízení – zařízení určené k výrobě energie nebo hmotných produktů, které využívá odpad jako normální nebo přídatné palivo

4.2 LEGISLATIVA V ČESKÉ REPUBLICE

Jako dva hlavní dokumenty, které se snaží splnit cíl směrnic EU, slouží zákon 185/2001 Sb., o odpadech který vydalo Ministerstvo životního prostředí a SEK z Ministerstva průmyslu a obchodu. Oba dokumenty se snaží plnit zájmy svého ministerstva, proto se může zdát, že jsou tyto zákony mnohdy v rozporu.

4.2.1 SEK – STÁTNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE

Dokument přebírá odpovědnost za dlouhodobé směřování energetického sektoru České republiky na dalších 25 let a zajišťuje spolehlivou a bezpečnou dodávku energie, která bude zároveň šetrná k životnímu prostředí. Jeho cílem je zajištění dostatku energie pro obyvatele a ekonomiku a rovněž zabezpečit, že Česká republika bude mít stále dodávky energie i v krizových situacích.

SEK navrhuje větší diverzifikaci zdrojů energie. Právě proto je pro ZEVO významným dokumentem, jelikož jej bere jako jednu z náhrad získávání elektrické energie pomocí spalování uhlí. Avšak stát musí nadále respektovat hierarchii nakládání s odpady, takže se musí v první řadě recyklovat, pokud je to možné, a až poté spalovat.

Momentálně prochází SEK mnohými novelami a aktualizacemi, jelikož původní znění z roku 2004 bylo již v mnohém překonáno a neodpovídalo mnohým událostem v energetickém sektoru a evropské ekonomice.

4.2.2 ZÁKON O ODPADECH Č. 185/2001 SB.

Tento zákon není pro ZEVO nijak zvlášť významným. Jeho zaměření je spíše ekologické než energetické a pojednává o předcházení vzniku odpadů a povinnost zpětného odběru akumulátorů, pneumatik a elektrospotřebičů. Rovněž se zabývá poplatky za skládkování a pokutami při porušení zákonů. [19]

4.2.3 ZÁKON 354/2002 SB. O EMISNÍCH LIMITECH A DALŠÍCH PODMÍNKÁCH PŘI SPALOVÁNÍ ODPADU

Jedná se o nařízení, které definuje požadavky pro provoz spaloven odpadu. Stanovuje emisní limity, jejich měření, čištění a další provozní podmínky. Rovněž udává povinnosti provozovatelům zařízení prokazovat způsob využití tepla a stanovuje způsob jejich zařazení do kategorií pro zařízení zvláště velkých a velkých zdrojů znečištění. [20]

4.3 POROVNÁNÍ EMISNÍCH LIMITŮ

Jedním z cílů této diplomové práce je výpočet emisí a škodlivin, které by byly ušetřeny při zvýšení parametrů páry. K tomu je potřeba určit jaké jsou limity pro ZEVO a hnědohelnou elektrárnu.

Na oficiálních webových stránkách SAKO Brno je uvedena tabulka (tab. 4) [SAKO], která porovnává emise a naměřené hodnoty ZEVO s jinými energetickými zdroji do 50 MW. Je zřejmé, že Směrnice 2010/75/EC a vyhláška MŽP č. 415/2012 Sb., určuje emisní limity pro ZEVO mnohem přísnější než pro ostatní zařízení.

Porovnání emisních limitů pro různé energetické zdroje s jmenovitým tepelným výkonem 5 - 50 MW													
Směrnice 2010/75/EC a vyhláška MŽP č. 415/2012 Sb.					Vyhláška 415/2012 Sb. - EL platné od 1.12.2012 do 31.12.2017								
Specifické emisní limity	Směrnice o spalování odpadů	Emisní limity dle platného Integrovaného povolení pro SAKO Brno, a.s.	Průměrné hodnoty hmotnostních koncentrací SAKO Brno, a.s. za rok 2015*		Biomasa	Tuhé palivo v ostatních topeništích		Tuhé palivo ve fluidním topeništi		Kapalná paliva		Plynná paliva	
Vztaženo na	11% O ₂	11% O ₂	11% O ₂		11% O ₂	**11% O ₂	6 % O ₂	**11% O ₂	6 % O ₂	**11% O ₂	3 % O ₂	**11% O ₂	3 % O ₂
	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
			Kotel K2	Kotel K3									
Tuhé emise	10	8	0,0	0,0	250	100	150	67	100	50	100	3	5
Organický uhlík	10	8	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂ jako SO ₂	50	50	19,7	21,4	2500	1667	2500	1000	1500	944	1700	19	35
NO jako NO ₂	200	200	156,7	158,1	650	433	650	333	500	250	450	111	200
NH ₃	50	50	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO	50	50	5,4	2,7	650	267	400	200	300	97	175	56	100
HCl	10	10	3,2	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HF	1	0,8	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PCDD/PCDF (ug/m ³)	0,1	0,08	0,0186	0,0095	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	0,05	0,05	0,0077	0,0006	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd, Tl	0,05	0,04	0,0001	0,0003	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ostatní těžké kovy	0,5	0,4	0,0065	0,0125	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 4 – Porovnání emisních limitů pro různé energetické zdroje s jmenovitým tepelným výkonem 5-50 MW [11]

Pro porovnání s hnědouhelnou elektrárnou Tušimice s výkonem bloku 200 MW je ovšem potřeba další tabulky (Tab. 5) [13]. Výsledky výpočtů budou v závěru porovnány s těmito emisními limity.

Druh paliva	Emisní limity [mg/m ³]											
	50–100 MW				> 100–300 MW				> 300 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo obecně	400 ⁽¹⁾	300 ⁽³⁾⁽⁷⁾	15	250	250 ⁽¹⁾	200 ⁽³⁾⁽⁷⁾	15	250	200 ⁽¹⁾	200 ⁽³⁾⁽⁷⁾	10	250
Biomasa	100 ⁽¹⁾	300 ⁽³⁾	15	250	100 ⁽¹⁾	250 ⁽³⁾	10	250	100 ⁽¹⁾	200 ⁽³⁾	10	250
Rašelina	300 ⁽¹⁾	300 ⁽³⁾	15	250	300 ⁽¹⁾	250 ⁽³⁾	10	250	200 ⁽¹⁾	200 ⁽³⁾	10	250
Kapalná paliva obecně	350 ⁽¹⁾	450 ⁽⁷⁾	15	175	250 ⁽¹⁾	200 ⁽³⁾⁽⁷⁾	15	175	200 ⁽¹⁾	150 ⁽³⁾⁽⁷⁾	5	175
		90 ⁽⁴⁾		100 ⁽⁴⁾		90 ⁽⁴⁾		100 ⁽⁴⁾		90 ⁽⁴⁾		100 ⁽⁴⁾
Zkapalněný plyn	5	200	5	100	5	200	5	100	5	200	5	100
		90 ⁽⁴⁾		100		90 ⁽⁴⁾		100		90 ⁽⁴⁾		100
Plynná paliva obecně	30	200	5	100 ⁽⁶⁾	30	200	5	100	5	100	5	100
		120 ⁽⁴⁾		100		120 ⁽⁴⁾		100		120 ⁽⁴⁾		100
Zemní plyn	5	100	5	100	5	100	5	100	5	100	5	100
		50 ⁽²⁾		100		50 ⁽⁵⁾		100		50 ⁽⁵⁾		100
Koksárenský plyn	400	300	30	100	400	300	30	100	400	300	30	100
										200 ⁽⁸⁾		
Vysokopecní plyn	200	300	10	100	200	300	10	100	200	300	10	100
										200 ⁽⁸⁾		
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	300 ⁽¹⁾	450	5	100	30 ⁽¹⁾	450	5	100	30 ⁽¹⁾	300 ⁽²⁾	5	100

Tab. 5 – Emisní limity pro 50-300 MW [13]

5 VÝPOČTY - ZEVO

Prvním krokem ke zjištění vlivu parametrů páry na výkon zařízení ZEVO je stochiometrie. V další části výpočtů je provedena základní tepelná bilance kotle, včetně určení bilančních tepelných výkonů pro jednotlivé části.

Následující hodnoty byly zadány vedoucím diplomové práce.

Název	Parametr	Hodnota	Jednotky
Výhřevnost	Q_i^r	10952	[kJ/kg _p]
Entalpie fyzického tepla v palivu	i_{pv}	0	[kJ/kg _p]
Množství paliva	M_{pal}	100	[kT/rok]
Složení hořlaviny			
Obsah uhlíku	C	28,430	[%]
Obsah dusíku	N	0,8	[%]
Obsah kyslíku	O	16,66	[%]
Obsah síry	S	0,210	[%]
Obsah vodíku	H	3,730	[%]
Úlet popílku	$a_{\dot{u}}$	0,3	[-]
Elementární složení			
Obsah popeloviny	A^r	18,17	[%]
Obsah vody	W^r	32,000	[%]
Ostatní			
Přebytek vzduchu ve spalovací komoře	α	1,6	[-]
Teplota napájecí vody	T_{NV}	163	[°C]

Tab. 6 - Tabulka zadaných hodnot pro ZEVO

Pro tuhá paliva platí, že součet jednotlivých složek se musí rovnat 100%.

$$W^r + A^r + h = 100\% \quad [\%] \quad (1)$$

$$32 + 18,17 + 28,43 + 0,8 + 0,21 + 3,73 + 16,66 = 100\%$$

Kde :

h Obsah hořlaviny (organické látky v palivu)

5.1 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY

Ke zjištění objemů vzduchu potřebného pro spalování paliva a objemu spalin je použito stechiometrických výpočtů. Vstupem pro tyto rovnice je složení paliva, zadané vedoucím diplomové práce.

Výpočet je proveden pro normální podmínky čili o teplotě 20°C a tlaku 101,325kPa. Ve spalinách se vyskytuje pouze stopové množství chlóru, proto není v dalších výpočtech uvažován.

Objem látek ve spalinách :

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$O_{O_2min} = 22,39 * \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r_{prch}}{32,06} + \frac{O^r}{32} \right) \quad [m_N^3/kg_p] \quad (2)$$

$$O_{O_2min} = 22,39 * \left(\frac{0,2843}{12,01} + \frac{0,0373}{4,032} + \frac{0,0021}{32,06} + \frac{0,1666}{32} \right)$$

$$O_{O_2min} = 0,622 m_N^3/kg_p$$

Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (3)$$

$$O_{VSmin} = \frac{0,622}{0,21}$$

$$O_{VSmin} = 2,962 m_N^3/kg_p$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$O_{VVmin} = \chi_v * O_{VSmin} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (4)$$

$$O_{VVmin} = 1,016 * 2,962$$

$$O_{VVmin} = 3,010 m_N^3/kg_p$$

Kde :

$\chi_v = 1,016 [-]$ Podíl vodní páry na 1 m_N³ suchého vzduchu. Hodnota je volena pro běžné klimatické podmínky.

Objem vodní páry :

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (5)$$

$$O_{H_2O}^V = 3,010 - 2,962$$

$$O_{H_2O}^V = 0,047 m_N^3/kg_p$$

Pokud by spalování probíhalo za minimálního přístupu spalovacího vzduchu, vznikalo by tak velké množství nedokonale spáleného paliva. Proto musí být spalovací proces veden za přístupu většího množství vzduchu. Toto množství je vyjádřeno pomocí součinitele přebytku vzduchu α .

Tato hodnota byla po konzultaci s vedoucím diplomové práce jako $\alpha=1,6$.

Objem oxidu uhličitého při $\alpha=1,6$:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} * C + 0,0003 * O_{VSmin} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (6)$$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} * 0,2843 + 0,0003 * 2,962$$

$$O_{CO_2} = 0,528 m_N^3/kg_p$$

Objem oxidu siřičitého při $\alpha=1,6$:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} * S \quad [m_N^3/kg_p] \quad (7)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} * 0,0021$$

$$O_{SO_2} = 0,001 m_N^3/kg_p$$

Objem dusíku při $\alpha=1,6$:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} * N^r + 0,7805 * O_{VSmin} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (8)$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} * 0,008 + 0,7805 * 2,962$$

$$O_{N_2} = 2,319 m_N^3/kg_p$$

Objem argonu a dalších vzácných plynů při $\alpha=1,6$:

$$O_{Ar} = 0,0092 * O_{VSmin} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (9)$$

$$O_{Ar} = 0,0092 * 2,962$$

$$O_{Ar} = 0,027 m_N^3/kg_p$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin :

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} * H + \frac{22,4}{18,016} * W + O_{H_2O}^V \quad [m_N^3/kg_p] \quad (10)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} * 0,0373 + \frac{22,4}{18,016} * 0,32 + 0,047$$

$$O_{H_2O}^S = 0,860 m_N^3/kg_p$$

Objem suchých spalin :

$$O_{SS} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (11)$$

$$O_{SS} = 0,528 + 0,001 + 2,319 + 0,027$$

$$O_{SS} = 2,875 m_N^3/kg_p$$

Minimální objem vlhkých spalin :

$$O_{SV \min} = O_{SS} + O_{H_2O}^S \quad [m_N^3/kg_p] \quad (12)$$

$$O_{SV \min} = 2,875 + 0,860$$

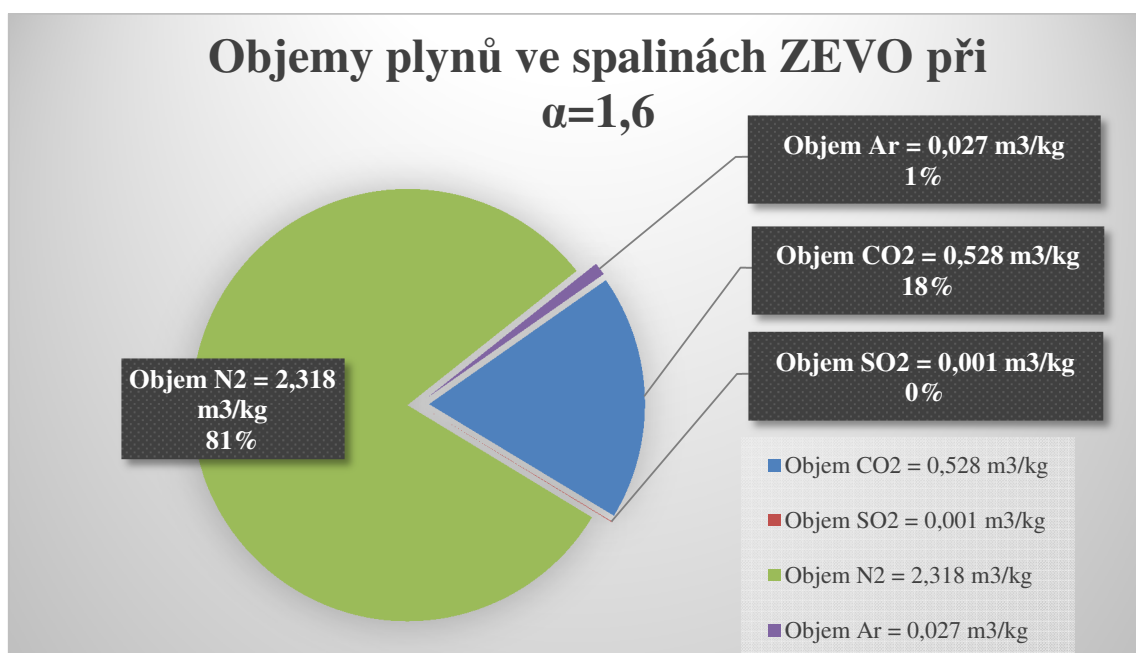
$$O_{SV \min} = 3,735 m_N^3/kg_p$$

Objem spalin z 1kg paliva při spalování (s přebytkem vzduchu $\alpha=1,6$) :

$$O_{SV} = O_{SS \min} + (\alpha - 1) * O_{VV \min} \quad [m_N^3/kg_p] \quad (13)$$

$$O_{SV} = 2,875 + (1,6 - 1) * 2,962$$

$$O_{SV} = 5,540 m_N^3/kg_p$$



Graf 2 - Objemy plynů ve spalinách ZEVO při $\alpha=1,6$

5.2 ZÁKLADNÍ TEPELNÁ BILANCE KOTLE

Cílem následujících výpočtů je stanovení tepelné účinnosti a produkovaného tepla potřebného k dosažení potřebných parametrů páry. Na kotel se pohlíží jako na energetický stroj, kde se uvolňuje chemická energie uložená v palivu do pracovního media, kterým je voda nebo pára. Tato transformace samozřejmě neprobíhá dokonale a tak se do výpočtu musí zahrnout i energetické ztráty, které si lze představit jako uvolněnou energii z paliva která není využita na ohřev páry v kotli.

Pro výpočet termické účinnosti byla zvolena metoda nepřímá, dle ČSN 070302, která spočívá v odečtu jednotlivých ztát. Obecně má tato metoda vyšší přesnost při spalování tuhých paliv, než metoda přímá.

Jelikož nebyly dostupné podklady CNIM, potřebné pro výpočet, byly použity hodnoty z garančního měření SAKO (Tab. 7), a jednotlivé druhy ztrát popsány.

Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta vzniká při neúplném vyhoření uhlíku v palivu. Celý spalovací proces by měl být takový, aby bylo palivo na roštu dostatečně dlouhou dobu a tak došlo k co nejlepšímu vyhoření.

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cp} + Z_{cú} + Z_{cr} + Z_{cb} \quad [\%] \quad (14)$$

Kde:

Z_{cs} [%]	Ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce
Z_{cp} [%]	Ztráta nedopalem v popílku
$Z_{cú}$ [%]	Ztráta nedopalem v úletu
Z_{cr} [%]	Ztráta nedopalem v roštovém propadu
Z_{cb} [%]	Ztráta uhelným práškem v brýdách

Ztráta chemickým nedopalem

Vyjadřuje teplo ztracené nezreagováním plynné hořlaviny, která odejde se spalinami z kotle. Dosahuje velmi nízkých hodnot okolo desetin procenta.

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 * mgCO * O_{SSmin}}{(21 - O_{2ref}) * Q_{ired}} \quad [\%] \quad (15)$$

Kde:

$mgCO$ [mg/m_N^3]	Ztráta nedopalem ve škváře nebo strusce
O_{2ref} [%]	Ztráta nedopalem v popílku
Q_{ired} [kJ/kg]	Ztráta nedopalem v úletu

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Jedná se o teplo, které unikne stěnami kotle do okolí. Jeho velikost tak závisí na izolaci stěn, způsobu oplechování, ploše povrchu a výkonu kotle.

$$Z_{sv} = Z_{sv}^o + Z_{sv}^{pk} + Z_{sv}^{mp} + Z_{sv}^{eko} + Z_{sv}^{OZV} \quad [\%] \quad (16)$$

Kde:

Z_{sv}^o [%]	Ztráta sdílením v ohništi
Z_{sv}^{pk} [%]	Ztráta sdílením v přehříváku
Z_{sv}^{mp} [%]	Ztráta sdílením v přihříváku
Z_{sv}^{eko} [%]	Ztráta sdílením v ekonomizéru
Z_{sv}^{OZV} [%]	Ztráta sdílením v ohříváku vzduchu

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Jedná se o teplo v tuhých zbytcích, především ve škváře a dalších tuhých odpadních produktech.

$$Z_f = \sum \frac{X_i}{1 - C_i} * \frac{A^r}{Q_{i\ red}} * c_i * t_i \quad [\%] \quad (17)$$

Kde :

c_i [$kJ * kg^{-1} * K$]	Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků [1]
t_i [-]	Teplota tuhých zbytků

Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

Výsledná termická účinnost kotle je nejvíce ovlivněna a snižována právě komínovou ztrátou, která představuje teplo, odcházející v kouřových plynech. Její velikost je dána množstvím a teplotou spalin za poslední teplosměnnou plochou kotle.

$$Z_k = (1 - Z_c) * \frac{I_s^{t_k, \alpha_k} - \alpha_k * I_{VZ}}{Q_{i\ red}} \quad [\%] \quad (18)$$

Kde:

$I_s^{t_k, \alpha_k}$ [$kJ * kg^{-1} * K$]	Entalpie spalin při teplotě t_k [1]
--	---------------------------------------

Hodnoty jednotlivých ztrát byly zadány vedoucím diplomové práce, podle ztrát kotle SAKO.

Název	Parametr	Hodnota	Jednotka
Ztráta mechanickým nedopalem	Z_c	3,380	[%]
Ztráta chemickým nedopalem	Z_{co}	0,100	[%]
Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	Z_{sv}	0,900	[%]
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	Z_f	0,660	[%]
Ztráta citelným teplem spalin	Z_k	12,545	[%]

Tab. 7 - Tabulka zadaných ztrát kotle

Termická účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k \quad [-] \quad (19)$$

$$\eta_k = 1 - 0,12545 - 0,001 - 0,0338 - 0,0066 - 0,009$$

$$\eta_k = 0,824$$

$$\eta_k = 82,4\%$$

Teplo přivedené do kotle

Pro určení tepelného výkonu kotle, je potřeba stanovit příkon kotle. Ten se určí na základě tepla přivedeného do kotle a vychází v jednotkách kJ na 1kg paliva. Fyzické teplo paliva je uvažováno v případě, že je palivo přehříváno mimo kotel.

$$Q_p^p = Q_i^r + i_{pv} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (20)$$

$$Q_p^p = 10952 + 0$$

$$Q_p^p = 10952 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný příkon kotle

$$Q_p = M_{pal} * Q_p^p \quad [\text{kW}] \quad (21)$$

$$Q_p = 3,171 * 10952$$

$$Q_p = 34728,564 \text{ kW}$$

Tepelný výkon kotle – vyrobené teplo páry

$$Q_v = Q_p * \eta_k \quad [\text{kJ/s}] \quad (22)$$

$$Q_v = 34728,564 * 0,824$$

$$Q_v = 28621,546 \text{ kW}$$

Pro zadané parametry páry v kotly byly odečteny následující hodnoty entalpií z parní tabulky [14].

400°C / 4 MPa			
Název	Parametr	Hodnota	Jednotka
Entalpie přehřáté páry	$i_{páry}^{400}$	3212,6	[kJ/kg]
Entalpie na výstupu z ohříváku	i'^{400}	1087,4	[kJ/kg]
Entalpie na výstupu z výparníku	i''^{400}	2800,3	[kJ/kg]
Entalpie napájecí vody	i_{NV}	678	[kJ/kg]
500°C / 5 Mpa			
Entalpie přehřáté páry	$i_{páry}^{500}$	3386,1	[kJ/kg]
Entalpie na výstupu z ohříváku	i'^{500}	1363,7	[kJ/kg]
Entalpie na výstupu z výparníku	i''^{500}	2744,6	[kJ/kg]

Tab. 8 - Tabulka odečtených entalpií [14]

Parní výkon kotle pro teplotu 400°C / 4 MPa

$$M_{páry}^{400} = \frac{Q_v}{(i_{páry}^{400} - i_{NV}) + 0,05 * (i'^{400} - i_{NV})} \quad [\text{kg/s}] \quad (23)$$

$$M_{páry}^{400} = \frac{28621,546}{(3212,6 - 678) + 0,05 * (1087,4 - 678)}$$

$$M_{páry}^{400} = 11,202 \text{ kg/s}$$

$$M_{páry}^{400} = 40,327 \text{ t/hod}$$

Parní výkon kotle pro teplotu 500°C / 9 MPa

$$M_{páry}^{500} = \frac{Q_v}{(i_{páry}^{500} - i_{NV}) + 0,05 * (i^{500} - i_{NV})} \quad [\text{kg/s}] \quad (24)$$

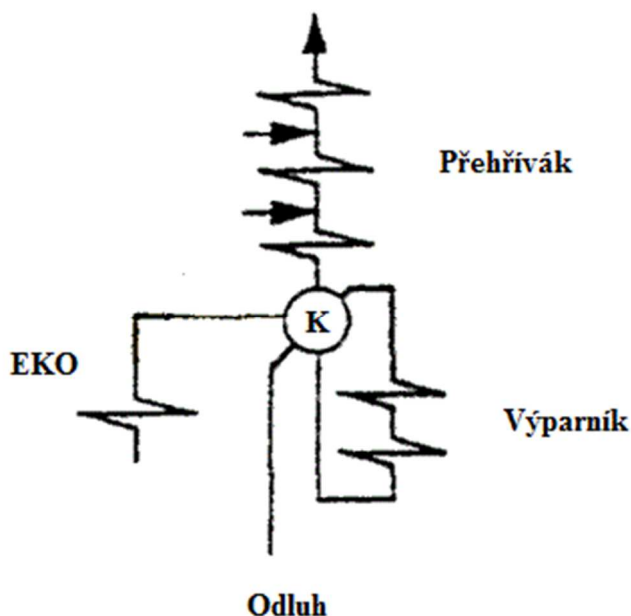
$$M_{páry}^{500} = \frac{28621,546}{(3386,1 - 678) + 0,05 * (1363,7 - 678)}$$

$$M_{páry}^{500} = 10,437 \text{ kg/s}$$

$$M_{páry}^{500} = 37,572 \text{ t/hod}$$

5.3 BILANČNÍ TEPELNÉ VÝKONY PRO JEDNOTLIVÉ ČÁSTI KOTLE

Následující výpočty dílčích bilančních ploch, rozdělují celkový tepelný výkon kotle ve styčných bodech, dle následujícího schématu (Obr. 10).



Obr. 10 - Zjednodušené schéma jednotlivých částí kotle

Vedoucím diplomové práce bylo zadáno množství odluhu na 5% z celkového množství páry. Hodnota vstříku se neuvažuje.

Pro 400°C / 4 MPa**Množství odluhu**

$$M_o^{400} = 0,05 * M_{páry}^{400} \quad [\text{kg/s}] \quad (25)$$

$$M_o^{400} = 0,05 * 11,202$$

$$M_o^{400} = 0,560 \text{ kg/s}$$

Tepelný výkon ohříváku (při ohřevu na teplotu varu)

$$Q_{EKO}^{400} = (M_{páry}^{400} + M_o^{400}) * (i'^{400} - i_{NV}) \quad [\text{kW}] \quad (26)$$

$$Q_{EKO}^{400} = (10,839 + 0,560) * (1087,4 - 678)$$

$$Q_{EKO}^{400} = 4815,345 \text{ kW}$$

Tepelný výkon výparníku

$$Q_{VÝP}^{400} = M_{páry}^{400} * (i''^{400} - i'^{400}) \quad [\text{kW}] \quad (27)$$

$$Q_{VÝP}^{400} = 11,202 * (2800,3 - 1087,4)$$

$$Q_{VÝP}^{400} = 19187,673 \text{ kW}$$

Tepelný výkon přehříváku

$$Q_{PŘ}^{400} = M_{páry}^{400} * (i_{páry}^{400} - i''^{400}) \quad [\text{kW}] \quad (28)$$

$$Q_{PŘ}^{400} = 11,202 * (3212,6 - 2800,3)$$

$$Q_{PŘ}^{400} = 4618,528 \text{ kW}$$

Součet tepelných výkonů

$$Q_B^{400} = Q_{EKO}^{400} + Q_{VÝP}^{400} + Q_{PŘ}^{400} \quad [\text{kW}] \quad (29)$$

$$Q_B^{400} = 4815,345 + 19187,672 + 4618,528$$

$$Q_B^{400} = 28621,546 \text{ kW}$$

Pro 500°C / 9 MPa**Množství odluhu**

$$M_o^{500} = 0,05 * M_{páry}^{500} \quad [\text{kg/s}] \quad (30)$$

$$M_o^{500} = 0,05 * 10,437$$

$$M_o^{500} = 0,522 \text{ kg/s}$$

Tepelný výkon ohříváku při ohřevu na teplotu varu

$$Q_{EKO}^{500} = (M_{páry}^{500} + M_o^{500}) * (i'^{500} - i_{NV}) \quad [\text{kW}] \quad (31)$$

$$Q_{EKO}^{500} = (10,437 + 0,522) * (1363,7 - 678)$$

$$Q_{EKO}^{500} = 7514,293 \text{ kW}$$

Tepelný výkon výparníku

$$Q_{VYP}^{500} = M_{páry}^{500} * (i''^{500} - i'^{500}) \quad [kW] \quad (32)$$

$$Q_{VYP}^{500} = 10,437 * (2744,6 - 1363,7)$$

$$Q_{VYP}^{500} = 14769,911 \text{ kW}$$

Tepelný výkon přehříváku

$$Q_{PŘ}^{500} = M_{páry}^{500} * (i_{páry}^{500} - i''^{500}) \quad [kW] \quad (33)$$

$$Q_{PŘ}^{500} = 10,437 * (3386,1 - 2744,6)$$

$$Q_{PŘ}^{500} = 6695,166 \text{ kW}$$

Součet tepelných výkonů

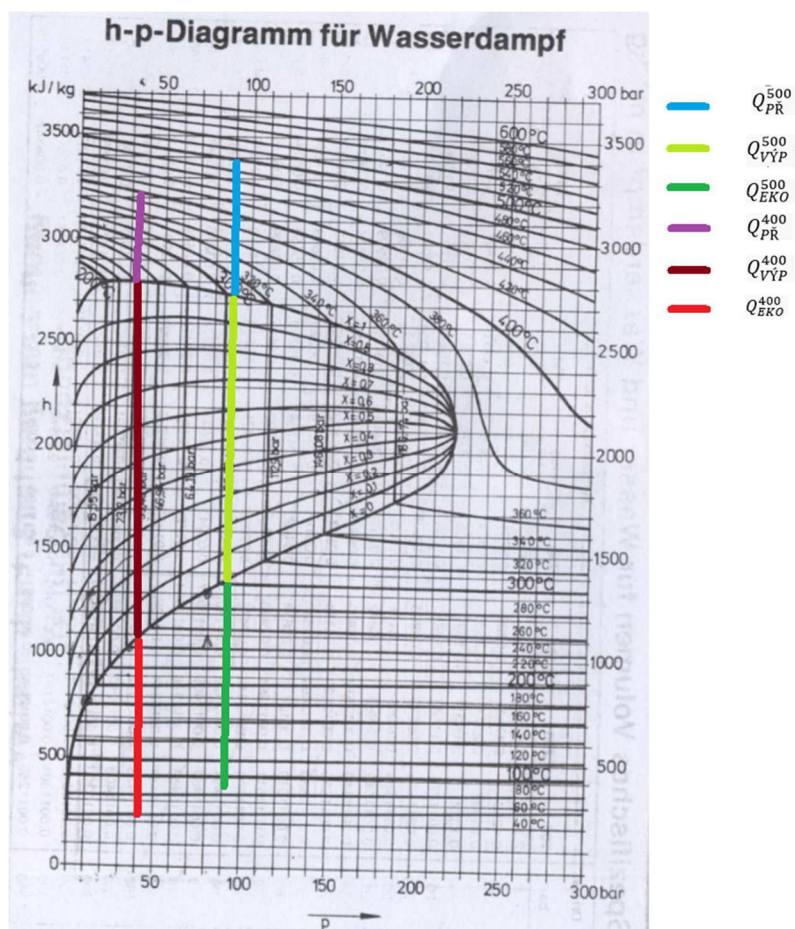
$$Q_B^{500} = Q_{EKO}^{500} + Q_{VYP}^{500} + Q_{PŘ}^{500} \quad [kW] \quad (34)$$

$$Q_B^{500} = 7515,293 + 14412,088 + 6695,166$$

$$Q_B^{500} = 28621,5 \text{ kW}$$

Ze součtů výkonů jednotlivých částí kotle pro 400°C / 4 MPa a 500°C / 9 MPa je patrné, že se hodnoty shodují s výrobním teplem páry. Tudíž lze konstatovat, že výpočty byly provedeny správně.

Závislost entalpie na tlaku a teplotě je zobrazena v následujícím grafu (Graf 3).

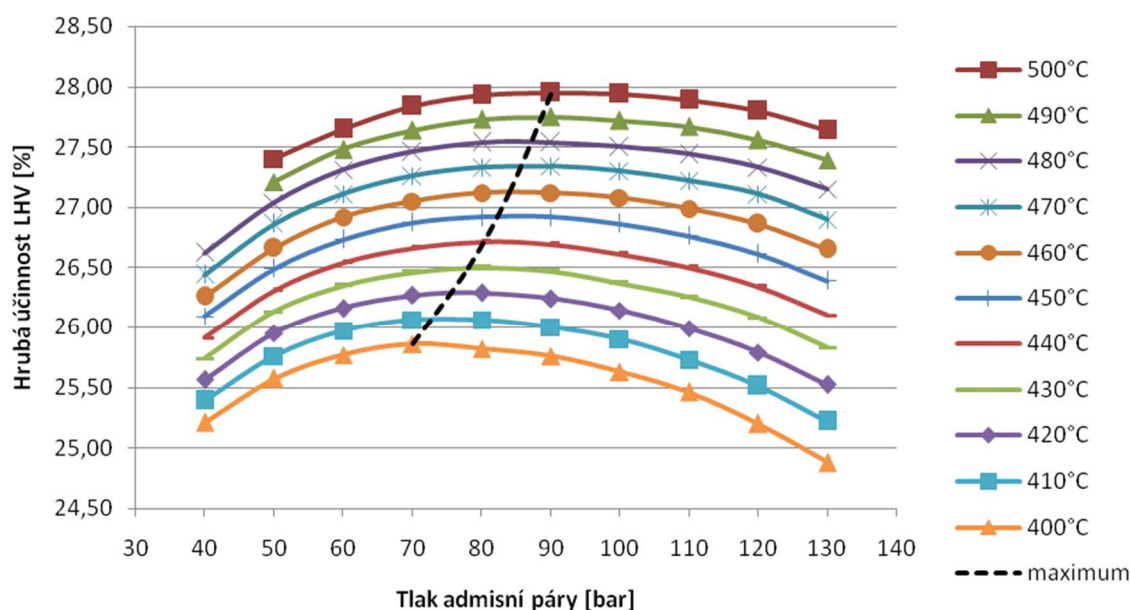


Graf 3 – I-p diagram pro vodní páru

6 VLIV PARAMETRŮ PÁRY NA VÝROBU ELEKTŘINY

Na základě měření [7] provedeného firmou VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s. byla provedena analýza parametrů páry, pomocí programu SteamPRO 20 od firmy ThermoFlow Inc., za účelem zjištění nejvhodnější kombinace teploty a tlaku admisní páry z hlediska účinnosti oběhu a výkonových parametrů. Měření bylo prováděno pro oběhy o teplotě 400 až 500°C při vzrůstajícím tlaku 40barů až 130 barů

Výsledné charakteristiky hrubé elektrické účinnosti jsou znázorněny v následujícím grafu. Čárkovaná křivka představuje spojnici maximálních účinností pomocí níž lze určit optimální tlaky pro zvolené teploty páry.



Graf 4 - Průběhy hrubé elektrické účinnosti na parametrech admisní páry při kombinované výrobě elektřiny a tepla [7]

Z naměřených charakteristik lze odečíst hrubou elektrickou účinnost pro zadané teploty a tlaky.

Název	Parametr	Hodnota	Jednotka
Elektrická účinnost pro 400°C / 4 MPa	η_e^{400}	25,3	[%]
Elektrická účinnost pro 400°C / 4 MPa	η_e^{500}	28	[%]

Tab. 9 - Tabulka odečtených entalpií

Množství vyrobené elektrické energie 400°C / 4 MPa

$$E^{400} = Q_p * \eta_e^{400} \quad [\text{kW}] \quad (35)$$

$$E^{400} = 34728,564 * 0,253$$

$$E^{400} = 8786,327 \text{ kW}$$

Za rok :

$$E^{400} = 277085,6 \text{ GWh}_e$$

Množství vyrobené elektrické energie 500°C / 9 MPa

$$E^{500} = Q_p * \eta_e^{500} \quad [\text{kW}] \quad (36)$$

$$E^{500} = 34728,564 * 0,28$$

$$E^{500} = 9723,998 \text{ kW}$$

Za rok :

$$E_{ZEVO}^{500} = 306656 \text{ GWh}_e$$

Rozdíl množství vyrobené elektrické energie:

$$E^{ZEVO} = E_{SV}^{500} - E_{SV}^{400} \quad [\text{kW}] \quad (37)$$

$$E^{ZEVO} = 9723,998 - 8786,327$$

$$E^{ZEVO} = 937,671 \text{ kW}$$

Za rok:

$$E^{ZEVO} = 29570 \text{ GWh}_e$$

7 SROVNÁNÍ S ELEKTRÁRNOU TUŠIMICE

Jako názorný příklad efektu změn parametrů páry ZEVO, byla vedoucím diplomové práce vybrána elektrárna Tušimice. Z výsledků je patrné, že při změně parametrů páry, bychom byli schopni ročně vyrobit o 29 570 GWh elektrické energie více. Cílem výpočtů je tak získání množství paliva, jehož spálením bychom získali stejné množství elektrické energie jako v případě rozdílu změn parametrů páry v ZEVO. Dalším důležitým výstupem této práce, je rovněž hmotnost škodlivin a dalších plynů, které by byly touto změnou taktéž ušetřeny.

Tepelná elektrárna na hnědé uhlí - Tušimice, vybudovaná v roce 1974 a rekonstruovaná v roce 2012, má následující parametry (Tab. 11).

Název	Parametr	Hodnota	Jednotky
Elektrický výkon	E^T	200	[MW _e]
Množství páry	$M_{páry}^{TU}$	547	[t/hod]
Tepelný výkon	Q_v^T	443,5	[MW]
Tepelný příkon	Q_p^T	490,1	[MW]
Výhřevnost	Q_i^{fT}	9,75	[MJ/kg _p]
Množství kyslíku	O ₂	6	[%]
Složení hořlaviny			
Obsah uhlíku	C ^T	64,76	[%]
Obsah vodíku	H ^T	5,71	[%]
Obsah dusíku	N ^T	1,0	[%]
Obsah kyslíku	O ^T	23,45	[%]
Obsah síry	S ^T	4,9	[%]

Tab. 10 - Tabulka zadaných hodnot pro Tušimice

K získání ušetřeného tepelného výkonu je potřeba vypočítat kolik MW tepelného výkonu Tušimic je potřeba na 1 MW elektrické energie.

$$Q_v^{T'} = \frac{Q_p^T}{E^T} \quad [\text{MW}_e] \quad (38)$$

$$Q_v^{T'} = \frac{490,1}{200}$$

$$Q_v^{T'} = 2,45 \text{ MW}_e$$

Ušetřený tepelný výkon

$$\begin{aligned}
 Q_v^{TU} &= E^{ZEVO} * Q_v^{T'} && [\text{MW}_t] \quad (39) \\
 Q_v^{TU} &= 0,938 * 2,45 \\
 Q_v^{TU} &= 2,298 \text{ MW}_t
 \end{aligned}$$

Množství ušetřeného paliva

$$\begin{aligned}
 M_{pal}^{TU} &= \frac{Q_v^{TU}}{Q_i^{rT}} && [\text{kg/s}] \quad (40) \\
 M_{pal}^{TU} &= \frac{2,298}{9,75} \\
 M_{pal}^{TU} &= 0,236 \text{ kg/s} \\
 M_{pal}^{TU} &= 7431,3 \text{ t/rok}
 \end{aligned}$$

K určení ušetřeného množství vyprodukovaných plynů, je nezbytné provedení stechiometrických výpočtů v elektrárně Tušimice.

7.1.1 OBJEM LÁTEK VE SPALINÁCH
Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$\begin{aligned}
 O_{O_2min}^T &= 22,39 * \left(\frac{C^T}{12,01} + \frac{H^T}{4,032} + \frac{S^T}{32,06} + \frac{O^T}{32} \right) && [\text{m}_N^3/\text{kg}_p] \quad (41) \\
 O_{O_2min}^T &= 22,39 * \left(\frac{0,6476}{12,01} + \frac{0,0571}{4,032} + \frac{0,049}{32,06} + \frac{0,2345}{32} \right) \\
 O_{O_2min}^T &= 1,395 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p
 \end{aligned}$$

Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$\begin{aligned}
 O_{VSmin}^T &= \frac{O_{O_2min}^T}{0,21} && [\text{m}_N^3/\text{kg}_p] \quad (42) \\
 O_{VSmin}^T &= \frac{1,395}{0,21} \\
 O_{VSmin}^T &= 6,641 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p
 \end{aligned}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1kg paliva :

$$\begin{aligned}
 O_{VVmin}^T &= \chi_v * O_{VSmin}^T && [\text{m}_N^3/\text{kg}_p] \quad (43) \\
 O_{VVmin}^T &= 1,016 * 6,641 \\
 O_{VVmin}^T &= 6,747 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p
 \end{aligned}$$

Kde :

$$\chi_v = 1,016 [-] \quad \text{Podíl vodní páry na } 1 \text{ Nm}^3 \text{ suchého vzduchu [1]}$$

Objem vodní páry :

$$\begin{aligned} O_{H_2O}^{VT} &= O_{VVmin}^T - O_{VSmin}^T && [\text{mN}^3/\text{kg}_p] \quad (44) \\ O_{H_2O}^{VT} &= 6,747 - 6,641 \\ O_{H_2O}^{VT} &= 0,106 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p \end{aligned}$$

Součinitel přebytku vzduchu :

$$\begin{aligned} \alpha^T &= \frac{21}{21 - O_2^T} && [-] \quad (45) \\ \alpha^T &= \frac{21}{21 - 6} \\ \alpha^T &= 1,4 \end{aligned}$$

Objem oxidu uhličitého při $\alpha^T=1,4$:

$$\begin{aligned} O_{CO_2}^T &= \frac{22,26}{12,01} * C^T + 0,0003 * O_{VSmin}^T && [\text{mN}^3/\text{kg}_p] \quad (46) \\ O_{CO_2}^T &= \frac{22,26}{12,01} * 0,6476 + 0,0003 * 6,641 \\ O_{CO_2}^T &= 1,202 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p \end{aligned}$$

Objem oxidu siřičitého při $\alpha^T=1,4$:

$$\begin{aligned} O_{SO_2}^T &= \frac{21,89}{32,06} * S^T && [\text{mN}^3/\text{kg}_p] \quad (47) \\ O_{SO_2}^T &= \frac{21,89}{32,06} * 0,049 \\ O_{SO_2}^T &= 0,033 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p \end{aligned}$$

Objem dusíku při $\alpha^T=1,4$:

$$\begin{aligned} O_{N_2}^T &= \frac{22,4}{28,016} * N^T + 0,7805 * O_{VSmin}^T && [\text{mN}^3/\text{kg}_p] \quad (48) \\ O_{N_2}^T &= \frac{22,4}{28,016} * 0,0118 + 0,7805 * 6,641 \\ O_{N_2}^T &= 5,192 \text{ m}_N^3/\text{kg}_p \end{aligned}$$

Objem argonu a dalších vzácných plynů při $\alpha^T=1,4$:

$$\begin{aligned} O_{Ar}^T &= 0,0092 * O_{VSmin}^T & [m_N^3/kg_p] & (49) \\ O_{Ar}^T &= 0,0092 * 6,641 \\ O_{Ar}^T &= 0,061 m_N^3/kg_p \end{aligned}$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin :

$$\begin{aligned} O_{H_2O}^{S,T} &= \frac{44,8}{4,032} * H^T + \frac{22,4}{18,016} * W^T + O_{H_2O}^{V,T} & [m_N^3/kg_p] & (50) \\ O_{H_2O}^{S,T} &= \frac{44,8}{4,032} * 0,0571 + \frac{22,4}{18,016} * 0,31 + 0,106 \\ O_{H_2O}^{S,T} &= 1,126 m_N^3/kg_p \end{aligned}$$

Minimální objem suchých spalin :

$$\begin{aligned} O_{SSmin}^T &= O_{CO_2}^T + O_{SO_2}^T + O_{N_2}^T + O_{Ar}^T & [m_N^3/kg_p] & (51) \\ O_{SSmin}^T &= 1,202 + 0,033 + 5,192 + 0,061 \\ O_{SSmin}^T &= 6,489 m_N^3/kg_p \end{aligned}$$

Minimální objem vlhkých spalin :

$$\begin{aligned} O_{SVmin}^T &= O_{SSmin}^T + O_{H_2O}^{S,T} & [m_N^3/kg_p] & (52) \\ O_{SVmin}^T &= 6,489 + 1,126 \\ O_{SVmin}^T &= 7,615 m_N^3/kg_p \end{aligned}$$

Objem spalin z 1kg paliva při spalování (s přebytkem vzduchu $\alpha=1,4$) :

$$\begin{aligned} O_{SV}^T &= O_{SSmin}^T + (\alpha - 1) * O_{VVmin}^T & [m_N^3/kg_p] & (53) \\ O_{SV}^T &= 6,489 + (1,4 - 1) * 6,749 \\ O_{SV}^T &= 10,314 m_N^3/kg_p \end{aligned}$$

7.1.2 VYPOČÍTANÉ MNOŽSTVÍ UŠETŘENÝCH SPALIN ZA ROK

Ze stechiometrických výpočtů lze dále získat množství plynů z paliva, které by bylo teoreticky ušetřeno. Tyto spaliny tudíž nevzniknou. Hodnoty jsou uváděny s indexem „U“ jako ušetřené. Pro převod objemů na jednotky hmotnosti je nutné použít tabulku hustot jednotlivých plynů. (Tab. 12) [8].

Název	Parametr	Hodnota	Jednotky
Hustota CO ₂	ρ_{CO_2}	1,9768	[kg/m ³]
Hustota SO ₂	ρ_{SO_2}	2,9262	[kg/m ³]
Hustota N ₂	ρ_{N_2}	1,25047	[kg/m ³]
Hustota Ar	ρ_{Ar}	1,78385	[kg/m ³]

Tab. 11 - Tabulka hustot plynů [8]

Ušetřená hmotnost oxidu uhličitého za 1 rok:

$$m_{CO_2}^{TU} = O_{CO_2}^T * M_{pal}^{TU} * \rho_{CO_2} \quad [t/rok] \quad (54)$$

$$m_{CO_2}^{TU} = 1,202 * 6124500 * 1,9768$$

$$m_{CO_2}^{TU} = 14556127 \text{ kg/rok}$$

$$m_{CO_2}^{TU} = 14556,1 \text{ t/rok}$$

Ušetřená hmotnost oxidu siřičitého za 1 rok:

$$m_{SO_2}^{TU} = O_{SO_2}^T * M_{pal}^{TU} * \rho_{SO_2} \quad [t/rok] \quad (55)$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 0,033 * 6124500 * 2,9262$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 599592 \text{ kg/rok}$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 599,6 \text{ t/rok}$$

Ušetřená hmotnost dusíku za 1 rok:

$$m_{N_2}^{TU} = O_{N_2}^T * M_{pal}^{TU} * \rho_{N_2} \quad [t/rok] \quad (56)$$

$$m_{N_2}^{TU} = 5,192 * 6124500 * 1,25047$$

$$m_{N_2}^{TU} = 39766657,74 \text{ kg/rok}$$

$$m_{N_2}^{TU} = 39766657,74 \text{ t/rok}$$

Ušetřená hmotnost argonu a dalších vzácných plynů za 1 rok:

$$m_{Ar}^{TU} = O_{Ar}^T * M_{pal}^{TU} * \rho_{Ar} \quad [t/rok] \quad (57)$$

$$m_{Ar}^{TU} = 0,061 * 6124500 * 1,78385$$

$$m_{Ar}^{TU} = 667466,144 \text{ kg/rok}$$

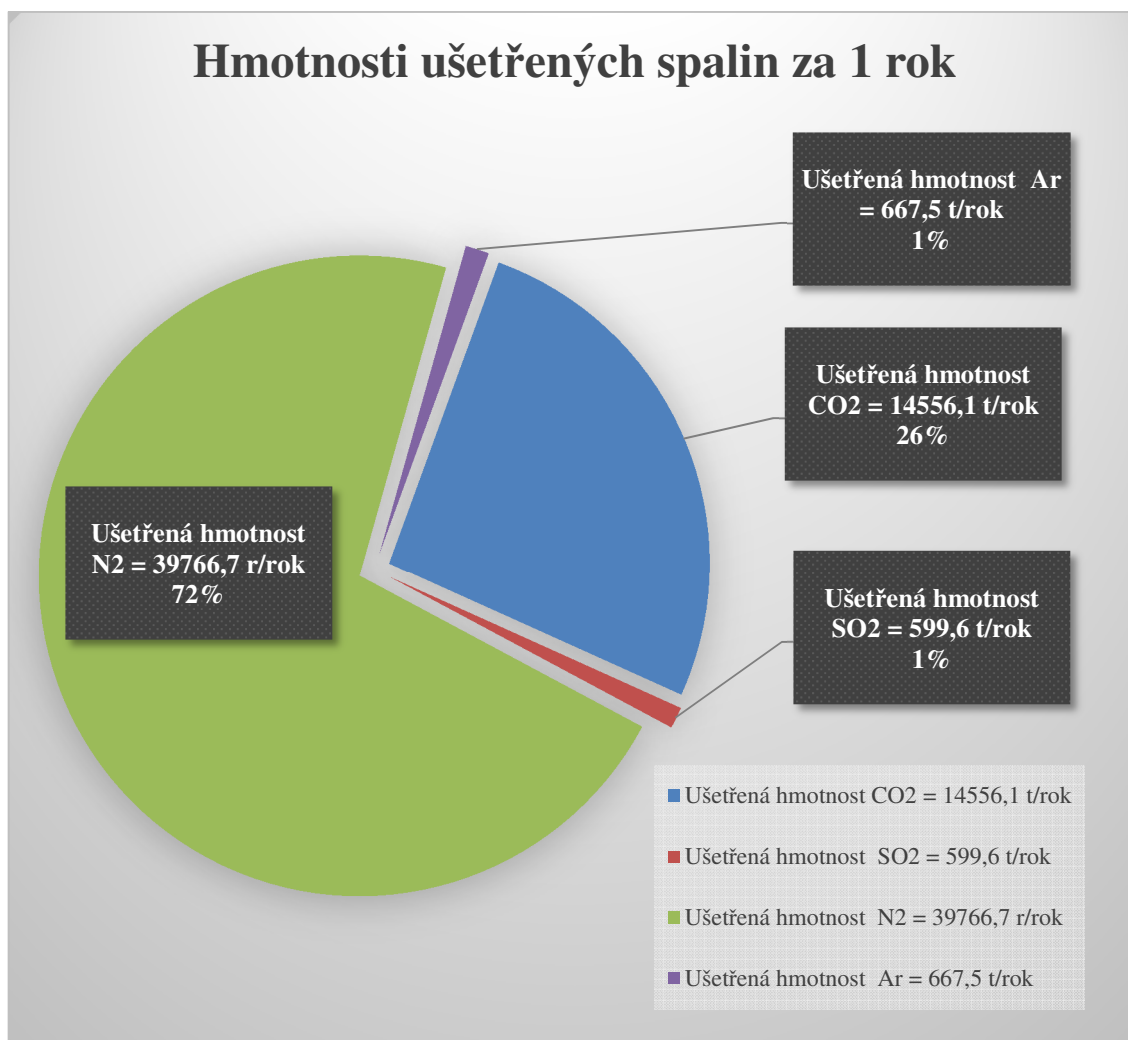
$$m_{Ar}^{TU} = 667,5 \text{ t/rok}$$

Celková ušetřená hmotnost suchých spalin za 1 rok :

$$m_{SS}^{TU} = O_{CO_2}^{TU} + O_{SO_2}^{TU} + O_{N_2}^{TU} + O_{Ar}^{TU} \quad [t/rok] \quad (58)$$

$$m_{SS}^{TU} = 14556,1 + 599,6 + 39766,7 + 667,5$$

$$m_{SS}^{TU} = 55589,844 \text{ t/rok}$$



Graf 5 - Hmotnosti ušetřených spalin za 1 rok

7.1.3 HMOTNOST VYPRODUKOVANÝCH LÁTEK NA 1 KG (Z GARANČNÍHO MĚŘENÍ)

Výpočet ušetřených hmotností škodlivých plynů SO₂, SO₃, NO_x, CO a tuhých znečišťujících látek TZL vychází z naměřených hodnot společnosti VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s. ze dne 25.10.2011.

Nejprve je nutné určit hmotnost vyprodukované látky na 1 kg paliva a tu následně převést na hmotnost plynu za 1 rok.

Název	Parametr	Hodnota	Jednotky
Obsah TZL	O_{TZL}^T	3,9	[mg/mN ³]
Obsah SO ₂	$O_{SO_2}^T$	9211	[mg/mN ³]
Obsah SO ₃	$O_{SO_3}^T$	79	[mg/mN ³]
Obsah NO _x	$O_{NO_x}^T$	194	[mg/mN ³]
Obsah CO	O_{CO}^T	48	[mg/mN ³]

Tab. č.12 - Tabulka měření Tušimice

Hmotnost vyprodukovaného TZL z 1 kg paliva :

$$m_{TZL}^T = O_{SSmin}^T * O_{TZL}^T \quad [mg/kg_p] \quad (59)$$

$$m_{TZL}^T = 6,489 * 3,9$$

$$m_{TZL}^T = 25,307 \text{ mg/kg}_p$$

Hmotnost vyprodukovaného SO₂ z 1 kg paliva:

$$m_{SO_2}^T = O_{SSmin}^T * O_{SO_2}^T \quad [mg/kg_p] \quad (60)$$

$$m_{SO_2}^T = 6,489 * 9211$$

$$m_{SO_2}^T = 59772,806 \text{ mg/kg}_p$$

Hmotnost vyprodukovaného SO₃ z 1 kg paliva:

$$m_{SO_3}^T = O_{SSmin}^T * O_{SO_3}^T \quad [mg/kg_p] \quad (61)$$

$$m_{SO_3}^T = 6,489 * 79$$

$$m_{SO_3}^T = 512,653 \text{ mg/kg}_p$$

Hmotnost vyprodukovaného NO_x z 1 kg paliva:

$$m_{NO_x}^T = O_{SSmin}^T * O_{NO_x}^T \quad [mg/kg_p] \quad (62)$$

$$m_{NO_x}^T = 6,489 * 194$$

$$m_{NO_x}^T = 1258,921 \text{ mg/kg}_p$$

Hmotnost vyprodukovaného CO z 1 kg paliva:

$$m_{CO}^T = O_{SS_{min}}^T * O_{CO}^T \quad [\text{mg/kg}] \quad (63)$$

$$m_{CO}^T = 6,489 * 48$$

$$m_{CO}^T = 311,486 \text{ mg/kg}_p$$

7.1.4 MNOŽSTVÍ UŠETŘENÝCH LÁTEK ZA 1 ROK (Z GARANČNÍHO MĚŘENÍ)**Hmotnost ušetřeného TZL za 1 rok :**

$$m_{TZL}^{TU} = m_{TZL}^T * M_{pal}^{TU} \quad [\text{t/rok}] \quad (64)$$

$$m_{TZL}^{TU} = 0,000025307 * 7431348,576$$

$$m_{TZL}^{TU} = 188,1 \text{ kg/rok}$$

$$m_{TZL}^{TU} = 0,188 \text{ t/rok}$$

Hmotnost ušetřeného SO₂ za 1 rok:

$$m_{SO_2}^{TU} = m_{SO_2}^T * M_{pal}^{TU} \quad [\text{t/rok}] \quad (65)$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 0,059772 * 7431348,576$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 444192,6 \text{ kg/rok}$$

$$m_{SO_2}^{TU} = 444,2 \text{ t/rok}_p$$

Hmotnost ušetřeného SO₃ za 1 rok:

$$m_{SO_3}^{TU} = m_{SO_3}^T * M_{pal}^{TU} \quad [\text{t/rok}] \quad (66)$$

$$m_{SO_3}^{TU} = 0,000512 * 7431348,576$$

$$m_{SO_3}^{TU} = 3809,7 \text{ kg/rok}$$

$$m_{SO_3}^{TU} = 3,810 \text{ t/rok}$$

Ušetřené množství NO_x :

$$m_{NO_x}^{TU} = m_{NO_x}^T * M_{pal}^{TU} \quad [\text{t/rok}] \quad (67)$$

$$m_{NO_x}^{TU} = 0,001259 * 7431348,576$$

$$m_{NO_x}^{TU} = 9355,5 \text{ kg/rok}$$

$$m_{NO_x}^{TU} = 9,356 \text{ t/rok}$$

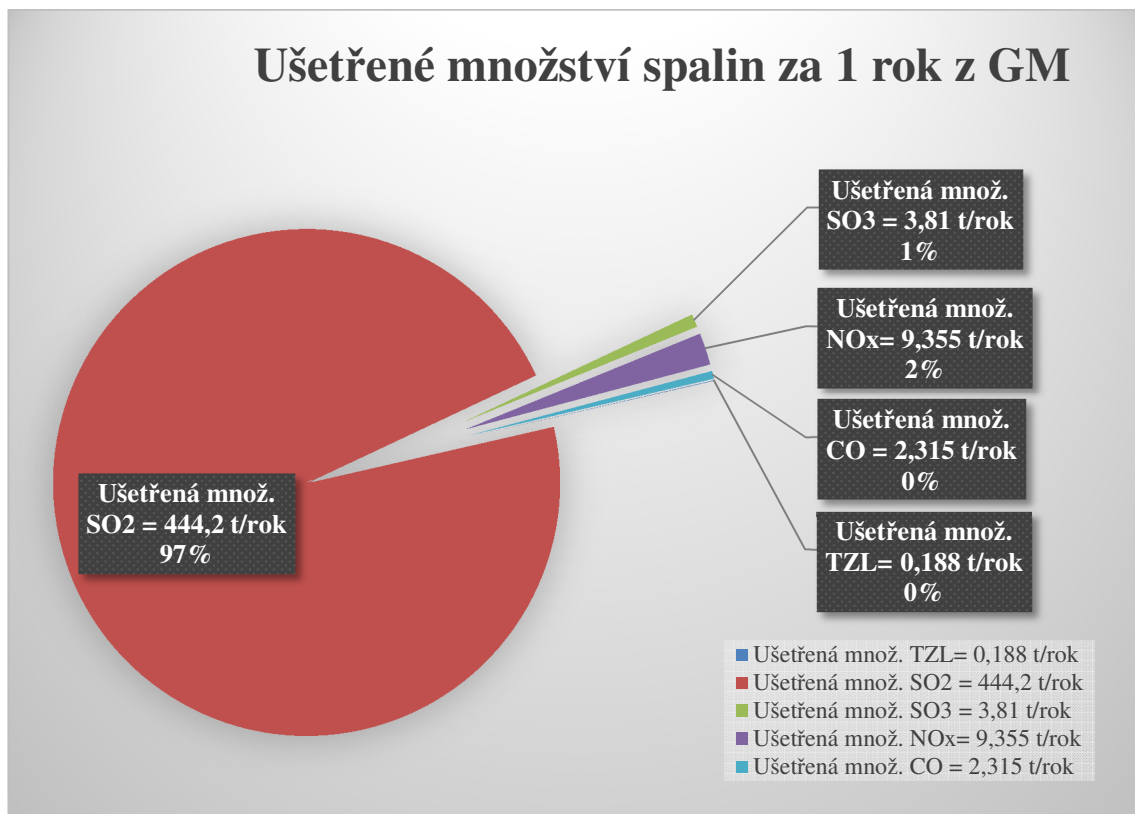
Ušetřené množství CO :

$$m_{CO}^{TU} = m_{CO}^T * M_{pal}^{TU} \quad [\text{t/rok}] \quad (68)$$

$$m_{CO}^{TU} = 0,000311 * 7431348,576$$

$$m_{CO}^{TU} = 2314,8 \text{ kg/rok}$$

$$m_{CO}^{TU} = 2,3148 \text{ t/rok}$$

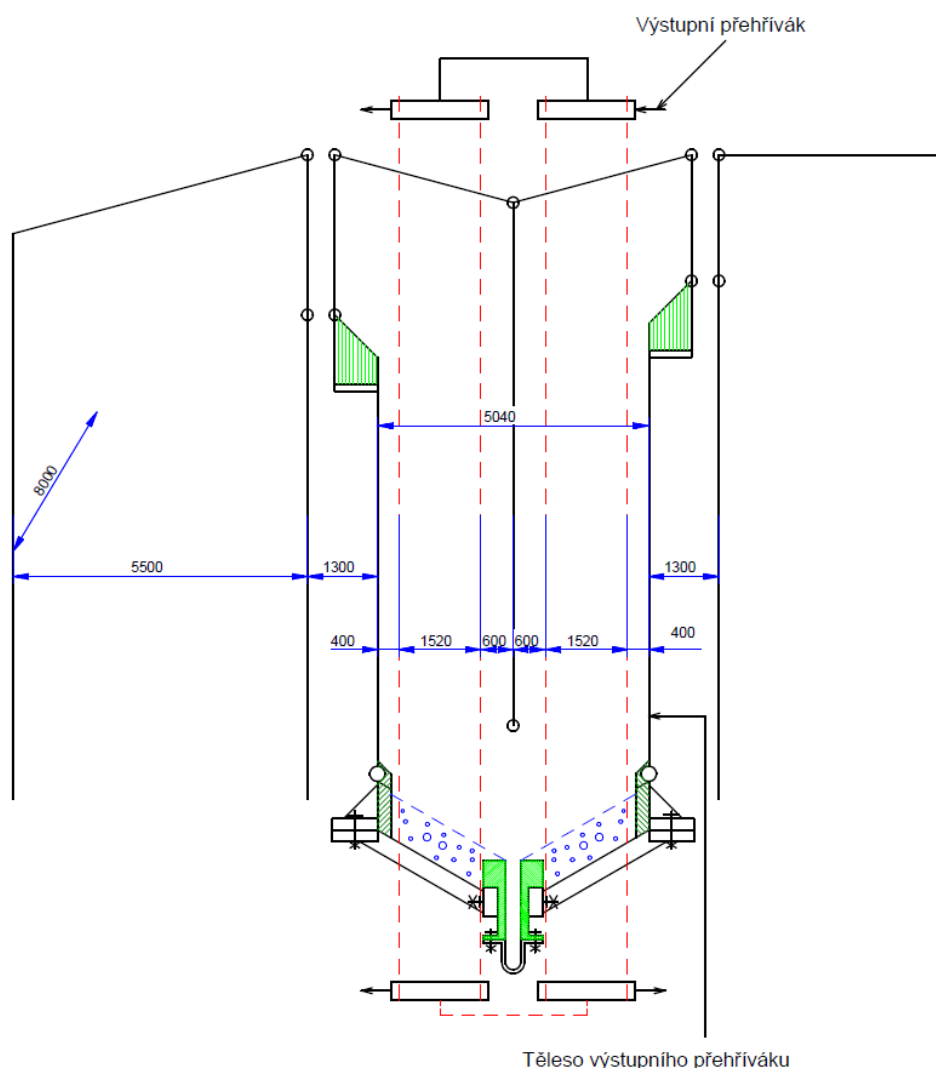


Graf 6 – Hmotnosti ušetřených látek za 1 rok z GM

8 SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO ZVÝŠENÉ PARAMETRY PÁRY

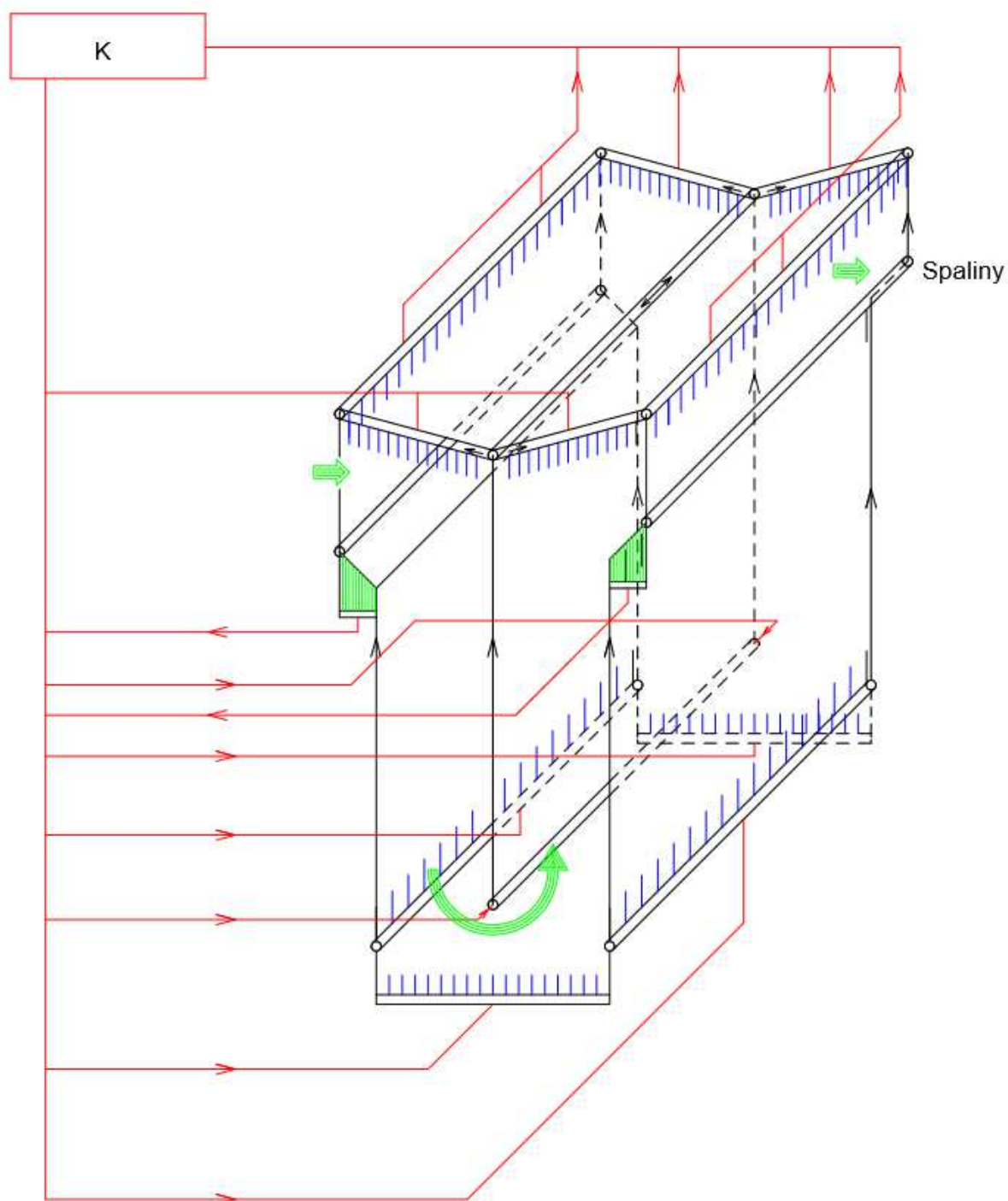
Součástí práce jsou rovněž schémata uspořádání teplosměnných ploch kotle s vyššími parametry páry. Výkresy byly zhotoveny v programu HiCad od společnosti ISD Group.

První výkres je zaměřen na mezičást tělesa výstupního přehříváku pro parametry 500°C a 90 MPa vloženou mezi spalovací komoru a druhý tah, od kterých je zároveň oddílována. Tato koncepce umožňuje, aby jednotlivé části kotle mohly být dodány různými dodavateli. Konstrukce zároveň umožňuje, aby byl systém zavšen popřípadě může být samonosný.



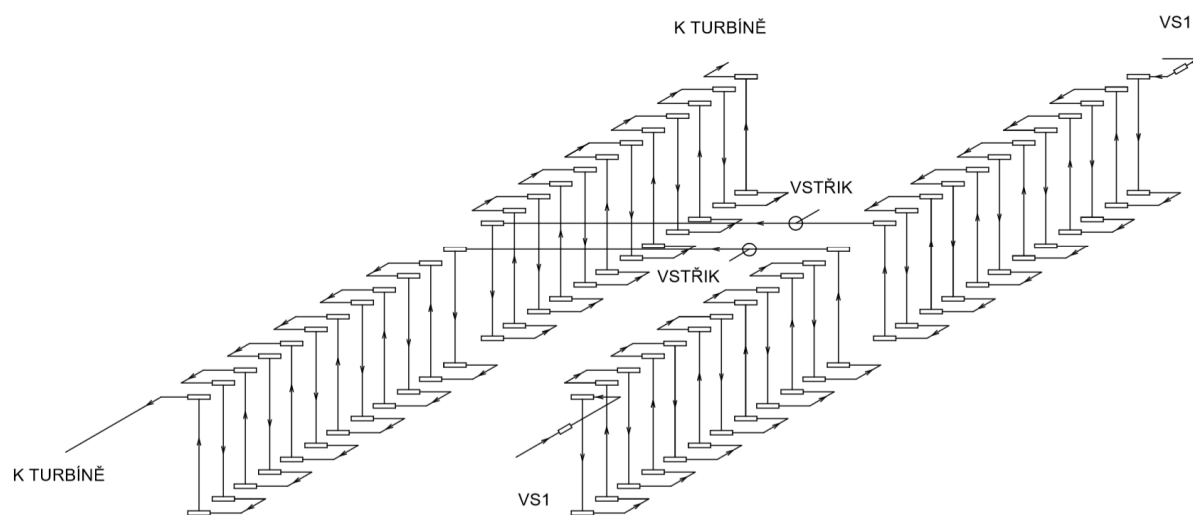
Obr. 11 – SAKO 500/90

Na detailnějším schématu je zobrazeno těleso výstupního přehříváku zapojené jako výparník.



Obr. 12 – Těleso výstupního přehříváku

Poslední schéma zobrazuje výstupní přehřívák. Přívod páry je zde ve dvou větvích a postupuje od středu na kraj. Nerovnoměrnost teploty spalin je tak eliminována střídáním desek .



Obr. 13 – výstupní přehřívák

Výkresy jsou rovněž k diplomové práci přiloženy jako příloha.

9 ZÁVĚR

Hlavním úkolem této diplomové práce byl popis činnosti ZEVO a následná analýza vlivu parametrů páry na množství vyrobeného tepla a elektrické energie. Po provedení nezbytných výpočtů je zřejmé, že zvýšení teploty a tlaku páry z 400 °C a 40 MPa na 500 °C a 90 MPa vede k nárůstu elektrické účinnosti o 3,3%. Díky tomu bychom byli schopni dodávat do sítě o 29 570 GWhe více energie, která by se za předpokladu, že požadavky na výrobu elektřiny jsou neměnné, nemusela získávat jiným způsobem. Pro názornost efektivity a významu tohoto řešení, byla vybrána hnědouhelná elektrárna Tušimice.

Snížení požadovaného výkonu Tušimic, by mělo za následek pokles spotřeby paliva o 7431,3 tun uhlí ročně, což je z ekonomického hlediska jistě nezanedbatelná úspora. Kromě šetření neobnovitelných zdrojů energie je zjevný i fakt, že snížení spotřeby paliva by vedlo i k úbytku škodlivin a skleníkových plynů.

Dle směrnic Evropské unie je ekonomická udržitelnost a snižování zátěže životního prostředí při výrobě energie velice důležité a právě zde má ZEVO velký skrytý potenciál. Oprávněně je mu tak, jako obnovitelnému zdroji energie, věnována stále větší pozornost jak ze strany medií, odborných kruhů, ale i vrcholových činitelů ve Štrasburku a Bruselu. Z výsledků této diplomové práce lze usuzovat, že vývoj a konstrukce ZEVO bude v budoucnu skutečně směřovat ke zvyšování parametrů páry.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Konvičkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady, připomínky, studijní materiály a čas, který mi ochotně věnoval při tvorbě této práce. Můj dík rovněž patří doc. Ing. Ladislavu Vilimci, za pomoc, trpělivost a potřebné podklady. Dále bych poděkoval své manželce a rodičům za to, že mě ve studiu vysoké školy podporovali z plných sil.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] DLOUHÝ T., *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*, ČVUT, 2011
- [2] KADRNOŽKA J., OCHRANA L., *Teplárenství*, nakl. CERM, s.r.o. Brno, 1983
- [3] ČIŽMÁŘ Z., *Brněnské odpadky v čase aneb Kronika společnosti SAKO Brno, a.s., SAKO Brno, a.s., 2014*
- [4] HOLÍNEK T., *Porovnání regulatorního prostředí energetického využití odpadu v ČR*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Oldřich Starý, CSc.
- [5] MAZÁK T., *SAKO Brno – vyvedení tepelného výkonu do CZT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 148 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [6] KADLEČEK V., *Spalovny komunálního odpadu ve státech sousedících s ČR a možnosti mezinárodního obchodu s odpadem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Feradan
- [7] ŠEVELOVÁ K., STÁREK K., *Spalovna komunálního odpadu, modelové simulace vlivu parametrů páry na oběh, materiálový výzkum*, VÍTKOVICE POWER ENGINEERING a.s., 2010
- [8] MIKULČÁK J., KLIMEŠ B., ŠIROKÝ J., ŠŮLA V., ZEMÁNEK F., *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*, Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1989
- [9] KLUČKA, I. *Energetické využití odpadu v Evropské unii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2012. 44 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Ferdan.
- [10] CEWEP : Confederation of European Waste-to-Energy Plants [online]. URL:< http://www.cewep.eu/information/data/studies/m_1459 > [cit. 2016-04-08]
- [11] SAKO Brno [online]. URL:< <http://www.sako.cz/>> [cit. 2016-05-08]
- [12] Video fy Arkadi, s.r.o. – SAKO vzdělávací video pro veřejnost URL:< <https://www.youtube.com/watch?v=kN7qPzcWIE0>> [cit. 2016-04-04]
- [13] TZB info – zpřísněné emisní limity a jejich řešení URL:< <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapani-prumyslovych-a-velkoprostorovych-objektu/12800-zprisenene-emisni-limity-a-jejich-reseni>> [cit. 2016-04-05]
- [14] TVL International, inc., - Calculator: Superheated Steam table URL:<<http://www.tlv.com/global/TI/calculator/superheated-steam-table.html>> [cit. 2016-05-04]

- [15] Brožura fy SAKO Brno
URL:<<http://www.sako.cz/upload/1444914938.pdf>> [cit. 2016-04-04]
- [16] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic, Štrasburk 2008
- [17] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 2000/76/ES ze dne 4. prosince 2000 o odpadu, Štrasburk 2000
- [18] Zákon – č. 185/2001 Sb. ze dne 15. května 2001 o odpadech, Praha 2001
- [19] Zákon – č. 354/2002 Sb. ze dne 3. července 2002o Emisních limitech a dalších podmínkách při spalování odpadu, Praha 2002

SEZNAM PŘÍLOH

- Výkresy - 001-05-05-2016-3
- 002-05-05-2016-2
- 003-05-05-2016-2

Další přílohy:

- CD - Zpráva – formát PDF
- Výkresy – formát PDF