

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh vlastní spotřeby páry pro zařízení DENOx
v lokalitě TETR**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Antonín LÁVIČKA**
Osobní číslo: **E18N0053P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Návrh vlastní spotřeby páry pro zařízení DENOX v lokalitě TETR**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

Popište teplárnu Trmice, uveďte kritéria, které teplárna musí splňovat pro plnění limitů BREF

1. Proveďte výpočet množství spalin při výkonu kotlů K5, K6.
2. Navrhněte varianty technického řešení pro ohřev spalin v zařízení Tail-end.
3. Spočítejte množství páry potřebné k přehřevu spalin v zařízení Tail-end.
4. Proveďte analýzu energetické náročnosti nové technologie v účinnosti výroby TETR.



[Handwritten signature]

Doc. Ing. Karol Noháč, Ph.D.

[Handwritten signature]

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce
2. ČSN IEC, CZT-obchodní podmínky, Energetický zákon. Prodej komodit na burze, www. stránky, katalogové listy.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Zbyněk Martínek, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na řešení odstranění oxidů dusíku ze spalin teplárny Trmice. Řešení je zaměřeno zvláště na technologii selektivní katalytické redukce ve verzi tail-end a návrhu přehřívání spalin pro tuto technologii. Součástí řešení je i výpočet účinnosti teplotního cyklu s novou technologií denitrifikace spalin.

Klíčová slova

Oxidy dusíku, odstraňování oxidů dusíků, DeNOx, denitrifikace, stechiometrické rovnice spalin, teplárna Trmice, tail-end, primární opatření, sekundární opatření, limity BREF, účinnost teplotního cyklu

Abstract

This diploma thesis is focused on the solution of removal of nitrogen oxides from flue gases of the heating plant Trmice. The solution is mainly focused on selective catalytic reduction in the tail-end version and the design of reheating of flue gas for this technology. Part of the solution is also the calculation of the efficiency of the heating cycle with a new technology of flue gas denitrification.

Key words

Nitrogen oxides, nitrogen oxides removal, DeNOx, denitrification, Trmice heating plant, stoichiometric equations of flue gases, tail-end, primary measures, secondary measures, BREF limits, efficiency of the heating cycle

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 10.6.2020

Antonín Lávička

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zbyňku Martínkovi, CSc. za odborné vedení práce. Dále bych tímto rád poděkoval Ing. Jiřímu Benešovi, Ph.D. za poskytnuté podklady. Poděkování patří v neposlední řadě mé rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 POPIS TEPLÁRNY TRMICE	13
1.1 HISTORIE TEPLÁRNY TRMICE	13
1.2 TECHNOLOGIE TEPLÁRNY.....	15
1.2.1 <i>Kotelna</i>	15
1.2.2 <i>Elektrická část provozu</i>	19
1.2.3 <i>Teplárenská část provozu</i>	20
1.2.4 <i>Uhelné hospodářství</i>	20
1.2.5 <i>Vodní hospodářství teplárny</i>	22
2 KRITÉRIA PRO TETR KE SPLNĚNÍ LIMITŮ UVEDENÉ V DOKUMENTU BREF	23
3 OXIDY DUSÍKU	30
3.1 MECHANIZMY VZNIKU NO _x	30
4 OMEZOVÁNÍ OXIDŮ DUSÍKU	33
4.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ	33
4.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ	35
5 POROVNÁNÍ VHODNÝCH TECHNOLOGIÍ DENITRIFIKACE PRO TETR	37
5.1 TECHNOLOGIE SCR.....	37
5.1.1 <i>Reagenty</i>	38
5.1.2 <i>Katalyzátory</i>	38
5.2 PROVEDENÍ HIGH DUST	41
5.3 PROVEDENÍ LOW DUST	42
5.4 PROVEDENÍ TAIL-END	43
5.5 ODŮVODNĚNÍ POUŽITÍ SCR TAIL-END V TEPLÁRNĚ TRMICE.....	44
6 VÝPOČET SPALIN	45
6.1 STECHIOMETRICKÝ VÝPOČET SPALIN	45
6.2 VÝPOČET SPALIN KOTLŮ K5 A K6.....	49
7 VÝPOČET MNOŽSTVÍ TEPELNÉ ENERGIE POTŘEBNÉ PRO OHŘÁTÍ SPALIN A REAGENTU	55
7.1 VÝPOČET TEPELNÉ ENERGIE NUTNÉ K OHŘÁTÍ SPALIN	55
7.2 VÝPOČET TEPELNÉ ENERGIE NUTNÉ K OHŘÁTÍ REAGENTU	57
8 NÁVRH OHŘEVU	59
8.1 OHŘEV POMOCÍ ZEMNÍHO PLYNU	60
8.2 OHŘEV POMOCÍ STŘEDOTLAKÉ PÁRY	61
8.3 OHŘEV POMOCÍ REDUKOVANÉ VYSOKOTLAKÉ PÁRY	61
8.4 VÝBĚR VÝSLEDNÉ TECHNOLOGIE OHŘEVU.....	63
9 ANALÝZA ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI NOVÉ TECHNOLOGIE NA ÚČINNOST TEPLÁRNY TRMICE	64
ZÁVĚR	69

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....70

Úvod

V dnešní době jsme my i naše planeta vystaveni škodlivým emisím, které jsou vypouštěny do ovzduší. Tato skutečnost má dopad na naši planetu v podobě klimatických změn. Ovšem v případě lidí je ohroženo nejen naše samotné zdraví, ale zároveň i náš způsob života na této planetě tak, jak jej doposud známe. Z těchto důvodů je problematika ochrany ovzduší aktuální téma nejenom v politice, ale i v běžném životě. Globálním lídrem ochrany ovzduší se staly země Evropské unie - ta se snaží omezit produkci škodlivých emisí na nezbytné minimum. Do této skupiny škodlivých emisí patří i oxidy dusíku. Oxidy dusíku jsou totiž nejenom významným skleníkovým plynem, ale mají i negativní dopad na lidské zdraví. Z těchto důvodů se problematika denitrifikace spalin velkých energetických provozů začala intenzivně řešit. V současnosti se v energetice k denitrifikaci spalin začala častěji používat metoda selektivní katalytické redukce. K této metodě denitrifikace bude zřejmě muset přistoupit většina energetických provozů spalující fosilní paliva. Ovšem, aby vůbec došlo ke katalytické reakci, musí mít spaliny dostatečnou teplotu. Pokud podmínky v provozu neumožňují přívod spalin s dostatečnou teplotou, musí se přehřívat. Právě problém přehřívání spalin pro denitrifikaci je ústředním tématem této diplomové práce.

Cílem této práce je navrhnout technologii přehřívání spalin pro provoz teplárny Trmice tak, aby bylo možné provést denitrifikaci spalin pomocí technologie SCR Tail-end. V této práci jsou nejprve popsány jednotlivé části provozu teplárny Trmice. V další kapitole práce jsou uvedeny jednotlivé nejlepší dostupné technologie pro teplárnu z dokumentů BREF. Taktéž jsou popsány principy vzniku a omezování oxidů dusíků při spalování fosilních paliv. V závěru teoretické části jsou porovnány jednotlivé varianty technologie SCR. V praktické části je proveden výpočet spalin pomocí stechiometrického výpočtu pro kotle K5 a K6. Další část je tvořena návrhem technologie přehřevu spalin. Nakonec je provedena energetická analýza nové technologie v účinnosti provozu teplárny Trmice

Seznam symbolů a zkratk

BAT	nejlepší dostupné technika (Best Available Techniques)
BREF	referenční dokument o nejlepších dostupných technikách
CO.....	oxid uhelnatý
C_{SO_2}	koncentrace SO ₂ ve spalinách (mg/m _n ³)
DeNOx.....	systém se selektivní redukcí oxidů dusíku
EN.....	evropská norma
FGD	systém, jehož účelem je snížení úrovně SOx
HCl	kyselina chlorovodíková
HF.....	označení pro veškeré anorganické sloučeniny fluoru
i	entalpie
ISO.....	norma mezinárodní organizace pro normalizaci
TETR	teplárna Trmice
TG.....	turbo generátor
M_U	množství uhlí (t/h)
M_T	množství páry vstupující do turbíny (kg/h)
NH ₃	amoniak
NOx	souhrnné označení všech oxidů dusíku, které vznikají během spalování
N ₂ O.....	oxid dusný
NO	oxid dusnatý
NO ₂	oxid dusičitý
η^{el}_t	účinnost teplotního cyklu (%)
η_g	účinnost generátoru (-)
η_k	účinnost kotle (-)
η_m	účinnost mechanická (-)
SO ₂	oxid siřičitý
SO ₃	oxid sírový
SOx.....	souhrnné označení všech oxidů síry
P_g	elektrický výkon generátoru (W)
Q_K	množství tepla dodaného do teplotního cyklu kotlem (GJ/h)
Q_O	množ. tepla odebíraného teplotním odběrem (GJ/h)
Q_{reag}	množ. tepla potřebného k ohřátí reagentu na požadovanou teplotu (GJ/h)
$Q_{Tohř}$	množství tepla potřebného k ohřátí spalin na požadovanou teplotu (GJ/h)

V_{sns}	skutečný objem suchých spalin (m^3_n/kg)
V_{vzs}	skutečná spotřeba suchého spalovacího vzduchu (m^3_n/kg)
V_{vzv}	skutečná spotřeba vlhkého spalovacího vzduchu (m^3_n/kg)
V_{snst}	teoretické množství suchých spalin (m^3_n/kg)
V_{snsv}	skutečný objem vlhkých spalin (m^3_n/kg)
V_{snvt}	teoretické množství vlhkých spalin (m^3_n/kg)
V_{vzst}	teoretickou spotřebu suchého spalovacího vzduchu (m^3_n/kg)
V_{vzvt}	teoretickou spotřebu vlhkého spalovacího vzduchu (m^3_n/kg)
v	Součinitel vlhkosti vzduchu (-)

1 Popis teplárny Trmice

Teplárna, jak už je podle jejího názvu patrné, je umístěna na okraji města Trmice. Trmice se nachází přibližně čtyři kilometry od centra krajského města Ústí nad Labem. Tato poloha je tedy ideální proto, aby teplárna mohla zásobovat teplem krajské město a přitom nebyla umístěna přímo v krajském městě.



Obr. 1.1 Pohled na teplárnu Trmice [2]

1.1 Historie teplárny Trmice

Na počátku historie teplárny stál hlad po elektřině na průmyslovém severu Čech, počátkem 20. století. V oblasti severních Čech stálo v roce 1901 několik parních elektráren, ale jejich výkon nebyl dostatečný na uspokojení poptávky po elektřině. Cena za dodanou elektrickou energii byla navíc vysoká. Společnost Nordb-böhmische Elektrizitätswerke, která sídlila v Děčíně, vycítila příležitost a rozhodla se elektrifikovat sever Čech. Elektrifikaci chtěla dosáhnout prostřednictvím vybudování rozvodných sítí 35 kV, 10 kV a 5 kV. Aby tento cíl mohl být uskutečněn, bylo nutné vybudovat novou elektrárnu. Jako nejvhodnější lokalita pro výstavbu byl vybrán pozemek v blízkosti města Trmice. Nejdůležitějším faktorem, který dal této lokalitě vyhrát, byl nedaleký hnědouhelný důl Alžběta (dnes již revitalizován), který se později stal výhradním dodavatelem uhlí do elektrárny. Další výhodou lokality byla blízkost řeky Bíliny a nedaleká železniční trať, po které byly dopravovány strojní komponenty elektrárny.

V roce 1916 byly uvedeny do provozu první čtyři kotle elektrárny Trmice, a také první turbo soustrojí o výkonu 6 MW. Celkem bylo do roku 1945 v provozu šestnáct kotlů a pět

turbo generátorů o celkovém výkonu 59,8 MW. Po roce 1946 započala výstavba prvních tří vysokotlakých roštových kotlů, společně s nimi bylo instalováno protitlakové turbosoustrojí TG6 o výkonu 16 MW. Čtvrtý vysokotlaký kotel byl zprovozněn v roce 1956.

Jelikož bylo státem počátkem padesátých let rozhodnuto o výstavbě hnědouhelných elektráren s bloky o výkonu 200 MW, ztrácela elektrárna Trmice na významu. Proto bylo rozhodnuto, že se elektrárna zaměří na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Změna začala uvedením dálkového parovodu do trvalého provozu. Nový parovod byl realizován bez návratového potrubí pro kondenzát, z tohoto důvodu byla v roce 1959 zprovozněna na levém břehu Labe nová čerpací stanice, která čerpala vodu potrubím do průmyslového závodu. V letech 1960 až 1976 jsou původní turbogenerátory a kondenzační turbíny postupně odstavovány z provozu. Spolu s odstavením těchto technologií byly rovněž postupně odstaveny původní kotle. Aby byl zajištěn rozptyl spalin v dostatečné výšce, byl vystaven i nový 220 metrů vysoký komín, do něhož byly v roce 1976 zavedeny kouřovody z vysokotlakých kotlů. V tomtéž roce došlo i na změnu jména z elektrárny Trmice na teplárnu Trmice. Jelikož se v Ústí nad Labem prováděla intenzivní bytová výstavba, narůstaly nároky na dodávané teplo, a proto byla zvýšena výroba páry. Aby mohla být pára vyráběna v požadované míře, musela být postavena nová chemická úprava vody – zprovozněna byla v roce 1968.

V letech 1972 až 1978 dochází k demolici původních kotlů a budov kotelen. Na místě, které bylo uvolněno, byl postaven fluidní kotel. Dále byl v roce 1975 zprovozněn kotel K5 s protitlakou turbínou TG7 a začala stavba dalšího vysokotlakého kotle K6 s turbínou TG8 stejného typu jako TG7. Koncem roku 1987 došlo ke zprovoznění dvou nových nízkotlakých výtopenských kotlů K7 a K8. Společně s touto technologií teplárny byl vybudován dodatečný komín na odvod spalin, který je vysoký 220 metrů. Další modernizace spočívala v odstavení staré čerpací stanice (z řeky Bíliny) a vybudování dalších tří přivaděčů z řeky Labe, celkově byly tedy v provozu čtyři přivaděče. Jednou z nejdůležitějších změn v tomto období bylo zprovoznění hydraulického odstruskování, na které byly postupně připojeny všechny granulační kotle [1].

V polovině 90. let byla započata modernizace teplárny, která zajistila ekologizaci provozu dle tehdejších norem. Ekologická opatření pro teplárnu byla totožná s opatřeními pro klasickou tepelnou elektrárnu. Jmenovitě se tedy jednalo o odsíření spalin z jednotlivých

kotlů a odpovídání spalín. Další modernizace, která v tomto období teplárnu technologicky posunula, byla instalace dvou kondenzačních turbín o výkonu 2×20 MW. V roce 1998 byla zprovozněna paroplynová turbína o elektrickém výkonu 70 MW. Tato paroplynová jednotka fungovala do roku 2011, následně byla odprodána do zahraničí [1].

Po kuponové privatizaci v 90. letech se teplárna stala majetkem francouzské firmy Dalkia. Společnost ČEZ, a.s. postupně získávala větší podíl akcií společnosti Dalkia, až se společnost ČEZ, a.s. stala dne 19. 5. 2011 úplným vlastníkem. Dále se dne 1.10.2013 stala teplárna součástí jednotky Poříčí, Tisová, Teplárny Hodonín a Trmice v divizi výroba ČEZ, a.s. [1].

1.2 Technologie teplárny

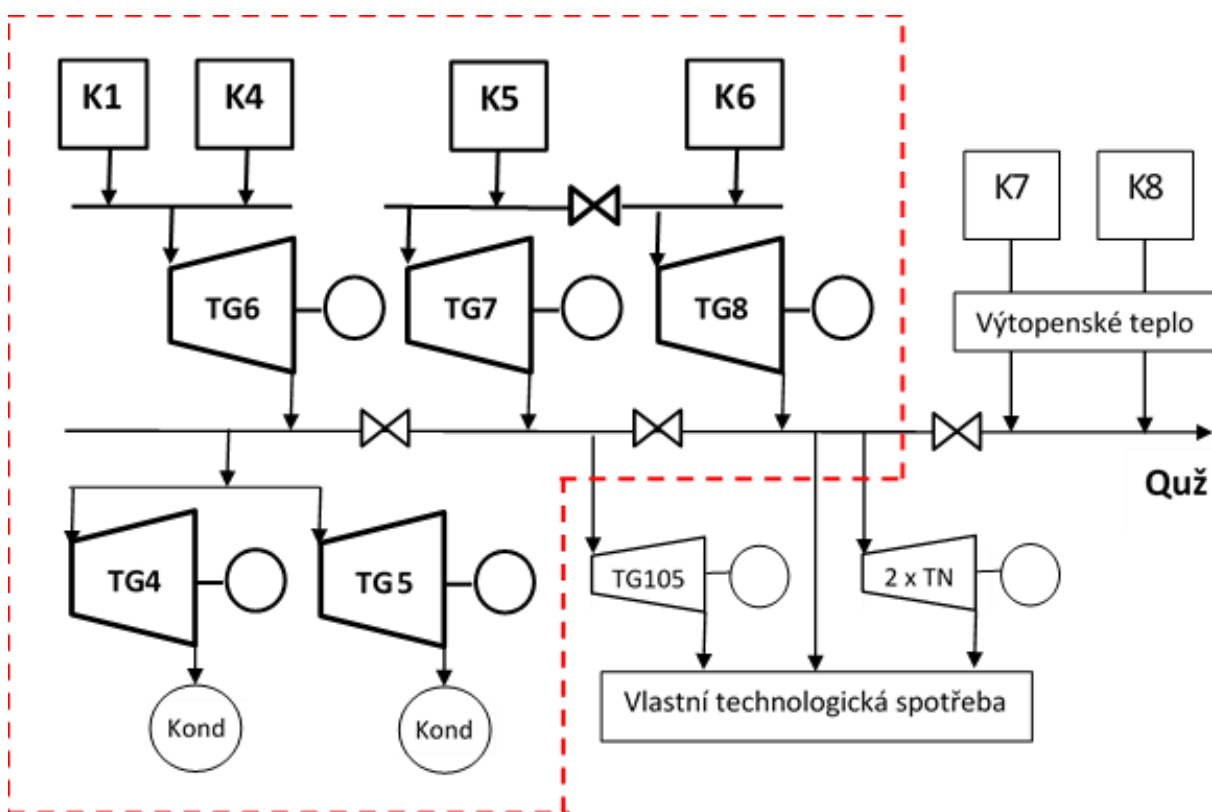
V současné době je v teplárně Trmice v provozu celkem 6 kotlů spolu se šesti turbogenerátory. Celkový tepelný výkon kotlů je 469,2 MW_e a celkový výkon turbogenerátorů je 89 MW_e. Technologie teplárny se skládá z částí kotelny, zauhlování, vyvedení elektrického výkonu, teplárenská technologie a vodního hospodářství. V následující podkapitolách si jednotlivé technologie teplárny popíšeme.

1.2.1 Kotelna

Kotelna je srdcem provozu teplárny, jsou zde umístěny kotle, ve kterých dochází k přeměně z energie primárního zdroje (v našem případě hnědé uhlí) na tepelnou energii v podobě páry. V tabulce 1.1 jsou uvedeny tepelné výkony jednotlivých kotlů, taktéž jsou v tabulce uvedeny i typy jednotlivých kotlů. Na obrázku 1.2 je technologické schéma teplárny na kterém můžeme vidět, jak jsou jednotlivé kotle vůči sobě uspořádány a zapojeny. Kotle jsou umístěny po dvojicích v budovách kotel. Dvojice kotlů jsou K1 a K4, K5 a K6, K7 a K8.

Tab. 1.1 Parametry kotlů [3]

Kotel	K1	K4	K5	K6	K7	K8	Celkový výkon
Tepelný výkon (MW _t)	42,7	42,7	110,0	110,0	81,9	81,9	469,2
Tepelný příkon (MW _t)	54,0	54,0	132,0	132,0	95,0	95,0	562,0
typ kotle	roštové jednobubnové		práškové granulační		práškové granulační		



Obr. 1.2 Technologické schéma teplárny Trmice

Technologický celek kotlen je tvořen vlastním kotlem, návaznými technologickými celky pro výrobu tepla a dalšími nezbytnými technologiemi. Tyto technologie jsou: úprava a doprava paliva, odtah popele a strusky, zařízení zajišťující napájení kotlů vodou, regulace spalovacího vzduchu a odtah spalin (případně čištění spalin).

Kotle K1 a K4 mají tepelný výkon $2 \times 42,7 \text{ MW}_t$, jsou roštového typu, vysokotlaké sálavé. Kotle mají vodotrubný, jednobubnový varný systém s přirozenou cirkulací vody. Rošt ohniště je realizován ve formě pohyblivého vratisuvného roštu. Kotel má tři tahy s dvoustupňovým přehříváním páry, třístupňovým ohřívákem vody (ekonomizér) a dvoustupňovým ohřívákem vzduchu. Spalovací komora nad šikmým rostem je vychlazována trubkami varného systému výparníku. Trubkový systém kotle, kterým proudí teplosměnné médium, je hladký. Spaliny jsou ve směsi s popílkem společně odsávány z topeniště kouřovým ventilátorem. Poté prochází druhým a třetím tahem kotle, následně přes vstupní kouřovod do dvoustupňového elektrostatického odlučovače popílku, a poté jsou spalinové odvody od obou kotlů spojeny v jednu spalinovou cestu. Palivem pro kotle je hnědé uhlí z dolu Bílina (hnědé uhlí z bílinského dolu má lepší vlastnosti, než uhlí okolních

dolů), frakce uhlí se pohybuje nad rozměrem 15 mm. Projektované fyzikálně-chemické parametry uhlí pro kotle K1 a K4 jsou v tabulce 1.2. Kotle umožňují spalovat společně v uhelné směsi i biomasu, ovšem pouze v maximálním poměru 50 %. V tabulce 1.3 jsou uvedeny provozní parametry obou kotlů. Čerpání napájecí vody pro oba dva kotle je zajišťováno pomocí čtyř napájecích soustrojí. Tři z těchto jednotek jsou poháněny asynchronními motory a jsou osazeny čerpadlem Sigma CHP 125, jmenovitý výkon každé jednotky je 160 t/h. Čtvrté soustrojí je provedeno jako turbonapajčka s čerpadlem Sigma CHP 150 o jmenovitém výkonu 228 t/h. Demineralizovaná napájecí voda je z chemické úpravy vody do kotelny přiváděna do dvou napájecích nádrží s odplynovacími ventily [3].

Tab. 1.2 Projektované fyzikálně-chemické parametry uhlí [3]

Uhlí SD – PS3		
Výhřevnost	10,5-13 (průměr 12,0)	MJ.kg ⁻¹
Obsah vody	průměrně 25,5	%
Obsah popela	průměrně 38	%
Obsah síry veškeré	průměrně 0,8	%
Bod měknutí popela	1400	°C
Bod tavení popela	>1500	°C
Bod tečení popela	>1500	°C

Tab. 1.3 Technické parametry kotlů K1 a K4 [3]

Technické parametry kotlů K1 a K4	
Jmenovitý výkon (MW _t)	42,7
Minimální výkon (MW _t)	25,62
Jmenovitý tlak páry (MPa)	12,0
Teplota přehřátí páry – jmenovitá (°C)	500 +5/-10
Teplota napájecí vody (°C)	115

Kotle K5 a K6 jsou granulační práškové kotle se dvěma tahy a s přirozenou cirkulací vzduchu. Každý kotel je vybaven čtyřmi ventilátorovými mlýny, které přímo foukají uhelný prášek do kotle. Kotle jsou vybaveny kromě hořáků na uhelný prášek i hořáky na mazut, mazutové hořáky slouží pouze k najíždění kotlů a stabilizaci plamene během nestandardních stavů. Kotle mají přehřívání páry s pěti stupni, v druhém tahu je umístěn ekonomizér. Přiváděný vzduch je ohříván pomocí dvou rotačních regeneračních ohříváků typu Ljungström. Spaliny jsou odtahovány do elektrostatických odlučovačů popílku, každý kotel má svůj samostatný odlučovač. Spaliny proudí dvěma samostatnými kanály pomocí dvou kouřových ventilátorů, které jsou umístěny za elektrostatickými odlučovači. Za ventilátory jsou spaliny svedeny do jednoho společného potrubí - spaliny z kotle K5 jsou sváděny přímo a spaliny z K6 pomocí by-passu. Spaliny dále proudí do odsíření a poté do komína o výšce 220 m. Kotel K6 je navíc vybaven by-passem do komína K1, taktéž o výšce 220 m. Kouřové ventilátory jsou poháněny asynchronním motorem o výkonu 400 kW s napájecím napětím 6

kV. Kouřové ventilátory jsou axiální rovnotlaké. Regulace je prováděna pomocí natáčení klapky regulačního věnce. Palivem pro kotle je opět hnědé uhlí dovážené z dolu Bílina, frakce paliva je pod 15 mm nebo je použito netříděné palivo. Projektované fyzikálně-chemické parametry používaných paliv jsou v tabulkách 1.4 a 1.2. Pro kotle je plánovaná ekologizace pro NO_x na úroveň 175 mg/Nm³ a pro SO₂ na úroveň 130 mg/Nm³. Stávající situace emisí se pohybuje na hodnotách 490 mg/Nm³ pro NO_x a 1 000 mg/Nm³ pro SO₂. Předmětem ekologizace nebude snížení emisí TZL. Aktuálně je dosahováno hodnot do úrovně 5 mg/Nm³. V tabulce 1.5 jsou technické parametry obou kotlů K5 a K6.

Tab. 1.4 Projektované fyzikálně-chemické parametry mazutu [3]

Těžký topný olej (mazut do 3% síry)		
Výhřevnost	40	MJ/kg
Hustota při 20 °C	957	kg.m-3
Viskozita při 100 °C	36,91	cSt
Mechanické nečistoty	0,02	% hm.
MCRT	7,12	% hm.
Obsah popela	0,018	částic za minutu
Obsah vody	<0,1	% hm.
Bod vzplanutí	240	°C
Obsah síry	<3	% hm.
Bod tuhnutí	19	°C

Tab. 1.5 Základní technické parametry kotlů K5 a K6 [3]

Základní parametry kotlů K5 a K6	
Jmenovitý výkon (MW _t)	110,01 (145 t/h)
Minimální výkon (MW _t)	64,5 (85 t/h)
Jmenovitý tlak páry (MPa)	13,5
Konstrukční přetlak (MPa)	14,5
Teplota přehřátí páry – jmenovitá (°C)	540 +5/-10
Teplota napájecí vody (°C)	165

Kotle K7 a K8 jsou granulační kotle s práškovým ohništěm. Jako zapalovací a stabilizační medium slouží opět mazut. Technologie spalování obou kotlů se neliší od kotlů K5 a K6, jediný rozdíl je v tepelném výkonu. Vlastnosti projektovaného paliva je k vidění v tabulkách 1.4 a 1.2, uhlí je opět tříděno pod frakci 15 mm, nebo není tříděno vůbec. Základní technické parametry obou kotlů jsou uvedeny v tabulce 1.6 [3].

Tab. 1.6 Základní technické parametry kotlů K7 a K8 [3]

Základní parametry kotlů K7 a K8	
Jmenovitý výkon (MW _t)	81,92 (115 t/h)
Minimální výkon bez stabilizace (MW _t)	53,43 (75 t/h)
Minimální výkon se stabilizací (MW _t)	41,32 (58 t/h)
Jmenovitý tlak páry (MPa)	1,8
Konstrukční přetlak (MPa)	2,2
Teplota přehřátí páry – jmenovitá (°C)	290 ± 8
Teplota napájecí vody (°C)	105 + 5/-0

Během realizace projektu DeNOx pro kotle K5 a K6 bude v zimním období v záložním provozu plynová kotelna, která má zajistit dodávky tepla v zimním období. V budoucnu bude provozována jako špičkový zdroj. Kotelna je provedena v modulární konfiguraci se čtyřmi kotli o parním výkonu 47,8 t/h. Součástí provozu je redukční plynová stanice, včetně rozvodů pro plynovou kotelnu. Parametry plynové kotelny jsou uvedeny v tabulce 1.7. Plynová kotelna je středotlaká a skládá ze čtyř velkoobjemových plynových kotlů pro výrobu páry. Kotle jsou vybaveny přehřívákem páry a spalínovým výměníkem pro úsporu energie a snížení emisí CO, kotle jsou dále osazeny nízkoemisními hořáky. Spaliny jsou vyvedeny pomocí kouřovodů do samostatných komínů [3].

Tab. 1.7 Základní technické parametry plynové kotelny [3]

Parametry plynové kotelny	
Celkový jmenovitý tepelný výkon zdroje	122,5 MW _t (4 x 30,625 MW _t).
Celkový jmenovitý tepelný příkon zdroje	128,138 MW _t (4 x 32,0345 MW _t).
Účinnost kotle	95,6 %.
Počet kotlových jednotek	4 ks
Jmenovitý parní výkon kotle	47,8 t/h
Jmenovitý tepelný výkon kotle	30,625 MW _t
Účinnost kotle celková	95,60 %
Přetlak přehřáté páry jmenovitý	16 bar _g
Maximální přetlak páry	21 bar _g
Teplota přehřáté páry jmenovitá	250 °C
Teplota přehřáté páry maximální	270 °C
Rozsah garance teploty páry:	50 % - 100 % výkonu kotle
<i>Palivo – zemní plyn:</i>	
výhřevnost min.	34,04 MJ/Nm ³
spalné teplo	37,77 MJ/Nm ³

1.2.2 Elektrická část provozu

Elektrická energie v teplárně je vyráběna pomocí pěti turbosoustrojí o celkovém výkonu 88 MW. Všech pět turbosoustrojí je instalováno ve strojovně, turbíny TG4 a TG5 jsou

kondenzačního typu a turbíny TG6, TG7 a TG8 jsou protitlakové. Jmenovité napětí turbo alternátorů je 6,3 kV a 11,5 kV. Turbosoustrojí zajišťují i napájení vlastní spotřeby teplárny. V teplárně je umístěno několik rozvodů: rozvodna 6 kV kobkového typu, rozvodna 35 kV a rozvodna 110 kV. Rozvodny 35 kV a 6 kV zajišťují vlastní spotřebu teplárny. Rozvodna 110 kV slouží jako předávací místo do distribuční sítě ČEZ a v případě odstávky je možné právě z této rozvodny napájet vlastní spotřebu při najíždění. Rozvodna je řešena dvěma systémy přípojníc a dvěma vývody do rozvodny Koštov. V rozvodně jsou umístěny transformátory o parametrech 110/11,5 kV 95 MVA, dva transformátory 110/35 kV 50 MVA a dva transformátory 110/6 kV 25 MVA.

1.2.3 Teplárenská část provozu

Teplárna je provoz, kde dochází ke kombinované výrobě tepla a elektřiny, tento termín se také nazývá kogenerace. Společná výroba tepla a elektřiny je účinnější než oddělená výroba. Tato spojená výroba přináší i snížení výrobních nákladů, ovšem jen pokud je systém vhodně navržen [4]. Teplo, které je v teplárně vyráběno, je formě páry dopravováno do Ústí nad Labem a okolí pomocí parovodů. Teplo z páry je předáváno ve výměňkových stanicích, nebo je pára přímo spotřebována v průmyslových podnicích. Pro blízké okolí teplárny je teplo dodáváno pomocí horkovodů. Celková délka parovodů je 107 km, délka horkovodů je pouze 8 km. Celkem je ročně do Ústí nad Labem dodáno 2000000 GJ tepelné energie, do Trmic je dodáno 83000 GJ. V době, kdy na konci parovodu není dostatečný tlak, je spuštěn špičkový posilovací zdroj ve formě středotlakého plynového kotle, který se nachází v městské část Neštémice. Tepelný výkon tohoto zdroje je 10,76 MW_t, jeho tepelný příkon je 12 MW_t. Zdroj byl spuštěn v roce 1980, ale byl na delší dobu odstaven, a v roce 1989 byl opět uveden do provozu. Zdroj je připojen na tepelný napaječ teplárny Trmice [3].

1.2.4 Uhelné hospodářství

Uhelné hospodářství musí zajistit plynulou a rovnoměrnou dodávku surového uhlí do zásobníků uhlí v kotelnách. Zauhlování můžeme rozdělit na vnější a vnitřní část. Vnější část slouží k vykládání, skladování a přípravu uhelného paliva. Skládka paliva má dostatečnou kapacitu na to, aby v případě výpadku dodávky paliva po železnici, vydržela zásoba až 14 dní nepřetržitého provozu. Vnitřní část zauhlování slouží k přepravě paliva do zásobníků surového uhlí na kotelnu teplárny.

Doprava uhlí je zajištěna kolejovou dopravou z dolu Bílina pomocí samovýsypných vagónů. Po příjezdu do areálu vagóny postupně svůj náklad vysypou do násypky hlubinného zásobníku. Z těchto zásobníků je uhlí pomocí čtyř vyhrnovacích vozíků shrnováno na dopravní pásy. Kvůli rovnoměrnému odběru uhlí z hlubinného uložení jsou použity dvě zauhlovací trasy. Následně je zauhlovací cesta spojena na pásu T3, na následujícím pasu T4 dochází pomocí elektromagnetického odlučovače k odloučení kovů, které jsou v palivu přimíchány. V horní části pásů T4 jsou umístěny automatické vzorkovače paliva, které zajišťují pravidelné odebrání vzorků paliva v určených intervalech [3]. Po rozdrčení paliva se dále zkoumají tyto parametry: množství vody v uhlí se určuje z kusů o velikosti 10 mm; výhřevnost uhlí, množství popela, škváry a síry se určuje z kusů o velikosti 3,15 mm; z popílku a škváry se určuje množství nedopalu ve škváře a popílku. Výhřevnost uhlí a množství nedopalu jsou určovány pomocí kalorimetrů. Výhřevnost je množství tepla, které je uvolněné dokonalým spálením 1 m³ nebo 1 kg paliva v adiabatických podmínkách za předpokladu, že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára obsažená ve spalinách zůstane v plynném stavu. Výhřevnost má význam pro praktické hodnocení paliv, protože při topení a výrobě energetické páry nemůže vodní pára ze spalin kondenzovat. Obsahují-li spaliny větší množství vodní páry, podílí se pára svou malou hustotou významně na vzniku komínového tahu. Výhřevnost se vypočítá podle vzorce 1.1.

$$Q_v = Q_s - 24,42 \cdot (W + 8,94 \cdot H_h) \quad (1.1)$$

kde:	Q_s	je spalné teplo	$(J \cdot g^{-1})$
	24,42	je koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 25 °C	$(J \cdot g^{-1})$
	W	je obsah vody v analytickém vzorku	(%)
	8,94	je koeficient pro přepočítání vodíku na vodu	
	H_h	je obsah vodíku v analytickém vzorku	(%)

Spalné teplo paliva Q_s se spočítá z konstanty kalorimetru a změny teploty vody v kalorimetrické nádobě. Pro stanovení obsahu vody v palivu je nejdříve třeba odebrat vzorek zvážit, a následně ho umístit do sušičky, kde se suší 1 hodinu při teplotě 110 °C. Po vyjmutí ze sušičky se vzorek nechá ochladit na teplotu okolí (ovšem je nutno zamezit výskytu vlhkosti okolí). Po ochlazení je vzorek opět zvážen. Z těchto skutečností vyplývá rovnice 1.2.

$$W = \frac{m_z - m_{vys}}{m_z} \cdot 100 (\%) \quad (1.2)$$

kde: m_z je hmotnost surového vzorku (g)
 m_{vys} je hmotnost vysušeného vzorku (g)

1.2.5 Vodní hospodářství teplárny

Teplárna pro svůj provoz potřebuje vodu, a to bez přerušení. Jako zdroj surové vody, která proudí do teplárny, slouží čerpací stanice, které jsou umístěny na levém břehu Labe. Po zpracování slouží voda k chlazení v chladicím okruhu a jako napájecí voda kotlů. V teplárně je několik chemických úprav vody. Jedna z úprav vody upravuje vodu pro průmyslový lihovar v sousedství. Největší úpravna vody zajišťuje vodu pro chladicí okruh kondenzačních turbín, dále upravuje vodu pro vnější a vnitřní síťové kondenzáty. Taktéž filtruje odluhy z chladicího okruhu kondenzačních turbín. Používají se třístupňové filtry, které obsahují ionex. Chemikálie používané pro úpravu vody jsou: kyselina solná HCl 31 %, hydroxid sodný NaOH 45 %, síran železitý $Fe_2(SO_4)_3$ 40 % a čpavková voda NH_4OH 25 %. Čpavková voda se používá pro alkalizaci parovodního okruhu elektrárny. Pro odsířovací zařízení se používá surová voda vyčištěná ve filtrační stanici.

2 Kritéria pro TETR ke splnění limitů uvedené v dokumentu BREF

Referenční dokumenty BREF uvádí informace o evropských nejlepších dostupných technikách. Existuje několik dokumentů BREF, které jsou zpracovávány pro jednotlivá průmyslová odvětví. Každý z těchto dokumentů obsahuje údaje o průmyslových procesech, používaných technikách, emisních limitech používaných v členských zemích EU, prioritních materiálových tocích a monitoringu. Každý dokument BREF obsahuje popis nejlepších dostupných technik (BAT) a informace o budoucích BAT.

Pojem BAT představuje nejpokročilejší a nejúčinnější fáze vývoje činností a jejich provozních metod, které dokládající praktickou vhodnost určité techniky jako základ pro stanovení limitních hodnot emisí a dalších podmínek povolení, jejichž smyslem je především předejít vzniku emisí. Pokud toto není proveditelné, je vyvíjena snaha tyto emise co nejvíce omezit a zabránit tak nepříznivým vlivům na životní prostředí [5]. V legislativě je pojem BAT vymezen dle evropské legislativy v §2 písm. e) zákona č. 76/2002 Sb., takto:

- *TECHNIKY – jednak použitá technologie, ale i způsob, jakým je zařízení vybudováno, navrženo, udržováno, provozováno, a nakonec vyřazeno z provozu;*
- *DOSTUPNÉ TECHNIKY – techniky vyvinuté tak aby, umožnily zavedení v odpovídajícím průmyslovém odvětví, ovšem za technicky a ekonomicky příznivých podmínek s ohledem na přínosy a náklady, pokud jsou provozovatelem zařízení při rozumných podmínkách dostupné - nehledě na to, jestli jsou vyráběny nebo používány v České republice;*
- *NEJLEPŠÍ TECHNIKY – nejúčinnější techniky s důrazem na vysokou úroveň ochrany životního prostředí [5]*

V dokumentu BREF jsou obecné závěry BAT, ty jsou navíc doplněny o BAT pro konkrétní druhy paliv. Obecné závěry BAT jsou rozděleny na soubory opatření, jmenovitě jsou to:

1. Systémy environmentálního řízení

2. Monitorování
 3. Celkový environmentální profil a průběh spalování
 4. Energetická účinnost
 5. Spotřeba vody a emise do vody
 6. Nakládání s odpady
 7. Emise hluku
1. Systémy environmentálního řízení (BAT 1) udávají, že nejlepší technikou pro zlepšení celkového environmentálního profilu je zavést a dodržovat systém environmentálního řízení, který obsahuje celkem šestnáct bodů (viz příloha 1). První tři prvky jsou následující:
- angažovanost vedoucích pracovníků včetně vrcholného vedení;
 - vedením stanovená environmentální politika, jejíž součástí je neustálé zdokonalování environmentálního profilu zařízení;
 - plánování a zavádění nezbytných postupů a obecných a konkrétních cílů ve spojení s finančním plánováním a investicemi. [6]
2. Monitorování (BAT 2) vysvětluje, že nejlepší dostupnou technikou je určení čisté elektrické účinnosti, tedy čistého celkového využití paliva a spalovacích jednotek prostřednictvím výkonové zkoušky při plném zatížení podle norem EN po uvedení jednotky do provozu, případně po kterékoliv změně, která by mohla významně ovlivnit účinnost. Ovšem pro KVET nelze z technických důvodů výkonovou zkoušku provést s jednotkou provozovanou při plném zatížení pro dodávku tepla. A proto je možné zkoušku doplnit nebo nahradit výpočtem s použitím parametrů pro plné zatížení [6]. V BAT 3 a BAT 4 jsou popsány parametry, které mají být monitorovány, zároveň je také uvedeno, jak často má být monitorování provedeno,

případně jaká norma má být použita. Parametry, které se týkají teplárny Trmice jsou v tabulkách 2.1 a 2.2, úplné tabulky jsou v příloze 2.

Tab. 2.1 Vybrané monitorovací parametry pro TETR z BAT 3 [6]

Proudící médium	Parametr	Monitorování
Spaliny	Průtok	Pravidelné nebo kontinuální zjišťování
	Obsah kyslíku, teplota a tlak	Pravidelné nebo kontinuální měření
	Obsah vodní páry	
Odpadní vody z čištění spalin	Průtok, pH a teplota	Kontinuální měření

Tab. 2.2 Vybrané monitorovací parametry pro TETR z BAT 4 [6]

Látka/Parametr	Palivo/proces/druh spalovacího zařízení	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení	Norma	Minimální frekvence monitorování
NH ₃	pokud je použita SCR a/nebo SNCR	Všechny velikosti	EN	Kontinuálně
NO _x	černé a/nebo hnědé uhlí včetně spolu spalování odpadu	Všechny velikosti	EN	Kontinuálně
N ₂ O	černé a/nebo hnědé uhlí včetně spolu spalování odpadu	Všechny velikosti	EN 21258	
CO	černé a/nebo hnědé uhlí včetně spolu spalování odpadu	Všechny velikosti	EN	Kontinuálně
SO ₂	černé a/nebo hnědé uhlí včetně spolu spalování odpadu	Všechny velikosti	EN a EN 14791	Kontinuálně
SO ₃	Pokud se používá SCR	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou ročně
HCl	černé a/nebo hnědé uhlí	Všechny velikosti	EN 1911	Jednou za tři měsíce
HF	černé a/nebo hnědé uhlí	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou za tři měsíce
Prach	černé a/nebo hnědé uhlí	Všechny velikosti	EN 13284-1 a EN 13284-2	Kontinuálně
Kovy a polokovy kromě rtuti	černé a/nebo hnědé uhlí	Všechny velikosti	EN 14385	Jednou ročně
Hg	černé a/nebo hnědé uhlí včetně spolu spalování odpadu	<300 MW _t	EN 13211	Jednou za tři měsíce

3. Celkový environmentální profil a průběh spalování, tomuto celku se věnuje BAT 6 až BAT 11. Jedná se o soubor opatření, které má zajistit zlepšení environmentálního profilu a snížení emisí CO. V BAT 6 se konkrétně jedná o opatření v podobě míchání paliva, o údržbě spalovacích systémů, pokročilém řídicím systému spalování, o správné konstrukci spalovacích zařízení a výběru paliva. BAT 7 stanovuje, že ke snížení emisí amoniaku (při použití selektivní nebo neselektivní katalytické redukce ke snížení emisí oxidů dusíku) musí být zařízení vhodně navrženo. Pro SCR musí být v ročním průměru emise amoniaku menší než 3 mg/Nm³. BAT 8 uvádí, že vhodnou údržbou a provozem zařízení pro snižování emisí lze zabránit nebo snížit emise. BAT 9 obsahuje soupis sledovaných parametrů paliva, které vedou k omezení emisí. U uhlí je to: výhřevnost, vlhkost, těžké látky, popel, fixní uhlík, C, H, N, O, S, Br, Cl, F, kovy a polokovy.
4. O energetické účinnosti pojednává BAT 12, jde se o soubor opatření ke zvýšení energetické účinnosti. U teplárny Trmice jsou to následující opatření: optimalizace spalování, optimalizace podmínek pracovního média, optimalizace parního cyklu, minimalizace spotřeby energie, předehřev spalovacího vzduchu, předehřev paliva, pokročilý řídicí systém, předehřev přívodní vody s využitím znovu získaného tepla, využití tepla formou kogenerace, kondenzátor spalin, akumulace tepla, vypouštění emisí chladicími věžemi, předsušení paliva, minimalizace tepelných ztrát, pokročilé materiály a modernizace parních turbín. Popis opatření je v tabulce v příloze číslo 3.
5. Spotřeba vody a emise do vody – v této části se jedná o recyklaci vody a manipulaci se suchým zbytkovým popelem.
6. Nakládání s odpady je popisováno v BAT 16. V provozu je obecně nutné předcházet vzniku odpadů. Ohledně již vzniklých odpadů se jedná o jejich přípravě na opětovné použití, recyklaci a jiné využití. Odpady mohou být využity pro výrobu sádry, jako stavební materiál, mohou mít energetické využití použitím ve skladbě paliv, a v neposlední řadě pro opětovné využití použitých katalyzátorů.
7. Emise hluku (BAT 17) mohou být sníženy pomocí následujících opatření anebo jejich kombinací: provozním opatřením (inspekce, údržba); použitím zařízení s nízkou hlučností (kompresory, čerpadla); útlumem hluku (ochranné valy),

zařazením pro regulaci hluku (tlumiče hluku); vhodným umístěním zařízení a budov. Obsáhlejší popis opatření a jejich použitelnost je v příloze 4.

Závěry BAT pro spalování hnědého a/nebo černého uhlí je doplnění obecných zásad. Doplnění je v následujících bodech:

1. Celkový environmentální profil
2. Energetická účinnost
3. Emise NO_x, N₂O a CO do ovzduší
4. Emise SO_x, HCl, a HF do ovzduší
5. Emise prachu a kovů vázaných na tuhé znečišťující látky do ovzduší
6. Emise rtuti do ovzduší

Pro bod 1 je v dokumentu uvedeno, že kromě nejlepších dostupných technik uvedených v BAT 6 je možné použití techniky – integrovaného procesu spalování zajišťující vysokou účinnost kotle a zahrnující primární techniky pro redukci NO_x (viz kapitola 4.1).

Pro bod 2 platí BAT 12 s doplňkem BAT 19, který doplňuje použití manipulace suchým zbytkovým popelem. To znamená využití energie popela jeho spalováním nebo využití energie z jeho ochlazování. V tabulce 2.3 je úroveň energetické účinnosti spojené s BAT pro spalování hnědého a/nebo černého uhlí pro teplárnu Trmice.

Tab. 2.3 Úroveň energetické účinnosti spojené z BAT 19 [6]

Typ spalovací jednotky	Čistá elektrická účinnost (%)		Celkové čisté využití paliva (%)
	Nová jednotka	Stávající jednotka	Nová nebo stávající jednotka
Na hnědé uhlí, <1000 MW _t	36,5-40	31,5-39,5	75-79

Pro bod 3 platí opatření v BAT 20, jde použití jednoho z následujících opatření anebo kombinace těchto opatření: optimalizace spalování (používá se s dalšími technikami);

kombinace primárních technik pro redukci NOx; selektivní nekatolická redukce; selektivní katalytická redukce; kombinace technik pro snížení NOx a SOx (proces DeSONOx). V tabulce 2.4 jsou úrovně emisí oxidů dusíků spojené s použitím BAT, vybrána jsou data relevantní pro teplárnu Trmice. Pro limity CO je orientační roční hodnota menší než 30-140 mg/Nm³.

Tab. 2.4 Úrovně emisí oxidů dusíků spojené BAT [6]

Celkový jmenovitý teplý příkon spalovacího zařízení (MW _t)	BAT-AEL (mg/Nm ³)			
	Roční průměr		Denní průměr nebo průměr za interval odběru vzorků	
	Nová zařízení	Stávající zařízení	Nová zařízení	Stávající zařízení
<100	100-150	100-270	155-200	165-330
100-300	50-150	95-200	80-130	155-210

Pro snížení nebo odstranění emise SOx, HCl, a HF (bod č. 4), je vhodné použití jedné z následujících technologií nebo jejich kombinace: injektáž sorbentu přímo do kotle nebo do lože; injektáž suchého sorbentu do spalin; rozprašování suchého absorbéru; mokrá vypírka; mokré odsíření spalin; kombinace technik pro snížení NOx a SOx; výběr paliva. Emisní limity pro SO₂, HCl a HF jsou v tabulkách 2.5 a 2.6.

Tab. 2.5 Úrovně emisí SO₂ [6]

Celkový jmenovitý teplý příkon spalovacího zařízení (MW _t)	BAT-AEL (mg/Nm ³)			
	Roční průměr		Denní průměr	Denní průměr nebo průměr za interval odběru vzorků
	Nová zařízení	Stávající zařízení	Nová zařízení	Stávající zařízení
<100	150-200	150-360	170-220	170-400
100-300	80-150	95-200	135-200	135-220

Tab. 2.6 Úrovně emisí HCl a HF [6]

Znečišťující látka	Celkový jmenovitý teplý příkon spalovacího zařízení (MW _t)	BAT-AEL (mg/Nm ³)	
		Roční průměr nebo průměr vzorků odebraných během jednoho roku	
		Nová zařízení	Stávající zařízení
HCl	<100	1-6	2-10
	≥100	1-3	1-5
HF	<100	<1-3	<1-6
	≥100	<1-2	<1-3

Pro snížení nebo odstranění emise prachu a kovů vázaných na tuhé znečišťující látky (bod č. 5) je vhodné použití následující technologie nebo jejich kombinace: elektrostatické odlučovače; látkové filtry; injektáž sorbentu do kotle; suché nebo polosuché odsíření spalin; mokré odsíření spalin. Emisní limity prachu jsou v tabulce 2.7.

Tab. 2.7 Úrovně emisí prachu [6]

Celkový jmenovitý teplý příkon spalovacího zařízení (MW _t)	BAT-AEL (mg/Nm ³)			
	Roční průměr		Denní průměr nebo průměr za interval odběru vzorků	
	Nová zařízení	Stávající zařízení	Nová zařízení	Stávající zařízení
<100	2-5	2-18	4-16	4-22
100-300	2-5	2-14	3-15	4-22

Pro snižování emisí rtuti (bod č. 6) jsou uvedeny následující techniky: elektrostatické odlučovače; látkové filtry; suchý nebo polosuchý systém FGD; mokré odsíření spalin; selektivní katalytická redukce (použitelná pouze s jinými technikami); injektáž uhlíkového sorbentu; použití halogenových přísad palivu (pouze pokud je v palivu nízký obsah halogenidů); úprava paliva před spalováním (promíchání, mísení paliv); výběr paliva. Emisní limity rtuti jsou v tabulce 2.8.

Tab. 2.8 Úrovně emisí rtuti [6]

Celkový jmenovitý teplý příkon spalovacího zařízení (MW _t)	BAT-AEL (μg/Nm ³)			
	Roční průměr nebo průměr vzorků odebraných během jednoho roku			
	Nová zařízení		Stávající zařízení	
	černé uhlí	hnědé uhlí	černé uhlí	hnědé uhlí
<300	<1-3	<1-5	<1-9	<1-10
≥ 300	<1-2	<1-4	<1-4	<1-7

Obecně lze dosáhnout snížení emisí použitím jedné technologie, tím se šetří finanční náklady na stavbu a údržbu této technologie. Nedosáhne se ovšem takové účinnosti odstranění emisí jako při použití několika specifických technologií.

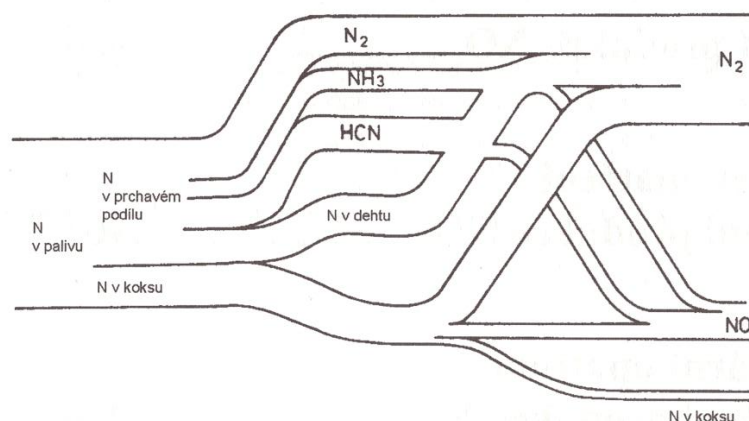
3 Oxidy dusíku

Nejběžnější oxidy dusíku jsou oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂), souhrnně jsou tyto oxidy označovány NO_x. Oxidy dusíku vznikají především spalováním fosilních paliv za vysokých teplot, během bouřek a činností mikroorganismů. Nebezpečí oxidů dusíku spočívá v podílu na vzniku kyselých dešťů, způsobují přízemní ozón a některé se řadí mezi významné skleníkové plyny (hlavně NO). Samotný dusík je toxická látka, jeho oxidy jsou přijímány člověkem zejména vdechováním. Pokud jsou zasaženy přímo oči a kůže, dochází ke vzniku závažných popálenin. Při vdechování v nízkých koncentracích dochází k podráždění očí a sliznic horních cest dýchacích. Ovšem při vysokých koncentracích dochází už k popálení těchto orgánů, může dojít k nevolnosti nebo dokonce ke smrti. Na emisích NO_x se výrazně podílí člověk, mezi hlavními průmyslovými odvětvími, které tyto emise produkují, je doprava, chemický průmysl a energetika. Když se NO_x dostanou do atmosféry, velmi rychle chemicky reagují a klesají zpět na zemský povrch. Většina NO_x je přeměněna na kyselinu dusičnou a další látky. K těmto chemickým reakcím dochází i ve vodním prostředí. Téměř ve všech vyspělých zemích, které jsou průmyslově vyspělé, jsou stanoveny přípustné emisní limity. Abychom mohli snížit produkci NO_x, je potřeba znalosti mechanismů jejich vzniku při spalování.

3.1 Mechanizmy vzniku NO_x

Příčinou vzniku oxidů dusíku při spalování fosilních paliv je oxidace dusíku chemicky vázaného v palivu a molekulárního dusíku, který je obsažen ve vzduchu. Těmito reakcemi vzniká 90 % NO a část NO₂. Doposud jsou známy tři principy vzniku oxidů dusíku. Jedná se o palivové NO, termické NO a okamžité (promptní) NO [7]. Na obrázku 3.2 můžeme vidět závislost vzniku oxidů dusíku na teplotě.

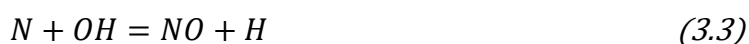
Palivový oxid dusnatý je produktem dusíku, který je vázán v tuhých a některých kapalných palivech. Dusík se procentuálně v uhlí vyskytuje od 0,5 % hm. až 5 % hm. Ovšem dusík, který je v palivu vázán, se na NO přemění jen z 10 až 25 %. Jak se dusík v palivu přeměňuje, je vidět na obrázku 3.1 [7].



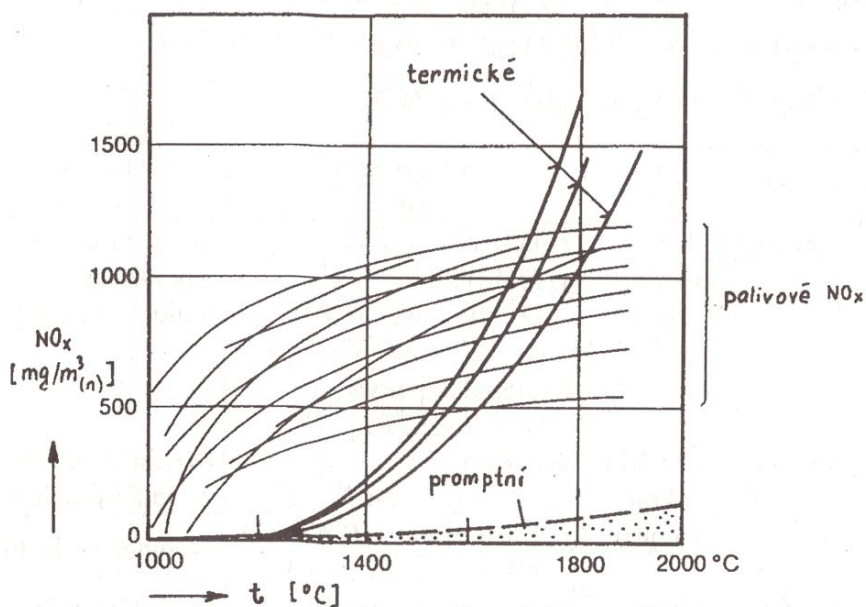
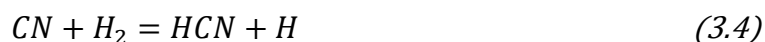
Obr. 3.1 Přeměna dusíku vázaného v palivu [7]

Ovšem samotný podíl NO_x, který vznikl z palivového oxidu dusnatého se pohybuje od hodnot 35 až 80 %. Princip přeměny palivového dusíku na NO_x není doposud plně objasněn. V podstatě se jedná o komplikovanou interakci mezi tuhými, kapalnými a plynnými reagenty. Při hoření tuhých paliv se dusík uvolňuje prchavým podílem (vzniká 60 až 80 % NO_x), část zůstává v koksů. Vznik oxidů dusíku z prchavého podílu je ovlivněn přebytkem vzduchu, koncentrací dusíku v prchavém podílu a na teplotě (slabý vliv). Složení uhlí tedy výrazně ovlivňuje produkci oxidů dusíku. Klíčovými parametry uhlí jsou: poměr obsahu pevného uhlíku ku obsahu prchavého podílu, obsah dusíku v palivu a obsah popelovin. Větší obsah popeloviny obvykle snižuje produkci NO_x. Dále záleží na poměru uhlíku ku prchavému podílu, menší podíl znamená nižší emise oxidů [7].

Termický NO vzniká z molekulárního dusíku, jenž je obsažen ve vzduchu - ovšem pouze při teplotách do 1300 °C, se zvyšující se teplotou jeho emise prudce stoupají. Emise jsou úměrné koncentraci atomárního kyslíku, jenž je obsažen v plamenu. Chemický vzorec mechanismu reakce podle Zeldoviče při přebytku kyslíku je uveden v rovnici 3.1 a 3.2, při přebytku paliva v rovnici 3.3 [7].



Promptní NO je produktem oxidace molekulárního dusíku na okraji plamene, a to za účasti uhlovodíkových radikálů. Vznik promptního NO je ovlivněn přebytkem vzduchu a teplotou. V průmyslových zařízeních je takto vzniklý oxid dusnatý zanedbatelný, jelikož vzniká ve větší míře teprve při teplotě 2000 °C. Chemický vzorec mechanismu vzniku podle Fenimora jsou uvedeny ve vzorcích 3.4 až 3.6 [7].



Obr. 3.2 Závislost vzniku oxidů dusíku na teplotě [7]

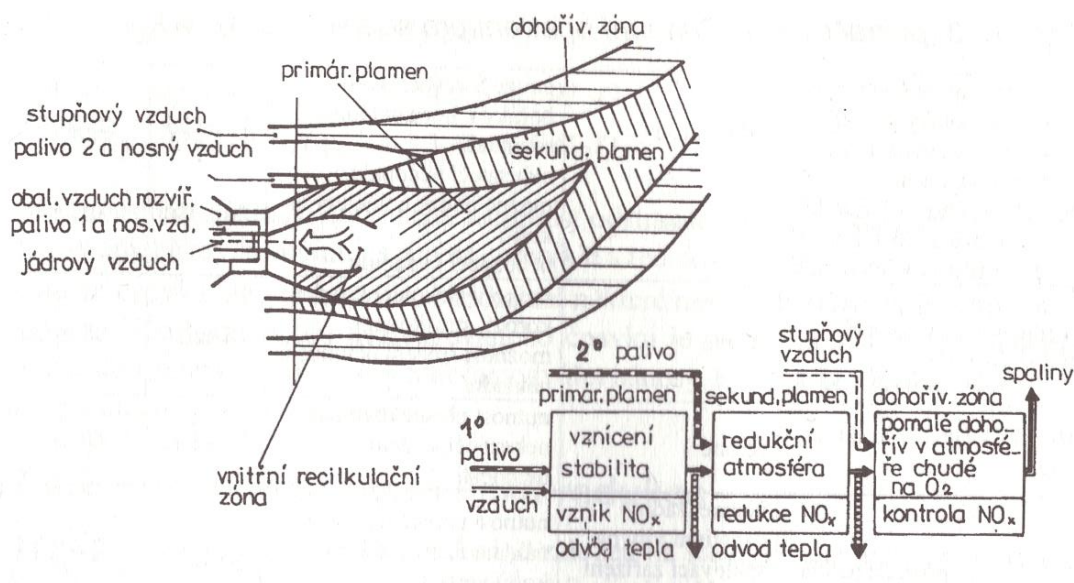
Oblast vzniku NO₂ je v plamenu, spalinových kanálech, komínu a atmosféře. Hlavní ovlivňující faktory jsou rychlá přerušení spalovacích reakcí, teplota pod 650 °C, koncentrace kyslíku a doba pobytu [7].

4 Omezování oxidů dusíku

4.1 Primární opatření

Primární opatření zajišťují omezení vzniku NO_x už během procesu spalování. Z analýz mechanismu vzniku NO_x je patrné, že snížení emisí NO je možné dosáhnout třemi způsoby. První způsob je snížení spalovací teploty, druhý způsob je snížení koncentrace O₂ v plameni. Posledním způsobem je zkrácení doby pobytu reagujících látek v oblasti s podmínkami pro vznik NO. Tato tři opatření mají největší efekt, jsou-li aplikována v oblasti, kde se palivo vzněcuje. Primární opatření jdou realizovat pomocí modifikací provozního režimu a opatřeními, kdy se musí modifikovat (nebo znovu zkonstruovat) spalovací zařízení [7].

Jedna z méně náročných metod, jak lze primárních opatření dosáhnout, je pomocí řízení spalovacího procesu. Ovšem pokud je toto opatření použito samostatně, je velice nepravděpodobné, že dojde ke snížení emisí NO_x pod zákonem stanovené limity. Proto je toto opatření většinou využíváno v kombinaci s dalšími primárními opatřeními [7].



Obr. 4.1 Hořák s nízkou produkcí NO_x ve variantě se stupňováním přívodu paliva [7]

Při realizaci primárních opatření pomocí rekonstrukce nebo novou konstrukcí spalovacího zařízení, je snížení emisí oxidů dusíku výrazně účinnější. Cílem této metody je vytvoření oblastí ve spalovacím prostoru, kde bude docházet k redukci. Toho můžeme dosáhnout ve velkých oblastech ohniště na začátku spalovacího procesu pomocí stupňování přívodu vzduchu, nebo také v menších oblastech před ústím hořáku. Tato opatření jsou

schopná snížit emise oxidů dusíku o 20 až 70 %. V jednotlivých případech se však účinnost tohoto opatření může značně lišit, jelikož závisí na mnoha faktorech. Dalším faktorem, který účinnost této metody ovlivňuje, je schopnost přesné regulace paliva a vzduchu v jednotlivých tryskách a hořácích. V případě spalování hnědého uhlí proudovými hořáky je nejčastěji vytvořeno podstechiometrické spalování v celém průřezu ohniště, nebo v první spalovací zóně. V redukčních oblastech je nejčastěji volen přebytek vzduchu kolem hodnoty 0,8. Při stupňovitém přívodu paliva vytvoříme redukční oblast za první spalovací zónou; schéma hořáku se stupňovitým přívodem paliva je na obrázku 3.3. Oxidy dusíku se v redukční zóně redukují na uhlovodíkové radikály, díky čemuž produkce oxidů dusíku klesá. V tabulce 3.1 je uveden celkový přehled primárních opatření [7].

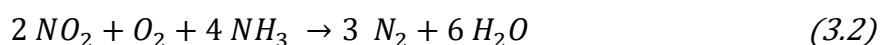
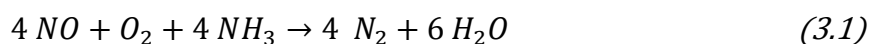
Tab. 3.1 Primární opatření pro snížení tvorby NO_x [7]

Metoda	Výhody	Nevýhody	Snížení tvorby NO _x (%)	
			průměrně	maximálně
Provoz se sníženým přebytkem vzduchu	jednoduché, možné použít u šech typů spalovacích zařízení	vzrůst emisí CO, možné zanášení struskování, koroze, snížení stability hoření, větší nedopal	16 až 20	25 až 30
Provoz s nižší teplotou ohřátého vzduchu	jednoduché	možné snížení účinnosti, snížená stabilita hoření, použitelné pouze u některých typů kotlů a paliv	5 až 20	10 až 25
Vytvoření redukčních zón, horní hořáky pracují s chudou směsí, dolní s bohatou směsí	jednoduché	pouze u větších kotlů s hořáky v horizontálních rovinách, nebezpečí nedopalu	15 až 25	25 až 35
Vytvoření redukčních zón, vyřazení horních hořáků z provozu a jejich použití jako vzduchových trysek	jednoduché	možné jenom u větších kotlů, nebezpečí nedopalu	20 až 30	30 až 40
Vzduchové trysky nad hořáky	účinné	riziko vysokoteplotní koroze, struskování, možnost snížení účinnosti, nákladné	15 až 35	35 až 50
Hořáky s nízkou produkcí NO _x	účinné	nutnost přesné regulace, nebezpečí snížení účinnosti	20 až 40	40 až 60
stupňování přívodu paliva	účinné, žádný vliv negativní vliv na spalovací zařízení, efektivní v širokém rozsahu výkonů	nutnost přesné regulace, nákladné, možné jen u kotlů větších výkonů	20 až 35	35 až 50
Recirkulace spalin	účinné, zejména u zemního plynu	nákladné, snížení stability hoření, změna sdílení tepla v kotli	15 až 30	uhlí 20, olej 45, zemní plyn 70

4.2 Sekundární opatření

Sekundární opatření jsou metody, které odstraňují již vzniklé oxidy dusíku ze spalin. Tyto metody se převážně používají v provozech, kde jsou používána paliva s vysokou výhřevností. Dříve se emisních limitů dosahovalo použitím pouze primárních opatření, ovšem dnes jsou již limity přísnější, a proto se musí používat i sekundární opatření. V praxi jsou používány tři metody: metoda selektivní nekatalytické redukce (SNCR), selektivní katalytická redukce (SCR) a metody simultánní [7].

Metoda SNCR tkví v redukci oxidů dusíků pomocí čpavku nebo močoviny. Tuto redukci je nutné provádět při teplotách 900 až 1050 °C, tedy přímo v kotli. Základní chemické reakce pro tuto metodu jsou uvedeny v rovnicích 3.7 a 3.8.



Výhoda této metody jsou nízké investiční náklady. Ovšem účinnost odstranění oxidů dusíku je nižší, proto se metoda musí kombinovat s jinými metodami (např. recirkulace spalin). Obvykle je pro redukci používán čpavek, jelikož je levnější než močovina. Močovina se oproti čpavku také hůř skladuje. Čpavek má ovšem několik nevýhod. Jednak je čpavek toxický, při jeho úniku v nezreagovaném stavu je okolí obtěžováno zápachem a jeho sloučeniny se sírou mohou vytvářet nánosy. Kvůli těmto důvodům je proto někdy výhodnější použít močovinu [7].

Selektivní katalytická redukce je založena na stejných chemických principech jako SNCR. Ovšem samotná reakce již probíhá při nižších teplotách 170 až 510 °C. Základem katalyzátoru je oxid titaničitý, na kterém jsou nanášeny vrstvy vanadu nebo wolframu. Wolfram nebo vanad jsou aktivními materiály katalyzátoru. Samotná reaktivita katalyzátoru s časem klesá. V případě, že je katalyzátor umístěn před odsiřovacím zařízením, hrozí při teplotě pod 300 °C dezaktivace, jelikož je přítomnost SO₃ ve spalinách. Technologie SCR bude podrobněji popsána v následující kapitole [7].

Simultánní metody umožňují současné odstranění NO_x a SO_x. Můžeme je rozdělit dle aplikace na metody:

- Suché vypírky – odstranění NO₂ a SO₂ pomocí aktivního koku, NO se redukuje pomocí čpavku
- Mokrý vypírky – rozdělujeme dále na metody oxidační a absorpční. Oxidační metoda nejprve zoxiduje NO na NO₂, následně lze NO₂ absorbovat vhodnou sloučeninou. Absorpční metoda využívá vhodnou vypírací tekutinu k odstranění NO ze spalin. Oxid dusnatý se pak redukuje na dusík. Absorpční metody používají komplikované a drahé sloučeniny.

Vývoj simultánních metod stále pokračuje, neboť tyto metody dokážou dosáhnout vysoké účinnosti zachytu oxidů dusíku [7].

5 Porovnání vhodných technologií denitrifikace pro TETR

Jak už bylo uvedeno v kapitolách 4 a 3, existují různá technická řešení, která zajistí snížení emisí oxidů dusíku pod zákonnou limitní hranici. Nicméně většina těchto technologií sama osobě nezajistí snížení emisí pod stanovanou mez, nebo jsou pro teplárnu Trmice technologicky nevhodné. Technologicky nevhodné mohou být z důvodu nedostatečného instalačního prostoru v místech, která jsou určena pro tyto technologie. Dále je nevhodnost některých technologií dána také nutností velkého zásahu do samotného spalovacího zařízení, což by bylo velice časově i finančně nákladné. Některá technologická opatření již byla implementována v minulých letech při ekologizaci provozu teplárny (jedná se hlavně o primární opatření), nicméně samotná tato opatření nesplňují kritéria (o BAT), jež jsou uvedena v dokumentech BREF (viz. 3. kapitola). Jako nejvhodnější se s těchto důvodů proto jeví použití technologie selektivní katalytické redukce (SCR). Technologie SCR je schopna i odstranit rtuť ze spalin, což je velice výhodné. Ovšem SCR umožňuje implementovat tuto technologii na různých částech spalinové cesty. Existují celkem tři varianty, které jsou od sebe různé svou konstrukcí i typicky používanými katalyzátory:

1. High dust systémy
2. Low dust systémy
3. Tail-end systémy

V této kapitole si technologii SCR popíšeme detailněji, a také si uvedeme, proč jsou pro teplárnu jednotlivé systémy vhodné, nebo nevhodné.

5.1 Technologie SCR

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, selektivní katalytická redukce probíhá v rozmezí teplot 170 až 510 °C. To, při jaké teplotě reakce probíhá, je určeno druhem katalyzátoru, jenž je v systému instalován. Aby mohlo ke katalytické reakci vůbec dojít, je potřeba přítomnost reagentu.

5.1.1 Reagenty

U selektivní katalytické redukce se jako reagent používá buďto čpavek nebo močovina. Typicky se močovina používá jako reagent u malých aplikací (maximálně do 50 MW_t). Močovina se používá v automobilovém průmyslu jako reagent v dieslových aplikacích, používá se pro ni označení AdBlue (skládá se z 32,5 % močoviny a 67,5 % vody). Močovina se v energetickém průmyslu v drtivé většině případů nepoužívá kvůli vyšší nákupní ceně, než je tomu u čpavku. K další velké nevýhodě také patří i vysoké korozivní účinky močoviny (čpavek je také korozivní ale ne v takové míře), ta způsobuje velké investiční náklady na pořízení zásobníku (musí odolat korozi) i údržbu dopravního mechanismu. Močovina je navíc méně účinná než čpavek, ale naopak je výhodná z důvodu, že její roztok je bez zápachu a není nutné ji skladovat v nádobách pod tlakem. Při použití čpavku je třeba dbát na vyšší bezpečnostní opatření, aby bylo zabráněno jeho úniku do ovzduší. Pokud je jako reagent použit plynný čpavek, je nutné ho při skladování zkapalnit a držet v nádobách pod tlakem 17 bar. V místě, kde je čpavek uskladněn je nutné zajistit nepřetržité měření jeho koncentrace ve vzduchu, jelikož je čpavek velice žíravý a při úniku hrozí ohrožení zdraví. Z těchto důvodů je vybudování infrastruktury pro použití čpavku velmi nákladné a používá se u velkých aplikacích. Některým těmto opatřením se můžeme vyhnout, pokud použijeme čpavek v jeho vodném roztoku, ovšem za cenu nutného většího objemu zásobníků. Vysoké nároky jsou kladeny i na dopravu čpavku do závodu, teplárna Trmice umožňuje dopravu čpavku pomocí vlakové dopravy z nedaleké chemičky Unipetrol Litvínov. Aby bylo možné čpavek v SCR reaktoru použít, je nutné čpavek odpařit, a následně smísit s nosným médiem. Nosným médiem může být pára, voda nebo vzduch. V případě teplárny Trmice bylo rozhodnuto použít vody jako nosného média. Vodný roztok čpavku se používá nejčastěji v koncentraci 29,4 % NH₃. Je možné použít i menší koncentrace, to se však příliš nepoužívá. V případě teplárny Trmice bylo rozhodnuto, že bude k reakci použit čpavkový roztok v koncentraci 30 %. Před vstříkem roztoku do reaktoru je vhodné ho míchat se vzduchem, tím dosáhneme požadovaného množství kyslíku pro reakci [8].

5.1.2 Katalyzátory

První katalyzátory používané pro selektivní katalytickou reakci byly zhotoveny z drahých kovů (např. paladium, platina), což způsobilo vysokou pořizovací cenu a technologie se příliš nerozšiřovala. Ovšem s dalším vývojem byly drahé kovy nahrazeny kovy levnějšími, jako je wolfram, vanad a titan. Cena katalyzátorů byla snížena a jejich

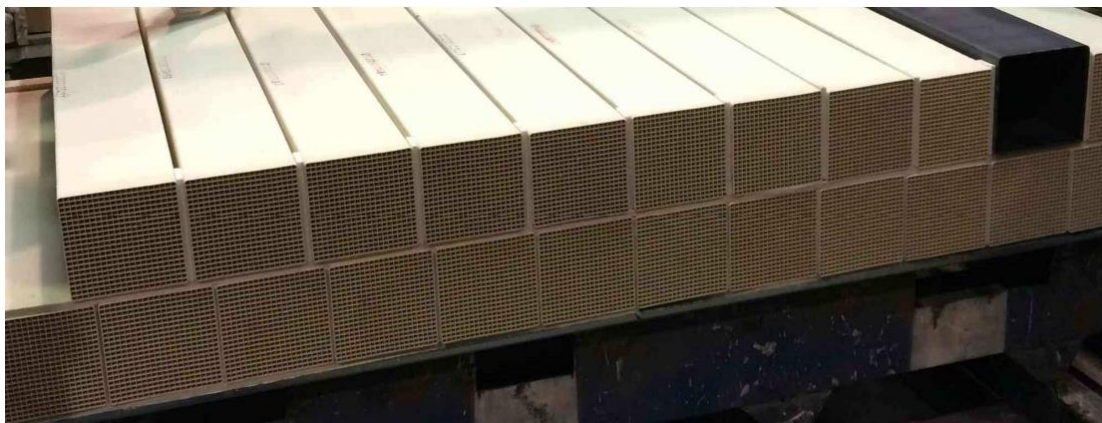
efektivita byla zachována. Další vývoj se zabýval zlepšováním parametrů reakce - toho bylo dosaženo přidáváním příměsí nebo změnou geometrie katalyzátoru. Katalyzátor, který je navržen vhodně, by měl při své pracovní teplotě dosahovat jednak vysoké účinnosti, jednak vysoké spolehlivosti a dlouhé doby životnosti. Katalyzátory SCR se tedy skládají z aktivních kovů nebo keramiky s vysoce porézní strukturou. Uvnitř pórů katalyzátoru jsou aktivní místa - tato místa mají kyselinovou skupinu, která se nachází ve sloučenině, kde dochází k redukční reakci. Po výskytu redukční reakce se místo reaktivuje rehydratací nebo oxidací. Postupem času se ovšem však aktivita katalyzátoru snižuje, což vyžaduje jeho výměnu. Vlastnosti katalyzátoru jsou dány jak materiálem katalyzátoru, tak i vnitřní konfigurací [8].

Hlavními skupinami dle materiálů jsou:

1. Oxidy železa
2. Aktivní uhlí
3. Zeolity
4. Katalyzátory s kovovými oxidy

Katalyzátory s oxidy železa se používají pro reakci s roztokem močoviny. Materiál je tvořen nejen oxidy železa, ale i vrstvou železnatého fosfátu, která zamezuje oxidaci katalyzátoru. V katalyzátoru s aktivním uhlím se používá práškové hnědé nebo černé uhlí, které je zalisováno s inertním materiálem. Tyto katalyzátory se používají při teplotách 100 až 210 °C. Jejich nevýhodou je náchylnost k abrazi. Z těchto důvodů je tento katalyzátor vhodný pouze pro SCR Tail-end. Zeolitové katalyzátory jsou velmi drahé, ale mají sníženou aktivaci oxidů síry, jejich provozní teplota se pohybuje od hodnot 350 do 600 °C. Proto se tyto katalyzátory používají tam, kde jsou vystaveny vysoké koncentraci oxidů síry (tedy před odsiřovací jednotkou). Katalyzátory s kovovými oxidy jsou levnější, ale napomáhají oxidaci SO₂ na SO₃. Jejich provozní teplota je 300 až 450 °C [8].

Katalyzátory mohou být konstrukčně provedeny ve třech variantách: plástvově, deskově, nebo pomocí pelet. Plástvové a deskové provedení je složeno z jednotlivých modulů o rozměrech 1 x 2 metry.



Obr. 5.1 Katalyzátor v plastovém provedení [9]

Na obrázku 5.1 můžeme vidět plastové provedení katalyzátoru. Katalyzátor je zhotoven z keramiky, je možné využívat kovové oxidy, zeolity. O vlastnostech tohoto provedení rozhoduje rozměr pitch, tedy šířka čtvercového otvoru (včetně tloušťky jedné stěny). Rozměr pitch rozhoduje o vhodnosti použití, tedy zda je vhodné ho použít před nebo za odlučovačem popílku. Pro High dust variantu je daný rozměr 7 až 9 mm a pro Low dust 4 až 7 mm. Výhoda tohoto provedení je velký reakční povrch kanálků [8].

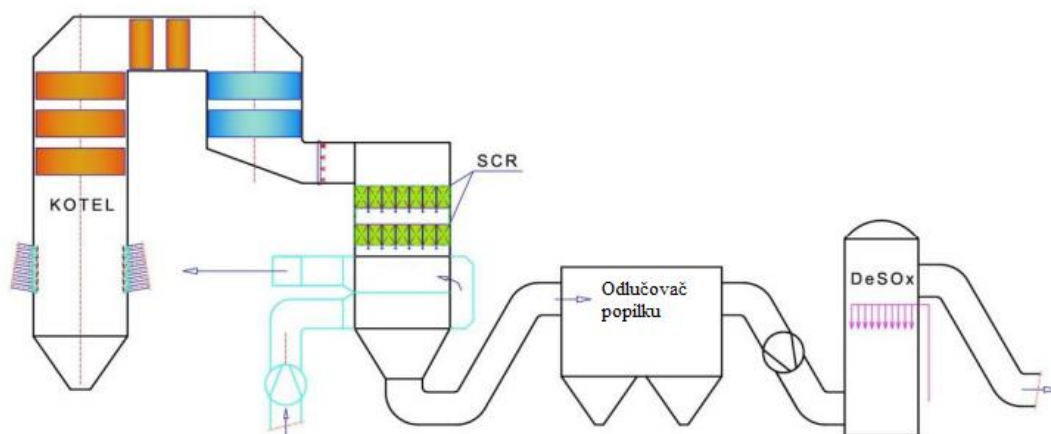
Provedení pomocí pelet je používáno pro zeolit nebo aktivní uhlí. Pelety se fluidně mísí se spalinami, což způsobuje rovnoměrný styk spalin s katalyzátorem. Tato varianta je však náchylná k abrazi a ucpání [8].

Deskové provedení je tvořeno kovovými pláty. Aktivními látkami katalyzátoru jsou TiO_2 nebo V_2O_5 . Tato varianta je výhodná, jelikož nedochází k velkému zanášení katalyzátoru díky širším kanálkům. Nevýhoda tohoto typu je menší reaktivní povrch katalyzátoru. To vede k nutnému navýšení rozměrů [8].

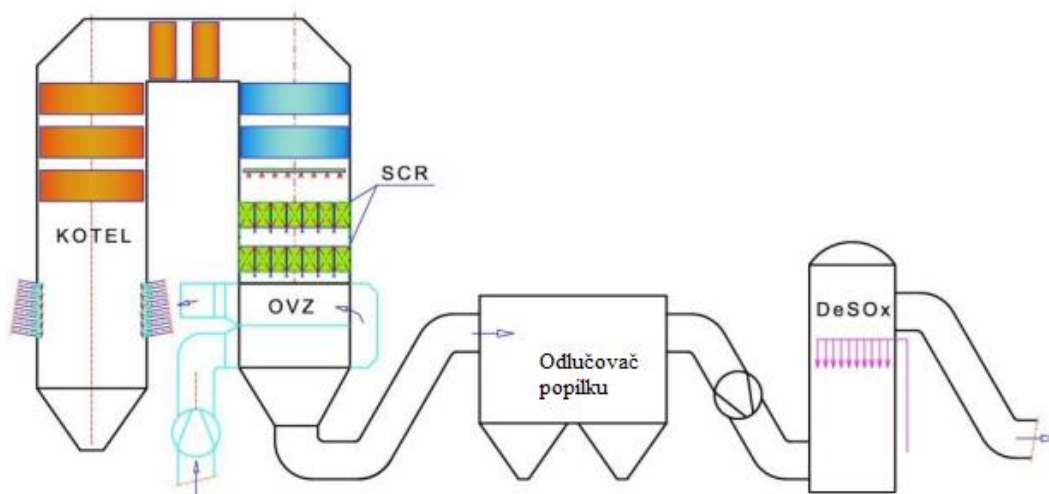
S postupem času se u každého katalyzátoru projevuje čpavkový skluz ve větší míře. Čpavkový skluz je míra čpavku, který nezareaguje a odchází spolu se spalinami ven z katalyzátoru. Čpavkový skluz je tedy způsoben opotřebením katalyzátoru. Opotřebením katalyzátoru může být způsobeno jeho zacpáním nebo deaktivací katalyzátoru. Deaktivace katalyzátoru je převážně závislá na čase, ale je také závislá na provozních podmínkách (vyšší provozní teplota, otrava katalyzátoru).

5.2 Provedení High dust

Schéma pro High dust můžeme vidět na obrázcích 5.2 a 5.3. Systém se separátním reaktorem, který je umístěn mimo kotel, je častější. Nicméně, jak je znázorněno na obrázku 5.3, je možné umístit systém SCR i do druhého tahu kotle. Toto řešení se příliš nepoužívá, jelikož je nutné počítat s umístěním SCR už při návrhu kotle. V separátním provedení je reaktor umístěn mezi ekonomizérem a ohřívákem přívodního vzduchu do kotle. Toto umístění zajišťuje optimální teplotu spalin pro redukci oxidů dusíku, při použití katalyzátoru s kovovými oxidy nebo zeolity. Nicméně v této konfiguraci se nachází ve spalinách popílek při vstupu do reaktoru SCR, proto je nutné, aby měl katalyzátor větší otvory (většinou se pro high dust používají deskové katalyzátory nebo plástvové katalyzátory), aby nedocházelo k přílišnému ucpávání popílkem. Časem by se katalyzátory stejně ucpaly, a proto je v reaktoru umístěn i systém pro jejich ofukování vzduchem. Ve spodní části reaktoru je zásobník na popílek, tento popílek je periodicky odstraňován. Pokud je ovšem rychlost spalin dostatečná, je jimi popílek zachycen a odchází dále spalinovou cestou. Všechny tyto skutečnosti ovšem znamenají i nárůst rozměrů celého reaktoru a zvýšení celkových investičních nákladů. Obsah popeloviny ve spalinách značně zkracuje životnost katalyzátorových kompakťů, jelikož dochází k značné abrazi. Dalším prvkem, který je silným katalytickým jedem, je arsen, který je také ve spalinách obsažen. Ve spalinách je přítomen i SO₂, který oxiduje na SO₃. Jelikož je ve spalinách obsažena i vodní pára, dochází ke vzniku kyseliny sírové, při přítomnosti čpavku se pak tvoří i soli kyseliny sírové. Tyto reakce tedy způsobují deaktivace katalyzátorů a korozi některých částí. Tato skutečnost se netýká fluidních kotlů, jelikož se u nich odsiřuje vápencem před vstupem do SCR reaktoru (suché odsiřování neutralizuje i arsen). Další nevýhodou je nutnost instalovat by-pass ekonomizér, jelikož by při velkých výkonech hrozila nízká teplota spalin a je tedy třeba provést regulaci. Nicméně značná výhoda je teplota spalin, která nevyžaduje jejich přehřívání před vstupem do SCR reaktoru. Tím se i docílí energetické úspory (přehřívání dle provedení může spotřebovat až 4 % celkového tepelného výkonu kotle) [8].



Obr. 5.2 Provedení High dust se separátním reaktorem [9]

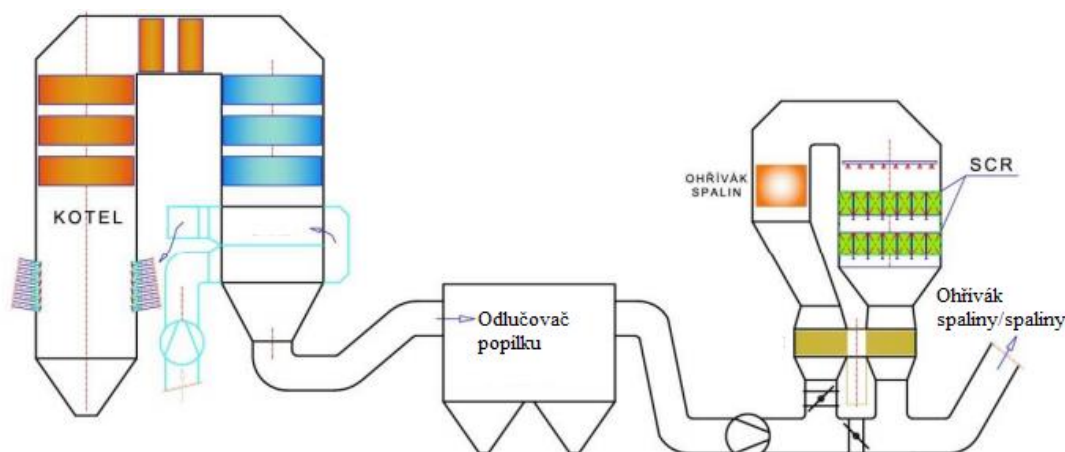


Obr. 5.3 Provedení High dust s reaktorem ve stávajícím II. tahu kotle [9]

5.3 Provedení Low dust

Při provedení low dust je SCR reaktor umístěn až za odličovačem popílku, na obrázku 5.4 je znázorněno schéma s přehříváním spalín. Nicméně je možná i varianta, kdy se spaliny ohřívát nemusí – v takovém případě ale musí být instalován vysokoteplotní elektrostatický odličovač popílku a ohřívák vstupního vzduchu musí být až za reaktorem SCR. Toto provedení se však musí plánovat už při výstavbě celého provozu, a proto pro dodatečnou ekologizaci provozu není vhodné. Většina nevýhod z provedení high dust se u low dust nevyskytuje. Jelikož se za odličovačem popílku téměř ve spalínách popílek nevyskytuje, není potřeba velkých otvorů katalyzátorů, ofukování kvůli popílku a tím se snižuje velikost reaktoru SCR. Nedochází ani k abrazi katalyzátorů. Životnost katalyzátorů je oproti high dust provedení výrazně vyšší, ale ve spalínách se stále vyskytuje SO_2 a dochází k jeho

oxidaci a konečně přeměně na kyselinu sírovou. Otrava katalyzátoru a oxidace povrchů je tedy stále problémem. Nevýhodou je nutnost ohřívat spaliny, pokud nemají dostatečnou teplotu. Při ohřívání spalin se používá výměník spaliny/spaliny typu LJUNGSTRÖM, odchozí spaliny ohřívají spaliny příchozí. Ohřívák spalin dokrývá tepelnou ztrátu spalin v samotném ohříváku a reaktoru SCR [8].

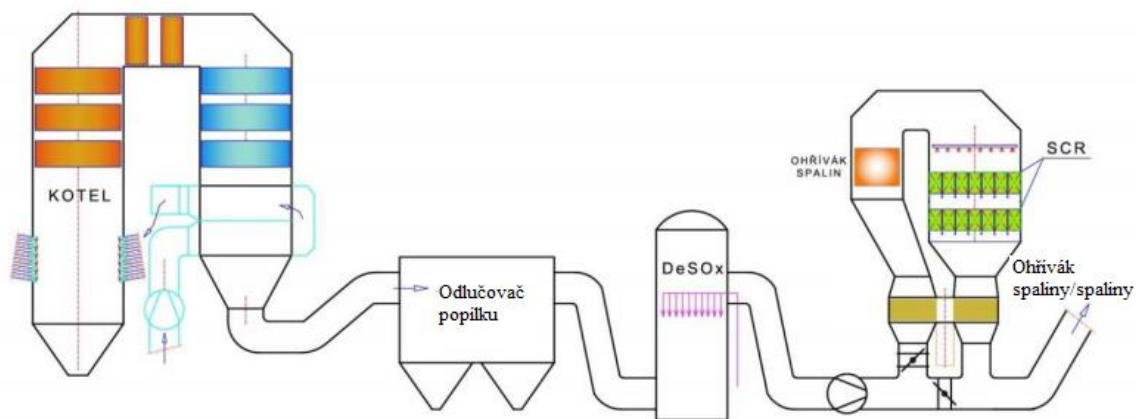


Obr. 5.4 Provedení Low dust [9]

5.4 Provedení Tail-end

U provedení tail-end je reaktor umístěn až za odsiřovací jednotkou, znázornění umístění je vidět na obrázku 5.5. Toto provedení zachovává některé výhody low dust systému, tedy hlavně nízký obsah popílku ve vstupních spalinách. Ovšem oproti low dust je díky umístění za odsiřovací jednotkou obsah SO_2 ve spalinách zanedbatelný. Díky těmto skutečnostem je životnost katalyzátorů výrazně vyšší než u ostatních dvou systémů. Velkou nevýhodou tohoto provedení je nízká teplota vstupních spalin, po průchodu spalin odsiřováním se jejich teplota pohybuje mezi 60 až 100 °C. Při takové teplotě je nemožné, aby proběhla katalytická redukce oxidů dusíku, proto musí spaliny procházet rotačním výměníkem spaliny/spaliny typu Ljungström. Při průchodu výměníkem a reaktorem dochází k tepelným ztrátám, a proto musí být instalován ohřívák, který tyto ztráty dokryje. Ohřívák může být proveden různě - nejčastěji se používá ohřívání pomocí páry nebo ohřívání hořákem na plyn. Roztok čpavku je vstříkován až za ohřívákem. Ohřívák sice zvyšuje provozní náklady, ale díky nižším nákladům na výměnu a údržbu katalyzátorů je tento nedostatek dostatečně vykompenzován. Varianta tail-end (i některé low-dust) téměř nepřerušuje provoz kotle po celou dobu výstavby systému. Pokud je v areálu dostatečné místo pro výstavbu systému, je tail-end schopný napojit se na stávající zařízení provozu. V minulost nebyly systémy tail-

end v přílišné oblibě kvůli vysokým nákladům na ohřev spalin. Díky pokroku se však teplota nutná pro katalytickou reakci oxidů dusíku a čpavku výrazně snížila, a proto je výstavba tohoto systému ve světě na vzestupu. V současné době je to nejvhodnější řešení pro provoz s mokrou cestou odlučování oxidů síry [8].



Obr. 5.5 Provedení Tail-end [9]

5.5 Odůvodnění použití SCR Tail-end v teplárně Trmice

Zvolení technologie SCR odstraňuje nevýhody nekatalytické redukce - tedy hlavně nízkou účinnost, dlouhou dobu realizace při odstaveném kotli, vysoké riziko ovlivnění dalších technologií a vyšší investiční náklady. Zvolení varianty SCR Tail-end je oproti provedení high dust výhodnější. Kdyby byla použita varianta high dust, znamenalo by to delší dobu realizace při odstaveném kotli, kratší životnost katalyzátorů a vysoké investiční náklady. Výhodná je i možnost připojení dalších kotlů na denitrifikační reaktor, je možné připojit až čtyři kotle.

6 Výpočet spalin

Aby bylo možné provést výpočet množství tepelné energie, které je potřeba dodat spalinám, je nutné nejprve provést výpočet množství jednotlivých složek nacházejících se ve spalinách. To lze provést pomocí stechiometrického výpočtu spalování.

Při spalování paliva dochází k přeměně chemicky vázané energie paliva na tepelnou energii o vysokém teplotním potenciálu. Při spalovacím procesu jsou pracovními látkami palivo, oksyličovadlo a zplodiny spalovacího pochodu (plynného i tuhého skupenství). Právě stechiometrickým výpočtem spalin lze zjistit množství potřebného vzduchu pro spalování, množství vzniklých spalin na konci reakce a jejich složení. Při dokonalém spalování dochází oksyličování všech hořlavých složek paliva (CO_2 , H_2O , SO_2), ovšem při nedokonalém spalování zůstávají ve spalinách nespálené složky a nespálený uhlík [7].

6.1 Stechiometrický výpočet spalin

K výpočtu je potřeba znát prvkové složení paliva. Hořlavé složky v jednom kilogramu paliva při spalování jsou získány z prvkového složení hořlaviny, proto platí:

$$C^{daf} + H^{daf} + S^{daf} + O^{daf} + N^{daf} = 1 \quad (\text{kg/kg}) \quad (6.1)$$

Nesmíme opomenout obsah vody W^r a popela A^r v surovém stavu, proto je rovnice o tyto dva prvky doplněna:

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r + W^r + A^r = 1 \quad (\text{kg/kg}) \quad (6.2)$$

Pokud tedy budeme vycházet z těchto dvou rovnic, můžeme při znalosti prvkového složení hořlaviny zjistit obsah jednotlivých prvků při surovém stavu. Dostáváme následující rovnice:

$$\begin{aligned}
 C^r &= C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \\
 H^r &= H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \\
 S^r &= S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \\
 O^r &= O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \\
 N^r &= N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r)
 \end{aligned}
 \tag{6.3} \text{ (kg/kg)}$$

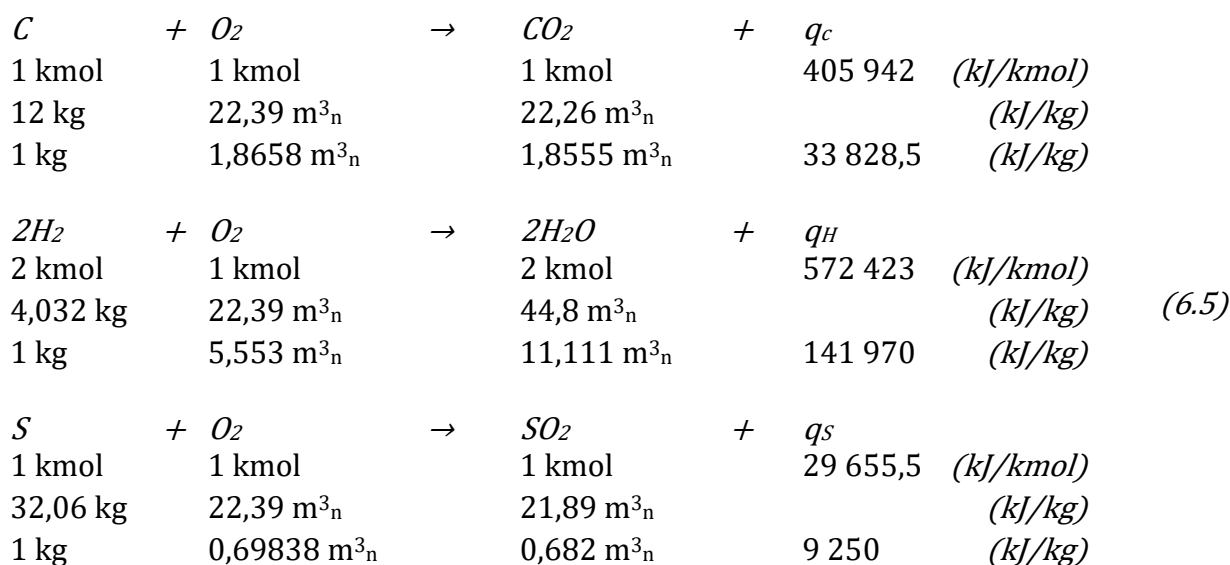
Indexy

r surový (spalovaný stav)
 daf hořlavina (palivo bez vody a popela)
 d sušina, suchý stav

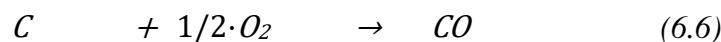
Obsah popela v surovém stavu se určí následující rovnicí:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r) \tag{6.4} \text{ (kg/kg)}$$

Při dokonalém spalování platí následující stechiometrické vztahy:



Při nedokonalém spalování pak platí:



Ve skutečnosti však proces spalování neprobíhá jako přímá oxidace, tak jak je uvedeno v rovnicích 6.5 a 6.6, ale probíhá jako řetězová reakce po etapách. Nicméně pro tepelnou a hmotnostní bilanci spalovacího procesu si s přímou oxidací prvků, odvozenými rovnicemi pro množství spotřebovaného kyslíku a vzniklých spalin naprosto vystačíme. V tabulce 6.1

jsou uvedeny molární hodnoty hořlaviny a zplodin po spalování, tyto molární hodnoty jsou používány v následujících rovnicích a výpočtech.

Tab. 6.1 Molární hodnoty hořlaviny a zplodin po spalování [7]

Látka		Molární hmotnost (MM) (kg/kmol)	Objem (MV) (m^3_n /kmol)	Hustota ρ (kg/ m^3_n)
Uhlík	<i>C</i>	12,01	-	-
Vodík	<i>H₂</i>	2,016	22,43	0,08988
Síra	<i>S</i>	32,06	-	-
Kyslík	<i>O₂</i>	32	22,39	1,4292
Dusík čistý	<i>N₂</i>	28,016	22,4	1,2507
Dusík ze vzduch	<i>N₂</i>	28,16	22,4	1,2571
Argon	<i>Ar</i>	39,944	22,39	1,784
Vzduch	<i>vz</i>	28,964	222,4	1,293
Oxid uhličitý	<i>CO₂</i>	44,01	22,26	1,9771
Oxid siřičitý	<i>SO₂</i>	64,06	21,89	2,9264
Vodní pára	<i>H₂O</i>	18,016	22,4	0,80429

Pro výpočet teoretické (tedy $\lambda=1$) spotřeby suchého spalovacího vzduchu platí:

$$V_{vzs} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left[\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} + \frac{O^r}{32,00} \right] \quad (m^3_n/kg) \quad (6.7)$$

Pokud V_{vzs} vynásobíme součinitelem vlhkosti vzduchu ν , tak získáme teoretickou spotřebu vlhkého spalovacího vzduchu.

$$V_{vzt} = V_{vzs} \cdot \nu \quad (m^3_n/kg) \quad (6.8)$$

Součinitel vlhkosti vzduchu ν je dán tímto vztahem:

$$\nu = 1 + \frac{\varphi \cdot p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad (-) \quad (6.9)$$

kde p'' (Pa) je tlak páry v závislosti na teplotě vzduchu, φ (-) je relativní vlhkost a p_c (Pa) je tlak vlhkého vzduchu (obvykle se tento tlak bere jako tlak barometrický).

Skutečná spotřeba suchého spalovacího vzduchu se rovná hodnotě V_{vzst} vynásobené koeficientem přebytku vzduchu ve spalinách λ .

$$V_{vzs} = V_{vzst} \cdot \lambda \quad (m^3_n/kg) \quad (6.10)$$

Skutečnou spotřebu vlhkého spalovacího vzduchu určíme vynásobením teoretické spotřeby vlhkého spalovacího vzduchu V_{vzvt} koeficientem přebytku vzduchu ve spalinách λ .

$$V_{vzv} = V_{vzvt} \cdot \lambda \quad (m^3_n/kg) \quad (6.11)$$

Teoretické složení spalin získáme z následujících rovnic:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{vzst} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.12)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \quad (m^3_n/kg) \quad (6.13)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7809 \cdot V_{vzst} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.14)$$

$$V_{Ar} = 0,0093 \cdot V_{vzst} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.15)$$

$$V_{H_2O} = 11,1111 \cdot H^r + 1,2433 \cdot W^r + (v-1) \cdot V_{vzst} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.16)$$

Pokud sečteme jednotlivé výsledky z rovnic 6.12 až 6.15 získáme teoretické množství suchých spalin.

$$V_{snt} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.17)$$

Pokud k této hodnotě přičteme množství vodní páry ve spalinách V_{H_2O} , získáme teoretické množství vlhkých spalin.

$$V_{smt} = V_{snt} + V_{H_2O} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.18)$$

Pro výpočet skutečného objemu suchých spalin provedeme následující korekci:

$$V_{sns} = V_{snt} + (\lambda - 1) \cdot V_{vzst} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.19)$$

Pro výpočet skutečného objemu vlhkých spalin provedeme další korekci:

$$V_{shsv} = V_{smt} + (\lambda - 1) \cdot V_{vzvt} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.20)$$

Pro výpočet koncentrace SO₂ ve spalinách (suchých) použijeme následující vztah:

$$C_{SO_2} = 1,9979 \cdot 1000000 \cdot \frac{S_r}{V_{sns}} \quad (m^3_n/kg) \quad (6.21)$$

Význam některých použitých indexů: vz – vzduch, sn – spaliny, s – suché, v – vlhké, t – teoretické

6.2 Výpočet spalin kotlů K5 a K6

Výpočet budeme provádět jen pro jeden kotel, jelikož jsou oba kotle naprosto stejné. Výsledné hodnoty spalin tedy platí pro oba kotle. Jelikož jsou oba kotle zaústěny do jednoho kouřovodu bude celkové množství spalin v kouřovodu dvojnásobné. Tyto výpočty jsou důležité pro další části práce, jelikož se dozvíme množství spalin, které je potřebné přehřát pro reakci v SCR reaktoru.

K dispozici máme procentuální zastoupení látek obsažených v 1 kilogramu vzorku uhlí. Toto uhlí je používáno jako palivo v kotlech K5 a K6. Konkrétně se jedná o hnědouhelné palivo s označením SD PS2. Jeho složení je vidět v tabulce 6.2. V tabulce ovšem nejsou

všechny hodnoty nutné pro výpočet (chybí hodnoty pro spalinový stav), proto použijeme vztahy z rovnice 6.3 a 6.4.

Tab. 6.2 Podíl prvků v uhlí SD PS2

Složení paliva:	spalovaný stav (r)	sušina (d)	hořlavina (daf)
Výhřevnost Q _r (MJ/kg)	11,5		
Voda veškerá W (%)	26		
Popel A (%)		40	
Vodík H (%)			6
Uhlík C (%)			67,9
Dusík N (%)			1,1
Kyslík O (%)			22,8
Síra prchavá S (%)			2,2

Provedeme vzorový výpočet popela a uhlíku v surovém stavu:

$$A^r_{\%} = A^d_{\%} \cdot (1 - W^r) = 40 \cdot \left(1 - \frac{26}{100}\right) = 29,6 \%$$

$$C^r_{\%} = C^{daf}_{\%} \cdot (1 - W^r - A^r) = 67,9 \cdot \left(1 - \frac{29,6}{100} - \frac{26}{100}\right) = 30,1476 \%$$

Po vypočtení všech rovnic a převedení z procentuálního podílu na podíl kg/kg poté získáme hodnoty uvedené v tabulce 6.3. V následujícím výpočtu je uveden příklad převodu u uhlíku.

$$C^r = \frac{C^r_{\%}}{100} = \frac{30,1479}{100} = 0,301476$$

Tab. 6.3 Vypočtené hodnoty surového podílu prvků v palivu

Složení paliva	Surový podíl prvků v palivu (-)
W ^r	0,260000
A ^r	0,296000
H ^r	0,026640
C ^r	0,301476
N ^r	0,004884
O ^r	0,101232
S ^r	0,009768

Před dalším výpočtem je potřeba zvolit hodnoty, jedná se o součinitel vlhkosti vzduchu a přebytek vzduchu ve spalínách. Tyto hodnoty byly nastaveny tak, abychom se blížili co nejvíce skutečným podmínkám kotle. Pro určení součinitele vlhkosti vzduchu bylo vycházeno z podmínek teploty vzduchu 20 °C, relativní vlhkosti vzduchu 65 % a barometrického tlaku 94800 Pa. Všechny tyto parametry byly dosazeny do rovnice 6.9. V tabulce 6.4 jsou uvedené hodnoty koeficientů používaných při dalším výpočtu.

Tab. 6.4 Koeficienty zvolené pro výpočet

Součinitel vlhkosti vzduchu ν	1,0156566 (-)
Účinnost spalování uhlí η_u	0,85 (-)
Přebytek vzduchu ve spalínách λ (při $O_2=6\%$)	1,4 (-)

Dále dosazujeme postupně do rovnic 6.7 až 6.21. Výsledky z těchto rovnic jsou v tabulce 6.5 a 6.6. V následujících dvou rovnicích jsou uvedeny výpočty pro výpočet teoretické spotřeby suchého spalovacího vzduchu V_{vzst} a teoretické množství CO_2 ve spalínách.

$$V_{vzst} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left[\frac{0,31476}{12,011} + \frac{0,026640}{4,032} + \frac{0,0009768}{32,066} + \frac{0,101232}{32,00} \right] = 3,08311 \text{ m}_n^3 / \text{kg}$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,31476 + 0,0003 \cdot 3,08311 = 0,559650 \text{ m}_n^3 / \text{kg}$$

Tab. 6.5 Vypočtené hodnoty spalín část 1.

Vypočtený parametr	Vypočtená hodnota	Jednotka
V_{vzst}	3,083114289	m_n^3/kg
V_{vzs}	3,131385376	m_n^3/kg
V_{vzs}	4,316360004	m_n^3/kg
V_{vzv}	4,383939526	m_n^3/kg
V_{CO_2}	0,559650405	m_n^3/kg
V_{SO_2}	0,006668125	m_n^3/kg
V_{N_2}	2,411508901	m_n^3/kg

Tab. 6.6 Vypočtené hodnoty spalin část 2.

Vypočtený parametr	Vypočtená hodnota	Jednotka
V_{Ar}	0,028672963	m^3_n/kg
V_{H_2O}	0,667528791	m^3_n/kg
V_{snst}	3,006500395	m^3_n/kg
V_{snvt}	3,674029186	m^3_n/kg
V_{sns}	4,23974611	m^3_n/kg
V_{snv}	4,926583336	m^3_n/kg
C_{SO_2}	4603	mg/m_n^3

Tyto vypočtené hodnoty spalin jsou však hodnoty, které vzniknou při spálení jednoho kilogramu uhlí. Abychom zjistili, kolik spalin v kotli celkem vznikne, musíme tyto hodnoty vynásobit množstvím uhlí, které je v kotli spalováno. Budeme počítat s maximálním tepelným výkonem kotle 132 MW_t. Pomocí maximálního tepelného výkonu kotle P_{kmax} , výhřevnosti uhlí Q_r a účinnosti spalování uhlí η_u , zjistíme, kolik uhlí se spálí v kotli za jednu hodinu.

$$M_U = \frac{3600 \cdot P_{kmax}}{\eta_u \cdot Q_r} = \frac{3600 \cdot 132}{0,85 \cdot 11,5} = 48613,8 \text{ kg/h}$$

Tedž, když je známo množství uhlí, které je za hodinu spáleno, je možné dopočítat celkové množství spalin vytvořených v jednom kotli za jednu hodinu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.7. V rovnici 6.28 si spočteme množství vzniklého popela a strusky M_{PS} , které vznikne za hodinu parovozy kotle.

$$M_{PS} = M_U \cdot A^r = 48613,8 \cdot 0,296 = 14389,68 \text{ kg/h}$$

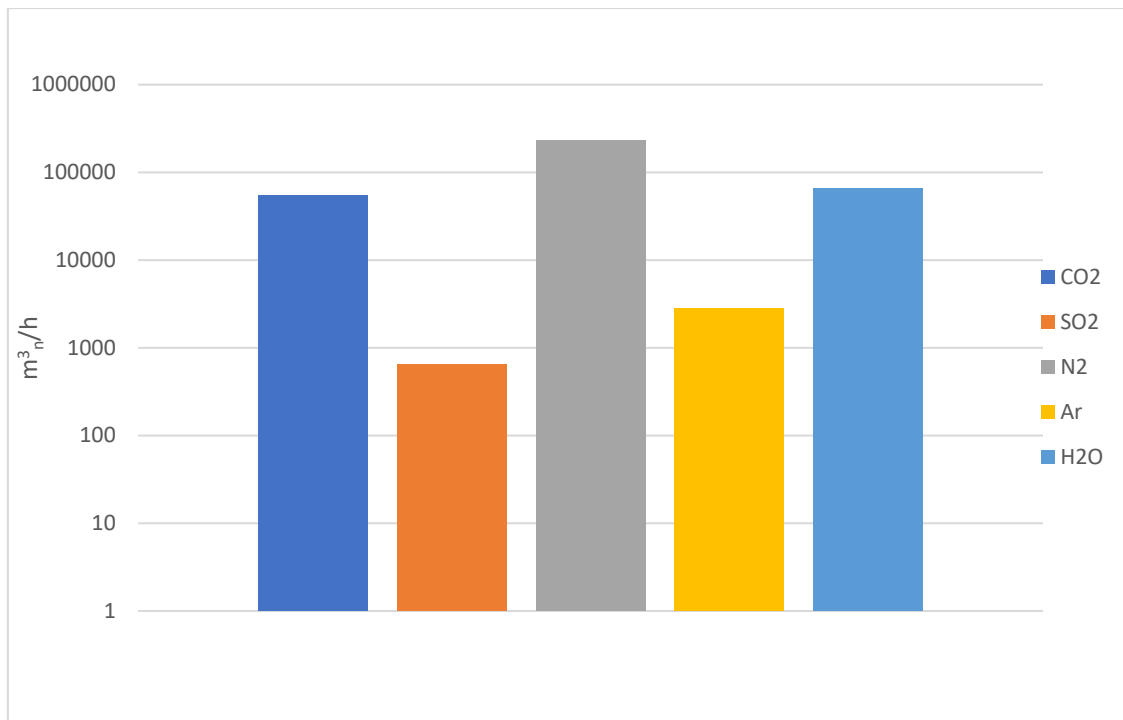
Tab. 6.7 Vypočtené hodnoty vzniklých spalin v jednom kotli za hodinu provozu, při maximální tepelném výkonu kotle

Vypočtený parametr	Vypočtená hodnota	Jednotka
V_{vzst}	149881,9014	m^3_n/h
V_{vzs}	152228,5424	m^3_n/h
V_{vzs}	209834,6620	m^3_n/h
V_{vzv}	213119,9593	m^3_n/h
V_{co2}	27206,7329	m^3_n/h
V_{so2}	324,1629	m^3_n/h
V_{n2}	117232,6114	m^3_n/h
V_{Ar}	1393,9017	m^3_n/h
V_{H2O}	32451,1111	m^3_n/h
V_{snst}	146157,4089	m^3_n/h
V_{snvt}	178608,5200	m^3_n/h
V_{sns}	206110,1694	m^3_n/h
V_{snv}	239499,937	m^3_n/h
C_{SO2}	4603	mg/m_n^3

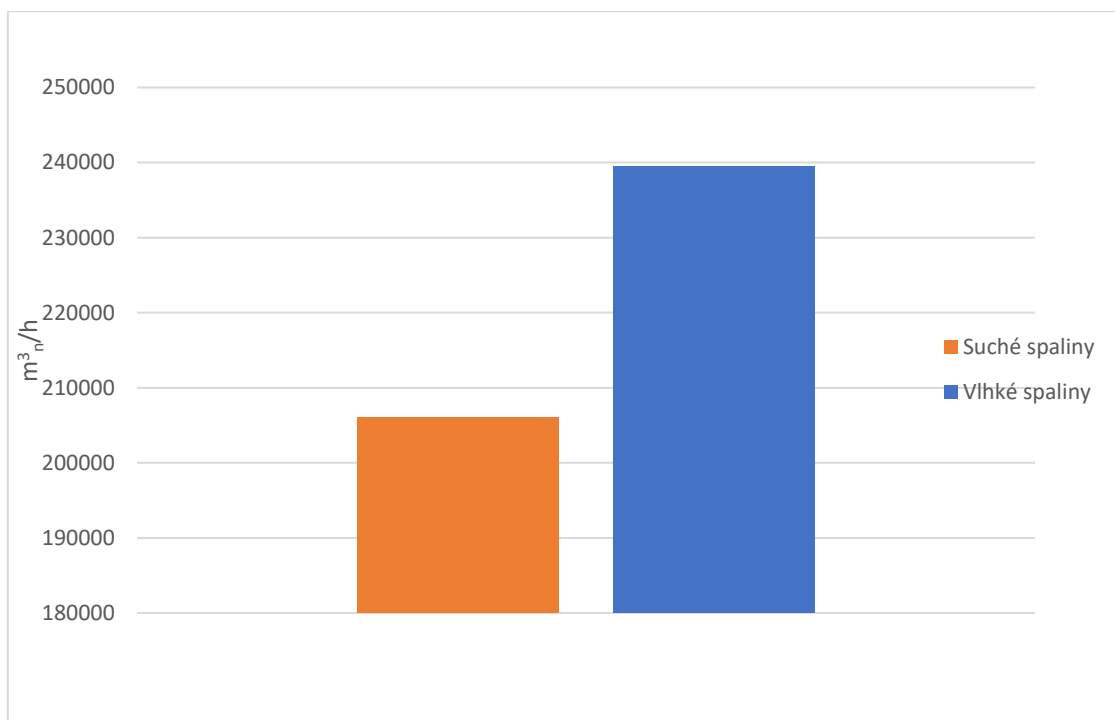
Jelikož máme oba kotle zaústěny do jednoho kouřovodu, je množství spalin při jejich maximálním tepelném výkonu ve společném kouřovodu dvojnásobné než množství spalin od jednoho kotle. Hodnoty spalin při provozu obou kotlů jsou v tabulce 6.8.

Vypočtený parametr	Vypočtená hodnota	Jednotka	Vypočtený parametr	Vypočtená hodnota	Jednotka
V_{vzst}	299763,803	m^3_n/h	V_{Ar}	2787,803366	m^3_n/h
V_{vzs}	304457,085	m^3_n/h	V_{H2O}	64902,2223	m^3_n/h
V_{vzs}	419669,324	m^3_n/h	V_{snst}	292314,8178	m^3_n/h
V_{vzv}	426239,919	m^3_n/h	V_{snvt}	357217,0401	m^3_n/h
V_{co2}	54413,4657	m^3_n/h	V_{sns}	412220,3389	m^3_n/h
V_{so2}	648,32581	m^3_n/h	V_{snv}	478999,874	m^3_n/h
V_{n2}	234465,223	m^3_n/h	C_{SO2}	9205,969741	m^3_n/h

Tab. 6.7 Vypočtené hodnoty vzniklých spalin v obou kotlích, při maximální tepelném výkonu kotlů



Graf. 6.1 Teoretické zastoupení jednotlivých prvků ve spalinách při společném provozu K5 a K6



Graf. 6.1 Porovnání množství suchých a vlhkých spalin při provozu K5 a K6 (při přebytku vzduchu 6 %)

7 Výpočet množství tepelné energie potřebné pro ohřátí spalin a reagentu

Aby bylo možné reaktor SCR Tai-end provozovat, je nutné ohřát spaliny, které do reaktoru vstupují. Ohřátí je realizováno pomocí regenerativního rotačního výměníku spaliny/spaliny, odchozí spaliny odevzdají podstatnou část své tepelné energie vstupujícím spalinám. Nicméně kvůli tepelným ztrátám ve výměníku a samotném reaktoru je potřebné spaliny navíc dodatečně ohřát v ohříváku spalin. Dále je také zajistit i ohřátí čpavkového roztoku, který je do spalin vsřikován. Je tedy nutné zjistit, kolik tepelné energie je třeba dodat spalinám a čpavkovému roztoku. Tyto výsledky budou použity při návrhu technologie ohřevu.

7.1 Výpočet tepelné energie nutné k ohřátí spalin

Při průchodu spalin SCR jednotkou dochází k tepelným ztrátám. V reaktoru dochází k tepelným ztrátám 5 °C a ve výměníku ke ztrátám 20 °C, celkově je tedy spaliny nutné přehřát o 25 °C. Spaliny tudíž ohříváme z teploty 180 °C na teplotu 205 °C. Při výpočtu použijeme výsledky dosažené v kapitole 6. Abychom se přiblížili co nejvíce provozním podmínkám, změníme přebytek vzduchu ve spalinách λ na hodnotu 1,68 (při přebytku kyslíku 8,5 %). Jelikož se spaliny přehřívají až za odsiřovací jednotkou, zanedbáme při výpočtu množství oxidu siřičitého.

Pro výpočet je nutné znát entalpie 1m^3_n plynu při dané teplotě, tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tab. 7.1 Hodnoty entalpii plynů při dané teplotě

Plyn	Hodnota entalpie při dané teplotě			Jednotky
	180 °C	200 °C	205 °C	
CO ₂	319	357	366	kJ/m ³ _n
N ₂	236	260	267	kJ/m ³ _n
H ₂ O	273	304	312	kJ/m ³ _n
vzduch	237	261	268	kJ/m ³ _n
Ar	167	186	191	kJ/m ³ _n

Nejprve spočítáme teoretickou (tedy $\lambda = 1$) entalpii spalin pro vstupní teplotu 180 °C.

$$\dot{i}_{s180} = V_{CO_2} \cdot \dot{i}_{nCO_2}^{180} + V_{N_2} \cdot \dot{i}_{nN_2}^{180} + V_{Ar} \cdot \dot{i}_{nAr}^{180} + V_{H_2O} \cdot \dot{i}_{nH_2O}^{180} = 936,14 \text{ kJ/kg}$$

Tutéž operaci provedeme pro teplotu 200 °C a 205°C.

$$\dot{i}_{s200} = V_{CO_2} \cdot \dot{i}_{nCO_2}^{200} + V_{N_2} \cdot \dot{i}_{nN_2}^{200} + V_{Ar} \cdot \dot{i}_{nAr}^{200} + V_{H_2O} \cdot \dot{i}_{nH_2O}^{200} = 1035,05 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{i}_{s205} = V_{CO_2} \cdot \dot{i}_{nCO_2}^{205} + V_{N_2} \cdot \dot{i}_{nN_2}^{205} + V_{Ar} \cdot \dot{i}_{nAr}^{205} + V_{H_2O} \cdot \dot{i}_{nH_2O}^{205} = 1061,22 \text{ kJ/kg}$$

Nyní můžeme provést převod z teoretické hodnoty entalpie na hodnotu skutečnou s přebytkem vzduchu ve spalínách $\lambda=1,68$. Součinitel vlhkost vzduchu zůstává na hodnotě 1,0157.

$$i_{s180} = \dot{i}_{s180} + (1,68-1) \cdot V_{vzst} \cdot \dot{i}_{nVzduch}^{180} \cdot \nu = 1441,22 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{s200} = \dot{i}_{s200} + (1,68-1) \cdot V_{vzst} \cdot \dot{i}_{nVzduch}^{200} \cdot \nu = 1590,81 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{s205} = \dot{i}_{s205} + (1,68-1) \cdot V_{vzst} \cdot \dot{i}_{nVzduch}^{205} \cdot \nu = 1630,93 \text{ kJ/kg}$$

Nyní spočítáme množství entalpie, která je potřeba k ohřátí spalin.

$$i_{180-200} = i_{s200} - i_{s180} = 149,59 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{200-205} = i_{s205} - i_{s200} = 40,12 \text{ kJ/kg}$$

$$i_{180-200} = i_{s200} - i_{s180} = 149,59 \text{ kJ/kg}$$

Posléze můžeme zjistit množství tepelné energie při maximálním výkonu obou kotlů. Při maximálním výkonu každý kotel spálí 48,6 tun uhlí za hodinu, dva kotle tedy spálí 97,2 tun za hodinu.

$$Q_{Tohř} = 2 \cdot M_U \cdot i_{s180-205} = 18,44 \text{ GJ/h}$$

Nutný tepelný příkon pro ohřátí se tedy rovná 5,12 MW_t.

7.2 Výpočet tepelné energie nutné k ohřátí reagentu

Jako reagent se bude používat 30 % vodní roztok čpavku. Tento čpavkový roztok je potřeba ohřát z teploty 20 °C na teplotu vstupních spalin (tedy 205 °C). K výpočtu je potřeba znát měrnou tepelnou kapacitu vody c_v , měrnou tepelnou kapacitu vodní páry c_{pv} , výparné teplo vody r_v , měrnou tepelnou kapacitu kapalného čpavku $c_{\check{c}}$, měrnou tepelnou kapacitu plynného čpavku $c_{p\check{c}}$ a výparné teplo čpavku $r_{\check{c}}$. Hodnoty těchto veličin jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tab. 7.2 Koeficienty nutné pro výpočet tepla nutného k ohřátí reagentu

Koeficient pro výpočet	Hodnota	Jednotka
Měrná tepelná kapacita vody c_v	4,20	kJ/kg·K
Měrná tepelná kapacita vodní páry c_{pv}	2,00	kJ/kg·K
Výparné teplo vody r_v	2 257,00	kJ/kg
Měrná tepelná kapacita kapalného čpavku $c_{\check{c}}$	4,73	kJ/kg·K
Měrná tepelná kapacita plynného čpavku $c_{p\check{c}}$	2,06	kJ/kg·K
Výparné teplo čpavku $r_{\check{c}}$	1 370,00	kJ/kg

Při plném výkonu obou kotlů se spotřebuje 180 kilogramů reagentu za hodinu provozu. Za hodinu je tedy v 30 % roztoku čpavku množství vody M_V rovno 126 kilogramů a množství čpavku 54 kilogramů.

Nejdříve spočteme množství tepla nutného k ohřevu a odparu čpavku $Q_{\check{c}}$.

$$Q_{\check{c}} = M_{\check{c}} \cdot c_{\check{c}} \cdot (100 - t_1) + M_{\check{c}} \cdot r_{\check{c}} + M_{\check{c}} \cdot c_{p\check{c}} \cdot (t_2 - 100) = 106,093 \text{ MJ/h}$$

Obdobně spočteme i množství tepla nutného k ohřevu a odparu čpavku Q_V

$$Q_V = M_V \cdot c_V \cdot (100 - t_1) + M_V \cdot r_V + M_V \cdot c_{pv} \cdot (t_2 - 100) = 353,178 \text{ MJ/h}$$

Celkové množství tepla Q_{reag} potřebného k ohřátí pro ohřátí reagentu získáme součtem Q_C a Q_V .

$$Q_{reag} = Q_C + Q_V = 0,4593 \text{ GJ/h}$$

8 Návrh ohřevu

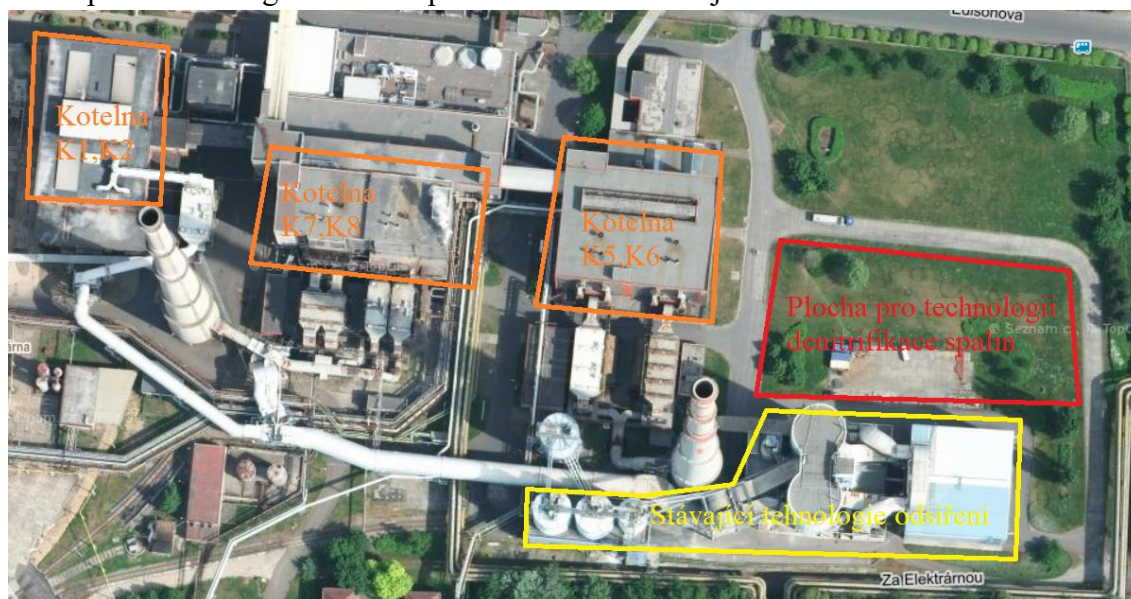
Pro ohřev reagentu a spalin je tedy potřeba celkem dodat 18,8993 GJ/h. Aby bylo možné dodat toto množství tepelné energie je potřeba navrhnout vhodný způsob, jak bude toto teplo spalinám a reagentu dodáno. Vezmeme v úvahu tři varianty ohřevu:

1. Ohřev pomocí zemního plynu
2. Ohřev pomocí středotlaké páry
3. Ohřev pomocí redukované vysokotlaké páry

U každé varianty ohřevu si rozebereme její výhody a nevýhody, taktéž provedeme výpočet spotřebované množství ohřivacího média za hodinu provozu denitrifikační jednotky. Nakonec provedeme srovnání všech variant a zdůvodníme, proč byla výsledná varianta vybrána právě pro teplárnu Trmice.

Kromě tří výše uvedených variant ohřevu by mohl být použit ještě například elektrický ohřev. Elektrický ohřev by byl značně ztrátový, jelikož by bylo zapotřebí provést několikanásobnou transformaci energie, přitom u každé transformace vznikají ztráty.

Při návrhu technologie budeme vycházet z umístění denitrifikační technologie na volný prostor před technologií odsíření spalin. Na obrázku 8.1 je vidět situační schéma.



Obr. 8.1 Situační schéma [10]

8.1 Ohřev pomocí zemního plynu

Aby bylo možné provádět ohřev spalováním zemního plynu, je potřeba vybudovat v areálu dodatečné plynové potrubí a redukční stanici plynu. Vzhledem k faktu, že je v teplárně Trmice již napaječ na zemní plyn zhotoven (z důvodu najíždění kotlů a budoucí plynové kotelny), přívodní potrubí by tedy nebylo velkého rozsahu. Do přívodního potrubí zemního plynu v místě mezi objektem skladu a kotelny K1, by bylo nutné nainstalovat nové hrdlo, které by bylo nutné osadit soustavou uzavíracích armatur. Na tuto soustavu bude napojeno nové potrubí zemního plynu, které bude dále vedeno pomocí ocelových konstrukcí do nové technologie denitrifikace spalin, kde bude zaústěno do redukční stanice plynu. Samotné ohřívání spalin by bylo prováděno přímým spalováním zemního plynu do proudu nevyčištěných spalin. V této variantě bude k vypařování čpavkového roztoku použit také zemní plyn. Samotný plynový ohřívák bude tvořen ocelovou skříní vstupem a výstupem spalin. Soustava plynových hořáků bude vystavena po obvodu komory ohříváku. Obvodový plášť tepelného výměníku bude tepelně izolován od jeho okolí. V této variantě bude k vypařování čpavkového roztoku použit taktéž zemní plyn.

Tato varianta tedy není technologicky ani realizačně příliš náročná. Nicméně při spalování plynu v plynových hořácích vznikají další spaliny, které by bylo nutné denitrifikovat. Velkou nevýhodou je také vysoká cena zemního plynu (v dnešní bouřlivé době se může cena plynu v průběhu let i výrazně zvýšit).

Nyní si spočteme spotřebované množství plynu za jednu hodinu provozu denitrifikační jednotky. Vycházet budeme z průměrné výhřevnosti zemního plynu $33,5 \text{ MJ/m}^3$. Pro výpočet použijeme upravenou bilanční rovnici. Pro účinnost ohřevu $\eta_{\text{ohřevu}}$ zvolíme hodnotu 0,92.

$$M_{\text{zem.plyn}} = \frac{Q_{\text{ohřev}}}{Q_{\text{zem.plyn}} \cdot \eta_{\text{ohřevu}}} = 613,21 \text{ m}^3/\text{h}$$

Jedná se o zjednodušený výpočet, pro skutečnou spotřebu plynu bychom museli zahrnout například rychlost proudění spalin a znát přesnou geometrii ohříváku. Nicméně pro orientační výpočet nám toto zjednodušení stačí. Skutečná spotřeba plynu by se spočetla po výběru dodavatele technologie.

8.2 Ohřev pomocí středotlaké páry

Pro ohřev pomocí středotlaké páry je potřeba vybudovat nový parovod. Tento parovod bude napojen na stávající rozdělovače páry v kotelně K7/K8. Do rozvaděče bude instalováno nové hrdlo, které bude osazeno soustavou uzavíracích armatur s elektropohonem. Kotle K5 a K6 jsou středotlaké kotle, každý je schopen vyrobit 50 tun páry za hodinu. Parovod bude veden pomocí ocelových konstrukcí až do denitrifikační jednotky. Z parovodu bude vyvedena odbočka do čpavkového hospodářství, kde bude pára použita k odpaření čpavkového reagentu. Přiváděná pára bude mít tlak 1,8 MPa a teplotu 350 °C. Potrubí pro kondenzát bude z reaktoru SCR vedeno po stávajících mostních lávkách až do chemické úpravy vody, kde bude ukládána v nádrži. Kondenzát bude mít tlak 0,3 MPa a teplotu 45 °C. Pro dopravu kondenzátu je potřeba instalovat čerpadlo. Parní ohřivací výměník spalin bude tvořen ocelovou skříní s vnitřní trubkovnicí s výstupem a vstupem páry a kondenzátu. Dále bude tvořen výstupem a vstupem nevyčištěných spalin. Ohřívák bude mít tepelnou izolaci a bude osazen obslužnými lávkami.

Toto řešení vyžaduje zásah do stávající technologie parovodů, tudíž bude potřeba při realizaci provést odstávku dotčených technologií. Při použití této varianty se také snižuje maximální parní výkon kotlů, jelikož musíme část páry odebírat pro novou technologii. Výhodou je naopak jednoduchost ohřivací technologie, jelikož není potřeba udržovat další spalovací zařízení. Nespornou výhodou je také nízká cena uhlí, které slouží k výrobě páry pro ohřev.

Nyní provedeme výpočet množství středotlaké páry pro ohřátí spalin a reagentu. Vycházet budeme z bilanční rovnice. Při ohřevu bude pára izobaricky kondenzovat. Pro účinnost ohřevu $\eta_{ohřevu}$ zvolíme hodnotu 0,97.

$$M_{páry.sřt} = \frac{Q_{ohřev}}{(i_{páry.sřt} - i_{kond}) \cdot \eta_{ohřevu}} = 6498,94 \text{ kg/h}$$

8.3 Ohřev pomocí redukované vysokotlaké páry

Provedení ohřevu pomocí redukované vysokotlaké páry je podobné jako u ohřevu se středotlakou párou. V tomto případě je ovšem pára přiváděna z kotle K5 a K6, tudíž je tlak

a teplota páry vyšší, tlak páry je 13,6 MPa a teplota 535 °C. K objektu denitrifikace spalin bude potřeba vybudovat nové parní potrubí. Dále bude nutné instalovat do stávajícího vysokotlakého rozdělovače ostré páry kotle K5 a K6 nová hrdla. Hrdla budou vybavena uzavíracími armaturami, které budou poháněny elektropohonem. Na armatury bude napojeno potrubí, které přivede páru do nové redukční stanice. Nová redukční stanice bude instalována v blízkosti rozdělovačů ostré páry kotlů K5 a K6. Samotná redukční stanice bude tvořena soustavou regulačních a uzavíracích armatur. Na redukční stanici bude napojeno nové parní potrubí, které bude vedeno po nových pomocných ocelových konstrukcích až do nové technologie denitrifikace spalin, kde bude napojen na parní ohřívák spalin. Páru je potřeba redukovat na požadovaný tlak z důvodu technologických (parovod a ohřívák spalin) a bezpečnostních. Z parního potrubí se provede odbočka i do čpavkového hospodářství, kde bude pára využita k odpaření reagentu. Taktéž bude třeba vybudovat potrubí k odvodu kondenzátu. Trasa potrubí kondenzátu se z velké části bude shodovat s trasou parního potrubí, tedy až do odklonu k chemické úpravě. Po odklonu se bude potrubí vést po stávajících mostních konstrukcích. Kondenzát bude v úpravě uložen v zásobníku kondenzátu a bude mít teplotu 45 °C a tlak 0,3 MPa. Pro dopravu kondenzátu je potřeba instalovat čerpadlo. Parní ohřívák spalin bude instalován nad regeneračním výměníkem spaliny/spaliny. Samotný parní ohřívák bude tvořen ocelovou skříní s vnitřní trubkovnicí, vstupem páry, výstupem kondenzátu, vstupem a výstupem nevyčištěných spalin. Vnější plášť parního ohříváku bude tepelně izolován od okolního prostředí. Kompakt ohříváku bude instalován v ocelové konstrukci, konstrukce bude vybavena obslužnými lávkami.

Výhody a nevýhody této varianty se téměř shodují s variantou ohřevu pomocí středotlaké páry. Ale vzhledem k tomu, že je kotelna K5/K6 blíže nové technologii, bude parovod kratší než v předchozí variantě. A protože má vysokotlaká pára větší entalpii než středotlaká pára, bude potřeba její menší množství, a tudíž průměr potrubí pro páru a kondenzát bude menší než v předchozím případě. Nicméně v tomto případě budou potřeba dodatečné náklady pro vybudování redukční stanice.

Nyní provedeme výpočet množství potřebné páry pro ohřev spalin a reagentu. Páru o parametrech 13,5 MPa a teplotě 535 °C, budeme redukovat na tlak 8,5 MPa (může se změnit dle požadavků dodavatele technologie). Pro účinnost ohřevu $\eta_{ohřevu}$ zvolíme hodnotu 0,97.

$$M_{\text{páry.r.vt}} = \frac{Q_{\text{ohřev}}}{(i_{\text{páry.r.vt}} - i_{\text{kond}}) \cdot \eta_{\text{ohřevu}}} = 5934,22 \text{ kg/h}$$

8.4 Výběr výsledné technologie ohřevu

Po konzultaci s techniky teplárny Trmice byla vybrána varianta s ohřevem pomocí redukované vysokotlaké páry. Tato varianta byla vybrána kvůli převážejícím výhodám oproti ostatním variantám. Oproti variantě s plynovým ohřevem je výhodnější díky nižší výsledné ceně paliva. V porovnání ke středotlaké variantě má výsledné řešení kratší parní potrubí, zároveň se díky menšímu množství nutné páry zmenší průměr potrubí páry a kondenzátu.

9 Analýza energetické náročnosti nové technologie na účinnost teplárny Trmice

Odběr páry pro novou technologii denitrifikace nepochybně zhorší účinnost teplárenského cyklu. Odběrem páry snížíme jak maximální množství vyrobené elektrické energie, tak i maximální množství odběru tepla pro teplárny. O kolik procent se toto zhoršení projeví, zjistíme pomocí výpočtu účinnosti teplárenského cyklu bez odběru páry pro denitrifikaci. Poté provedeme výpočet s odběrem páry pro denitrifikaci. Pro výpočet účinnosti teplárenského cyklu platí vzorec (9.1).

$$\eta_r^{el} = \frac{3600 \cdot \sum P_{el} + \sum Q_o}{\sum Q_K} \cdot 100 \quad (\%) \quad (9.1)$$

kde: $\sum P_{el}$ - je suma elektrických výkonů generátorů (W)

$\sum Q_o$ - je suma odběrů tepla pro teplárny (J)

$\sum Q_K$ - je suma dodaného tepla všemi kotly do cyklu (J)

Elektrický výkon generátoru spočteme:

$$P_G = \frac{M_T (i_1 - i_2) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} \quad (W) \quad (9.2)$$

kde: M_T - množství páry vstupující do turbíny (kg/h)

i_1 - entalpie vstupní páry (kJ/kg)

i_2 - entalpie páry na výstupu turbíny (kJ/kg)

η_g - účinnost generátoru (-)

η_m - mechanická účinnost (-)

Množství tepla, které je dodáno jednotlivými kotly do cyklu, spočteme pomocí bilanční rovnice. Z bilanční rovnice získáme množství tepla sníženého o hodnotu účinnosti kotle, proto rovnici podělíme právě hodnotou účinnosti kotle, abychom získali skutečnou hodnotu dodaného tepla.

$$Q_K = \frac{M_K \cdot (i_a - i_{nv})}{\eta_K} \quad (J/h) \quad (9.3)$$

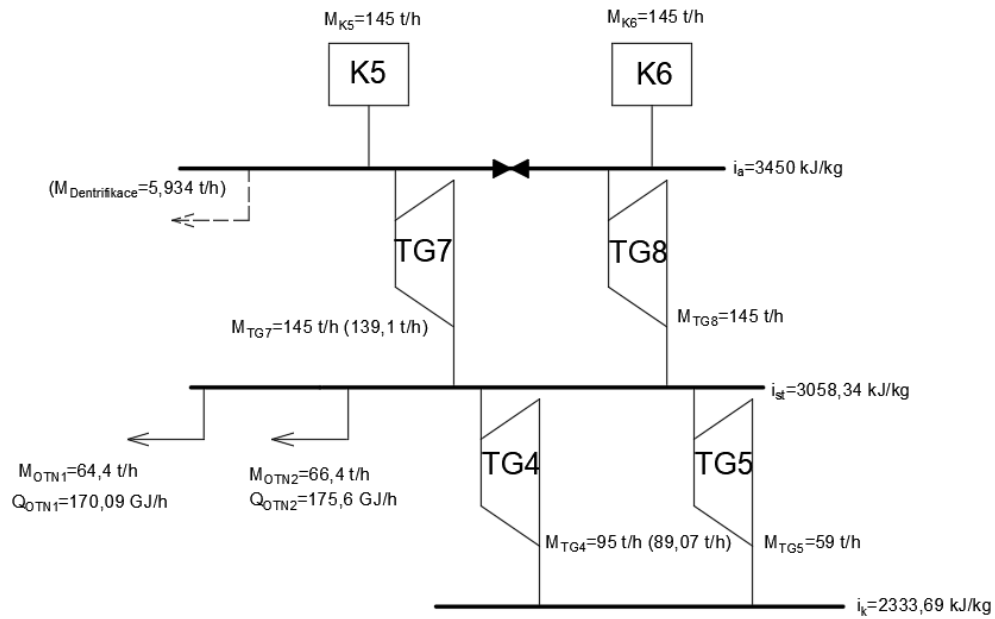
kde: M_T - množství páry vstupující do turbíny (kg/h)

i_a - entalpie admisní páry vystupující z kotle (kJ/kg)

i_{nv} - entalpie napájecí vody vstupující do kotle (kJ/kg)

η_K - účinnost kotle (-)

Při výpočtu budeme vyházet z následující situace – provoz pouze kotlů K5 a K6; oba kotle pracují na svůj maximální výkon; pouze dva odběry tepla pro teplárenství; pracují pouze turbíny TG7, TG8, TG4 a TG5. Hmotnostní průtoky a entalpie jsou uvedeny na obrázku 9.1. Hodnoty uvedené v závorce platí pro provoz s odběrem páry pro denitrifikaci. Pokud není uvedena žádná hodnota v závorce, platí stejná hodnota jako pro situaci bez odběru. Při výpočtu budeme měnit pouze množství páry vstupující do jednotlivých turbín, takže odběr tepla pro teplárenství je fixní.



Obr. 9.1 Schéma pro výpočet účinnosti

Nejprve provedeme výpočet účinnosti pro situaci bez odběru páry pro denitrifikaci. Jako první spočteme elektrický výkon jednotlivých generátorů, pomocí rovnice (9.2). Pro hodnotu účinnosti $\eta_g \cdot \eta_m$ budeme uvažovat hodnotu 0,92.

$$P_{elG7} = \frac{M_{TG7} \cdot (i_a - i_{st}) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 14,51 \text{ MW}$$

$$P_{elG8} = \frac{M_{TG8} \cdot (i_a - i_{st}) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 14,51 \text{ MW}$$

$$P_{elG4} = \frac{M_{TG4} \cdot (i_{st} - i_k) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 17,59 \text{ MW}$$

$$P_{elG5} = \frac{M_{TG5} \cdot (i_{st} - i_k) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 10,93 \text{ MW}$$

Nyní spočteme sumu jednotlivých elektrických výkonů.

$$\sum P_{el} = P_{elG7} + P_{elG8} + P_{elG4} + P_{elG5} = 57,54 \text{ MW}$$

Dále spočteme teplo dodané do cyklu kotly. Jelikož jsou oba kotle stejné, vynásobíme rovnici dvěma. Entalpie napájecí vody je 710,6 kJ/kg, účinnost obou kotlů je 0,85.

$$Q_K = 2 \cdot \frac{M_{K5} \cdot (i_a - i_{nv})}{\eta_K} = 902,4 \text{ GJ/h}$$

Suma odběru tepla pro teplárenství.

$$\sum Q_O = Q_{OTN1} + Q_{OTN2} = 345,69 \text{ MW}$$

Následně můžeme dosadit do rovnice (9.1) a spočítáme účinnost cyklu bez odběru páry pro denitrifikaci.

$$\eta_t^{el} = \frac{3600 \cdot \sum P_{el} + \sum Q_O}{\sum Q_K} \cdot 100 = 61,26 \%$$

Následně provedeme stejný výpočet pro variantu s odběrem páry pro technologii denitrifikace. Hodnoty spočtené v předchozím případě budou stejné, tedy až na hodnotu elektrického výkonu, kde se hodnota změní kvůli změně množství páry.

Provedeme tedy výpočet elektrického výkonu pro turbínu TG7 a TG4, u kterých se změní množství protékající páry.

$$P_{elG7} = \frac{M_{TG7} \cdot (i_a - i_{st}) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 13,92 \text{ MW}$$

$$P_{elG4} = \frac{M_{TG4} \cdot (i_{st} - i_k) \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{3600} = 16,49 \text{ MW}$$

Nyní spočteme změněnou sumu elektrických výkonů.

$$\sum P_{el}'' = P_{elG7}'' + P_{elG8}'' + P_{elG4}'' + P_{elG5}'' = 55,85 \text{ MW}$$

Dosadíme znovu do vzorce pro výpočet účinnosti teplotního cyklu.

$$\eta_t^{el''} = \frac{3600 \cdot \sum P_{el}'' + \sum Q_O}{\sum Q_K} \cdot 100 = 60,58 \%$$

Nakonec spočteme rozdíl účinností.

$$\Delta\eta_t^{el} = \eta_t^{el} - \eta_t^{el''} = 0,68 \%$$

Při odběru páry pro novou technologii denitrifikace se tedy účinnost teplotního cyklu sníží o 0,68 %, výroba elektrické energie klesne o 1,69 MW.

Závěr

V této diplomové práci jsem řešil návrh technologie přehřevu spalin pro denitrifikaci v zařízení DeNOx Tail-end. Aby bylo možné tuto technologii vůbec navrhnout, je nutné znát množství spalin, které je potřeba přehřát. Samotný výpočet množství spalin jsem provedl pomocí stechiometrických rovnic. Výpočet byl proveden pro kotle K5 a K6, přičemž jsem vycházel z maximálního výkonu obou kotlů. Po provedení výpočtů bylo zjištěno, že při maximálním výkonu oba kotle dohromady vyprodukují za hodinu 239 499,94 m³_n vlhkých spalin. Po známém množství spalin bylo možné vypočítat množství tepla, které je potřeba spalinám a reagentu dodat. Spaliny je nutné přehřát ze vstupní teploty 180 °C na 205 °C, reagent v podobě 30 % vodního roztoku čpavku je potřeba vypařit z teploty 20 °C na tutéž teplotu jako spaliny, tedy 205°C. Při výpočtu bylo vycházeno z entalpie jednotlivých prvků, které jsou ve spalinách a reagentu obsaženy. Množství tepla potřebného k ohřátí spalin za hodinu provozuje je 18,44 GJ, teplo potřebné k vypaření reagentu je 0,46 GJ, celkem je tedy potřeba do nové technologie denitrifikace dodat 18,9 GJ/h. Při návrhu bylo porovnáváno několik variant jak zajistit ohřátí spalin a reagentu. Mezi uvažované varianty patřily tyto: ohřev pomocí zemního plynu, ohřev pomocí středotlaké páry a ohřev pomocí redukované vysokotlaké páry. Po srovnání všech variant ohřevu byl nakonec vybrán způsob ohřevu pomocí redukované vysokotlaké páry. Tato varianta byla vybrána hlavně kvůli nižším provozním nákladům (oproti variantě se zemním plynem) a menšímu množství potřebné páry (oproti varianty se středotlakou párou). Pro výslednou variantu bylo spočteno, že pro ohřev bude potřeba dodat do denitrifikace 5 934 kg páry za hodinu provozu. Ovšem kvůli odběru této páry se sníží celková účinnost teplotního cyklu teplárny Trmice. Aby se zjistilo, o kolik procent se toto snížení projeví, byla spočtena účinnost teplotního cyklu s odběrem páry a bez odběru páry. V modelové situaci, pro který byl výpočet prováděn, bylo zjištěno zhoršení účinnost o 0,68 %, přičemž výroba elektrické energie klesla o 1,69 MW. Technologie denitrifikace spalin teplárny Trmice by podle aktuálních plánů měla být zprovozněna v roce 2023.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČEZ a.s., *100 let Teplárny Trmice, jak šel čas* 1. vyd. Bratislava: ČEZ, a. s., útvar komunikace a marketing, 2014. 12 s.
- [2] Teplárna Trmice [online]. [Cit. 10.8.2011]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/mene-smogu-na-ustecku-1398374>
- [3] IPPC. ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2019-12-27]. dostupné z: https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/xsp/.ibmmodres/domino/OpenAttachment/ippc/ippc4.nsf/1222BB96F2472164C12584E7002B65A4/Files/cez_-_teplarna_trmice_-_ip_z29_n_-_uplne_zneni.doc
- [4] DVORSKÝ, Emil a HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie* 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 288 s. ISBN 80-7300-118-7.
- [5] Nejlepší dostupné techniky, MPO [online]. [cit. 2020-01-15]. dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/nejlepsi-dostupne-techniky-bat--224368/>
- [6] Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách v oblasti Velká spalovací zařízení, MPO [online]. [cit. 2020-01-15]. dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/9/2017-1442_LCP-BAT-Cs.pdf
- [7] IBLER, Zděň a kolektiv. *Technický průvodce energetika* 1. vyd. Praha: BEN, 2002. 616 s. ISBN 80-7300-026-
- [8] EPA air pollution control cost manual: Sixth edition, U.S. Environmental Protection Agency [online]. [cit. 2020-04-17]. dostupné z: https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/c_allchs.pdf
- [9] DeNOx SCR – Selektivní katalytická redukce, Provyko [online]. [cit. 2020-04-20]. dostupné z: <https://provyko.cz/cs/formular/scr.pdf>
- [10] Letecký snímek teplárna Trmice, Mapy.cz [online]. [cit. 2020-05-11]. dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=13.9877408&y=50.6449772&z=18&base=ophoto&q=tapl%C3%A1rna%20trmice>

Příloha 1

Systémy environmentálního řízení zahrnuje:

- i. angažovanost vedoucích pracovníků včetně vrcholného vedení;
- ii. vedením stanovená environmentální politika, jejíž součástí je neustálé zdokonalování environmentálního profilu zařízení;
- iii. plánování a zavádění nezbytných postupů a obecných a konkrétních cílů ve spojení s finančním plánováním a investicemi;
- iv. zavádění postupů se zvláštním důrazem na:
 - a) strukturu a odpovědnost
 - b) nábor, školení, informovanost a způsobilost
 - c) komunikaci
 - d) zapojení zaměstnanců
 - e) dokumentaci
 - f) účinné řízení procesů
 - g) plánované programy pravidelné údržby
 - h) připravenost a reakci na mimořádné situace
 - i) zajištění souladu s právními předpisy v oblasti životního prostředí;
- v. kontrola výsledků a provádění nápravných opatření se zvláštním důrazem na:
 - a) monitorování a měření (viz též referenční zpráva JRC o monitorování emisí do ovzduší a vody ze zařízení podle směrnice IED (ROM))
 - b) nápravná a preventivní opatření
 - c) vedení záznamů
 - d) nezávislý (pokud možno) vnitřní a vnější audit, kterým se zjistí, zda EMS odpovídá plánovaným opatřením a zda je řádně prováděn a dodržován;
- vi. přezkum EMS, který provádí vrcholné vedení, a posouzení, zda je systém i nadále vhodný, přiměřený a účinný;
- vii. sledování vývoje čistějších technologií;
- viii. zohlednění environmentálních dopadů konečného vyřazení zařízení z provozu ve fázi návrhu nového provozu a po dobu jeho fungování, včetně:
 - a) nepoužívání podzemních konstrukcí
 - b) zahrnutí vlastností, které usnadňují demontáž
 - c) výběru povrchových úprav, které lze snadno dekontaminovat
 - d) použití takové konfigurace zařízení, které snižuje množství zachycených chemických látek na minimum a usnadňuje jejich odvádění a čištění
 - e) navrhování flexibilních samostatných zařízení, která umožňují postupné uzavírání
 - f) používání biologicky rozložitelných a recyklovatelných materiálů, kde je to možné;
- ix. pravidelné porovnávání s odvětvovými referenčními hodnotami.

Konkrétně pro toto odvětví je také důležité zvažovat tyto prvky EMS, které jsou v daných případech popsány v příslušných BAT:
- x. programy zajištění kvality/kontroly kvality, aby bylo zaručeno, že vlastnosti všech paliv budou plně stanoveny a kontrolovány (viz BAT 9);

- xi. plán řízení s cílem snížit emise do ovzduší a/nebo do vody za jiných než běžných provozních podmínek, včetně doby uvádění do provozu a ukončování provozu (viz BAT 10 a BAT 11);
- xii. plán pro nakládání s odpady s cílem zajistit, aby se zabránilo vzniku odpadu, aby byl odpad připraven k opětovnému použití, recyklován či jinak využit, včetně použití technik uvedených v BAT 16;
- xiii. systematická metoda zjišťování a řešení potenciálních nekontrolovaných a/nebo neplánovaných emisí do životního prostředí, zejména:
 - a) emisí do půdy a podzemních vod z manipulace s palivy, přísadami, vedlejšími produkty a odpady a z jejich skladování
 - b) emisí souvisejících se samovolným ohřevem a/nebo samovznícením paliv při skladování a manipulaci s nimi;
- xiv. plán na regulaci emisí prachu pro předcházení rozptýleným emisím z nakládky, vykládky a skladování paliv, zbytků a přísad a/nebo z manipulace s nimi, nebo pokud to není možné, pro jejich snížení;
- xv. plán regulace hluku tam, kde se očekává nebo kde trvale působí hluk na citlivé receptory, včetně:
 - a) protokolu pro provádění monitorování hluku na hranici zařízení
 - b) programu snižování hluku
 - c) protokolu pro reakci na události související s hlukem obsahujícího vhodná opatření a lhůty
 - d) přezkoumání událostí souvisejících s hlukem z minulosti, nápravných opatření a poskytnutí informací o událostech souvisejících s hlukem dotčeným stranám;
- xvi. pro spalování, zplyňování nebo spoluspalování zápachajících látek plán regulace zápachu, včetně:
 - a) protokolu monitorování zápachu;
 - b) v případě potřeby programu pro odstranění zápachu s cílem určit a odstranit nebo snížit uvolňování zápachu
 - c) protokolu k zaznamenávání událostí souvisejících se zápachem a vhodných opatření a lhůt
 - d) přezkoumání událostí souvisejících se zápachem z minulosti, nápravných opatření a poskytnutí informací o událostech souvisejících se zápachem dotčeným stranám.

Příloha 2

BAT 3 – monitorování klíčových provozních parametrů

Proudící médium	Parametr(y)	Monitorování
Spaliny	Průtok	Pravidelné nebo kontinuální zjišťování
	Obsah kyslíku, teplota a tlak	Pravidelné nebo kontinuální měření
	Obsah vodní páry (*)	
Odpadní vody z čištění spalin	Průtok, pH a teplota	Kontinuální měření

(*) Kontinuální měření obsahu vodní páry ve spalinách není nutné, pokud jsou spaliny zařazené do vzorku před analýzou vysušeny.

BAT 4 – monitorování emisí:

Látka/Parametr	Palivo/proces/druh spalovacího zařízení	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení	Norma(y) (*)	Minimální frekvence monitorování (*)	Monitorování související s
NH ₃	— Pokud je používána selektivní katalytická redukce (SCR) a/nebo selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně (*) (*)	BAT 7
NO _x	— Černé a/nebo hnědé uhlí včetně spoluspalování odpadu — Tuhá biomasa a/nebo rašelina včetně spoluspalování odpadu — Kotle a motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Spalovací turbíny na plynový olej — Kotle, motory a turbíny na zemní plyn — Plyny vznikající při výrobě železa a oceli — Procesní paliva z chemického průmyslu — Zařízení IGCC	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně (*) (*)	BAT 20 BAT 24 BAT 28 BAT 32 BAT 37 BAT 41 BAT 42 BAT 43 BAT 47 BAT 48 BAT 56 BAT 64 BAT 65 BAT 73
	— Spalovací zařízení na těžebních plošinách	Všechny velikosti	EN 14792	Jednou ročně (*)	BAT 53
N ₂ O	— Černé a/nebo hnědé uhlí v kotlech s cirkulujícím fluidním ložem — Tuhá biomasa a/nebo rašelina v kotlech s cirkulujícím fluidním ložem	Všechny velikosti	EN 21258	Jednou ročně (*)	BAT 20 BAT 24

Látka/Parametr	Palivo/proces/druh spalovacího zařízení	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení	Norma(y) ⁽¹⁾	Minimální frekvence monitorování ⁽²⁾	Monitorování související s
CO	<ul style="list-style-type: none"> — Černé a/nebo hnědé uhlí včetně spoluspalování odpadu — Tuhá biomasa a/nebo rašelina včetně spoluspalování odpadu — Kotle a motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Spalovací turbíny na plynový olej — Kotle, motory a turbíny na zemní plyn — Plyny vznikající při výrobě železa a oceli — Procesní paliva z chemického průmyslu — Zařízení IGCC 	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně ⁽³⁾ ⁽⁵⁾	BAT 20 BAT 24 BAT 28 BAT 33 BAT 38 BAT 44 BAT 49 BAT 56 BAT 64 BAT 65 BAT 73
	— Spalovací zařízení na těžebních plošinách	Všechny velikosti	EN 15058	Jednou ročně ⁽⁶⁾	BAT 54
SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> — Černé a/nebo hnědé uhlí včetně spoluspalování odpadu — Tuhá biomasa a/nebo rašelina včetně spoluspalování odpadu — Kotle na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Spalovací turbíny na plynový olej — Plyny vznikající při výrobě železa a oceli — Procesní paliva z chemického průmyslu — Zařízení IGCC 	Všechny velikosti	Obecné normy EN a EN 14791	Kontinuálně ⁽³⁾ ⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾	BAT 21 BAT 25 BAT 29 BAT 34 BAT 39 BAT 50 BAT 57 BAT 66 BAT 67 BAT 74
SO ₃	— Pokud se používá SCR	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou ročně	—
Plynné chloridy, vyjádřené jako HCl	<ul style="list-style-type: none"> — Černé a/nebo hnědé uhlí — Procesní paliva z chemického průmyslu 	Všechny velikosti	EN 1911	Jednou za tři měsíce ⁽³⁾ ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾	BAT 21 BAT 57
	— Tuhá biomasa a/nebo rašelina	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně ⁽¹²⁾ ⁽¹³⁾	BAT 25
	— Spoluspalování odpadu	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně ⁽³⁾ ⁽¹³⁾	BAT 66 BAT 67

Látka/Parametr	Palivo/proces/druh spalovacího zařízení	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení	Norma(y) ⁽¹⁾	Minimální frekvence monitorování ⁽²⁾	Monitorování související s
HF	— Černé a/nebo hnědé uhlí — Procesní paliva z chemického průmyslu	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou za tři měsíce ⁽³⁾ ⁽¹⁰⁾ ⁽¹¹⁾	BAT 21 BAT 57
	— Tuhá biomasa a/nebo rašelina	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou ročně	BAT 25
	— Spoluspalování odpadu	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně ⁽³⁾ ⁽¹³⁾	BAT 66 BAT 67
Prach	— Černé a/nebo hnědé uhlí — Tuhá biomasa a/nebo rašelina — Kotle na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Plyny vznikající při výrobě železa a oceli — Procesní paliva z chemického průmyslu — Zařízení IGCC — Motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Spalovací turbíny na plynový olej	Všechny velikosti	Obecné normy EN a EN 13284-1 a EN 13284-2	Kontinuálně ⁽³⁾ ⁽¹⁴⁾	BAT 22 BAT 26 BAT 30 BAT 35 BAT 39 BAT 51 BAT 58 BAT 75
	— Spoluspalování odpadu	Všechny velikosti	Obecné normy EN a EN 13284-2	Kontinuálně	BAT 68 BAT 69
Kovy a polokovy kromě rtuti (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V, Zn)	— Černé a/nebo hnědé uhlí — Tuhá biomasa a/nebo rašelina — Kotle a motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej	Všechny velikosti	EN 14385	Jednou ročně ⁽¹⁵⁾	BAT 22 BAT 26 BAT 30
	— Spoluspalování odpadu	< 300 MW _{th}	EN 14385	Jednou za šest měsíců ⁽¹⁰⁾	BAT 68 BAT 69
		≥ 300 MW _{th}	EN 14385	Jednou za tři měsíce ⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁹⁾	
— Zařízení IGCC	≥ 100 MW _{th}	EN 14385	Jednou ročně ⁽¹⁵⁾	BAT 75	
Hg	— Černé a/nebo hnědé uhlí včetně spoluspalování odpadu	< 300 MW _{th}	EN 13211	Jednou za tři měsíce ⁽¹⁰⁾ ⁽¹⁷⁾	BAT 23
		≥ 300 MW _{th}	Obecné normy EN a EN 14884	Kontinuálně ⁽¹³⁾ ⁽¹⁸⁾	
	— Tuhá biomasa a/nebo rašelina	Všechny velikosti	EN 13211	Jednou ročně ⁽¹⁹⁾	BAT 27
	— Spoluspalování odpadu s tuhousu biomasou a/nebo rašelinou	Všechny velikosti	EN 13211	Jednou za tři měsíce ⁽¹⁰⁾	BAT 70
	— Zařízení IGCC	≥ 100 MW _{th}	EN 13211	Jednou ročně ⁽²⁰⁾	BAT 75

Látka/Parametr	Palivo/proces/druh spalovacího zařízení	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení	Norma(y) ⁽¹⁾	Minimální frekvence monitorování ⁽²⁾	Monitorování související s
TVOC	— Motory na těžký topný olej a/nebo plynový olej — Procesní paliva z chemického průmyslu	Všechny velikosti	EN 12619	Jednou za šest měsíců ⁽¹⁰⁾	BAT 33 BAT 59
	— Spoluspalování odpadu s černým uhlím, hnědým uhlím, tuhou biomasou a/nebo rašelinou	Všechny velikosti	Obecné normy EN	Kontinuálně	BAT 71
Formaldehyd	— Zemní plyn v zážehových motorech se spalováním chudé směsi a dvoupalivových motorech	Všechny velikosti	Norma EN není k dispozici	Jednou ročně	BAT 45
CH ₄	— Motory na zemní plyn	Všechny velikosti	EN ISO 25139	Jednou ročně ⁽²¹⁾	BAT 45
PCDD/F	— Procesní paliva z chemického průmyslu — Spoluspalování odpadu	Všechny velikosti	EN 1948-1, EN 1948-2, EN 1948-3	Jednou za šest měsíců ⁽¹⁰⁾ ⁽²²⁾	BAT 59 BAT 71

Příloha 3

BAT 12 – techniky k optimalizaci energetické účinnosti a jejich použitelnost:

Technika	Popis	Použitelnost
a. Optimalizace spalování	Optimalizace spalování minimalizuje obsah nespálených látek ve spalinách a v tuhých zbytcích ze spalování	Obecně použitelné
b. Optimalizace podmínek pracovního média	Provoz při nejvyšším možném tlaku a teplotě pracovního média (plynu nebo páry) v rámci omezení vyplývajících např. z řízení emisí NO _x nebo požadovaných vlastností energie	
c. Optimalizace parního cyklu	Provoz při nižším tlaku na výfuku z turbíny využitím co nejnižší teploty chladicí vody kondenzátoru v rámci konstrukčních podmínek.	
d. Minimalizace spotřeby energie	Minimalizace interní spotřeby energie (např. vyšší účinnost čerpadla přírodní vody).	

Technika	Popis	Použitelnost
e. Předehřev spalovacího vzduchu	Opětovné využití tepla získaného ze spalin pro předehřev vzduchu používaného při spalování	Obecně použitelné v rámci omezení vyplývajících z nutnosti řídit emise NO _x
f. Předehřev paliva	Předehřev paliva s využitím znovu získaného tepla	Obecně použitelné v rámci omezení vyplývajících z konstrukce kotle a nutnosti řídit emise NO _x
g. Pokročilý řídicí systém	Počítačové řízení hlavních parametrů spalování umožňuje zlepšit účinnost spalování	Obecně použitelné pro nové jednotky. Použitelnost pro staré jednotky může být omezena potřebou dodatečného vybavení spalovacího systému a/nebo řídicího a ovládacího systému
h. Předehřev přívodní vody s využitím znovu získaného tepla	Předehřev vody přiváděné z parního kondenzátoru s využitím znovu získaného tepla předtím, než je znovu využita v kotli	Použitelné pouze pro parní okruhy, nikoli pro horkovodní kotle Použitelnost pro stávající jednotky může být omezena v důsledku omezení vyplývajících z konfigurace zařízení a množství znovu využitelného tepla
i. Využití tepla formou kogenerace (KVET)	Využití tepla (hlavně z parního systému) pro výrobu horké vody/páry určené k použití v průmyslových procesech/činnostech nebo ve veřejné síti dálkového vytápění Další získání tepla k opětovnému využití je možné z(e): — spalin — chlazení roštu — cirkulujícího fluidního lože	Použitelné v rámci omezení vyplývajících z místní poptávky po teple a elektřině. Použitelnost může být omezená v případě plynových kompresorů s nepředvídatelným provozním tepelným profilem
j. Připravenost na KVET		Použitelné pouze na nové jednotky, u kterých je realistický potenciál pro budoucí využití tepla v blízkosti jednotky
k. Kondenzátor spalin		Obecně použitelné pro jednotky KVET za předpokladu, že existuje dostatečná poptávka po nízkoteplotním teple
l. Akumulace tepla	Uchovávání akumulovaného tepla v režimu KVET	Použitelné pouze pro zařízení KVET Použitelnost může být omezená v případě nízké poptávky po teple
m. Mokrý komín		Obecně použitelné pro nové a stávající jednotky vybavené mokrým odsiřovacím snalin (FGD)

Technika		Popis	Použitelnost
n.	Vypouštění emisí chladicími věžemi	Vypouštění emisí do ovzduší z chladicí věže, nikoli přes vyhrazený komín	Použitelné pouze pro jednotky vybavené mokřým odsífováním spalin (FGD), u kterých je nutný ohřev spalin před vypuštěním a jejichž chladicím systémem je chladicí věž
o.	Předsušení paliva	Snížení obsahu vlhkosti v palivu před jeho spalováním pro zlepšení podmínek spalování	Použitelné na spalování biomasy a/nebo rašeliny v rámci omezení vyplývajících z rizik samovolného vznícení (např. obsah vlhkosti rašeliny je v celém dodavatelském řetězci udržován nad 40 %). Dodatečné vybavení stávajících zařízení může být omezeno energetickou hodnotou, kterou lze získat navíc ze sušení, a omezenými možnostmi dodatečného vybavení vyplývajících z konstrukce kotle nebo konfigurace zařízení
p.	Minimalizace tepelných ztrát	Minimalizace ztrát odpadním teplem, např. těch, ke kterým dochází prostřednictvím strusky nebo které lze snížit izolací sálavých zdrojů	Použitelné pouze pro spalovací jednotky používající tuhá paliva a pro zplyňovací jednotky/jednotky IGCC
q.	Pokročilé materiály	Použití pokročilých materiálů, u kterých se prokázalo, že jsou schopny odolávat vysokým provozním teplotám a tlakům, a díky tomu dosáhnout vyšší účinnosti využití páry/procesu spalování	Použitelné pouze pro nová zařízení
r.	Modernizace parních turbín	Sem patří techniky, jako je zvyšování teploty a tlaku střednětlaké páry, přidání nízkotlaké turbíny a úpravy geometrie lopatek rotoru turbíny	Použitelnost může být omezena poptávkou, stavem páry a/nebo omezenou životností zařízení
s.	Superkritické a ultrasuperkritické stavy páry	Použití parního okruhu, včetně parních ohřívacích systémů, ve kterém pára může dosáhnout tlaku vyššího než 220,6 baru a teplot nad 374 °C v případě superkritického stavu a nad 250–300 barů a teplot nad 580–600 °C v případě ultrasuperkritického stavu	Použitelné pouze pro nové jednotky $\geq 600 \text{ MW}_{\text{th}}$ provozované $> 4\,000 \text{ h/rok}$. Neaplikuje se, jestliže účelem jednotky je výroba páry o nízké teplotě a/nebo tlaku ve zpracovacím průmyslu. Neaplikuje se na spalovací turbíny a motory na výrobu páry v režimu KVET. U jednotek spalujících biomasu může být použitelnost u některých druhů biomasy omezena vysokoteplotní korozí

Příloha 4

BAT 17 – nejlepší dostupné techniky ke snížení hluku:

Technika		Popis	Použitelnost
a.	Provozní opatření	Tato opatření zahrnují: <ul style="list-style-type: none"> — důkladnější inspekci a údržbu zařízení — zavírání dveří a oken uzavřených prostor, pokud je to možné — zkušenou obsluhu zařízení — neprovozování hlučných činností v noci, pokud je to možné — opatření pro regulaci hlučnosti během údržby 	Obecně použitelné
b.	Zařízení s nízkou hlučností	Potenciálně sem patří kompresory, čerpadla a kotouče	Obecně použitelné, jestliže je zařízení nové nebo vyměněné
c.	Útlum hluku	Šíření hluku lze omezit tím, že se mezi zdroj hluku a jeho příjemce umístí překážky. Mezi vhodné překážky patří ochranné stěny, ochranné valy a budovy.	Obecně použitelné u nově budovaných zařízení. Ve stávajících provozech může být možnost umístění překážek omezena nedostatkem volného prostoru
d.	Zařízení pro regulaci hluku	To zahrnuje: <ul style="list-style-type: none"> — tlumiče hluku — izolaci zařízení — uzavření hlučného zařízení — zvuková izolace budov 	Použitelnost může být omezena nedostatkem volného prostoru
e.	Vhodné umístění zařízení a budov	Hlučnost je možné omezit zajištěním větší vzdálenosti mezi zdrojem hluku a jeho příjemcem a použitím budov jako protihlukových stěn	Obecně použitelné u nově budovaných zařízení. U stávajících provozů může být možnost přemístění zařízení a výrobních jednotek omezena nedostatkem volného místa či nadměrnými náklady