



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KONCEPČNÍ PROJEKT REKONSTRUKCE UHELNÉHO ZDROJE

CONCEPTUAL PROJECT OF COAL SOURCE RECONSTRUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kocourek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Tomáš Kocourek**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Koncepční projekt rekonstrukce uhelného zdroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V tepelných elektrárnách a teplárnách se transformací primární energie paliva (uhlí, plyn, biomasa.....) získává tepelná energie ve formě páry. Tato energie je následně transformována v parní turbíně, kde se přemění na energii mechanickou a pomocí generátoru je generován elektrický výkon. Zvýšení účinnosti transformace primární energie paliva lze dosáhnout při teplotěnském režimu.

Cíle diplomové práce:

- uhlí jako palivo, proč se od něj ustupuje, možné náhrady,
- popis stávajícího uhelného zdroje, koncepční návrh nového zdroje,
- bilanční výpočty stávajícího a nového zdroje,
- technologické schéma nového zdroje.

Seznam doporučené literatury:

KRBEK, Jaroslav. Projektování tepelných centrál. Brno: VUT Brno, 1986, 252 s.

FIEDLER, Jan. Parní turbíny: návrh a výpočet. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 66 s. ISBN 80-214-2777-9.

KRBEK, Jaroslav, Jan FIEDLER a Bohumil POLESNÝ. Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. ISBN 80-214-1334-4.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013, 119 stran : ilustrace. ISBN 978-80-214-4770-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

.....

doc. Ing. Jiří Pospíšil,
Ph.D.
ředitel ústavu

.....

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konceptním návrhem přestavby hnědouhelného kotle na kotel spalující biomasu. V první části práce je popsáno uhlí jakožto palivo a jsou zde uvedeny důvody, proč se od něj ustupuje. V další části práce je uveden popis stávajícího hnědouhelného kotle a konceptní návrh nového rekonstruovaného kotle. Pro oba zdroje jsou následně provedeny bilanční výpočty. Závěrečná část práce se zabývá porovnáním zdrojů na základě provedených bilančních výpočtů.

Klíčová slova

Uhlí, biomasa, stávající zdroj, rekonstruovaný zdroj, emise

ABSTRACT

The diploma thesis's deals with the conceptual design of the coal boiler into biomass boiler conversion. The first part of the thesis describes coal as a fuel, also the reasons why are we quitting from it are mentioned here. The next part of the thesis contains a description of the existing coal boiler and a conceptual design of the new reconstructed boiler. Balance calculations are then performed for both sources. The final part of the thesis deals with the comparison of sources based on performed balance calculations.

Key words

Coal, biomass, existing source, reconstructed source, emissions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOCOUREK, Tomáš. *Koncepční projekt rekonstrukce uhelného zdroje* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139381>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Koncepční projekt rekonstrukce uhelného zdroje** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlovi Milčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
1 Uhlí jako palivo, proč se od něj ustupuje a možnosti jeho náhrady.....	14
1.1 Vznik uhlí a jeho dělení	14
1.2 Historie uhlí, jeho těžba a zásoby	16
1.3 Proč se od uhlí ustupuje a jeho předpovídaný vývoj	19
1.4 Možnosti náhrady uhlí	22
2 Popis stávajícího zdroje	27
2.1 Umístění a konstrukce stávajícího uhelného kotle K1	27
2.2 Systém spalovacího vzduchu stávajícího uhelného kotle K1	27
2.3 Napájení stávajícího uhelného kotle K1	28
2.4 Palivo stávajícího uhelného kotle K1.....	28
2.5 Výstup přehřáté páry ze stávajícího uhelného kotle K1	29
2.6 Čištění spalin stávajícího uhelného kotle K1	29
2.7 Technologické schéma stávajícího uhelného kotle K1	30
3 Konceptní návrh nového zdroje	31
3.1 Umístění a konstrukce nového biomasového kotle.....	31
3.2 Systém spalovacího vzduchu nového biomasového kotle	32
3.3 Napájení nového biomasového kotle	32
3.4 Palivo nového biomasového kotle	32
3.5 Výstup přehřáté páry z nového biomasového kotle	34
3.6 Čištění spalin a spalinovody nového biomasového kotle	34
3.7 Popelové hospodářství nového biomasového kotle	35
3.8 Technologické schéma nového biomasového kotle.....	36
4 Bilanční výpočty stávajícího zdroje.....	37
4.1 Stechiometrické výpočty	37
4.1.1 Výpočet minimálního objemu vzduchu	37
4.1.2 Výpočet minimálního objemu spalin	37
4.1.3 Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalin	38
4.2 Entalpie spalin a vzduchu	40
4.3 Základní bilance kotle	43
4.3.1 Teplo přivedené do kotle.....	43
4.3.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle	43
4.3.3 Množství vyrobené páry a paliva přivedeného do kotle	46
4.3.4 Měrné emise ve spalinách a množství vznikající strusky	47
4.4 Čištění spalin.....	51
4.4.1 Filtrace TZL	51
4.4.2 Odsíření.....	52
4.4.3 Denitrifikace.....	53
4.5 Bilanční schéma kotle a systému čištění spalin	55
4.6 Denní a roční provoz zdroje.....	57
5 Bilanční výpočty rekonstruovaného zdroje.....	58
5.1 Přepočít složení paliva a výpočet výhřevnosti	58
5.2 Stechiometrické výpočty	59

5.2.1	Výpočet minimálního objemu vzduchu.....	59
5.2.2	Výpočet minimálního objemu spalín.....	60
5.2.3	Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalín.....	61
5.3	Entalpie spalín a vzduchu.....	62
5.4	Základní bilance kotle	64
5.4.1	Teplo přivedené do kotle	64
5.4.2	Tepelné ztráty a účinnost kotle.....	64
5.4.3	Množství vyrobené páry a paliva přivedeného do kotle.....	66
5.4.4	Měrné emise ve spalínách a množství vznikající strusky.....	66
5.5	Čištění spalín	71
5.5.1	Filtrace TZL.....	71
5.5.2	Odsíření	72
5.5.3	Denitrifikace	73
5.6	Bilanční schéma kotle a systému čištění spalín.....	75
5.7	Denní a roční provoz zdroje	77
6	Porovnání zdrojů.....	78
6.1	Množství přiváděného paliva.....	78
6.2	Množství produkovaných emisí.....	78
6.3	Množství reagentů	79
6.4	Množství tuhých produktů spalování	80
	DISKUSE.....	81
	ZÁVĚR	82
	Citovaná literatura	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM GRAFŮ.....	92
	SEZNAM TABULEK.....	93
	SEZNAM PŘÍLOH.....	94

ÚVOD

Svět dlouhodobě čelí problému s rostoucí globální teplotou, to má za následek vznik celé řady negativních dopadů na fungování planety. Jednou z okolností napomáhajících jejímu dalšímu nárůstu je zvyšující se koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Skleníkových plynů existuje mnoho, avšak největší podíl na skleníkovém efektu, který způsobují, má oxid uhličitý. Ten ve velké míře vzniká při spalování fosilních paliv, která jsou poslední dobou terčem různých omezování. Mezi tato omezování patří i plánovaný útlum využívání uhlí. To je stále i v dnešní době ve velké míře využíváno například v energetické průmyslu, kde slouží jako palivo v elektrárnách a teplárnách. Jednou z možností, jak tyto provozování mohou plnit požadavky spojené s omezováním využívání uhlí je úprava stávajících uhelných zdrojů tak, aby v nich mohlo být spalováno jiné alternativní a ekologičtější palivo, kterým může být například biomasa.

Teoretická část práce má za cíl popsat uhlí jakožto palivo, vysvětlit důvody proč je omezováno jeho využívání a uvést možné náhrady. Praktická část práce má za cíle popsat stávající uhelný zdroj a provést konceptní návrh rekonstrukce tohoto zdroje, kdy dojde k přestavbě palivové základny z hnědého uhlí na biomasu, kterou bude v tomto případě dřevní štěrka. Následně pro oba zdroje provést bilanční výpočty a vytvořit technologická schémata.

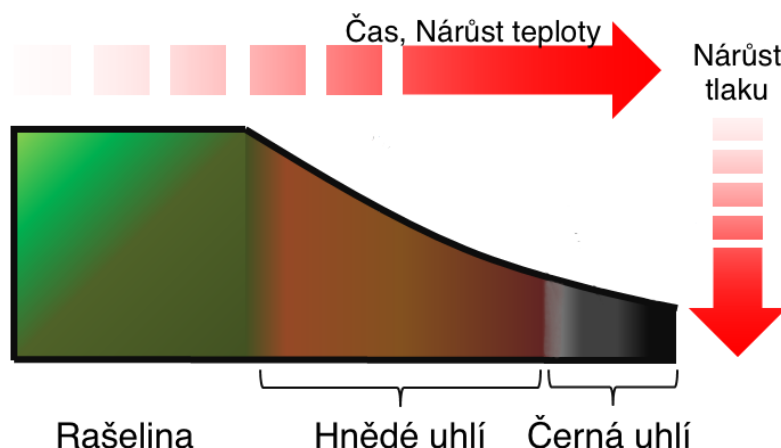
1 Uhlí jako palivo, proč se od něj ustupuje a možnosti jeho náhrady

Uhlí je hnědá, hnědo-černá, nebo černá hornina skládající se převážně z uhlíku a mnoha dalších stopových prvků. Spolu s ropou a zemním plynem se uhlí řadí mezi fosilní paliva. Díky jeho vysoké hustotě energie a rozsáhlým zásobám v přírodě se uhlí využívá především jako palivo určené pro výrobu elektřiny v uhelných elektrárnách případně elektřiny a tepla v teplárnách. Uhlí má nezastupitelné místo také v metalurgii při výrobě surového železa a v chemickém průmyslu. Poslední dobou se však mnoho zemí po celém světě zavazuje k omezování jeho využívání, a to především z ekologických důvodů. [1]

1.1 Vznik uhlí a jeho dělení

Vznik prvních uhelných ložisek se datuje do geologických období zvaných karbon (přibližně před 290–360 miliony let) a křída (přibližně před 65–144 miliony let).

K tvorbě uhlí docházelo v bažinných ekosystémech jezerních pánví, říčních delt z těl pravěkých rostlin, které po odumření klesaly pod hladinu bažiny, ve které se začaly anaerobně tj. bez přístupu kyslíku rozkládat. Tento proces mohl probíhat i několik tisíc let, přičemž vznikala částečně rozpadlá rostlinná hmota zvaná rašelina. Následně byla tato ložiska v důsledku geologických procesů, kterými mohly být například přírodní katastrofy, překryta vrstvami jiných materiálů. Rašelina se tak dostávala do větších hloubek, kde z ní díky zvyšujícím se tlakům a teplotě byla vytěšňována voda a další látky, zatím co podíl uhlíku rostl. Vnikala tak hmota, kterou známe jako hnědé uhlí (lignit). S dalším vytěšňováním vody a nárůstem podílu uhlíku se z hnědého uhlí postupně stane uhlí černé a následně antracit. [2] [3]



Obr. 1.1 Průběh vzniku uhlí [2]

Uhlí podle jeho stáří rozdělujeme na nejmladší rašelinu → lignit → hnědé uhlí → černé uhlí → antracit, který je nejstarší. Se zvyšujícím se stářím uhlí roste jeho hmotnostní podíl uhlíku na úkor vody a dalších látek. Z hlediska jeho využívání jako paliva lze tedy psát, že čím starší uhlí je, tím vyšší kvality dosahuje.

Rašelina je organická polorozpadlá hmota obsahující kolísavý podíl těl a částí rostlin. Typický je vysoký obsah vody, a to i více než 75 %, obsah uhlíku se pohybuje v rozsahu 50 – 60 %. Rašelina je využívána především v zemědělství a zahradnictví pro její schopnost vázat vlhkost, menší využití pak nachází jako léčivo v lázních. Z důvodu nízké výhřevnosti je používání rašeliny pro výrobu tepla málo efektivní a je proto nahrazována jinými palivy. [4]



Obr. 1.2 Rašelina [5]

Hnědé uhlí a lignit jsou jedním z dalších produktů prouhelňování. Obsah vody je oproti rašelině nižší než 75 % a obsah uhlíku vyšší než 60 %. Rozdíl mezi hnědým uhlím a lignitem spočívá v jeho formě, kdy hnědé uhlí má tvrdou formu, kdežto lignit měkkou xylitickou. Obě formy jsou využívány jako zdroje energie. Hnědé uhlí je využíváno také v chemickém průmyslu. [4]



Obr. 1.3 Hnědé uhlí [6]

Černé uhlí je produkt prouhelňování následující v uhelné řadě po hnědém uhlí. Obsah vody se u černého uhlí pohybuje pod 30 % a obsah uhlíku nad 69 %. Černé uhlí se využívá jako palivo pro výrobu elektrické energie, jako surovina pro výrobu koksu, ale také v chemickém průmyslu. [4]



Obr. 1.4 Černé uhlí [7]

Antracit je nejvyšší prouhelňovací stádium uhlé hmoty. Obsah uhlíku je vyšší než 91 % a obsah vody se pohybuje pod 5 %. Antracit je využíván především jako palivo pro výrobu energie. [4]



Obr. 1.5 Antracit [8]

Přehled chemického složení a základních vlastností jednotlivých typů uhlí jsou uvedeny v tabulce níže.

	C^{daf}	O^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	V^{daf}	W^r	Q_i^r
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MJ/kg]
rašelina	50–60	33–40	4,5–6	0,9–3,5	>60	75–95	<14,7
lignit	<65	19–33	<6	<1	52–40	>30	14,7–17
hnědé uhlí	65–69	10–19	<6	<1	52–40	>30	17–24,4
černé uhlí	69–92	2–10	<5	<1	40–8	>5	24,4–32,6
antracit	86–98	<2	<3	<1	8–2	>2	>32,6

Tab. 1.1 Základní vlastnosti typů uhlí¹ [9]

1.2 Historie uhlí, jeho těžba a zásoby

Uhlí bylo pravděpodobně objeveno v Číně a jako zdroj energie je využíváno již po dobu téměř 2000 let. Poptávka po uhlí však dramaticky vzrostla až během 19. a 20. století spolu s probíhající průmyslovou revolucí, která s sebou přinesla rozmach v používání parních strojů (železnice, lodní doprava, pivovary, cukrovary) a růst železáren. Spotřeba uhlí se následně každoročně zvyšovala a svého vrcholu dosáhla v roce 2014, kdy bylo vytěženo více než 8 000 milionů tun uhlí. V dalších letech pak docházelo k mírnému poklesu. [1] [10]

Uhlí se nachází ve vrstvách, kterým se obecně říká sloje. Uhlé sloje můžeme dobývat různými způsoby. V základě však rozlišujeme 2 způsoby dobývání, a to dobývání hlubinné a dobývání povrchové, které je v mnoha ohledech výhodnější. [10]

¹ C^{daf} – obsah uhlíku v hořlavině, H^{daf} – obsah vodíku, O^{daf} – obsah kyslíku, N^{daf} – obsah dusíku, V^{daf} – obsah prchavé hořlaviny, W^r – obsah vody, Q_i^r – výhřevnost, daf – vysušený vzorek baliva bez obsahu popeloviny, r – původní/surový vzorek

Hlubinné dobývání vyžaduje vyhloubení svislé jámy – šachty z povrchu až k uhelné sloji. Typickým poznávacím znakem hlubinného dobývání je těžební věž, která se tyčí nad šachtou.

Šachta slouží nejen k dopravě horníků do dolů a vyvážení vytěženého uhlí na povrch, ale také k dopravě veškerého materiálu a energie potřebné k těžbě, vedou v ní tedy veškerá potřebná potrubí a kabely. Od svislé šachty se pak podle tvaru a velikosti sloje razí vodorovné chodby potřebné k vytěžení ložiska.

Způsobů dobývání uhlí ze sloje je velká řada a jeho volba vždy záleží na mnoha okolnostech, kterými jsou například tvar sloje, nebo pevnost uhlí a okolních hornin. Při těžbě však musí být vždy zajištěno několik předpokladů, mezi které patří zabezpečení důlního díla proti zavalení, odvětrání a odvodnění dolu.

Pokud jsou důlní díla ražena v nesoudržných horninách, je potřeba ražené chodby vyztužit, aby odolávaly tlaku od vrchních vrstev horniny – nadloží. Výztuž se používají buďto železobetonové, nebo ocelové. V místech, kde se uhlí přímo dobývá se pro ochranu pracovníků používá tzv. posuvná výztuž. [10]

Povrchové dobývání se využívá v místech, kde jsou uhelné sloje v blízkosti povrchu (může se jednat i o desítky metrů).

V případě povrchového dobývání je zapotřebí odvést veškeré nadložní horniny, které jsou nad uhelnými sloji. K tomuto účelu se využívají lopatková, kolesová, nebo korečková rýpadla. Rýpadla bývají spojena s pásovým mostem, pomocí kterého se hornina dopravuje na nejbližší místo tak, aby nepřekážela další těžbě.

Samotné uhlí se těží taktéž pomocí rýpadel, která jej následně nakládají buď na velkokapacitní nákladní automobily, nebo do železničních vagónů na provizorním kolejišti.

Výhodou povrchového dobývání je oproti hlubinnému především jeho ekonomická stránka, je levnější. Další výhodou je výtěžnost. Dá se jím vytěžit takřka 100 % uhelných zásob. Jeho nevýhodou je neblahý dopad na okolní krajinu. [10]

Zásoby uhlí

Určit přesné množství zásob uhlí je velmi obtížné, a to především z toho důvodu, že se nachází v podzemí. K 31. prosinci 2020 byly prokázány odhady celkových vytěžitelných světových zásob uhlí asi 1 156 miliard tun, z toho je 75 % všech zásob rozloženo mezi pět zemí (22 % USA, 15 % Rusko, 14 % Austrálie, 14 % Čína, 10 % Indie). V České republice bylo v roce 2018 celkem 676 milionů tun prokázanych vytěžitelných zásob. [11] [12]

Poptávka po uhlí

Celosvětová poptávka po uhlí za rok 2020 činila 7 243 milionů tun. Pokud bychom uvažovali, že by průměrná spotřeba uhlí v následujících letech byla podobná, jako v roce 2020, vystačily by současné prokázané zásoby přibližně na dalších 160 let. [13]

Jak se světová poptávka po uhlí historicky vyvíjela je znázorněno na následujícím grafu.



Graf 1.1 Historický vývoj světové spotřeby uhlí [14]

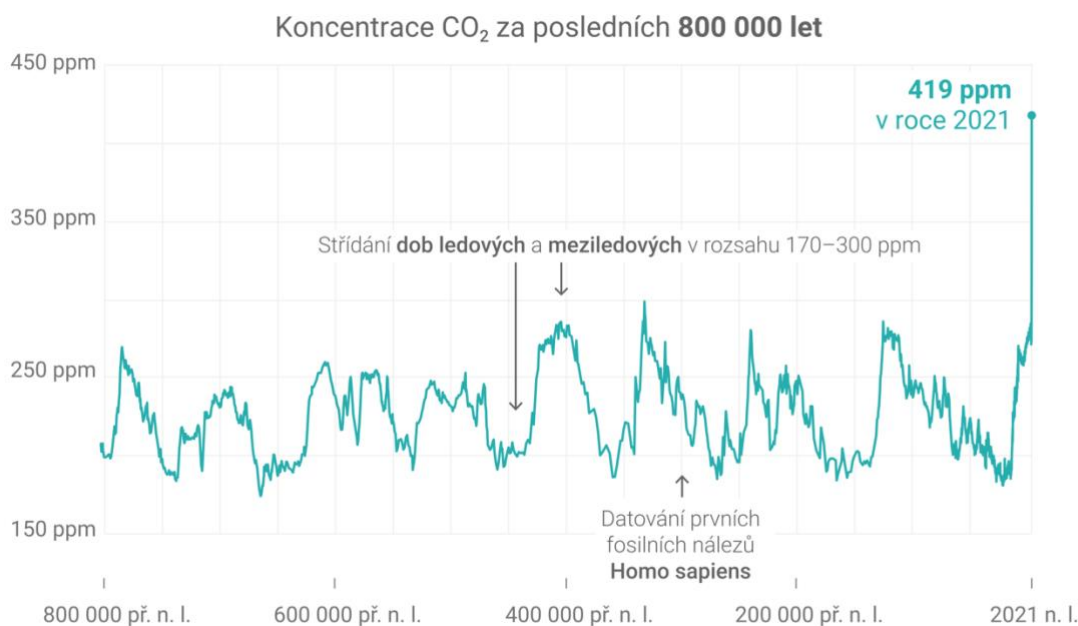
1.3 Proč se od uhlí ustupuje a jeho předpovídaný vývoj

Při spalování uhlí a všech ostatních fosilních paliv vzniká velké množství emisí skleníkových plynů – především oxidu uhličitého, ale i dalších škodlivin, mezi které patří oxidy síry, oxidy dusíku a tuhé znečišťující látky.

Koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře se během posledních 800 000 let pohybovala v rozsahu od 170 do 300 ppm. Kolísání odpovídá střídáním dob ledových a meziledových. Během posledních 2000 let se jeho koncentrace pohybovala v rozsahu 275–280 ppm a to až přibližně do roku 1750, od kterého se v důsledku probíhající průmyslové revoluce a rozmachu v používání fosilních paliv, začala rychle zvyšovat. Není to ale jen koncentrace, která se zvyšuje, je to také tempo jejího růstu. V letech 1750–1949 rostla koncentrace CO_2 o 2,1 ppm za dekádu, v letech 2000–2020 už je to 21,6 ppm za dekádu. V roce 2021 se koncentrace CO_2 v atmosféře pohybovala okolo 419 ppm. Jak se koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře v průběhu historie měnila lze vidět na grafu 1.2. [15]

Problémem oxidu uhličitého, ale i všech dalších antropogenních skleníkových plynů je, že zesilují skleníkový efekt. To má za následek pomalý růst teploty na Zemi neboli globální oteplování. Planeta je v současné době o 1,2 °C teplejší než v letech 1850–1900 tedy před tzv. předindustriálním obdobím (referenční období). V současné době se trend oteplování pohybuje mezi 0,15–0,20 °C za dekádu. Jedná se však o průměrnou teplotní anomálii pro celou planetu, která se počítá z váženého průměru místních anomálií. Místní anomálie pro daný rok udává, o kolik bylo dané místo teplejší, než je jeho průměrná roční teplota v referenčním období. Teplota na jednotlivých kontinentech roste různě. Obecně platí, že Severní polokoule a místa na souši se oteplují rychleji než oceány. Například teplota v Evropě a severní Asii vzrostla za posledních 100 let o 2–3 °C, v arktických oblastech dokonce o 4 °C. [16]

Zvyšující se teplota na Zemi ovlivňuje procesy po celém světě. Jako jedny z příkladů lze uvést tání ledovců a s tím spojený růst hladin oceánů, rozšiřování pouštních oblastí, vymírání některých druhů, či extrémní výkyvy počasí, které mají vliv mimo jiné i na světovou energetickou infrastrukturu, ta musí čelit stále se zvyšujícím fyzickým rizikům (cyklónové větry, záplavy).



Graf 1.2 Koncentrace CO_2 v atmosféře za posledních 800 000 let [15]

Proto, aby bylo zabráněno dalšímu nárůstu obsahu oxidu uhličitého v atmosféře a s tím spojenému růstu teplot na Zemi, vydala Mezinárodní agentura pro energii (IEA) dokument s názvem World energy outlook 2021, ve kterém se zabývá současnou situací a představuje několik dlouhodobých scénářů, jak se s touto situací vypořádat. Hlavními scénáři jsou: [17]

- Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE), který pro globální energetický sektor popisuje dosažitelnou cestu, jak do roku 2050 dosáhnout čistých nulových emisí CO₂ (tj. koncentrace CO₂ v atmosféře už nebude růst).
- Announced Pledges Scenario (APS), který předpokládá, že všechny klimatické závazky přijaté vládami po celém světě, včetně národně stanovených příspěvků (NDC) a dlouhodobých cílů čisté nuly, budou splněny v plném rozsahu a včas.
- Stated Policies Scenario (STEPS), který odráží aktuální politické nastavení, které bylo oznámeno vládami po celém světě.

Při zaměření se na uhlí je ve všech výše zmíněných scénářích, splňujících klimatické cíle, počítáno s jeho postupným omezováním. A to z toho důvodu, že se jedná o palivo s největším obsahem uhlíku používaném především pro výrobu elektrické energie a tepla. Zároveň je nahrazení uhlí v energetickém sektoru pomocí obnovitelné energie jedno z finančně nejvýhodnějších řešení pro instalaci nových zdrojů.

Celosvětově bylo z uhlí v roce 2019 získáno 27,4 % veškeré spotřebované energie. Při pohledu na světovou produkci elektřiny činil podíl uhlí na její výrobě za rok 2020 celkem 33,8 %. [18] [19]

Podle výše zmíněných scénářů klesne celosvětová spotřeba uhlí v energetickém sektoru do roku 2030 přibližně o 5 % v STEPS, o 10 % v APS a o 55 % v NZE.

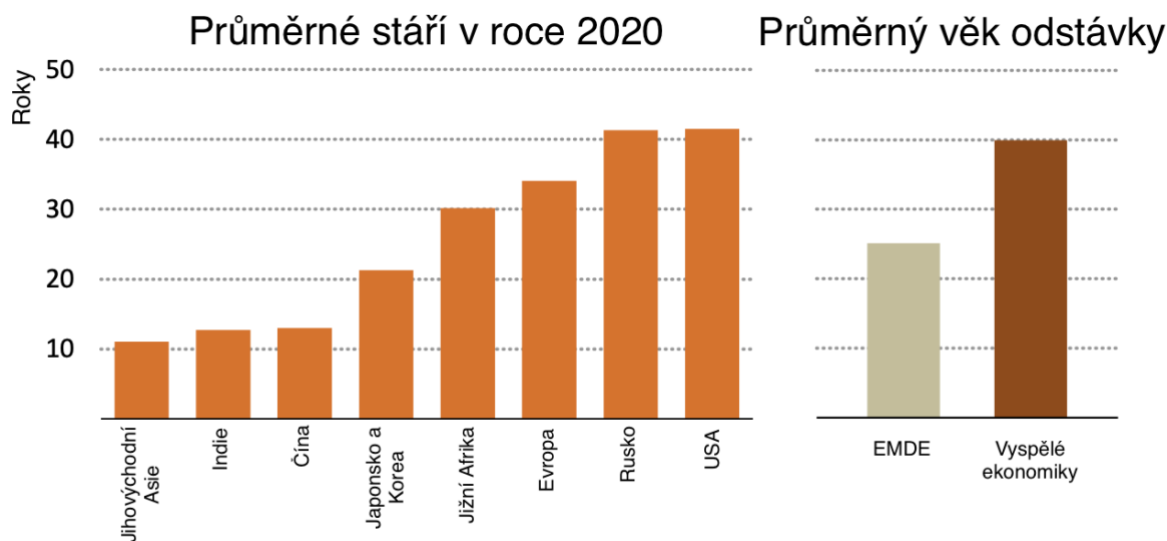
Postupné vyřazování uhlí v energetickém sektoru zahrnuje dvě řešení, která se navzájem doplňují. Jedná se o zastavení výstavby nových elektráren a snižování produkovaných emisí, či rovnou odstavení těch, které jsou již provozovány.

První z uvedených řešení je snazší. Ve scénáři NZE není počítáno s žádnou výstavbou nových uhelných elektráren. Další dva scénáře APS a STEPS počítají až s 200 a 215 GW schválenými a dokončenými do roku 2030. Jedná se o projekty zejména v Číně, Indii a jihovýchodní Asii. V obou scénářích je počítáno s další výstavbou i po roce 2030.

Při snižování produkovaných emisí ze stávajících provozů je počítáno s jejich modernizací, která může zahrnovat dovybavení zařízení o systémy pro zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (CCUS – Carbon Capture, Use and Storage), nebo spoluspalování s nízkoemisními palivy, jako je například biomasa, nebo čpavek, případně kompletní změnu palivové základny (podrobněji v následující podkapitole).

Poslední ze zvažovaných možností odchodu od uhlí je uzavírání stávajících uhelných provozů. Vzhledem k závislosti některých zemí a regionů na uhlí by uzavření uhelných dolů a elektráren mohlo mít neblahý vliv na sociální a hospodářskou situaci. Proto musí být uzavírání dobře promyšlené a postupné. Prioritou je postupné vyřazování nejstarších a nejméně účinných elektráren. Podle scénáře NZE bude do roku 2030 odstaveno okolo 40 % stávajících uhelných provozů. Nicméně po celém světě a zejména v rozvojových ekonomikách, jsou stávající uhelné elektrárny relativně mladé a jejich vyřazení by znamenalo risk vzniku uvízlých aktiv neboli předčasných odpisů. Například v Asii je průměrné stáří uhelných elektráren 13 let a k jejich odstavení dojde po 35 letech provozu v APS a 25 letech v NZE. Ve vyspělých ekonomikách dosahuje průměrné stáří elektráren téměř 35 let a k odstavení dojde za 8 let v APS a 5 let v NZE.

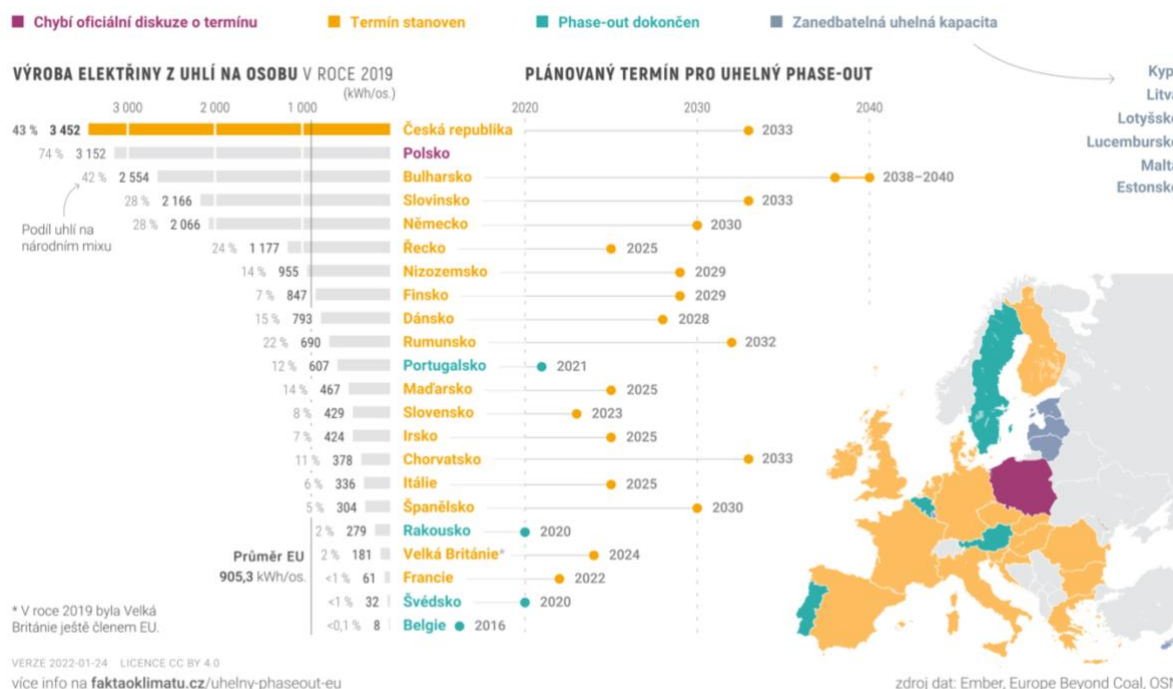
Níže uvedený graf 1.3 znázorňuje průměrné stáří elektráren ve světě a průměrnou dobu jejich provozu podle scénáře NZE. Jak se k omezování výroby elektřiny z uhlí postavily jednotlivé země Evropské unie popisuje graf 1.4. [17]



EMDE = rozvíjející se trhy a rozvojové ekonomiky s výjimkou Číny

IEA. All rights reserved.

Graf 1.3 Průměrné stáří existujících uhelných elektráren v roce 2020 a odstavení podle NZE [17]



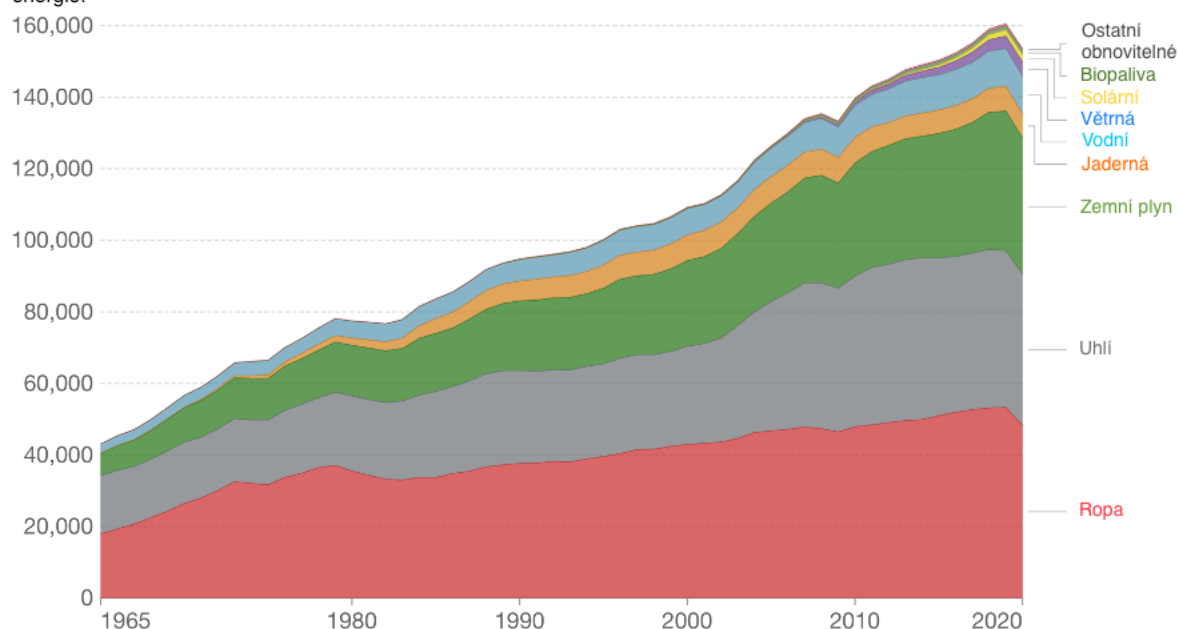
Graf 1.4 Omezování výroby elektřiny z uhlí v zemích EU [20]

1.4 Možnosti náhrady uhlí

Všechny výše zmíněné scénáře, popisující odchod od uhlí, směřují k čisté elektrifikaci. V současném výhledu však není možné elektrizovat vše, a i ve scénáři NZE tvoří elektřina v roce 2050 méně než 50 % celkové konečné spotřeby energie. Ve scénářích APS a STEPS jsou tato čísla ještě menší a to konkrétně 31 % a 26 %. Při náhradě uhlí, jakožto zdroje pro výrobu elektrické energie, je počítáno s rozvojem obnovitelných zdrojů, především solárních a větrných elektráren. Podstatnou roli budou hrát také jaderné elektrárny a dočasně provoz, využívající zemní plyn. Pevná, kapalná a plynná paliva budou tedy i nadále významně přispívat ke globálnímu energetickému mixu. Jak se celosvětově vyvíjel podíl jednotlivých zdrojů na celkové spotřebované energii v letech 1965–2020 znázorňuje graf 1.5. [17]

Světová spotřeba energie podle jednotlivých zdrojů

Spotřeba primární energie je měřena v terawatthodinách (TWh). U fosilních paliv byl použit faktor neefektivnosti (substituční metoda), díky tomu dávají podíly jednotlivých zdrojů energie lepší aproximaci konečné spotřeby energie.



Zdroj: BP Statistical Review of World Energy

Poznámka: "Ostatní obnovitelné" zahrnují geotermální energii, biomasu a energii z odpadů

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Graf 1.5 Světová energetická spotřeba dle zdrojů [19]

Solární energie se pro výrobu elektrické energie v energetickém sektoru začala více využívat okolo roku 1982. V této době činil celkový světový výkon fotovoltaických systémů 9,3MW. Za rok 1983 bylo ze solární energie celkově vyrobeno méně než 1 TWh (0,01 %) z celkové spotřebované energie. V roce 2020 již světový instalovaný výkon činil 773,2 GW a bylo vyrobeno 2 111 TWh (1,37 %) z celkové spotřebované energie. Podle Global Market Outlooku 2021–2025, vydaným sdružením SolarPower Europe, se očekává, že do roku 2025 vzroste světový instalovaný výkon fotovoltaických systémů na 1 553 až 2 147 GW. [19] [21]

Mezi hlavní výhody solárních systému patří jejich vysoká provozní spolehlivost, bezemisní a bezhlučný provoz, který prakticky nevyžaduje fyzickou obsluhu. Mezi nevýhody patří závislost na místních klimatických podmínkách, vysoké investiční náklady, malá účinnost přeměny energie a poměrně krátká životnost, která se pohybuje okolo 20 let. [22]

Větrná energie je využívána již od starověku, příkladem můžou být větrné mlýny. Pro výrobu elektrické energie se však začala využívat až v 80. letech 19. století, kdy bylo pomocí větru vyráběno méně než 1 TWh z celkové spotřebované energie. V roce 2020 tvořil celosvětový instalovaný výkon větrných elektráren 743 GW a bylo pomocí nich vyrobeno 3 926 TWh (2,56 %) z celkové spotřebované energie. Podobně jako u fotovoltaických systémů se i u větrných elektráren očekává růst instalovaného výkonu, který by se měl, dle předpovědi GWEC (Global Wind Energy Council), do roku 2024 navýšit o 355 GW. [19] [23] [24]

Výhodou větrných elektráren je jejich bezemisní provoz. Mezi nevýhody patří jejich nerovnoměrný výkon, který je závislý na povětrnostních podmínkách, vysoké investiční náklady, hluchost při provozu a narušení přirozeného rázu krajiny.

Biomasa je lidmi nejdéle využívaný zdroj energie. Do poloviny 18. století bylo dřevo prakticky jediným využívaným palivem pro získávání tepelné energie. Až v 19. století bylo z velké části nahrazeno fosilními palivy. Se snahou zamezení vlivu lidstva na změnu klimatu však tento zdroj získává znovu na významu.

Pod pojmem biomasa je obecně myšlena veškerá organická hmota na Zemi. Jedná se tedy o těla živočichů, rostlin, bakterií, hub a sinic. Z pohledu energetiky je však důležitá pouze energeticky využitelná biomasa. Ta se dá rozdělit do dvou kategorií. První z nich je biomasa záměrně pěstovaná pro energetické účely. Mezi kterou se řadí rychle rostoucí dřeviny (topol, vrba, platan atd.) a rostliny bylinného charakteru (konopí, šťovík, kostřava atd.). Druhou kategorií je odpadní biomasa, pod kterou si lze představit zbytky ze zemědělské výroby a údržby krajiny (kukuřičná sláma, odpady ze sadů a vinic, odpady z likvidace křovin atd.), zbytky z živočišné výroby (exkrementy hospodářských zvířat, zbytky krmiv, kejda), z těžby a zpracování dřeva (piliny, hobliny, větve, kůra, pařezy, kořeny atd.), ale také biologicky rozložitelný komunální odpad – BRKO (zbytky potravin, papírové obaly), biologicky rozložitelný průmyslový odpad – BRPO (odpady z jatek, výroby cukru, mouky, papíru) a splašky z kanalizace.

Biomasa může být pro energetické účely zpracovávána více způsoby, a to mechanickou úpravou (řezání, drcení, štěpování, lisování), termickými procesy (karbonizace, pyrolýza, zplyňování), biochemickou a chemickou přeměnou (alkoholové a metanové kvašení, esterifikace surových olejů).

Hlavní výhodou biomasy oproti fosilním palivům je, že se její spalování vyznačuje nulovou bilancí oxidu uhličitého. Množství plynu uvolněné jejím spálením je přibližně stejné, jako množství, které rostliny během svého života absorbují při fotosyntéze. Mezi další výhody patří dostupnost a široké možnosti úpravy paliva. Nevýhodami jsou nároky na skladovací prostory, vyšší náklady spojené s dopravou a některými typy úprav paliva. [25]

Zemní plyn patří mezi fosilní paliva a jeho spalováním se do ovzduší uvolňují skleníkové plyny. Oproti ostatním fosilním palivům, především uhlí, je však množství produkováných emisí CO₂ a dalších škodlivin znatelně menší. Z tohoto důvodu je ve všech scénářích, zaměřených na odchod od uhlí, počítáno s jeho dalším, avšak dočasným využíváním.

Kdy přesně došlo k vědomému využívání zemního plynu je obtížné určit. Za vznik průmyslového plynárenství je považován rok 1813, kdy se poprvé rozsvítily lampy plynového osvětlení na Westminsterském mostě v Londýně. Spotřeba zemního plynu od této doby postupně rostla a v roce 2020 bylo pomocí zařízení využívajících tento typ paliva celosvětově vyrobeno 38 228 TWh (24,89 %) z celkové spotřebované energie. Podle studií IEA je očekáváno, že jeho využití bude v nadcházejících letech nadále silně růst. A to především proto, že plynové elektrárny jsou schopny pružně reagovat na výkyvy poptávky a poskytnout zálohu stále se rozšiřujícím obnovitelným zdrojům. Proto Evropská komise 2. února 2022 schválila

dočasné zařazení zemního plynu mezi čisté zdroje energie. Tato podpora bude trvat do roku 2035 a má pomoci některým zemím při odstavování tepláren a elektráren využívajících uhlí nebo ropu. Podle scénáře uvažujícího dosažení čistých nulových emisí CO₂ do roku 2050 (NZE) je však předpokládáno, že v roce 2040 bude výroba elektrické energie pomocí zemního plynu o 90 % nižší ve srovnání s rokem 2020 a stávající plynové elektrárny budou muset být buďto vybaveny systémy CCUS, nebo spoluspalovat nízkouhlíková paliva.

Zemní plyn je vysoce výhrevným palivem a jeho výhodou je, že může být dopravován potrubím, nebo ve zkapalněné formě pomocí lodí a spolu s možností jeho skladování v podzemních zásobnících se z něj stává dobře dostupné palivo. Další výhodou je, že surový zemní plyn nevyžaduje nijak náročnou úpravu přede distribucí. Nevýhodou je, že se jedná o fosilní palivo, s omezenými zásobami na Zemi a jeho spalování se neslučuje se snahou o dosažení nulových čistých emisí. Druhou nevýhodou zemního plynu je jeho cena, která v posledních letech roste. [19] [26] [27]

Jaderná energie je pro výrobu elektrické energie využívána od roku 1954, kdy začala do veřejné sítě dodávat elektřinu první jaderná elektrárna (Obninsk u Moskvy). Od tohoto roku počet provozovaných jaderných zdrojů ve světě rostl. Podle statistik WNA (World Nuclear Association) bylo ve 32 státech světa k 1. lednu 2022 v provozu 438 jaderných reaktorů s celkovou instalovanou kapacitou 390 174 MW_e. Nejvíce jaderných zdrojů stojí v USA (93), Francii (56), Číně (53), Rusku (37), Japonsku (33), Jižní Koreji (24), Indii (23), Kanadě (19), Ukrajině (15) a Velké Británii (12). Pro porovnání s ostatními zdroji bylo za rok 2020 pomocí jaderné energie celosvětově vyrobeno 6 661 TWh (4,34 %) z celkové spotřebované energie. V současné době je ve výstavbě 57 reaktorů a předběžně se ve světě uvažuje o vybudování celkem 325 dalších reaktorů, jejichž instalovaný výkon by měl dosáhnout asi 353 812 MW.

Provozem jaderných reaktorů sice nedochází k produkci emisí CO₂ nicméně vzniká vyhořelé palivo, které v současnosti nemá žádné další využití a je nutné ho ukládat do úložišť radioaktivního odpadu. Proto nebyla jaderná energie až do nedávna v Evropě řazena mezi čisté zdroje. To se ale změnilo 2. února 2022, kdy Evropská komise, podobně jako u zemního plynu, její zařazení mezi tyto zdroje schválila. Zelený status však budou mít pouze ty nové jaderné bloky, které budou postaveny do roku 2045. Každé 3 roky přitom bude moci komise pravidla přehodnotit a navrhnout změnu podmínek.

Mezi hlavní výhody jaderné energie patří náklady na výrobu elektřiny, které po celém světě patří mezi nejnižší a na rozdíl od ostatních zdrojů v sobě tato cena zahrnuje i externí náklady (nakládání s odpady, odstavování zařízení, zdravotní a environmentální vlivy). Dalšími výhodami jaderné energetiky je prakticky nulová produkce emisí CO₂ a dostatek surovin pro výrobu paliva. Světové zásoby ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez jejich recyklace vystačit na 85 let. Nevýhodami jsou pak především konečná likvidace radioaktivního jaderného odpadu, technicky složitá a finančně náročná výstavba elektráren a omezené zásoby paliva (nejedná se o obnovitelný zdroj). [19] [26] [28]

Vodík byl objeven v roce 1776 britským vědcem Henrym Cavendishem. V době svého objevu však v průmyslu nenašel širší uplatnění, a to především z důvodu nástupu levnějších fosilních paliv. Současná doba, kdy je napříč všemi světadíly snaha o rozvoj nových alternativ klimaticky neutrálních technologií a dochází k rozvoji obnovitelných zdrojů s sebou nese riziko v podobě jejich nepředvídatelné produkce elektřiny. Vodík má v tomto případě sehrát roli energetického nosiče, který je vhodný zejména pro sezónní akumulaci. Očekává se, že v budoucnu bude mít široké uplatnění v dopravě, energetice i průmyslu.

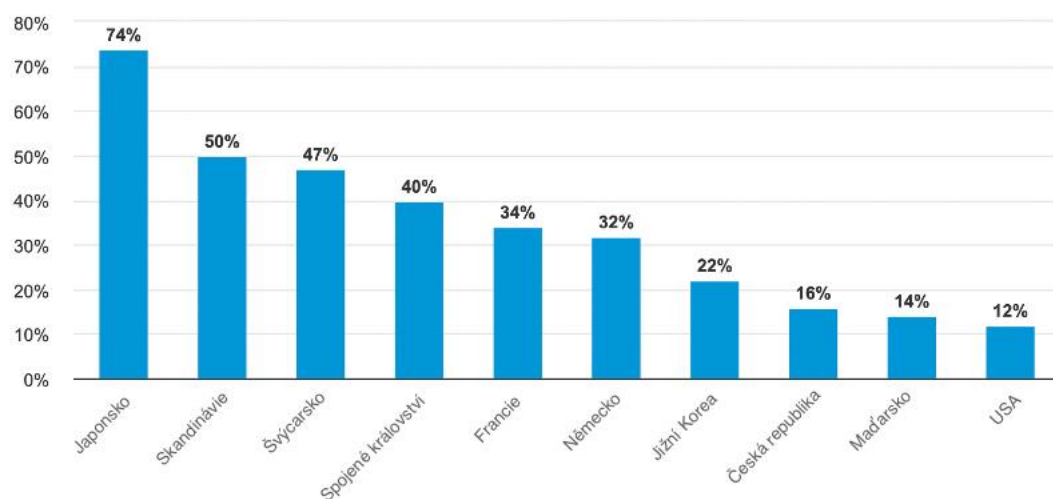
Jako zdroj energie může být využíván více způsoby. Lze jej přidávat do palivových směsí spalovacích motorů, nebo jej přímo spalovat v plynových motorech. Tyto způsoby jsou však

značně energeticky neefektivní. Mnohem zajímavějším způsobem je vyrobit z vodíku elektřinu a tu potom dále využít pro různé účely. Zařízení, které pomocí vodíku vyrábí elektrochemickou cestou elektřinu se nazývá palivový článek.

Vodík je třetí nejrozšířenější prvek na Zemi, přesto se jako samostatná molekula téměř nevyskytuje. Proto je potřeba ho vyrábět uměle. V současné době je uváděno, že 96 % veškeré světové výroby vodíku pochází z fosilních paliv tzv. parním reformingem zemního plynu. Jedná se o nejlevnější současnou technologii výroby vodíku. Takto vyrobený vodík je nazýván šedým. Zbýlé 4 % jsou vyráběny pomocí elektrolýzy vody. Očekává se však, že tento poměr se bude v následujících letech měnit právě ve prospěch elektrolýzy. Přechodným způsobem výroby může být kombinace dnes již známých technologií, kterými jsou parní reforming zemního plynu se systémy CCS (Carbon Capture and Storage). Takto vyrobený vodík je nazýván modrý. Do budoucna nejpodporovanějším způsobem výroby vodíku v Evropské unii je jeho výroba elektrolýzou vody za použití elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie. Takto vyrobený vodík je nazýván bílý. Existují ještě další způsoby, kterými lze vodíky vyrábět a lze se setkat s označeními hnědý vodík (vyráběn zplyňováním uhlí), nebo tyrkysový vodík (vyráběn ze zemního plynu, ale vedlejším produktem je uhlík v pevném skupenství).

Výhodou vodíku je jeho nezávadnost pro životní prostředí a v případě jeho výroby pomocí obnovitelných zdrojů také nulová produkce emisí CO₂. Jeho hlavní nevýhodou je skladování. Molekula vodíku je velmi malá a má tendenci unikat. Moderní zásobníky jsou proto vyráběny z mimořádně pevných a neprodyšných materiálů. To souvisí s jeho další nevýhodou a tou je v současné době pořád ještě velká finanční náročnost a neschopnost konkurovat jiným levnějším zdrojům. [29] [30]

Odpady se začaly spalovat a využívat k výrobě tepla a elektrické energie v 19. století, kdy byly v Anglii mezi lety 1874–1877 postaveny první větší spalovny. V současnosti jsou spalovny odpadů využívány po celém světě a například jen v Evropě bylo v roce 2018 provozováno celkem 492 spaloven (nejsou zahrnuty spalovny nebezpečných odpadů), ve kterých bylo spáleno celkem 96 milionů tun odpadu. Kolik procent z celkového množství pevného komunálního odpadu je spalováno ve vybraných zemích znázorňuje graf 1.5.



Zdroj: Data z Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) z 22. listopadu 2021
Poznámka: Skandinávie zahrnuje Dánsko, Norsko a Švédsko. Data pro USA, Jižní Koreu a Japonsko jsou z roku 2018; data ostatních zemí jsou z roku 2019

Graf 1.6 Procenta z celkového pevného komunálního odpadu, který se ve vybraných zemích spálí s energetickým využitím [31]

Směsné komunální odpady se obecně skládají z obalů, papíru, lepenky, textilu, plastů, skla, kovových odpadů, biologických odpadů, chemikálií, léků, baterií atd. V zařízeních sloužících k energetickému využívání odpadu jsou však tepelně zpracovávány pouze komunální a průmyslové odpady, které už nelze dále recyklovat.

Výhodou takového zacházení s odpady je redukce množství odpadu, který by jinak byl uložen na skládku. Spálením 1 tuny odpadu vznikne přibližně 150 až 300 kilogramů popele a jeho původní objem se sníží až o 90 %. Vzniklý popel pak může být dále využit k výrobě stavebních hmot, nebo uložen na skládce. Další výhodou je zamezení vzniku metanu (silný skleníkový plyn, který má 25x větší dopad na klima oproti oxidu uhličitému), který by byl uvolňován ze skládky v případě, kdy by na ni byl tento odpad uložen.

Nevýhodami spalování odpadů je tvorba emisí (tuhé znečišťující látky, oxidy dusíku, těžké kovy, dioxiny, ...). Emise všech látek jsou však měřeny a musí splňovat dané emisní limity. Druhou nevýhodou takového zacházení s odpadem je finanční náročnost. Spalování je v současné době nákladnější než jeho skládkování. [31] [32] [33]

2 Popis stávajícího zdroje

Podklady k popisu stávajícího zdroje byly získány na základě konzultací ve společnosti Damaris Solutions s.r.o. Protože se jedná o konkrétní energetický zdroj, mají níže uvedené údaje charakter důvěrných informací. Z tohoto důvodu nejsou uvedeny informace o majiteli a provozovateli tohoto energetického zdroje.

Hlavní technologickou jednotkou zdroje je skupina tří kotlů označených K1, K2 a K3. Kotel K1 je hnědouhelný, zbylé dva kotle K2 a K3 jsou plynové. Účelem všech kotlů je výroba vysokotlaké přehřáté páry, o parametrech 9,42 MPa a 535 °C, která slouží pro výrobu elektrické energie a tepla prostřednictvím kogenerace. Samotná rekonstrukce se týká kotle K1, jehož technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Typ kotle	granulační s přirozenou cirkulací
Palivo	hnědé uhlí
Jmenovitý parní výkon	150 t/h
Tepelný výkon	116,7 MW _t
Jmenovitý tlak přehřáté páry	9,42 MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	535 ± 5 °C
Spotřeba paliva při jmenovitém výkonu kotle	36,2 t/h (výhřevnost 12,8 MJ/kg)
Teplota napájecí vody	160 °C
Teplota spalovacího vzduchu	140 °C
Informativní teplota výstupních spalín	145 °C
Účinnost kotle při jmenovitém výkonu	cca 90 %

Tab. 2.1 Technické parametry kotle K1

2.1 Umístění a konstrukce stávajícího uhelného kotle K1

Kotel K1 je umístěn v kotelně, která je součástí hlavního výrobního bloku. Samotný kotel o rozměrech 7,5 x 11 m je zavěšen na ocelové nosné konstrukci, tvořené 6 sloupy. Ocelová konstrukce kotelny je propojena technologickými plošinami a nosnou konstrukcí kotle na úrovních +7,5 m, +12,0 m, +15,65 m, +18,70 m a +22,50 m. Střecha kotelny je na úrovni +29,95 m. Zadní stěna kotelny je tvořena opláštěním a zadní stěnou kotle.

Tlakový systém kotle je konstruován jako jednobubnový s membránovými stěnami a přirozenou cirkulací parovodní směsí. Přehřívák páry je umístěn v horní části spalovací komory a je tvořen výstupním sálavým dílem a vstupním konvekčním dílem. Mezi první a druhý díl je umístěna regulace teploty přehřátí páry pomocí vstřiku napájecí vody. V posledním tahu kotle (třetím) je umístěn trojdílný ohřívák vody.

Ohniště kotle je práškové, granulační se čtyřmi mlýnskými okruhy a přímým foukáním prášku do spalovací komory. Každý mlýnský okruh se skládá ze sušící šachty, dopravního šneku s uhelnou svodkou, tlukadlového mlýna, dvou práškovodů a dvou práškových hořáků. Na každém mlýnu je osazen obrátový žaluziový třídič s možností regulace jemnosti mletí.

Pro najíždění, odstavování a stabilizaci je kotel vybaven dvěma duoblokovými plynovými hořáky na zemní plyn každým o výkonu 26 MW_t.

2.2 Systém spalovacího vzduchu stávajícího uhelného kotle K1

Spalovací vzduch je nasáván z venkovního prostředí přes tlumiče hluku dvěma axiálními ventilátory a následně dopravován přes ohřívák vzduchu do práškových hořáků a rozvodů dohořivacích (terciárních) vzduchů.

Ventilátory k najížděcím a stabilizačním hořákům jsou umístěny uvnitř kotelny na podlaží 0,0 m.

2.3 Napájení stávajícího uhelného kotle K1

Surová voda je před vstupem do kotle upravována v chemické úpravně vody, kde je filtrována od mechanických nečistot, odplyněna a zbavována od minerálů, které by mohli způsobovat korozi a zanášení výměňkových ploch kotle. Z hlediska kvality napájecí vody jsou sledovány tyto vlastnosti: tvrdost, hodnota pH, celkový obsah solí, obsah křemíku, železa, mědi, obsah kyslíku a oxidu uhličitého. [34]

Napájecí voda je vedena z napájecí hlavy přes měřicí clonu do trojdílného ohříváku vody, nacházejícího se v posledním tahu kotle. Napájecí hlava se skládá z dvou uzavíracích armatur, regulačního ventilu a zpětné klapky.

2.4 Palivo stávajícího uhelného kotle K1

Primárním palivem kotle je hnědé uhlí, které je ze skládky paliva pomocí systému vnějšího palivového hospodářství dopravováno transportními pásy do 2 uhelných bunkrů umístěných vedle kotle. Z uhelných bunkrů je uhlí pomocí šnekových dopravníků dopravováno do svodek paliva kotle. Parametry uhlí jsou uvedeny v tabulce 2.2. Stabilizačním a najížděcím palivem je zemní plyn, který je ke kotli přiveden pomocí potrubí průmyslového plynovodu. U kotle K1 je na podlaží 7,5 m instalována plynová regulační stanice, která slouží k úpravě tlakových parametrů zemního plynu na požadované hodnoty potřebné pro správnou funkci stabilizačních a najížděcích hořáků. Parametry zemního plynu jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Vlastnosti	Uhlí 610–32
Výhřevnost původního vzorku (Q_i^r)	12,81 MJ/kg
Spalné teplo původního vzorku (Q_s^r)	14,31 MJ/kg
Spalné teplo v bezvodém vzorku (Q_s^d)	22,51 MJ/kg
Spalné teplo čisté hořlaviny (Q_s^{daf})	30,32 MJ/kg
Popelovina v původním vzorku (A^r)	16,49 %
Popelovina v bezvodém vzorku (A^d)	25,80 %
Hořlavina v původním vzorku (V^r)	47,18 %
Veškerá voda v původním vzorku (W^r)	36,33 %
Voda v analytickém vzorku (W^a)	11,41 %
Voda hrubá (W^{ex})	30,12 %
Voda zbylá (W^h)	8,70 %
Uhlík v původním vzorku (C^r)	34,66 %
Uhlík v hořlavině (C^{daf})	73,36 %
Kyslík v původním vzorku (O^r)	7,64 %
Vodík v původním vzorku (H^r)	3,72 %
Vodík v hořlavině (H^{daf})	5,91 %
Síra v původním vzorku (S^r)	0,70 %
Měrná sirnatost (S_m^r)	0,55 g/MJ
Dusík v původním vzorku (N^r)	0,46 %

Tab. 2.2 Vlastnosti hnědého uhlí 610–32 společnosti Sokolovská uhelná a.s.

Vlastnosti	Zemní plyn
Výhřevnost (Q_{i^f})	34 MJ/Nm ³
Obsah CH ₄	96,3 %
Obsah C ₂ H ₆	1,5 %
Obsah C ₃ H ₈	0,4 %
Obsah CO ₂	0,4 %
Obsah O ₂	0,5 %
Obsah N ₂	0,9 %

Tab. 2.3 Vlastnosti zemního plynu

2.5 Výstup přehřáté páry ze stávajícího uhelného kotle K1

Přehřátá pára je od kotlů K1, K2 a K3 vedena do vysokotlakého rozdělovače „VTR A“. Z rozdělovače je pára vedena k redukční stanici „RS 1“ a odběrové turbíně „TG 1“. Odběry z parní turbíny jsou využívány k dodávce tepla.

Teplo je dodáváno do centrálních výměníkůvých stanic pára/voda prostřednictvím NT páry (220 °C/0,7–0,8 MPa). Z centrálních výměníkůvých stanic je k odběratelům dodávána horká (130/70 °C) a teplá (90/70 °C) voda.

2.6 Čištění spalin stávajícího uhelného kotle K1

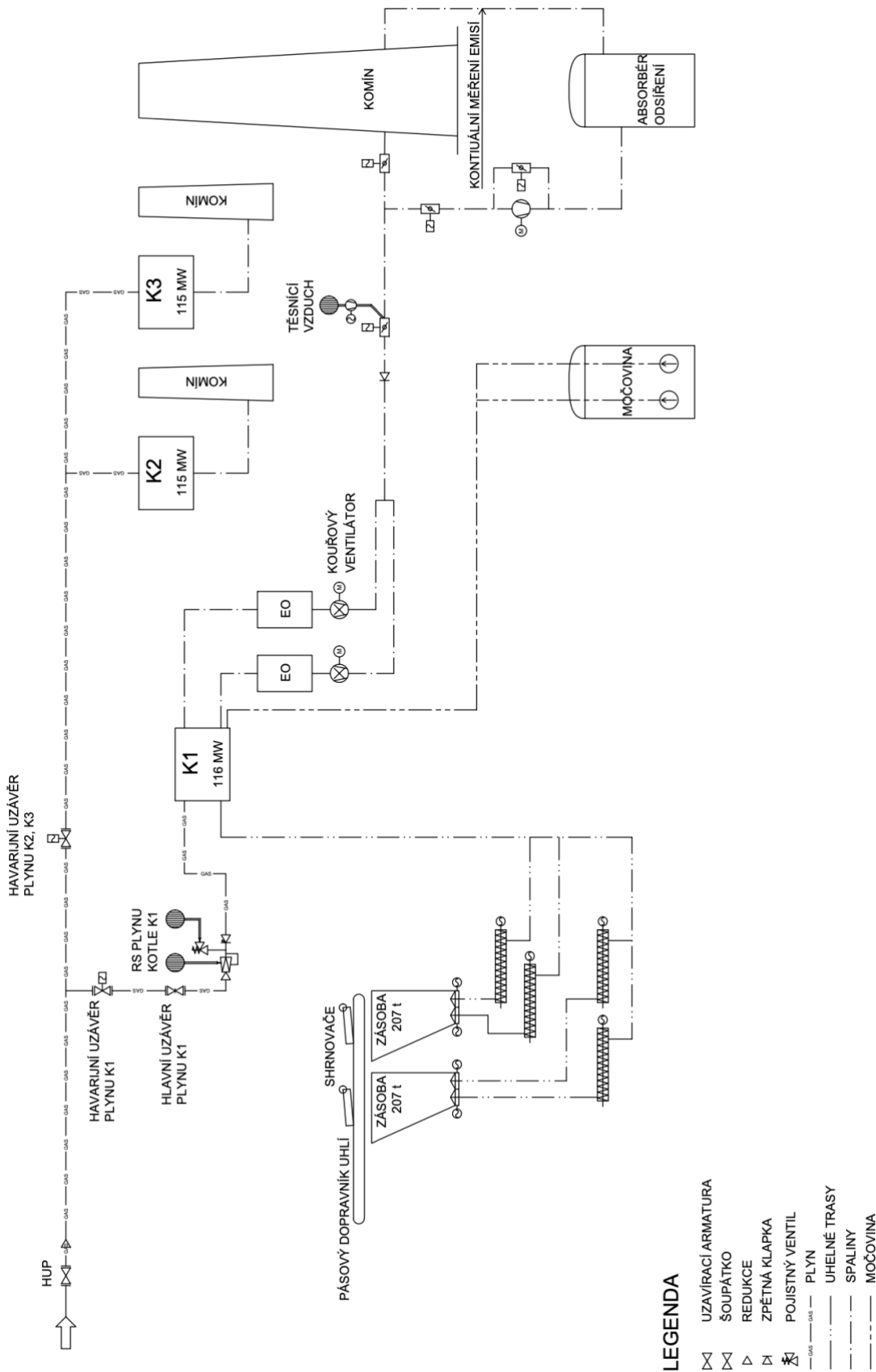
Kotel využívá primárních i sekundárních opatření pro snižování emisí NO_x.

Primární opatření spočívá ve snaze zamezení vzniku NO_x již během procesu spalování. Z tohoto důvodu je kotel vybaven nízkoemisními práškovými hořáky a regulací spalovacího vzduchu.

Sekundární opatření slouží k redukci již vzniklých emisí NO_x a k tomuto účelu je u kotle K1 využívána technologie SNCR, která je tvořena zásobní nádrží močoviny a dopravními cestami reagentu k míchacímu modulu, míchacím modulem a vstřikovacími tryskami. Technologie SNCR spočívá v nástřiku čpavku do kotle v místech, kde se teplota spalin pohybuje v rozmezí 900–1050 °C. Tímto dojde ke vzniku redukčních podmínek, při kterých jsou snižovány oxidy dusíku za vzniku elementárního dusíku a vodní páry. [35]

Spaliny jsou z kotle kouřovodem vedeny přes elektrostatické filtry TZL. U těchto filtrů dochází k zachytávání tuhých částic na srážecích elektrodách pomocí působení elektrostatických sil. Z filtrů TZL jsou spaliny pomocí dvojice kouřových ventilátorů vedeny kouřovodem přes uzavírací klapku, napojenou na stávající rozvod těsnícího vzduchu, do odsíření (mokrý vápencová vypírka). Spaliny při odsířování vstupují do absorbéru, ve kterém jsou „sprchovány“ vodní vápencovou suspenzí, která při styku s oxidem siřičitým obsaženým ve spalinách reaguje za vzniku hydrogensířičitanu vápenatého. Vzniklý hydrogensířičitan vápenatý lze ještě v odsířovacím reaktoru oxidovat a získat tak dihydrát síranu vápenatého (energósádovec), který má další využití. Za technologii odsíření je kouřovod vybaven pomocným spalínovým ventilátorem a zaústěn do stávajícího komínu. Pro případy najíždění kotle je na spalínovodu, u odbočky do technologie odsíření, zhotoven by-pass pomocí kterého lze spaliny vypouštět přímo do komína.

2.7 Technologické schéma stávajícího uhelného kotle K1



Obr. 2.1 Technologické schéma stávajícího hnědouhelného kotle K1

3 Konceptní návrh nového zdroje

Podklady k návrhu rekonstrukce stávajícího zdroje byly získány na základě konzultací ve společnosti Damaris Solutions s.r.o.

Účelem rekonstruovaného kotle bude výroba přehřáté páry pro výrobu elektrické energie a tepla prostřednictvím kogenerace. Nový biomasový kotel bude vřazen do procesu výroby tepla stejným způsobem jako původní granulační kotel.

Kotel je navržen na parní výkon 150 t/h, při parametrech výstupní páry 9,42 MPa, 535 °C. Palivem bude biomasa – dřevní štěpka. Technické parametry nového kotle jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Typ kotle	se stacionární fluidní vrstvou
Palivo	dřevní štěpka
Jmenovitý parní výkon	150 t/h
Tepelný výkon	116,7 MW _t
Jmenovitý tlak přehřáté páry	9,42 MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	535 ± 5 °C
Spotřeba paliva při jmenovitém výkonu kotle	45,2 t/h (výhřevnost 10,27 MJ/kg)
Teplota napájecí vody	160 °C
Teplota spalovacího vzduchu	140 °C
Informativní teplota výstupních spalin	145 °C
Účinnost kotle při jmenovitém výkonu	cca 90 %

Tab. 3.1 Technické parametry nového biomasového kotle

3.1 Umístění a konstrukce nového biomasového kotle

Z důvodu, že spalování ve fluidní vrstvě probíhá při nižší teplotě, než v práškovém ohništi (cca 900 °C), bude oproti stávajícímu kotli potřeba větších teplosměnných ploch. Proto bude stávající kotel rozšířen a doplněn o čtvrtý tah.

Je navržen jednobubnový parní kotel s přirozenou cirkulací parovodní směsi. Ve spodní části spalovací komory je navržen stacionární rošt, nad kterým bude probíhat spalování v bublinkující fluidní vrstvě, kterou bude udržovat ve vznosu proud spalovacího vzduchu z primárního ventilátoru. Spalovací komora a část prvního tahu bude tvořena membránovými stěnami. Zbytek kotle, včetně spodní části prvního tahu kotle bude tvořen plechovými kanály, ve kterých budou umístěny plochy pro ohřev vzduchu, napájecí vody a přehříváky páry.

Z konstrukčních důvodů bude nový kotel delší a širší. Podle těchto požadavků bude potřeba upravit stávající základy kotle spolu s nosnými sloupy. Výška kotelny zůstane zachována.

Tlakový celek kotle bude proveden v souladu s ČSN EN 12952, ČSN EN 13480, 2014/68/EU a bude tvořen těmito hlavními částmi:

- ohříváky napájecí vody (ekonomizéry)
- výparníkem
- přehříváky páry
- propojovacím potrubím z ekonomizéru do parního bubnu
- parním bubnem s příslušenstvím
- potrubím ostré páry
- potrubím najížděcí páry

- chladiči páry
- pojistnými ventily
- vypouštěcími a odvodušňovacími přípojkami
- jemnou armaturou kotle (vodoznaky, odvodušňovací ventily, hlavní uzávěr, vypouštěcí ventily...)
- měřením teploty a tlaku.

3.2 Systém spalovacího vzduchu nového biomassového kotle

Systém zajišťuje přísun a distribuci primárního a sekundárního vzduchu do spalovací komory, k chlazení palivových tras a ke snížení teploty spalin před vstupem do filtru. Primární vzduch je přiváděn pod rošt do spodní části výsypky, do palivových svodek a slouží primárně k fluidizaci paliva. Sekundární vzduch je přiváděn dvěma úrovněmi do horní části spalovací komory, kde slouží ke snížení nedopalu, regulaci teploty ve spalovací komoře a k distribuci spalovacího vzduchu pro najížděcí a stabilizační plynové hořáky.

Systém spalovacího vzduchu zahrnuje:

- sací potrubí primárního a sekundárního ventilátoru, které umožní sání z kotelny a z venkovního prostředí
- primární a sekundární ventilátor, oba řízené frekvenčními měniči
- výtlačná potrubí primárního a sekundárního ventilátoru osazené o regulační armatury a měřením průtoku
- ohřívačky vzduchu

3.3 Napájení nového biomassového kotle

Napojení napájení bude provedeno na stávající potrubí v místě stávající napájecí hlavy. Budou vyměněny veškeré armatury napájecí hlavy. Za napájecí hlavou bude zhotoveno nové napájecí potrubí do nového biomassového kotle.

3.4 Palivo nového biomassového kotle

Palivem pro nový kotel je dle vyhlášky 477/2012 Sb. Typ S2 a S3 – dřevní štěpka původem z čerstvého, nebo skladovaného listnatého a jehličnatého dřeva v libovolném poměru charakterizována jako: zbytkové hmoty z těžby dřeva, tzv. nehroubí, tj. dřevo do průměru 7 cm a zbytkové produkty z jejího zpracování včetně kořenů (pařezů), biomasa vzniklá v lese z probírek a prořezávek, dřevní hmota z údržby veřejné a soukromé zeleně včetně trátí, vodotečí, rozvodů elektřiny apod. a zbytkové produkty jejího zpracování, včetně jejich úprav pro přepravu ke konečnému spotřebiteli biomasy, nebo odřezky ze dřeva určené pro materiálové využití, včetně vedlejších a zbytkových produktů jejich zpracování a včetně jejich úprav pro přepravu ke konečnému spotřebiteli biomasy, nebo štěpka vzniklá při pilařském zpracování odkorněného a neodkorněného dřeva. Jako referenční palivo pro výpočty byla zvolena lesní štěpka, jejíž prvkový rozbor je uveden v tabulce 3.1.

Dřevní štěpka bude bez kovů a mechanických nečistot pro velikost 10 mm a více. Podíl kůry do 30 %, podíl příměsí (písek, jíl apod.) do 2 %. Granulometrie dřevní štěpky: velikost do 80 mm, nadsítná frakce částice s celkovou délkou stran do 160 mm. Obsah stopových prvků v minimálních i maximálních hodnotách dle ČSN EN ISO 17255–1 z roku 2020.

Vzhledem k tomu, že kvalita dřevní štěpky, především její obsah vlhkosti, se může v průběhu roku značně měnit, což by kladlo zvýšené nároky na regulaci kotle, je navržena výstavba skladu štěpky. Skladování štěpky v zastřešeném a odvětrávaném objektu zajistí její vysoušení, a tedy udržování přibližně stejného obsahu vlhkosti ve štěpce. Bude se jednat o komplex budov, zajišťujících příjem, skladování a dopravu dřevní štěpky do kotle. Komplex budov se bude skládat z:

- příjmové stanice
- skladu štěpky
- objektu vzduchového třídiče a vzduchotechniky

Příjmová stanice bude sloužit k zajištění příjmu dřevní štěpky z kamionů. Objekt je pojat jako vykládka paliva a bude se skládat ze dvou paralelních stání pro kamionovou dopravu. Bude se jednat o nadzemní objekt jehož technologická část bude z části zapuštěna pod terén. Technologickou částí se rozumí dvojice šnekových dopravníků a dvojice pásových dopravníků zajišťujících dopravu dřevní štěpky do skladové haly.

Sklad štěpky bude umístěn na ploše stávající skládky hnědého uhlí. Budova skladu je navržena jako nadzemní objekt, jehož skladovací prostor bude řešen železobetonovou vanou. Nad touto železobetonovou vanou se bude nacházet ocelová konstrukce, která bude tvořit zastřešení a umožní pojezd jeřábu s drapákem.

Objekt vzduchového třídiče a vzduchotechniky bude technologický objekt sloužící pro umístění technologie vzduchového třídiče a vzduchotechnického zařízení. VZT zařízení bude zajišťovat odvětrávání provozních prostorů příjmové stanice, skladu štěpky a prostoru vzduchového třídiče.

Vzduchový třídič bude zajišťovat požadované rozměry a kvalitativní parametry surové dřevní štěpky. Z technologického hlediska bude zajišťovat operace třídění, drcení a odstraňování těžké frakce (písek, kameny, kovové části)

Dřevní štěpka je při vykládce sypána z kamionů do systému šnekových dopravníků, jejíž svodky jsou zaústěny do bočního pásového dopravníku. Z tohoto dopravníku je štěpka přesypána na další pásový dopravník, který zajišťuje její dopravu do přesýpací věže umístěné na rohu skladové haly. Z přesýpací věže je štěpka přesypána na pásový dopravník, který prochází celým objektem skladu. Na tomto dopravníku je umístěn pojízdný jednostranný vyhrnovací pluh, který štěpku směřuje na pojízdný portálový dopravník. Z portálového dopravníku je štěpka pomocí šípových pluhů shazována na požadované místo ve skladu. Vyskladňování a manipulace s dřevní štěpkou uvnitř skladu je zajišťována mostovým jeřábem s drapákem s autonomním systémem řízení. Ze skladu je štěpka drapákem jeřábu sypána do násypky se žlabovým šnekovým dopravníkem. Jím je vedena do systému třídění a drcení. Vytříděná štěpka je pásovým dopravníkem vyvedena ven z objektu třídiče a přesypána na pásový dopravník vedoucí do objektu kotelny. V objektu kotelny je štěpka přesypána na pásový dopravník zajišťující její dopravu do nových zásobníků štěpky nacházejících se poblíž kotle. Z těch je pomocí systému šnekových dopravníků dopravována do svodek paliva nového biomasového kotle.

Najížděcím a stabilizačním palivem bude stejně jako v případě hnědouhelného kotle K1 zemní plyn, který bude ke kotli přiveden z průmyslového plynovodu.

Vlastnosti	Lesní štěpka
Sypná hmotnost	250 kg/m ³
Střední velikost částic	13,23 mm
Vlhkost v původním vzorku (W ^r)	30,00 %
Popelovina v bezvodém vzorku (A ^d)	11,90 %
Uhlík v bezvodém vzorku (C ^d)	46,89 %
Vodík v bezvodém vzorku (H ^d)	5,14 %

Dusík v bezvodém vzorku (N ^d)	0,34 %
Síra v bezvodém vzorku (S ^d)	0,04 %
Kyslík v bezvodém vzorku (O ^d)	47,59 %

Tab. 3.2 Vlastnosti lesní štěpky

3.5 Výstup přehřáté páry z nového biomasového kotle

Výstupní potrubí přehřáté páry bude napojeno na stávající potrubní rozvody vedoucí do stávajícího vysokotlakého rozvaděče „VTR A“.

3.6 Čištění spalín a spalínovody nového biomasového kotle

Účelem systému čištění spalín je zajistit plnění požadovaných emisních limitů.

Nový biomasový kotel bude stejně jako kotel původní využívat primární i sekundární opatření pro snižování emisí oxidů dusíku.

Z důvodu nižších teplot spalín, oproti původnímu kotli na uhlí, je u nového kotle jako sekundární opatření ke snižování emisí NO_x navržena technologie SCR (selektivní katalytická redukce). Selektivní katalytická redukce je založena na stejných chemických reakcích jako technologie SNCR, ale díky katalyzátoru umístěném v tahu kotle, za místem vstřiku redukčního činidla (močoviny), probíhají reakce již při teplotách 300–400 °C. Pro skladování, dopravování a nakládání s močovinou bude využito stávající nádrže, včetně dopravních cest a míchacího modulu. [35]

Nově bude za kotlem před vstupem do filtru tuhých znečišťujících látek umístěn předfiltr, jehož účelem je zachycení nedohořených částic ve spalínách a zabránit tak možnému vzniku požáru ve filtru TZL. Předfiltry jsou mechanické odlučovače, které odlučují prachové částice za pomoci odstředivé síly, které na tyto částice, unášené v odsávané vzdušině, působí. Směs vzduchu a prachu vstupuje do vrchní excentrické části cyklónového odlučovače. Pomocí excentrického náběhu je směs uvedena do rotace kolem osy cyklónu. Prachové částice tak vlivem odstředivé síly kloužou po vnitřní ploše předfiltru a vlivem gravitace padají dolů k výsypné přírubě. Takto vyčištěné spaliny odcházejí vrchní částí předfiltru.

Za předfiltrem bude na místě stávajícího filtru tuhých znečišťujících látek umístěn filtr nový. Nový filtr TZL bude tvořen tkaninovými filtračními rukávci vyztuženými opěrnými koši. Spaliny obsahující pevné znečišťující částice vstupuje do filtru, kde vlivem poklesu rychlosti a změně směru proudu spalín dojde k odloučení prvních hrubých částic prachu. Spaliny dále postupují k vertikálně zavěšeným filtračním hadicím, na jejichž vnějším povrchu dojde k oddělení zbývajících tuhých částic. Následně vyčištěné spaliny prochází přes komoru vyčištěných spalín ven z filtru. Na vnějších površích filtračních dílů se vlivem filtračního děje vytváří souvislá vrstva prachu, která se pravidelně odstraňuje například pulsní regenerací. Regenerace je prováděna krátkými pulsy stlačeného vzduchu, který je vháněn do filtračních dílů. Účinkem pulsů stlačeného vzduchu na vnitřní stranu filtračních dílů dojde k odtržení usazené prachové vrstvy. Prach poté padá do výsypky, odkud je odváděn mimo prostor filtru. Čestnost a délka pulsů je řízena řídicí jednotkou, která pomocí solenoidových ventilů ovládá membránové ventily regeneračního systému. Regenerační proces je řízen na základě tlakové ztráty filtru, nebo pevného časového režimu tak, aby nedocházelo k nadměrnému zvyšování tlakové ztráty a zároveň aby byla na filtračních dílech stálá vrstva prachu (filtrační koláč), která zvyšuje účinek filtru tuhých znečišťujících látek.

Na výstupu z filtru tuhých znečišťujících látek budou zhotoveny nové spalínovody, které budou zaústěny do sání kouřového ventilátoru. Na výtlaku kouřového ventilátoru bude odbočka pro recirkulaci spalín do sání primárního a sekundárního ventilátoru spalovacího vzduchu. Stávající systém spalínovodů za nově zhotovenou odbočkou bude nutno vzhledem k větším průtokům spalín nahradit novým o větších rozměrech. Systém spalínovodů bude tvořen

hranatými, nebo kulatými kanály s plynotěsně svařenými přechody z ocelových plechů. Dilatace budou řešeny pomocí tkaninových kompenzátorů. Návrhová rychlost spalin v kouřovodech je 10–25 m/s.

Stávající systém odsíření bude zachován, případně bude provedena jeho intenzifikace tak, aby byly plněny emisní limity kyselých složek HCL a HF.

Nový systém čištění spalin a spalinovodů zahrnuje:

- potrubí spalinovodu z kotle do předfiltru
- potrubí spalinovodu z předfiltru do filtru TZL
- filtr tuhých znečišťujících látek
- potrubí z filtru TZL do sání kouřového ventilátoru
- kouřový ventilátor
- potrubí výtlaku z kouřového ventilátoru
- potrubí spalinovodu z kouřového ventilátoru do technologie odsíření
- úpravy na technologii odsíření
- úpravy na posilovacím ventilátoru odsíření
- potrubí spalinovodu z technologie odsíření do komína

3.7 Popelové hospodářství nového biomasového kotle

Popelové hospodářství pro rekonstruovaný kotel bude zajišťovat dopravu ložového popela a pseudoproduktu popílku z mezitahu kotle do nového sila popílku.

Odběr ložového popela bude realizován pomocí chlazených šnekových dopravníků, které budou dopravovat vzniklou škváru do sběrné nádoby, kde bude případně dochlazena na požadovanou teplotu. Následně bude škvára pomocí systému stávajících dopravních šneků a řetězových dopravníků dopravována na dopravníkový pás, pomocí kterého bude odvedena do stávajícího sila škváry.

Popílek z předfiltru bude možno odvádět dvěma trasami. První trasa umožní odvádět popílek přes turniketový podavač do plnicí hubice a následně do cisternového motorového vozidla. Druhá trasa z předfiltru bude zavedena do komorových podavačů, ze kterých bude popílek tlakovým vzduchem přefukován do nového samostatného sila popílku dřevní štěpky.

Principem dopravy popílku z nového filtru tuhých znečišťujících látek je shromažďování popílku v zásobníku. Následně po vytvoření hladiny je zásobník tlakově oddělen od filtru a natlakován dopravním vzduchem. Poté je směs vypuštěna do dopravního potrubí sila popílku. Filtr tuhých znečišťujících látek bude opatřen šesti jehlanovými výsypkami. Pod každou výsypkou bude instalován deskový uzávěr, který umožní odběr popílku přes svislou svodku, která bude zaústěna do komorového podavače pseudoproduktu. Odtud bude popílek pneumaticky dopravován do nového sila popílku, ze kterého bude odvážen k dalšímu nakládání.

Popelové hospodářství zahrnuje:

- komorové vynašeče úletového popílku z předfiltru a filtru TZL
- turniketové podavače z předfiltrů do plnicích hubic
- plnicí hubice
- silo popílku
- potrubí z komorových vynašečů do místa napojení
- potrubí tlakového vzduchu
- nádobu shromažďování škváry včetně dochlazovacího systému
- šnekový dopravník popelovin k napojení na stávající dopravu
- vertikální dopravník strusky

Obr. 3.1 Technologické schéma nového biomasového kotle

4 Bilanční výpočty stávajícího zdroje

Obsahem této kapitoly jsou přípravné výpočty, základní bilance kotle, výpočty množství produkováných emisí a výpočty čištění spalin. Přípravnými výpočty se rozumí přepočty složení a výhřevnosti paliv, stechiometrické výpočty, výpočty entalpií spalin a vzduchu. Základní bilance kotle zahrnuje výpočet tepelných ztrát a účinnosti kotle a množství potřebného paliva. Počítáno dle [36].

4.1 Stechiometrické výpočty

Stechiometrické výpočty slouží ke stanovení objemu vzduchu potřebného pro spalování jednotkového množství paliva a objemu vzniklých spalin.

4.1.1 Výpočet minimálního objemu vzduchu

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$\begin{aligned} O_{O_2 min} &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) = \\ &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{34,66}{12,01} + \frac{3,72}{4,032} + \frac{0,70}{32,06} - \frac{7,64}{32} \right) = 0,804 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{vs min} = \frac{O_{O_2 min}}{0,21} = \frac{0,804}{0,21} = 3,829 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.2)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{vv min} = \chi_v \cdot O_{vs min} = 1,016 \cdot 3,829 = 3,891 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.3)$$

kde $\chi_v \dots$ součinitel podílu vodní páry připadajícího na 1 Nm³ suchého vzduchu.
Při výpočtech pro běžné klimatické podmínky lze volit $\chi_v = 1,016$ odpovídající vlhkosti $\varphi = 70 \%$ při teplotě $t_v = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu:

$$O_{H_2O}^v = O_{vv min} - O_{vs min} = 3,891 - 3,829 = 0,061 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.4)$$

4.1.2 Výpočet minimálního objemu spalin

Minimální objem spalin vznikne při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu, tzn. při spalování bez přebytku vzduchu ($\alpha = 1$).

Objem oxidu uhličitého ve spalinách:

$$\begin{aligned} O_{CO_2 min} &= \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + 0,0003 \cdot O_{vs min} = \\ &= \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{34,66}{100} + 0,0003 \cdot 3,829 = 0,644 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Objem oxidu siřičitého ve spalínách:

$$O_{SO_2 min} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,70}{100} = 0,005 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.6)$$

Objem dusíku ve spalínách:

$$\begin{aligned} O_{N_2 min} &= \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,7805 \cdot O_{vs min} = \\ &= \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,46}{100} + 0,7805 \cdot 3,829 = 2,992 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Objem argonu ve spalínách:

$$O_{Ar min} = 0,0092 \cdot O_{vs min} = 0,0092 \cdot 3,829 = 0,035 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.8)$$

Minimální objem suchých spalín získaný spálením 1 kg paliva:

$$\begin{aligned} O_{ss min} &= O_{CO_2 min} + O_{SO_2 min} + O_{N_2 min} + O_{Ar min} = \\ &= 0,644 + 0,005 + 2,992 + 0,035 = 3,676 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalín:

$$\begin{aligned} O_{H_2O}^s &= \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{W^r}{100} + O_{H_2O}^v = \\ &= \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{3,72}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{36,33}{100} + 0,061 = 0,925 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Minimální objem vlhkých spalín získaný spálením 1 kg paliva:

$$O_{sv min} = O_{ss min} + O_{H_2O}^s = 3,676 + 0,925 = 4,601 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.11)$$

4.1.3 Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalín

V případě stávajícího zdroje je pro granulační ohniště s uzavřeným mlecím okruhem bez recirkulace a přímým foukáním počítáno s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,25$.

Skutečný objem suchého vzduchu:

$$O_{vs} = O_{vs min} \cdot \alpha = 3,829 \cdot 1,25 = 4,786 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.12)$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu:

$$O_{vv} = O_{vv min} \cdot \alpha = 3,891 \cdot 1,25 = 4,864 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (4.13)$$

Skutečný objem suchých spalín:

$$\begin{aligned} O_{ss} &= O_{ss \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vs \min} = 3,676 + (1,25 - 1) \cdot 3,829 = \\ &= 4,633 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Skutečný objem vlhkých spalín:

$$\begin{aligned} O_{sv} &= O_{sv \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vv \min} = 4,601 + (1,25 - 1) \cdot 3,891 = \\ &= 5,574 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Výpočet minimálního objemu vzduchu	
Min. objem kyslíku ($O_{O_2 \min}$)	0,804 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem suchého vzduchu ($O_{vs \min}$)	3,829 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem vlhkého vzduchu ($O_{vv \min}$)	3,891 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem H ₂ O v min. objemu vlhkého vzduchu ($O_{H_2O}^v$)	0,061 Nm ³ /kg _{PAL}
Výpočet minimálního objemu spalín	
Objem oxidu uhličitého ($O_{CO_2 \min}$)	0,644 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem oxidu siřičitého ($O_{SO_2 \min}$)	0,005 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem dusíku ($O_{N_2 \min}$)	2,992 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem argonu ($O_{Ar \min}$)	0,035 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem suchých spalín ($O_{ss \min}$)	3,676 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem H ₂ O v min. objemu vlhkých spalín ($O_{H_2O}^s$)	0,925 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem vlhkých spalín ($O_{sv \min}$)	4,601 Nm ³ /kg _{PAL}
Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalín	
Objem suchého vzduchu (O_{vs})	4,786 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem vlhkého vzduchu (O_{vv})	4,864 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem suchých spalín (O_{ss})	4,633 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem vlhkých spalín (O_{sv})	5,574 Nm ³ /kg _{PAL}

Tab. 4.1 Přehled vypočtených hodnot stechiometrie stávajícího kotle K1

4.2 Entalpie spalin a vzduchu

Při výpočtu tepelné bilance kotlů je potřeba vyjadřovat teplo odebírané spalínám. K tomuto účelu se využívá jejich entalpie. Spaliny jsou směs plynů, a proto lze jejich entalpii vyjádřit jako součet entalpií dílčích složek včetně popílku. Měrné entalpie některých složek spalin jsou uvedeny v následující tabulce.

t [°C]	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	suchý vzd.	CO	O ₂	popílek
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	170,0	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395,0	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664,0	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381

Tab. 4.2 Měrná entalpie některých složek spalin i_i^t [kJ/Nm³] v závislosti na teplotě t [°C] [36]

Níže uvedené výpočty jsou provedeny pro každou teplotu z Tab. 4.2 zvlášť. Pro názornost jsou uvedeny výpočty pro teplotu 100 °C. U výpočtů s přebytkem vzduchu je počítáno s jeho hodnotou $\alpha = 1,25$.

Entalpie minimálního objemu spalin:

$$\begin{aligned}
 I_{s\min}^t &= O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + \\
 &\quad + a_{\dot{u}} \cdot A^r \cdot i_{pop}^t = \\
 &= 0,644 \cdot 170 + 0,005 \cdot 191,2 + 2,992 \cdot 129,5 + 0,035 \cdot 93,07 + \\
 &\quad + 0,925 \cdot 150,6 + 0 = 640,5 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

kde $a_{\dot{u}}$... představuje poměrný úlet popílku z ohniště vztažený k celkovému obsahu popela v palivu A^r . Entalpie popílku se ve spalínách uvažuje pouze pokud procento popelovin v palivu splňuje nerovnost:

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_r^i}{41,8 \cdot X_{\dot{u}}}$$

$$16,49 > \frac{6 \cdot 12810}{41,8 \cdot 80} \quad (4.17)$$

$$16,49 \ngtr 22,98$$

kde $X_{\dot{u}} \dots$ je procento úletového popílku, které bylo po odborné konzultaci zvoleno
 $X_{\dot{u}} = 80 \%$

Nerovnost není splněna, proto entalpie popílku není ve výpočtu uvažována.

Entalpie minimálního objemu suchého vzduchu:

$$I_{v \min}^t = O_{vs \min} \cdot i_{vs}^t + O_{H_2O}^t \cdot i_{H_2O}^t = 3,829 \cdot 132,3 + 0,061 \cdot 150,6 =$$

$$= 515,9 \text{ kJ/kg} \quad (4.18)$$

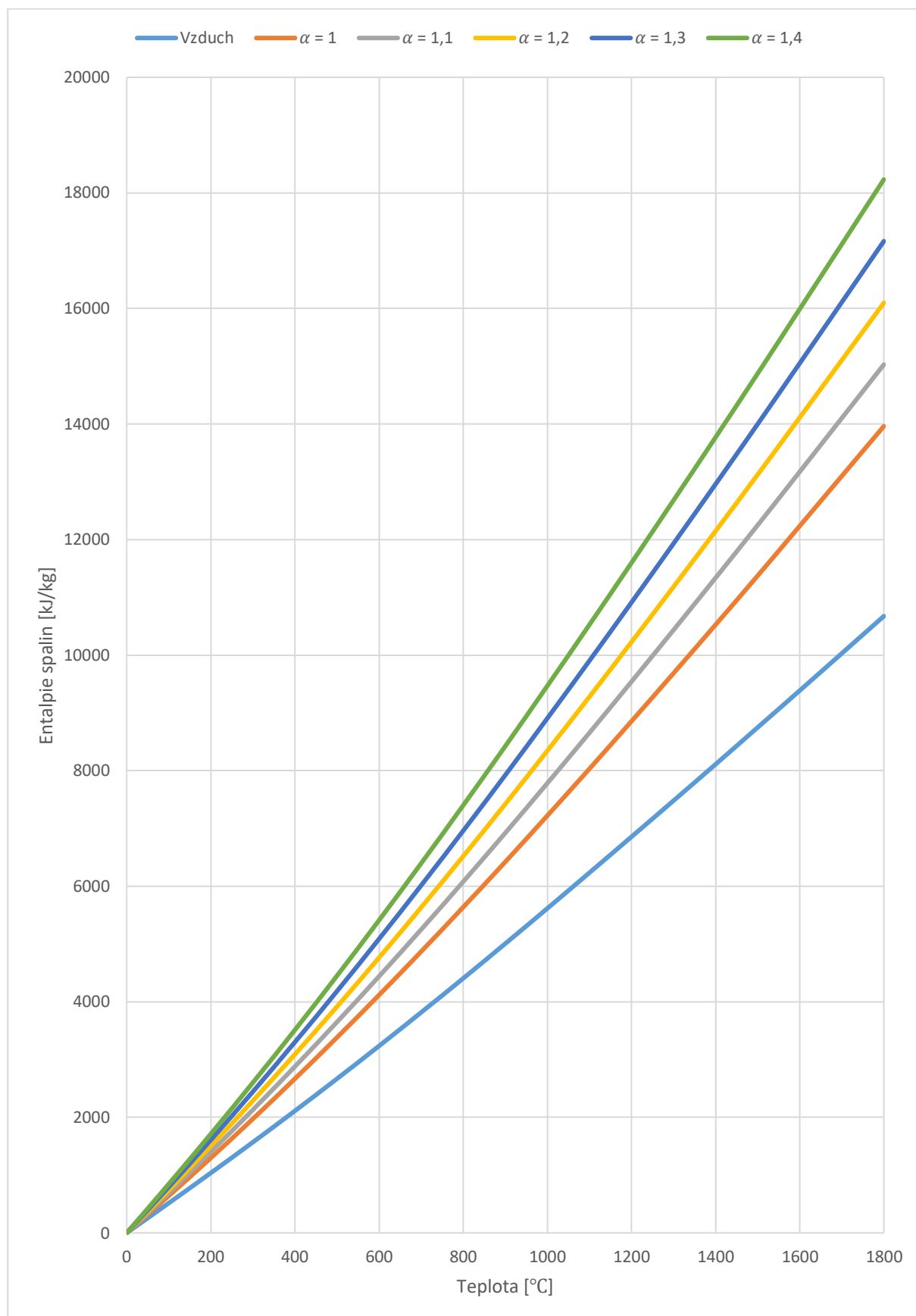
Entalpie spalín s přebytkem vzduchu:

$$I_s^{t,\alpha} = I_{s \min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{v \min}^t = 640,5 + (1,25 - 1) \cdot 515,9 =$$

$$= 769,5 \text{ kJ/kg} \quad (4.19)$$

t	$I_{s \min}^t$	$I_{v \min}^t$	$I_s^{t,\alpha} = I_{s \min}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{v \min}^t \text{ [kJ/kg]}$				
[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,4$
0	0	0	0	0	0	0	0
100	640,5	515,9	640,5	692,0	743,6	795,2	846,8
200	1298,0	1038,0	1298,0	1401,8	1505,6	1609,4	1713,2
300	1973,9	1569,7	1973,9	2130,9	2287,8	2444,8	2601,8
400	2669,1	2112,7	2669,1	2880,4	3091,6	3302,9	3514,2
500	3383,5	2668,3	3383,5	3650,4	3917,2	4184,0	4450,9
600	4117,5	3236,2	4117,5	4441,1	4764,7	5088,3	5411,9
700	4869,1	3815,9	4869,1	5250,7	5632,2	6013,8	6395,4
800	5638,0	4405,1	5638,0	6078,5	6519,0	6959,5	7400,1
900	6421,0	5006,6	6421,0	6921,7	7422,3	7923,0	8423,7
1000	7221,2	5616,0	7221,2	7782,8	8344,4	8906,0	9467,6
1100	8031,4	6233,4	8031,4	8654,7	9278,1	9901,4	10524,8
1200	8854,3	6855,0	8854,3	9539,8	10225,3	10910,8	11596,3
1300	9686,2	7480,7	9686,2	10434,2	11182,3	11930,4	12678,4
1400	10525,7	8110,4	10525,7	11336,7	12147,8	12958,8	13769,8
1500	11373,5	8748,0	11373,5	12248,3	13123,1	13997,9	14872,7
1600	12234,5	9385,9	12234,5	13173,1	14111,7	15050,3	15988,8
1800	13961,3	10673,7	13961,3	15028,6	16096,0	17163,4	18230,7

Tab. 4.3 Vypočtené hodnoty entalpií spalín a vzduchu pro sestavení I-t diagramu spalín stávajícího kotle K1



Graf 4.1 I-t diagram spalín stávajícího kotle K1

4.3 Základní bilance kotle

Cílem základní bilance kotle je stanovení účinnosti kotle a spotřeby paliva pro zajištění požadovaného tepelného výkonu. Počítáno dle [36].

4.3.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_{i\ red} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz} + Q_{pr} = 12810 + 44,83 = 12854,8\ kJ/kg \quad (4.20)$$

kde Q_i^r ... výhřevnost paliva
 i_{pv} ... fyzické teplo paliva
 Q_{cz} ... teplo přivedené cizím zdrojem
 Q_{pr} ... teplo přivedené parou při ofukování

Fyzické teplo paliva je započítáváno pouze v případě, pokud je splněna podmínka:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$
$$36,33 \geq \frac{12810}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (4.21)$$
$$36,33 \geq 20,38$$

Podmínka splněna, fyzické teplo paliva bude započteno.

Fyzické teplo paliva:

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 2,24 \cdot 20 = 44,83\ kJ/kg \quad (4.22)$$

kde c_{pv} ... měrná tepelná kapacita paliva
 t_{pv} ... teplota paliva (zvoleno 20 °C)

Měrná tepelná kapacita paliva:

$$c_{pv} = 4,19 \cdot W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r) = 4,19 \cdot 0,3633 + 1,13 \cdot (1 - 0,3633) = 2,24\ kJ/kg \cdot K \quad (4.23)$$

kde c_{su} ... měrné teplo sušiny paliva (pro hnědé uhlí $c_{su} = 1,13\ kJ/kg \cdot K$)

4.3.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle

Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem vzniká u tuhých paliv vlivem obsahu nespáleného uhlíku ve škváře, popílku a úletu.

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} = 0,929 + 0,596 = 1,525\ \% \quad (4.24)$$

kde Z_{cs} ... nedopal ve škváře nebo strusce
 $Z_{cú}$... nedopal v úletu

Jednotlivé složky ztráty nedopalem ($i = s, ú$) se určí pomocí vzorce:

$$Z_{ci} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot Q_{ci} \quad (4.25)$$

kde C_i ... podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků
 X_i ... podíl popela z celkového množství v palivu připadající na uvažovaný druh tuhých zbytků
 Q_{ci} ... výhřevnost hořlaviny uvažovaného druhu tuhých zbytků. Za předpokladu, že spalitelné látky jsou tvořeny převážně uhlíkem lze brát $Q_{ci} = 32600 \text{ kJ/kg}$

Ztráta nedopalem vzniklá ve škváře nebo strusce:

$$Z_{cs} = \frac{0,1}{1 - 0,1} \cdot 0,2 \cdot \frac{16,49}{12854,8} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,929 \% \quad (4.26)$$

Ztráta nedopalem vzniklá úletem:

$$Z_{cú} = \frac{0,0175}{1 - 0,0175} \cdot 0,8 \cdot \frac{16,49}{12854,8} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,596 \% \quad (4.27)$$

Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemickým nedopalem vzniká v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách, především oxidu uhelnatého.

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{ss \text{ min}}}{(21 - O_{2 \text{ ref}}) \cdot Q_{i \text{ red}}} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 3,676}{(21 - 6) \cdot 12854,8} \cdot 100 = 0,101 \% \quad (4.28)$$

kde $O_{2 \text{ ref}}$ referenční obsah kyslíku (pro spalování uhlí $O_{2 \text{ ref}} = 6 \%$)
 $mgCO$... emisní limit CO pro hnědé uhlí dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Touto ztrátou je zohledňováno množství tepla uniklé pláštěm kotle do okolního prostředí. Počítáno dle [37].

$$Z_s = \frac{Q_{RC}}{Q_N} \cdot 100 = \frac{0,945}{128,830} \cdot 100 = 0,733 \% \quad (4.29)$$

kde Q_{RC} ... ztráty sáláním a konvekcí
 Q_N ... maximální využitelný výkon

Ztráty sáláním a konvekcí:

$$Q_{RC} = C \cdot Q_N^{0,7} = 0,0315 \cdot 128,830^{0,7} = 0,945 \text{ MW} \quad (4.30)$$

kde C ... koeficient pro spalování hnědého uhlí [37]

Maximální využitelný výkon:

$$Q_N = M_{PAL} \cdot Q_i^r = 10,057 \cdot 12,81 = 128,830 \text{ MW} \quad (4.31)$$

kde M_{PAL} ... množství paliva přivedeného do kotle (rovnice č. 4.38)

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků vzniká v důsledku tepla odcházejícího z kotle ve formě nedochlazených tuhých zbytků.

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fú} = 0,002 + 0,001 = 0,003 \% \quad (4.32)$$

kde Z_{fs} ... ztráta fyzickým teplem škváry
 $Z_{fú}$... ztráta fyzickým teplem úletu

Jednotlivé složky ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků se určí pomocí vzorce:

$$Z_{fi} = \sum_i \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{i \text{ red}}} \cdot c_i \cdot t_i \quad (4.33)$$

kde c_i ... měrná tepelná kapacita tuhých zbytků [36]
 t_i ... uvažovaná teplota tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem škváry:

$$Z_{fs} = \frac{0,2}{1 - 0,1} \cdot \frac{0,1649}{12854,8} \cdot 0,9301 \cdot 600 = 0,002 \% \quad (4.34)$$

Ztráta fyzickým teplem úletu:

$$Z_{fú} = \frac{0,8}{1 - 0,0175} \cdot \frac{0,1649}{12854,8} \cdot 0,8244 \cdot 145 = 0,001 \% \quad (4.35)$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

Ztráta citelným teplem spalin představuje teplo odcházející z kotle prostřednictvím spalin. Jedná se o největší ztrátu, která největší mírou ovlivňuje výslednou účinnost kotle.

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, \alpha} - I_s^{t_{vz}, \alpha}}{Q_{i \text{ red}}} = (100 - 1,525) \cdot \frac{1124,04 - 153,88}{12854,8} = 7,432 \% \quad (4.36)$$

kde $I_s^{t_k, \alpha}$... entalpie spalin na výstupu z kotle

$I_s^{t_{vz}, \alpha}$... entalpie spalin při teplotě okolního vzduchu (zvoleno 20 °C)

Účinnost kotle

Z vypočtených ztrát kotle je možné určit jeho hrubou účinnost tzv. nepřímou metodou.

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = 100 - (1,525 + 0,101 + 0,733 + 0,003 + 7,432) = 90,21 \% \quad (4.37)$$

Teplo přivedené do kotle	
Teplo přivedené do kotle ($Q_{i \text{ red}}$)	12854,8 kJ/kg
Tepelné ztráty a účinnost kotle	
Ztráta mechanickým nedopalem (Z_c)	1,525 %
Ztráta chemickým nedopalem (Z_{co})	0,101 %
Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí (Z_{ci})	0,733 %
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků (Z_{fi})	0,003 %
Ztráta citelným teplem spalín (Z_k)	7,432 %
Účinnost kotle (η_k)	90,21 %

Tab. 4.4 Přehled vypočtených hodnot ze základní bilance stávajícího kotle K1

4.3.3 Množství vyrobené páry a paliva přivedeného do kotle

Výrobní teplo páry:

$$\begin{aligned} Q_v &= M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i'_w - i_{nv}) = \\ &= 41,67 \cdot (3470,5 - 680,77) + 0,625 \cdot (1382,5 - 680,77) = \\ &= 116\,677 \text{ kW} \end{aligned} \quad (4.38)$$

kde M_{pp} ... množství vyrobené páry
 M_o ... množství odluhu
 i_{pp} ... entalpie přehřáté páry
 i_{nv} ... entalpie napájecí vody
 i'_w ... entalpie syté vody

Množství paliva přivedeného do kotle:

$$M_{PAL} = \frac{Q_v}{Q_{i \text{ red}} \cdot \eta_k} = \frac{116677}{12854,8 \cdot 90,21} = 10,062 \text{ kg/s} \quad (4.39)$$

Skutečné množství spáleného paliva:

$$M_{pv} = M_{PAL} \cdot (1 - Z_c) = 10,057 \cdot (100 - 1,525) = 9,909 \text{ kg/s} \quad (4.40)$$

4.3.4 Měrné emise ve spalínách a množství vznikající strusky

Celkové množství vlhkých spalín:

$$O_{sv\ celk} = O_{sv} \cdot M_{pv} = 5,574 \cdot 9,909 = 55,229 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.41)$$

Celkové množství suchých spalín:

$$O_{ss\ celk} = O_{ss} \cdot M_{pv} = 3,676 \cdot 9,909 = 36,424 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.42)$$

Měrné emise oxidu siřičitého ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{SO_2} = \frac{M_{SO_2}}{M_S} \cdot \frac{S^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{64}{32} \cdot \frac{0,7}{100} \cdot 9,909 = 0,139 \text{ kg/s} \quad (4.43)$$

$$c_{sv\ SO_2} = \frac{\dot{m}_{SO_2}}{O_{sv\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,139}{55,229} \cdot 1000000 = 2\,512 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (4.44)$$

kde $\dot{m}_{SO_2}$... hmotnostní tok oxidu uhličitého ve spalínách
 M_{ii} ... molární hmotnost dané složky (S, SO₂)

Měrné emise oxidu uhličitého ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{44}{12} \cdot \frac{34,66}{100} \cdot 9,909 = 12,592 \text{ kg/s} \quad (4.45)$$

$$c_{sv\ CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{O_{sv\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{12,592}{55,229} \cdot 1000000 = 228\,002 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (4.46)$$

Měrné emise částic ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{TZL} = \frac{X_{\dot{u}}}{100} \cdot \frac{A^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{80}{100} \cdot \frac{16,49}{100} \cdot 9,909 = 1,307 \text{ kg/s} \quad (4.47)$$

$$c_{sv\ TZL} = \frac{\dot{m}_{TZL}}{O_{sv\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{1,307}{55,229} \cdot 1000000 = 23\,667 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (4.48)$$

Obsah kyslíku ve vlhkých spalínách:

$$O_{sv\ O_2} = (\alpha - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot O_{vs\ min} = (1,25 - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot 3,829 = 0,201 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (4.49)$$

Objemový podíl kyslíku ve vlhkých spalínách:

$$O_{2\ sv} = \frac{O_{sv\ O_2}}{O_{sv}} \cdot 100 = \frac{0,201}{5,574} \cdot 100 = 3,61 \% \quad (4.50)$$

Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách:

$$c_{ss\ SO_2} = \frac{\dot{m}_{SO_2}}{O_{ss\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,139}{36,424} \cdot 1000000 = 3\ 808 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.51)$$

Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalínách:

$$c_{ss\ CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{O_{ss\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{12,592}{36,424} \cdot 1000000 = 345\ 714 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.52)$$

Měrné emise částic v suchých spalínách:

$$c_{ss\ TZL} = \frac{\dot{m}_{TZL}}{O_{ss\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{1,307}{36,424} \cdot 1000000 = 35\ 886 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.53)$$

Obsah kyslíku v suchých spalínách:

$$O_{ss\ O_2} = (\alpha - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot O_{ss\ min} = (1,25 - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot 3,676 = 0,243 \frac{m^3}{kg} \quad (4.54)$$

Objemový podíl kyslíku v suchých spalínách:

$$O_{2\ ss} = \frac{O_{ss\ O_2}}{O_{ss}} \cdot 100 = \frac{0,243}{4,633} \cdot 100 = 5,25\ \% \quad (4.55)$$

Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ \%$):

$$c_{SO_2}^{ref} = c_{ss\ SO_2} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 3808 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 3\ 627 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.56)$$

Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ \%$):

$$c_{CO_2}^{ref} = c_{ss\ CO_2} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 345714 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 329\ 252 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.57)$$

Měrné emise TZL v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ \%$):

$$c_{TZL}^{ref} = c_{ss\ TZL} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 35886 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 34\ 177 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.58)$$

Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ \%$) jsou dle odborné konzultace uvažovány jako:

$$c_{NO_x}^{ref} = 400 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.59)$$

Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách:

$$c_{ss NO_x} = \frac{c_{NO_x}^{ref} \cdot (21 - O_2)}{21 - O_2^{ref}} = \frac{400 \cdot (21 - 5,25)}{21 - 6} = 420 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.60)$$

Hmotnostní tok oxidů dusíku ve spalínách:

$$\dot{m}_{NO_x} = \frac{c_{ss NO_x} \cdot O_{ss celk}}{1000000} = \frac{420 \cdot 36,424}{1000000} = 0,015 \text{ kg/s} \quad (4.61)$$

Měrné emise oxidů dusíku ve vlhkých spalínách:

$$c_{sv NO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{O_{sv celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,015}{55,229} \cdot 1000000 = 277 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.62)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 \text{ ref}} = 6 \%$) jsou dle odborné konzultace uvažovány jako:

$$c_{CO}^{ref} = 250 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.63)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách:

$$c_{ss CO} = \frac{c_{CO}^{ref} \cdot (21 - O_2)}{21 - O_2^{ref}} = \frac{250 \cdot (21 - 5,25)}{21 - 6} = 263 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.64)$$

Hmotnostní tok oxidu uhelnatého ve spalínách:

$$\dot{m}_{CO} = \frac{c_{ss CO} \cdot O_{ss celk}}{1000000} = \frac{263 \cdot 36,424}{1000000} = 0,010 \text{ kg/s} \quad (4.65)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého ve vlhkých spalínách:

$$c_{sv CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{O_{sv celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,010}{55,229} \cdot 1000000 = 173 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.66)$$

Množství vznikající strusky:

$$M_s = X_s \cdot A^r \cdot M_{PAL} = 0,2 \cdot 0,1649 \cdot 10,062 = 0,332 \text{ kg/s} \quad (4.67)$$

Měrné emise vlhkých spalin	
Emise oxidu siřičitého ($c_{sv\ SO_2}$)	2 512 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{sv\ CO_2}$)	228 002 mg/m ³ _{sp}
Emise částic ($c_{sv\ TZL}$)	23 667 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{sv\ NO_x}$)	277 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého ($c_{sv\ CO}$)	173 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{2\ sv}$)	3,61 %
Měrné emise suchých spalin	
Emise oxidu siřičitého ($c_{ss\ SO_2}$)	3 808 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{ss\ CO_2}$)	345 714 mg/m ³ _{sp}
Emise částic ($c_{ss\ TZL}$)	23 667 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{ss\ NO_x}$)	420 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého ($c_{ss\ CO}$)	263 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{ss\ O_2}$)	5,25 %
Měrné emise suchých spalin přepočítané na referenční obsah kyslíku	
Emise oxidu siřičitého ($c_{SO_2}^{ref}$)	3 627 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{CO_2}^{ref}$)	329 252 mg/m ³ _{sp}
Emise částic (c_{TZL}^{ref})	22 540 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{NO_x}^{ref}$)	400 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého (c_{CO}^{ref})	250 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{O_2\ ref}$)	6 %
Množství vznikající strusky	
Množství strusky (M_s)	0,332 kg/s

Tab. 4.5 Přehled vypočtených hodnot měrných emisí a množství vznikající strusky stávajícího kotle K1

4.4 Čištění spalin

Výpočty systémů čištění spalin zahrnují denitrifikaci spalin, jejich odsíření a filtraci od vznikajících TZL.

4.4.1 Filtrace TZL

Množství částic odloučených v meztazích kotle:

$$\dot{m}_{pop}^k = \dot{m}_{TZL} \cdot 0,11 = 1,307 \cdot 0,11 = 0,144 \text{ kg/s} \quad (4.68)$$

- dle odborné konzultace je počítáno, že v meztazích kotle dojde k odloučení 11 % z celkového množství vznikajících TZL ve formě popílku

Množství částic za kotlem:

$$\dot{m}_{TZL out}^k = \dot{m}_{TZL} - \dot{m}_{pop}^k = 1,307 - 0,144 = 1,163 \text{ kg/s} \quad (4.69)$$

Množství odloučených částic v elektrostatických odlučovacích:

$$\dot{m}_{pop}^{EO} = \dot{m}_{TZL out}^k \cdot \eta_{EO} = 1,163 \cdot 0,999 = 1,162 \text{ kg/s} \quad (4.70)$$

- účinnost stávajících elektrostatických odlučovačů je 99,9 %

Množství částic za elektrostatickým odlučovačem:

$$\dot{m}_{TZL out}^{EO} = \dot{m}_{TZL out}^k - \dot{m}_{pop}^{EO} = 1,163 - 1,162 = 0,001 \text{ kg/s} \quad (4.71)$$

Množství částic odloučených v mokré pračce:

$$\dot{m}_{pop}^{MP} = \dot{m}_{TZL out}^{EO} \cdot \eta_{MP}^{TZL} = 0,001 \cdot 0,6 = 0,0007 \text{ kg/s} \quad (4.72)$$

- je počítáno, že při průchodu spalin mokrou pračkou dojde k odloučení 60 % částic obsažených ve spalinách

Množství částic za mokrou pračkou:

$$\dot{m}_{TZL out} = \dot{m}_{TZL out}^{EO} - \dot{m}_{pop}^{MP} = 0,001 - 0,0007 = 0,0005 \text{ kg/s} \quad (4.73)$$

Měrné emise částic opouštějící komín v suchých spalinách:

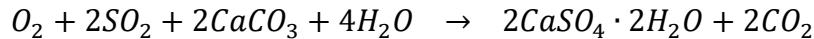
$$c_{ss TZL out} = \frac{\dot{m}_{TZL out}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,0005}{36,424} \cdot 1000000 = 13 \frac{\text{mg}}{\text{m}_3^3} \quad (4.74)$$

Měrné emise částic opouštějící komín v suchých spalinách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 \text{ ref}} = 6 \%$):

$$c_{TZL out}^{ref} = c_{ss TZL out} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 13 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 12 \frac{\text{mg}}{\text{m}_3^3} \quad (4.75)$$

4.4.2 Odsíření

Odsiřování spalin v mokré pračce probíhá podle následující chemické rovnice:



Množství oxidu siřičitého vstupující do pračky:

$$\dot{m}_{SO_2 in} = \dot{m}_{SO_2} = 0,139 \text{ kg/s} \quad (4.76)$$

Množství oxidu siřičitého vystupující z pračky:

$$\dot{m}_{SO_2 out} = (1 - \eta_{PR SO_2}) \cdot \dot{m}_{SO_2 in} = (1 - 0,945) \cdot 0,139 = 0,008 \text{ kg/s} \quad (4.77)$$

- účinnost stávající pračky je 94,5 %

Množství oxidu siřičitého vstupující do reakce v pračce:

$$\dot{m}_{SO_2}^{reag} = \dot{m}_{SO_2 in} - \dot{m}_{SO_2 out} = 0,139 - 0,008 = 0,131 \text{ kg/s} \quad (4.78)$$

Množství kyslíku potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{32}{128,132} \cdot 0,131 = 0,033 \text{ kg/s} \quad (4.79)$$

Teoretické minimální množství vápence potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CaCO_3}^{teor} = \frac{M_{2CaCO_3}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{200,1738}{128,132} \cdot 0,131 = 0,205 \text{ kg/s} \quad (4.80)$$

Skutečné množství vápence potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CaCO_3}^{skut} = \frac{1,04}{0,975} \cdot \dot{m}_{CaCO_3}^{teor} = \frac{1,04}{0,975} \cdot 0,205 = 0,218 \text{ kg/s} \quad (4.81)$$

- přebytek vápence o čistotě 97,5 % je uvažován 1,04

Množství vody potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{M_{4H_2O}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{72}{128,132} \cdot 0,131 = 0,074 \text{ kg/s} \quad (4.82)$$

Množství sádrovce vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O} = \frac{M_{2CaSO_4 \cdot 2H_2O}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{344}{128,132} \cdot 0,131 = 0,352 \text{ kg/s} \quad (4.83)$$

Množství oxidu uhličitého vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{2CO_2}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{88}{128,132} \cdot 0,131 = 0,090 \text{ kg/s} \quad (4.84)$$

Přibližné množství energosádrovce zachyceného pračkou:

$$\dot{m}_{ES} = \dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O} + \dot{m}_{pop}^{MP} + (\dot{m}_{CaCO_3}^{skut} - \dot{m}_{CaCO_3}^{teor}) = 0,352 + 0,0007 + (0,218 - 0,205) = 0,366 \text{ kg/s} \quad (4.85)$$

Přibližná čistota energosádrovce:

$$\frac{\dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O}}{\dot{m}_{ES}} \cdot 100 = \frac{0,352}{0,366} \cdot 100 = 96 \%$$

Měrné emise oxidu siřičitého opouštějící komín v suchých spalínách:

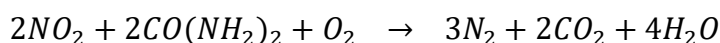
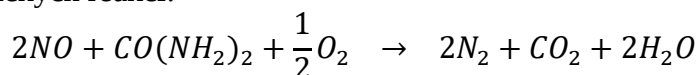
$$c_{ss \text{ SO}_2 \text{ out}} = \frac{\dot{m}_{SO_2 \text{ out}}}{O_{ss \text{ celk}}} \cdot 1000000 = \frac{0,008}{36,424} \cdot 1000000 = 209 \frac{\text{mg}}{\text{m}_\text{sp}^3} \quad (4.86)$$

Měrné emise oxidu siřičitého opouštějící komín v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 \text{ ref}} = 6 \%$):

$$c_{SO_2 \text{ out}}^{\text{ref}} = c_{ss \text{ SO}_2 \text{ out}} \cdot \frac{21 - O_2^{\text{ref}}}{21 - O_2} = 209 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 199 \frac{\text{mg}}{\text{m}_\text{sp}^3} \quad (4.87)$$

4.4.3 Denitrifikace

Denitrifikace spalín se v případě stávajícího zdroje skládá z primárních a sekundárních metodách snižování NO_x . Pomocí primárních metod dojde ke snížení obsahu NO_x ve spalínách ze $450 \text{ mg/m}_\text{sp}^3$ (normální podmínky a 6 % obsah kyslíku) na hodnotu pohybující se okolo $250 \text{ mg/m}_\text{sp}^3$. Dalšího snižování, tak aby byly plněny emisní limity, je dosahováno pomocí metody SNCR (reagentem je v tomto případě močovina), která probíhá na základě následujících chemických reakcí:



Vzhledem k tomu, že 90 až 95 % NO_x obsažených ve spalínách je tvořeno NO je první z výše uvedených chemických reakcí dominantní, a proto z ní vychází i následující výpočty. [38]

Množství oxidů dusíku ve spalínách před denitrifikací:

$$\dot{m}_{\text{NO}_x \text{ in}} = \dot{m}_{\text{NO}_x} = 0,008 \text{ kg/s} \quad (4.88)$$

Množství oxidů dusíku ve spalínách po denitrifikaci:

$$\dot{m}_{\text{NO}_x \text{ out}} = (1 - \eta_{\text{SNCR}}) \cdot \dot{m}_{\text{NO}_x \text{ in}} = (1 - 0,55) \cdot 0,008 = 0,004 \text{ kg/s} \quad (4.89)$$

– účinnost stávající metody SNCR je 55 %

Množství oxidů dusíku vstupující do reakce:

$$\dot{m}_{NO_x}^{reag} = \dot{m}_{NO_x in} - \dot{m}_{NO_x out} = 0,008 - 0,004 = 0,004 \text{ kg/s} \quad (4.90)$$

Teoretické minimální množství močoviny potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{teor} = \frac{M_{CO(NH_2)_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{60,06}{60,02} \cdot 0,004 = 0,004 \text{ kg/s} \quad (4.91)$$

Skutečné množství močoviny potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{skut} = 1,05 \cdot \dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{teor} = 1,05 \cdot 0,004 = 0,005 \text{ kg/s} \quad (4.92)$$

– přebytek močoviny je uvažován 1,05

Množství kyslíku potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{32}{60,02} \cdot 0,004 = 0,001 \text{ kg/s} \quad (4.93)$$

Množství dusíku vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{56,03}{60,02} \cdot 0,004 = 0,004 \text{ kg/s} \quad (4.94)$$

Množství oxidu uhličitého vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{44,01}{60,02} \cdot 0,004 = 0,003 \text{ kg/s} \quad (4.95)$$

Množství vody vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{36,03}{60,02} \cdot 0,004 = 0,003 \text{ kg/s} \quad (4.96)$$

Měrné emise oxidů dusíku opouštějící komín v suchých spalínách:

$$c_{ss NO_x out} = \frac{\dot{m}_{NO_x out}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,004}{36,424} \cdot 1000000 = 99 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.97)$$

Měrné emise oxidů dusíku opouštějící komín v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 ref} = 6 \%$):

$$c_{NO_x out}^{ref} = c_{ss NO_x out} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 99 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 95 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.98)$$

Množství vypouštěných emisí současného kotle K1 v porovnání s emisními limity dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší pro spalovací stacionární zdroje > 100 – 300 MW jsou uvedeny v následující tabulce.

Emise	Produkovaná hodnota [mg/m ³]	Emisní limit [mg/m ³]
Oxid siřičitý (SO ₂)	199	250
Oxidy dusíku (NO _x)	95	200
Tuhé znečišťující látky (TZL)	12	25
Oxid uhelnatý (CO)	250	250

Tab. 4.6 Množství produkovaných emisí stávajícího kotle K1 v porovnání s emisními limity²

4.5 Bilanční schéma kotle a systému čištění spalin

Bilanční schéma (obr.4.1) znázorňuje hmotnostní/objemové toky médií, které jsou potřeba pro zajištění správného a bezproblémového chodu technologického celku zdroje.

Technologický celek zdroje je ve schématu tvořen kotlem a zařízeními sloužícími k čištění a odvodu spalin. Ta zahrnují dva filtry tuhých znečišťujících látek, mokrou pračku spalin a komín.

Do kotle je přiváděn spalovací vzduch, palivo (hnědé uhlí), napájecí voda a močovina, která je přiváděna v rámci sekundárních opatření snižování emisí oxidů dusíku ve spalinách. Z kotle vystupuje přehřátá pára, produkty vzniklé spalováním (spaliny, popílek, struska) a odluh, pomocí kterého jsou z tlakového celku kotle odváděny nečistoty obsažené v kotlové vodě. Pro doplnění jsou ve schématu znázorněny také ztráty kotle.

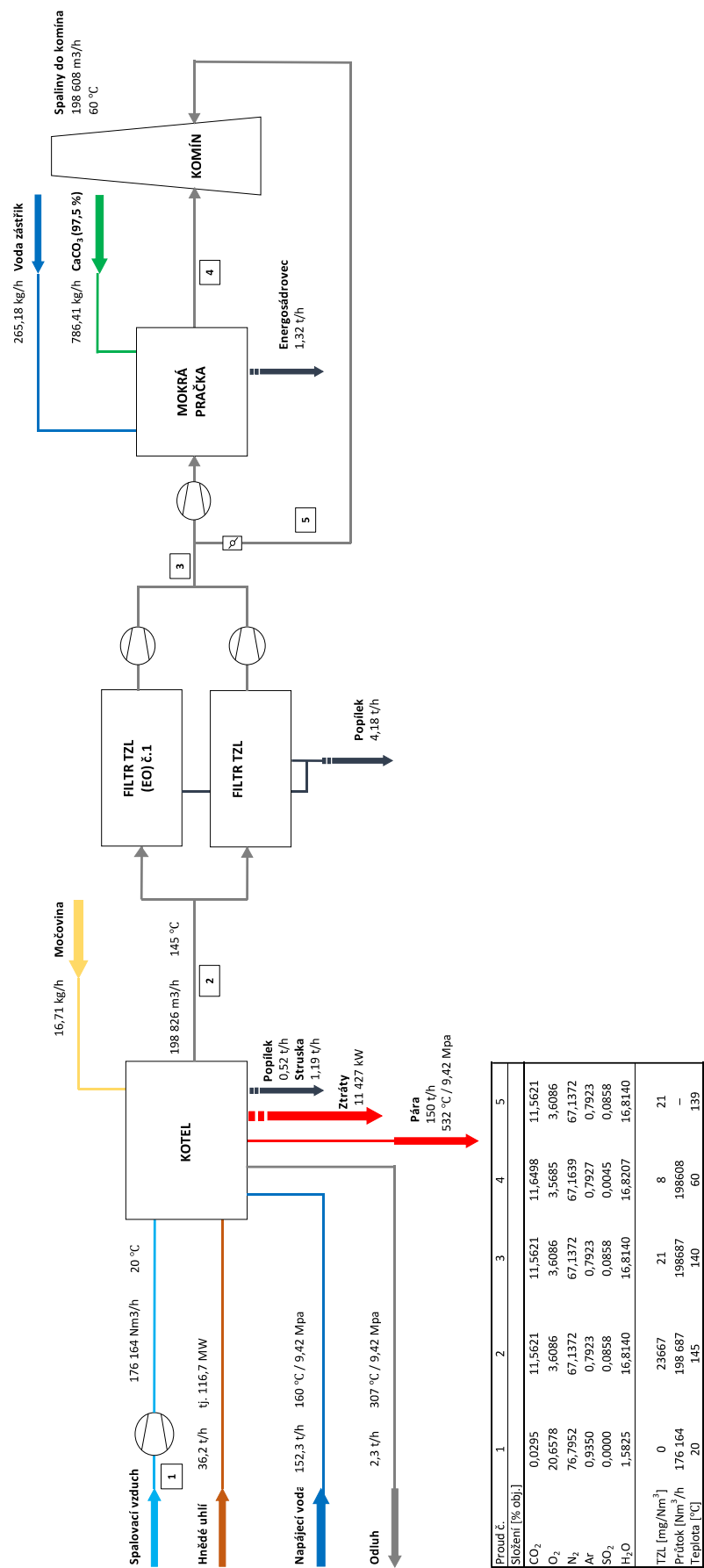
Do dvojice filtrů tuhých znečišťujících látek vstupují spaliny a vystupuje množství odloučeného popílku.

Do mokré pračky spalin vstupují spaliny, vápenec a voda sloužící k doplňování a zástřiku směsi. Z pračky vystupuje vzniklý energosádrovec. Odpaní vody z pračky byly v tomto případě zanedbány.

Do komína vstupují vyčištěné spaliny, které jsou dále vypouštěny do atmosféry.

Ve spodní části bilančního schématu jsou vypsány vlastnosti jednotlivých proudů médií (teplota, průtok a objemové složení), které jsou v nákresu značeny odkazy s čísly 1 až 5.

² Produkované hodnoty i specifické emisní limity jsou vztaženy na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 %.



Obr. 4.1 Bilanční schéma stávajícího zdroje

4.6 Denní a roční provoz zdroje

Pro doplnění jsou níže uvedeny tabulky, které znázorňují bilanci technologického celku zdroje v tunách za den a v tunách za rok pro případ, kdy by byl provozován na 100 % instalovaného tepelného výkonu (množství spalovacího vzduchu, napájecí vody a zástřikové vody není uvažováno). U ročního provozu je uvažováno že zdroj bude provozován po dobu 7 800 hodin.

Denní bilance	Množství [t/den]
Spotřeba paliva (hnědé uhlí)	869
Spotřeba močoviny	0,40
Spotřeba vápenec	19
Odloučený popílek	113
Vzniklá struska	29
Vzniklý energosádrovec	32
Emise oxidu siřičitého	0,66
Emise oxidu uhličitého	1 096
Emise TZL	0,04
Emise oxidů dusíku	0,31
Emise oxidu uhelnatého	0,83

Tab. 4.7 Denní bilance stávajícího kotle K1³

Roční bilance	Množství [t/rok]
Spotřeba paliva (hnědé uhlí)	282 541
Spotřeba močoviny	130
Spotřeba vápenec	6 134
Odloučený popílek	36 704
Vzniklá struska	9 318
Vzniklý energosádrovec	10 285
Emise oxidu siřičitého	214
Emise oxidu uhličitého	356 214
Emise TZL	13
Emise oxidů dusíku	101
Emise oxidu uhelnatého	268

Tab. 4.8 Roční bilance stávajícího kotle K1

³ Emisemi v tabulkách denní i roční bilance zdroje jsou myšleny ty, jenž opouštějí komín (vstupují do atmosféry)

5 Bilanční výpočty rekonstruovaného zdroje

5.1 Přepočet složení paliva a výpočet výhřevnosti

V případech, kdy nejsou v prvkovém rozboru paliva uvedeny parametry paliva ve tvaru potřebném pro výpočty (obsahy v původním vzorku) je nutno tyto parametry přepočítat.

Přepočet obsahu popeloviny na obsah v původním vzorku:

$$A^r = A^d \cdot (100 - W^r) = 0,119 \cdot (100 - 30) = 8,33 \% \quad (5.1)$$

Přepočet obsahu hořlaviny na obsah v původním vzorku:

$$V^r = 100 - W^r - A^r = 100 - 30 - 8,33 = 61,67 \% \quad (5.2)$$

Přepočet obsahu uhlíku na obsah v původním vzorku:

$$C^r = C^d \cdot (100 - W^r) = 0,4689 \cdot (100 - 30) = 32,82 \% \quad (5.3)$$

Přepočet obsahu vodíku na obsah v původním vzorku:

$$H^r = H^d \cdot (100 - W^r) = 0,0514 \cdot (100 - 30) = 3,60 \% \quad (5.4)$$

Přepočet obsahu dusíku na obsah v původním vzorku:

$$N^r = N^d \cdot (100 - W^r) = 0,0034 \cdot (100 - 30) = 0,24 \% \quad (5.5)$$

Přepočet obsahu síry na obsah v původním vzorku:

$$S^r = S^d \cdot (100 - W^r) = 0,0004 \cdot (100 - 30) = 0,03 \% \quad (5.6)$$

Přepočet obsahu kyslíku na obsah v původním vzorku:

$$O^r = O^d \cdot (100 - W^r) = 0,4759 \cdot (100 - 30) = 33,31 \% \quad (5.7)$$

Spalné teplo vypočtené dle [39]:

$$\begin{aligned} Q_s^r &= 0,341 \cdot C^r + 1,322 \cdot H^r - 0,12 \cdot (O^r - N^r) + 0,0686 \cdot S^r - \\ &- 0,0153 \cdot A^r = 0,341 \cdot 32,82 + 1,322 \cdot 3,6 - 0,12 \cdot (33,31 - 0,24) + \\ &+ 0,0686 \cdot 0,03 - 0,0153 \cdot 8,33 = 11,80 \text{ MJ/kg} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Výhřevnost vypočtená ze spalného tepla:

$$\begin{aligned} Q_i^r &= Q_s^r - 2,453 \cdot (W^r + 9 \cdot H^r) = 11,8 - 2,453 \cdot (0,3 + 9 \cdot 0,036) = \\ &= 10,27 \text{ MJ/kg} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Parametr	Hodnota
Výhřevnost dřevní štěrky (Q_i^r)	10,27 MJ/kg
Hořlavina v původním vzorku (V^r)	61,67 %
Popelovina v původním vzorku (A^r)	8,33 %
Vlhkost v původním vzorku (W^r)	30,00 %
Obsah uhlíku v původním vzorku (C^r)	32,82 %
Obsah vodíku v původním vzorku (H^r)	3,60 %
Obsah dusíku v původním vzorku (N^r)	0,24 %
Obsah síry v původním vzorku (S^r)	0,03 %
Obsah kyslíku v původním vzorku (O^r)	33,31 %

Tab. 5.1 Přehled přepočtených parametrů dřevní štěrky

5.2 Stechiometrické výpočty

5.2.1 Výpočet minimálního objemu vzduchu

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$\begin{aligned}
 O_{O_2 min} &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) = \\
 &= \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{32,82}{12,01} + \frac{3,60}{4,032} + \frac{0,03}{32,06} - \frac{33,31}{32} \right) = 0,579 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}}
 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{vs min} = \frac{O_{O_2 min}}{0,21} = \frac{0,579}{0,21} = 2,757 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.11)$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{vv min} = \chi_v \cdot O_{vs min} = 1,016 \cdot 2,757 = 2,801 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.12)$$

- součinitel podílu vodní páry připadajícího na 1 Nm³ suchého vzduchu byl, stejně jako v případě stávajícího zdroje, zvolen $\chi_v = 1,016$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu:

$$O_{H_2O}^v = O_{vv min} - O_{vs min} = 2,801 - 2,757 = 0,044 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.13)$$

5.2.2 Výpočet minimálního objemu spalin

Objem oxidu uhličitého ve spalinách:

$$\begin{aligned} O_{CO_2 min} &= \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + 0,0003 \cdot O_{vs min} = \\ &= \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{32,82}{100} + 0,0003 \cdot 2,757 = 0,609 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Objem oxidu siřičitého ve spalinách:

$$O_{SO_2 min} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,03}{100} = 0,0002 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.15)$$

Objem dusíku ve spalinách:

$$\begin{aligned} O_{N_2 min} &= \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,7805 \cdot O_{vs min} = \\ &= \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,24}{100} + 0,7805 \cdot 2,757 = 2,154 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Objem argonu ve spalinách:

$$O_{Ar min} = 0,0092 \cdot O_{vs min} = 0,0092 \cdot 2,757 = 0,025 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.17)$$

Minimální objem suchých spalin získaný spálením 1 kg paliva:

$$\begin{aligned} O_{ss min} &= O_{CO_2 min} + O_{SO_2 min} + O_{N_2 min} + O_{Ar min} = \\ &= 0,609 + 0,0002 + 2,154 + 0,025 = 2,788 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin:

$$\begin{aligned} O_{H_2O}^s &= \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{W^r}{100} + O_{H_2O}^v = \\ &= \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{3,60}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{30,0}{100} + 0,044 = 0,816 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Minimální objem vlhkých spalin získaný spálením 1 kg paliva:

$$O_{sv min} = O_{ss min} + O_{H_2O}^s = 2,788 + 0,816 = 3,604 \frac{Nm^3}{kg_{PAL}} \quad (5.20)$$

5.2.3 Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalín

V případě nového rekonstruovaného fluidního kotle je počítáno s přebytkem spalovacího vzduchu $\alpha = 1,25$.

Skutečný objem suchého vzduchu:

$$O_{vs} = O_{vs \min} \cdot \alpha = 2,757 \cdot 1,25 = 3,446 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \quad (5.21)$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu:

$$O_{vv} = O_{vv \min} \cdot \alpha = 2,801 \cdot 1,25 = 3,501 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \quad (5.22)$$

Skutečný objem suchých spalín:

$$\begin{aligned} O_{ss} &= O_{ss \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vs \min} = 2,788 + (1,25 - 1) \cdot 2,757 = \\ &= 3,477 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Skutečný objem vlhkých spalín:

$$\begin{aligned} O_{sv} &= O_{sv \min} + (\alpha - 1) \cdot O_{vv \min} = 3,604 + (1,25 - 1) \cdot 2,801 = \\ &= 4,305 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{PAL}}} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Výpočet minimálního objemu vzduchu	
Min. objem kyslíku ($O_{O_2 \min}$)	0,579 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem suchého vzduchu ($O_{vs \min}$)	2,757 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem vlhkého vzduchu ($O_{vv \min}$)	2,801 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem H ₂ O v min. objemu vlhkého vzduchu ($O_{H_2O}^v$)	0,044 Nm ³ /kg _{PAL}
Výpočet minimálního objemu spalín	
Objem oxidu uhličitého ($O_{CO_2 \min}$)	0,609 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem oxidu siřičitého ($O_{SO_2 \min}$)	0,0002 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem dusíku ($O_{N_2 \min}$)	2,154 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem argonu ($O_{Ar \min}$)	0,025 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem suchých spalín ($O_{ss \min}$)	2,788 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem H ₂ O v min. objemu vlhkých spalín ($O_{H_2O}^s$)	0,816 Nm ³ /kg _{PAL}
Min. objem vlhkých spalín ($O_{sv \min}$)	3,604 Nm ³ /kg _{PAL}
Výpočet skutečného objemu vzduchu a spalín	
Objem suchého vzduchu (O_{vs})	3,446 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem vlhkého vzduchu (O_{vv})	3,501 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem suchých spalín (O_{ss})	3,477 Nm ³ /kg _{PAL}
Objem vlhkých spalín (O_{sv})	4,305 Nm ³ /kg _{PAL}

Tab. 5.2 Přehled vypočtených hodnot stechiometrie rekonstruovaného kotle

5.3 Entalpie spalín a vzduchu

Výpočty obsažené v této kapitole byly počítány stejným způsobem, jako výpočty v kapitole 4.2 *Entalpie spalín a vzduchu* dle vzorců (4.16), (4.18) a (4.19). Proto je níže uvedena pouze tabulka s výslednými hodnotami.

U výpočtů dle vzorce (4.16) bylo potřeba provést ověření podmínky pro uvažování entalpie popílku ve spalínách. Procento úletového popílku bylo dle [36] zvoleno $X_{\dot{u}} = 60 \%$.

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_r^i}{41,8 \cdot X_{\dot{u}}}$$

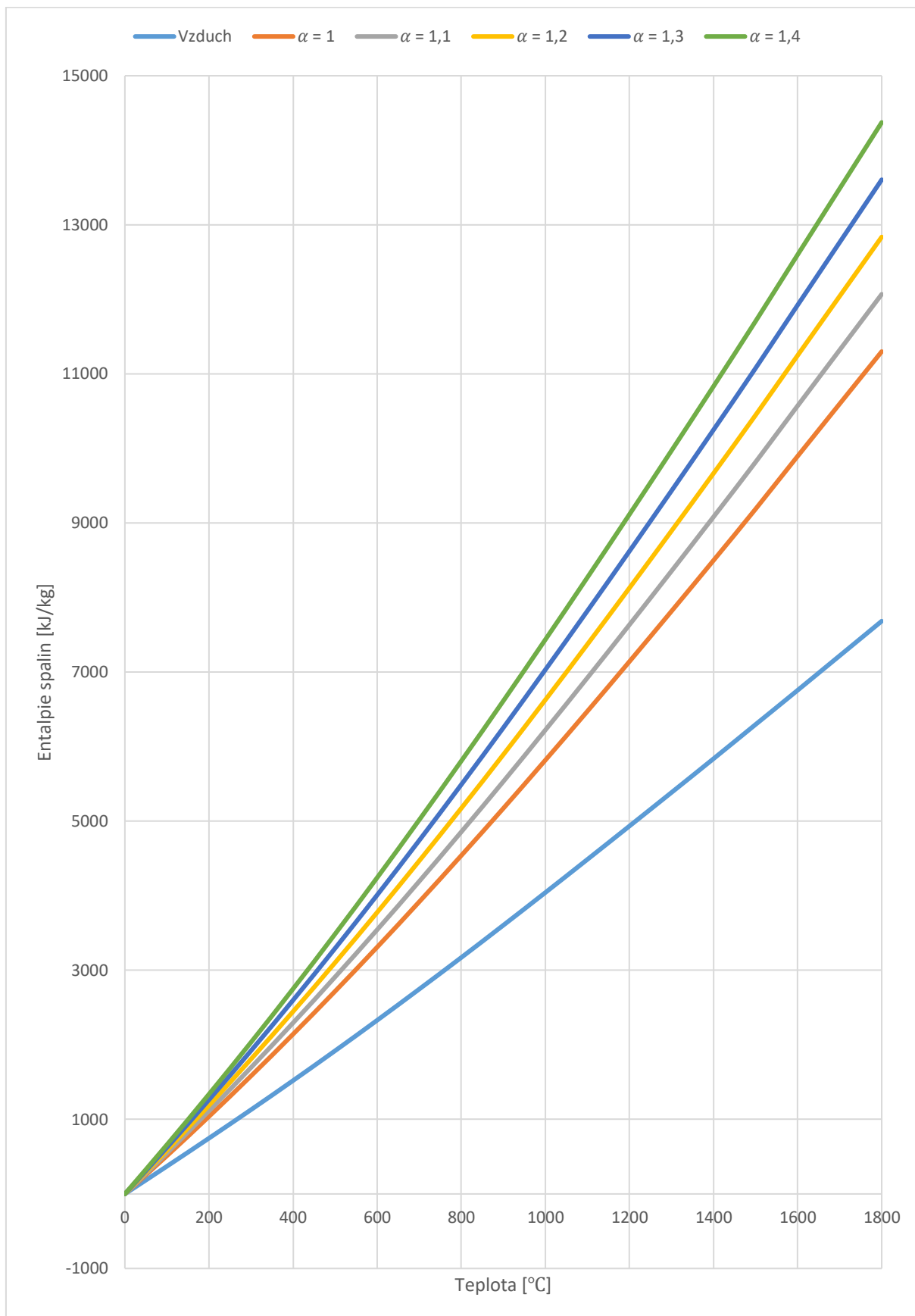
$$8,33 > \frac{6 \cdot 10270}{41,8 \cdot 60} \quad (5.25)$$

$$8,33 > 24,57$$

Nerovnost je splněna, proto entalpie popílku je ve výpočtu entalpie minimálního objemu spalín uvažována.

t	I_{smin}^t	I_{vmin}^t	$I_s^t, \alpha = I_{smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{vmin}^t$ [kJ/kg]				
[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,4$
0	0	0	0	0	0	0	0
100	513,1	371,4	513,1	550,2	587,4	624,5	661,7
200	1042,1	747,3	1042,1	1116,9	1191,6	1266,3	1341,0
300	1587,4	1130,0	1587,4	1700,4	1813,3	1926,3	2039,3
400	2149,0	1520,9	2149,0	2301,1	2453,2	2605,3	2757,4
500	2726,8	1920,9	2726,8	2918,9	3110,9	3303,0	3495,1
600	3320,6	2329,7	3320,6	3553,6	3786,5	4019,5	4252,5
700	3929,1	2747,0	3929,1	4203,8	4478,5	4753,2	5027,9
800	4551,9	3171,2	4551,9	4869,1	5186,2	5503,3	5820,4
900	5186,6	3604,2	5186,6	5547,0	5907,4	6267,8	6628,2
1000	5835,5	4042,9	5835,5	6239,8	6644,0	7048,3	7452,6
1100	6493,6	4487,4	6493,6	6942,3	7391,1	7839,8	8288,5
1200	7162,7	4934,8	7162,7	7656,2	8149,7	8643,2	9136,6
1300	7840,1	5385,3	7840,1	8378,6	8917,1	9455,6	9994,2
1400	8524,6	5838,6	8524,6	9108,4	9692,3	10276,1	10860,0
1500	9216,6	6297,6	9216,6	9846,4	10476,1	11105,9	11735,6
1600	9931,2	6756,8	9931,2	10606,8	11282,5	11958,2	12633,9
1800	11340,3	7683,9	11340,3	12108,7	12877,1	13645,4	14413,8

Tab. 5.3 Vypočtené hodnoty entalpií spalín a vzduchu pro sestavení I-t diagramu spalín rekonstruovaného kotle



Graf 5.1 I-t diagram spalín rekonstruovaného kotle

5.4 Základní bilance kotle

5.4.1 Teplo přivedené do kotle

$$Q_{i\ red} = Q_i^r + i_{pv} + Q_{cz} + Q_{pr} = 10270 + 58,6 = 10\ 328,6\ kJ/kg \quad (5.26)$$

Fyzické teplo paliva je započítáváno pouze v případě, pokud je splněna podmínka:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{4,19} \cdot \frac{1}{150}$$
$$30 \geq \frac{10270}{4,19} \cdot \frac{1}{150} \quad (5.27)$$
$$30 \geq 16,34$$

Podmínka splněna, fyzické teplo paliva bude započteno.

Fyzické teplo paliva:

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 2,93 \cdot 20 = 58,6\ kJ/kg \quad (5.28)$$

- teplota paliva byla zvolena 20 °C

Měrná tepelná kapacita paliva:

$$c_{pv} = 4,19 \cdot W^r + c_{su} \cdot (1 - W^r) = 4,19 \cdot 0,30 + 2,39 \cdot (1 - 0,30) = 2,93\ kJ/kg \cdot K \quad (5.29)$$

- měrné teplo sušiny paliva pro dřevní štěpku s 30 % vlhkostí $c_{su} = 2,39\ kJ/kg \cdot K$ [40]

5.4.2 Tepelné ztráty a účinnost kotle

Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} = 0,159 + 2,231 = 2,390\ \% \quad (5.30)$$

Ztráta nedopalem vzniklá ve škváře nebo strusce:

$$Z_{cs} = \frac{0,01}{1 - 0,01} \cdot 0,6 \cdot \frac{0,0833}{10\ 328,6} \cdot 32600 \cdot 100 = 0,159\ \% \quad (5.31)$$

Ztráta nedopalem vzniklá úletem:

$$Z_{cú} = \frac{0,175}{1 - 0,175} \cdot 0,4 \cdot \frac{0,0833}{10\ 328,6} \cdot 32600 \cdot 100 = 2,231\ \% \quad (5.32)$$

Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{ss\ min}}{(21 - O_{2\ ref}) \cdot Q_{i\ red}} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 2,788}{(21 - 11) \cdot 10\ 328,6} \cdot 100 = 0,143 \% \quad (5.33)$$

- referenční obsah kyslíku pro spalování biomasy $O_{2\ ref} = 11 \%$
- emisní limit CO pro biomasu dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

$$Z_s = \frac{Q_{RC}}{Q_N} \cdot 100 = \frac{0,949}{129,607} \cdot 100 = 0,732 \% \quad (5.34)$$

Ztráty sáláním a konvekcí:

$$Q_{RC} = C \cdot Q_N^{0,7} = 0,0315 \cdot 129,607^{0,7} = 0,949\ MW \quad (5.35)$$

- koeficient pro spalování ve fluidní vrstvě je dle [37] $C = 0,0315$

Maximální využitelný výkon:

$$Q_N = M_p \cdot Q_i^r = 12,62 \cdot 10,27 = 129,607\ MW \quad (5.36)$$

- množství paliva přivedeného do kotle dosazeno z rovnice č. 5.43

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = Z_{fs} + Z_{fú} = 0,003 + 0,000 = 0,003 \% \quad (5.37)$$

Ztráta fyzickým teplem škváry:

$$Z_{fs} = \frac{0,6}{1 - 0,01} \cdot \frac{0,0833}{10\ 328,6} \cdot 0,9301 \cdot 600 = 0,003 \% \quad (5.38)$$

Ztráta fyzickým teplem úletu:

$$Z_{fú} = \frac{0,4}{1 - 0,175} \cdot \frac{0,0833}{10\ 328,6} \cdot 0,8244 \cdot 145 = 0,000 \% \quad (5.39)$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, \alpha} - I_s^{t_{vz, \alpha}}}{Q_{i\ red}} = (100 - 2,39) \cdot \frac{884,82 - 120,99}{10\ 328,6} = 7,219 \% \quad (5.40)$$

- pro určení entalpie spalin při okolní teplotě vzduchu byla zvolena teplota $20\ ^\circ\text{C}$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = 100 - (2,390 + 0,143 + 0,732 + 0,003 + 7,219) = 89,51 \% \quad (5.41)$$

Teplo přivedené do kotle	
Teplo přivedené do kotle ($Q_{i \text{ red}}$)	10 328,6 kJ/kg
Tepelné ztráty a účinnost kotle	
Ztráta mechanickým nedopalem (Z_c)	2,390 %
Ztráta chemickým nedopalem (Z_{co})	0,143 %
Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí (Z_{ci})	0,732 %
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků (Z_{fi})	0,003 %
Ztráta citelným teplem spalín (Z_k)	7,219 %
Účinnost kotle (η_k)	89,51 %

Tab. 5.4 Přehled vypočtených hodnot ze základní bilance rekonstruovaného kotle

5.4.3 Množství vyrobené páry a paliva přivedeného do kotle

Výrobní teplo páry:

$$\begin{aligned} Q_v &= M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_o \cdot (i'_w - i_{nv}) = \\ &= 150 \cdot (3470,5 - 680,77) + 2,25 \cdot (1382,5 - 680,77) = \\ &= 116\,677 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.42)$$

Množství paliva přivedeného do kotle:

$$M_{PAL} = \frac{Q_v}{Q_{i \text{ red}} \cdot \eta_k} = \frac{116677}{10328,6 \cdot 89,51} = 12,620 \text{ kg/s} \quad (5.43)$$

Skutečné množství spáleného paliva:

$$M_{pv} = M_{PAL} \cdot (1 - Z_c) = 12,620 \cdot (100 - 2,39) = 12,318 \text{ kg/s} \quad (5.44)$$

5.4.4 Měrné emise ve spalínách a množství vznikající strusky

Celkové množství vlhkých spalín:

$$O_{sv \text{ celk}} = O_{sv} \cdot M_{pv} = 4,305 \cdot 12,318 = 53,026 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.45)$$

Celkové množství suchých spalín:

$$O_{ss \text{ celk}} = O_{ss} \cdot M_{pv} = 2,788 \cdot 12,318 = 34,346 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.46)$$

Měrné emise oxidu siřičitého ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{SO_2} = \frac{M_{SO_2}}{M_S} \cdot \frac{S^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{64}{32} \cdot \frac{0,03}{100} \cdot 12,318 = 0,007 \text{ kg/s} \quad (5.47)$$

$$c_{sv SO_2} = \frac{\dot{m}_{SO_2}}{O_{sv celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,007}{53,026} \cdot 1000000 = 139 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.48)$$

Měrné emise oxidu uhličitého ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{44}{12} \cdot \frac{34,66}{100} \cdot 12,318 = 14,824 \text{ kg/s} \quad (5.49)$$

$$c_{sv CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{O_{sv celk}} \cdot 1000000 = \frac{14,824}{53,026} \cdot 1000000 = 279\,559 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.50)$$

Měrné emise částic ve vlhkých spalínách:

$$\dot{m}_{TZL} = \frac{X_{\dot{u}}}{100} \cdot \frac{A^r}{100} \cdot M_{pv} = \frac{40}{100} \cdot \frac{8,33}{100} \cdot 12,318 = 0,410 \text{ kg/s} \quad (5.51)$$

$$c_{sv TZL} = \frac{\dot{m}_{TZL}}{O_{sv celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,410}{53,026} \cdot 1000000 = 7\,740 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.52)$$

Obsah kyslíku ve vlhkých spalínách:

$$O_{sv O_2} = (\alpha - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot O_{vs min} = (1,25 - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot 2,757 = 0,145 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (5.53)$$

Objemový podíl kyslíku ve vlhkých spalínách:

$$O_{2 sv} = \frac{O_{sv O_2}}{O_{sv}} \cdot 100 = \frac{0,145}{4,305} \cdot 100 = 3,36 \% \quad (5.54)$$

Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách:

$$c_{ss SO_2} = \frac{\dot{m}_{SO_2}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,007}{34,346} \cdot 1000000 = 215 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.55)$$

Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalínách:

$$c_{ss CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{14,824}{34,346} \cdot 1000000 = 431\,599 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.56)$$

Měrné emise částic v suchých spalínách:

$$c_{ss TZL} = \frac{\dot{m}_{TZL}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,410}{34,346} \cdot 1000000 = 11\,950 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.57)$$

Obsah kyslíku v suchých spalínách:

$$O_{ss\ O_2} = (\alpha - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot O_{ss} = (1,25 - 1) \cdot \frac{21}{100} \cdot 3,477 = 0,183 \frac{m^3}{kg} \quad (5.58)$$

Objemový podíl kyslíku v suchých spalínách:

$$O_{2\ ss} = \frac{O_{ss\ O_2}}{O_{ss}} \cdot 100 = \frac{0,183}{3,477} \cdot 100 = 5,25 \% \quad (5.59)$$

Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ %$):

$$c_{SO_2}^{ref} = c_{ss\ SO_2} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 215 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 205 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.60)$$

Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ %$):

$$c_{CO_2}^{ref} = c_{ss\ CO_2} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 431599 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 411\ 047 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.61)$$

Měrné emise TZL v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ %$):

$$c_{TZL}^{ref} = c_{ss\ TZL} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 11950 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 11\ 381 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.62)$$

Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\ ref} = 6\ %$) jsou dle odborné konzultace uvažovány jako:

$$c_{NO_x}^{ref} = 450 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.63)$$

Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách:

$$c_{ss\ NO_x} = \frac{c_{NO_x}^{ref} \cdot (21 - O_2)}{21 - O_2^{ref}} = \frac{450 \cdot (21 - 5,25)}{21 - 6} = 473 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.64)$$

Hmotnostní tok oxidů dusíku ve spalínách:

$$\dot{m}_{SO_2} = \frac{c_{ss\ NO_x} \cdot O_{ss\ celk}}{1000000} = \frac{473 \cdot 34,346}{1000000} = 0,016 \text{ kg/s} \quad (5.65)$$

Měrné emise oxidů dusíku ve vlhkých spalínách:

$$c_{sv\ NO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x}}{O_{sv\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,016}{53,026} \cdot 1000000 = 306 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.66)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2\text{ ref}} = 6\%$) jsou dle odborné konzultace uvažovány jako:

$$c_{CO}^{ref} = 250 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.67)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách:

$$c_{ss\ CO} = \frac{c_{CO}^{ref} \cdot (21 - O_2)}{21 - O_2^{ref}} = \frac{250 \cdot (21 - 5,25)}{21 - 6} = 263 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.68)$$

Hmotnostní tok oxidu uhelnatého ve spalínách:

$$\dot{m}_{CO} = \frac{c_{ss\ CO} \cdot O_{ss\ celk}}{1000000} = \frac{263 \cdot 34,346}{1000000} = 0,009 \text{ kg/s} \quad (4.69)$$

Měrné emise oxidu uhelnatého ve vlhkých spalínách:

$$c_{sv\ CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{O_{sv\ celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,009}{53,026} \cdot 1000000 = 170 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (4.70)$$

Množství vznikající strusky:

$$M_s = X_s \cdot A^r \cdot M_{PAL} = 0,6 \cdot 0,0833 \cdot 12,62 = 0,631 \text{ kg/s} \quad (5.71)$$

Měrné emise vlhkých spalin	
Emise oxidu siřičitého ($c_{sv\ SO_2}$)	139 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{sv\ CO_2}$)	279 559 mg/m ³ _{sp}
Emise částic ($c_{sv\ TZL}$)	7 740 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{sv\ NO_x}$)	306 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého ($c_{sv\ CO}$)	170 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{2\ sv}$)	3,36 %
Měrné emise suchých spalin	
Emise oxidu siřičitého ($c_{ss\ SO_2}$)	215 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{ss\ CO_2}$)	431 599 mg/m ³ _{sp}
Emise částic ($c_{ss\ TZL}$)	7 740 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{ss\ NO_x}$)	473 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého ($c_{ss\ CO}$)	263 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{ss\ O_2}$)	5,25 %
Měrné emise suchých spalin přepočítané na referenční obsah kyslíku	
Emise oxidu siřičitého ($c_{SO_2}^{ref}$)	205 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhličitého ($c_{CO_2}^{ref}$)	411 047 mg/m ³ _{sp}
Emise částic (c_{TZL}^{ref})	7 372 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidů dusíku ($c_{NO_x}^{ref}$)	450 mg/m ³ _{sp}
Emise oxidu uhelnatého (c_{CO}^{ref})	250 mg/m ³ _{sp}
Objemový podíl kyslíku ($O_{O_2\ ref}$)	6 %
Množství vznikající strusky	
Množství strusky (M_s)	0,631 kg/s

Tab. 5.5 Přehled vypočtených hodnot měrných emisí a množství vznikající strusky rekonstruovaného kotle

5.5 Čištění spalin

5.5.1 Filtrace TZL

Množství částic odloučených v meztazích kotle:

$$\dot{m}_{pop}^k = \dot{m}_{TZL} \cdot 0,20 = 0,410 \cdot 0,20 = 0,082 \text{ kg/s} \quad (5.72)$$

- dle odborné konzultace je počítáno, že v meztazích kotle dojde k odloučení 20 % z celkového množství vznikajících TZL ve formě popílku

Množství částic za kotlem:

$$\dot{m}_{TZL out}^k = \dot{m}_{TZL} - \dot{m}_{pop}^k = 0,410 - 0,082 = 0,3283 \text{ kg/s} \quad (5.73)$$

Množství odloučených částic v sestavě cyklón–látkový filtr:

$$\dot{m}_{pop}^{CLF} = \dot{m}_{TZL out}^k \cdot \eta_{EO} = 0,3283 \cdot 0,998 = 0,3280 \text{ kg/s} \quad (5.74)$$

- účinnost navrhované sestavy je 99,8 %

Množství částic za sestavou cyklón–látkový filtr:

$$\dot{m}_{TZL out}^{CLF} = \dot{m}_{TZL out}^k - \dot{m}_{pop}^{CLF} = 0,3283 - 0,3280 = 0,0003 \text{ kg/s} \quad (5.75)$$

Množství částic odloučených v mokré pračce:

$$\dot{m}_{pop}^{MP} = \dot{m}_{TZL out}^{CLF} \cdot \eta_{MP}^{TZL} = 0,0003 \cdot 0,6 = 0,0002 \text{ kg/s} \quad (5.76)$$

- je počítáno, že při průchodu spalin mokrou pračkou dojde k odloučení 60 % částic obsažených ve spalinách

Množství částic za mokrou pračkou:

$$\dot{m}_{TZL out} = \dot{m}_{TZL out}^{CLF} - \dot{m}_{pop}^{MP} = 0,0003 - 0,0002 = 0,0001 \text{ kg/s} \quad (5.77)$$

Měrné emise částic opouštějící komín v suchých spalinách:

$$c_{ss TZL out} = \frac{\dot{m}_{TZL out}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,0001}{34,346} \cdot 1000000 = 4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.78)$$

Měrné emise částic opouštějící komín v suchých spalinách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 ref} = 6 \%$):

$$c_{TZL out}^{ref} = c_{ss TZL out} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 4 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{sp}} \quad (5.79)$$

5.5.2 Odsíření

Množství oxidu siřičitého vstupující do pračky:

$$\dot{m}_{SO_2 in} = \dot{m}_{SO_2} = 0,0074 \text{ kg/s} \quad (5.80)$$

Množství oxidu siřičitého vystupující z pračky:

$$\dot{m}_{SO_2 out} = (1 - \eta_{PR SO_2}) \cdot \dot{m}_{SO_2 in} = (1 - 0,945) \cdot 0,007 = 0,0004 \text{ kg/s} \quad (5.81)$$

- účinnost stávající pračky je 94,5 %

Množství oxidu siřičitého vstupující do reakce v pračce:

$$\dot{m}_{SO_2}^{reag} = \dot{m}_{SO_2 in} - \dot{m}_{SO_2 out} = 0,0074 - 0,0004 = 0,0070 \text{ kg/s} \quad (5.82)$$

Množství kyslíku potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{32}{128,132} \cdot 0,0070 = 0,002 \text{ kg/s} \quad (5.83)$$

Teoretické minimální množství vápence potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CaCO_3}^{teor} = \frac{M_{2CaCO_3}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{200,1738}{128,132} \cdot 0,0070 = 0,011 \text{ kg/s} \quad (5.84)$$

Skutečné množství vápence potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CaCO_3}^{skut} = \frac{1,04}{0,975} \cdot \dot{m}_{CaCO_3}^{teor} = \frac{1,04}{0,975} \cdot 0,0070 = 0,012 \text{ kg/s} \quad (5.85)$$

- přebytek vápence o čistotě 97,5 % je uvažován 1,04

Množství vody potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{M_{4H_2O}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{72}{128,132} \cdot 0,0070 = 0,004 \text{ kg/s} \quad (5.86)$$

Množství sádrovce vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O} = \frac{M_{2CaSO_4 \cdot 2H_2O}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{344}{128,132} \cdot 0,0070 = 0,019 \text{ kg/s} \quad (5.87)$$

Množství oxidu uhličitého vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{2CO_2}}{M_{2SO_2}} \cdot \dot{m}_{SO_2}^{reag} = \frac{88}{128,132} \cdot 0,0070 = 0,005 \text{ kg/s} \quad (5.88)$$

Přibližné množství energosádrovce zachyceného pračkou:

$$\dot{m}_{ES} = \dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O} + \dot{m}_{pop}^{MP} + (\dot{m}_{CaCO_3}^{skut} - \dot{m}_{CaCO_3}^{teor}) = 0,019 + 0,0002 + (0,012 - 0,011) = 0,020 \text{ kg/s} \quad (5.89)$$

Přibližná čistota energosádrovce:

$$\frac{\dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O}}{\dot{m}_{ES}} \cdot 100 = \frac{0,019}{0,020} \cdot 100 = 95 \%$$

Měrné emise oxidu siřičitého opouštějící komín v suchých spalínách:

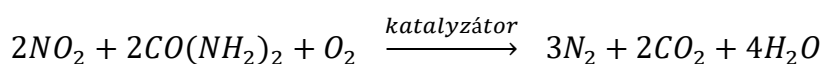
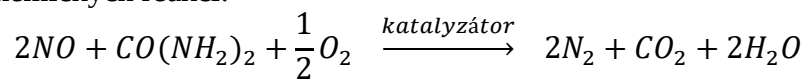
$$c_{ss \text{ SO}_2 \text{ out}} = \frac{\dot{m}_{SO_2 \text{ out}}}{O_{ss \text{ celk}}} \cdot 1000000 = \frac{0,0004}{34,346} \cdot 1000000 = 12 \frac{\text{mg}}{\text{m}_3^3} \quad (5.90)$$

Měrné emise oxidu siřičitého opouštějící komín v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 \text{ ref}} = 6 \%$):

$$c_{SO_2 \text{ out}}^{ref} = c_{ss \text{ SO}_2 \text{ out}} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 12 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 11 \frac{\text{mg}}{\text{m}_3^3} \quad (5.91)$$

5.5.3 Denitrifikace

Denitrifikace spalin se v případě rekonstruovaného zdroje skládá z primárních a sekundárních metodách snižování NO_x . Pomocí primárních metod dojde ke snížení obsahu NO_x ve spalínách ze 450 mg/m_3^3 (normální podmínky a 6 % obsah kyslíku) na hodnotu pohybující se okolo 260 mg/m_3^3 . Dalšího snižování, tak aby byly plněny emisní limity, je dosahováno pomocí metody SCR (reagentem je v tomto případě močovina), která probíhá na základě následujících chemických reakcí:



Vzhledem k tomu, že 90 až 95 % NO_x obsažených ve spalínách je tvořeno NO je první z výše uvedených chemických reakcí dominantní, a proto z ní vychází i následující výpočty. [41]

Množství oxidů dusíku vstupující do pračky:

$$\dot{m}_{NO_x \text{ in}} = \dot{m}_{NO_x} = 0,009 \text{ kg/s} \quad (5.92)$$

Množství oxidů dusíku vystupující z pračky:

$$\dot{m}_{NO_x \text{ out}} = (1 - \eta_{SNCR}) \cdot \dot{m}_{NO_x \text{ in}} = (1 - 0,90) \cdot 0,009 = 0,001 \text{ kg/s} \quad (5.93)$$

– účinnost navrhované metody SCR je 90 %

Množství oxidů dusíku vstupující do reakce:

$$\dot{m}_{NO_x}^{reag} = \dot{m}_{NO_x in} - \dot{m}_{NO_x out} = 0,009 - 0,001 = 0,008 \text{ kg/s} \quad (5.94)$$

Teoretické minimální množství močoviny potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{teor} = \frac{M_{CO(NH_2)_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{60,06}{60,02} \cdot 0,008 = 0,008 \text{ kg/s} \quad (5.95)$$

Skutečné množství močoviny potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{skut} = 1,05 \cdot \dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{teor} = 1,05 \cdot 0,008 = 0,009 \text{ kg/s} \quad (5.96)$$

– přebytek močoviny je uvažován 1,05

Množství kyslíku potřebné pro reakci:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{32}{60,02} \cdot 0,008 = 0,001 \text{ kg/s} \quad (5.97)$$

Množství dusíku vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{56,03}{60,02} \cdot 0,008 = 0,008 \text{ kg/s} \quad (5.98)$$

Množství oxidu uhličitého vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{44,01}{60,02} \cdot 0,008 = 0,006 \text{ kg/s} \quad (5.99)$$

Množství vody vzniklé reakcí:

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{2NO}} \cdot \dot{m}_{NO_x}^{reag} = \frac{36,03}{60,02} \cdot 0,008 = 0,005 \text{ kg/s} \quad (5.100)$$

Měrné emise oxidů dusíku opouštějící komín v suchých spalínách:

$$c_{ss NO_x out} = \frac{\dot{m}_{NO_x out}}{O_{ss celk}} \cdot 1000000 = \frac{0,001}{34,346} \cdot 1000000 = 27 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.101)$$

Měrné emise oxidů dusíku opouštějící komín v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah kyslíku ($O_{2 ref} = 6 \%$):

$$c_{NO_x out}^{ref} = c_{ss NO_x out} \cdot \frac{21 - O_2^{ref}}{21 - O_2} = 27 \cdot \frac{21 - 6}{21 - 5,25} = 26 \frac{mg}{m_{sp}^3} \quad (5.102)$$

Množství vypouštěných emisí rekonstruovaného kotle v porovnání s emisními limity dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší pro spalovací stacionární zdroje > 100 – 300 MW jsou uvedeny v následující tabulce.

Emise	Produkovaná hodnota [mg/m ³]	Emisní limit [mg/m ³]
Oxid siřičitý (SO ₂)	11	200
Oxidy dusíku (NO _x)	26	200
Tuhé znečišťující látky (TZL)	4	20
Oxid uhelnatý (CO)	250	250

Tab. 5.6 Množství produkovaných emisí rekonstruovaného kotle v porovnání s emisními limity⁴

5.6 Bilanční schéma kotle a systému čištění spalin

Bilanční schéma rekonstruovaného kotle je podobné jako v případě kotle stávajícího s tím rozdílem, že je doplněno o trasu recirkulace spalin a filtry TZL jsou nahrazeny sestavou předfiltru a látkového filtru.

Technologický celek zdroje je ve schématu tvořen kotlem, předfiltrem a látkovým filtrem tuhých znečišťujících látek, mokrou pračku spalin a komínem.

Do kotle je přiváděn spalovací vzduch, recirkulace spalin, palivo (dřevní štěpka), napájecí voda a močovina. Z kotle vystupuje přehřátá pára, produkty vzniklé spalováním (spaliny, popílek, struska) a odluh. Stejně jako ve schématu stávajícího kotle jsou i zde pro doplnění znázorněny ztráty kotle.

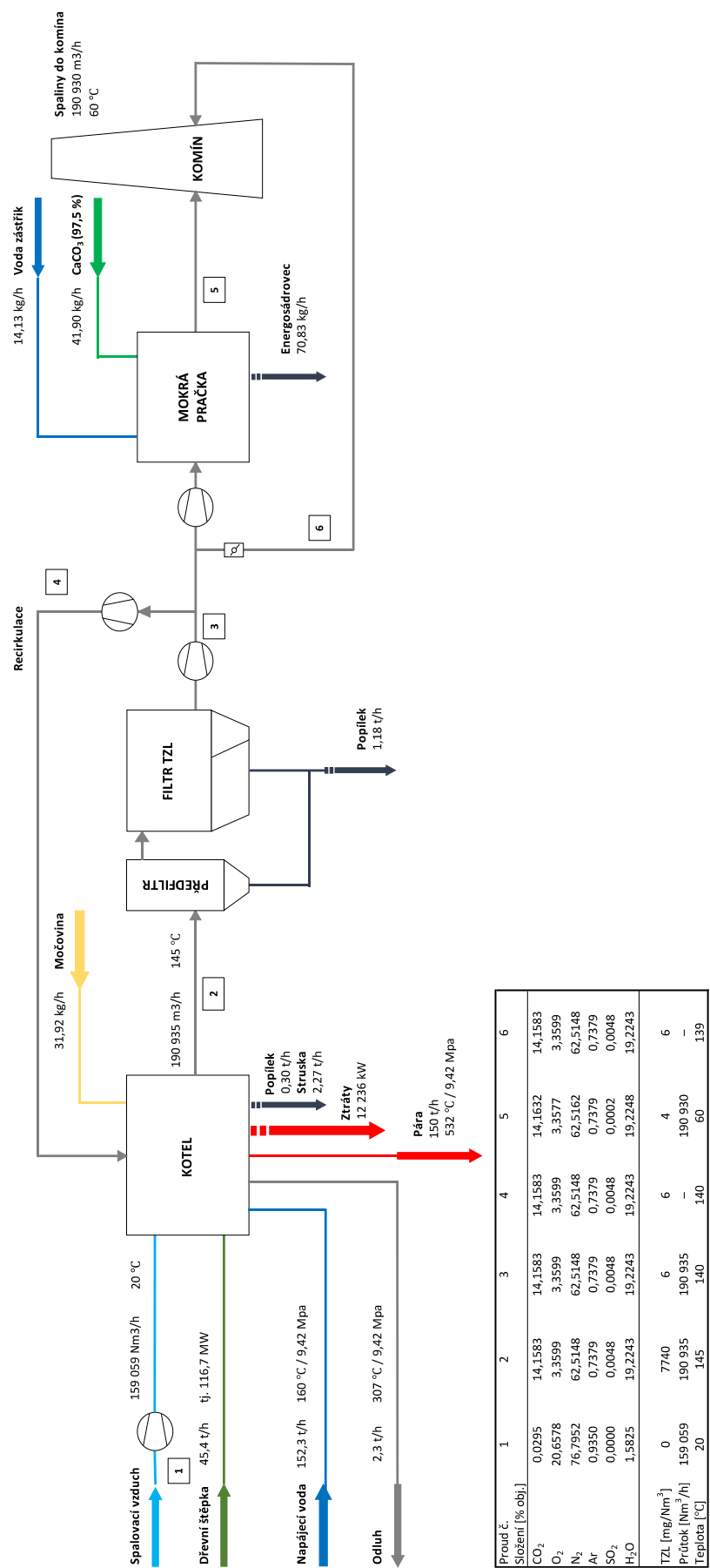
Do sestavy předfiltru a filtru tuhých znečišťujících látek vstupují spaliny a vystupuje množství odloučeného popílku.

Do mokré pračky spalin vstupují spaliny, vápenec a voda sloužící k doplňování a zástřiku směsí. Z pračky vystupuje vzniklý energosádrovec. Odpaní vody z pračky byly v tomto případě zanedbány.

Do komína vstupují vyčištěné spaliny, které jsou dále vypouštěny do atmosféry.

Ve spodní části bilančního schématu jsou vypsány vlastnosti jednotlivých proudů médií (teplota, průtok a objemové složení), které jsou v nákresu značeny odkazy s čísly 1 až 6.

⁴ Produkované hodnoty i specifické emisní limity jsou vztaženy na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 %.



Obr. 5.1 Bilanční schéma rekonstruovaného zdroje

5.7 Denní a roční provoz zdroje

Stejně jako v případě stávajícího zdroje jsou i pro nový rekonstruovaný zdroj níže uvedeny tabulky, které znázorňují bilanci technologického celku zdroje v tunách za den a v tunách za rok pro případ, kdy by byl provozován na 100 % instalovaného tepelného výkonu (množství spalovacího vzduchu, napájecí vody a zástřikové vody není uvažováno). U ročního provozu je uvažováno že zdroj bude provozován po dobu 7 800 hodin.

Denní bilance	Množství [t/den]
Spotřeba paliva (dřevní štěpka)	1 090
Spotřeba močoviny	0,77
Spotřeba vápence	1
Odloučený popílek	35
Vzniklá struska	54
Vzniklý energosádrovec	2
Emise oxidu siřičitého	0,04
Emise oxidu uhličitého	1 282
Emise TZL	0,01
Emise oxidů dusíku	0,08
Emise oxidu uhelnatého	0,78

Tab. 5.7 Denní bilance rekonstruovaného zdroje⁵

Roční bilance	Množství [t/rok]
Spotřeba paliva (dřevní štěpka)	354 370
Spotřeba močoviny	249
Spotřeba vápenec	327
Odloučený popílek	11 525
Vzniklá struska	17 711
Vzniklý energosádrovec	553
Emise oxidu siřičitého	11
Emise oxidu uhličitého	416 564
Emise TZL	4
Emise oxidů dusíku	26
Emise oxidu uhelnatého	253

Tab. 5.8 Roční bilance rekonstruovaného zdroje

⁵ Emisemi v tabulkách denní i roční bilance zdroje jsou myšleny ty, jenž opouštějí komín (vstupují do atmosféry)

6 Porovnání zdrojů

Stávající kotel K1 je s novým rekonstruovaným biomasovým kotlem porovnán v množství přiváděného paliva, množství spotřebovaných reagentů, potřebných pro čištění spalin, množství vznikajících emisí a množství tuhých produktů spalování.

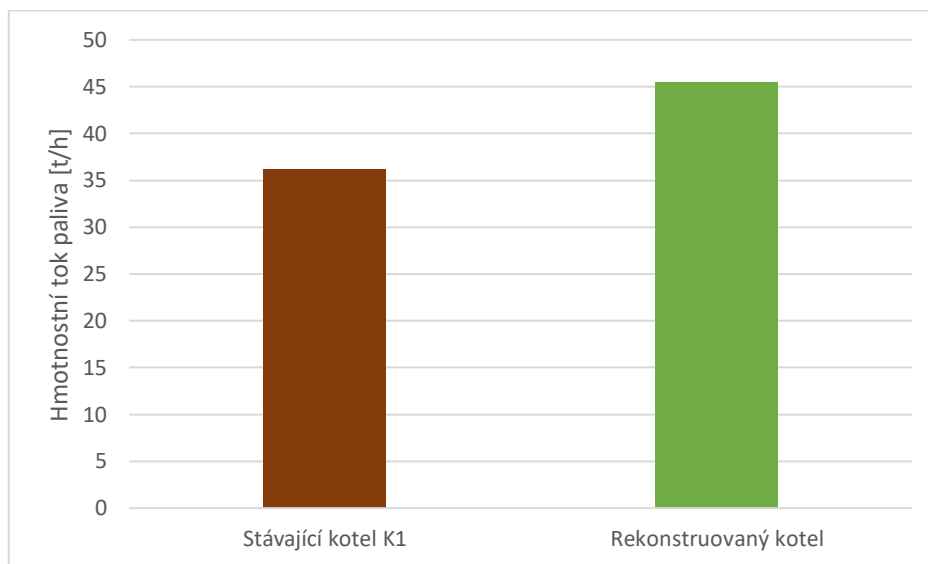
6.1 Množství přiváděného paliva

Stávající kotel K1 spálí při provozu na jmenovitý výkon 36,2 tun hnědého uhlí za hodinu. Za den provozu činí toto množství 869 tun. Při uvažování sypané hmotnosti hnědého uhlí 720 kg/m^3 a objemu jednoho nákladního vagónu 82 m^3 je k přísunu množství paliva potřebného pro jednodenní provoz kotle zapotřebí přibližně 15 takovýchto nákladních vagónů.

Rekonstruovaný biomasový kotel spálí za stejných podmínek 45,4 tun dřevní štěpky za hodinu. Za den provozu pak 1 090 tun. Pro zajištění přísunu takového množství paliva je zapotřebí přibližně 53 nákladních vagónů denně.

To znamená, že provozem nového rekonstruovaného kotle dojde k navýšení nákladů spojených s dopravou paliva ke zdroji.

Pro názornost je potřebné množství přiváděného paliva pro oba zdroje zobrazeno na následujícím grafu.

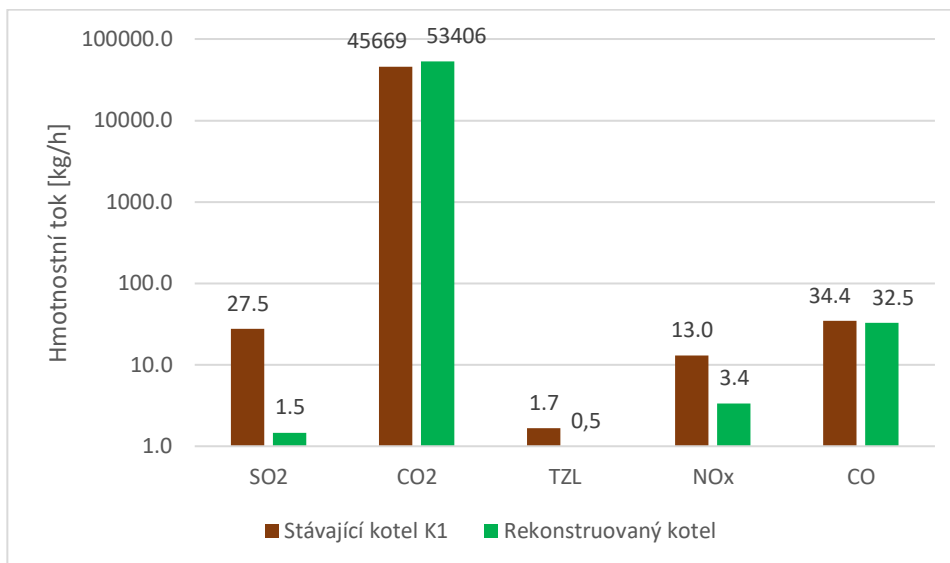


Graf 6.1 Porovnání spotřeby paliva

6.2 Množství produkovaných emisí

Obecně lze konstatovat, že emise stávajícího kotle K1 dosahují vyšších hodnot než emise produkované novým biomasovým kotlem. Výjimkou je množství produkovaných emisí oxidu uhličitého, které je vyšší v případě kotle na biomasu, a to přibližně o $7\,700 \text{ kg/h}$. To odporuje snaze snižování emisí tohoto plynu, aby bylo bráněno dalšímu oteplování planety. Při spalování biomasy jakožto náhrady za fosilní palivo je však počítáno s tím, že přispívá ke snižování produkce skleníkových plynů, neboť množství produkovaného oxidu uhličitého je přibližně stejné s množstvím, které je rostlinami spotřebováno při jejich růstu (fotosyntéze).

Jednotlivé hodnoty množství emisí produkovaných oběma zdroji jsou zobrazeny na následujícím grafu.



Graf 6.2 Porovnání množství produkovaných emisí

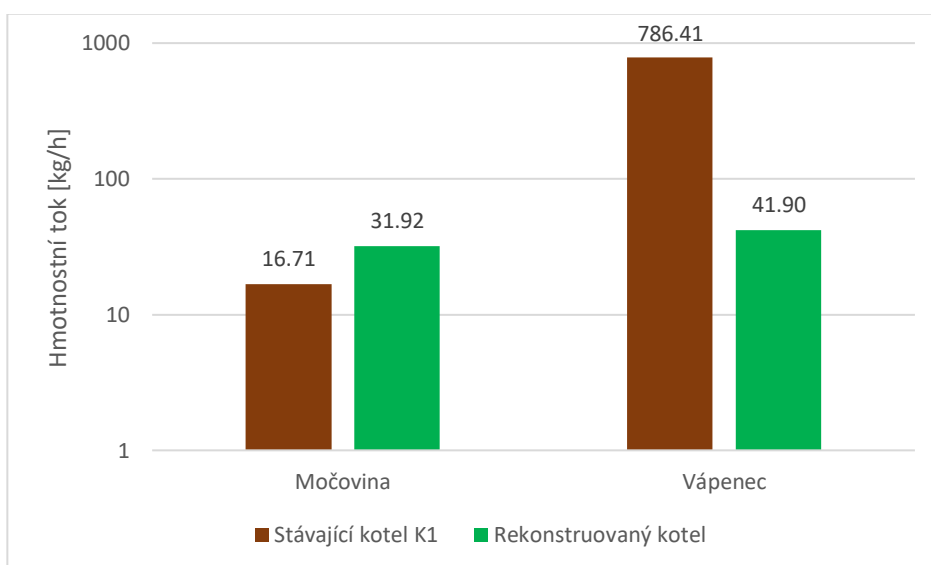
6.3 Množství reagentů

K zajištění provozu technologie sekundárního snižování emisí NO_x stávajícího kotle K1 (SNCR) je potřeba přivádět 16,71 kg močoviny za hodinu. Provoz technologie odsíření spalin stávajícího kotle K1 spotřebuje 786,41 kg vápence.

Rekonstruovaný kotel na biomasu bude pro snižování emisí NO_x pomocí sekundárních opatření vybaven technologií SCR, pro jejíž provoz bude potřeba přivádět 31,92 kg močoviny za hodinu. Z důvodu volby dřevní štěpky s poměrně vysokým obsahem síry, jako referenčního paliva, bude potřeba i u nového rekonstruovaného kotle provozovat stávající systém odsíření spalin tak, aby byly plněny emisní limity. Systém odsíření v tomto případě spotřebuje 41,90 kg vápence za hodinu.

Provozem nového rekonstruovaného kotle tedy poklesnou náklady na odsíření spalin. Náklady na jejich denitrifikaci naopak vzrostou.

Potřebné množství přiváděných reagentů pro oba zdroje je pro názornost zobrazeno na následujícím grafu.



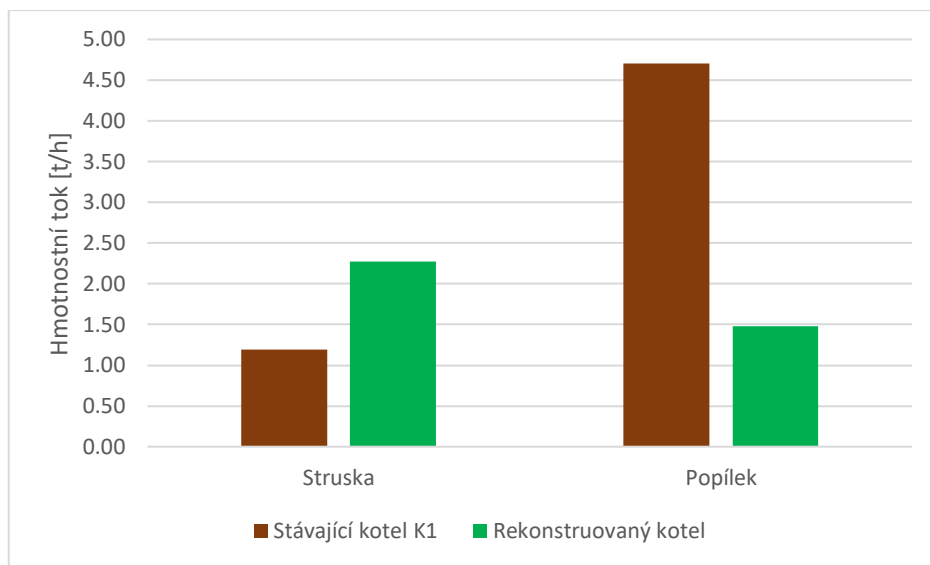
Graf 6.3 Porovnání spotřeby reagentů

6.4 Množství tuhých produktů spalování

Během provozu kotle je potřeba odvádět tuhé zbytky vzniklé během procesu spalování. Spalováním hnědého uhlí ve stávajícím kotli K1 vzniká 1,19 tun strusky a 4,70 tun popílku za hodinu provozu.

Při provozu nového rekonstruovaného kotle na dřevní štěpku bude vznikat 2,27 tun strusky a 1,48 tun popílku za hodinu provozu.

Porovnání množství tuhých produktů je pro názornost vykresleno v následujícím grafu.



Graf 6.2 Porovnání množství tuhých produktů spalování⁶

⁶ Množství popílku v grafu znázorňuje jeho množství odloučené v mezitazích kotle a systémech čištění spalin.

DISKUSE

Vzhledem k současně se odehrávajícím událostem je potřeba zvážit veškeré situace, které mohou nastat. Mezi ty patří i nedostatek zemního plynu v důsledku přerušení jeho dodávek. Zemní plyn má ve velké míře dočasně nahradit právě uhlí. Je otázkou, do jaké míry by tato skutečnost odchýlila proces útlumu a ukončování využívání uhlí od scénářů popsanými v úvodní části práce a zda by nebyl „konec“ uhlí časově oddálen.

Při provádění stechiometrických výpočtů byl použit model dokonalého spalování, který předpokládá dokonalé spálení veškeré hořlaviny obsažené v palivu. Z tohoto důvodu nebylo možné přesně vypočítat výsledný obsah oxidu uhelnatého, jakožto produktu nedokonalého spalování, ve spalínách. Jeho obsah byl v obou případech dle odborné konzultace volen podle maximální hodnoty emisního limitu a ve skutečnosti tedy může být nižší. Přestože se výpočtový model nedokonalého spalování více blíží reálným podmínkám při spalování, dle [36] je rozdíl ve výsledcích stechiometrických výpočtů zanedbatelný.

Při uvažování uhlíkové neutrality biomasy, tedy že množství oxidu uhličitého vzniklé jejím spálením je následně opět využito rostlinami při fotosyntéze, je potřeba zvážit, zda tomu tak opravdu bude i v případě, kdy by jako palivo byla využívána ve více „větších“ zdrojích. V určitém bodě by totiž mohla nastat situace, kdy množství spalované biomasy, a tedy i množství tímto způsobem vznikajícího oxidu uhličitého převyší množství, které jsou rostliny schopny zpětně využít při fotosyntéze.

ZÁVĚR

První část diplomové práce byla zaměřena na popis uhlí jakožto paliva, byly zde popsány důvody, proč se odstupuje od jeho dalšího využívání a uvedeny možné náhrady. V další části práce byl popsán stávající hnědouhelný zdroj a proveden koncepční návrh jeho rekonstrukce, která zahrnuje změnu palivové základny z hnědého uhlí na biomasu, kterou je v tomto případě dřevní štěpka. V závěru práce byly oba zdroje navzájem porovnány.

Pro stávající hnědouhelný zdroj i nový rekonstruovaný biomasový zdroj byly provedeny bilanční výpočty. Ty zahrnovaly stechiometrické výpočty, výpočty entalpie spalín a vzduchu a bilanci systémů čištění spalín. Pomocí stechiometrických výpočtů byly vypočteny objemy spalín a potřebná množství spalovacího vzduchu. Při výpočtech entalpií spalín bylo vypočteno množství tepla, které spaliny obsahují v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu. V základní bilanci kotle bylo vypočteno množství tepla přivedeného do kotlů, jejich účinnost a tepelné ztráty. Bylo zde vypočítáno také množství vyrobené páry, množství paliva přivedeného do kotle, množství vznikající strusky a měrné emise ve spalínách. Bilančními výpočty systémů čištění spalín bylo vypočteno množství odloučených emisí ze spalín a následně jejich konečné množství vypouštěné do atmosféry prostřednictvím komína.

Ze závěrečného porovnání zdrojů vyplývá, že aby rekonstruovaný kotel dodržel stejné výkonové parametry bude muset spalovat více paliva než kotel stávající, a to o 9,2 t/h. Spalováním takového množství dřevní štěpky bude vznikat větší množství emisí oxidů dusíku než v případě stávajícího hnědouhelného kotle. To má za následek vyšší spotřebu močoviny pro denitrifikaci spalín a to o 91 %. Naopak jelikož biomasa obecně obsahuje méně síry než uhlí, je i množství produkovaných emisí oxidu siřičitého znatelně nižší. To znamená, že množství vápence potřebné pro odsíření je v případě rekonstruovaného zdroje menší, a to přibližně o 95 %. Emise tuhých znečišťujících látek jsou menší v případě rekonstruovaného zdroje. Emise oxidu uhelnatého jsou u obou zdrojů srovnatelné. Největší rozdíl v produkovaných emisích je v případě oxidu uhličitého. Toho je produkováno více v případě rekonstruovaného kotle na biomasu, a to o 17 % (tj. 196 t/h) oproti stávajícímu hnědouhelnému zdroji. Z pohledu množství vznikajících tuhých zbytků spalování bude u nového rekonstruovaného kotle vznikat větší množství strusky, a to přibližně o polovinu oproti stávajícímu hnědouhelnému kotli. Množství úletového popílku ve spalínách u rekonstruovaného zdroje naopak poklesle o 69 %.

Z výsledného porovnání zdrojů je vyplývá, že změnou palivové základny z hnědého uhlí na biomasu a úpravami systémů čištění spalín bude rekonstruovaným zdrojem do ovzduší vypouštěno méně emisí oproti stávajícímu zdroji, s výjimkou emisí oxidu uhličitého. To je v rozporu se snahou o snižování množství skleníkových plynů, avšak při spalování biomasy jakožto náhrady za fosilní palivo je počítáno s tím, že přispívá ke snižování produkce skleníkových plynů, neboť množství produkovaného oxidu uhličitého je přibližně stejné s množstvím, které je rostlinami spotřebováno při jejich růstu (fotosyntéze).

Citovaná literatura

- [1] BOECHLER, E. et al. Energyeducation [online]. 2021. Dostupné také z: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal>
- [2] CEY, E. et al. Energyeducation [online]. 2019. Dostupné také z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_formation
- [3] OKD [online]. Dostupné také z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/jak-uhli-vzniklo>
- [4] Geologie.vsb. *Energetické suroviny* [online]. Dostupné také z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/energeticke_suroviny.html
- [5] Landsnails [online]. Dostupné také z: https://landsnails.org/images/Potreby/Substraty/raselina_01big.jpg
- [6] Palivazdemar [online]. Dostupné také z: https://www.palivazdemar.cz/upload/produkty/794-zbd00038_1.jpg
- [7] Topmeuhlim [online]. Dostupné také z: https://www.topmeuhlim.cz/wp-content/uploads/2016/04/uhli_pro_kovare.jpg
- [8] Topgeo [online]. Dostupné také z: https://img.topgeo.com/normal/anthrazit-anthrazitkohle-_21185.jpg
- [9] Geologie.vsb. *Využití uhlí* [online]. Dostupné také z: http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyuziti_uhli.html
- [10] CEZ. *Uhlí* [online]. Dostupné také z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/uhli_1.html
- [11] EIA. *Coal explained* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/how-much-coal-is-left.php>
- [12] Oenergetice. *Vytěžitelných zásob uhlí v Česku ubývá, hnědého je necelých 650 mil. tun* [online]. 2019. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/uhli/vytezitelných-zasob-uhli-v-cesku-ubyva-hnedého-je-necelých-650-mil-tun>
- [13] IEA. In: *Coal 2020 Analysis and forecast to 2025* [online]. 2020. Dostupné také z: https://iea.blob.core.windows.net/assets/00abf3d2-4599-4353-977c-8f80e9085420/Coal_2020.pdf
- [14] IEA. *Coal information* [online]. 2020. Dostupné také z: <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview/consumption>
- [15] Faktaoklimatu. *Vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/koncentrace-co2>
- [16] Faktaoklimatu. *Vývoj světové teplotní anomálie* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/teplotni-anomalie>

- [17] World energy outlook 2021. In: IEA [online]. 2021. Dostupné také z: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>
- [18] Ourworldindata. *Electricity mix* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [19] Ourworldindata. *Energy mix* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [20] Faktaoklimatu. *Uhelný phase-out ve státech EU* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/uhelny-phaseout-eu>
- [21] Solarpowereurope. *Solar continues to break installation records on track for terawatt scale by 2022* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://www.solarpowereurope.org/solar-continues-to-break-installation-records-on-track-for-terawatt-scale-by-2022/>
- [22] CEZ. *Fotovoltaika* [online]. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [23] SALAVEC, J. Oenergetice. *Světový instalovaný výkon větrných elektráren loni vzrostl o 60 GW* [online]. 2020. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/svetovy-instalovany-vykon-vetrnych-elektraren-loni-vzrostl-60-gw>
- [24] GWEC. In: *Global wind report 2021* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [25] VOBOŘIL, D. Oenergetice. *Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online]. 2017. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [26] Oenergetice. *EK schválila podmínky pro označení jádra a plynu za zelené investice* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/ek-schvalila-podminky-pro-oznaceni-jadra-a-plynu-za-zelene-investice#comments>
- [27] IEA. *Gas* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/gas>
- [28] CEZ. *Jaderná energetika ve světě* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete>
- [29] SLAVÍK, J. Proelektrotechniky. *Vodíková mobilita a vodíková energetika – již ne vzdálená budoucnost* [online]. 2016. Dostupné také z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/46.php>
- [30] HYTEP. *Základní informace k vodíku* [online]. 2022. Dostupné také z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [31] EIA. *Waste to energy* [online]. 2021. Dostupné také z: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/waste-to-energy.php>

- [32] Odpadjeenergie. *19. století - mezník pro odpady* [online]. Dostupné také z: <http://www.odpadjeenergie.cz/historie/19-stoleti-meznik-pro-odpady>
- [33] CEWEP. *What is waste to energy* [online]. Dostupné také z: <https://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>
- [34] POLACH, V. ZCU. In: *Parní kotle* [online]. Dostupné také z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf
- [35] CEZ. *Snižování emisí NOx* [online]. Dostupné také z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [36] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [37] *Norma ČSN EN 12952-15 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – část 15: Přejímací zkoušky*. 2003.
- [38] SORRELS, J. L. et al. EPA. In: *Selective Noncatalytic Reduction* [online]. 2019. Dostupné také z: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/sncrcostmanualchapter7thedition20162017revisions.pdf>
- [39] BALÁŠ, M. et al. vutbr. In: *Spalné teplo a složení biopaliv a bioodpadů* [online]. 2019. Dostupné také z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2019/01.pdf>
- [40] MICHAELA, Z. *Návrh sušky na biomasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [41] SORRELS, J. L. et al. EPA. In: *Selective Catalytic Reduction* [online]. 2019. Dostupné také z: https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/srcrcostmanualchapter7thedition_2016revisions2017.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\dot{m}_{CO_2}$	Hmotnostní tok oxidu uhličitého ve spalinách	kg/s
$\dot{m}_{CO_2}$	Množství oxidu uhličitého vzniklé reakcí	kg/s
$\dot{m}_{H_2O}$	Množství vody potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{N_2}$	Množství dusíku vzniklé reakcí	kg/s
$\dot{m}_{NO_x \text{ in}}$	Množství oxidů dusíku ve spalinách před denitrifikací	kg/s
$\dot{m}_{NO_x \text{ out}}$	Množství oxidů dusíku ve spalinách po denitrifikaci	kg/s
$\dot{m}_{NO_x}$	Hmotnostní tok oxidů dusíku ve spalinách	kg/s
$\dot{m}_{O_2}$	Množství kyslíku potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{SO_2}$	Hmotnostní tok oxidu siřičitého ve spalinách	kg/s
$\dot{m}_{CaCO_3}^{skut}$	Skutečné množství vápence potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{CaCO_3}^{teor}$	Teoretické minimální množství vápence potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{CaSO_4 \cdot H_2O}$	Množství sádrovce vzniklé reakcí	kg/s
$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{skut}$	Skutečné množství močoviny potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{CO(NH_2)_2}^{teor}$	Teoretické minimální množství močoviny potřebné pro reakci	kg/s
$\dot{m}_{CO}$	Hmotnostní tok oxidu uhelnatého ve spalinách	kg/s
$\dot{m}_{ES}$	Přibližné množství energosádrovce zachycené pračkou	kg/s
$\dot{m}_{NO_x}^{reag}$	Množství oxidů dusíku vstupující do reakce	kg/s
$\dot{m}_{pop}^{CLF}$	Množství odloučených částic v sestavě cyklón–látkový filtr	kg/s
$\dot{m}_{pop}^{EO}$	Množství částic odloučených v elektrostatických odlučovácích	kg/s
$\dot{m}_{pop}^k$	Množství částic odloučených v mezikotlích	kg/s
$\dot{m}_{pop}^{MP}$	Množství částic odloučených v mokré pračce	kg/s
$\dot{m}_{SO_2 \text{ in}}$	Množství oxidu siřičitého vstupující do pračky	kg/s
$\dot{m}_{SO_2 \text{ out}}$	Množství oxidu siřičitého vystupující z pračky	kg/s
$\dot{m}_{SO_2}^{reag}$	Množství oxidu siřičitého vstupující do reakce v pračce	kg/s
$\dot{m}_{TSL \text{ out}}^{CLF}$	Množství částic za sestavou cyklón–látkový filtr	kg/s
$\dot{m}_{TSL \text{ out}}^{EO}$	Množství částic za elektrostatickým odlučovákem	kg/s
$\dot{m}_{TSL \text{ out}}^k$	Množství částic za kotlem	kg/s
$\dot{m}_{TSL \text{ out}}$	Množství částic za mokrou pračkou	kg/s
$\dot{m}_{TSL}$	Hmotnostní tok částic ve spalinách	kg/s
A^d	Obsah popeloviny v bezvodém vzorku	%
A^r	Obsah popeloviny v původním vzorku	%
$a_{\dot{u}}$	Poměrný úlet popílku z ohniště	—
$C_{CO_2}^{ref}$	Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalinách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah O_2	mg/m _{sp} ³

$c_{NO_x}^{ref}$	Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
$c_{SO_2}^{ref}$	Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
c_{CO}^{ref}	Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
C^d	Obsah uhlíku v bezvodém vzorku	%
C^{daf}	Obsah uhlíku ve vysušeném vzorku bez popeloviny	%
C_i	Podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků	—
c_i	Měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	$kJ/kg \cdot K$
$c_{NO_x out}^{ref}$	Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách za normálních podmínek přepočtené na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
c_{pv}	Měrná tepelná kapacita paliva	$kJ/kg \cdot K$
C^r	Uhlík v původním vzorku	%
$c_{SO_2 out}^{ref}$	Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách za normálních podmínek přepočtené na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
$c_{ss CO_2}$	Měrné emise oxidu uhličitého v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss NO_x out}$	Měrné emise oxidů dusíku opouštějící komín v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss NO_x}$	Měrné emise oxidů dusíku v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss SO_2 out}$	Měrné emise oxidu siřičitého opouštějící komín v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss SO_2}$	Měrné emise oxidu siřičitého v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss CO}$	Měrné emise oxidu uhelnatého v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss TZL out}$	Měrné emise částic opouštějící komín v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{ss TZL}$	Měrné emise částic v suchých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{sv CO_2}$	Měrné emise oxidu uhličitého ve vlhkých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{sv NO_x}$	Měrné emise oxidů dusíku ve vlhkých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{sv SO_2}$	Měrné emise oxidu siřičitého ve vlhkých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{sv CO}$	Měrné emise ve vlhkých spalínách	mg/m_{sp}^3
$c_{sv TZL}$	Měrné emise částic ve vlhkých spalínách	mg/m_{sp}^3
c_{sv}	Měrné teplo sušiny paliva	$kJ/kg \cdot K$
$c_{TZL out}^{ref}$	Měrné emise částic v suchých spalínách za normálních podmínek přepočtené na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
c_{TZL}^{ref}	Měrné emise částic v suchých spalínách za normálních podmínek přepočítané na referenční obsah O ₂	mg/m_{sp}^3
H^d	Obsah vodíku v bezvodém vzorku	%
H^{daf}	Obsahu vodíku ve vysušeném vzorku bez popeloviny	%
H^r	Vodík v původním vzorku	%
i_{nv}	Entalpie napájecí vody	kJ/kg
i_{pp}	Entalpie přehřáté páry	kJ/kg

i_{pv}	Fyzické teplo paliva	kJ/kg
$I_{s\ min}^t$	Entalpie minimálního objemu spalin	kJ/kg
$I_s^{tk,\alpha}$	Entalpie spalin na výstupu z kotle	kJ/kg
$I_s^{tvz,\alpha}$	Entalpie spalin při teplotě okolního vzduchu	kJ/kg
$I_s^{t,\alpha}$	Entalpie spalin s přebytkem vzduchu	kJ/kg
$I_v^t\ min$	Entalpie minimálního objemu suchého vzduchu	kJ/kg
i'_w	Entalpie syté vody	kJ/kg
M_{ii}	Molární hmotnost dané složky	kg/mol
M_o	Množství odluhu	t/h
M_{PAL}	Množství paliva přivedeného do kotle	kg/s
M_{pp}	Množství vyrobené páry	t/h
M_{pv}	Skutečné množství spáleného paliva	kg/s
M_s	Množství vznikající strusky	kg/s
N^d	Obsah dusíku v bezvodém vzorku	%
N^{daf}	Obsah dusíku ve vysušeném vzorku bez popeloviny	%
N^r	Obsah dusíku v původním vzorku	%
$O_{CO_2\ min}$	Objem oxidu uhličitého ve spalinách	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{H_2O}^s$	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{H_2O}^v$	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{N_2\ min}$	Objem dusíku ve spalinách	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{O_2\ min}$	Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{SO_2\ min}$	Objem oxidu siřičitého ve spalinách	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{2\ ref}$	Referenční obsah kyslíku	%
$O_{2\ ss}$	Objemový podíl kyslíku v suchých spalinách	%
$O_{2\ sv}$	Objemový podíl kyslíku ve vlhkých spalinách	%
$O_{Ar\ min}$	Objem argonu ve spalinách	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
O^d	Obsah kyslíku v bezvodém vzorku	%
O^{daf}	Obsah kyslíku ve vysušeném vzorku bez popeloviny	%
O^r	Kyslík v původním vzorku	%
$O_{ss\ O_2}$	Obsah kyslíku v suchých spalinách	m^3/kg
$O_{ss\ celk}$	Celkové množství suchých spalin	m^3/s
$O_{ss\ min}$	Minimální objem suchých spalin získaný spálením 1 kg paliva	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
O_{ss}	Skutečný objem suchých spalin	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
$O_{sv\ O_2}$	Obsah kyslíku ve vlhkých spalinách	m^3/kg
$O_{sv\ celk}$	Celkové množství vlhkých spalin	m^3/s
$O_{sv\ min}$	Minimální objem vlhkých spalin	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$
O_{sv}	Skutečný objem vlhkých spalin	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{PAL}$

$O_{vs\ min}$	Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva	Nm^3/kg_{PAL}
O_{vs}	Skutečný objem suchého vzduchu	Nm^3/kg_{PAL}
$O_{vv\ min}$	Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva	Nm^3/kg_{PAL}
O_{vv}	Skutečný objem vlhkého vzduchu	Nm^3/kg_{PAL}
Q_{ci}	Výhřevnost hořlaviny uvažovaného druhu tuhých zbytků	kJ/kg
Q_{cz}	Teplo přivedené cizím zdrojem	kJ/kg
$Q_{i\ red}$	Redukovaná výhřevnost	MJ/kg
Q_i^r	Výhřevnost původního vzorku	MJ/kg
Q_N	Maximální využitelný výkon	MW
Q_{pr}	Teplo přivedené parou při ofukování	kJ/kg
Q_{RC}	Ztráty sáláním a konvekcí	MW
Q_s^d	Spalné teplo bezvodého vzorku	MJ/kg
Q_s^r	Spalné teplo původního vzorku	MJ/kg
Q_v	Výrobní teplo páry	kJ/kg
S^d	Obsah síry v bezvodém vzorku	%
S_m^r	Měrná sirnatost	g/MJ
S^r	Síra v původním vzorku	%
t_i	Uvažovaná teplota tuhých zbytků	$^{\circ}C$
t_{pv}	Teplota paliva	$^{\circ}C$
t_v	Teplota vzduchu	$^{\circ}C$
V^{daf}	Obsah hořlaviny ve vysušeném vzorku bez popeloviny	%
V^r	Obsah hořlaviny v původním vzorku	%
W^a	Voda v analytickém vzorku	%
W^{ex}	Voda hrubá	%
W^h	Voda zbylá	%
W^r	Obsah vody v původním vzorku	%
X_i	Podíl popela z celkového množství v palivu	—
$X_{\dot{u}}$	Procento úletového popílku	%
Z_c	Ztráta mechanickým nedopalem	%
Z_{co}	Ztráta chemickým nedopalem	%
Z_{cs}	Nedopal ve škváře, nebo strusce	%
$Z_{c\dot{u}}$	Nedopal v úletu	%
Z_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	%
Z_{fs}	Ztráta fyzickým teplem škváry	%
$Z_{f\dot{u}}$	Ztráta fyzickým teplem úletu	%
Z_k	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)	%
Z_s	Ztráta sáláním	%
η_k	Účinnost kotle	%

χ_v	Součinitel podílu vodní páry	—
C	Koeficient pro spalování daného paliva	—
$mgCO$	Emisní limit oxidu uhelnatého	mg/Nm^3
α	Součinitel přebytku spalovacího vzduchu	—
φ	Relativní vlhkost	%
APS	Announced Pledge Scenario	
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad	
BRPO	Biologicky rozložitelný průmyslový odpad	
CCS	Carbon Capture and Storage	
CCUS	Carbon Capture, Use and Storage	
IEA	International Energy Agency	
NDC	Nationally Determined Contributions	
NZE	Net Zero Emissions by 2050	
RS	Redukční stanice	
SCR	Selektivní katalytická redukce	
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce	
STEPS	Stated Policies Scenario	
TG	Turbogenerátor	
TZL	Tuhé znečišťující látky	
VTR	Vysokotlaký rozdělovač	
VZT	Vzduchotechnika	
WNA	World Nuclear Assotiation	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Průběh vzniku uhlí [2]	14
Obr. 1.2 Rašelina [5]	15
Obr. 1.3 Hnědé uhlí [6]	15
Obr. 1.4 Černé uhlí [7]	15
Obr. 1.5 Antracit [8]	16
Obr. 2.1 Technologické schéma stávajícího hnědouhelného kotle K1	30
Obr. 3.1 Technologické schéma nového biomasového kotle	36
Obr. 4.1 Bilanční schéma stávajícího zdroje	56
Obr. 5.1 Bilanční schéma rekonstruovaného zdroje	76

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.1 Historický vývoj světové spotřeby uhlí [14]	18
Graf 1.2 Koncentrace CO ₂ v atmosféře za posledních 800 000 let [15]	19
Graf 1.3 Průměrné stáří existujících uhelných elektráren v roce 2020 a odstavení podle NZE [17]	21
Graf 1.4 Omezování výroby elektřiny z uhlí v zemích EU [20]	21
Graf 1.5 Světová energetická spotřeba dle zdrojů [19]	22
Graf 1.6 Procenta z celkového pevného komunálního odpadu, který se ve vybraných zemích spálí s energetickým využitím [31]	25
Graf 4.1 I-t diagram spalin stávajícího kotle K1	42
Graf 5.1 I-t diagram spalin rekonstruovaného kotle	63
Graf 6.1 Porovnání spotřeby paliva	78
Graf 6.4 Porovnání množství tuhých produktů spalování	80

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Základní vlastnosti typů uhlí [9]	16
Tab. 2.1 Technické parametry kotle K1	27
Tab. 2.2 Vlastnosti hnědého uhlí 610–32 společnosti Sokolovská uhelná a.s.	28
Tab. 2.3 Vlastnosti zemního plynu	29
Tab. 3.1 Technické parametry nového biomasového kotle.....	31
Tab. 3.2 Vlastnosti lesní štěpky	34
Tab. 4.1 Přehled vypočtených hodnot stechiometrie stávajícího kotle K1	39
Tab. 4.2 Měrná entalpie některých složek spalín i_{it} [kJ/Nm ³] v závislosti na teplotě t [°C] [36].....	40
Tab. 4.3 Vypočtené hodnoty entalpií spalín a vzduchu pro sestavení I-t diagramu spalín stávajícího kotle K1	41
Tab. 4.4 Přehled vypočtených hodnot ze základní bilance stávajícího kotle K1	46
Tab. 4.5 Přehled vypočtených hodnot měrných emisí a množství vznikající strusky stávajícího kotle K1	50
Tab. 4.6 Množství produkovaných emisí stávajícího kotle K1 v porovnání s emisními limity.....	55
Tab. 4.7 Denní bilance stávajícího kotle K1	57
Tab. 4.8 Roční bilance stávajícího kotle K1	57
Tab. 5.1 Přehled přepočtených parametrů dřevní štěpky	59
Tab. 5.2 Přehled vypočtených hodnot stechiometrie rekonstruovaného kotle.....	61
Tab. 5.3 Vypočtené hodnoty entalpií spalín a vzduchu pro sestavení I-t diagramu spalín rekonstruovaného kotle.....	62
Tab. 5.4 Přehled vypočtených hodnot ze základní bilance rekonstruovaného kotle	66
Tab. 5.5 Přehled vypočtených hodnot měrných emisí a množství vznikající strusky rekonstruovaného kotle.....	70
Tab. 5.6 Množství produkovaných emisí rekonstruovaného kotle v porovnání s emisními limity.....	75
Tab. 5.7 Denní bilance rekonstruovaného zdroje.....	77
Tab. 5.8 Roční bilance rekonstruovaného zdroje	77

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Výpočty a bilanční schémata zdrojů (.xlsx soubor)