



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

MODERNÍ TECHNOLOGIE PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY A ODPADŮ

UP-TO-DATE TECHNOLOGY FOR ENERGY UTILISATION OF BIOMASS AND WASTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KRŇÁVEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MAREK ŠARLEJ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Krňávek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Moderní technologie pro energetické využití biomasy a odpadů

v anglickém jazyce:

Up-to-date technology for energy utilisation of biomass and waste

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou zdrojů a dostupností biomasy a technologickými jednotkami pro jejich energetické využití.

Cíle bakalářské práce:

Seznámit se s problematikou energetického využití biomasy a odpadů.

Zhodnotit situaci v České republice z hlediska zdrojů biomasy.

Provést průzkum trhu s jednotkami pro energetické využití biomasy.

Vyhodnotit možnosti termického zpracování odpadů.

Navrhnout konkrétní technologickou jednotku.

Seznam odborné literatury:

Kunc, J.: ORC technologie v realizaci (II) - Trhové Sviny, srovnání, citováno z: <http://www.tzb-info.cz/2834-orc-technologie-v-realizaci-ii-trhove-sviny-srovnani>, dne 20.2.2011

Ministerstvo životního prostředí (2009): Projekt „Analýza a výsledná kvantifikace využitelné lesní biomasy s důrazem na těžební zbytky pro energetické účely, při zohlednění rizik vyplývajících z dopadu na půdu, koloběh živin a biologickou rozmanitost“. Č.j. 30692/ENV/2009; 2007/610/2009. 48s.

Ministerstvo životního prostředí (2011): Projekt „Analýza energetické bilance, efektivity a logistiky zpracování lesních těžebních zbytků pro energetické využití“. Č.j. 44892/ENV/10; 705/640/10. 77s.

SKOBLIA, S. a kol.: Výroba energie z biomasy a odpadu. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy“, str. 89 – 98. VUT v Brně,(2003), ISBN 80-214-2543-1

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Kropáč, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 23.11.2012

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá technologiemi pro energetické využití biomasy a odpadů. Úvodní část práce je věnována biomase, jejímu rozdělení a zvláště pak zdrojům biomasy z pohledu termického zpracování. Hlavní část práce popisuje a srovnává technologické jednotky pro energetické využití biomasy, které jsou významné pro český trh. Dále jsou v této práci popsány vybrané technologie čištění spalin vhodné především pro termické zpracování odpadů. Součástí práce je také základní návrhový výpočet technologické jednotky zpracovávající dřevní štěpku pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie.

Klíčová slova

Biomasa, obnovitelné zdroje energie, technologické jednotky, energetické využití odpadů, ekologie, kogenerace

Abstract

The bachelor's thesis deals with technologies for energy utilisation of biomass and waste. The introductory part is dedicated to biomass, its division and sources of biomass suitable for thermal treatment. The main part describes and compares technological units for energy utilisation of biomass, which is important for the Czech market. Furthermore there is described selected technologies for flue gas cleaning suitable especially for thermal treatment of waste. A basic design calculation of technological unit fired with wood chips for combined heat and power production is included here.

Keywords

Biomass, renewable energy sources, technological units, waste to energy, environmental protection, CHP

Bibliografická citace práce

KRŇÁVEK, Martin. *Moderní technologie pro energetické využití biomasy a odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 51 s., 3 s. příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Šarlej, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....
Podpis autora
Martin Krňávek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Marku Šarlejovi, Ph.D. za vstřícnost, ochotnou pomoc a užitečné rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti EVECO Brno za výbornou spolupráci a za zkušenosti, které jsem během praxe v této společnosti získal.

Rád bych také poděkoval svým blízkým a rodině za všestrannou pomoc a podporu během celého studia.

Obsah

1. Úvod	1
2. Zdroje biomasy a její energetické využití.....	2
2.1. Co je biomasa.....	2
2.2. Rozdělení biomasy.....	2
2.3. Způsoby využití biomasy k energetickým účelům	4
2.4. Energie z fytomasy	4
2.4.1. Pšenice	5
2.4.2. Žito	6
2.4.3. Oves	7
2.4.4. Ječmen	8
2.4.5. Řepka olejná	9
2.4.6. Kukuřice	10
2.4.7. Dílčí závěr a zhodnocení výsledků.....	12
2.5. Energie z dendromasy.....	12
2.5.1. Dřevní štěpka.....	12
2.5.2. Rychle rostoucí dřeviny (RRD).....	13
2.5.3. Dřevozpracující závody.....	15
3. Jednotky pro energetické využití biomasy	16
3.1. Rozdělení kotlů a spalovacích zdrojů	16
3.2. Technologická jednotka Vesko-B.....	17
3.2.1. Popis jednotky	18
3.2.2. Technické parametry jednotky	20
3.3. Technologická jednotka K8	21
3.3.1. Popis jednotky	22
3.3.2. Technické parametry	24
3.4. Technologická jednotka EVECO Brno.....	26
3.4.1. Popis jednotky	26
3.4.2. Technické parametry	28
4. Energetické využití odpadů	31
4.1. Rozdělení odpadů a jejich produkce	31
4.2. Technologie čištění spalin	33

4.2.1.	Redukce koncentrací emisí NO _x	34
4.2.2.	Kondicionovaná sorpce s jednoduchým absorbérem	36
4.2.3.	Katalyticko-filtrační systém Remedia	38
4.2.4.	4D filtrace	40
4.2.5.	Odstraňování těžkých kovů	42
5.	Návrhový výpočet jednotky na zpracování biomasy	43
5.1.	Zadání	43
5.2.	Výpočet	44
5.3.	Zhodnocení výsledků	45
6.	Závěr	46
	Seznam použitých zdrojů	47
	Seznam použitých zkratk a symbolů	50
	Seznam příloh	51

1. Úvod

Biomasa představuje nejstarší palivo užívané člověkem už stovky tisíc let, avšak až v dnešní době jsou využívány specifické technologie s vysokou procesní účinností k jejímu zpracování. Biomasu řadíme mezi obnovitelné zdroje energie, přičemž se vychází z předpokladu, že během spalování biomasy se uvolní jen tolik oxidu uhličitého, kolik její rostliny absorbovaly v průběhu růstu při fotosyntetických procesech. Znamená to, že během termické konverze biomasy nenarůstá v atmosféře množství oxidu uhličitého, který se řadí mezi nejvýznamnější skleníkové plyny.

V dnešní době odborníci odhadují, že roční celosvětová produkce biomasy tvoří zhruba 100 miliard tun, což představuje asi 1 400 EJ energie. Pro srovnání je to přibližně čtyřnásobek roční světové produkce fosilních paliv (325 EJ). Ovšem zpracovat takové množství biomasy není ve skutečnosti reálné, neboť by tak například docházelo k přímé konkurenci potravinářské produkci nebo vzhledem k rozmístění zdrojů biomasy by byla logistika ekonomicky nevýhodná. Proto je důležité biomasu chápat především jako lokální zdroj energie, jenž snižuje závislost na dovážených energetických zdrojích. Z tohoto důvodu se první část práce zaměří na analýzu biomasových zdrojů v České republice využitelných pro termické zpracování.

Jedním z výchozích principů státní energetické koncepce (SEK) je dosažení maximální nezávislosti na cizích energetických zdrojích ve smyslu snížení závislosti na dovozu a optimálního využití tuzemských zdrojů energie s ohledem na bezpečnost a ekologii. Proto se druhá část této práce bude zabírat moderními technologickými jednotkami, které umožňují efektivně využívat širokou škálu biomasových paliv tak, aby byla uspokojena poptávka po teple a elektrické energii.

Rostoucí ceny tepla a elektrické energie vedou k hledání alternativních zdrojů. Jistým přesahem termického zpracování biomasy se v dnešní době stává energetické využití odpadů. Na základě směrnice 2006/12/ES definující hierarchii nakládání s odpady, kterou vydala Evropská unie, lze předpokládat, že skládkování odpadů bude dále nevýhodné a bude se přistupovat k jejich energetickému zpracování. Tato skutečnost bude mít mimo jiné pozitivní vliv na životní prostředí a zároveň se takto budou šetřit primární zdroje energií. Během spalování jakéhokoliv materiálu, tedy i odpadu, vzniká určité množství škodlivin, jejichž koncentrace jsou regulovány emisními limity danými příslušným zákonem. Třetí část této práce bude tedy věnována energetickému využití odpadů zejména z hlediska technologií čištění spalin.

Nedílnou součástí práce, uvedenou v její závěrečné části, bude návrhový výpočet technologické jednotky zpracovávající biomasu, na kterém budou principiálně předvedeny základní bilanční výpočty. V rámci výpočtu bude zapotřebí určit hlavní parametry technologie tak, aby byly splněny požadované dodávky tepla.

2. Zdroje biomasy a její energetické využití

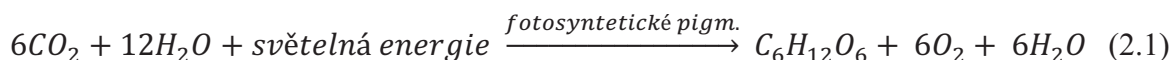
První část této kapitoly přináší základní poznatky o biomase, dále je zde vysvětleno rozdělení biomasy dle příslušných kritérií. Následně se zabývá způsoby energetického využití biomasy diferencovanými podle žádaných výstupů. Ovšem podstatná část této kapitoly je věnována samotným zdrojům biomasy, neboť při navrhování technologické jednotky je důležité tyto zdroje znát, popsat a vyhodnotit. V první řadě to jsou zdroje fytohmoty, které tvoří významnou část eventuálního energetického zhodnocení, přičemž tato práce zkoumá šest základních tuzemských plodin a jejich energetický potenciál. Další část se zabývá zdroji dendromasy, které jsou typické pro krajinu České republiky, a přináší základní informace o jejich vlastnostech a možnostech energetického využití. V neposlední řadě se část této práce věnuje dřevozpracujícím závodům z hlediska producentů dřevních odpadů a eventuálních odběratelů zařízení pro jejich energetické využití.

2.1. Co je biomasa

Dříve než budou provedeny detailnější analýzy, je důležité si uvědomit, co je biomasa a co ji představuje.

Biomasa je hmota organického původu, která vznikla při působení světelné energie a tuto energii uchovala ve formě různých organických látek. Někdy je biomasa také definována jako „substance biologického původu (pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Biomasa je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti, nebo se jedná o využití zbytků ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z komunálního hospodářství, z údržby krajiny a péče o ni.“ (Pastorek a kol., 2004, s. 17).

Základním principem vzniku biomasy je fotosyntéza, při níž z anorganických látek (oxidu uhličitého a vody) za spolupůsobení fotosyntetických pigmentů (chlorofyly aj.) vznikají látky organické (primárně sacharidy). Ačkoliv je celý proces fotosyntézy složitější, tak můžeme biochemickou reakci znázornit následovně:



Fotosyntetické rostliny tvoří potravu pro nefotosyntetické mikroorganismy a živočichy, jež jsou potravou konzumentům druhého řádu. Tento řetězec uzavírají reducenti, kteří rozkládají odumřelé části rostlin a živočichů zpět na minerální prvky, a tak je zajištěn oběh látek a energie v biosféře. Tento koloběh je velmi úzce provázaný a jednotlivé části mezi sebou citlivě interagují, například jak uvádí Pastorek a kol. (2004, s. 34): „Zvýšení parciálního tlaku oxidu uhličitého jako důsledek zvýšené aktivity mikroorganismů má za následek zvýšenou fotosyntézu.“

2.2. Rozdělení biomasy

Následující podkapitola je věnována rozdělení biomasy z hlediska jejího získávání a z hlediska obsahu vody. Tato dvě kritéria jsou významná z pohledu použitelnosti zdrojů biomasy a jejího energetického zpracování.

Dle způsobu získávání biomasy rozdělujeme biomasu na:

A) Biomasu odpadní

- Rostlinné odpady: obilná, kukuřičná a řepková sláma, zbytky z pasterveckých a lučních areálů (seno), odpady sadů, vinic, či chmelnic
- Lesní odpady: zbytky dřevní hmoty po těžbě (větve, pařezy, vršky stromů, šišky, kůra), křoviny, dřevní hmota z lesních probírek
- Organické odpady z průmyslových výrob: odpady z provozů na zpracování rostlinné produkce, mlékáren, lihovarů, cukrovarů, odpady dřezozpracujících závodů (piliny, hobliny, krajinky a jiné odřezky)
- Odpady z živočišné výroby: hnůj, kejda, drůbeží trus, zbytky krmiv, odpady z přidružených zpracovatelských závodů (jatká)
- Komunální organické odpady: čistírenské kaly, BRKO, zbytky z údržby křovin a stromů měst a obcí

B) Biomasa záměrně produkována k energetickým účelům (tzv. energetické plodiny)

Podle základních strukturních materiálů rostlin se rozdělují energetické plodiny do tří kategorií:

- Lignocelulózové¹: dřeviny (vrby, olše, topoly, akáty), obiloviny (celé rostliny), traviny (sloní tráva, trvalé travní porosty), ostatní rostliny (šřovík krmný, křídlatka, konopí seté)
 - Olejnaté: řepka olejná, slunečnice, len
 - Škrobno-cukernaté: brambory, cukrová řepa, kukuřice, cukrová třtina a další
- (Beranovský, 2004, s. 50)

Dle obsahu vody rozdělujeme biomasu na:

- A) Suchou – obsah sušiny v biomase je větší než 50 % a lze ji spalovat přímo, případně po mírném vysušení. Jedná se zejména o dřevo a dřevní odpad, slámu, seno a další.
- B) Mokrou – obsah sušiny v biomase je menší než 50 % a nelze ji spalovat přímo, pro termické využití je nutné její vysušení. Využívá se převážně při anaerobní fermentaci pro získávání bioplynu. Jedná se o kejdu, trus, mrvu, čistírenský kal a další.
- C) Speciální – tento typ biomasy představují hlavně olejninny, škrobové a cukernaté plodiny. Jejich speciálním zpracováním získáme energetické látky, jako např. etanol nebo bionaftu.

(Co je to biomasa?, 2013)

¹ Pod pojmem lignocelulóza rozumíme: „Strukturní materiál rostlin, zvláště ve stoncích nebo kmenech. Skládá se převážně z celulózy, hemicelulózy a ligninu.“ (Lignocelulóza, 2013)

2.3. Způsoby využití biomasy k energetickým účelům

Způsob využití biomasy k energetickým účelům výrazně předurčují fyzikální a chemické vlastnosti biomasy. Důležitým hodnotícím kritériem pro volbu správného procesu zpracování je obsah vlhkosti, resp. obsah sušiny v biomase. Při zpracování suché biomasy se hovoří o tzv. termochemické konverzi (suchých procesech), je-li zpracovávána mokrá biomasa, jedná se o tzv. biochemickou konverzi (mokrých procesech). Jak uvádí Beranovský (2004), rozlišuje se několik základních principů způsobu získávání energie z biomasy a její přípravy pro energetické využití:

A) Termochemická konverze

- Spalování – energetickým výstupem je teplo vázané na nosič (voda/pára, olej), odpadním materiálem jsou popeloviny.
- Zplynování – výstupem je generátorový plyn, případně dehtový olej nebo uhlíkaté palivo.
- Pyrolýza – výstupem je opět generátorový plyn, případně dehtový olej nebo pevné hořlavé zbytky.

B) Biochemická konverze

- Anaerobní fermentace – primárně se získává bioplyn, odpadním materiálem je fermentovaný substrát.
- Aerobní fermentace – energetickým výstupem je teplo vázané na nosič a odpadní materiál opět tvoří fermentovaný substrát.

C) Fyzikálně-chemická konverze

- Esterifikace bioolejů – žádaným výstupem je metylester biooleje, druhotnou surovinu tvoří glycerin.
- Mechanická – štípání, drcení, mletí, lisování, briketování a peletování náleží mezi základní mechanické přeměny, při kterých nedochází k získávání další užitné energie. Jedná se o přípravné operace před samotným energetickým využitím.

2.4. Energie z fytomasy

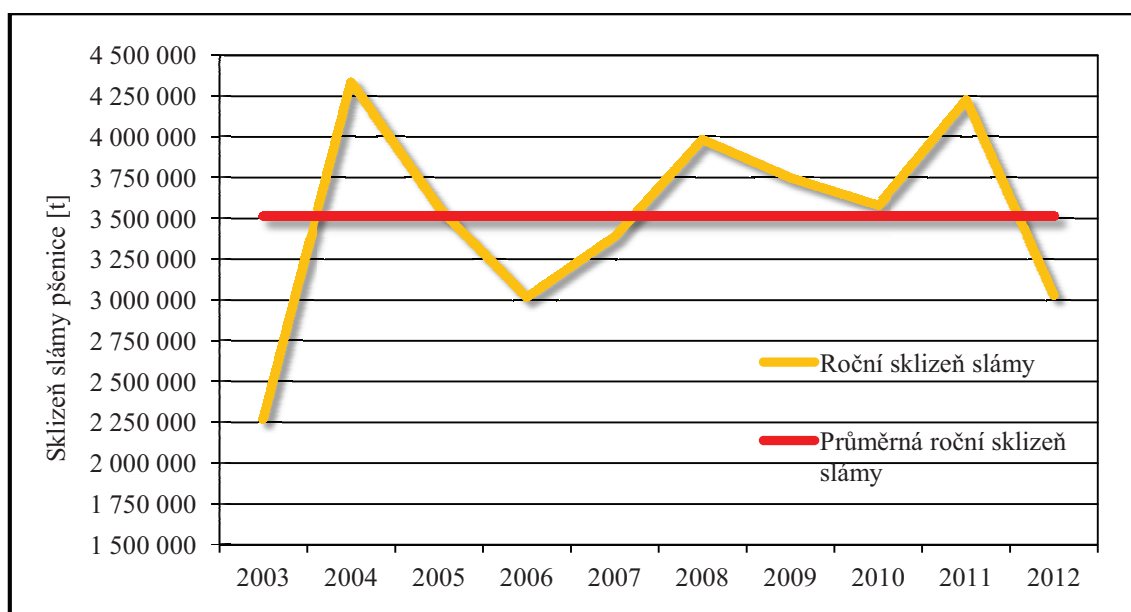
Následující podkapitola se zabývá zdroji fytomasy v rámci České republiky pro zjištění energetického potenciálu. Zaměřuje se na šest základních zemědělských plodin (pšenice, žito, oves, ječmen, kukuřice a řepka olejná), které tvoří nejvýznamnější podíl v agrární produkci. Pro jednotlivé plodiny jsou hodnoty sklizně a výnosu zrna (za posledních 10 let) zjištěny dle údajů ČSÚ (Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin, 2012). Takto získané hodnoty sklizně a výnosu zrna jsou přepočítány na hodnoty sklizně a výnosu slámy dle daného koeficientu. Pro zajištění větší objektivity výpočtu jsou koeficienty pro přepočet mezi výtěžností zrna a slámy pro jednotlivé plodiny vypočítány jako průměrné hodnoty z více zdrojů (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2). Na zřetel je také bráno, že sláma využitelná pro energetické účely konkuruje dalším způsobům využití slámy. Sláma slouží také k podestýlce hospodářských zvířat, dále jako krmivo, případně jako hnojivo při zaorání. Odečtením tohoto množství slámy je vypočítán přibližný energetický potenciál jednotlivých plodin, který lze využít pro termické zpracování.

2.4.1. Pšenice

Pšenice patří mezi tradiční zemědělské plodiny a je nejvíce pěstovanou obilovinou v České republice. Získané zrno se hojně využívá jako základní surovina v potravinářském průmyslu nebo jako krmivo v živočišné výrobě. Množství sklizeného zrna a výnosy pšenice pro jednotlivé roky dekády uvádí tabulka 2.1.. Koeficient mezi výtěžností zrna a slámy pšenice je 0,86 (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2), pomocí něhož je určena roční sklizeň slámy (viz graf 2.1., žlutá křivka) a její výnos. Každoročně se vyprodukuje průměrně 3,513 milionů tun slámy (viz graf 2.1., červená křivka). Dle údajů ČSÚ (Hrubá zemědělská produkce v ČR za rok 2008, 2009) je roční přibližná spotřeba stelivové slámy 2 miliony tun. Pro energetické využití zbývá tedy přibližně 1,5 milionů tun pšeničné slámy. Výhřevnost slámy při 15% vlhkosti je dle Beranovského (2004, s. 51) 14 MJ/kg., takže můžeme odhadovat, že roční energetický potenciál pšeničné slámy v rámci ČR je asi 21 PJ.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	2 637 891	4,07	2 268 586	3,50
2004	5 042 523	5,84	4 336 570	5,02
2005	4 145 039	5,05	3 564 734	4,34
2006	3 506 252	4,49	3 015 377	3,86
2007	3 938 924	4,86	3 387 475	4,18
2008	4 631 502	5,77	3 983 092	4,96
2009	4 358 073	5,24	3 747 943	4,51
2010	4 161 553	4,99	3 578 936	4,29
2011	4 913 048	5,69	4 225 221	4,89
2012	3 518 896	4,32	3 026 251	3,72

Tabulka 2.1. Sklizeň a výnosy zrna a slámy pšenice v letech 2003 až 2012



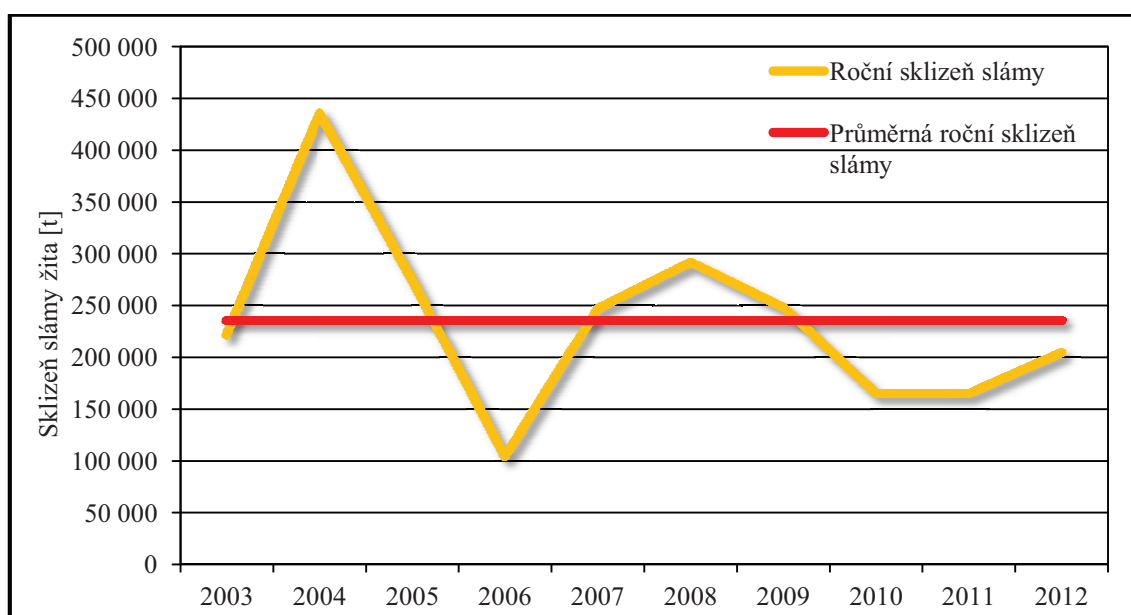
Graf 2.1. Sklizeň slámy pšenice v letech 2003 až 2012

2.4.2. Žito

Mezi další tradiční tuzemské obiloviny patří žito. V minulosti žito patřilo mezi nejvíce pěstované obilniny, dnes je jeho pěstování na ústupu a je nahrazeno výkonnějšími druhy, zejména pšenicí ozimou. Tato obilovina se výhradně využívá k potravinářským účelům, eventuálně je nekvalitní zrno zkrmováno. V tabulce 2.2. jsou uvedeny roční sklizně a výnosy zrna za posledních deset let. V druhé části této tabulky je uvedeno množství sklizené slámy a její výnosy. Tyto hodnoty byly vypočítány pomocí hmotnostního koeficientu, jak bylo uvedeno v úvodní části této kapitoly, a pro žito činí 1,39 (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2). V grafu 2.2. je uveden trend sklizené slámy v jednotlivých letech (žlutá křivka) ve srovnání s průměrnou hodnotou (v grafu 2.2. červená křivka). Průměrně se ročně vyprodukuje asi 235 tisíc tun žitné slámy a průměrný výnos se odhaduje na 6,15 t/ha. Výhřevnost slámy při 15% vlhkosti je cca 14 MJ/kg, takže energetický potenciál žitné slámy je asi jen 3 PJ.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	159 312	3,80	221 444	5,28
2004	313 348	5,29	435 554	7,35
2005	196 755	4,19	273 489	5,82
2006	74 811	3,33	103 987	4,63
2007	177 507	4,73	246 735	6,57
2008	209 787	4,83	291 604	6,71
2009	178 070	4,63	247 517	6,44
2010	118 233	3,91	164 344	5,43
2011	118 456	4,74	164 654	6,59
2012	146 962	4,81	204 277	6,69

Tabulka 2.2. Sklizeň a výnosy zrna a slámy žita v letech 2003 až 2012



Graf 2.2. Sklizeň slámy žita v letech 2003 až 2012

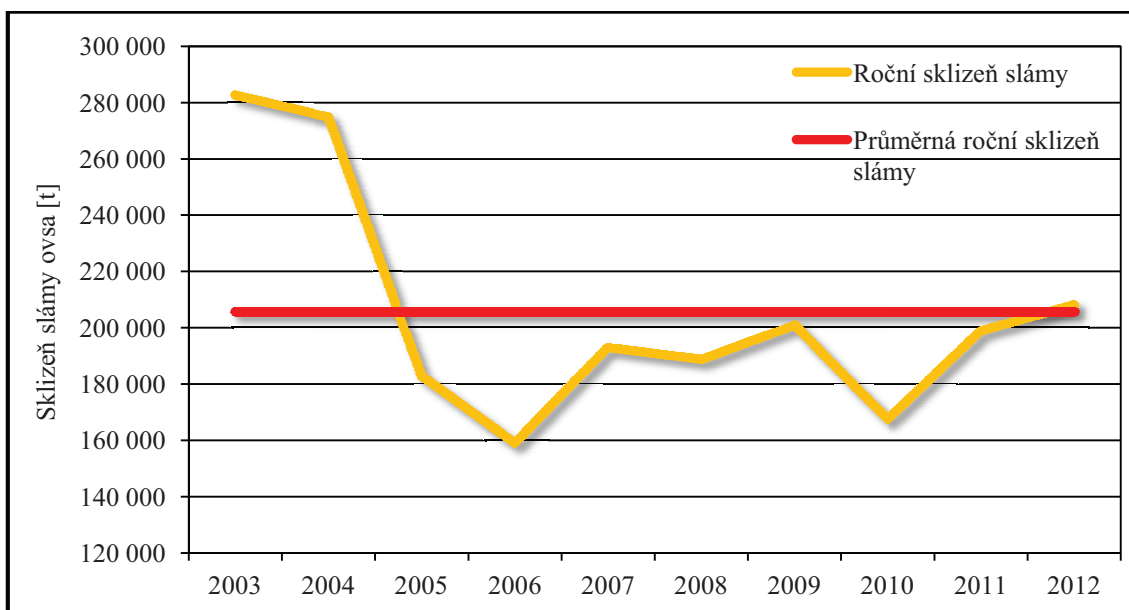
Výhodnou odrůdou žita pro energetické účely může být žito trsnaté (žito lesní). Dle Fajmana a kol. (2011) je tato odrůda charakteristická vysokým výnosem slámy, jejíž délka může dosahovat až 200 cm. Výnosy zrna se pohybují jen okolo 1,5 t/ha, naopak výnosy slámy dosahují hodnot 10 až 12 t/ha. Žito trsnaté se dále vyznačuje svojí odolností vůči klimatickým podmínkám, má nízké nároky na kvalitu půdy, výživu a ochranu proti škůdcům. Zároveň kvalita zrna je srovnatelná s běžnými odrůdami žita. Vzhledem k těmto okolnostem může být žito trsnaté pěstováno i v horských oblastech, které jsou nepříznivé pro ostatní obiloviny, a přitom se využije půda, která by jinak byla nevyužitá. Vzhledem k těmto skutečnostem může být žito trsnaté považováno za plodinu, která by mohla sloužit také pro termické zpracování.

2.4.3. Oves

Oves je historicky nejmladší obilninou, jejíž převážná produkce slouží jako krmivo. Jedná se zejména o zelené krmivo, siláž, zrní a slámu, která se považuje za nejkvalitnější. Část produkce slouží k potravinářské výrobě a jiné využití ovesa je na minimální úrovni. Pěstování ovesa není náročné na půdní podmínky, důležitá je ovšem zvlaha (Skládanka, 2006). Tabulka 2.3 uvádí, kolik se sklídilo zrna a jaký byl výnos ovesa v posledních deseti letech. Koeficient mezi výtěžností zrna a slámy pro tuto obilninu je 1,21 (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2). Pomocí tohoto koeficientu je vypočítaná sklizeň a výnos slámy v jednotlivých letech, jak je uvedeno v tabulce 2.3. Průměrně se vyprodukuje asi 200 tisíc tun slámy ovesa ročně (průměrný výnos slámy je 3,79 t/ha). Dle údajů ČSÚ (Hrubá zemědělská produkce v ČR za rok 2008, 2009) je roční přibližná spotřeba krmné slámy 1,1 milionů tun. Vzhledem k tomu, že se jedná o nejkvalitnější krmnou slámu, tak poptávka několikanásobně převyšuje nabídku. Jak vyplývá z grafu 2.3., tak vývoj produkce slámy ovesa za posledních deset let nenasvědčuje, že by mělo docházet k významnému růstu. Vzhledem k těmto skutečnostem není možné uvažovat o dalším energetickém využití.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	233 560	3,02	282 608	3,65
2004	227 017	3,88	274 691	4,69
2005	151 054	2,92	182 775	3,53
2006	131 353	2,68	158 937	3,24
2007	159 408	2,70	192 884	3,27
2008	155 868	3,18	188 600	3,85
2009	165 993	3,32	200 852	4,02
2010	138 244	2,64	167 275	3,19
2011	164 248	3,63	198 740	4,39
2012	171 976	3,39	208 091	4,10

Tabulka 2.3. Sklizeň a výnosy zrna a slámy ovesa v letech 2003 až 2012



Graf 2.3. Sklizeň slámy ovsa v letech 2003 až 2012

2.4.4. Ječmen

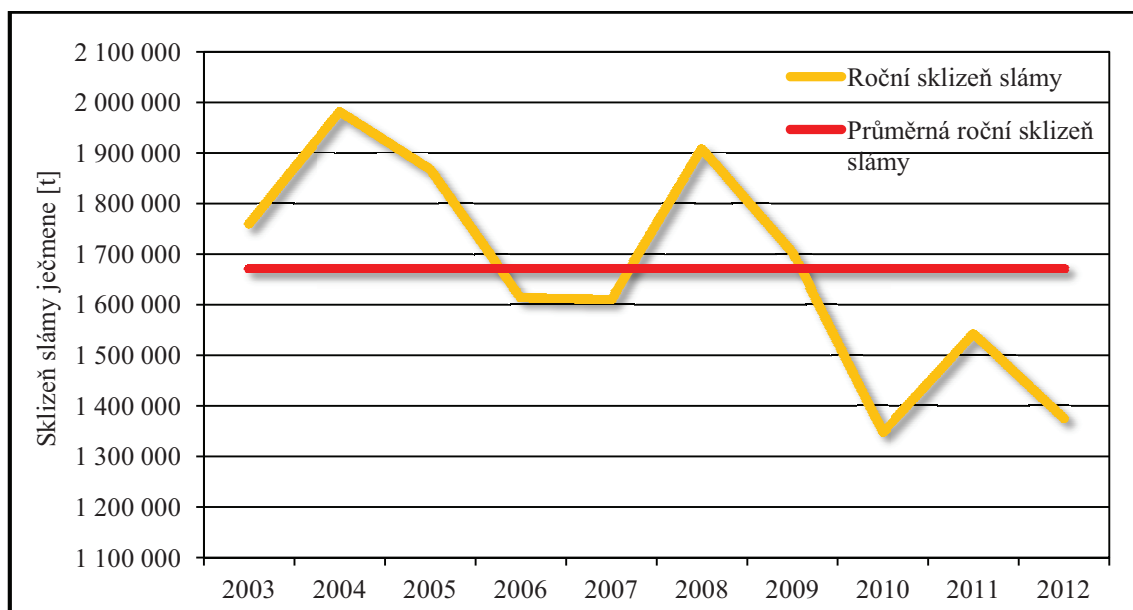
Další obilovinou je ječmen. Ječmen je nejstarší pěstovanou a druhou nejrozšířenější tuzemskou obilninou. Pěstuje se převážně ke krmným účelům v živočišné výrobě, přičemž se využívá jak zrno, tak i sláma, což snižuje potenciál jeho využití pro energetické účely.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	2 068 693	3,76	1 758 389	3,20
2004	2 330 582	4,97	1 980 995	4,22
2005	2 195 376	4,21	1 866 070	3,58
2006	1 897 703	3,59	1 613 048	3,05
2007	1 893 408	3,80	1 609 397	3,23
2008	2 243 865	4,65	1 907 285	3,95
2009	2 003 032	4,40	1 702 577	3,74
2010	1 584 456	4,50	1 346 788	3,83
2011	1 813 679	4,64	1 541 627	3,94
2012	1 616 467	4,23	1 373 997	3,60

Tabulka 2.4. Sklizeň a výnosy zrna a slámy ječmene v letech 2003 až 2012

V tabulce 2.4. je uvedeno množství sklizeného zrna a výnosy za posledních deset let. Koeficient mezi výtěžnostmi zrna a slámy ječmene je 0,85. Ve druhé části tabulky 2.4. je vypočítáno množství vyprodukované slámy a její výnos, který je průměrně 3,63 t/ha, což je nejméně ze všech zde zkoumaných plodin. I přesto se každoročně průměrně vyprodukuje přibližně 1,67 milionů tun slámy (graf 2.4., červená křivka). Trend sklizeň slámy ječmene je uveden v grafu 2.4. (žlutá křivka). Z grafu vyplývá, že dochází k poklesu produkce, což je důsledek snížení produkce živočišné výroby v ČR. Jak bylo popsáno výše, průměrná roční spotřeba slámy je 1,1 milionů tun. Odečteme-li množství ovesné slámy (200 tisíc tun), tak pro

krmné účely je zapotřebí ještě 900 tisíc tun slámy ječmene. Pro energetické využití je tak k dispozici zhruba 770 tisíc tun slámy. Při 15% vlhkosti a výhřevnosti 14 MJ/kg toto množství slámy odpovídá přibližně 11 PJ energie.



Graf 2.4. Sklizeň slámy ječmene v letech 2003 až 2012

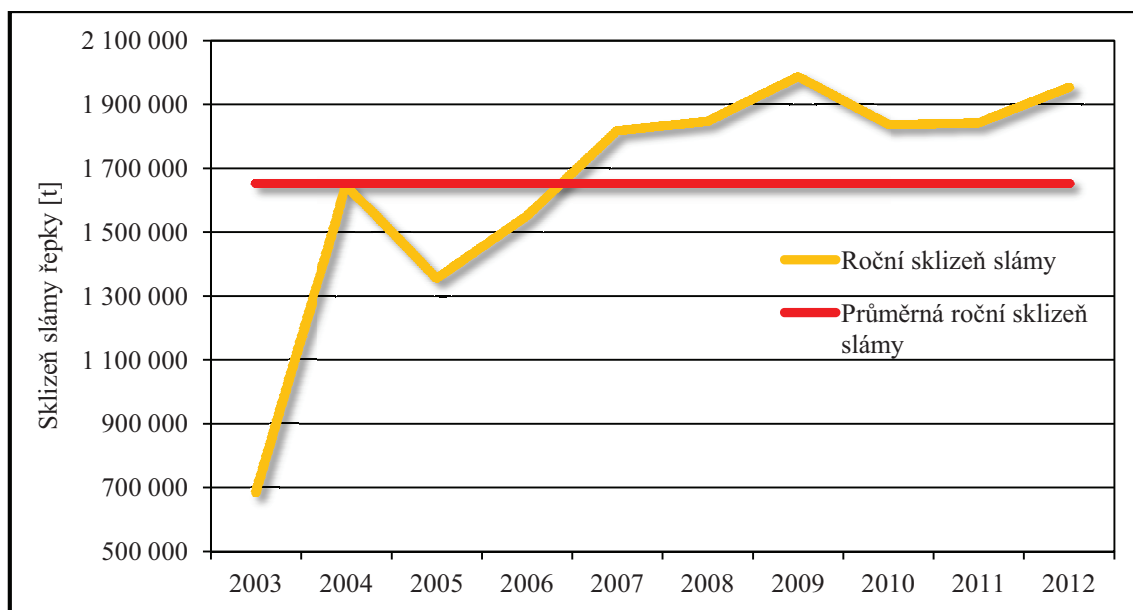
2.4.5. Řepka olejná

Řepka olejná patří mezi přední tuzemské olejninu. Jejím hlavním produktem je řepkový olej, který se využívá primárně v potravinářství. V posledních letech ovšem roste poptávka po tomto oleji v důsledku výroby bionafty, neboť bionafta se v ČR vyrábí esterifikací řepkového oleje. Výroba bionafty je do značné míry ovlivněna rozhodnutím Evropské unie, která výrobcům pohonných hmot ukládá za povinnost přimíchávat 5 % bionafty do nafty vyrobené z ropy (Bionafta, 2012). Tabulka 2.5. udává množství sklizeného zrna a výnosy řepky za posledních deset let. Koeficient mezi výtěžnostmi zrna a slámy pro řepku olejnou je 1,76 (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2). V druhé části tabulky 2.5. je vypočítaná teoretická sklizeň slámy a její výnos v jednotlivých letech.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	387 805	1,55	682 537	2,73
2004	934 674	3,60	1 645 026	6,34
2005	769 377	2,88	1 354 104	5,07
2006	880 172	3,01	1 549 103	5,30
2007	1 031 920	3,06	1 816 179	5,39
2008	1 048 943	2,94	1 846 140	5,17
2009	1 128 119	3,18	1 985 489	5,60
2010	1 042 411	2,83	1 834 643	4,98
2011	1 046 071	2,80	1 841 085	4,93
2012	1 109 137	2,76	1 952 081	4,86

Tabulka 2.5. Sklizeň a výnosy zrna a slámy řepky olejné v letech 2003 až 2012

Sláma řepky olejné se nehodí ke zkrmování ani se nedá využít k podestýlce, proto je běžně při sklizni rozřezána a následně zaorána. Tato skutečnost předurčuje, že sláma řepky by se mohla v budoucnu stát významným zdrojem fytohmoty pro termické využití. Z grafu 2.5. (žlutá křivka) vyplývá, že dochází k eskalaci produkce slámy, převážně z výše zmíněného důvodu rozhodnutí EU. Za posledních deset let se produkce slámy řepky zvýšila bezmála třikrát (viz tab. 2.5.) a průměrně se každý rok vyprodukuje přibližně 1,65 milionů tun slámy (graf 2.5. červená křivka). Výhřevnost řepkové slámy je při obvyklé 18% vlhkosti 13,5 MJ/kg. Roční energetický potenciál řepky olejné, využitelný pro termické zpracování dosahuje hodnoty 22PJ, což je nejvíce ze zkoumaných plodin.



Graf 2.5. Sklízeň slámy řepky olejné v letech 2003 až 2012

Kromě zmíněné slámy se nabízí také termické zpracování řepkových pokrutin, které představují zbytky semen po lisování oleje. Tyto pokrutiny obsahují zbytkový olej, což zvyšuje jejich energetickou hodnotu. Vzhledem k vysoké výhřevnosti, obsahu spalitelných látek a zároveň nízkému obsahu znečišťujících látek představují pokrutiny výhodné palivo z kategorie odpadní biomasy. Vzhledem k vysokému množství různých organických látek obsažených v pokrutinách rostou emise oxidů dusíku ve spalinách (Štulíř, 2008, s. 9), proto je nutné přizpůsobit technologie spalovacích procesů (eventuálně čištění spalin) tak, aby nedošlo překročení emisních limitů. Jak uvádí Valeš a kol. (2011), někdy je výhodné nejdříve extrahovat zbytkový olej procesem pyrolýzy² a následně pyrolyzát (pevný uhlíkatý zbytek) termicky zpracovat.

2.4.6. Kukuřice

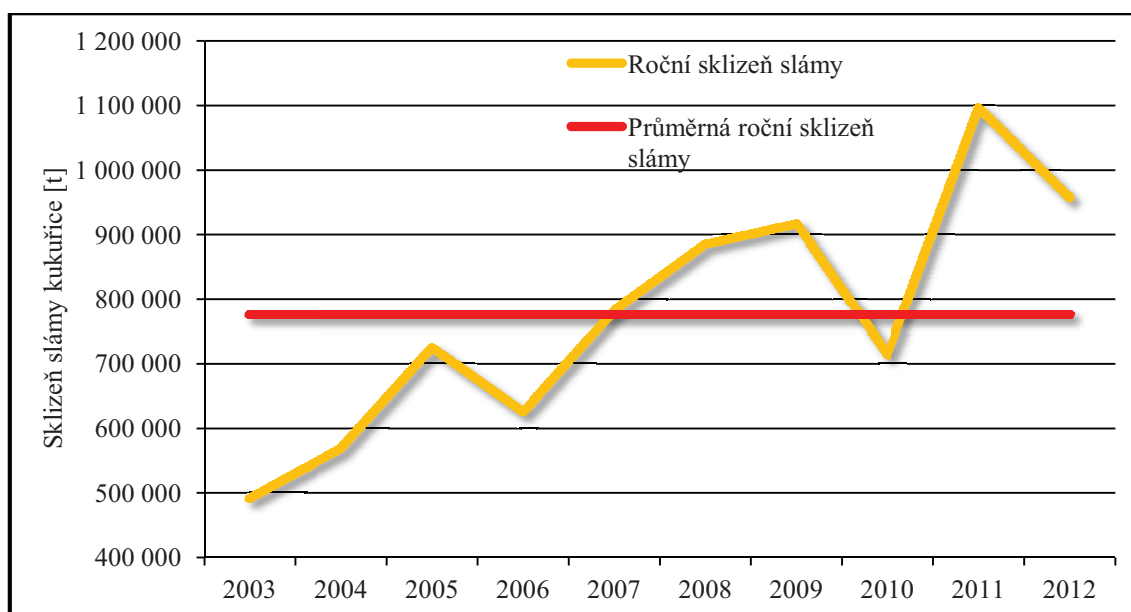
Kukuřice patří mezi nejvýznamnější tuzemské plodiny, jež se využívá jednak v živočišné výrobě jako krmivo a jednak v potravinářském průmyslu. Zpravidla se u nás pěstují dva užitné druhy kukuřice: kukuřice na siláž a kukuřice na zrno. Kukuřice, která slouží k výrobě siláže, se sklízí ve formě řezanky a je tak zpracována celá rostlina včetně stonku, proto se tato

² Pyrolýza je beztlaký termický proces, který probíhá za nepřístupu vzduchu při teplotách cca 700 °C.

práce zaměřuje pouze na kukuřici na zrno. Z praktického hlediska je využití kukuřičné slámy k termickému zpracování pouze potenciální možností. Sláma se nehodí ani ke zkrmování ani není využitelná k podestýlce, proto je bezprostředně po sklizni rozdrvena a následně zaorána. Tabulka 2.6. udává množství sklizeného zrna a výnosy v letech 2003 až 2012. Koeficient mezi výtěžností zrna a slámy kukuřice činí 1,03 (Beranovský, 2004, s. 66; Fajman a kol., 2011; Abrham, Andert, 2011, s. 2). V druhé části tabulky 2.6. je vypočítána teoretická sklizeň a výnos slámy za posledních deset let. Z grafu 2.6. (žlutá křivka) vyplývá, že produkce slámy v posledních letech rostla. Nárůst v roce 2012 oproti roku 2003 byl téměř dvojnásobný. Zároveň dle získaných dat dosahuje kukuřice nejvyšší průměrné hodnoty výnosu slámy (7,39 t/ha). Průměrně se v ČR každoročně vyprodukuje 775 tisíc tun kukuřičné slámy (graf 2.6., červená křivka). Při 10% vlhkosti a výhřevnosti 14,4 MJ/kg můžeme počítat s energetickým potenciálem zhruba 11PJ.

Rok	Sklizeň zrna [t]	Výnos zrna [t/ha]	Sklizeň slámy [t]	Výnos slámy [t/ha]
2003	476 371	5,58	490 662	5,75
2004	551 628	6,13	568 177	6,31
2005	702 933	7,17	724 021	7,39
2006	606 366	6,75	624 557	6,95
2007	758 781	6,80	781 544	7,00
2008	858 407	7,54	884 159	7,77
2009	889 574	8,45	916 261	8,70
2010	692 589	6,71	713 367	6,91
2011	1 063 736	8,79	1 095 648	9,05
2012	928 147	7,78	955 991	8,01

Tabulka 2.6. Sklizeň a výnosy zrna a slámy kukuřice v letech 2003 až 2012



Graf 2.6. Sklizeň slámy kukuřice v letech 2003 až 2012

2.4.7. Dílčí závěr a zhodnocení výsledků

Celkový energetický potenciál výše zmíněných plodin, který je k dispozici pro termické zpracování, je přibližně 68 PJ. Tato práce zkoumá zdroje fytohmoty v rámci České republiky jako celku pro získání základního přehledu energetické využitelnosti jednotlivých plodin. Ovšem pro konkrétní návrh zařízení na zpracování této stébelnaté biomasy je důležité zkoumat situaci v konkrétním regionu. Klimatická rozmanitost (roční srážkový úhrn, intenzita slunečního svitu), úrodnost půdy a nadmořská výška jsou základními činiteli, které předurčují skladbu pěstovaných rostlin v regionu, což se odráží na potenciálu fytohmotových zdrojů.

Zajímavé zhodnocení dostaneme, pokud tento výsledek srovnáme s množstvím spotřebované biomasy pro termické zpracování v rámci České republiky. Dle Fajmana a kol. (2011, s.3) se v roce 2010 energeticky zpracovalo 34,3 PJ energie biomasy (včetně dendromasy) mimo domácností. Vycházíme-li z předpokladu, že se dnes z větší části spaluje dendromasa, tak se fytohmota jeví jako možný alternativní zdroj energie.

Jak hodnotí situaci v českém zemědělství Abrham a Andert (2011, s. 1), tak mezi lety 1990 a 2010 poklesl stav skotu v ČR o 62 %. Stále zdokonalující se technologie chovu hospodářských zvířat umožňují ve větší míře využívat roštové nebo bezstelivové stáje, z čehož plyne klesající poptávka po stelivové slámě. Tyto skutečnosti znamenají zvýšení energetického potenciálu pro využití fytohmoty.

K vyhodnocení celé ekonomiky těchto paliv je důležité stanovit cenu slámy. Vychází se z předpokladu, že cena slámy je určena dvěma hlavními faktory: náklady na produkci slámy a náklady na sběr a odvoz slámy z pozemku (Abrham, Andert, 2011, s.1), avšak stanovení ceny slámy není předmětem této práce.

2.5. Energie z dendromasy

Dendromasa představuje kategorii biomasy zahrnující dřevo, štěpku, či dřevní odpad. Zdroje dendromasy jsou v České republice významné vzhledem k nadmořské výšce, klimatickým a půdním podmínkám. Zároveň jsou tyto zdroje velmi snadno dostupné v porovnání například s ropou, uhlím a zemním plynem. Z hlediska složení paliva má dendromasa snížený obsah síry v porovnání s uhlím. Dále množství popela po spálení je také nižší, navíc tento popel neobsahuje těžké kovy. Ačkoliv se čerstvá dendromasa vyznačuje vysokým obsahem hořlaviny, zároveň má vysokou vlhkost (až 60 %), což přímo snižuje výhřevnost tohoto paliva. (Biomasa, 2009)

Tato podkapitola se věnuje typickým zdrojům dendromasy: dřevní štěpce, rychle rostoucím dřevinám a dřevozpracujícím závodům. Dále se zaměřuje na produkci štěpky v ČR a podmínky pěstování rychle rostoucích dřevin, přičemž je kladen důraz na získání základního přehledu o těchto palivech.

2.5.1. Dřevní štěpka

V České republice je celkem 2,59 milionů hektarů lesa (zhruba 30 % rozlohy ČR), z čehož je 1,966 hektarů lesů hospodářských (bez omezení využití produkční funkce). Celková zásoba dřeva je 663 milionů m³ bez kůry, z čehož jehličnatá zásoba tvoří 551 milionů m³, listnatá pak

112 milionů m³. V porovnání s evropskými státy, kde jednoznačně dominuje Německo a Švédsko, je Česká republika, z hlediska globálního ukazatele objemu zásob, v průměru. Každoročně se vytěží přibližně 14 milionů m³ dřeva, což může být směrodatným měřítkem pro hodnocení možného energetického využití. (Fajman a kol., 2011)

Dřevní štěpka je hmota, která je nakrácena (nadcená) na kusy o délce 3 až 250 mm. Štěpka je získávána z odpadů lesní těžby, průmyslového zpracování dřeva, popřípadě rychle rostoucích dřevin. Jedná se o biopalivo určené pro vytápění jak rodinných domů, tak větších budov nebo podniků, ale stejně tak dobře může kotelna na dřevní štěpku dodávat teplo do CZT (centrální zásobování teplem). Výhřevnost štěpky úzce souvisí s obsahem vlhkosti a dosahuje hodnot od 8 do 15 MJ/kg, měrná hmotnost činí cca 250 kg/m³ a vlhkost se pohybuje v rozmezí 15 až 50 %. (Stupavský, Holý, 2010)

Dle kvality štěpky a dalších příměsí ji můžeme dělit na tři základní druhy:

- Zelená štěpka – získává se ze zbytků po lesní těžbě. Lze v ní nalézt části drobných větví, listů, případně jehličí, proto se nazývá zelená štěpka. Důsledkem toho, že se zpracovává čerstvá hmota, je vlhkost této štěpky vysoká.
- Hnědá štěpka - získává se ze zbytkových částí kmenů, pilařských odřezků apod. Určujícím prvkem je obsah kůry, neboť dříví nebylo před zpracováním odkorněno. Z toho plyne, že lze na jednotlivých štěpkách rozpoznat části kůry.
- Bílá štěpka – je získávána z odkorněného dříví, většinou z odřezků při pilařské výrobě. Na jednotlivých štěpkách se již nenachází kůra. Využívá se především pro výrobu dřevotřískových desek.

Pro skladování dřevní štěpky je zapotřebí vzhledem k její nízké objemové hmotnosti prostornější sklady, velkoobjemová síla, nebo haly. Ve skladu musí být především zajištěno nezbytné provětrávání, neboť palivová štěpka má vyšší obsah vody (ve srovnání např. s uhlím), je náchylná k plesnivění a zapařování, což by mohlo v uzavřených prostorách vést ke znehodnocení paliva (samovznícením). Dostatečné provětrávání skladu zajistí i dosušení štěpky během skladování. Uskladnění přímo ve vytápěných obytných budovách bez účinného provětrávání skladu se nedoporučuje, v některých zemích je přímo zakázáno. Pro skladování většího objemu dřevní štěpky je zapotřebí dimenzovat vstup do skladu pro dopravní a manipulační techniku. (Stupavský, Holý, 2010)

S rozvojem využívání dendromasy pro energetické účely je spojen i rozvoj technologií pro její mechanické zpracování. Štěpkovače, drtiče, popř. svazkovače musí splňovat mnoho požadavků producentů i zpracovatelů biomasy, potažmo producentů energie. Mezi tyto požadavky patří využitelnost v daném terénu a technologické požadavky na výstupní materiál. Štěpkovači je hmota štěpkována soustavou nožů, technologie je menší a mobilnější, na druhou stranu je výkon menší než například u drtičů. (Fajman a kol., 2011)

2.5.2. Rychle rostoucí dřeviny (RRD)

Pěstování rychle rostoucích dřevin se zdá být vhodným způsobem využití přebytečné zemědělské půdy. Pro zakládání plantáží jsou vybírány dřeviny s krátkou dobou obmýtlí (jedno produkční období plantáže) tak, aby pěstování a následná produkce byla efektivní. Pěstování rychle rostoucích dřevin je vhodné v oblastech s mírným podnebím a na půdách

s dostatečným množstvím vody a živin. V horských oblastech není zaručen dostatečný výnos a klimatické podmínky mohou poškodit dřeviny např. mrazem. Pro efektivní pěstování rychle rostoucích dřevin na plantáži je nutné splnit následující požadavky, jak uvádí Pastorek a kol. (2004, s. 29):

- Extrémně rychlý vzrůst dřevin v mládí
- Výborné obrůstající schopnosti pařezu po obmýtí
- Odolnost proti chorobám a škůdcům
- Mocnost ornice min. 30 cm, optimální je 70 cm
- Vysoká hladina spodní vody, která nesmí klesnout pod 2 m
- Pozemek umožňující mechanizační zpracování

Mezi dřeviny, které splňují výše uvedené požadavky, patří topol černý či balzámový, případně jejich hybridy, např. topol japonský. Právě topol japonský se u nás pěstuje nejčastěji za účelem získání palivového dříví, eventuálně štěpky. Průměrný roční přírůstek je závislý na klimatických a půdních činitelích a dosahuje 2,5 až 4 m/rok. Na obrázku 2.1. můžeme vidět vzrůst topolu japonského v 1. roce a na obrázku 2.2. vzrůst v 5. roce při sklizni. Délka obmýtí se pohybuje mezi 2 až 6 lety. Kratší doba obmýtí (cca 2 roky) je vhodná tehdy, pokud výsledným produktem má být štěpka, naopak chceme-li získat palivové dříví, tak délka obmýtí by měla dosahovat 5 až 6 let. Určitým benefitem může být i možnost pěstování topolu japonského v záplavových oblastech nebo v podmáčených loukách, neboť topol snese zaplavení po dobu 50-60 dní. V takovém případě se sklizeň dřevin provádí v zimních měsících, kdy je půda zamrzlá. (O japonském topolu, 2010)



Obrázek 2.1. Vzrůst topolu japonského v 1. roce (Galéria, 2012)



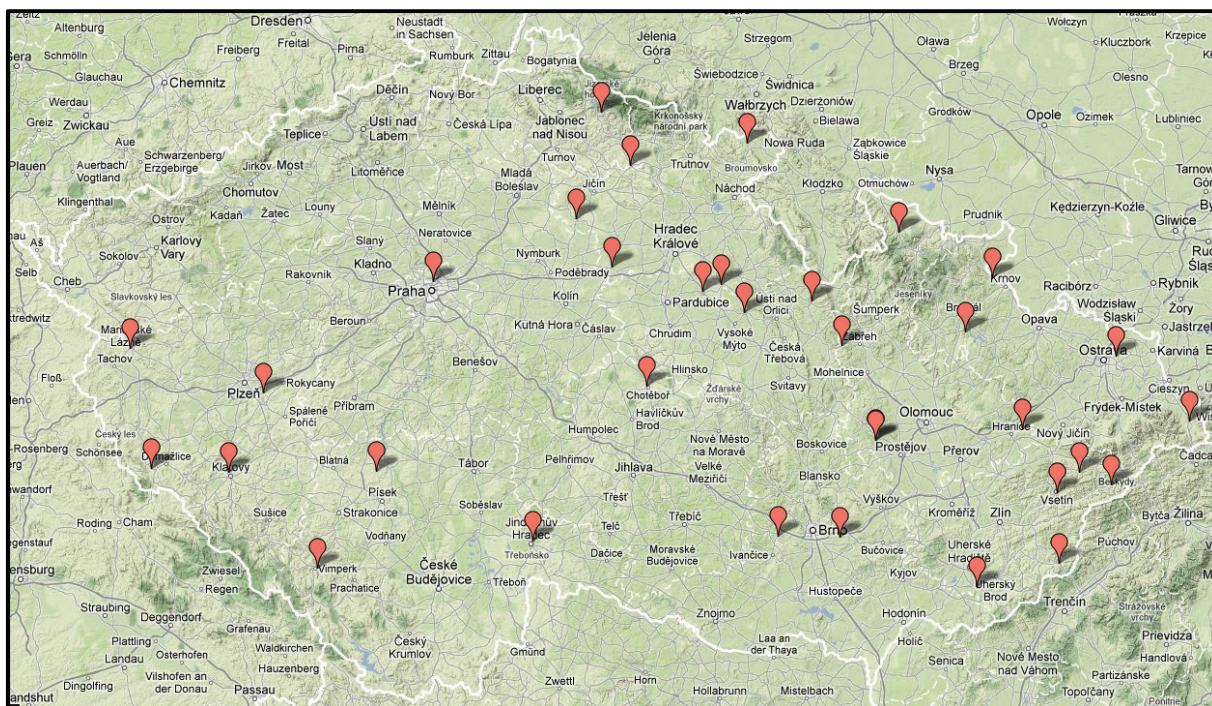
Obrázek 2.2. Vzrůst topolu japonského v 5. roce při sklizni (Galéria, 2012)

Do skupiny dřevin vyznačujících se extrémně rychlým růstem a zvýšenou přizpůsobivostí patří také akát, olše, vrba, osika nebo bříza. Skladování dřevní hmoty (štěpky či polen) RRD po sklizni není obtížné, jediné, co je třeba zajistit, je vhodné krytí vůči nadměrné vlhkosti tak, aby nedošlo k degradaci materiálu např. hnilobou a tím ke snížení výhřevnosti paliva. Výnosy z RRD ovlivňují především tyto faktory: druh dřeviny, stanoviště plantáže, délka obmýtí, klimatické a půdní podmínky. Reálné výnosy v podmínkách ČR se podle Pastorka (2004, s. 30) pohybují mezi 5 až 10 t · ha⁻¹ sušiny ročně.

2.5.3. Dřevozpracující závody

Dřevozpracující závody představují významný zdroj dřevní odpadní biomasy. Při zpracování a výrobě produktů ze dřeva vzniká dřevní odpad v podobě krajinek, odřezků, hoblin nebo pilin. Tyto druhotné suroviny mohou být nadále termicky zpracovány pro získání tepelné, případně elektrické energie. Je-li jednotka pro energetické využití dřevního odpadu umístěna přímo v areálu dřevozpracujícího závodu, odpadají tak náklady spojené s logistikou paliva, což zlepšuje ekonomiku celého projektu. Dalším benefitem je možnost přímého využití tepla, které může být uplatněno pro vytápění provozů, sušení dřeva, či jinak využito podle potřeb konkrétního závodu. Pokud budeme uvažovat o kombinované výrobě tepelné a elektrické energie, tak vyrobená elektrická energie může být opět využita pro potřeby závodu nebo může být prodána do distribuční sítě. Z tohoto pohledu je symbióza dřevovýroby a jednotky zpracovávající její odpad velmi výhodná.

Pro eventuální výstavbu jednotek pro energetické využití dřevního dopadu bylo vytipováno několik desítek dřevozpracujících závodů v České republice. Jedná se o výběr závodů, který byl vytvořen pro zmapování zdrojů dendromasy. Jedním z hlavních kritérií pro výběr byla velikost závodů, jež je rozhodující z hlediska množství vyprodukovaného odpadu, a proto byly vybírány především větší podniky. Na mapě ČR (obr.2.3.) jsou všechny tyto závody vyznačeny červeným bodem (pro získání přehledu o poloze těchto závodů). Tato mapa je také dostupná na adrese: <http://goo.gl/maps/92V5X>, kde jsou navíc umístěny doplňující informace, pro snazší identifikaci. V příloze číslo 1 této práce jsou také jednotlivé podniky uvedeny v tabulce, v níž se nachází název firmy včetně jejího zaměření, adresy a kontaktů pro snadnější identifikaci.



Obrázek 2.3. Mapa vybraných dřevozpracujících závodů v České republice

3. Jednotky pro energetické využití biomasy

Poté co byly v předcházející kapitole popsány zdroje fytohmoty a dendromasy a jejich energetický potenciál, tak následující kapitola se zaměřuje na jednotky pro termické zpracování. Na základě průzkumu trhu byly vybrány tři technologické jednotky, které tvoří významné zastoupení v této sféře průmyslu. Postupně bude popsána jednotka Vesko-B od české společnosti TTS group, dále jednotka K8 rakouské společnosti Kohlbach a poté jednotka české společnosti EVECO Brno. Při popisu jednotek bude brán zřetel zejména na popis jednotlivých částí spalovací komory a tepelného výměníku a jejich funkce. Dále budou uvedeny technické parametry charakteristické pro daná zařízení.

3.1. Rozdělení kotlů a spalovacích zdrojů

Předtím než budou detailněji popsány konkrétní jednotky, budou v této podkapitole rozděleny kotle do jednotlivých kategorií podle základních kritérií.

Podle pracovního (teplonosného) média se kotle dělí na:

- Teplovodní kotle – pracovním médiem je voda s pracovní teplotou do 115 °C
- Horkovodní kotle – pracovním médiem je voda s pracovní teplotou nad 115 °C
- Parní kotle – teplonosné médium představuje vodní pára
- Termoolejové kotle – pracovním médiem je jak kapačný olej, tak i olejová pára, která se využívá především u tzv. ORC procesů (Organický Rankinův Cyklus)

Podle velikosti pracovního tlaku se kotle dělí na:

- Nízkotlaké kotle – přetlak pracovního média je do 0,05 MPa
- Středotlaké kotle – přetlak pracovního média je od 0,05 MPa do 1,6 MPa
- Vysokotlaké kotle – přetlak pracovního média je od 1,6 MPa do 16 MPa
- Kotle s velmi vysokým a nadkritickým tlakem – přetlak pracovního média překračuje hodnotu 16 MPa. (ČSN 07 0000, 1980)

Na trhu se vyskytuje velké množství konstrukcí kotlů, proto zde bude popsáno několik nejužívanějších:

- Vodotrubné kotle – teplonosné médium je zavedeno do kovových trubek, přes jejichž stěny dochází k jeho ohřevu. Trubky jsou často součástí spalovací komory, kde jsou umístěny ve vyzdívce, a zároveň všechny trubky ústí do bubny nebo do rozváděcích trámů. Tato konstrukce je obecně složitější, avšak vykazuje výbornou odolnost vůči působení tlaku, proto se využívá především u výkonnějších a vysokotlakých kotlů.
- Žárotrubné kotle – horké spaliny jsou zavedeny přes rozváděcí trubkovičky do kovových trubek, přes jejichž stěny odevzdávají teplo teplonosnému médiu, které je zvnějšku obklopuje. Jedná se o nepravidelnou svařovanou konstrukci, která důsledkem toho hůře odolává vyšším tlakům, proto je vhodná především pro nízkotlaké a středotlaké kotle.

- Kombinované kotle – vznikly kombinací různých kotlů válcových, plamencových, skříňových a žárotrubných. Tak vznikly různé tvary kotlů, aby došlo k maximální optimalizaci výroby tepla. (Witos, 1996)

Spalovací zdroje se rozřadí podle tepelného výkonu do těchto kategorií:

- Malé spalovací zdroje – jmenovitý tepelný výkon je nižší než 0,2 MW
- Střední spalovací zdroje – jmenovitý tepelný výkon je mezi 0,2 až 5 MW
- Velké spalovací zdroje – jmenovitý tepelný výkon je od 5 do 50 MW
- Zvláště velké spalovací zdroje – jmenovitý tepelný výkon je vyšší než 50 MW

Zákon č. 201/2012 dále rozděluje spalovací zdroje jednak podle výkonu a jednak podle charakteru a účelu zdroje. Obecně se dá říci, že nachází-li se v jedné provozovně více kotlů ústících do jednoho komínu (výduchu), pak je velikost zdroje dána součtem jednotlivých výkonů těchto kotlů.

Spalování biomasy v zařízeních velkých výkonů s sebou nese vysoký stupeň automatizace, dále je nutný on-line monitoring určených emisí. Na druhou stranu velké výkony disponují vysokou účinností (až 90 %). Obecně lze také tvrdit, že ekonomická návratnost velkých zdrojů je nižší než návratnost středních zdrojů. Ovšem vysoký výkon zdroje vede k velké spotřebě paliva, což má za následek zvýšené nároky na logistiku a to se negativně projeví na doprovodných emisích. Biomasa je brána jako lokální zdroj energie a výstavba velkého spalovacího zařízení by mohla narušit křehký trh s biomasou a neúměrně navýšit cenu tohoto paliva.

Výstavba zařízení středních výkonů umožňuje reagovat na dynamický lokální trh s biomasou a zároveň minimalizovat provozní náklady spojené se zajištěním dodávek paliva. Pro zajištění maximální utilizace a bezproblémový provoz je žádoucí přizpůsobit technologickou jednotku jednak konkrétnímu spalovanému palivu a jednak požadavkům provozovatele tohoto zařízení. Přínos jednotek středních výkonů je zejména ekologický, neboť tyto jednotky vykazují nízké množství emisí a zátěž pro životní prostředí je minimální. Díky tomu může v jedné lokalitě koexistovat více jednotek spalujících různé palivo. Zároveň tyto moderní jednotky dosahují vysoké účinnosti (80-90 %), což má pozitivní vliv na ekonomiku celého projektu.

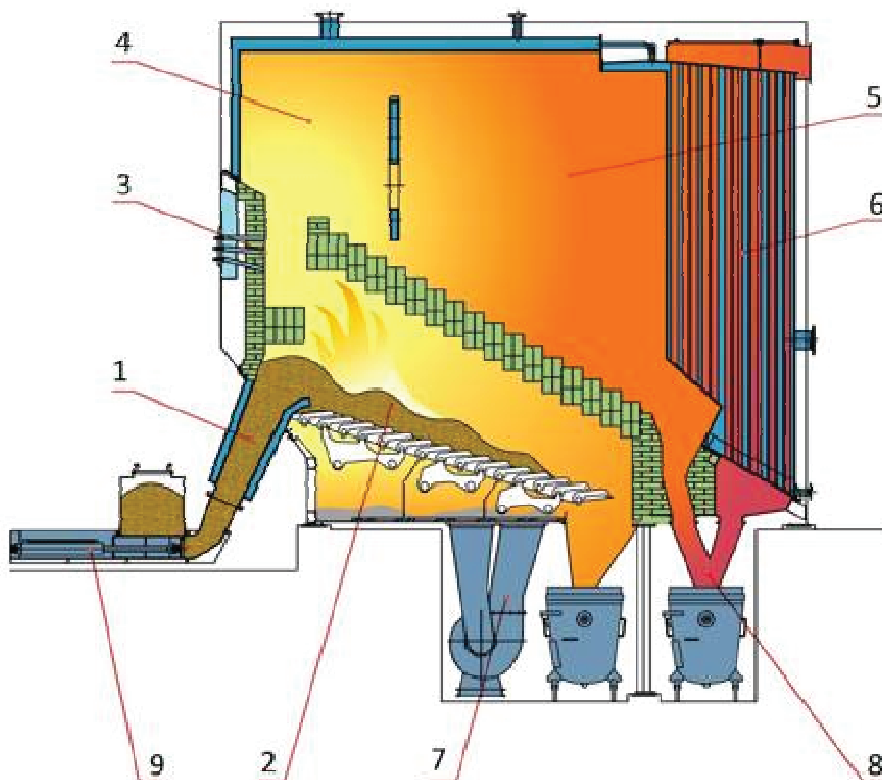
3.2. Technologická jednotka Vesko-B

V této podkapitole bude popsána technologická jednotka Vesko-B, kterou dodává česká společnost TTS group. První jednotky tohoto typu byly vyrobeny v roce 2001 a doposud bylo realizováno několik desítek instalací těchto jednotek v České a Slovenské republice. Vesko-B je uzpůsobeno výhradně ke spalování dřevní biomasy, zejména o vysoké vlhkosti (až 55 %) s nestálou frakcí (nahodilé kusy paliva o délce až 50 cm). Tato jednotka se dodává ve výkonovém rozsahu 1 až 8 MW (střední a velké spalovací zdroje) a je vhodná zejména pro městské vytápění CZT a průmyslové podniky. (O divizi, 2012)

3.2.1. Popis jednotky

Technologická jednotka Vesko-B je samonosná celosvařovaná skříňová konstrukce s vertikálním uspořádáním trubkového výměníku.

Palivo je nejprve nakladačem navezeno do denního zásobníku paliva. Následné dávkování je zajištěno pohyblivou podlahou, která činí přímočarý vratný pohyb vyvozený hydraulickými válci. Pomocí specifické konstrukce pohyblivé podlahy je palivo přesouváno tak, aby se postupně plnil tzv. příčný kanál. Dávkování paliva do kotle je realizováno zavážecím lisem (obr. 3.1./9), který tlačí palivo do vstupní hubice (obr. 3.2./1). Vstupní hubice má obdélníkový průřez s minimálními rozměry 1200 x 280 mm (velikost průřezu se odvíjí od výkonu kotle). Tento průřez se ve vstupní hubici po její délce rozšiřuje, aby nedošlo ke zpěchování paliva a tím k ucpaní celé vstupní hubice. Tento způsob dávkování paliva se jeví jako výhodný, neboť stejně tak dobře mohou být dopravovány piliny, štěpka nebo větší kusy dřeva. Zároveň jsou tyto dopravní cesty schopné přepravit i vyšší procento nespalitelných příměsí (např. šterk nebo ocelové kusy). Vedlejší funkcí vstupní hubice je i předeřtání a předsušení paliva topnou vodou.



Obrázek 3.1 Schéma technologické jednotky Vesko-B (Vesko-B, 2012)

Jakmile je palivo vytlačeno vstupní hubicí na rošt, tak dojde k jeho rychlému dosušení a k následnému vznícení. Pohyb paliva je zajištěn přesuvným šikmým roštem (obr. 3.1./2), jehož funkce spočívá v pohybu stupňovitých roštnic. Rošt je sestaven tak, že se pravidelně střídají pohyblivé a nepohyblivé stupně roštnic. Pohyblivé roštnice jsou spojeny tzv. „vozíky“ a vznikají tak vzájemně nezávislé části roštu. Vratný pohyb každého vozíku, potažmo roštnice, je zajištěn hydraulickým mechanismem. Celý rošt je chlazený primárním vzduchem.

Podávání paliva a jeho pohyb na roštu je řízen podle vlastností daného paliva. Po vyhoření paliva padá roštový popel a nespalitelná residua do kontejneru (objem 1m³), který je speciálním mechanismem spojen s kotlem tak, aby nedošlo ke ztrátě podtlaku ve spalovací komoře. Podobně druhý kontejner zajišťuje sběr popílku z propadu na konci klenby a z propadu pod trubkovým výměníkem (obr. 3.1./8). Kontejnery jsou umístěny v podkotlí, a po naplnění jsou vyzdviženy zvedacím zařízením a obsluha je přesune na místo určené k vychladnutí a následnému odvozu. Alternativním řešením je odpopelnění pomocí popelových dopravníků do společného velkoobjemového kontejneru.

V podkotlí se nachází také vzduchové ventilátory (obr. 3.1./7), které dodávají žádané množství vzduchu pod rošt a tím zajišťují primární spalování paliva. Specifický tvar šamotové klenby zajišťuje protiproudé uspořádání spalin, které napomáhá ke zkrácení doby vysušení paliva. Trysky sekundárního vzduchu (obr.3.1./3) se nachází v zadní stěně spalovací komory a umožňují dopalování oxidu uhelnatého. Automatika kotle zajistí, že spalování je optimalizováno na základě podtlaku ve spalovací komoře podle přebytku kyslíku ve spalinách. Následně se horké spaliny dostanou do vírové komory (obr. 3.1./4), kde vlivem příčné clony dojde k jejich zpomalení. Poté spaliny proudí do dohořivací komory (obr. 3.1./5), ve které proběhne jejich zchlazení na teplotu, jež je nižší než je teplota tavení popílku, což zabrání jeho napékání na žárové trubky výměníku. Zároveň rozlehlá dohořivací komora se správným sklonem klenby odloučí až 40 % poléťavého popílku.



Obrázek 3.2 Technologická jednotka Vesko-B, město Detva (SR) (Reference, 2012)

Výměník (obr. 3.1./6) kotle Vesko-B je žárotrubný, orientovaný vertikálně, což není zcela běžné. Horké spaliny do výměníku vstupují ze spodní části dohořivací komory, poté se dostanou do horní obrátové komory, ve které změni směr proudění, a sestupují do spodní

obratové komory, kde opět změni směr proudění a dostanou se opět do horní části (obr. 3.1. pravý horní roh). Tento způsob konstrukce výměníku umožní zvětšit teplosměnnou plochu výměníku a zároveň dovolí zachovat kompaktní rozměry. Výhodou této vertikální konstrukce je zabránění vytvoření návějí popílků, který je odváděn ze spodní obrátové komory do kontejneru. Další výhodou je i snadné čištění výměníku, které probíhá skrze otevřené horní obrátové komory, proto je důležité dbát na dostatek prostoru nad kotlem. Ochlazené spaliny jsou odváděny z kotle do multicyklonu, ve kterém dojde k jejich odpopílkování, a poté jsou přes spalinový ventilátor vyvedeny do komínu.

Celá konstrukce kotle Vesko-B je opatřena tepelnou izolací a plechovým krytím s plastovým povlakem. Součástí kotle jsou části měření, regulace a řízení. (Vesko-B, 2012)

3.2.2. Technické parametry jednotky

Konstrukce spalovací komory a způsob dávkování umožňuje spalovat i nejméně hodnotnou dřevní hmotu s vysokou vlhkostí a nestálou frakcí, která vzniká především ve dřevozpracujících závodech, během těžby dřeva nebo při pěstebních pracích v lese. Jedná se zároveň o nekontaminovanou dřevní hmotu:

- Dřevní štěpka (všechny druhy)
- Piliny a hoblíny
- Dřevní odřezky (do délky 50 cm)
- Kůra, rašelina

Mezi další požadavky na kvalitu paliva patří: maximální vlhkost paliva 55 %, popelnatost 3 % a měrná hmotnost 250-350 kg/m³.

Výkon kotle	MW	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Konstrukční přetlak	MPa	0,6							
Minimální teplota vstupní vody	°C	70							
Maximální teplota vstupní vody	°C	130							
Výstupní teplota spalin	°C	170							
Tepelná účinnost (při 50% H ₂ O)	%	85							
Regulační rozsah	%	30-100							
Výška kotle	mm	4450	5200	5370	5900	6500	6500	6900	6900
Délka kotle	mm	5250	6600	7000	8100	8100	11200	11600	11600
Šířka kotle	mm	2450	2600	2600	3000	2800	3500	3750	3750
Spotřeba paliva (při 50% H ₂ O)	kg/hod	530	990	1580	2050	2698	3238	3778	4317
Tlaková ztráta na straně spalin	Pa	1400	1500	1500	1500	1700	1500	1500	1500
Vlastní (suchá) hmotnost	t	37,7	50	60	110	105	132	155,1	155,1
Vodní objem	m ³	7,7	14,5	20	30	60	70	43,4	43,4
Provozní hmotnost	t	45,4	64,5	80	140	165	202	198,5	198,5

Tabulka 3.1. Technické parametry kotlů Vesko-B (Vesko-B, 2012)

Technologická jednotka Vesko-B je běžně dostupná v osmi výkonových provedení od 1 do 8 MW. Výstupní teplota vody je 110 °C a konstrukční přetlak činí 0,6 MPa, jedná se tedy

o středotlaký teplovodní kotel. Podle požadavků zákazníka je možné rozšířit tepelný výkon až na 10 MW, pracovní přetlak na 1,0 MPa a výstupní teplotu na 130 °C. Termická účinnost se pohybuje okolo 85 % při 50% obsahu vody v palivu. Vodní objem trubkového výměníku kotle se pohybuje v rozmezí od 7,7 m³ (pro nejmenší 1 MW kotel) až do 43,4 m³ (pro 8 MW kotel). Podrobnější technické údaje o jednotce Vesko-B jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Řízení kotle je plně automatizováno a může pracovat buď v autonomním režimu (tj. bez použití nadřazeného počítače), nebo v režimu řízeném centrálním počítačem spravujícím celou kotelnu. Automatika zajišťuje optimalizaci spalování na základě přebytku kyslíku ve spalinách, řídí podávání paliva a pohyb roštu v závislosti na jakosti paliva. Dále přenáší všechny měřené veličiny, zásahy zabezpečovacího zařízení a poruchy na dispečink. Zároveň vysoký stupeň automatizace přináší nenáročnost na obsluhu, což dle výrobce představují zhruba 2 hodiny obsluhy jednoho pracovníka denně. (Vesko-B, 2012)

Jednotka Vesko-B spaluje výhradně dendromasu, avšak pokud bychom měli zájem spalovat obilnou slámu, tak společnost TTS group nabízí řešení v podobě jednotky Vesko-S. Jedná se opět o středotlaký teplovodní kotel o výkonu 2 až 5 MW. Celá jednotka Vesko-S je přizpůsobena ke spalování stébelnatého paliva v podobě velkorozměrných hranolových balíků. Výraznějším rozdílem oproti jednotce Vesko-B je způsob dopravy paliva do spalovací komory. Zakladač (jeřáb) přesouvá ze skladu paliva jednotlivé balíky na podávací plošinu, která je umístí do svislé komory a stříhacím hydraulickým mechanismem jsou balíky děleny na menší části. Tyto části balíku jsou postupně protlačovány pístem na rošt kotle. Samotná spalovací komora Vesko-S je také odlišná. Ve spalovací komoře už nefiguruje mohutná klenba, ta je nahrazena výrazně kratší klenbou u ústí palivové hubice. Spalovací vzduch je přiveden do bočních stěn spalovací komory, ta je navíc chlazena teplotnějším médiem, aby nedocházelo k napékání popelovin (popel slámy vykazuje nižší teplotu tavení). Nápadným konstrukčním rozdílem je také oddělený žárotrubný výměník (opět svisle orientovaný), který se nachází vedle spalovací komory a netvoří s ní kompaktní celek. Podobně jako jednotka Vesko-B, tak i jednotka Vesko-S je určena pro průmyslové podniky, obytné komplexy nebo pro výtopny CZT.

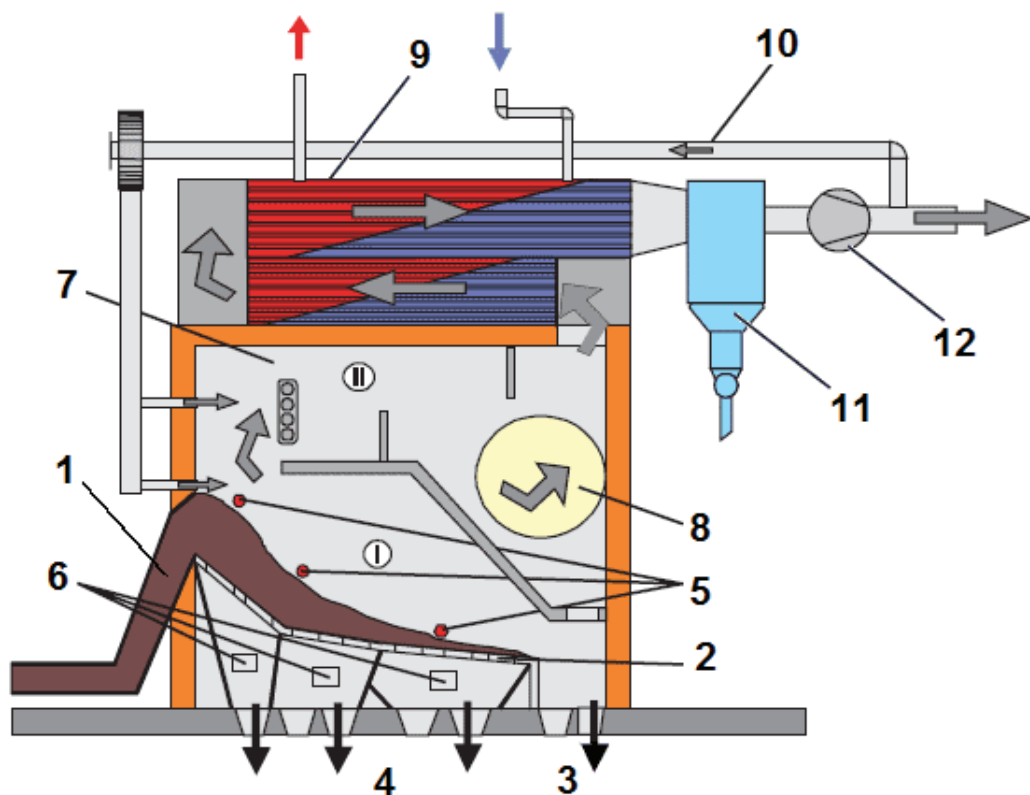
3.3. Technologická jednotka K8

V této podkapitole bude popsána technologická jednotka K8 rakouské společnosti Kohlbach. Společnost Kohlbach má na trhu více než šedesátiletou tradici a je významným dodavatelem řady jednotek spalujících biomasu v rámci celé Evropy. Tato společnost nabízí komplexní řešení uzpůsobené individuálním požadavkům zákazníka od návrhu až po realizaci a servis. Samotný návrh jednotky je velmi sofistikovaný, neboť společnost Kohlbach provozuje vlastní výzkumné centrum, ve kterém dle potřeby probíhají testy a měření na prototypch zařízení. Konstrukční odlišností jednotky K8 od výše popisované jednotky Vesko-B je možnost použití třech teplotnějších médií (voda, pára nebo termolej). Společnost TTS group nabízí pouze teplovodní (horkovodní) a termolejové kotle. Výkonový rozsah spalovací komory je od 525 kW do 7675 kW. Vzhledem k tomuto výkonovému rozsahu je využití jednotky vhodné především v průmyslových podnicích, dřevozpracujících závodech nebo výtopnách napojených na CZT. (Company, 2011)

3.3.1. Popis jednotky

Technologická jednotka K8 je samonosná celosvařovaná skříňová konstrukce s možností instalace tří typů výměníků, dle teplotního média.

Palivo je navezeno nakladačem ze skladu do denního zásobníku paliva. Zásobník paliva představuje železobetonovou jámku s obdélníkovým půdorysem, na jehož dně je nainstalovaná pohyblivá podlaha. Díky specifické konstrukci pohyblivé podlahy, jejíž elementy mají tvar klínu, dochází při vratném pohybu k přesunu paliva směrem k příčnému kanálu. V příčném kanálu se nachází zavážecí lis, který tlačí palivo do stoupavého kanálu (hubice) a dál na rošt kotle. Vratný pohyb zavážecího lisu a pohyblivé podlahy zajišťují hydraulické válce napojené na olejové čerpadlo. Palivo se dostává do rozšiřujícího se stoupavého kanálu (obr. 3.3./1), ve kterém se částečně předsuší. Rozšiřující tvar a správný sklon stoupání zaručí, že nedojde ke zpěchování paliva a tím k jeho zaseknutí. Rozměry stoupavého kanálu závisí na instalovaném výkonu kotle a na množství přepravovaného paliva. K dispozici je také alternativní možnost přepravy jemnozrnného paliva ze zásobníku (sila) pomocí šnekového dopravníku.



Obrázek 3.3. Schéma technologické jednotky K8 (Kotelní systém Kohlbach typ K8, 2011)

Ústí stoupavého kanálu se nachází ve spalovací komoře na začátku roštu. Rošt technologické jednotky K8 (obr. 3.3./2) je přesuvný, což zajistí dobré prohoření nehomogenního paliva tím, že ho během spalování přeskupuje v celém objemu. Jakmile je palivo dopraveno na rošt, dojde vlivem okolní vysoké teploty k rychlému dosušení a následnému vzplanutí. Pohyb paliva zajišťují kaskádovitě uspořádané pohyblivé a nepohyblivé roštnice. Rošt je sestaven

tak, že se pravidelně střídají pohyblivé a nepohyblivé stupně roštnic. Pohyblivé roštnice jsou spojeny tzv. „vozíky“, které umožňují vratný pohyb více stupňů roštnic zaráz. Jednotlivé „vozíky“ jsou na sobě nezávislé a jejich celkový počet se odvíjí od délky roštu. Díky tomu může být palivo přesouváno různou rychlostí v dílčích částech roštu. Vratný pohyb vozíků, respektive roštnic, zajišťují hydraulické válce. Po vyhoření paliva padá popel a nespálená residua do propadu na konci roštu (obr. 3.3./3) a dál do výsypky (kontejneru) v podkotlí. V propadu je nainstalovaná uzavírací klapka, která tlakově odděluje spalovací komoru a výsypku tak, aby nedošlo k přísávání balastního vzduchu a nemožnosti udržet podtlak v komoře. Část popele, který propadne mezi roštnicemi pod rošt, je odveden propady (obr. 3.3./4) do podkotlí a dál do společné výsypky (kontejneru).

Primární vzduch (obr. 3.3./6) je přiveden do příslušných sekcí pod rošt a zajišťuje hoření v sekci I (obr. 3.3.). Dříve než primární vzduch vstoupí do spalovací komory, dojde k jeho předehřátí v plášti spalovací komory, kterou tím zároveň chladí. Hoření v sekci I spalovací komory je protiproudé, což má pozitivní vliv na účinnost spalování a také na množství emisí ve spalinách. Nad roštem jsou v bočních stěnách spalovací komory umístěny sondy (obr.3.3./5), které měří vrstvu paliva, a díky nimž je možné lépe řídit pohyb roštnic. V zadní stěně spalovací komory jsou umístěny přívody recirkulace spalin (obr. 3.3./10). Recirkulace spalin zefektivňuje spalování tím, že redukuje množství zbytkového kyslíku a oxidu uhelnatého a přispívá také ke snížení koncentrací emisí NO_x . Podobně i sekundární vzduch se podílí na spalování oxidu uhelnatého. Vývody sekundárního vzduchu (obr. 3.3./7) jsou vsazeny nad klenbu v bočních stěnách sekce II spalovací komory. Následně spaliny proudí do dohořivací komory (obr. 3.3./8), kde dojde k jejich zpomalení, zchlazení a zároveň se zde odloučí část popílku.

Dále se horké spaliny dostanou do žárotrubného teplovodního (horkovodního, parního, či termoolejového) výměníku (obr. 3.3./9), který je umístěn nad spalovací komorou a je orientovaný horizontálně (termoolejový vertikálně). Spaliny projdou spodní polovinou a dostanou se do zadní obratové komory, ve které se otočí, a proudí zpět horní částí výměníku. Ochlazené spaliny proudí z kotle do multicyklonu (obr. 3.3./11), ve kterém dojde k jejich odprášení, a dále se pomocí spalinového ventilátoru (obr. 3.3./12) dostanou do komínu. Konstrukce výměníku se v praxi může od uvedeného nákresu lišit tím, že je přidána další obratová komora, spaliny procházejí třikrát výměníkem a odcházejí zadní stěnou kotle. Na čelo výměníku mnohdy bývá nainstalované automatické čištění žárových trubek (obr. 3.4.). Toto čištění je realizováno pulzem tlakového vzduchu, který pročistí trubky od nánosů popílku. Systém automatického čištění sníží počet nutných servisních odstávek a zvýší tak efektivitu zařízení. Ovšem nevýhodou tohoto systému čištění je dynamické zatěžování konstrukce kotle, což může vést k únavovému porušení (zejména v místech svarů) a tím k dřívějšímu opotřebení výměníku. Kromě teplovodního (horkovodního) výměníku je k dispozici instalace parního nebo termoolejového výměníku. Jednotlivé varianty výměníků jsou nabízeny v širokých rozpětích provozních tlaků a teplot.

Celá konstrukce jednotky K8 je opatřena „pohledovou“ tepelnou izolací a plechovým krytím s plastovou povrchovou úpravou pro zajištění podmínek bezpečnosti práce a zmenšení

tepelných ztrát. Rošt i plášť kotle jsou chlazeny topnou vodou tak, aby nedošlo k jejich přehřátí. Součástí kotle jsou části měření, regulace a řízení.

3.3.2. Technické parametry

Technologická jednotka K8 je schopna spalovat velmi heterogenní palivo s vysokým obsahem vody. Palivem této jednotky může být nejrůznější dřevní odpad lesní těžby, dřevozpracujících závodů, eventuálně odpad agrární produkce. Mezi běžná paliva jednotky K8 patří:

- Dřevní štěpka (obsah vody 10 až 60 %, velikost 3 cm až 10 cm)
- Piliny a hobliny (obsah vody 10 až 50 %, velikost 1 až 10 mm)
- Kůra (obsah vody 20 až 60 %, průřez až 25 cm², délka až 80 cm)
- Dřevní odřezky (ojedinělé kusy až do délky 80 cm a průměru 10 cm)
- Dřevěné pelety (obsah vody do 18 %, průměr od 4 do 20 mm)
- Palivový mix z výše uvedených druhů

Společnost Kohlbach předepisuje maximální obsah popelovin v palivu na 5 %. (Produkts, 2011)

Všestrannost a robustnost jednotek společnosti Kohlbach umožňují také spalování dalších druhů paliv, mezi které se řadí například: kukuřičné klasy, sláma, pelety ze slámy, zemědělský odpad, dřevní prach aj. Tato speciální paliva se vyznačují velmi vysokým obsahem popela, zvýšeným množstvím dusíku, chlóru, síry, strusky atd. Z těchto důvodů je nutné přizpůsobit konstrukci jednotek s ohledem na spalovací proces a koncentrace emisí polutantů. Jednotky mohou být vybaveny elektrostatickým filtrem, či SNCR (SCR) technologií snižující množství oxidů dusíku ve spalinách. Dále je možné jednotku opatřit zónami opětovného spalování, ve kterých dojde ke zpomalení proudu spalin a k jejich zahřátí přidavným hořákem pro zajištění redukce znečišťujících látek.

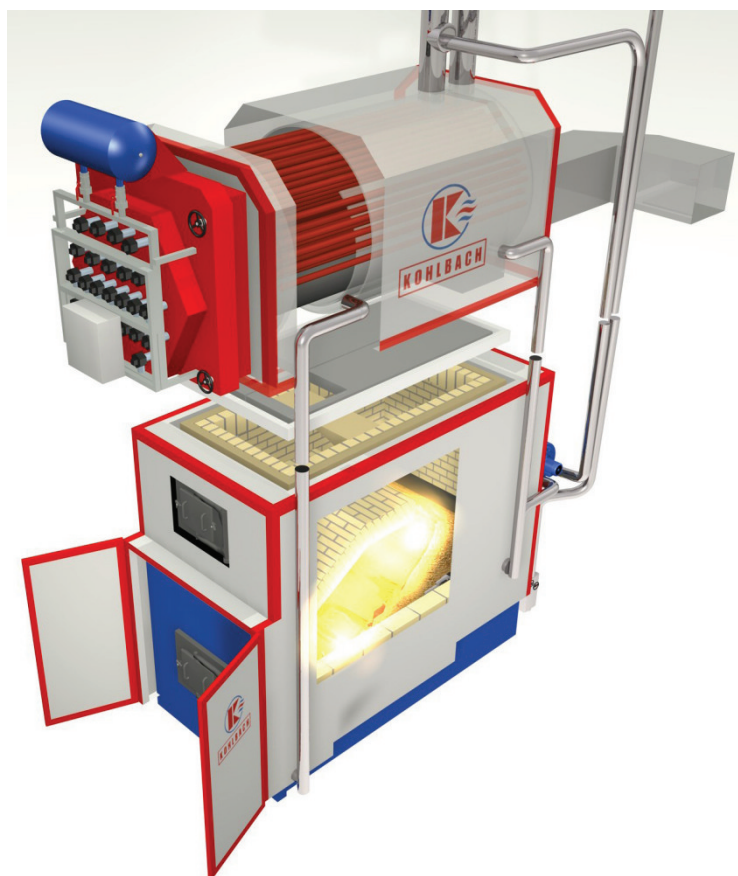
I přes svoji výraznou univerzálnost jednotky K8 z hlediska použitelných paliv výrobce upozorňuje na paliva, která nesmí být spalována. Mezi tato paliva patří zejména: uhlí, zemní plyn, topné oleje a další fosilní paliva, stejně tak jako plasty, potravinářské produkty, odpady (komunální, toxický) i chemicky ošetřené dřevo. Společnost Kohlbach deklaruje, že jednotka K8 pro tyto druhy paliva nebyla vyrobena a vylučuje jakékoliv technologické přizpůsobení z důvodů firemní filozofie. (Produkts, 2011)

Teplovodní (horkovodní) výměník je schopen produkovat teplou vodu do 115 °C nebo horkou vodu až do teploty 200 °C. Dle požadavků zadavatele může pracovní tlak dosáhnout hodnoty až 16 bar. Jak již bylo zmíněno, výměník může mít 3 průchody (pro plné zatížení) nebo 2 průchody pro částečné zatížení. Horizontální orientace výměníku přímo nad spalovací komorou minimalizuje ztráty radiací a vykazuje lepší účinnost. Zároveň je zde možnost umístit výměník vertikálně vedle spalovací komory tak, aby bylo vyhověno eventuálním prostorovým omezením.

Na spalovací komoru lze nainstalovat také parní kotel, který může produkovat technickou páru o teplotě až 450 °C. Pracovní přetlak činí 0,5 až 40 bar. K dispozici je jednak parní kotel

na sytou páru a jednak kotel opatřený přehřívákem vyrábějícím přehřátou páru. Tuto přehřátou páru využívá především přidružená parní turbína nebo parní motor. Zejména tato zařízení vyžadují lepší kvalitu páry ve smyslu vyšších teplot a tlaků, pro zajištění správného chodu zařízení a dobré účinnosti při výrobě elektrické energie.

Třetí možností je instalace termoolejového kotle, který je dodáván ve výkonovém rozpětí 3,3 až 12 MW. Termo-olej je využíván především v podobě páry k pohonu ORC turbíny. Další možností je využití termo-oleje jako tepelného nosiče s pracovní teplotou od 150 °C do 315 °C. (Produkts, 2011)



Obrázek 3.4. Vizualizace technologické jednotky K8 (Products, 2011)

Dobrá regulovatelnost celého systému umožňuje provozovat jednotku ve výkonovém rozmezí 40 až 100 % při dodržení všech emisních limitů. Jednotka je řízena PLC řídicím systémem (Siemens S7), který nabízí mnoho variant pro individuální nastavení a efektivní provoz. Prvky automatizace jsou mezi sebou propojeny BUS technologií, která umožní redukcí kabelů nutných pro jejich propojení. Samotné řízení probíhá skrze počítačovou vizualizaci, která komunikuje s PLC systémem, zobrazuje všechny aktuální měřené údaje, zároveň je možné ovládat veškerých elektronických prvků. Systém řízení také zobrazuje akce, alarmy a vývojové trendy, což zjednodušuje optimalizaci systému. Technologii je také možné vybavit systémem dálkového řízení přes internetové rozhraní. (Produkts, 2011)

3.4. Technologická jednotka EVECO Brno

V následující podkapitole bude popsána další technologická jednotka dodávaná českou společností EVECO Brno. Tuto jednotku vyvinulo sdružení zavedených českých firem (EVECO Brno, s. r. o., VHS Brno, a. s., Ing. Bohumil Metelka – Promet a Biopal Technologie, s. r. o.) ve spolupráci s Ústavem procesního a ekologického inženýrství, FSI VUT v Brně. Firma EVECO Brno se řadu let zabývá problematikou tepelné energetiky a zrealizovala stovky projektů a studií, díky nimž má bohaté zkušenosti v této oblasti. Popisovaná jednotka je dodávána ve výkonovém rozsahu 1 až 5 MW (oblast středních výkonů) a je schopna spalovat různé druhy dendromasy a fytomasy. Vzhledem k tomuto výkonovému rozsahu je užití této jednotky všestranné a jednotka může být instalována v průmyslových podnicích, ve výtopnách dodávajících do CZT či v agrárních závodech. Firma EVECO Brno spolupracuje s Mendelovou lesnickou a zemědělskou univerzitou v Brně, což má význam z hlediska volby vhodného paliva pro danou oblast. (Štulíř, 2010)

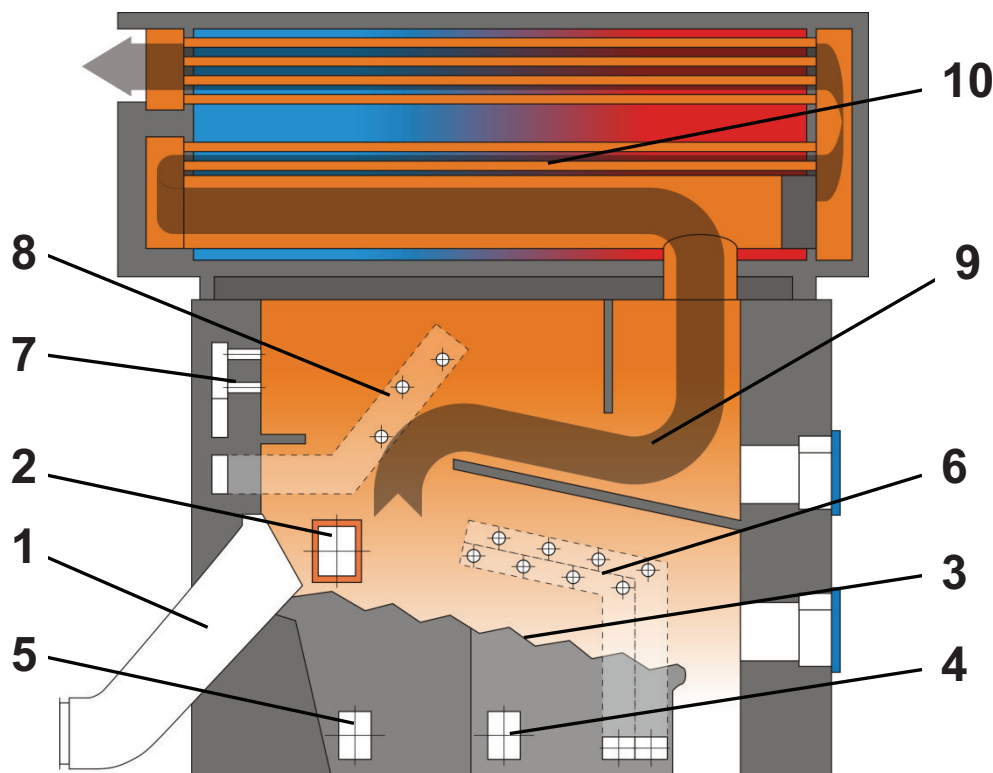
3.4.1. Popis jednotky

Technologická jednotka společnosti EVECO Brno je samonosná celosvařovaná konstrukce s protiproudou spalovací komorou s možností instalace teplovodního (horkovodního) nebo parního kotle.

Palivo je, podobně jako v předešlých případech, nejprve navezeno nakladačem ze skladu do denního zásobníku paliva. Zásobník paliva zpravidla představuje vyvýšenou betonovou desku, která je po dvou protilehlých stranách osazena dřevěnými zábranami. Na této betonové ploše je zřízena pohyblivá podlaha, kterou tvoří na sobě nezávislá hrabla. Specifická konstrukce hrabel složená z klínových elementů zajišťuje při vratném pohybu posuv paliva jedním směrem, čímž se plní příčný žlab. Žlab je oplechovaný a na dně je umístěno pohyblivé hrablo, po jehož délce jsou nainstalované klínové elementy, a na konci je osazeno tzv. „beranem“. Palivo se cyklicky přesypává přes klíny vpřed, až se dostane před „berana“, který zatlačí palivo do stoupavého kanálu a dál na rošt kotle. Vratný pohyb zajišťují hydraulické válce poháněné olejovým čerpadlem (podobně jako u Vesko-B a K8). Součástí pohyblivého hrabla závažecího lisu jsou i střížné hrany, které umožní zkrácení délky hranolků tak, aby nedocházelo k zaseknutí mechanismu. Stoupavý kanál (obr. 3.5./1) má rozšiřující se tvar, což způsobí optimální rozložení paliva na roštu a zamezí jeho zpěchování. Eventuální dopravní palivovou trasu do kotle představuje šnekový dopravník, který je určen zejména pro transport stébelnaté fytomasy a ústí přímo do spalovací komory (obr. 3.5/2).

Rošt spalovací komory je vratisuvný, což zajišťuje dobré prohoření i větší vrstvy paliva a její promísení v celém objemu během spalování. Kaskádovité uspořádání pravidelně se střídajících pohyblivých a nepohyblivých roštnic zajistí žádaný pohyb paliva po roštu. Pohyblivé roštnice jsou spojeny tzv. „vozíky“ a tvoří tak na sobě nezávislé části roštu. Vratný pohyb „vozíku“ je vyvozen hydraulickými válci. Po vyhoření paliva odchází popel společně s nespalitelnými zbytky redlerovým dopravníkem do kontejneru, který se po naplnění vyveze na skládku bez další složité manipulace. Současná konstrukce kotle je navržena bez podkotlí, což podstatně sníží pořizovací náklady, ale zároveň to vede k obtížnějšímu manuálnímu odpopelnění prostoru pod roštem.

Primární vzduch (obr. 3.5./4) je zaveden pod rošt a podílí se tak na spalování paliva na roštu. Předtím než se dostane pod rošt, je vzduch zaveden do pláště spalovací komory, kde dojde k jeho předehřátí, čímž se zároveň chladí spalovací komora. Druhou možností jak vzduch předehřát je pomocí rekuperačního výměníku, který odebírá teplo z horkých spalin (vstupní teplota je přibližně 220 °C). Spalovací vzduch se předehřívá na teplotu 80 až 130 °C, což vede ke zvýšení účinnosti kotle. Aby došlo k efektivnímu spálení i druhotných plynných složek paliva (metan, vodík, oxid uhelnatý), přivádí se do vybraných zón spalovací komory sekundární vzduch. Sekundární vzduch může být přiveden do bočních stěn protiproudé části spalovací komory (obr. 3.5./6) mezi rošt a klenbu, dále do bočních stěn obratové komory (obr.3.5./8) nebo do zadní stěny obratové komory (obr.3.5/7). K dispozici je také možnost předehřátí sekundárního vzduchu v rekuperačním výměníku. Tato jednotka může být vybavena systémem recirkulace spalin, díky němuž se část horkých spalin opětovně vhání pod rošt (obr. 3.5./5) a intenzifikuje proces zplyňování biomasy na roštu, což vede ke zvýšení účinnosti kotle a snížení koncentrací emisí CO a NO_x. (Štulíř, 2010)



Obrázek 3.5 Schéma technologické jednotky EVECOTechnological unit (Štulíř, 2010)

V dohořívací komoře (obr. 3.5./9) dochází ke zpomalení proudění spalin, poklesu teploty a odloučení části polévatého popílku. Následně horké spaliny vstoupí do teplovodního (horkovodního) žárovodního výměníku. Orientace výměníku je horizontální podobně jako u jednotky K8. Spaliny proudí nejprve spodním plamencem do zadní obratové komory, kde se otočí a proudí žárovými trubkami zpět. V přední obratové komoře dojde opět ke změně směru toku a spaliny projdou potřetí výměníkem, což zaručí efektivní výměnu tepla. Jakmile se ochlazené spaliny dostanou z kotle, proudí přes multicyklon a dále přes spalinový ventilátor do komínu.

K dispozici je i varianta parního kotle, která se využívá zejména při kombinované výrobě elektrické energie a tepla. Dodávaný parní kotel je žárotrubný s možností instalace přehříváku pro zajištění kvalitnější páry.

Spalovací komora je vyrobena z ocelové rámové konstrukce, jež je z vnějšku opatřena plechovými krycími panely. Stěny komory se skládají z tepelných izolací, šamotových cihel a žáropevných tvarovek. Plášť spalovací komory a rošt je chlazen topnou vodou, aby nedošlo k jejich přehřátí a následnému poškození. (Kotle na spalování biomasy, 2008)

3.4.2. Technické parametry

Technologická jednotka dodávaná společností EVECO Brno je navržena tak, že je schopná spalovat heterogenní palivo s vysokým obsahem vlhkosti. Ve srovnání s jednotkami K8 a Vesko-B nabízí tato jednotka největší variabilitu z hlediska použitelných paliv. Mezi tato paliva se řadí:

- Dřevní štěpka (všechny druhy)
- Piliny a hobliny
- Kůra
- Dřevní odřezky
- Obilná sláma
- Amarant
- Řepkové pokruty
- Kontaminovaná biomasa

Společnost EVECO Brno má k dispozici provozní testovací jednotku o výkonu 1 MW pro spalování různých druhů biomasy a fytomasy. Na této jednotce je možné realizovat různé zkoušky za účelem optimálního návrhu zařízení, dle specifických požadavků zákazníka. Takto je možné dodat zařízení „na míru“, což výrazně omezí vznik eventuálních problémů při realizaci. Na této testovací jednotce také proběhly zkoušky s různými druhy paliv, aby byly odstraněny případné technické nedostatky zařízení, a zjistily se emisní charakteristiky jednotlivých paliv dosahované v daném prototypu (Štulíř, 2008). Výsledkem těchto testů bylo také srovnání průměrných koncentrací emisí čtyř charakteristických druhů paliv, které uvádí tabulka 3.2. Pro srovnání k těmto hodnotám jsou v tabulce 4.3. uvedeny předepsané emisní limity pro kotle na biomasu.

Zkoušená biomasa	VOC	CO	NO ₂	SO ₂	TZL
	mg/m _N ³				
Štěpka	0	121,03	115,86	119,23	59,36
Amarant	0	110,11	152	0	70,5
Obilná sláma	0	146,85	172,93	29,78	85,76
Řepkové pokruty	0	81,73	541,14	444,74	21,84

Tabulka 3.2. Průměrné koncentrace emisí, přepočtené na suché spaliny s 11% obsahem O₂ (Štulíř, 2008, s. 9)

V dnešní době se setkáváme i s nezanedbatelnou částí biomasy, která je nějakým způsobem kontaminována a nelze ji označit jako „zelenou“. K těmto palivům patří například biomasa znečištěná chemickými látkami (barvy, laky, mořidla, lepidla) či biomasa kontaminovaná jinými látkami během sklizně nebo skladování. Během spalování se pak můžou uvolňovat do spalin nadlimitní množství škodlivin. Tato skutečnost nutně vede k úpravě technologie, především v části čištění spalin. Navrhovaná technologie společnosti EVECO Brno pracuje na principu suché sorpce, během níž se do spalin přidává multikomponentní sorbent, který reaguje s kyselými složkami obsaženými ve spalinách (např. SO_2 , Cl, F). Chemické reakce jsou intenzifikovány v kontaktoru. Neutralizačním činidlem je hydrogenuhličitan sodný (NaHCO_3), které neutralizuje kyselé složky na sodné soli (NaCl , NaF , Na_2SO_4). Pro správný průběh reakce je důležitá pracovní teplota (180°C až 230°C), při které dochází k rozkladu hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO_3) na uhličitan sodný (Na_2CO_3), při němž se uvolní CO_2 a H_2O . Na částicích Na_2CO_3 vznikne velmi porézní povrch, na kterém probíhá vlastní reakce s vysokou účinností. Zreagovaný sorbent se společně s popílkem odstraní pomocí tkaninových (keramických) filtrů (Oral, Šarlej, Šikula, 2009). Další technologie čištění spalin odstraňující např. oxidy dusíku nebo PCDD/PCDF budou podrobněji popsány ve čtvrté kapitole.



Obrázek 3.6. Spalovací komora testovací jednotky s výkonem 1MW, Kojetín (ČR)
(Štulíř, 2008)

Průměrná tepelná účinnost jednotky je 80-85 % (úzce závisí na použitém palivu a jeho vlhkosti). Maximální výstupní parametry horké vody a páry, kterých je schopna jednotka dosáhnout, jsou uvedeny v tabulce 3.3. V této tabulce jsou pro srovnání uvedeny také výstupní parametry jednotek Vesko-B a K8.

Název jednotky	Výkonový rozsah [MW]	Maximální výstupní teplota a tlak teplotnosného média [°C / MPa]		
		Teplovodní (horkovodní) kotel	Parní kotel	Termoolejový kotel
Vesko-B	1 - 10	130 / 1,0	-	300 / 1,0
K8	0,525 - 7,675	200 / 1,5	450 / 4,0	315 / -
EVECO Brno	1 - 5	135 / 0,6	230 / 1,6	-

Tabulka 3.3. Přehled parametrů technologických jednotek

Řízení kotle je plně automatizováno a nevyžaduje trvalou obsluhu. Řídící PLC (Siemens, Mitsubishi) je osazeno v elektrorozvaděči technologie a komunikuje se všemi přidruženými systémy. Ovládání jednotky se provádí skrze elektronický panel nebo prostřednictvím operátorského PC. Technologii je dále možné vybavit systémem zasílání informativních SMS o chodu technologie, případně systémem dálkového řízení přes internetové rozhraní.

4. Energetické využití odpadů

Jak již bylo zmíněno, existují určité skupiny materiálů, které nemohou být spalovány ve výše uvedených jednotkách, a je nutné upravit celý proces termického zpracování. Mezi tyto materiály se řadí například kontaminovaná biomasa a zvláště pak odpady. Zároveň evropský parlament schválil rámcovou směrnici o odpadech 2006/12/ES, která upravuje požadavky na nakládání s odpady v celé Evropské unii. Mimo jiné poprvé na evropské úrovni v právním předpisu definuje hierarchii nakládání s odpady:

1. Prevence vzniku odpadů
2. Opětovné použití
3. Materiálová recyklace
4. Energetické využití
5. Odstranění

Z uvedeného výčtu plyne, že na prvním místě by měla snaha předcházet vzniku odpadů. Pokud odpad vznikne, měl by být využit materiálově nebo energeticky. Teprve odpady, které není možné dále nijak využít, by měly být odstraňovány (spalováním nebo skládkováním). Tyto předpisy jsou promítnuty do legislativy členských států EU, tedy i České republiky (Ucekaj a kol., 2011).

V České republice se v současnosti skládkováním odstraňuje cca 55 % všech komunálních odpadů a snahou je postupně skládkování omezit na minimum a v budoucnu ho zakázat úplně. Zákaz skládkování komunálního odpadu platí například od roku 2000 ve Švýcarsku a k jeho energetickému využití slouží kolem třiceti technologických zařízení. Zároveň Švýcarsko, které vyniká čistotou životního prostředí, nemůžeme označit za zemi, která by si jej nechránila. V České republice jsou v současnosti tři zařízení na energetické využití odpadů (ZEVO), která jsou provozována v Praze, Brně a Liberci a v roce 2012 vyrobila teplo a elektřinu pro zhruba 50 000 domácností. Ministerstvo životního prostředí také vnímá potřebu řešit náhradu primárních surovin, zejména uhlí pro CZT a výrobu elektřiny.

V této kapitole budou popsány technologie čištění spalin, které mohou být využity především v zařízeních pro termické zpracování odpadu. Dále bude kladen důraz na vybrané technologie, které mohou být aplikovány také u jednotek s výkonem v řádech megawattů. Jednotlivé technologie čištění spalin představují zástupce z každého odvětví tak, aby byly principiálně vysvětleny metody redukující všechny polutanty, jichž koncentrace je legislativně omezena.

4.1. Rozdělení odpadů a jejich produkce

Vzhledem k velkému počtu druhů odpadů je v této podkapitole provedeno pouze základní rozdělení dle původu, skupenství a legislativy. Dále je v této podkapitole uvedena produkce komunálních odpadů v letech 2004 až 2010.

Dle původu se odpady dělí na:

- A) Průmyslové odpady – např. odpady vzniklé při výrobě kovů, struska, použité oleje

- B) Zemědělské odpady – např. zbytky rostlin, kejda
- C) Komunální odpady – např. tříděný odpad, směsný komunální odpad, BRKO
- D) Odpady ze zdravotnictví – např. prošlá léčiva, infekční materiál
- E) Ostatní – např. čistírenské kaly, autovraky, jaderný odpad

Dle skupenství se dělí odpady na:

- A) Pevné – do této skupiny se řadí většina produkováných odpadů
- B) Kapalné – např. odpadní vody, rozpouštědla, oleje
- C) Plynné – např. plynné emise z chemických výrob, VOC

Dle legislativy (zákon 185/2001 Sb., vyhláška č. 381/2001 Sb.) se odpady rozdělují na 20 základních kategorií, přičemž se jednotlivé podkategorie dělí na:

- A) Nebezpečné odpady
- B) Ostatní odpady

Mezi hlavní producenty odpadů se řadí zejména průmysl, zemědělství, těžební průmysl a obyvatelstvo. Pro energetické využití odpadů je z hlediska dostupnosti a relativně dobré výhřevnosti významný komunální odpad. Tabulka 4.1. uvádí množství vyprodukovaných komunálních odpadů (KO) v letech 2004 až 2010. Dále jsou v tabulce uvedeny některé významné podkategorie KO (rozčleněné dle katalogových čísel), například směsný komunální odpad (SKO).

	Katalog. číslo	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Komunální odpad celkem	20	4 655 000	4 443 600	3 979 000	4 392 298	4 601 727	4 794 665	4 684 552
Oddělený sběr	20 01	441 814	498 976	459 789	561 028	588 874	527 316	515 206
Odpady ze zahrad a parků	20 02	526 725	474 441	264 470	322 915	280 482	373 456	364 879
Ostatní komunální odpady	20 03	3 686 918	3 462 204	3 255 002	3 508 355	3 732 371	3 893 894	3 720 340
Směsný komunální odpad	20 03 01	2 854 000	2 741 000	2 758 000	2 812 356	2 954 102	3 236 264	3 090 806
Objemný odpad	20 02 07	284 000	316 000	326 000	383 718	434 609	506 482	486 444
Ostatní složky	20 03 XX	548 918	405 204	171 002	312 281	343 660	151 148	143 090

Tabulka 4.1. Produkce komunálních odpadů v ČR v letech 2004 až 2010, množství odpadů je uvedeno v t/rok (Oral a kol., 2012)

Pro srovnání je v tabulce 4.2. uvedené množství vyprodukovaného odpadu přepočteno na jednoho obyvatele České republiky. Roční produkce komunálního odpadu v České republice v letech 2004 až 2010 průměrně činila 434 kg/os. Tato hodnota je ve srovnání s ostatními státy EU jedna z nejnižších. Ve vyspělých zemích západní Evropy se roční produkce komunálních odpadů pohybuje mezi 600 až 700 kg/os. (Oral a kol., 2012)

	Katalog. číslo	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Komunální odpad celkem	20	455	433	387	423	440	456	445
Oddělený sběr	20 01	43	49	45	54	56	50	49
Odpady ze zahrad a parků	20 02	52	46	26	31	27	36	35
Ostatní komunální odpady	20 03	361	338	316	338	357	371	353
Směsný komunální odpad	20 03 01	279	267	268	271	282	308	293
Objemný odpad	20 02 07	28	31	32	37	42	48	46
Ostatní složky	20 03 XX	54	40	17	30	33	14	14

Tabulka 4.2. Produkce komunálních odpadů v ČR v letech 2004 až 2010, množství odpadů je uvedeno v kg/osobu/rok (Oral a kol., 2012)

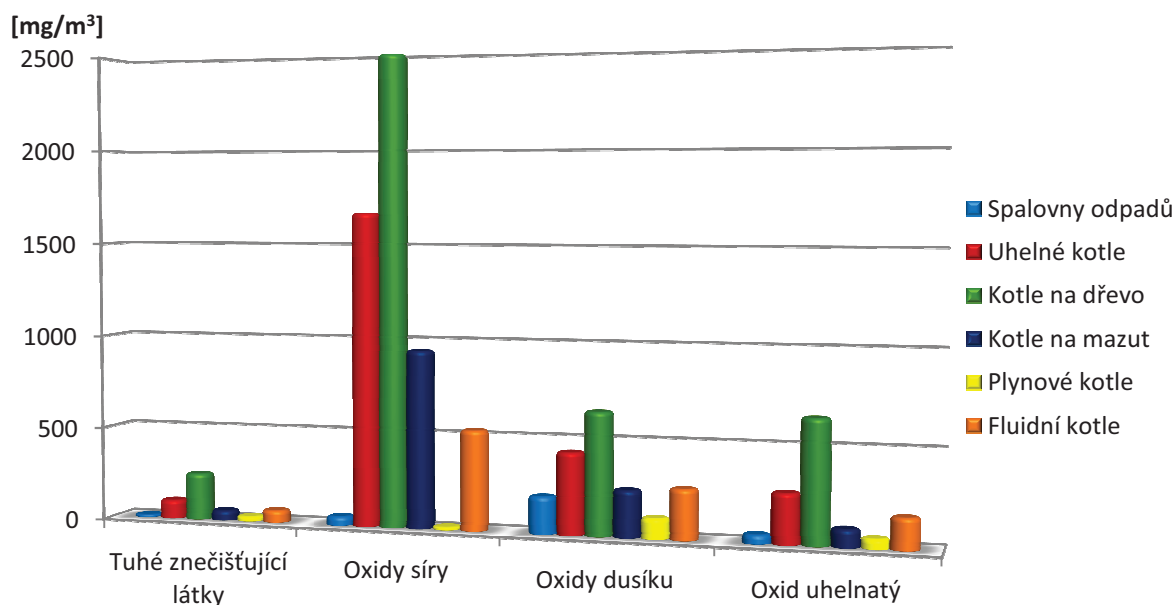
4.2. Technologie čištění spalin

Při návrhu a následném provozu spalovacího zařízení, tedy i při spalování odpadu, je vždy nutné splňovat emisní limity dané příslušným zákonem. V tabulce 4.3. jsou pro srovnání uvedeny emisní limity pro různé stacionární spalovací zdroje, které nesmí být překročeny pod hrozbou vysokých finančních sankcí nebo vyřazení z provozu. Z tabulky 4.3. je patrné, že emisní limity určené pro spalovny odpadu (zařízení EVO) jsou nejpřísnější a zároveň je sledováno nejvíce polutantů (srovnání vybraných polutantů je znázorněno také v grafu 4.1.).

	Spalovny odpadů	Uhelné kotle	Kotle na biomasu	Kotle na mazut	Plynové kotle	Fluidní kotle
Tuhé znečišťující látky	10	100	250	55	28	67
Organický uhlík	10	-	50	-	-	-
Oxidy síry (jako SO₂)	50	1667	2500	945	19	533
Oxidy dusíku (jako NO₂)	200	435	650	250	111	267
Oxid uhelnatý	50	267	650	97	55	167
Chlorovodík	10	-	-	-	-	-
Flourovodík	1	-	-	-	-	-
PCDD/PCDF (ng TE/Nm³)	0,1	-	-	-	-	-
Rtuť	0,05	-	-	-	-	-
Kadmium	0,05	-	-	-	-	-
Ostatní těžké kovy	0,5	-	-	-	-	-

Tabulka 4.3. Emisní limity podle směrnice EU 76/2000 o spalování odpadů a nařízení vlády č.352/2002, uvedeny v mg/m³ (kromě PCDD/PCDF)³ (Spalovny a ovzduší, 2013)

³ Střední a malé zdroje znečišťování do výkonu 50 MW. Hodnoty jsou přepočteny na 11% obsah O₂ a vztaženy na suchý plyn při normálních stavových podmínkách (273 K, 1013 hPa).



Graf 4.1. Srovnání emisních limitů vybraných polutantů stacionárních spalovacích zdrojů dle tab. 4.3.

Při návrhu technologie čištění spalin je důležité si uvědomit, jaké množství znečišťujících látek zařízení při svém provozu vypustí do ovzduší, respektive jaký je výkon spalovacího zařízení. Tato skutečnost a dané emisní limity předurčují, jaký technologický aparát bude při čištění spalin využit. Dále budou podrobněji popsány technologie čištění spalin. Tyto technologie byly vybrány jako zástupci z každého odvětví s důrazem na moderní postupy a širokou využitelnost dané metody.

4.2.1. Redukce koncentrací emisí NO_x

Z pohledu legislativy, potažmo emisních limitů, se sleduje pouze oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Oxidy dusíku vznikají při spalování ve třech formách:

- Termické NO_x – vznikají při reakci dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu za působení vysokých teplot.
- Palivové NO_x – vznikají jako produkt oxidace dusíku obsaženého v palivu.
- Promptní NO_x – vznikají při oxidaci uhlovodíkových radikálů na rozhraní plamene.

Opatření ke snížení NO_x jsou rozdělena do dvou kategorií: primární a sekundární opatření.

Primární opatření:

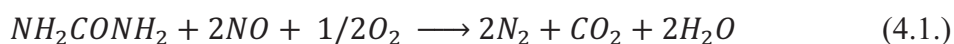
Cílem primárních opatření je potlačení tvorby NO_x již v průběhu spalovacího procesu. Tohoto může být dosaženo snížením množství kyslíku zajišťujícího spalování v primární zóně a snížením teploty. Tímto dojde ke zvýšení koncentrace uhlíkových částic (CO, nespálené složky), které umožní redukovat již vytvořené NO_x a omezí novou tvorbu. Následně je do sekundární zóny přivedeno dostatečné množství vzduchu tak, aby bylo dokončeno spalování. Pro dosažení nízkých emisí NO_x a zároveň dokonalého spalování je potřebný relativně dlouhý čas prodlevy v redukovající primární zóně a dobré smíchání se spalovacím vzduchem v zóně sekundární (Heide a kol., 2012).

Mezi účelná primární technická opatření patří:

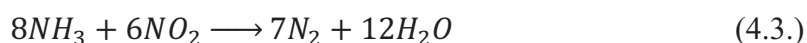
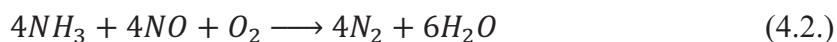
- Nastavení a optimalizace hořáku
- Redukce přebytku vzduchu
- Odstupňovaný přívod vzduchu a paliva
- Recirkulace spalin

Sekundární opatření, technologie SNCR:

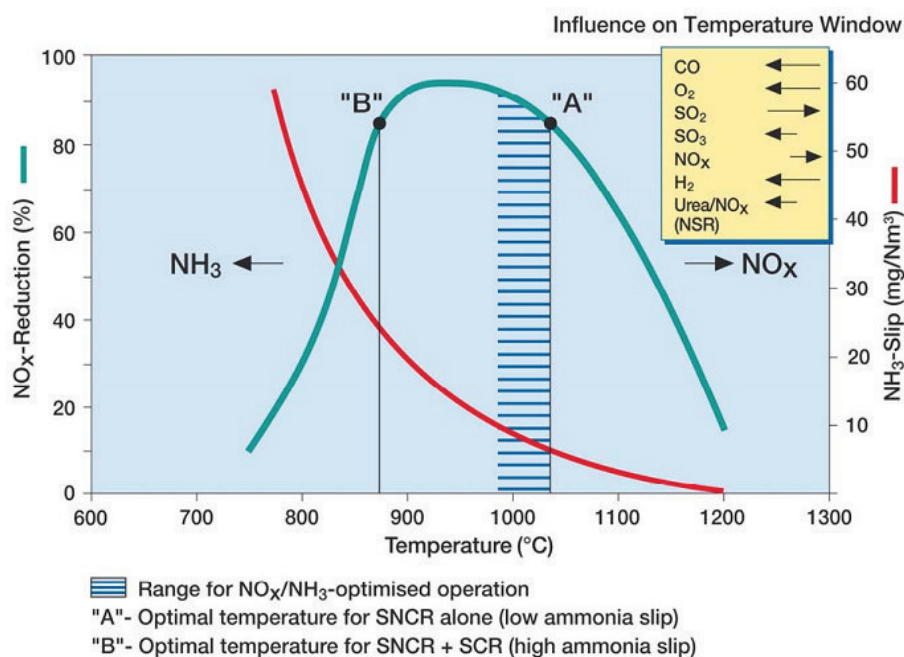
Metoda SNCR, neboli selektivní nekatalytické redukce, je pokročilou technologií, která se široce prosazuje mezi postupy pro snižování oxidů dusíků ve spalinách. Tento postup se uplatňuje u spalovacích zařízení na konvenční paliva, biomasu a také odpad s účinností redukce NO_x okolo 90 %. SNCR umožňuje konverzi NO_x na N₂ a H₂O a hlavní podstatou této metody je použití redukčních prostředků (čpavková voda nebo močovina) štěpících se na čpavek (čpavkový radikál). Reakce probíhá při teplotách přibližně od 850 °C do 1100 °C bez přítomnosti katalyzátoru. Rozsah optimálních teplot pro tuto metodu se odvíjí od daného chemického složení spalin. Při SNCR jsou vstříkována redukční činidla ve vodném roztoku (čpavková voda, vodný roztok močoviny) nebo v plynné formě (čpavek) do horkých spalin. Močovina (NH₂CONH₂) rozpuštěná ve vodě se vlivem vyšších teplot nejprve rozloží na reaktivní radikály NH₂, které následně reagují s oxidy dusíku. Souhrnně lze celou reakci vyjádřit následovně :



Reakci čpavku vyjadřují rovnice:



Produkty těchto reakcí jsou: molekulární dusík, voda a případně oxid uhličitý. V grafu 4.2. je vyjádřena závislost odloučených NO_x na teplotě (v grafu zelená křivka) a závislost čpavkového skluzu na teplotě (v grafu červená křivka). Nad teplotou cca 1100 °C v narůstajícím množství tvoří čpavek oxidy dusíku (nežádoucí reakce) a pro teplotou cca 850 °C vzniká čpavkový skluz. Čpavkový skluz se vytváří v důsledku nižší reakční rychlosti a může vést ke tvorbě amoniakových solí, a tím k následným technickým problémům (tvorba usazenin). Z toho důvodu je žádoucí držet čpavkový skluz na nízké úrovni.



Graf. 4.2. Odlučování NO_x v závislosti na teplotě⁴

Hlavním cílem je dosažení vysokého stupně odloučení NO_x při současné malé spotřebě redukčního prostředku a nízkém skluzu NH₃. SNCR vykazuje vysoký stupeň redukce NO_x, je-li reaktant dobře promíchán se spaliny. Možnou nevýhodou této metody je relativně úzké teplotní okno vhodné pro nástřik reaktantu, na druhou stranu je tato technologie levnější ve srovnání například se SCR technologií nebo low-NO_x hořákem. Jak dále uvádí Heide a kol. (2012), k dispozici jsou i integrovaná zařízení vhodná pro spalovací malé jednotky s výkonem <10 MW. Tato zařízení se standardně dodávají v předem smontovaném modulu, což výrazně usnadní instalaci. (Heide a kol., 2012)

Kromě technologie SNCR se v praxi také využívá technologie SCR neboli selektivní katalytické redukce. Tato metoda bude blíže popsána v podkapitole 4.2.4 4D Filtrace.

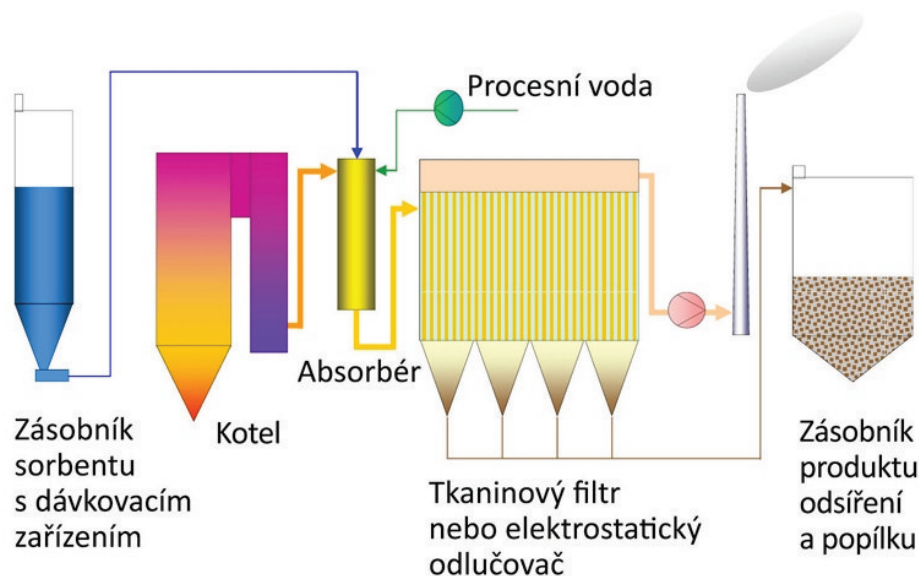
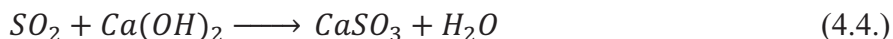
4.2.2. Kondicionovaná sorpce s jednoduchým absorbérem

Technologie kondicionované sorpce s jednoduchým absorbérem (reaktorem) je určena pro snížení emisí SO₂. Jedná se o technologii, která spadá na hranici mezi suchou a polosuchou metodou odsíření. Tato metoda je založena na principu rozprášení suchého sorbentu a vody do spalin. Účinnost odsíření spalin je velmi závislá na teplotě a vlhkosti spalin a významného zvýšení účinnosti lze tedy dosáhnout ochlazením a zvlhčením spalin neboli kondicionováním.

Celá reakce probíhá v absorbéru, ve kterém se sorbent s vodou a se spaliny dokonale promísí tak, aby mohla proběhnout neutralizační reakce. K neutralizaci se používá sorbent,

⁴ PŘEKLD KE GRAFU 4.2.: Influence on Temperature Window – Vliv na teplotní okno; NO_x-Reduction – Odloučení NO_x; NH₃-Slip – Skluz NH₃; Temperature – Teplota; Range for NO_x/NH₃-optimised operation – Oblast pro optimalizovaný provoz NO_x/NH₃; Optimal temperature for SNCR alone (low ammonia slip) – Optimální teplota pro samotné SNCR (nízký čpavkový skluz); Optimal temperature for SNCR + SCR (high ammonia slip) – Optimální teplota pro SNCR + SCR (velký čpavkový skluz)

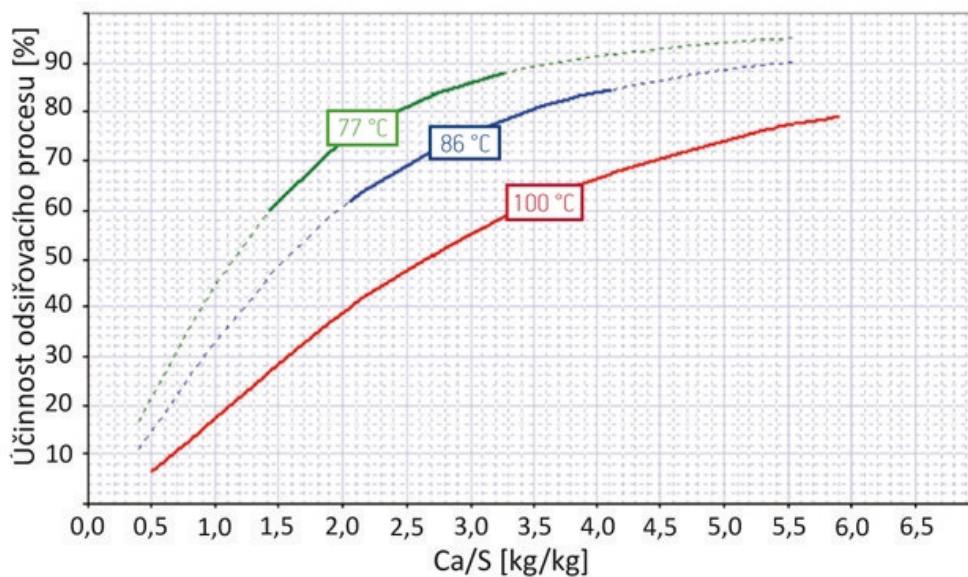
který u této metody představuje výhradně vápenný hydrát ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a pneumatickou cestou se rozprašuje do proudu spalin. Zároveň tento postup vyžaduje kvalitní rozprašení vody, které zajišťují dvoumédiové trysky. Je důležité, aby se veškerá voda v absorběru odpařila tak, aby nedocházelo k nalepování vlhkého sorbentu na jeho stěny. Suchou sorpci s rozprašováním vody lze vyjádřit následujícími rovnicemi:



Obrázek 4.1. Schéma kondicionované suché sorpce s jednoduchým reaktorem
(Suché metody odsíření, 2013)

Jednoduchý absorběr slouží ke zpomalení proudění spalin a tím k prodloužení reakční doby. Odsiřovací proces končí následně ve filtru (tkaninovém nebo elektrostatickém), kde dojde k odloučení tuhých látek ze spalin. Poté jsou tyto částice dopraveny do příslušného zásobníku. Nabízí se i možnost recyklace tohoto produktu odsíření, čímž by se proces zefektivnil. Tato procesní úprava ovšem vede ke zvýšení investičních nákladů. Účinnost odsiřovacího procesu se pohybuje od 45 % do 90 %, při stechiometrickém poměru Ca/S cca 1,8 až 3,6. Tato účinnost může být pro menší spalovací zařízení dostačující ke splnění emisních limitů.

V grafu 4.3. jsou uvedeny výsledky testu suché kondicionované sorpce. Je zde vyjádřena závislost účinnosti odsiřovacího procesu na stechiometrickém poměru Ca/S při třech různých výstupních teplotách spalin. Plné čáry grafu vyznačují testovanou oblast, tečkované čáry představují předpokládaný průběh závislosti. Z nelineárního průběhu závislosti vyplývá, že účinnost odsiřovacího procesu, potažmo spotřeba sorbentu, úzce závisí na teplotě a vlhkosti spalin vystupujících z reaktoru. Pro tuto metodu odsíření je stěžejní kvalita rozprašení vody v absorběru na velmi malé kapky a její stabilní rozptýlení v celém rozsahu regulace. Těchto požadavků lze dosáhnout pomocí dvoumédiových trysek, které využívají tlakový vzduch pro atomizaci vody. Samotná tryska je umístěna na dlouhém nosiči, díky němuž je možné trysku zasunout do absorběru dle potřeby. (Suché metody odsíření, 2013)

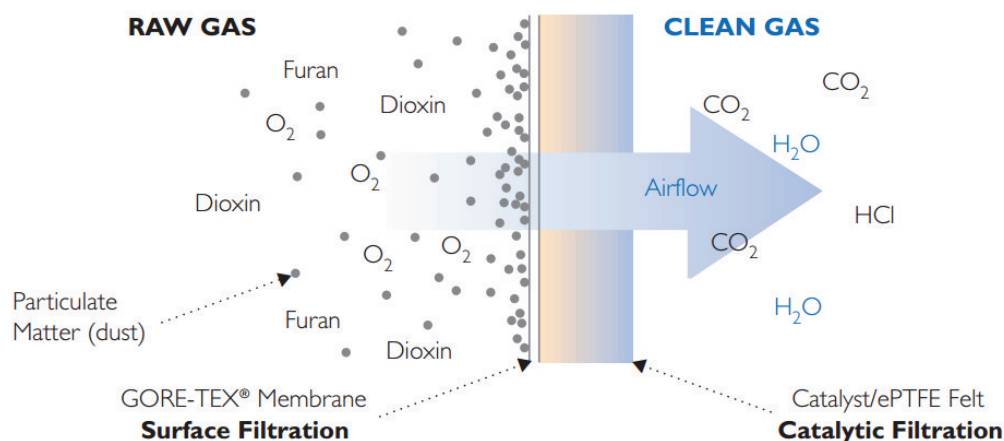


Graf 4.3. Test kondicionovaného suchého odsíření (Suché metody odsíření, 2013)

4.2.3. Katalyticko-filtrační systém Remedia

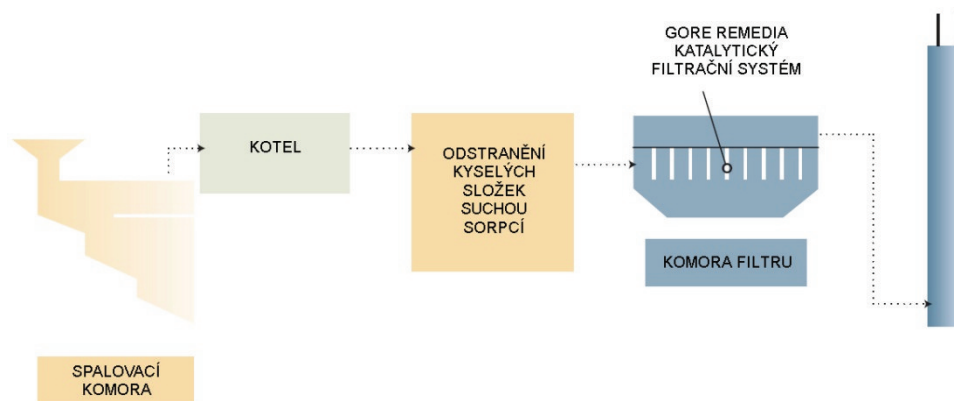
Dioxinům (PCDD) a furanům (PCDF) je v dnešní době věnována značná pozornost odborné i laické veřejnosti. Zprávy o množství těchto látek v potravinách a jejich škodlivosti vedou ke všeobecnému znepokojení a legislativa na toto reaguje přísnými emisními limity. Koncentrace těchto látek ve spalinách upravuje v České republice nařízení vlády č. 354/2002 (viz tabulka 4.3.). V této podkapitole bude popsán filtrační katalytický systém Remedia americké společnosti W. L. Gore & Associates, který je navržen k odstranění dioxinů a furanů ze spalin.

Tato technologie kombinuje principy povrchové filtrace a katalytického rozkladu tak, aby byly splněny emisní limity pro PCDD/PCDF (viz tab. 4.3.). Filtrační elementy jsou umístěny v komoře filtru (ang. baghouse) s výsypkou, kde dochází k jímání škodlivin a k jejich odstranění. Elementy představují tkaninové rukávce, které jsou zpravidla vyztuženy drátěnou konstrukcí, jež zaručí jejich tvarovou stálost v podobě válce. Na povrchu tkaniny je tzv. „nalaminovaná“ vrstva Gore-tex membrány, kterou tvoří expandovaný polytetrafluorethylen (PTFE). Na obrázku 4.2. je znázorněn princip činnosti filtru a jeho struktura. Membrána zachytává jemné částice (popílek) a zároveň propouští plynné částice dioxinů a furanů dále do tkaniny. Katalytická část filtru je tvořená specifickými PTFE koherentními vlákny. Tato vlákna jsou vpichována do netkané textilie Rastex a dohromady tvoří speciální plstěné rouno. Katalyzátor reaguje s molekulami dioxinů a furanů a rozloží je na nepatrné množství CO_2 , H_2O a HCl . Do hrdla rukávce je nainstalována tzv. Venturiho dýza, která zajistí kvalitnější odprášení filtru.



Obrázek 4.2. Princip povrchové a katalytického filtrace⁵, (Remedia, 2006)

Na povrchu filtru se v průběhu času vytvoří tzv. „filtrační koláč“ (vrstva suchého sorbentu z odsíření spalin s TZL), na kterém dobíhá neutralizační reakce kyselých složek při současném zařazení suché sorpce (viz obr. 4.3.). Regenerace filtru se uskutečňuje pomocí pulzu tlakového vzduchu, který se do každého rukávce vhání skrze Venturiho dýzu. Tato dýza je umístěna v hrdle rukávce a zajišťuje lepší usměrnění proudu vzduchu a tím efektivnější odprášení. Tlakový ráz v rukávci způsobí odpadnutí zachycených částic na vnějším povrchu filtru. Tyto částice následně propadnou do výsypky, ve které se shromažďují, a poté jsou odstraněny pomocí šnekových či pásových dopravníků. Jakmile je filtr zregenerován (odprášen), tak se celý cyklus opakuje. Doba trvání jednoho cyklu se odvíjí přímo od stupně znečištění spalin.



Obrázek 4.3. Technologické schéma čištění spalin zahrnující technologii Remediation (Remedia, 2006)

Účinnost dioxinového filtru je vysoká a dosahuje hodnoty přibližně 90 %, což umožní splnění přísných emisních limitů s bezpečnou rezervou. Maximální provozní teplota spalin

⁵ PŘEKLAD K OBRÁZKU 4.2.: Raw gas – Surový plyn; Clean gas – Čistý plyn; Particulate Matter (dust) – Pevná částice (prach); Airflow – Proudění vzduchu; GORE-TEX Membrane – Membrána GORE-TEX; Surface Filtration – Povrchová filtrace; Catalyst/ePTFE Felt – Katalyzátor/ePTFE plst'; Catalytic Filtration – Katalytická filtrace

vstupujících do filtru je 260 °C (ve špičkách až 274 °C). Filtrační materiál také vykazuje vynikající odolnost vůči kyselinám a zásadám.

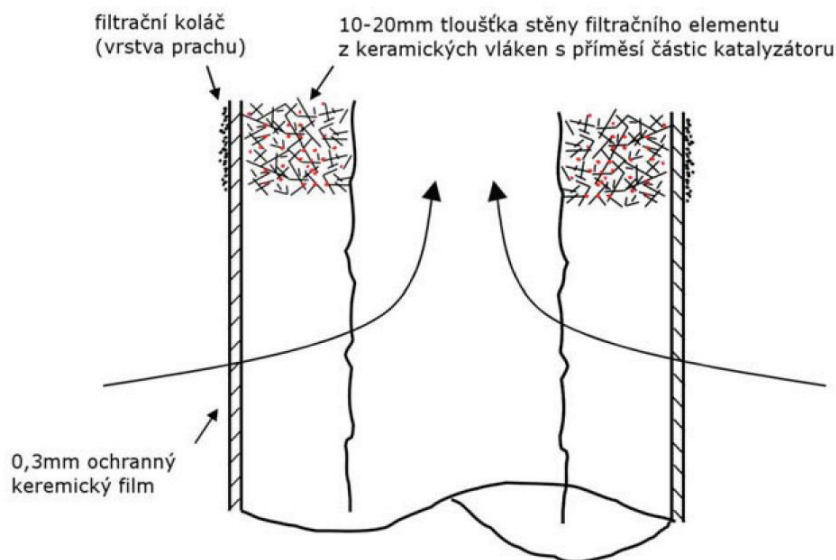
Filtrační systém Remedia předčí jiné systémy svou jednoduchou instalací. Zejména pak nahrazení stávajícího rukávového filtru systémem Remedia nevyžaduje žádné další speciální zařízení, postupy nebo školení obsluhy. Jedná se o pasivní systém filtrace, což sníží nároky na údržbu a zajistí lepší kontinuálnost provozu. Systém Remedia dioxiny a furany přímo rozkládá, na rozdíl od systému na bázi práškového aktivního uhlí (PAC), který tyto polutanty pouze absorbuje. Při následném skládkování těchto sorbentů rostou náklady na likvidaci nebezpečného odpadu a také vzrůstá riziko úniku škodlivin do životního prostředí. (Remedia, 2006)

4.2.4. 4D filtrace

Odborníci stále hledají nové způsoby, jak systémy čištění spalin zjednodušit a jak zároveň zachovat požadované užité vlastnosti. Mezi systémy, které významně zjednodušují celou technologii čištění spalin, se řadí tzv. 4D filtrace. Základem celého systému jsou filtrační elementy ve tvaru dutého válce, vyrobené z porézní keramiky, do které jsou implementovány částice katalyzátoru (obr. 4.4.). 4D technologie spojuje následující funkce do jednoho celku:

1. DeDusting

Jedná se o filtraci tuhých znečišťujících látek, které ulpívají na povrchu keramického filtru. Tyto tuhé látky vytvářejí společně se suchým sorbentem (z odsíření spalin) tzv. „filtrační koláč“ (obr. 4.4.). Regenerace filtru se uskutečňuje pomocí pulzu tlakového vzduchu, podobně jako u systému Remedia.

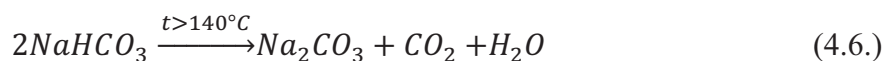


Obrázek 4.4. Schéma konstrukce keramického filtračního elementu (Oral a kol., 2012)

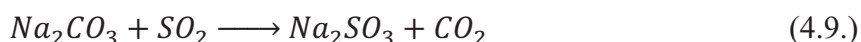
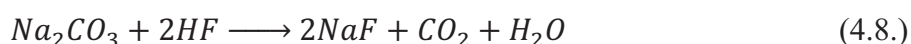
2. DrySorption

Tato funkce umožňuje neutralizovat kyselé složky spalin (SO_2 , HCl , HF a v omezené míře i NO_x). Za kotlem se do horkých spalin dávkuje suchý sorbent v podobě hydrogenuhličitanu

sodného (NaHCO₃). Sorbent se spalinami proudí následně do kontaktoru, ve kterém se proudění zpomalí a proběhne v něm neutralizační reakce. NaHCO₃ se při teplotě nad 70 °C začíná pomalu rozkládat na uhličitan sodný (Na₂CO₃), avšak až při teplotách nad 140 °C je rozklad dostatečně rychlý. Během tohoto rozkladu dochází ke značnému zvětšení reakčního povrchu (pórovitosti). Tento proces je označován jako „popcorn effect“ nebo kalcinace (rovnice 4.6.).



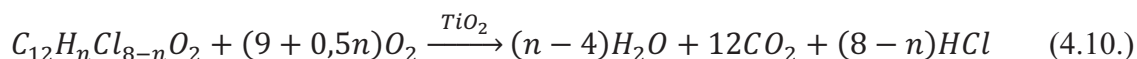
Dále probíhá proces neutralizace (rovnice 4.7.-4.9), čímž dochází k zneškodňování příslušných polutantů.



Produkty těchto reakcí jsou soli (NaCl, NaF a Na₂SO₃), CO₂ a H₂O. Tyto soli společně s popílkem a zbytky nezreagovaného sorbentu ulpívají na povrchu keramického filtračního elementu a vytvářejí tzv. „filtrační koláč“, v němž dobíhá neutralizační reakce.

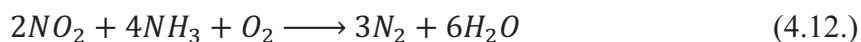
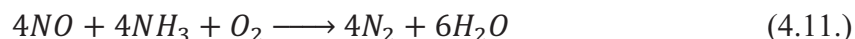
3. DeDiox

Jedná se o katalytický rozklad dioxinů (PCDD) a furanů (PCDF) v plynné fázi, který probíhá na stejném principu jako u systému Remedía. Keramické filtrační elementy obsahují příměsí částic katalyzátoru, které rozkládají PCDD/F na CO₂, H₂O a nepatrné množství HCl:

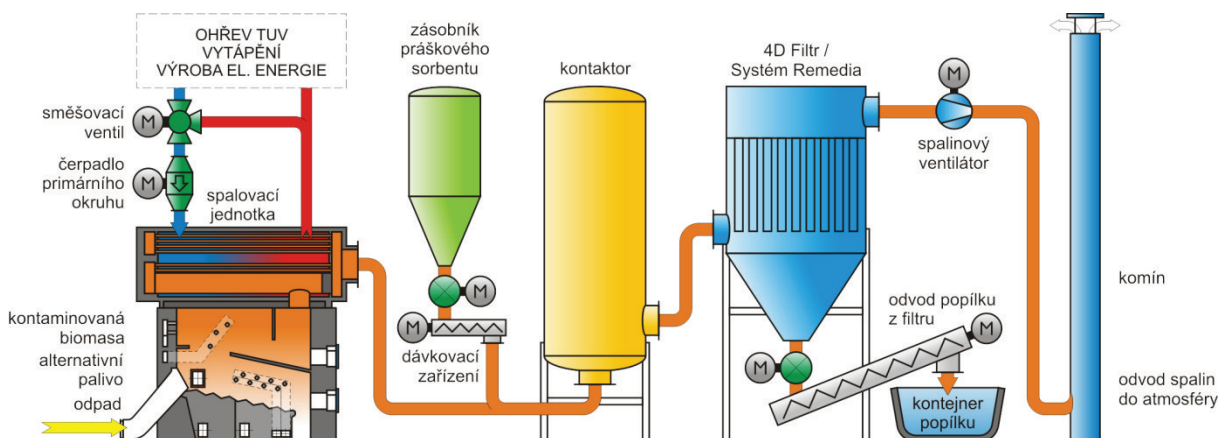


4. DeNO_x

Tato funkce zajišťuje selektivní katalytickou redukci (SCR) oxidů dusíku. Díky katalyzátoru na bázi oxidu titaničitého (TiO₂) a oxidu vanadičného (V₂O₅) probíhají rozkladné reakce oxidů dusíku na molekuly dusíku a vody. Reakce probíhají při současném nástřiku denitrifikačního činidla (NH₃ nebo močovina) do spalin před filtr při teplotách 250 °C až 400 °C (rovnice 4.12. a 4.13).



Na obrázku 4.5. je znázorněno řazení aparátů na čištění spalin systému 4D filtrace. Tento systém je plně v souladu s BAT/BREF a vzhledem k nižšímu počtu aparátů roste spolehlivost systému a klesají nároky na údržbu a obsluhu. Dalším významným benefitem tohoto systému je skutečnost, že se dá počítat s nižšími investičními a provozními náklady oproti systémům s jednoúčelovými aparáty. (Oral a kol., 2012)



Obrázek 4.5. Technologické schéma čištění spalin zahrnující 4D filtraci (Štulíř, 2010)

4.2.5. Odstraňování těžkých kovů

Obsah těžkých kovů ve spalinách je sledován dle legislativy také u zařízení spalujících odpad a jejich přípustné koncentrace jsou určeny emisními limity (tab. 4.3.). Mezi sledované těžké kovy se řadí například kadmium (Cd), rtuť (Hg), arzén (As), olovo (Pb), kobalt (Co), nikl (Ni) či vanad (V) a jejich sloučeniny. Tyto látky jsou buď vázány na prachové částice nebo se ve spalinách vyskytují v podobě par.

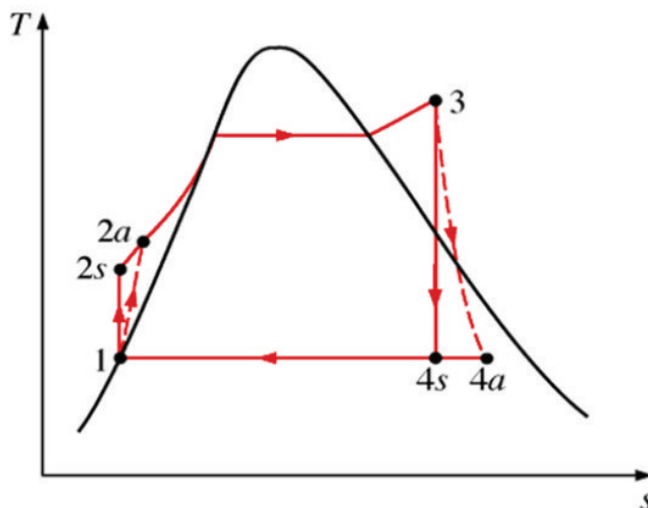
Jednou z možností odstranění těžkých kovů ze spalin je metoda adsorpce s využitím práškového činidla. Práškové činidlo je založeno na bázi směsi aktivního uhlí a modifikovaného přírodního zeolitu⁶. Toto činidlo je dávkováno do proudu spalin, který následně proudí do reaktoru. Podstatná část adsorpce probíhá v reaktoru, ve kterém se proudění spalin zpomalí, sorbent se rovnoměrně rozptýlí, a tím se prodlouží reakční doba. Nakonec je sorbent s TZL zachycen na látkových či keramických filtrech, na kterých dobíhá adsorpční reakce. Užití toho činidla nevyklučuje možnost současného použití i dalších sorbentů k jiným účelům, například použití hydrogenuhličitanu sodného k redukci kyselých složek. (Oral a kol., 2009)

Další možností odstranění těžkých kovů (zvláště rtuti v plynné formě) je využití absorpční metody formou mokré vypírky. Spaliny jsou v mokré vypírce skráceny prací vodou s přídavkem speciálního činidla. Činidlem může být peroxid vodíku (H_2O_2), který umožní absorpci rtuti do vody. Rtuť poté kondenzuje, přičemž odpadní voda musí být upravena a kal se rtuť separován (Kropáč, 2012). Nevýhodou této metody je chemická agresivita peroxidu, která může vést k technickým problémům (zejména ke korozi). Jako další vhodné činidlo se jeví TMT15, které reaguje s těžkými kovy a vytváří prakticky nerozpustné sloučeniny těžkých kovů. Tyto stabilní sraženiny se filtrují a po následné solidifikaci se ukládají na skládku. Výhodou této metody je relativně vysoká účinnost přípravku (8,4 ml TMT15 na 1 m³ absorpční kapaliny pro zachycení 1 g rtuti ve vstupujícím proudu spalin). (Jecha, 2010)

⁶ Zeolity jsou krystalické hydratované alumosilikáty alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Díky prostorovému uspořádání atomů vytváří kanálky a póry konstantních rozměrů. V těchto kanálcích se mohou zachytávat látky tuhého, kapalného a plynného skupenství. (Přírodní zeolit, 2013)

5. Návrhový výpočet jednotky na zpracování biomasy

Výpočtová část této práce se zabývá návrhem technologické jednotky na energetické využití biomasy. Na příkladu budou ukázány základní bilanční výpočty potřebné pro její návrh. Při výpočtu se vychází z Rankinova-Clausiova cyklu s přehřevem páry, který je vyznačen na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1. Rankinův-Clausiovův cyklus s přehřevem páry⁷ (Štětina, 2012)

5.1. Zadání

Cílem výpočtu je navrhnout technologii kotelny spalující dřevní štěpku včetně kombinované výroby tepla a elektrické energie. Je zapotřebí určit výkon jednotky, elektrický výkon turbíny a spotřebu paliva, tak aby byla zaručeny dodávky teplé vody o tepelném výkonu 2 MW s teplotním spádem 90 °C na 70 °C.

Zadané parametry technologie:

- Bude instalována technologická jednotka společnosti EVECO Brno s tepelnou účinností: $\eta = 83 \%$
- Výhřevnost dřevní štěpky (při 40% obsahu vody) $H_p = 10,1 \text{ MJ/kg}$ (Novák,2013)
- Typ kotle: žárotrubný s přehřívákem páry
- Teplota a přetlak napájecí vody: $t_n = 107 \text{ °C}$, $p_n = 1,43 \text{ MPa}$
- Výstupní teplota a přetlak páry z kotle: $t_p = 230 \text{ °C}$, $p_p = 1,4 \text{ MPa}$
- Jako modul expanze páry bude použita točivá redukce řady TR (turbína s letmo uloženým oběžným kolem), kterou dodává společnost G-Team a.s.
- Termodynamická účinnost točivé redukce: $\eta_t = 64 \%$ ⁸
- Účinnost elektrického generátoru s převodovkou: $\eta_e = 93 \%$
- Přetlak páry v protitlaku za turbínou (vstupní tlak páry do výměníku): $p_t = 0,1 \text{ MPa}$

⁷ Přerušovanou červenou křivkou je znázorněna nevratnost dějů na čerpadle a na turbíně.

⁸ Hodnota účinnosti byla zjištěna na základě garanční zkoušky turbíny TR 100, která je instalovaná ve výtopně CZT v Zábřeze (společnosti Talorm a.s.). Tuto turbínu dodávala také firma G-Team a vykazuje podobné technické parametry jako zde navrhovaná turbína.

5.2. Výpočet

Pro návrh výměníku tepla je zapotřebí určit teplotu (t_t) a entalpii (h_t^*) páry za turbínou, která odpovídá vstupní teplotě do výměníku. Ta se stanoví na základě termodynamické účinnosti točivé redukce (η_t):

$$\eta_t = \frac{h_p - h_t^*}{h_p - h_t} \quad (5.1.)$$

$$h_t^* = h_p - \eta_t(h_p - h_t) \quad (5.2.)$$

kde h_p je entalpie výstupní páry z kotle, h_t je teoretická entalpie páry za turbínou a h_t^* je skutečná entalpie páry za turbínou.

Pro přehřátou páru o teplotě $t_p = 230$ °C a tlaku $p_p = 1,4$ MPa je z T-S diagramu stanovena hodnota entalpie $h_p = 2874$ kJ/kg. Přetlaku v protitlaku za turbínou $p_t = 0,1$ MPa odpovídá při izoentropickém ději entalpie $h_t = 2505$ kJ/kg. Následně dosadíme příslušné veličiny do rovnice 5.2.:

$$h_t^* = 2874 - 0,64(2874 - 2505)$$

$$h_t^* = 2638 \text{ kJ/kg}$$

Této entalpii odpovídá teplota páry za turbínou: $t_t = 120,4$ °C a suchost $x_t = 0,969$.

V systému bude zařazen spirálový výměník JAD X 17.217.10 od společnosti Secespol. Jedná se o nerezový, celosvařovaný, nerozebíratelný celek. Topná voda se nachází v prostoru válcového pláště a pára je zavedena do trubek uspořádaných do šroubovic. Tato konstrukce spirálových výměníků se vyznačuje dobrou odolností vůči teplotním šokům (oproti pájeným deskovým výměníkům). Výrobce pro návrhový výpočet doporučuje uvažovat teplotu kondenzátu $t_k = 80$ °C (pro teplotní spád na teplovodní straně 90-70 °C) (Spirálové výměníky, 2013). Přetlaku $p_t = 0,1$ MPa a teplotě kondenzátu $t_k = 80$ °C odpovídá entalpie kondenzátu $h_k = 335$ kJ/kg. Tepelnému výkonu výměníku $P_v = 2000$ kW odpovídá tento hmotnostní průtok páry ve výměníku:

$$\dot{m}_v = \frac{P_v}{(h_t^* - h_k)} \quad (5.3.)$$

$$\dot{m}_v = \frac{2000}{(2638 - 335)}$$

$$\dot{m}_v = 0,868 \text{ kg/s} = 3126 \text{ kg/hod}$$

Nízkotlaká pára se využívá také k přehřevu a odplynění napájecí vody, k vytápění budovy kotelny či ohřevu TUV v kotelně. Z toho důvodu budeme dále počítat s 10% nárůstem spotřeby páry, tedy celkový hmotnostní tok páry z kotle (\dot{m}_p) je:

$$\dot{m}_p = 1,1 \cdot \dot{m}_v \quad (5.4.)$$

$$\dot{m}_p = 1,1 \cdot 0,868$$

$$\dot{m}_p = 0,955 \text{ kg/s} = 3439 \text{ kg/hod}$$

Výkon kotle (P_k) se vypočítá na základě následujícího vztahu:

$$P_k = \dot{m}_p(h_p - h_n) \quad (5.5.)$$

kde teplotě ($t_n = 107 \text{ }^\circ\text{C}$) a přetlaku ($p_n = 1,43 \text{ MPa}$) napájecí vody odpovídá entalpie $h_n = 450 \text{ kJ/kg}$. Po dosazení můžeme psát:

$$P_k = 0,955 \cdot (2874 - 450)$$

$$P_k = 2315 \text{ kW}$$

Při zohlednění ztrát kotle (např. komínová ztráta, sálání z opláštění) můžeme příkon jednotky vyjádřit rovnicí:

$$P'_k = \frac{P_k}{\eta} \quad (5.6.)$$

$$P'_k = \frac{2315}{0,83}$$

$$P'_k = 2789 \text{ kW}$$

Pro výpočet činného elektrického výkonu turbíny P_e využijeme rovnici:

$$P_e = \eta_e \cdot \dot{m}_p(h_p - h_t^*) \quad (5.7.)$$

$$P_e = 0,93 \cdot 0,955 \cdot (2874 - 2638)$$

$$P_e = 209,6 \text{ kW}_e$$

Spotřeba paliva \dot{m}_s se určí podle vztahu:

$$\dot{m}_s = \frac{P'_k}{H_p} \quad (5.8.)$$

$$\dot{m}_s = \frac{2789}{10100}$$

$$\dot{m}_s = 0,276 \text{ kg/s} = 994 \text{ kg/hod}$$

5.3. Zhodnocení výsledků

Pro zajištění dodávky teplé vody bude zapotřebí navrhnout jednotku s výkonem alespoň 2315 kW. Vzhledem k dobré regulaci kotle a odběrovým špičkám je žádoucí navýšit tento výkon o cca 25 %, můžeme tedy navrhnout jednotku s výkonem 3 MW. Pro maximální průtok páry (3439 kg/hod) je činný elektrický výkon turbíny 209,6 kW_e. Z důvodu lepší termodynamické účinnosti i při nižších průtocích páry je reálné navrhnout turbínu s výkonem 200 kW_e. Spotřeba paliva (994 kg/hod) je značná, ovšem ve výpočtu bylo počítáno s palivem s vyšším obsahem vody. Spotřeba paliva by klesla, pokud bychom použili kvalitnější palivo, například pro dřevní štěpku s 10% obsahem vody a výhřevností 16,4 MJ/kg (Novák,2013) by spotřeba činila cca 612 kg/hod. Pro zjištění přesnějších výsledků by bylo zapotřebí využít detailnější model a složitější výpočetní aparát a brát v úvahu i další faktory (např. tepelné a tlakové ztráty v potrubí).

6. Závěr

V rámci této bakalářské práce se autor seznámil s širokou problematikou energetického využití biomasy a odpadů. V úvodní části práce bylo provedeno základní rozdělení biomasy a byly analyzovány biomasové zdroje. V rámci druhé části práce byl proveden průzkum trhu s jednotkami pro energetické využití biomasy. Dále byly vyhodnoceny možnosti termického zpracování odpadů, především z hlediska technologií čištění spalin. V závěrečné části práce byla navržena konkrétní technologická jednotka zpracovávající dendromasu.

Z výsledků analýzy biomasových zdrojů lze předpokládat, že fytomasa a dendromasa v České republice představují perspektivní zdroje energie. V analýze zdrojů fytomasy bylo zkoumáno celkem šest zemědělských plodin, které tvoří základ rostlinné produkce České republiky. Energetický potenciál těchto plodin byl vyčíslen na přibližně 68 PJ. Pro získání podrobnějších výsledků by bylo vhodné do průzkumu zahrnout i další druhy rostlin jako například travní porosty či energetické rostliny. Zpracování dendromasy prováděné přímo v dřevozpracujících závodech se jeví jako vhodné a nese s sebou řadu výhod. Mezi hlavní pozitiva tohoto řešení patří zejména eliminace nákladů na logistiku paliva, přičemž vyrobené teplo a elektrická energie jsou upotřebeny v rámci zpracovatelského závodu.

Technologické jednotky pro energetické využití biomasy, uvedené v rámci této práce, byly popsány jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska technických parametrů. Při návrhu spalovacích jednotek je důležité počítat se skutečností, že biomasová paliva vykazují různé specifické vlastnosti, které je třeba zohlednit během jejich spalování a dalších přidružených procesů. Konstrukci technologie a spalovací proces je tedy nutné přizpůsobit konkrétnímu palivu tak, aby byla dosažena požadovaná účinnost a nedocházelo k technickým problémům, jako je například spékání popele, nadměrné zanášení kotle či nedokonalé spalování apod. Každá z jednotek vykazuje své technické přednosti i nedostatky. Důležitým parametrem, který má zásadní vliv na prodej, je však také cena nabízené technologie. Ceny jednotek není ovšem z důvodu vysoké variability konkrétních řešení možné obecně určit, a proto cenové srovnání nebylo v této práci provedeno.

Významným technologickým celkem užívaným v zařízeních pro termické zpracování odpadů je systém čištění spalin. Vybrané technologie čištění spalin uvedené v kapitole 4.2. reprezentují moderní a vysoce efektivní metody, které jsou úspěšně instalovány jak v České republice, tak v zahraničí. Při návrhu technologie čištění spalin je důležité brát v úvahu emisní limity, výkon spalovacího zařízení, provozní podmínky, investiční náklady apod. Z provedené rešerše plyne, že jednoúčelové aparáty bývají instalovány zejména při dodatečných úpravách a dílčích rekonstrukcích systémů čištění spalin. Naopak víceúčelové aparáty (např. 4D filtrace) se využívají především při instalaci nových technologických systémů, a to z důvodu nižších investičních a provozních nákladů.

V poslední části práce byly návrhovým výpočtem určeny hlavní parametry technologie kotelny zpracovávající dřevní štěpku. Metodou využívající Rankinův-Clausinův cyklus byly zjištěny výsledky prezentované v kapitole 5.3. Na tomto místě je třeba uvést, že navržený systém splňuje požadované parametry, a je schopen dodávat žádané množství tepla a elektrické energie.

Seznam použitých zdrojů

ABRHAM, Zdeněk a David ANDERT. Energetický potenciál a ekonomika odpadní zemědělské biomasy z obilovin a olejnin. *Biom.cz* [online]. 2012, roč. 2011, č. 2 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticky-potencial-a-ekonomika-odpadni-zemedelske-biomasy-z-obilovin-a-olejnin>

BERANOVSKÝ, Jiří. *Alternativní energie pro váš dům. 2.*, aktualiz. vyd. Brno: EkoWATT, 2004, xiii, 125 s. ISBN 80-865-1789-6.

Biomasa. *Národní energetická* [online]. 2009 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.narodnaenergeticka.sk/sekcie/hrinovska-energeticka/co-je-co/biomasa>

Bionafta. *Dolceta-Spotřebitelské vzdělávání online* [online]. 2012 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://www.dolceta.eu/ceska-republika/Mod5/Bionafta.html>

Co je to biomasa?. *Biomasa 2010* [online]. 2010 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: <http://www.biomasa2010.cz/co-je-to/>

Company. *Kohlbach* [online]. 2011 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.kohlbach.at/en/company/>

ČSN 07 0000. *Názvosloví parních a horkovodních kotlů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1980, 172 s.

Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin. *Český statistický úřad* [online]. 2012 [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/2010edicniplan.nsf/publ/2102-10->

FAJMAN, Martin, Radomír KLVÁČ, Josef KOLAŘÍK, Stanislav LIŠKA, Martin NIKL, Jaroslav ORAL, Martin PAVLAS, Alois SKOUPÝ, Petr STEHLÍK, Tomáš STŘEDA a Vladimír UCEKAJ. *Optimalizace výše podpory elektřiny vyrobené z biomasy pro snížení vlivu na cenu elektřiny pro spotřebitele. 2011.*

Galéria. *Japonské topole - rychlerastuce dřeviny* [online]. 2012 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://www.japonsketopole.eu/galeria>

HEIDE, Bernard, Zdenek ŠIMEK a Rostilav MALÝ. Pokročilá technologie SNCR - nové možnosti a hranice. *All for Power*. Praha: AF POWER agency a.s., 2012, roč. 6, č. 2. ISSN 1802-8535.

Hrubá zemědělská produkce v ČR za rok 2008. *Český statistický úřad* [online]. 2009 [cit. 2013-02-19]. Dostupné z: [http://www.czso.cz/csu/2009edicniplan.nsf/t/B600434731/\\$File/21010902.pdf](http://www.czso.cz/csu/2009edicniplan.nsf/t/B600434731/$File/21010902.pdf)

JECHA, David. *Absorpční čištění spalin vznikajících spalováním odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 118 s., 10 s. příloh, Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Kotelní systém Kohlbach typ K8. *Schiestl spol. s r.o.* [online]. 2011 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.schiestl.cz/katalog/KOTELNI-SYSTEM-KOHLBACH-TYP-K8>

Kotle na spalování biomasy. *Biopal technologies s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://www.biopal.cz/cz/?clanek=2>

KROPÁČ, Jiří. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 158 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Lingocelulóza. In: *COACH Bioenergy* [online]. 2013 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <http://www.coach-bioenergy.eu/en/component/glossary/?id=597>

NOVÁK, Jan. Výhřevnosti a měrné jednotky palivového dřeva. Tzbinfo [online]. 2013 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/12-vyhrevnosti-a-merne-jednotky-palivoveho-dreva>

O divizi. *TTS Boilers* [online]. 2012 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/boilers/o-divizi.html>

O japonském topolu. *Japonský topol rychle rostoucí dřevina* [online]. 2010 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://www.rychlerostoucitol.cz/21-o-japonskem-topolu/>

ORAL, Jaroslav, Marek ŠARLEJ a Jiří ŠIKULA. EVECŮ BRNO, s.r.o. *Nová technologická jednotka pro čistou energii z kontaminované biomasy (1 až 3 MW)*. Brno, 2009.

ORAL, Jaroslav, PUCHÝŘ Radim a Petr STEHLÍK. Kam kráčí moderní technologie pro energetické využití odpadů?. *All for Power*. 2012, č. 1. ISSN 1802-8535.

PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. 2., aktualiz. vyd. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-865-3406-5.

Produkts. *Kohlbach* [online]. 2011 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.kohlbach.at/en/cetest-firstpage0/produkte/>

Přírodní zeolit. *ZEOONE - World of Zeolites* [online]. Pixelhouse, 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.zeolity.cz/zeoone/home/category/21/prirodni-zeolit>

Reference. *TTS Boilers* [online]. 2012 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/boilers/reference.html>

Remedia: Catalytic filter system. W. L. GORE & ASSOCIATES. *Gore* [online]. Spojené státy americké, 2006 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://www.gore.com/MungoBlobs/868/858/Remedia_brochure-6-01-06.pdf

SKLÁDANKA, Jiří a Jana VRZALOVÁ. Jednoleté pícniny. *Multimediální učební texty pícninářství* [online]. 2006, 14. 7 .2007 [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/picniny/sklady.php?odkaz=hlavni_jednolete.html

Spalovny a ovzduší. *Odpad je energie* [online]. Praha: Steo, 2013 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/ochrana-zp/spalovny-a-ovzdusi/default.aspx>

Spirálové výměníky. *Secespol střední Evropa* [online]. Praha, 2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.secespol.cz/cs/produkty/vymeniky/spiralove/>

STUPAVSKÝ, Vladimír, HOLÝ, Tomáš: Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2013-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>>. ISSN: 1801-2655.

Suché metody odsiřování. *Tenza* [online]. Brno, 2013 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cistení-spalin/suche-metody-odsirovani/>

ŠTĚTINA, Josef. *Termomechanika: Oběhy parních zařízení* [Elektronický učební text]. Brno, 2012 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=90>

ŠTULÍŘ, Roman. *Energie z biomasy* [Tištěný propagační materiál]. Brno, 2010 [cit. 2.4.2013].

ŠTULÍŘ, Roman. *Roční zpráva o řešení projektu v programu IMPULS*, v roce 2007. Brno, 2008.

UCEKAJ, Vladimír, JAROSLAV ORAL a MAREK ŠARLEJ. *Čistá energie z biomasy a odpadů*. Brno, 2011. Firemní dokument.

VALEŠ, Josef, KUSÝ, Jaroslav, ANDĚL, Lukáš, ŠAFÁŘOVÁ, Marcela: Možnosti využití pokrutiny z výroby rostlinného oleje pro energetické účely. *Biom.cz* [online]. 2011-12-28 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-pokrutiny-z-vyroby-rostlinneho-oleje-pro-energeticke-ucely>>. ISSN: 1801-2655.

Vesko-B. *TTS Boilers* [online]. 2012 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/boilers/vesko-b.html>

WITOS, Jindřich. *Obsluha kotlů IV. a III. třídy*. Rožnov pod Radhoštěm: RoVS-Rožnovský vzdělávací servis, 1996.

Seznam použitých zkratek a symbolů

BAT	Best Available Techniques – Nejlepší dostupná technika
BREF	Referenční dokument BAT
BRKO	Biologicky rozložitelné komunální odpady
BUS	Sběrnice – propojovací vedení
CZT	Centrální zásobování teplem
ČSÚ	Český statistický úřad
EVO	Energetické využití odpadů
ORC	Organický Rankinův cyklus
PAC	Powdered Activated Carbon – Práškové aktivní uhlí
PCDD/PCDF	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny/polychlorované dibenzofurany
PLC	Programmable Logic Controller – Programovatelný logický ovladač
PTFE	Polytetrafluorethylen
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektivní katalytická redukce
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction - Selektivní nekatalytická redukce
TUV	Teplá užitková voda
TZL	Tuhé znečišťující látky
VOC	Volatile Organic Compounds – Těkavé organické sloučeniny

h_k	Entalpie kondenzátu
h_n	Entalpie napájecí vody
h_p	Entalpie výstupní páry z kotle
h_t	Teoretická hodnota entalpie páry za turbínou
h_t^*	Skutečná hodnota entalpie páry za turbínou
H_p	Výhřevnost paliva
\dot{m}_p	Celkový hmotnostní tok páry z kotle
\dot{m}_s	Spotřeba paliva
\dot{m}_v	Hmotnostní průtok páry ve výměníku
P'_k	Příkon jednotky
P_e	Elektrický výkon turbíny
P_k	Výkon kotle
P_v	Tepelný výkon výměníku
p_n	Tlak napájecí vody
p_p	Výstupní tlak páry z kotle
p_t	Přetlak v protitlaku za turbínou
t_k	Teplota kondenzátu
t_n	Teplota napájecí vody
t_p	Výstupní teplota páry z kotle
t_t	Teplota páry za turbínou
x_t	Suchost páry za turbínou

η	Účinnost spalovací jednotky
η_e	Účinnost elektrického generátoru s převodovkou
η_t	Termodynamická účinnost parní turbíny

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Seznam dřevozpracujících závodů