

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**MIROSLAV
BABOR**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Babor** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **438339**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Srovnání vlastností různých druhů biomasy a návrh vhodné přípravy paliva před jeho dalším energetickým zpracováním

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of properties of various types of biomass and suitable fuel preparation before its further energy processing

Pokyny pro vypracování:

Porovnejte vlastnosti různých druhů biomasy z hlediska jejího energetického využití.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše dostupných druhů biomasy pro energetické účely a možnosti jejího energetického využití.
2. Popis hlavních zástupců biomasy a jejich vlastností.
3. Srovnání výhřevnosti paliva a účinnosti kotle v závislosti na složení paliva.
4. Vyhodnocení vlivu obsahu vody na vlastnosti paliva a návrh přípravy paliva před jeho dalším energetickým zpracováním.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Havlík, Ph.D., ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


Ing. Jan Havlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

- 2 - 05 - 2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

Miroslav Babor

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat celému Ústavu energetiky a procesní techniky za trpělivost a rady, které mi velice pomohly a byly mi přínosné.

Samozřejmě také bych rád poděkoval za kvalitní vedení a pomoc vedoucímu bakalářské práce J. Havlíkovi.

Anotační list

Jméno autora	Miroslav Babor
Název BP/DP	Srovnání vlastností různých druhů biomasy a návrh vhodné přípravy paliva před jeho dalším energetickým zpracováním
Anglický název:	Comparison of properties of various types of biomass and suitable fuel preparation before its further energy processing
Akademický rok:	2017/2018
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/Energetika a procesní technika
Vedoucí BP/DP:	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Konzultant:	-
Bibliografické údaje:	Počet stran: 47 Počet obrázků: 24 Počet tabulek: 20 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Biomasa, druhy a vlastnosti biomasy, energetické využití biomasy
Keyword:	Biomass, biomass types and properties, energy use of biomass
Anotace:	Práce se zabývá srovnáním různých druhů biomasy, jejich vlastností, způsobu jejich zpracování a případné možnosti jejich dalšího energetického využití se zaměřením na Českou republiku. Dále řeší vliv vlhkosti paliva na efektivitu spalování a to především vliv na výhřevnost paliva a účinnost kotle.
Abstract:	The thesis deals with the comparison of different types of biomass, their properties, the way of their processing and possibilities of their further energy utilization with a focus on the Czech Republic. It further solves the influence of fuel moisture on the combustion efficiency and above all on the fuel heating value and boiler efficiency.

Obsah

1 Seznam symbolů	8
2 Úvod	9
3 Biomasa a její definice.....	10
3.1 Základní podmínky pro vznik biomasy a její energie	11
3.2 Přehled zdrojů biomasy.....	12
4 Obnovitelné zdroje energie v EU a v ČR v číslech	13
4.1 Výroba elektřiny z biomasy v ČR	14
4.2 Výroba tepla z biomasy v ČR	15
5 Popis hlavních druhů energeticky využitelné biomasy	18
5.1 Dřevo a dřevní odpad.....	18
5.2 Spalitelné obilí.....	21
5.3 Organické průmyslové a potravinářské odpady.....	23
5.4 Biomasa záměrně pěstovaná pro energetické účely	24
6 Zpracování biomasy pro energetické účely.....	25
6.1 Možnosti zpracování	25
6.2 Podpora využívání biomasy.....	26
7 Nejvýznamnější zástupci biomasy v ČR a způsob jejich využití.....	27
8 Výpočet výhřevnosti různých druhů paliv a účinnost kotle	30
8.1 Dřevní smrková štěpka (měkké dřevo)	30
8.2 Bukové dřevo (tvrdé dřevo)	35
8.3 Pšeničná sláma	36
8.4 Tráva z pastvin.....	36
8.5 Hnědé uhlí Sokolov	37
8.6 Souhrn výsledků výpočtů	38
9 Vliv obsahu vody v palivu na jeho spalovací vlastnosti	38
10 Návrh přípravy paliva před jeho energetickým využitím	41
10.1 Metody, pomocí kterých lze snížit obsah vody v biomase	41
10.2 Rozdělení sušek.....	41
10.3 Experimentální určení energetické náročnosti nepřímého sušení dřevní štěpky. Sušení štěpky s vysokým obsahem vody	42
11 Závěr:.....	46
12 Zdroje:	47

1 Seznam symbolů

symbol	význam	jednotka
Q_i^r	výhřevnost paliva	J/kg
O_{O_2min}	minimální objem kyslíku pro spálení 1 kg paliva	Nm^3/kg
O_{VSmin}	minimální objem suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva	Nm^3/kg
χ_v	součinitel respektující zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti	–
O_{CO_2}	objem CO_2 v suchých spalinách	Nm^3/kg
O_{SO_2}	objem SO_2 v suchých spalinách	Nm^3/kg
O_{N_2}	objem N v suchých spalinách	Nm^3/kg
O_{Ar}	objem Ar v suchých spalinách	Nm^3/kg
O_{SSmin}	objem suchých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s min. množstvím vzduchu	Nm^3/kg
O_{H_2Os}	objem vodní páry ve spalinách	Nm^3/kg
O_{SVmin}	objem vlhkých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s min. množstvím vzduchu	Nm^3/kg
ρ	relativní vlhkost vzduchu	%
p''	parciální tlak vodní páry na mezi sytosti	Pa
α_h	přebytek vzduchu na hořácích	–
α_k	přebytek vzduchu za kotlem	–
t_{vf}	teplota přisávaného vzduchu	$^{\circ}C$
l_{vf}	entalpie přisávaného vzduchu	J/kg
t_{sk}	teplota spalin za kotlem	$^{\circ}C$
l_{sk}	entalpie spalin za kotlem	J/kg
η_k	účinnost	%
Z_k	ztráta citelným teplem spalin	%
$I_{Sk}^{\alpha_k, t_k}$	entalpie spalin při teplotě t_{sk} a přebytku vzduchu α_k za kotlem	J/kg
I_{stvz}	entalpie vzduchu	J/kg
Z_c	ztráta mechanickým nedopalem	%
Q_c	výhřevnost uhlíku	J/kg
X_i	poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků	–
C_i	obsah uhlíku v tuhých zbytcích	%
Z_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	%
i_i	entalpie tuhých zbytků spalin	J/kg
Z_{CO}	Ztráta hořlavinou ve spalinách	%
mgCO	je emisní limit CO	mg/Nm^3
$O_2 ref$	obsah kyslíku pro referenční stav spalin	%
$Q_i red$	redukovaná výhřevnost paliva	J/kg
Z_{sv}	ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	%
W_r	obsah vody v palivu	–
A_d	obsah popele v sušině	–
C_r	obsah uhlíku v syrovém palivu	–
H_r	obsah vodíku v syrovém palivu	–
N_r	obsah dusíku v syrovém palivu	–
O_r	obsah kyslíku v syrovém palivu	–
S_r	obsah síry v syrovém palivu	–
C_{daf}	obsah uhlíku v suchém stavu	–
H_{daf}	obsah vodíku v suchém stavu	–
N_{daf}	obsah dusíku v suchém stavu	–
O_{daf}	obsah kyslíku v suchém stavu	–
S_{daf}	obsah síry v suchém stavu	–

2 Úvod

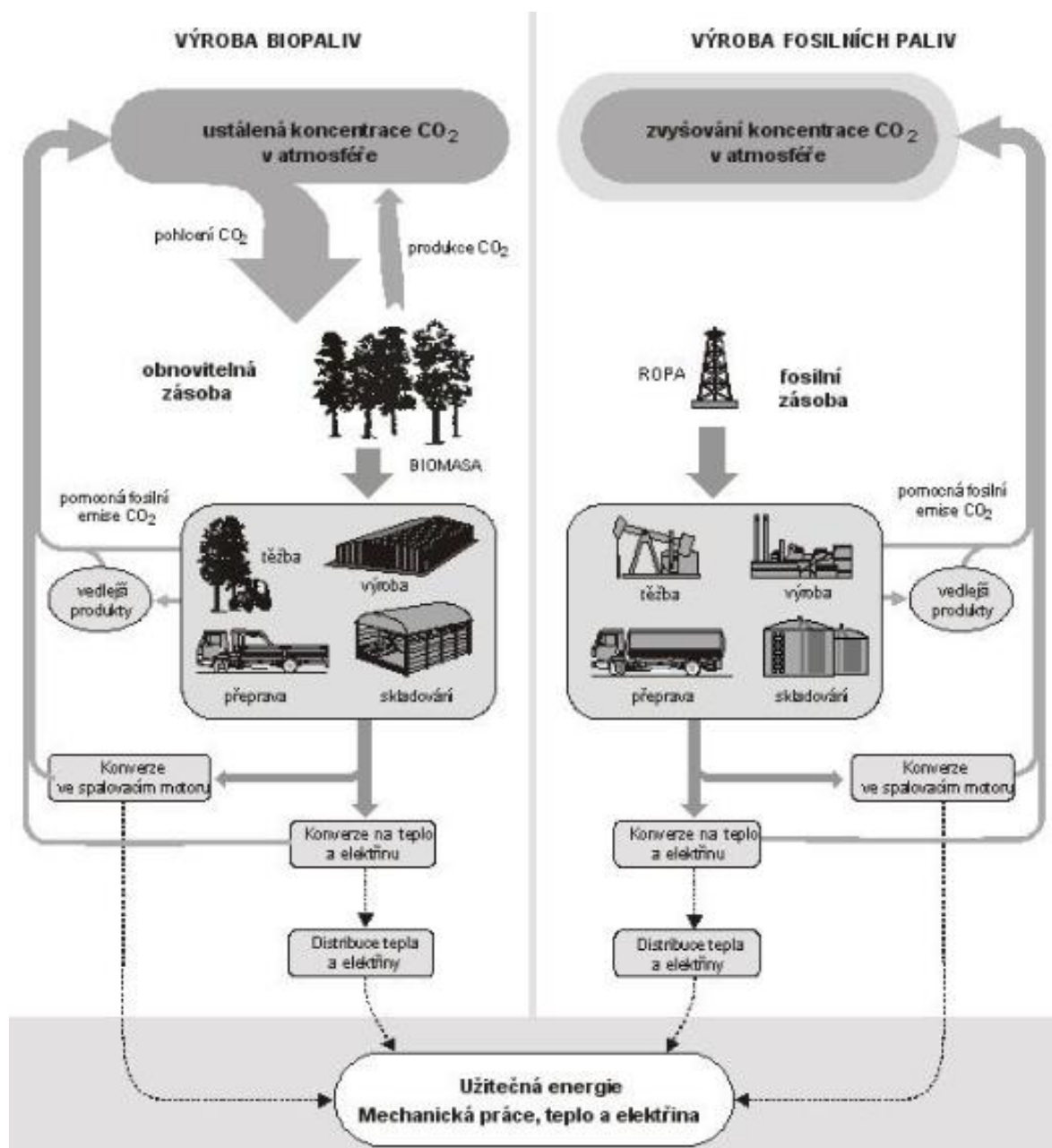
Palivo, které je vyrobeno přímo nebo nepřímo z biomasy se nazývá biopalivo a energie vyprodukovaná z biomasy, tedy z biopaliv je nazývána jako bioenergie. Základní výhodou biomasy je nefosilní původ a především obnovitelnost.

Během posledních dvou století došlo v průmyslovém rozvoji k poměrně intenzivnímu využívání fosilních paliv. Jako příklad lze uvést, že spálením 1 kg černého uhlí vznikne 2,56 kg CO₂, spálením 1 kg motorové nafty se uvolní 3,12 kg CO₂ a 1 m³ zemního plynu 2,75 kg CO₂, což způsobilo zvýšení koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře.

Mnohem příznivěji ovzduší ovlivňují rostliny. Z hlediska emisí oxidu uhličitého, který je základním plynem způsobující skleníkový efekt, se biomasa chová neutrálně, protože rostlina během svého růstu spotřebovává CO₂ z ovzduší.

Rostoucí spotřebu energie vykazují jak země průmyslově vyspělých států, tak země rozvojové. V posledních letech energetika prochází řadou změn. Primární jsou technická a ekonomická kritéria, přičemž v současnosti převládají ta ekonomická. A zároveň se zvyšují nároky na životní prostředí. Lidstvo si čím dál tím více uvědomuje, že primární energie začínají být omezenější a dražší. Při rychlém rozvoji energie je vhodné hledat alternativní možné zdroje. Proto je aktuálním tématem využívání obnovitelných zdrojů energie. Pro podmínky na území naší republiky je jednou z významných možností využívání spalování obnovitelné energetické biomasy.

Ve této práci se zabývám srovnáním různých druhů biomasy jejich vlastností a možností jejich energetického využití. Dále pro nejvýznamnější druhy na našem území řeším vliv vlhkosti paliva na efektivitu spalování. Především jaký vliv má vlhkost paliva na jeho výhřevnost a dále na celkovou účinnost kotle. Pro srovnání jsem provedl výpočet pro několik druhů biomasy a pro jeden druh fosilního paliva a to pro hnědé uhlí. V poslední řadě řeším možnosti přípravy paliva před spalováním a to především jeho sušení.



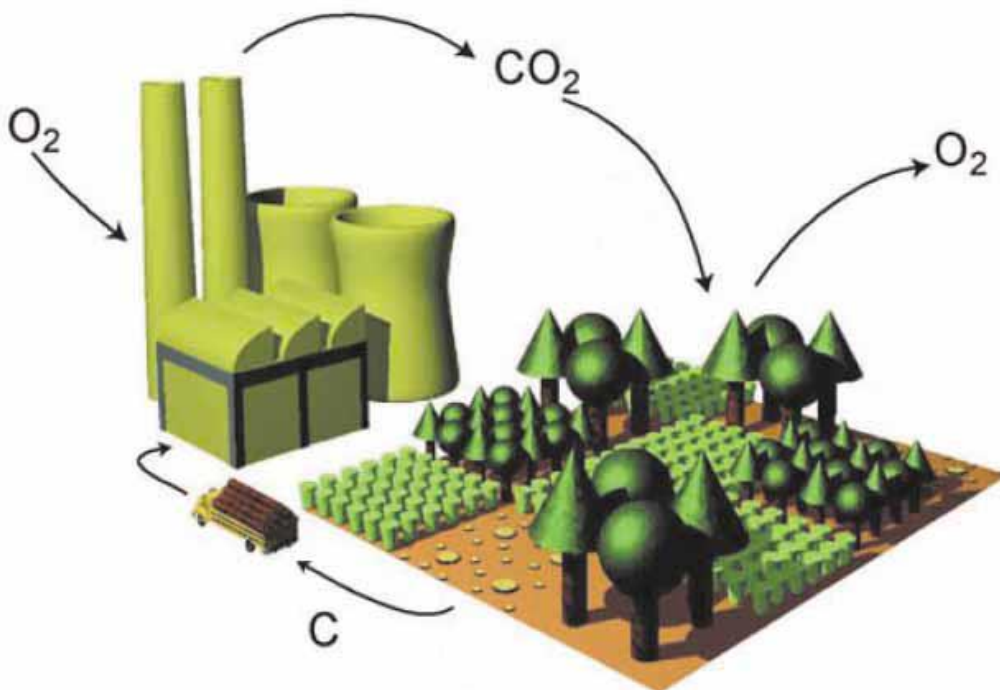
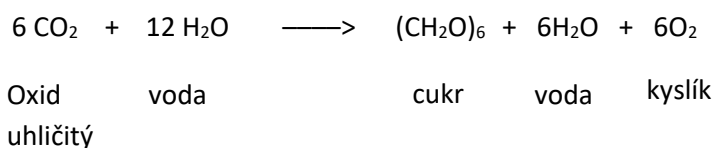
Obrázek č. 1: Srovnání výroby fosilních paliv a biopaliv [5]

3 Biomasa a její definice

Biomasu můžeme definovat jako hmotu organismů na Zemi. Spadají do ní živé, či odumřelé schránky organismů a jejich produkty činností (obaly, exkrementy, semena...). Hlavními producenty biomasy jsou rostliny, které jsou schopny produkovat sacharidy a pak následně bílkoviny na základě využívání světla, které zachycují v zeleném barvivo tzv. chlorofylu. Pro produkci energie lze využít všechny formy biomasy, jelikož stavební jednotkou živé hmoty je uhlík a jeho vazba.

3.1 Základní podmínky pro vznik biomasy a její energie

Na zemském povrchu a v atmosféře koluje oběh prvků a sloučenin, které jsou složeny z chemických prvků. Významné postavení mají především organické sloučeniny. Skládají se z pouhých několika prvků: vodík, dusík, uhlík, fosfor a síra. Jistou roli však mají i Fe, Cu, K, Na...). Trvalý oběh zajišťují biogenní prvky a transformují sluneční energii na chemickou energii, která se využívá jako zdroj pro všechny biochemické procesy. Základní úlohu tvoří fotosyntéza a fotochemické reakce. Při fotosyntéze vzniká z oxidu uhličitého a vody velké množství organických látek za působení chlorofylu, enzymů a světelné energie. Při fotochemických reakcích se oxid uhličitý redukuje na cukry a voda se oxiduje, přičemž vzniká molekulový kyslík. Reakci můžeme popsat jednoduchou chemickou rovnicí:



Obrázek č. 2: Uzavřený cyklus uhlíku při udržitelném energetickém využívání biomasy [5]

Hlavním produktem fotosyntézy je glukóza. Celulóza ($[\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5]_n$), která vzniká polymerací glukózy a je základní stavební látkou dřevin a buněčných stěn rostlin. Z glukózy ovšem v rostlinách vzniká i mnoho dalších látek, které lze využít pro výrobu biopaliv.

3.2 Přehled zdrojů biomasy

Co do energetického využití biomasy a jejich produktů můžeme na našem území využít především zbytky ze zemědělství (zvířecí exkrementy, sláma...), zbytky dřevní hmoty (kůra, větve, pařezy, piliny, odřezky, hobliny...), záměrně pěstované plodiny (energetické rostliny a plodiny, palivové dřevo), nebo separované zbytky biologického odpadu z potravinářského průmyslu a produkty komunálního odpadu.

Tabulka 1: Přehled hlavních zdrojů biomasy v ČR [6]

Sektor	Zdroj	Typ zdroje	Obsah vody (% hm.)	Obsah popele (% sušiny)	Technologie pro přeměnu
Zemědělství	Zbytky a odpady z rostlinné výroby	Suchá lignocelulózová biomasa (sláma, zbytky po lisování olejů, odpadní zno, ekonomicky neprodejné produkty apod.)	10 - 50	2 - 20	Spalování, zplyňování, pyrolýza
	Odpady ze živočišné výroby	Mokrā celulózává biomasa (hnůj, kejda, podestýlka, apod.)	70 - 95	25 - 35	Anaerobní digesce
		Suchá lignocelulózová biomasa (drůbeží trus, zbytky krmiv apod.)	75	17 - 30	Spalování, zplyňování, pyrolýza
	Energetické plodiny	Plody/semena olejnin (řepka, slunečnice, len apod.)	-	< 0,02	Lisování + výroba metylesteru
		Cukernaté a škrobnaté plodiny (cukrová řepa, obilniny, brambory apod.)	-	< 0,02	Fermentace (výroba bioetanolu)
	Energetické byliny a dřeviny	Suchá lignocelulózová biomasa (topol, olše, akát, šřovík, konopí, komonice bílá, amaranthus apod.)	12,5 - 50	0,2 - 8	Spalování, zplyňování, pyrolýza
Odpadní travní hmota	Mokrā celulózává biomasa (tráva z údržby trvale zatravněných ploch apod.)	75 - 80	7-10	Anaerobní digesce	
	Odpadní dřevní hmota	Suchá lignocelulózová biomasa (zbytky po likvidaci křovin a náletů, odpady ze sadů a vinic)	25 - 50	1 - 10	Spalování, zplyňování, pyrolýza
Lesnictví	Palivové dřevo	Suchá lignocelulózová biomasa	25 - 50	0,4 - 5	Spalování, zplyňování, pyrolýza
	Zbytky a odpady z lesnictví	Suchá lignocelulózová biomasa (větve, kůra, pařezy, probírkové dřevo, manipulační odřezky apod.)	25 - 50	0,4 - 5	Spalování, zplyňování, pyrolýza
Průmysl	Zbytky a odpady z průmyslu	Suchá lignocelulózová biomasa (zbytky z dřevařského průmyslu - piliny, hobliny, odřezky apod.)	10 - 30	0,2 - 20	Spalování, zplyňování, pyrolýza
		Mokrā celulózává biomasa (organický odpad z potravinářství - jatka, mlékárny, lihovary, pivovary apod.)	70 - 95	3 - 6	Anaerobní digesce
		Sulfátové výluhy (odpad z papírenství)	90	35-40	Spalování
Odpadové hospodářství	Tuhý komunální odpad	Dřevo z demolice a sběrných dvorů	10 - 40	0,5 - 3	Spalování, zplyňování
		Směsný komunální odpad	20 - 30	20 - 50	Spalování, zplyňování
		Odpad na skládkách	20 - 30	20 - 50	Anaerobní digesce (na skládce)
		Separovaný BRKO	30 - 50	5 - 30	Anaerobní digesce
	Čištění odpadních vod	Čistírenský kal (komunální a průmyslové ČOV)	70 - 95	20 - 30	Anaerobní digesce
Údržba veřejné a soukromé zeleně	Odpadní dřevní hmota	Suchá lignocelulózová biomasa (dřevo z údržby parků, zahrad, ochranných pásem, břehových porostů apod.)	25 - 50	1 - 10	Spalování, zplyňování, pyrolýza
	Odpadní travní hmota	Mokrā celulózává biomasa (tráva z údržby parků, zahrad, zatravněných ploch)	75 - 80	7-10	Anaerobní digesce

Biomasu lze rozdělit:

a) dle původu

- **Fytomasa:** biomasa rostlinného původu
- **Zoobiomasa:** biomasa živočišného původu
- **Dendromasa:** biomasa lesního původu

b) dle obsahu vody

- **Mokrā:** zahrnuje tekuté odpady např. ze živočišné výroby a komunální odpad. Využívá se bioplynových technologiích, jelikož ji nelze spalovat přímo.
- **Suchā:** spadají sem suché zbytky zemědělských plodin, lesnictví, průmysl, sláma a dřevo. Lze využít k přímému spalování.
- **Speciální:** cukernaté a škrobové plodiny, olejniny. Využívají se pro získání bionafty nebo lihu.

c) Biomasa pěstovaná pro energetické účely

- Rychle rostoucí dřeviny
- rostliny bylinného charakteru
- travní porosty
- obiloviny
- olejnaté rostliny
- škrobo-cukernaté rostliny

d) Odpadní biomasa

- z rostlinné výroby
- z živočišné výroby
- z těžby a zpracování dřeva a lesní odpady
- biologicky rozložitelný komunální odpad
- biologicky rozložitelný průmyslový odpad
- splašky z kanalizace

4 Obnovitelné zdroje energie v EU a v ČR v číslech

Podíl obnovitelných zdrojů energie na produkci elektřiny a tepla se za poslední deset let téměř zdvojnásobil. Výrazný podíl na tom má růst využití energie z biomasy, jejíž role při plnění cílů EU 2020 je zásadní. Do roku 2020 by biomasa měla zajišťovat polovinu energie vyrobené z OZE. Podíl OZE by v EU měl dosáhnout na 20 % veškeré produkce energií. V roce 2014 bioenergie v EU představovala již 61 % (107,212 ktoe – jednotka ropného ekvivalentu) spotřeby energie z OZE, s celkovým 10% podílem na hrubé konečné spotřebě energie v Evropě. [3]

Podíl biomasy v EU a v ČR:

- Bioenergie je současným vedoucím obnovitelným zdrojem pro vytápění a chlazení (88%). Představuje 16 % z celkové hrubé konečné spotřeby v EU pro tyto účely.
- Spotřeba v průmyslu (26,6 %) a výroba tepla (15,8 %) čítá dohromady okolo 40 % spotřeby biomasy v sektoru tepla.
- V roce 2014 bylo 73 % (76,998 ktoe) spotřeby bioenergie v Evropě využito na vytápění. Výroba elektřiny z biomasy čítala 14 % (14,349 ktoe) a biopaliva představovala zbývajících 13 % (14,141 ktoe) celkové spotřeby bioenergie v Evropě.
- Biomasa je nejvýznamnějším obnovitelným zdrojem energie v EU. Její největší podíl v národním energetickém mixu má Švédsko (60 %), Finsko (90 %) a Litva (80 %).
- Německo je největším producentem obnovitelného tepla v Evropě s 11,1 Mtoe, reprezentující 14% podíl. Následuje Švédsko s 8,8 Mtoe a Francie produkující 7,0 Mtoe tepla z OZE.
- Spotřeba tepla v ČR v roce 2014 činila 12,611 ktoe celkové spotřeby a s 2,112 ktoe se na produkci tepla podílely OZE. Teplo z OZE tak činilo 16,75 % z celkové produkce tepla.
- Podíl biomasy na produkci tepla pro vytápění a chlazení v ČR v roce 2014 byl 15,9 %.

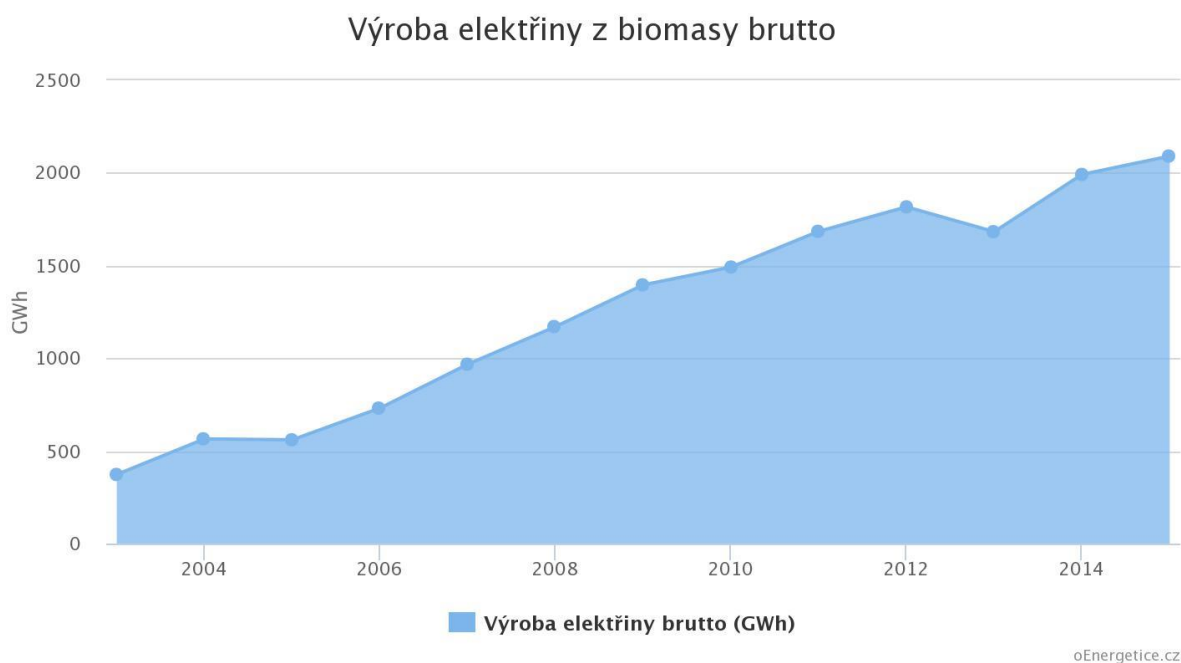
[3]

Tabulka 2: Celková energie z obnovitelných zdrojů v ČR v roce 2015 [3].

	Energie z OZE celkem (GJ)	Odhad podíl na PEZ (%)	Podíl na energii z OZE (%)
Biomasa (mimo domácnosti)	46 922 484	2,7%	25,6%
Biomasa (domácnosti)	73 398 454	4,2%	40,1%
Vodní elektrárny	6 461 305	0,4%	3,5%
Bioplyn	25 663 773	1,5%	14,0%
Komunální odpad (BRKO)	3 341 604	0,2%	1,8%
Kapalná biopaliva	12 435 671	0,7%	6,8%
Tepelná čerpadla	3 809 777	0,2%	2,1%
Solární termální systémy	741 779	0,0%	0,4%
Větrné elektrárny	2 061 403	0,1%	1,1%
Fotovoltaické elektrárny	8 149 846	0,5%	4,5%
Celkem	182 986 096	10,49%	100,0%

4.1 Výroba elektřiny z biomasy v ČR

V roce 2015 bylo podle statistiky Ministerstva průmyslu a obchodu vyrobeno z biomasy 2 090 GWh elektřiny, což je asi 2,5 % celkové hrubé výroby elektřiny v ČR. Zhruba polovina tohoto množství elektřiny byla vyrobena spálením dřevního odpadu, štěpky, kůry apod. (1 062 GWh), 688 GWh elektřiny bylo vyrobeno spálením celulóзовých výluhů a 341 GWh spálením rostlinných materiálů. [6]



Obrázek č. 3: Výroba elektřiny z biomasy v ČR [6]

Tabulka 3: Výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů v roce 2015 [16]

	Hrubá výroba elektřiny (MWh)	Podíl na elektřině z OZE (%)	Podíl na hrubé výrobě elektřiny (%)
Vodní elektrárny	1 794 807	19,05%	2,14%
MVE < 1 MW	445 888	4,73%	0,53%
MVE 1 až < 10 MW	555 909	5,90%	0,66%
VVE ≥ 10 MW	793 010	8,42%	0,95%
Biomasa celkem	2 091 495	22,19%	2,49%
Palivové dříví	268	0,00%	0,00%
Štěpka apod.	1 064 771	11,30%	1,27%
Celulóznové výluhy	687 784	7,30%	0,82%
Neaglom. rostlinné materiály	100 042	1,06%	0,12%
Pelety a brikety	236 546	2,51%	0,28%
Ostatní biomasa	0	0,00%	0,00%
Kapalná biopaliva	2 083	0,02%	0,00%
Bioplyn celkem	2 614 065	27,74%	3,12%
Komunální ČOV	86 878	0,92%	0,10%
Průmyslové ČOV	16 537	0,18%	0,02%
Bioplynové stanice	2 411 843	25,59%	2,88%
Skládkový plyn	98 808	1,05%	0,12%
Biologicky rozložitelná část TKO	86 652	0,92%	0,10%
Větrné elektrárny	572 612	6,08%	0,68%
Fotovoltaické elektrárny	2 263 846	24,02%	2,70%
Celkem	9 423 476	100,00%	11,23%

Tabulka 4: Výroba elektřiny z biomasy podle jejich typů v roce 2015 [16]

	Počet respondentů	Výroba elektřiny (MWh)	Vlastní spotřeba a ztráty (MWh)	Prodej elektřiny (MWh)	Spotřeba paliva (t)
Palivové dřevo	2	268,25	153,59	114,66	269,35
Dř. štěpka, odpad	40	1 064 770,60	249 450,62	815 319,98	990 706,26
Celulóznové výluhy	2	687 784,47	561 113,42	126 671,05	357 432,60
Rostlinné materiály	7	100 042,13	7 083,56	92 958,57	90 593,96
Brikety a pelety	11	236 545,80	46 104,67	190 441,13	163 801,74
Ostatní biomasa	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Kapalná biopaliva	10	2 083,26	941,15	1 142,11	381,84
Celkem	61	2 091 494,51	864 847,01	1 226 647,50	1 603 185,75

4.2 Výroba tepla z biomasy v ČR

Současný trend výroby tepla z biomasy je v České republice rostoucí. Nejvíce tepla se vyrobí z palivového dřeva a dřevní štěpky. Palivové dřevo je jedním z hlavních zdrojů tepla především v domácnostech, a to zejména na vesnicích, kde je pro velké množství lidí snadno dostupné.

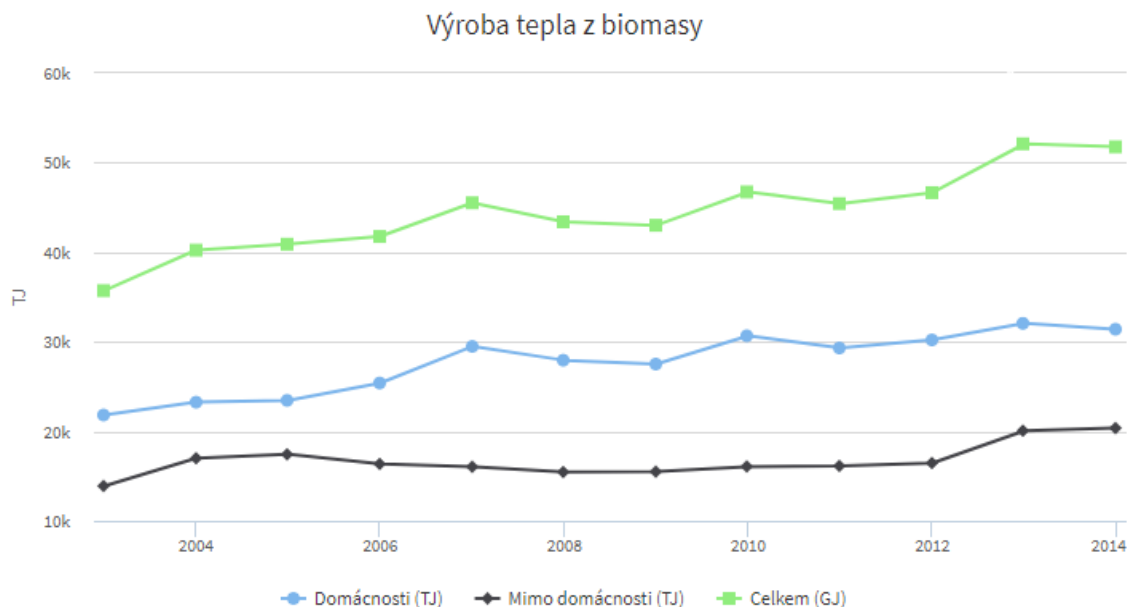
Tabulka 5: Výroba tepla z biomasy v ČR v letech 2013 - 2014 [6]

rok	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Domácnosti (PJ)	21,82	23,25	23,46	25,39	29,48	27,94	27,51	30,67	29,30	30,21	32,05	31,40
Spotřeba domácnosti (tis. t)	2 653	2 827	2 852	3 088	3 585	3 397	3 345	3 730	3 564	3 673	3 897	3 818
Mimo domácnosti (PJ)	13,89	16,98	17,44	16,37	16,04	15,46	15,50	16,07	16,13	16,45	20,05	20,37
Spotřeba mimo domácnosti (tis. t)	1 690	1 777	1 967	1 840	1 916	1 885	1 855	1 964	1 937	2 047	2 436	2 549
Celkem (PJ)	35,71	40,23	40,89	41,76	45,52	43,40	43,01	46,74	45,44	46,65	52,10	51,77
Spotřeba celkem (tis. t)	4 343	4 605	4 819	4 927	5 501	5 282	5 200	5 693	5 501	5 721	6 333	6 368

Z tabulky je patrné, že od roku 2003 do roku 2014 potřeba a tudíž i spotřeba tepla plynule stoupala.

Nedá se ovšem předpokládat, že spotřeba tepla by měla dále rostoucí tendenci. Především kvůli dnešním nízkoenergetickým stavbám a postupnému zateplování budov.

V grafu níže můžeme vidět podíl výroby tepla v domácnosti a mimo domácnost v letech 2004 až 2014.



Obrázek č. 4: Výroba tepla z biomasy v ČR [6]

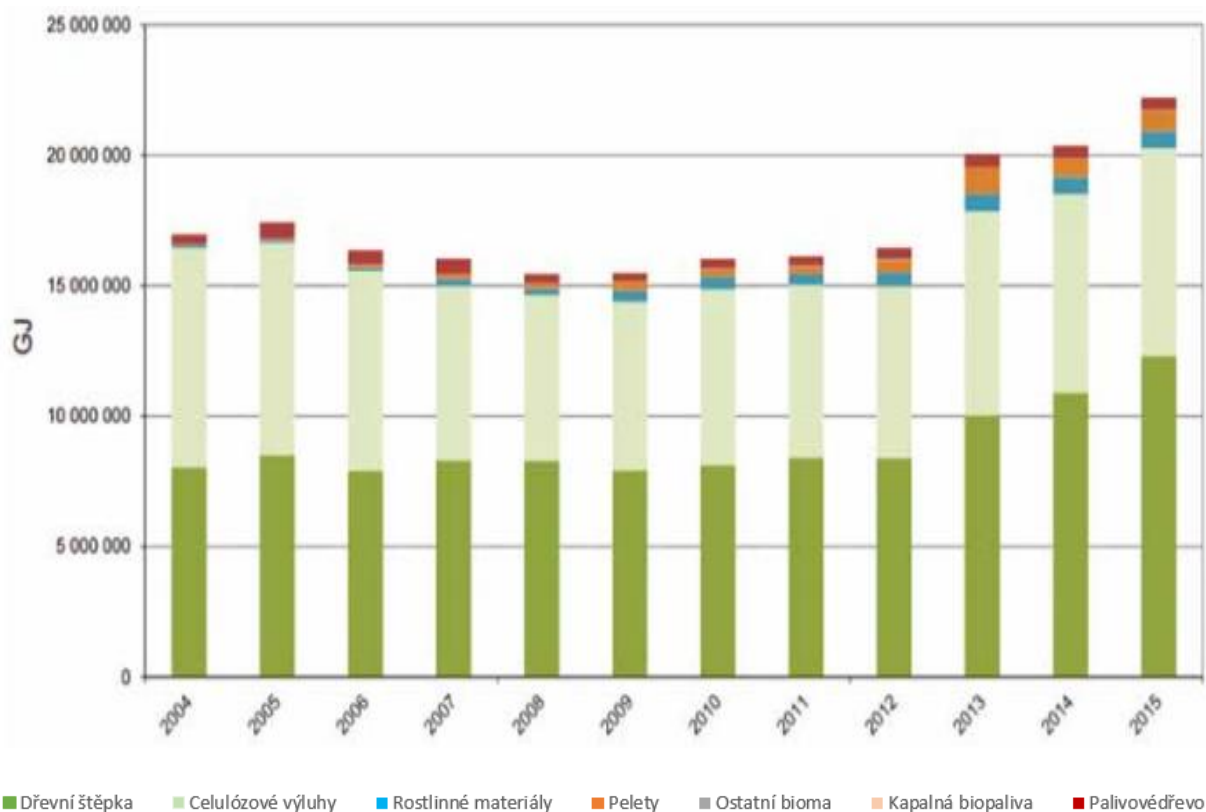
Tabulka 6: Výroba tepla z obnovitelných zdrojů v roce 2015 [16]

	Hrubá výroba tepla (GJ)	Podíl na teple z OZE (%)
Biomasa celkem	77 263 689	87,5%
Biomasa mimo domácnosti	22 214 848	25,2%
Palivové dřevo	477 674	0,5%
Štěpka apod.	12 313 628	13,9%
Celulóznové výluhy	7 962 885	9,0%
Neaglom. rostlinné materiály	654 398	0,7%
Brikety a pelety	801 131	0,9%
Ostatní biomasa	0	0,0%
Kapalná biopaliva	5 132	0,0%
Biomasa domácnosti	55 048 841	62,4%
Bioplyn celkem	4 158 488	4,7%
Komunální ČOV	617 838	0,7%
Průmyslové ČOV	218 717	0,2%
Bioplynové stanice	3 239 708	3,7%
Skládkový plyn	82 226	0,1%
Biologicky rozložitelná část TKO	2 306 933	2,6%
Tepelná čerp. (teplo prostředí)	3 809 777	4,3%
Solární termální systémy	741 779	0,8%
Celkem	88 280 666	100,0%

V tabulce si můžeme všimnout, že v domácnostech se vyrobí více jak dvojnásobek tepla oproti teplu vyrobenému mimo domácnosti. Mimo domácnosti dominuje dřevní štěpka. V domácnostech to je palivové dřevo.

Tabulka 7: Výroba tepelné energie z biomasy podle jejich typů v roce 2015 (bez domácností a drobných spotřebitelů) [16]

Palivo	Počet respondentů	Hrubá výroba tepla (GJ)	Vlastní spotřeba a ztráty (GJ)	Prodej tepla (GJ)	Spotřeba paliva (t)
Palivové dřevo	570	477 673,54	477 673,54	0,00	43 379,10
Dř. štěpka, odpad	624	12 313 627,93	8 417 843,66	3 895 784,27	1 492 231,39
Celulóznové výluhy	2	7 962 884,80	7 359 857,00	603 027,80	1 073 319,50
Rostlinné materiály	81	654 398,17	254 550,65	399 847,52	58 778,08
Brikety a pelety	255	801 131,08	227 496,80	573 634,28	58 327,11
Ostatní biomasa	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Kapalná biopaliva	8	5 132,16	3 491,71	1 640,45	190,59
Celkem	1 314	22 214 847,69	16 740 913,37	5 473 934,32	2 726 225,77



Obrázek č. 5: Vývoj výroby tepla z biomasy v ČR [3].

5 Popis hlavních druhů energeticky využitelné biomasy

5.1 Dřevo a dřevní odpad

Dřevo je velmi oblíbeným zdrojem především díky snadné dostupnosti, skladování a poměrně nízké ceně. Navíc je to šetrnější zdroj energie než například fosilní paliva. Při spalování dřeva se vyprodukuje tolik CO_2 , kolik během růstu rostliny spotřebovala fotosyntéza. V lesích na celé zemi je naakumulováno cca 550 miliard tun uhlíku.

Pro energetické využití získáváme dřevo a dřevní odpad ve formě palivového dřeva, pilin, hoblin, zbytků ze zpracoven a odpadní dendromasy. Odpadní dendromasa je produktem lesní těžby a zahrnuje pařezy, větve a odřezky.

Palivové dřevo

Palivové dřevo se po těžbě převážně k dalšímu zpracování ve formě dlouhých kmenů nebo polen. Palivové dřevo jakožto produkt lesní těžby dělíme na měkké a tvrdé. Až na několik výjimek tvrdé dřevo nepodléhá tak snadno hnilobě jako měkké dřevo.

Naprostá většina tvrdého dřeva pochází z listnatých stromů. Řadí se tam stromy jako dub, buk, ořech, třešeň, jablň, jasan, švestka, hrušeň, habr, akát, eben cejlonský, africký grenadil, duajak, jiné exotické dřeviny... Z jehličnatých stromů považujeme za tvrdé dřevo douglasky, tis a u nás hojně zastoupené borovice rostoucí především v písčitém prostředí. Na našem území je to dominantní strom v okolí pískoven.

Mezi zástupce měkkého dřeva patří smrk, borovice, limba, jedle, topoly, vrby, lípy, modřín, douglaska, kleč, jalovec, bříza, olše, jíva, střemcha, teak.

Tabulka 8: Tvrdost palivového dřeva [7]

Tvrdost	kg/cm ²	Druh
1.tvrdost (velmi měkká)	0-350	smrk, borovice, limba, jedle, topoly, vrby, lípy
2.tvrdost (měkká)	351-500	modřín, douglaska, kleč, jalovec, bříza, olše, jíva, střemcha, teak
3.tvrdost (středně tvrdá)	501-650	kaštan jedlý, platan, jilmy, líska
4.tvrdost (tvrdá)	651-1000	dub, ořešák, třešeň, jabloň, jasan, buk, hrušeň, švestka, akát, habr
5.tvrdost (velmi tvrdá)	1001-1500	dřín, svída, ptačí zob, dub pýřitý, zimostráz
6.tvrdost (neobyčejně tvrdá)	nad 1501	eben cejlonský, africký grenadil, duajak a jiné exotické dřeviny

Vzhledem ke specifickému způsobu hoření a různé výhřevnosti je pro krby a kamna vhodné tvrdé dřevo a pro kotle zase měkké.



Obrázek č. 6: Možnosti využití biomasy [8]

Měření dřeva

Množství dřeva se udává v prostorových mírách. Dlouhé kmeny uvádíme m³ (kubík), pro palivové dřevo se zavedla jednotka prostorový metr rovnaný (Prmr), což je prostor 1×1×1 m vyskládaných polen a štípaného dříví. Jednotka se zavedla, aby se nezanedbávala mezerovitost mezi jednotlivými kusy dřeva. Také se používá prostorový metr sypaný (Prms). Prms je volně vysypaný prostor 1×1×1 m dřevem.

Výhřevnost

Z energetického hlediska je výhřevnost nejvýznamnějším faktorem. Výhřevnost dřeva nám říká, kolik energie, či tepla se uvolní, pokud je úplně spálen 1 kg dřeva. Dá se říci, že hodnota výhřevnosti je u všech druhů dřeva stejná, ale rozdílné je množství, tedy objem, který spotřebujeme pro získání stejného množství energie. Měkké dřevo bývá lehčí, takže je ho do kila více nežli těžšího tvrdého dřeva. A abychom docílili stejné hodnoty výhřevnosti, je potřeba spálit měkkého dřeva více než tvrdého. U výhřevnosti dřeva musíme také zohledňovat míru vlhkosti. Suché dřevo může mít až dvojnásobnou výhřevnost oproti stejnému množství vlhkého (v m³, nikoli v kg).

Výhřevnost palivového dříví je ve srovnání s ostatními palivy poměrně vysoká. Při efektivním topení může nahradit jiná, dražší paliva (např. 1 Prmr suchého tvrdého dřeva nahradí 5 q koksu či 200 litrů topného oleje).

Tabulka 9: Výhřevnost jednotlivých dřevin [9]

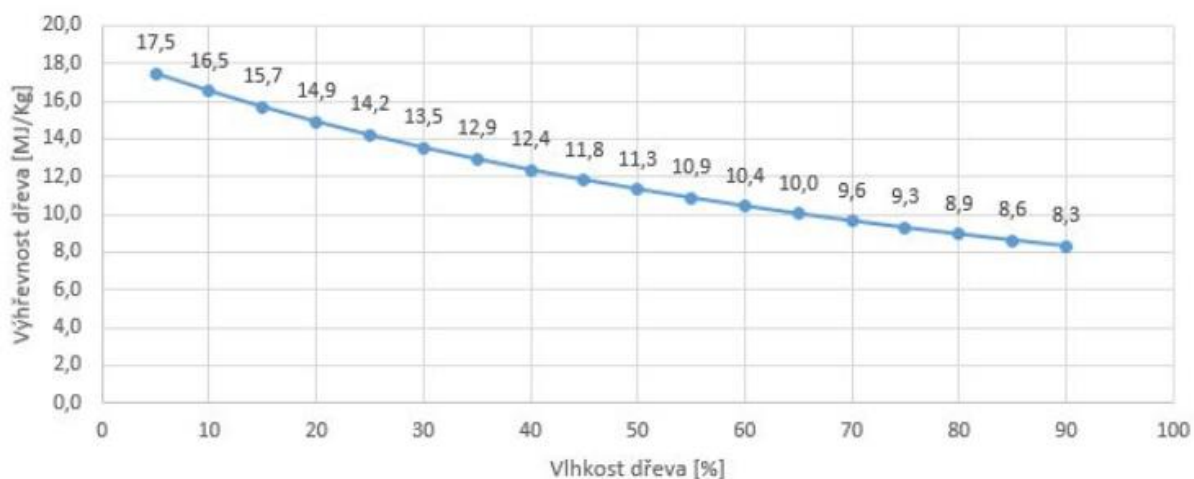
Typ dřeva	kWh/prm	kWh/kg
javor	1900	4,1
bříza	1900	4,3
dub	2100	4,2
olše	1500	4,1
jasan	2100	4,2
smrk	1600	4,4
borovice	1700	4,4
modřín	1700	4,4
topol	1400	4,2
buk	2100	4,2
habr	2200	4,2
jedle	1500	4,4

Výhřevnost palivového dřeva spočteme pomocí vzorce:

$$H = \frac{18500 - 30w}{100 + w} \times 100$$

H = výhřevnost palivového dřeva v kJ/kg

w = vlhkost dřeva



Obrázek č. 7: Výhřevnost dřeva v závislosti na vlhkosti [10]

Tabulka 10: Vliv vlhkosti dřeva na výhřevnost a měrnou hmotnost [7]

Druh paliva	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]	Objemová hmotnost volně ložená [kg/m ³]
Poleno (měkké dřevo)	0	18,56	355
	10	16,40	375
	20	14,28	400
	30	12,18	425
	40	10,10	450
	50	8,1	530
Dřevní štěpka	10	16,40	170
	20	14,28	190
	30	12,18	210
	40	10,10	225

5.2 Spalitelné obilí

Spalitelným obilím se myslí zemědělské sklizňové zbytky, zejména pak obilná a řepková sláma. Dříve se část obilné slámy používala jako stelivo pro hospodářská zvířata a ostatní sláma se zpět zaorávala jako hnojivo. Dnes je nadbytečná sláma často brána jako dobré, dostupné a relativně levné palivo. V našich podnebních podmínkách se k energetickému využití používá sláma pšenice, žita, ječmene, ovesa, kukuřice a řepky olejné.

Tabulka 11: Poměr zrna ke slámě [11]

Plodina	Poměr zrno:sláma
Pšenice	1:1,85
Žito	1:1,7
Ječmen	1:0,8
Oves	1:1,4
Kukuřice	1:1,2
Řepka olejná	1:1,2 až 1,8



Obrázek č. 8: Svoz balíků slámy [12]

V České republice obiloviny zaujímají 52 % plochy zemědělské půdy, což se zdá být jako zdroj poměrně velkého potenciálu pro získání energie z obilné slámy. Plnému využití tohoto potenciálu však brání mnoho překážek. Nejvýznamnějším problémem využívání slámy pro energetické účely je postupné znekvětňování orné půdy v důsledku většího odběru živin z půdy. To pro zemědělce znamená v dalších letech větší investice do hnojiv, aby vykompenzovali chybějící živiny v orné půdě. Z toho plyne, že sláma se pro energetické účely nenechá využít z daného pole každoročně, což ve finále signalizuje, že reálný potenciál se pohybuje od 7 % do 20 % roční produkce slámy.

Dnes se slisovaná sláma také používá ve stavebnictví jako izolační materiál u dřevostaveb.



Obrázek č. 9: Dřevěná konstrukce zateplená slámou [13]

5.3 Organické průmyslové a potravinářské odpady

Tyto odpady se využívají pro výrobu bioplynu pomocí anaerobní fermentace. Do této skupiny odpadů řadíme:

- Komunální a průmyslové odpady, zpracovávané v čistírnách odpadních vod
- Komunální a průmyslové tuhé odpady uložené na skládkách
- Slamný kravský hnůj, jateční odpady, exkrementy z velkochovů vepřů a drůbeže odpady potravinářské výroby a speciálně pěstované trávy



Obrázek č. 10: Čistírna odpadních vod [14]

5.4 Biomasa záměrně pěstovaná pro energetické účely

Poměrně novým odvětvím je záměrné pěstování biomasy na zemědělské půdě pro energetické využití. Jsou to druhy bylin, či dřevin schopných velkého výnosu nadzemní biomasy.

Záměrné pěstování rostlin pro energetickou biomasu má stále větší význam. Poměrně známé jsou plantáže rychle rostoucích dřevin, které jsou i u nás zakládány, ale jsou rozšířeny hlavně v zahraničí. Méně známé jsou energetické rostliny bylinného charakteru. Pro přímé spalování jsou efektivní rostliny, které dosahují výnosu kolem 10 t suché hmoty z 1 ha.

Pěstování rostlin k energetickým účelům začalo s jednoletými plodinami. Postupně se začaly pěstovat především rostliny víceleté a zejména vytrvalé. Na základě výsledků z pokusů rostlinné výroby byly později vybrány perspektivní druhy energetických bylin, které byly i podkladem pro podporu jejich pěstování pro zemědělce. Záměrně pěstované rostliny a dřeviny pro energetické účely dělíme na:

Jednoleté až dvouleté:

Laskavec, konopí seté, světlice barvířská, sléz přeslenitý, komonice bílá, pupalka dvouletá, hořčice sarepská

Víceleté a vytrvalé (dvouděložné):

mužák prorostlý, jestřabina východní, topinambur, čičorka pestrá, šťovík krmný, sléz vytrvalý, oman pravý, bělotrn kulatohlavý

Energetické trávy:

sveřep bezbranný, sveřep horský (samužníkovitý), psineček veliký, lesknice (chrastice) rákosovitá, kostřava rákosovitá, ovsík vyvýšený, ozdobnice čínská (sloní tráva)



Obrázek č. 11: Pěstování krmného šťovíku [15]

Z těchto rostlin jsou nejdůležitější rostliny víceleté a vytrvalé. Jejich hlavní výhodou je snížení nákladů na pěstování oproti jednoletým či dvouletým rostlinám. Velký význam mají také vysoce vzrůstné trávy. Ze seznamu vytrvalých rostlin je nejvíce propracovaný krmný šťovík, který se jeví jako nejperspektivnější. Tato plodina je krmivářsky vysoce kvalitní a lze ji sklízet na zeleno 3 až 5x do roka, a dorůstá do výšky až 2,5 m. Biomasu šťovíku, stejně jako jiných energetických rostlin (bylin) lze využívat nejen v suchém stavu k přímému spalování, ale rovněž jako přísada do fermentoru, pro výrobu bioplynu. Během posledních 3 let bylo v ČR zaseto již téměř 1000 ha této energetické plodiny.

Tabulka 12: Výsledky měření spalování různých druhů biomasy v kotli Golem 1800

palivo	teplota v komíně	výkon kotle
dřevo	230 °C	1800 KW
šťovík	225 °C	1900 KW
sláma	180 °C	1400 KW

Z výsledků vyplývá, že šťovík se chová jednoznačně jako velice kvalitní palivo a oproti slámě dosahuje vyššího výkonu a lepšího spalování. Vykazuje lepší vlastnosti při drcení na rozdrůžovadle a je křehčí a vhodnější pro šnekovou dopravu. Neucpává šneky a je dobře spalitelný i při vyšší vlhkosti cca do 30 % (při zachování kvality spalování). Sláma je spalitelná do 20 % vlhkosti.

6 Zpracování biomasy pro energetické účely

Energii z biomasy můžeme získávat převážně spalováním (termo-chemickou přeměnou). Biomasu v závislosti na druhu spalujeme buďto přímo, nebo její plynné či kapalné produkty. Od toho se odvíjejí základní technologie zpracování a přípravy ke spalování. [3]

6.1 Možnosti zpracování

Mechanická úprava

Mechanickými procesy biomasu upravujeme do předfinální, či finální podoby. Biomasa se upravuje především kvůli přepravě a následnému získání energie. Přeprava biomasy ovšem na větší vzdálenosti není příliš ekonomicky efektivní. Mezi mechanické úpravy patří řezání, drcení, štěpkování, lisování briket či pelet a lisování oleje (výroba metylesteu).

Termické procesy

- **Spalování** – je chemický proces rychlé oxidace, kterým se uvolňuje chemická energie vázaná ve spalovaném palivu na energii tepelnou. Jedná se o nejjednodušší metodu pro termickou přeměnu organických (fosilních i obnovitelných) paliv za dostatečného přístupu kyslíku na tepelnou energii.
- **Karbonizace** – jde o nejstarší metodu zušlechťování dřeva pro energetické účely. Dříve se využíval tepelný rozklad bez přístupu vzduchu, který byl méně hospodárný a ekologicky vhodný jako dnes využívaná metoda suché destilace v karbonizačních pecích a retortách.
- **Pyrolýza** – neboli termický rozklad organických látek bez přístupu vzduchu. Biomasa se ohřívá nad mez termické stability organických sloučenin. Ty jsou štěpeny na nízkomolekulární sloučeniny. Touto metodou je možné využít komunálního odpadu, papíru, pneumatik a plastů, jako jsou polyetylen, polystyren či PVC, k výrobě biooleje.
- **Zplyňování** – tato metoda využívá slámy, palivového nebo odpadního dřeva k jejich přeměně na plynné produkty. Tímto produktem je generátorový plyn, využívaný jako palivo pro vozidla, či k výrobě elektřiny a tepla.

Biochemické a chemické přeměny

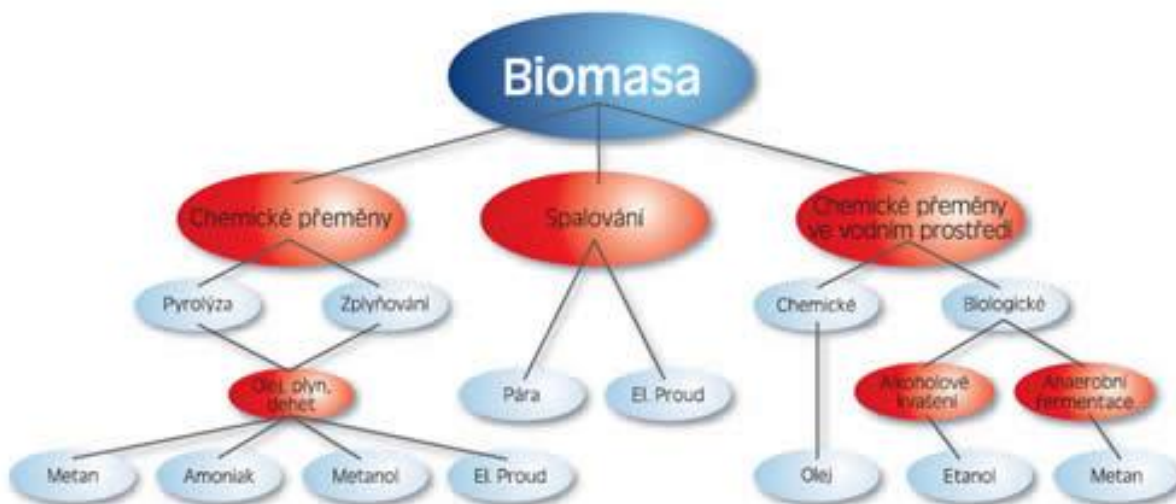
- **Alkoholová kvašení** – získávání vysokoprocenního ethanolu organickou fermentací v mokřím prostředí a následnou destilací. Ethanol se poté využívá jako ekologické palivo pro

spalovací motory. Pro představu: Z kilogramu cukru lze teoreticky získat 0,65 litru čistého ethanolu.

- **Metanové kvašení** – je proces, při kterém se získává bioplyn anaerobní fermentací odpadních vod a zvířecích exkrementů za nepřístupu vzduchu při teplotě 35-45 °C. Bioplyn je směs plynů obsahující 50-75 % metanu, 25-40 % oxidu uhličitého a další plyny.
- **Esterifikace surových olejů** - vylisovaný olej z olejnatých rostlin se substitucí metylalkoholu za glycerin mění na metylester, který se vyznačuje podobnými vlastnostmi a výhřevností jako motorová nafta.
-

Tabulka 13: Technologie zpracování biomasy [4]

thermo-chemická přeměna	pyrolýza (produkce plynu, oleje)
	zplyňování (produkce plynu)
bio-chemická	fermentace, alkoholové kvašení (produkce etanolu)
	anaerobní vyhnívání, metanové kvašení (produkce bioplynu)
mechanicko-chemická přeměna	lisování olejů (produkce kapalných paliv, oleje)
	esterifikace surových bio-olejů (výroba bionafty a přírodních maziv)
	štípání, drcení, lisování, peletace, mletí (výroba pevných paliv)



Obrázek č. 12: Možnosti využití biomasy [4]

6.2 Podpora využívání biomasy

- 1) Z hlediska politické podpory ve vztahu k OZE (obnovitelný zdroj energie)
- 2) Z hlediska legislativní podpory ve vztahu k OZE

Klíčovým politickým dokumentem pro diskusi je Bílá kniha, „Energie pro budoucnost – obnovitelné zdroje energie“. Tato kniha pochází z roku 1997, kde je definován cíl zvýšit podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé domácí spotřebě energetických zdrojů. Je uveden i plán, jak tento ambiciózní cíl uskutečnit.

Nejdále je sektor výroby elektrické energie, z hlediska platné evropské legislativy, kde v roce 2001 byla přijata Směrnice Evropského parlamentu a Rady o podpoře elektrické energie z obnovitelných zdrojů na vnitřním trhu s elektřinou 2001/77/EC. V této směrnici je stanoven cíl, aby 22,1 % elektrické energie spotřebované v EU v roce 2010 bylo produkováno z OZE. Česká republika se zavázala přijmout národní indikativní cíl ve výši 8 % podílu výroby elektřiny z OZE. To je včetně biomasy a bioplynu. Dnes je to cca 4,2 %. Situace se zkomplikovala přijetím do EU dalších 10 členských zemí roku 2004, protože nové země nabízejí jak určitý potenciál, tak zároveň jsou v určité fázi vývoje a rozvoje. Politika a legislativa EU má jasný cíl. A to co nejvíce zvýšit podíl biopaliva a alternativních paliv. Hlavní cíl byl relativně splněn, neboť bioenergetické zdroje se téměř dvojnásobně zvýšily od roku 2010. Jedním z impulzů pro zvýšení využívání biomasy byly dotace. Z ekonomického, enviromentálního a sociálního hlediska je to udržitelný zdroj. Pro tyto účely sloužily dva nové programy. Operační program Podnikání a Inovace a také Operační program Životné prostředí.

7 Nejvýznamnější zástupci biomasy v ČR a způsob jejich využití

Rozvojové plány

V posledních letech je patrná snaha zvýšit podíl využívání obnovitelných zdrojů energie. Omezit závislost výrobních podniků na externích dodávkách elektřiny jako prevence výpadku externích dodávek a je požadován určitý stupeň samovýroby, který by v havarijních situacích postačil pro udržení provozu kritických technologií.

Technologie energetického využití biomasy, které byly uvažovány pro aplikaci, jsou:

- výroba bioplynu fermentací biomasy a následné spalování v kogenerační jednotce nebo v kotli
- termické zplyňování (pyrolýza) biomasy a použití produktů pro pohon kogenerační jednotky nebo přímé spalování
- parní zdroj s přímým spalováním biomasy nebo bioplynu

Z tabulek ze 4. kapitoly je patrné, že v České republice se pro výrobu elektřiny a tepla z biomasy nejvíce využívá dřevní odpad (dřevní štěpka, kůra, piliny...). Z dřevního odpadu získáváme tepelnou energii spalování v kotlích či kamnech.

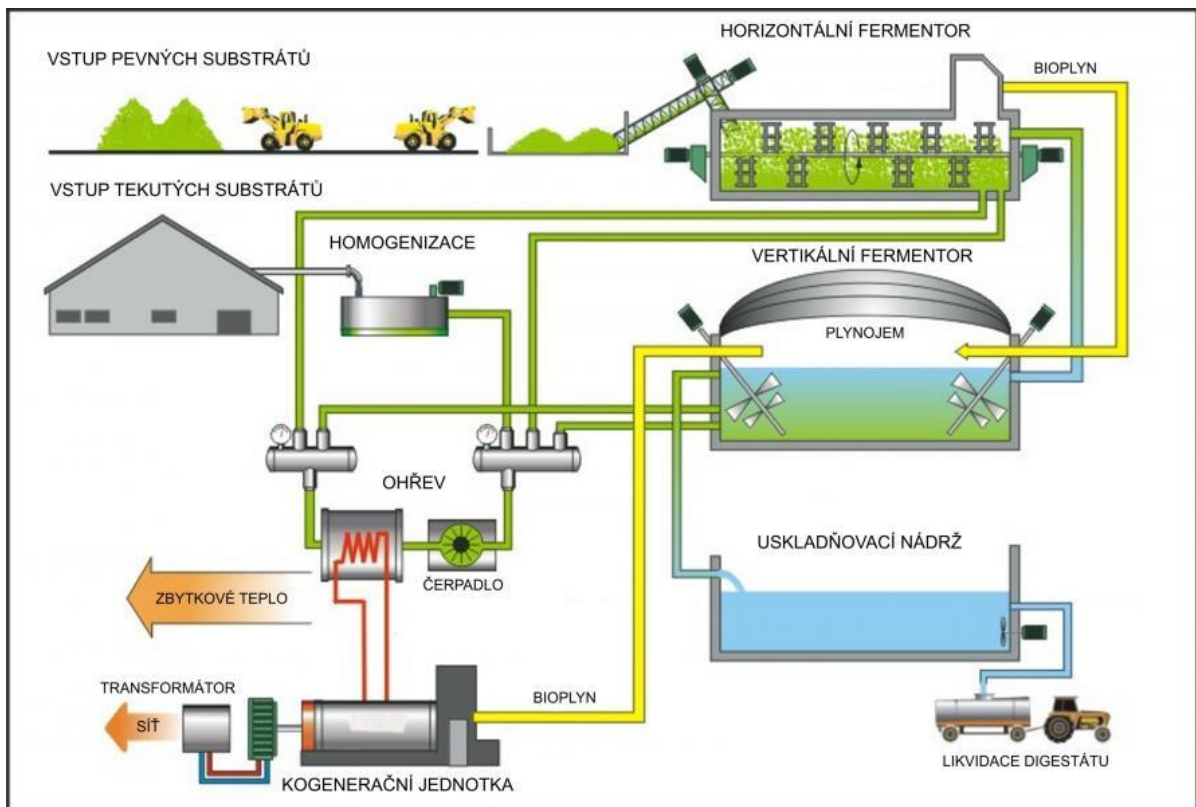


Obrázek č. 13: Spalování dřevní štěpky ve spalovacím zařízení Biopower s podsuvným roštem [17]

Dalšími významnými zástupci jsou celulózové výluhy a bioplyn z bioplynových stanic. Bioplyn se v bioplynových stanicích vyrábí fermentací odpadu rostlinného původu (zbytky potravin, kejda, drůbeží hnůj, senáž, siláž, cíleně pěstované zemědělské plodiny...).

Tabulka 14: Příklady bioodpadu a jejich energetické využitelnosti [18]

Surovina	Vyprodukované množství bioplynu z 1 tuny materiálu (m ³)	Z jedné tuny materiálu lze kogenerační jednotkou vyrobit	
		Elektrická energie (kWh)	Teplo (kWh)
Tráva (30 % sušina)	126	312	430
Prasečí kejda (5,5 % sušina)	14	35	48
Odpad tukového průmyslu (25 % sušina)	280	695	955
Siláž (30 % sušina)	190	471	648
Masokostní moučka (95 % sušina)	400	992	1364



Obrázek č. 14: Procesy v bioplynové stanici [18]

Z přehledu využívání biomasy pro energetické účely v ČR vyplývá, že mezi nejvíce používané druhy patří smrková dřevní štěpka s různou vlhkostí (měkké dřevo), dále celulózové výluhy, pšeničná sláma, kukuřičná siláž a rostliny pro výrobu pelet, které jsou ovšem kvůli vyšší náročnosti přípravy podstatně dražší. Na druhou stranu mají při spalování vlastnosti srovnatelné se zemním plynem. Především vysokou výhřevnost.

Všechny druhy dřeva mají téměř stejnou výhřevnost vztaženou na kilogram paliva. Liší se pouze v objemovém množství. Měkké dřevo má menší hustotu než dřevo tvrdé, tudíž je lepším palivem především kvůli skladovací kapacitě. Jak již bylo zmíněno, tak surové dřevo využíváme především k vytápění v domácnostech. V energetických podnicích jako jsou výtopny, teplárny a elektrárny spalujeme především dřevěný odpad, který se dříve nijak nevyužil, jako například dále řešená dřevní štěpka. Dřevní štěpka se vyrábí po lesní těžbě štěpkováním větví, které se dříve nechávali v lese shnit, nebo se rovnou na místě pálili. Ovšem využívají se i další odpadní produkty podobných spalovacích vlastností a to především z dřevozpracovatelského průmyslu (piliny...) nebo například zemědělství (obilná sláma ve formě balíků) či z papírenského průmyslu (celulózové výluhy).

Dá se říci, že naprostá většina biomasy, kterou využíváme pro spalování za účelem energetického zisku má velice podobné složení. Její vlhkost se pohybuje mezi 10 až 50 %. Právě vyšší hodnota obsahu vody je největší bolest těchto paliv. Naopak výhodou je, že především rostlinná biomasa obsahuje téměř nulové množství popela. U dřeva a především dřevní štěpky se tato hodnota pohybuje v jednotkách procent.

Dle mého názoru je také důležité rozlišovat rozdíl mezi využíváním odpadní biomasy a biomasy pěstované přímo pro energetické účely. Zatím co u odpadní biomasy se snažíme využít veškerý

potenciál daného materiálu a tím i zefektivnit jeho zpracování a využití, tak speciálně pěstovaná biomasa zabírá značné množství hektarů zemědělské půdy, které se dříve využívali pro pěstování čistě potravinářských rostlin. Jak to bude v budoucnu bude záležet především na postoji zemědělců k dané otázce a na ekonomické výhodnosti, ve které mohou sehrát svoji roli například různé dotace na pěstování daných druhů rostlin.

8 Výpočet výhřevnosti různých druhů paliv a účinnost kotle

Zadání paliva:

Pro porovnání jsem provedl výpočet pro smrkovou dřevní štěpku s různou vlhkostí (měkké dřevo), bukové (tvrdé) dřevo, pšeničnou slámu, trávu z pastvin a pro u nás nejpoužívanější fosilní palivo což je hnědé uhlí.

Výpočet proveden dle skript [1].

Složení paliv bráno viz. [19]

8.1 Dřevní smrková štěpka (měkké dřevo)

Pro porovnání byly pro výpočet dřevní štěpky, ostatních druhů biomasy a hnědého uhlí zachovány stejné parametry a stejné výpočetní postupy.

Výpočet dřevní štěpky jsem provedl pro několik hodnot vlhkosti paliva vzatých z experimentu sušení dřevní štěpky 10.3. V experiment jsem štěpku sušil po dobu třech hodin v elektrické sušce a každou hodinu změřil její vlhkost.



Obrázek č. 15: Vlevo smrková dřevní štěpka v původním stavu a napravo po 3 hodinách sušení.

Výpočet pro 58,89 % vlhkost štěpky což odpovídá v experimentu stavu před sušením

Voda v původním stavu

$$W_r = 0,5889$$

Popel v sušině

$$A_d = 0,0056$$

složení hořlaviny:

Uhlík

$$C_{daf} = 0,4980$$

Vodík

$$H_{daf} = 0,0630$$

dusík

$$N_{daf} = 0,0013$$

Kyslík

$$O_{daf} = 0,4320$$

síra

$$S_{daf} = 0,00015$$

Přepočet paliva

Popel v původním stavu:

$$A_r = A_d \cdot (1 - W_r) = 0,0056 \cdot (1 - 0,5889) = 0,0023$$

Hořlavina v původním stavu:

$$C_r = C_{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 0,4980 \cdot (1 - 0,5889 - 0,0023) = 0,2036$$

$$H_r = H_{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 0,0630 \cdot (1 - 0,5889 - 0,0023) = 0,0258$$

$$N_r = N_{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 0,0013 \cdot (1 - 0,5889 - 0,0023) = 0,0005$$

$$O_r = O_{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 0,4320 \cdot (1 - 0,5889 - 0,0023) = 0,1766$$

$$S_r = S_{daf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 0,00015 \cdot (1 - 0,5889 - 0,0023) = 0,00006$$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 34,75 \cdot C_r + 95,3 \cdot H_r - 10,9 \cdot (O_r - S_r) - 2,5 \cdot W_r$$

$$Q_i^r = 34,75 \cdot 0,2036 + 95,3 \cdot 0,0258 - 10,9 \cdot (0,1766 - 0,00006) - 2,5 \cdot 0,5889$$

$$Q_i^r = 6,1373 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrické výpočty:

Minimální objem kyslíku pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{O_2min} = 22,39 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \left(\frac{C_r}{12,01} \right) + \left(\frac{H_r}{4,032} \right) + \left(\frac{S_r}{32,06} \right) + \left(\frac{O_r}{32} \right) = 0,399 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Minimální objem suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

$$O_{VSmin} = \frac{O_{O_2min}}{0,21} = 1,900 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva:

Součinitel respektující zvětšení objemu suchého vzduchu v důsledku vlhkosti

$$\chi_v = 1 + \frac{\rho}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\rho}{100} \cdot p''}$$

$$\chi_v = 1,016$$

Kde ρ [%] je relativní vlhkost vzduchu, p'' [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu t_v a p_c [MPa] je celkový tlak, který obvykle bývá 0,1 MPa.

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} = 1,931 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Objemy složek suchých spalin:

$$O_{CO_2} = \frac{22,27 \cdot \text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}{12,01} \cdot C_r + 0,0003 \cdot O_{VSmin} = 0,378 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89 \cdot \text{Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}}{32,06} \cdot S_r = 4,19 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4 \cdot Nm^3 \cdot kg^{-1}}{28,013} \cdot N_r + 0,7805 \cdot O_{VSmin} = 1,483 Nm^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VSmin} = 0,017 Nm^3 \cdot kg^{-1}$$

Objem suchých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s min. množstvím vzduchu

$$O_{SSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} = 1,879 Nm^3 \cdot kg^{-1}$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2Os} = \frac{44,81 \cdot Nm^3 \cdot kg^{-1}}{4,032} \cdot H_r + \frac{22,41 \cdot Nm^3 \cdot kg^{-1}}{18,015} \cdot W_r + (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin}$$

$$O_{H_2Os} = 1,049 Nm^3 \cdot kg^{-1}$$

Objem vlhkých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s min. množstvím vzduchu

$$O_{SVmin} = O_{SSmin} + O_{H_2Os} = 2,928 Nm^3 \cdot kg^{-1}$$

Tepelné ztráty kotle a účinnost

Výpočet účinnosti kotle byla spočítána pro případ spalování v roštovém kotli, přebytek spalovacího vzduchu 1,6 a teplotou spalin za kotlem 160°C.

Účinnost kotle

Účinnost jsem spočítal pomocí nepřímé metody, která je založena na stanovení jednotlivých ztrát. Výsledkem této metody jsou hodnoty kotlových ztrát.

$$\eta_k = 1 - Z_c - Z_{co} - Z_f - Z_{sv} - Z_k$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová):

Komínová ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Jde o nejvýznamnější ztrátu, která má největší vliv na výslednou účinnost kotle.

$$Z_k = \frac{(1 - Z_c) \cdot (I_{Sk}^{\alpha_k, t_k} - \alpha_k \cdot I_{stvz})}{Q_i^r}$$

Z_c – ztráta mechanickým nedopalem

$I_{Sk}^{\alpha_k, t_k}$ – entalpie spalin při teplotě t_{sk} a přebytku vzduchu α_k za kotlem odečtená z grafu 4.5 [1]

I_{stvz} – entalpie vzduchu při teplotě 25 °C ($I_{stvz} = I_{vf} = 124,2$)

Q_i^r – výhřevnost paliva

$$Z_k = \frac{(1 - 0,0011) \cdot (1307,1 - 2,15 \cdot 124,2)}{6137,304} = 0,1693 = 16,93\%$$

Ztráta mechanickým nedopalem:

$$Z_c = Q_c \cdot \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot \frac{X_i}{Q_i^r} = \frac{Q_c \cdot A^r}{Q_i^r} \cdot \left(\frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s + \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_u}{1 - C_u} \cdot X_u \right)$$

Q_i^r – výhřevnost paliva

Q_c – výhřevnost uhlíku

A^r – obsah popelovin v palivu

X_i – poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků, škváře strusce (š, s) popílek ve

spalinách (ú), ložový propad (r)

C_i – obsah uhlíku v druhu tuhých zbytků, škváře strusce (š, s) popílek ve spalinách (ú), ložový propad (r), určeno z tabulek 5-1 a 5-2 [1]

$$Z_c = \frac{32600 \cdot 0,0023}{6137,304} \cdot \left(\frac{0,07}{1 - 0,07} \cdot 0,6 + \frac{0,20}{1 - 0,20} \cdot 0,03 + \frac{0,11}{1 - 0,11} \cdot 0,32 \right) = 0,00113 = 0,113\%$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků:

$$Z_f = \sum \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r \cdot i_i}{Q_{i\ red}^i} = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot \left(\frac{X_s \cdot i_s}{1 - C_s} + \frac{X_r \cdot i_r}{1 - C_r} + \frac{X_{\dot{u}} \cdot i_{\dot{u}}}{1 - C_{\dot{u}}} \right)$$

Q_r^i – výhřevnost paliva

A^r – obsah popelovin v palivu

X_i - poměr hmotnosti popela v uvažovaném druhu tuhých zbytků, škváře strusce (š, s) popílek ve spalinách (ú), ložový propad (r)

i_i – entalpie tuhých zbytků spalin $i = c_i \cdot t_i$ viz. tab. 15

C_i – obsah uhlíku v druhu tuhých zbytků, škváře strusce (š, s) popílek ve spalinách (ú), ložový propad (r), určeno z tabulek 5-1 a 5-2 [1]

$$Z_f = \frac{0,0023}{6137,304} \cdot \left(\frac{0,6 \cdot 560}{1 - 0,07} + \frac{0,03 \cdot 560}{1 - 0,20} + \frac{0,32 \cdot 115,1}{1 - 0,11} \right) = 0,00016 = 0,016\%$$

Entalpie popílků jsem dopočítal pomocí měrné tepelné kapacity odvozené interpolací z tabulky 21 [2] pro teplotu 140 °C jenž je teplota na konci kotle. Pro entalpii ložového popela a teplotu tuhých zbytků jsem uvažoval teplotu 600 °C.

Tabulka 15: Entalpie spalin a popele [2]

Teplota [°C]	O2 [kJ/Nm ³]	CO2 [kJ/Nm ³]	N2 [kJ/Nm ³]	H2O [kJ/Nm ³]	SO2 [kJ/Nm ³]	Ar [kJ/Nm ³]	Pop [kJ/kg]
100	132	170	130	150	189	93	76,22
200	267	357	260	304	392	186	162,48
300	407	559	392	463	610	278	258,78
400	551	772	527	626	836	372	365,12
500	699	994	666	795	1070	465	481,5
600	850	1225	804	969	1310	557	607,92
700	1004	1462	948	1149	1550	650	744,38
800	1160	1705	1094	1334	1800	743	890,88
900	1318	1952	1242	1526	2050	834	1047,42
1000	1477	2204	1392	1723	2305	928	1214
1500	2294	3504	2166	2779	3590	1390	2197,5

Ztráta hořlavinou ve spalínách (mechanickým nedopalem):

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SS\ min}}{(21 - O_{2\ ref}) \cdot Q_{i\ red}}$$

mgCO [mg/Nm³] – je emisní limit CO

$O_{2\ ref}$ [%] – je obsah kyslíku pro referenční stav spalin, viz tabulka 5-3 [1] (pro spalování dřeva voleno

$O_{2\ ref} = 11\ %$)

$Q_{i\ red}$ [kJ/kg] – je redukováná výhřevnost paliva (Pro výpočet použity hodnoty Q_i^r)

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 1,8791}{(21 - 11) \cdot 6137,304} = 0,00162 = 0,162\%$$

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí:

Tato ztráta zohledňuje teplo unikající pláštěm kotle do okolí. Závisí na izolaci stěn, materiálu, velikosti kotle a druhu spalovaného paliva. Únik tepla je zapříčiněn sáláním a vedením.

Určení této ztráty je pomocí grafu 5-1 z literatury [1]

Pro dřevní štěpku, ostatní biomasu i hnědé uhlí předpokládáme ztrátu o velikosti:

$$Z_{sv} = 0,6\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 1 - 0,0011 - 0,0016 - 0,0002 - 0,0060 - 0,1693$$

$$\eta_k = 0,8218 = 82,18\%$$

Výpočet pro 49,15 % vlhkost štěpky což odpovídá v experimentu stavu po 1 hodině sušení

Vlhkost po hodině sušení $W_r = 0,4915$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 8,1775 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VV\ min} = 2,3879 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SV\ min} = 3,3273 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová):

Dále již uvádím pouze ztrátu citelným teplem spalin, protože je nejvýznamnější a ostatní ztráty se s měnící se vlhkostí mění velice málo.

$$Z_k = 0,1271 = 12,71\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,8644 = 86,44\%$$

Výpočet pro 32,31 % vlhkost štěpky což odpovídá v experimentu stavu po 2 hodinách sušení

Vlhkost po 2 hodinách sušení $W_r = 0,3231$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 11,7136 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VVmin} = 3,1787 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 4,0172 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová):

$$Z_k = 0,0887 = 8,87\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,9031 = 90,31\%$$

Výpočet pro 4,57 % vlhkost štěpky což odpovídá v experimentu stavu po 3 hodinách sušení

Vlhkost po 3 hodinách sušení $W_r = 0,0457$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 17,5385 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VVmin} = 4,4814 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 5,1538 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin (komínová):

$$Z_k = 0,0593 = 5,93\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,9329 = 93,29\%$$

8.2 Bukové dřevo (tvrdé dřevo)

Dále všechny výpočty počítány stejným postupem jako smrková dřevní štěpka.

$$A_d = 0,005$$

$$W_r = 0,32$$

Hořlavina v původním stavu:

$$C_{daf} = 0,4790$$

$$H_{daf} = 0,0620$$

$$N_{daf} = 0,0022$$

$$O_{daf} = 0,4520$$

$$S_{daf} = 0,00015$$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 11,1276 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VVmin} = 3,0153 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 3,8585 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = 0,0934 = 9,34\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,8984 = 89,84\%$$

8.3 Pšeničná sláma

$$A_d = 0,043$$

$$W_r = 0,32$$

Hořlavina v původním stavu:

$$C_{daf} = 0,4560$$

$$H_{daf} = 0,0580$$

$$N_{daf} = 0,0048$$

$$O_{daf} = 0,4240$$

$$S_{daf} = 0,0019$$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 10,1149 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VVmin} = 2,7607 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 3,5612 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = 0,1028 = 10,28\%$$

Účinnost

$$\eta_k = 0,8879 = 88,79\%$$

8.4 Tráva z pastvin

$$A_d = 0,049$$

$$W_r = 0,32$$

Hořlavina v původním stavu:

$$C_{daf} = 0,4610$$

$$H_{daf} = 0,0560$$

$$N_{daf} = 0,0134$$

$$O_{daf} = 0,3810$$

$$S_{daf} = 0,0139$$

Výhřevnost paliva:

$$Q_i^r = 10,4232 \text{ MJ/kg}$$

Stechiometrie

$$O_{VVmin} = 2,8582 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 3,6338 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = 0,0997 = 9,97\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,8909 = 89,09\%$$

8.5 Hnědé uhlí Sokolov

Před sušením

Voda v původním stavu

$$W_r = 0,38$$

Popel v sušině

$$A_d = 0,1885$$

složení hořlaviny:

Uhlík

$$C_{daf} = 0,7347$$

Vodík

$$H_{daf} = 0,0570$$

dusík

$$N_{daf} = 0,0103$$

Kyslík

$$O_{daf} = 0,1880$$

síra

$$S_{daf} = 0,0100$$

[1]

Spalné teplo paliva:

$$Q_{Sr} = Q_{Sdaf} \cdot (1 - W_r - A_r) = 15\,565 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Výhřevnost tepla:

$$Q_i = Q_{Sr} - 2453 \cdot \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (W_r + 9 \cdot H_r) = 14\,000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Stechiometrické výpočty:

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} = 3,801 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{SVmin} = 4,500 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = 0,0793 = 7,93\%$$

Účinnost kotle

$$\eta_k = 0,8850 = 88,5\%$$

8.6 Souhrn výsledků výpočtů

Tabulka 16: Shrnutí vlivu vlhkosti různých druhů biomasy na výslednou účinnost.

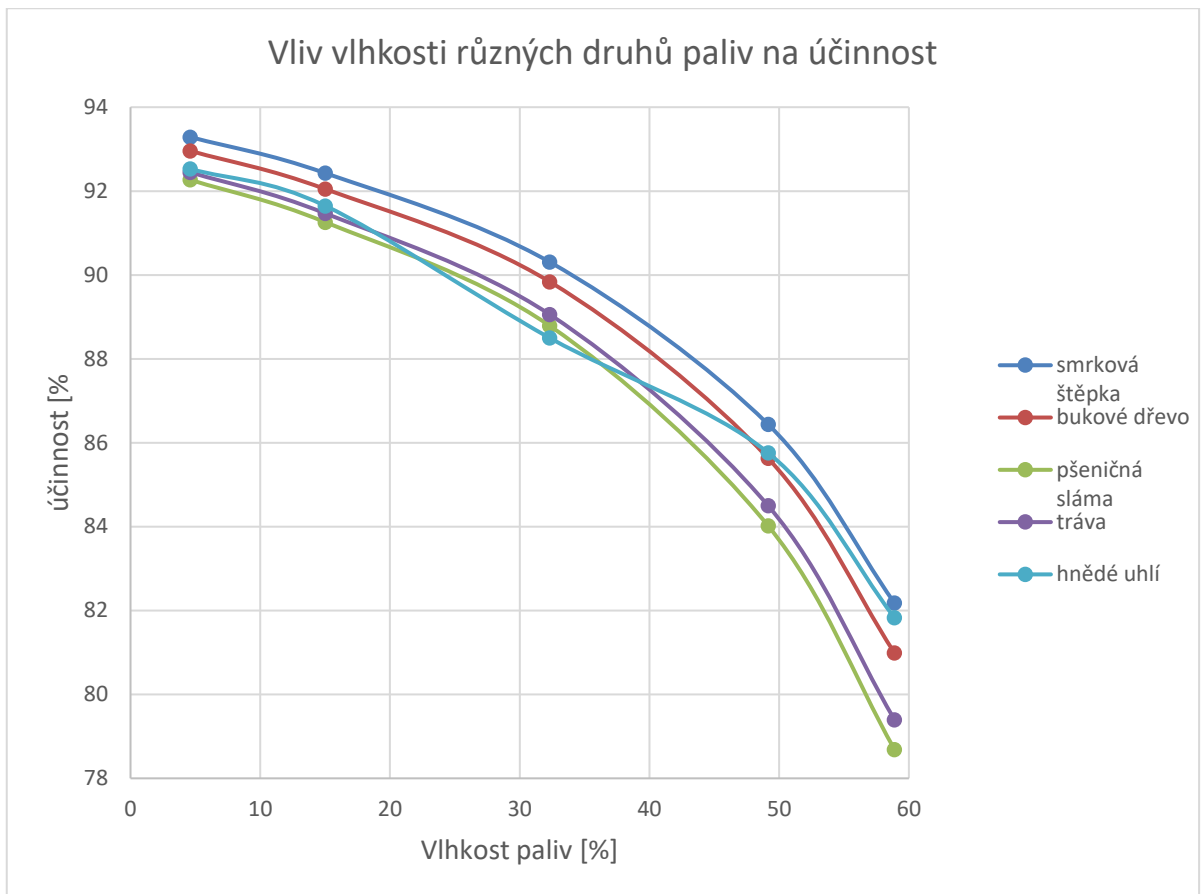
	Výhřevnost [MJ/kg]	Účinnost [%]
Smrková dřevní štěpka $W_r=0,59$	6,13	82,2
Smrková dřevní štěpka $W_r=0,50$	8,18	86,4
Smrková dřevní štěpka $W_r=0,32$	11,72	90,3
Smrková dřevní štěpka $W_r=0,05$	17,54	93,3
Bukové dřevo $W_r=0,32$	11,13	89,8
Pšeničná sláma $W_r=0,32$	11,13	89,8
Tráva z pastvin $W_r=0,32$	10,11	88,8
Uhlí Sokolov $W_r=0,32$	10,42	89,1

Z výsledků je patrné, že většina biomasy má velice podobné složení. Většinou se liší pouze množstvím síry a dusíku. Oproti uhlí obsahuje biomasa několikanásobně méně síry, což snižuje náročnost na odsíření spalin. Naopak ale některé druhy rostlin obsahují mnohem více dusíku. Z výsledků výpočtu pro různě vlhkou dřevní štěpku je zřejmé, že jednoznačně nejvýznamnější vliv na výhřevnost, tudíž i na účinnost kotle má množství vody v palivu.

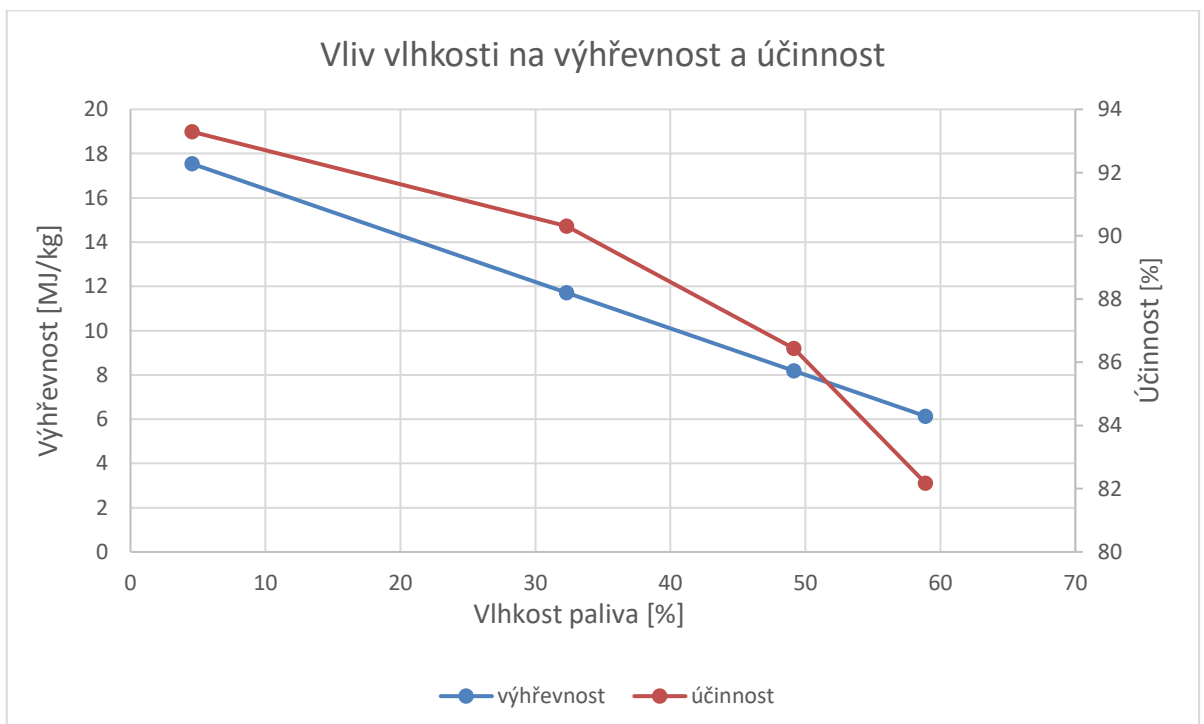
9 Vliv obsahu vody v palivu na jeho spalovací vlastnosti

Rostoucí obsah vody v palivu se projeví větším množstvím spalovacího vzduchu což se promítne v účinnosti, kde největší vliv měla ztráta citelným teplem spalin. Velké množství energie se musí spotřebovat na vypaření vody z paliva.

V grafu níže vidíme, že vlhkost různých druhů biomasy má prakticky stejný vliv na výslednou účinnost. Ovšem vidíme i, že s klesajícím obsahem vody v palivech účinnost neroste lineárně. Z počátku u vysokých obsahů vody v palivu účinnost roste výrazně a při nižších hodnotách vlhkosti již účinnost neroste tolik.



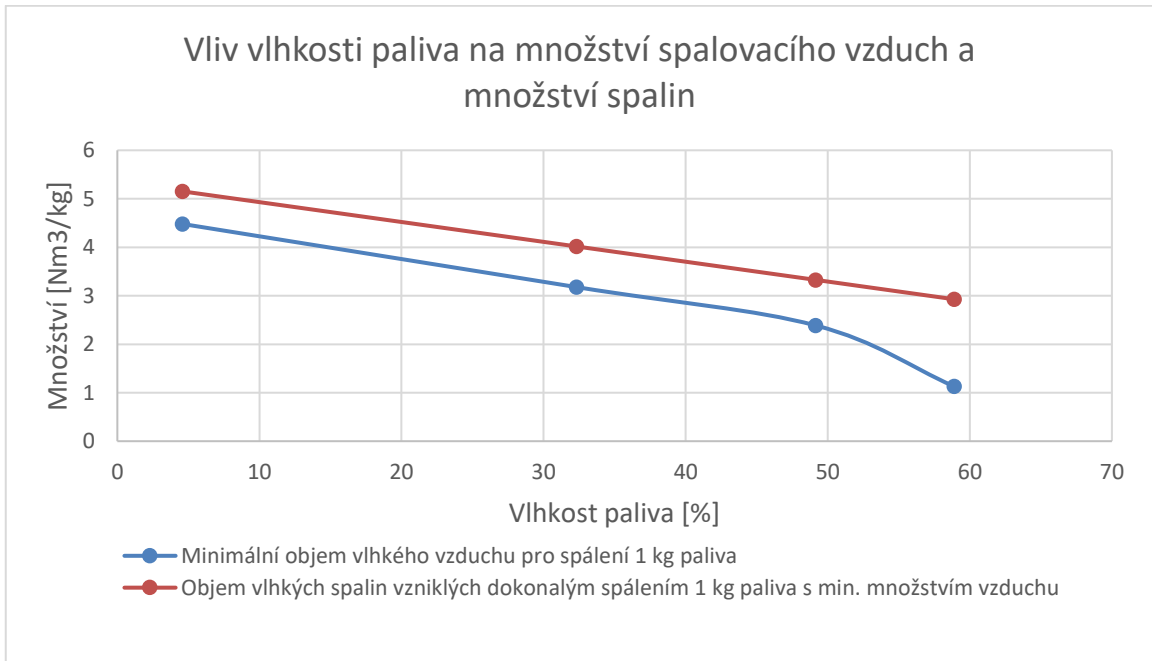
Obrázek č. 16: Porovnání vlivu vlhkosti různých paliv na jejich účinnost.



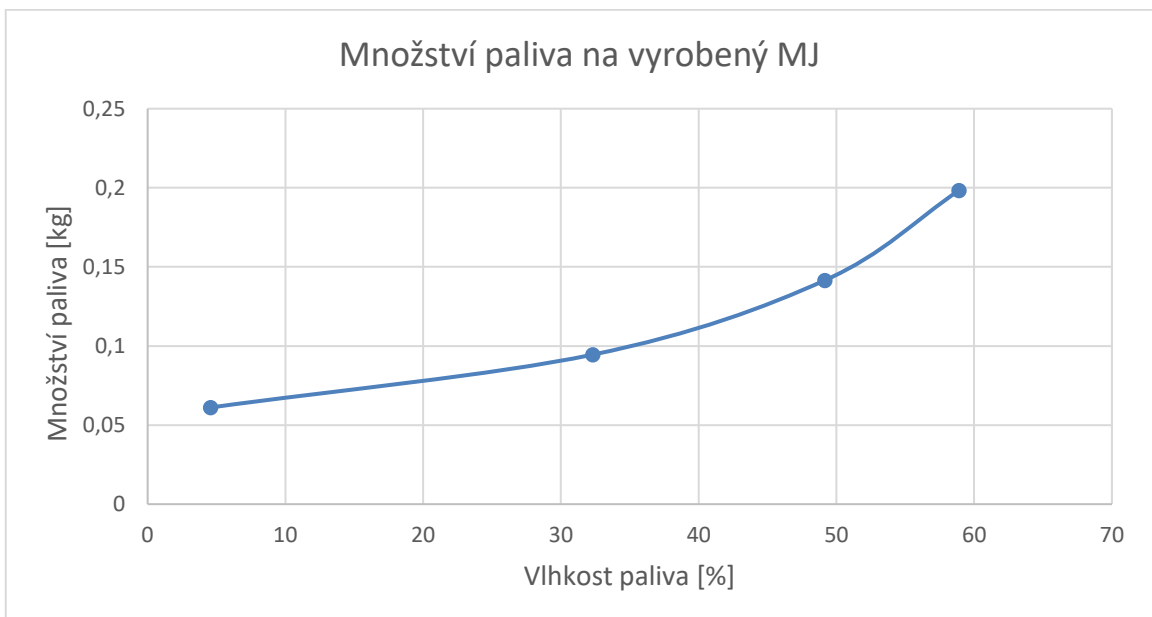
Obrázek č. 17: Vliv vlhkosti měřené smrkové dřevní štěpky na jeho výhřevnost.

Z grafu je patrné, že závislost mezi vlhkostí paliva a jeho výhřevností je lineární. Dále, dle předpokladu, je zřejmé, že s rostoucí vlhkostí výhřevnost paliva klesá. Nutno také brát v potaz, že palivo s vlhkostí 50 % (55%) a více je již prakticky nespalitelné.

Z vypočtených hodnot je patrné, že nejvýznamnější ztrátou kotle je dle předpokladu ztráta citelným teplem spalin. Na velikost této ztráty má vliv krom druhu paliva také jeho vlhkost. S rostoucí vlhkostí tato ztráta výrazně roste.



Obrázek č. 18: Vliv vlhkosti smrkové dřevní štěpky na množství spalovacího vzduchu a množství spalin.



Obrázek č. 19: Spotřebované množství dřevní štěpky na vyrobený MJ tepla při totožných spalovacích podmínkách jako u výpočtů v kapitole 8.

10 Návrh přípravy paliva před jeho energetickým využitím

Protože biomasa má často vysoký obsah vody, je vhodnou přípravou sušení paliva, což výrazně zlepší jeho vlastnosti. Ovšem energie, kterou získáme díky suššímu palivu je téměř shodná s energií vynaloženou na usušení paliva. Především sušení v elektrických sušárnách není po energetické stránce zcela ideální. Smysl to má při sušení ve výměníku, či někde na roštu přímo v areálu podniku, kde se dané palivo spaluje. Kde jako sušící médium se použije část teplého vzduchu některé z částí kotle.

10.1 Metody, pomocí kterých lze snížit obsah vody v biomase

Snížení obsahu vody před přívodem do kotle lze dosáhnout:

- mechanickým odvodněním
- sušením
- kombinací obou způsobů

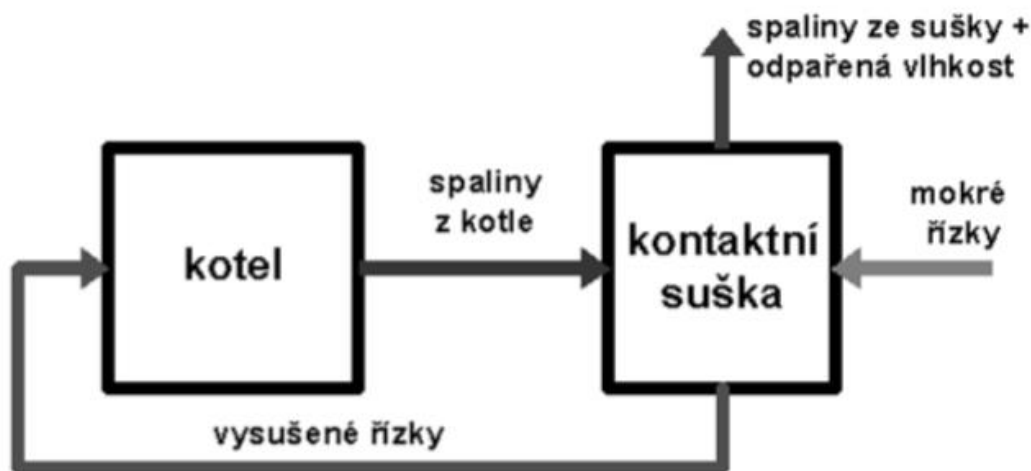
Mechanické odvodnění biomasy provádíme odstředováním, nebo lisováním. Těmito metodami jsme schopni dosáhnout hraničního obsahu vody v biomase (60 % vlhkosti), aby ji bylo možné vůbec spalovat. Pro vysušení na nějakou přijatelnější vlhkost se sušení jeví jako asi jediná rozumná možnost.

10.2 Rozdělení sušek

- kontaktní – sušená hmota a sušící médium jsou odděleny výhřevnou plochou
- konvektivní – sušená hmota je obtékána sušícím médiem
 - bubnové
 - proudové
 - fluidní

Zdrojem sušícího tepla může být:

- odpadní teplo z technologie
- spaliny získané spalováním ušlechtilých paliv čistě jen pro účely sušení
- spaliny odvedené z kotle spalujícího řízky



Obrázek č. 20: Otevřená spalinová kontaktní suška [17]

10.3 Experimentální určení energetické náročnosti nepřímého sušení dřevní štěpky. Sušení štěpky s vysokým obsahem vody

Experiment byl proveden v prostorách laboratoří FS ČVUT na Julisce, kde jsem sušil dřevní štěpku s vysokým obsahem vody. Dřevní štěpku jsem sušil v kampaňovité sušce a vzorky jsem dosoušel ve speciální elektrické sušce.

Pro zajištění přesnějších výsledků měření, z důvodu značné nehomogenity sušeného materiálu, jsem vždy odebíral více vzorků. Tyto vzorky byly rozděleny do misek, zváženy a vysušeny ve speciální elektrické sušce na téměř nulovou hodnotu vlhkosti a poté vyhodnoceny rozdíly jejich hmotností viz. tabulka 20, 21, 22, 23. Rozdíl hmotnosti vzorku před a po sušení byl dán změnou obsahu vody daného vzorku.



Obrázek č. 20: Kampaňovitá suška z laboratoří FS ČVUT na Julisce.



Obrázek č. 21: Speciální elektrická suška se vzorky z laboratoří FS ČVUT na Julisce.

Sušil jsem 3,3 kg dřevní štěpky v kampaňovité sušce s délkou teplosměnné plochy 1 m a vnitřním průměrem 26 cm. Zdrojem tepla sušky je elektrický ohřev, přičemž termostat byl nastaven na 140 °C. Pro efektivnější sušení je uvnitř sušky hřídel s lopatkami, které materiál promíchávají. Pohonem hřídele je elektromotor, který je s hřídelí spojen pomocí řetězového převodu. Po rozehrátí sušky byla dovnitř vložena mokrá štěpka, a začal proces sušení. Sušení probíhalo po dobu 3 hodin. Po každé hodině byla sušená štěpka vyndána a převážena.



Obrázek č. 22: Vnitřní prostor kampaňové sušky s míchacím zařízením a sušeným materiálem.

Naměřené hodnoty:

Tabulka 17: Počáteční stav dřevní štěpky

Speciální suška	Počáteční stav			
	17	15	12	16
Číslo vzorku (misky)	17	15	12	16
Hmotnost misky [g]	41,902	42,230	39,253	40,369
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	71,740	67,734	72,377	68,799
Hmotnost misky + sušiny [g]	53,248	53,106	53,296	52,148
Hmotnost štěpky před sušením [g]	29,838	25,504	33,124	28,430
Hmotnost sušiny [g]	11,346	10,876	14,043	11,779
Vlhkost [%]	61,975	57,356	57,605	58,568
Kampaňovitá suška				
Hmotnost štěpky [kg]	3,3			
Elektřina spotřebovaná na ohřev sušky [kWh]	1,68			

Tabulka 18: Po 1 hodině sušení

Speciální suška	Po 1 hod. sušení		
	5	1	11
Číslo vzorku (misky)	5	1	11
Hmotnost misky [g]	48,279	45,211	39,296
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	58,184	55,802	50,080
Hmotnost misky + sušiny [g]	53,308	50,565	44,820
Hmotnost štěpky před sušením [g]	9,905	10,591	10,784
Hmotnost sušiny [g]	5,029	5,354	5,524
Vlhkost [%]	49,228	49,448	48,776

Kampaňovitá suška	
Hmotnost štěpky [kg]	2,25
Hmotnost odpařené vody [kg]	1,05
Elektřina spotřebovaná na ohřev sušky [kWh]	0,89

Tabulka 19: Po 2 hodinách sušení

Speciální suška	Po 2 hod. sušení		
Číslo vzorku (misky)	15	16	12
Hmotnost misky [g]	42,240	40,376	39,257
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	49,728	47,619	45,766
Hmotnost misky + sušiny [g]	47,476	45,171	43,615
Hmotnost štěpky před sušením [g]	7,488	7,243	6,509
Hmotnost sušiny [g]	5,236	4,795	4,358
Vlhkost [%]	30,075	33,798	33,047
Kampaňovitá suška			
Hmotnost štěpky [kg]	1,55		
Hmotnost odpařené vody [kg]	0,7		
Elektřina spotřebovaná na ohřev sušky [kWh]	1		

Tabulka 20: Po 3 hodinách sušení

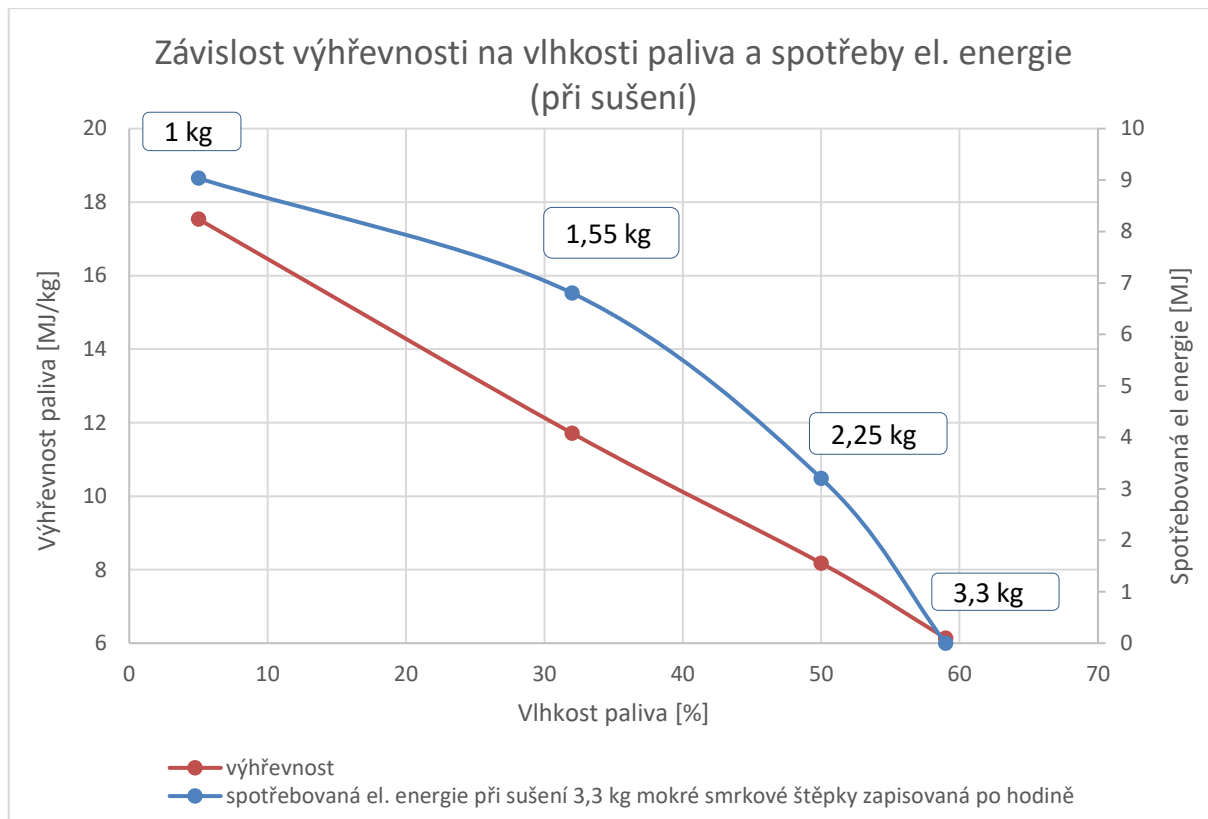
Speciální suška	Po 3 hod. sušení			
Číslo vzorku (misky)	1	5	17	11
Hmotnost misky [g]	45,211	48,279	41,902	39,296
Hmotnost misky + štěpky před sušením [g]	52,385	57,625	49,792	47,604
Hmotnost misky + sušiny [g]	52,089	57,399	49,611	46,871
Hmotnost štěpky před sušením [g]	7,174	9,346	7,890	8,308
Hmotnost sušiny [g]	6,878	9,120	7,709	7,575
Vlhkost [%]	4,126	2,418	2,9294	8,823
Kampaňovitá suška				
Hmotnost štěpky [kg]	1			
Hmotnost odpařené vody [kg]	0,55			
Elektřina spotřebovaná na ohřev sušky [kWh]	0,62			

S postupně sušším palivem by mírně měla klesat i spotřeba elektrické energie na ohřev sušky. Důvodem, proč tomu tak nebylo po 2 hodinách měření, bude nejspíš různým spínáním termostatu v daném čase.

Vyhodnocení měření

Cílem měření bylo zjistit, o kolik jsme schopni vlhkou štěpku v námi zvolené sušce usušit v daném čase, a jaké množství elektrické energie na to bude zapotřebí. Počáteční vlhkost štěpky byla 58,89 %. Po hodině sušení vlhkost klesla na hodnotu 49,15 %, po druhé hodině na 32,31 % a po třetí hodině na 4,42 %. Během 3 hodin sušení bylo odpařeno 2,3 kg vody a spotřebováno 2,51 kWh elektrické energie. Z výsledků vyplývá, že 1 kg odpařené vody bylo potřeba 1,09 kW elektrické energie, což je 3,924 MJ. Měření může obsahovat nepřesnost především z důvodu nehomogenity použitého materiálu. Drobnější částice se vysuší za výrazně menší časový interval.

Pro usušení 3,3 kilogramu dřevní štěpky z vlhkosti 58,9 % na vlhkost 32,3 % bylo spotřebováno 1,89 kWh elektrické energie bez započítání energie potřebné pro počáteční ohřev sušky. Když budeme palivo sušit v elektrické sušce z našeho experimentu a vezmeme v potaz, že průměrná cena 1 kWh elektrické energie se pohybuje kolem 3,82 Kč, tak zjistíme, že pro vysušení 1 tuny paliva z 58,9 % vlhkosti na 32,3 % vlhkost spotřebujeme 572,7 kWh elektrické energie, což činí 2188 Kč za spotřebovanou elektrickou energii.



Obrázek č. 24: Závislost výhřevnosti na vlhkosti paliva spotřeby elektrické energie s hodinovým vyhodnocením.

V grafu můžeme vidět vyhodnocení provedeného experimentu pro mokrou smrkovou štěpku. Také je zřetelné, že s klesající vlhkostí dřevní štěpky klesá i hodinový odběr elektrické energie potřebné pro sušení.

11 Závěr:

V této práci jsem zpracoval rešerši o druzích, vlastnostech a možnostech využití biomasy. Popsal jsem dělení biomasy, možnosti energetického využití a popis vlastností a složení těchto druhů. Zpracoval jsem i nejvýznamnější druhy v České republice, především na základě symbiózy se zemědělskou produkcí. Z přehledu využívání biomasy pro energetické účely v ČR vyplývá, že mezi nejvíce používané zástupce patří smrková dřevní štěpka. Dále celulózové výluhy, pšeničná sláma, kukuřičná siláž a rostliny pro výrobu pelet, které jsou ovšem kvůli vyšší náročnosti přípravy podstatně dražší. Mají ovšem spalovací vlastnosti srovnatelné se zemním plynem. Především vysokou výhřevnost. U palivového dřeva lze říci, že všechny druhy mají téměř stejnou výhřevnost vztaženou na kilogram paliva. Palivové dřevo má největší využití jako zdroj pro vytápění v domácnostech (palivo pro krbová kamna či malé kotle). Celkově můžeme říci, že naprostá většina biomasy, využívaná pro spalování za účelem energetického zisku má velice podobné složení, a to především velice nízký obsah popela a často vysoký obsah vody. Také výhřevnost jednotlivých druhů je velice podobná a nejvíce závislá právě na jejich vlhkosti. Dalším důležitým parametrem je, že biomasa na rozdíl od např. uhlí neobsahuje prakticky žádnou síru.

Provedl jsem experiment sušení mokré smrkové štěpky v elektrické sušce, kde jsem vyhodnocoval po hodinových časových intervalech sušení, o kolik klesla vlhkost štěpky, a jaké množství elektrické energie se spotřebovalo na snížení vlhkosti. Na základě experimentu jsem vypočítal a porovnal vliv vlhkosti paliva na výhřevnost a účinnost kotle. Vyhodnotil jsem, že míra vlhkosti má největší vliv na výhřevnost paliva, a tím pádem i na účinnost kotle především kvůli ztrátě citelným teplem spalin, která výrazně nabývá s rostoucí vlhkostí paliva. Pro smrkovou dřevní štěpku s 59 % vlhkostí jsem napočítal hodnotu její výhřevnosti 6,1 MJ/kg, přičemž po usušení na vlhkost 4,6 % její výhřevnost stoupla na hodnotu 17,5 MJ/kg což je více jak dvojnásobek. S rostoucí výhřevností rostla i účinnost kotle a to z 82,2 % na 93,3 %.

Dále jsem řešil možnosti přípravy paliva před jeho spalováním, a to především možnostmi snížením jeho vlhkosti na úkor vynaložené energie na vysoušení. Na tří hodinové sušení 3,3 kg vlhké smrkové štěpky z vlhkosti 58,89 % na 4,42 % jsem spotřeboval 2,51 kWe. Z výsledků plyne, že pro sušení biomasy nějakým zdrojem ušlechtilé energie (elektrická energie, zemní plyn) je spotřebovaná energie téměř totožná s energií, kterou získáme při spalování suššího paliva navíc.

12 Zdroje:

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vydání třetí. Praha: České vysoké učení technické, 2007. 212 s.
- [2] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet*. čtvrté přepracované. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. 200 s.
- [3] Biom: *Odborný časopis a informační zpravodaj Českého sdružení pro biomasu*. Praha: CZ Biom - České sdružení pro biomasu, 1997. ISSN 1801-4038.
- [4] BERANOVSKÝ, Jiří, Monika KAŠPAROVÁ, František MACHOLDA, Karel SRDEČNÝ a Jan TRUXA. *Energie biomasy*. <http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-biomasy>. Praha: EkoWATT, 2007
- [5] HROMÁDKO, Jan: *Hodnocení životního cyklu fosilních paliv a bioetanolu*. Listy cukrovarnické a řepařské, http://www.cukr-listy.cz/on_line/2009/pdf/320-323.pdf. 1 Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2009
- [06] VOBOŘIL, David – *Využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR*. <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>. Praha: Dharma Gaia, 1999.
- [6] Zelený Kompas. *Informace o životním prostředí*. <http://zelenykompas.cz/cs-CZ/static%3BDobsah/informaceo%5BEivotn%C3%ADmprost%C5%99ed%C3%AD/energie.aspx>.
- [7] VLASTNOSTI PALIVOVÉHO DŘEVA. *Palivové dřevo a jeho vlastnosti*. <http://palivove-drevo-libeznice.cz/palivove-drevo/vlastnosti-dreva/>
- [8] HAPALA Vladimír. *Těžba dřeva - lesnické práce*. <http://www.tezba-dreva.eu/foto-tezba-dreva/tahani-klad-traktorem-k%C5%AFrovec>. cit. 25.05.2018
- [9] DREVOBORAC. *Výhřevnost palivového dřeva*. <http://www.drevoborac.cz/prednosti-palivoveho-dreva/vyhrevnost-palivoveho-dreva/>. cit. 10.05.2018
- [10] DŘEVOSTAVUTEL. *Palivové dřevo*. <https://www.drevostavitel.cz/clanek/palivove-drevo-vyhrevnost-cena>. cit. 15.05.2018
- [11] BUDIŠ Marek. *Energetické využití biomasy*. https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40314. Brno: Fakulta strojního inženýrství, 2011
- [12] CHLAGRO Žákovice. *Lisování a svoz slámy*. <http://www.chlagro.cz/lisovani-a-svoz-slamy>. cit. 22.05.2018
- [13] DŘEVOSTAVBY. *Dřevěná konstrukce zateplená slámou a omítaná hlinou*. https://homebydleni.cz/dum/drevostavby/nove-technologie-a-materialy-u-drevostaveb/attachment/02_cejna_slamenydom/. cit. 22.05.2018
- [14] VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ. *Čištění odpadních vod v ČR*. <http://vodnihospodarstvi.cz/cistenio-padnich-vod-cr/>. cit. 24.05.2018

- [15] ENERGETICKÉ SYSTÉMY ZEPPELIN CZ. *Energetické uplatnění krmného štovíku*. <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/7779-energeticke-uplatneni-krmneho-stoviku>. cit. 24.05.2018
- [16] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Obnovitelné zdroje energie*. <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2017/2/Obnovitelne-zdroje-energie2015.pdf>. cit. 24.05.2018
- [17] HAVLÍK Jan. *Energetické využití biomasy*. <http://energetika.cvut.cz/files/OZE%20p7.pdf>. Praha: Fakulta strojní 2018
- [18] POWER ENERGO. *Bioplynové stanice*. <http://www.power-energo.cz/produkty/bioplynovestanice.html>. Praha: Power energo, 2018
- [19] ČAŇO, L. *Agropelety pro domovní kotle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..