



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLASTNOSTI AGROPELET

AGROPELLETS PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Němeček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisy, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **David Němeček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Vlastnosti agropelet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude stanovit základní palivové charakteristiky paliva z agropelet se a porovnání výsledků s publikovanými výsledky. Dále se věnovat podmínkám spalování agropelet s důrazem na tvorbu emisí TZL.

Cíle bakalářské práce:

- provést rešerži vlastností agropelet jako paliva
- provést rešerži spalování agropelet se zaměřením na tvorbu TZL
- experimentálně stanovit vlastnosti vybraných paliv a ověřit tvorbu emisí TZL na pilotní jednotce

Seznam literatury:

Baláš, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

Jandačka, J., Mikulík, M.: Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. TU Žilina 2007, ISBN 978-80-969595-4-9

Trávníček et kol.: Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití, MZLU 2015, ISBN 978-80-7509-206-9

Jandačka, J. a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce řeší problematiku spalování agropelet a s tím související výhody a nevýhody jejich použití ve spalovacích zařízeních. V práci je nejprve rozdělena biomasa, přičemž se zaměřuje hlavně na rostlinnou biomasu a představuje některé její používané druhy, které se využívají k výrobě paliv. V další části se řeší problematika výroby pelet, jaké jsou výhody a nevýhody a případné rady pro kvalitnější pelety. Ve finální teoretické části se řeší přímo spalování tohoto paliva. Jedná se o vlastnosti pelet při spalování, jaké při spalování nastávají problémy, práce také pojednává o emisích vznikajících při spalování agropelet. V poslední části se práce zabývá experimentálním zjišťováním vlastností agropelet a rostlinných paliv jako takových a následným porovnáním se dřevní biomasou a tabulkovými hodnotami.

ABSTRACT

This thesis solves problems of combustion of agropellets and the advantages and disadvantages, which are connected with their application in combustion devices. In this thesis at first there is divided biomass, where it primarily concentrates on the plant biomass and it constitutes some used types, which are used to a fuel production. In the next part it solves problems of production of pellets, the advantages and disadvantages of this production and the advices for superior pellets. In the final theoretical part it solves combustion of this fuel. It is about properties of pellets, problems of combustion and this work also deals with emissions of combustion agropellets. In the last part the thesis engages in experimental detection of agropellets properties and plant biomass as such and subsequent comparison to wood biomass and tabular values.

KLÍČOVÁ SLOVA

Biomasa, rostlinná biomasa, dřevní biomasa, pelety, agropelety, alternativní paliva

KEYWORDS

Biomass, plant biomass, wood biomass, pellets, agropellets, alternative fuels

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NĚMEČEK, D. Vlastnosti agropelet. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vlastnosti agropelet** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne 27. 5. 2016

.....
David Němeček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi při vypracování bakalářské práce poskytnul. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Otakaru Štelcovi za odbornou asistenci při experimentální části bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za jejich podporu.

OBSAH

ÚVOD	11
1. BIOMASA	12
1.1. Rozdělení biomasy	12
1.2. Dendromasa – dřevní biomasa	13
1.2.1. Rychle rostoucí dřeviny	13
1.2.2. Vlhkost a výhřevnost dřevin	13
1.3. Fytomasa – rostlinná biomasa	14
1.3.1. Rostlinné odpady	15
1.3.2. Energetické rostliny nedřevnaté	15
1.3.3. Energetické využití některých druhů rostlin	15
1.3.3.1. Krmný šťovík	15
1.3.3.2. Kukuřice setá	15
1.3.3.3. Pšenice	16
1.3.3.4. Řepka olejka	16
1.3.3.5. Slunečnice	16
1.3.3.6. Žito seté	17
1.3.3.7. Tráva	17
1.3.3.8. Triticale	17
2. PELETY, PELETOVÁNÍ	18
2.1. Technologie výroby pelet	18
2.1.1. Výroba ze slisovaných balíků	18
2.1.1.1. Příjem suroviny a rozdužování balíků	18
2.1.1.2. Drcení slámy	19
2.1.1.3. Peletizace řezanky slámy	19
2.1.1.4. Kvalita pelet	19
2.1.1.5. Chlazení pelet	20
2.1.2. Výroba pomocí samojízdného peletovacího stroje	20
2.1.3. Výroba pomocí MGL	21
2.1.4. Zapečení matrice paletovacího lisu	21
2.1.5. Lignin a aditiva	22
2.1.5.1. Lignin	22
2.1.5.2. Aditiva	22
2.2. Složení suroviny pro pelety	22
2.2.1. Chemické složení biomasy	22
2.2.2. Části paliva	24
2.2.3. Spalné teplo a výhřevnost	25

3.	SPALOVÁNÍ BIOMASY	26
3.1.	Vlastnosti paliva	26
3.1.1.	Obsah prchavé hořlaviny v palivu.....	26
3.1.2.	Vlastnosti popelovin v palivu.....	26
3.1.2.1.	Druhy popelovin	27
3.1.2.2.	Charakteristické teploty popele.....	27
3.2.	Ovlivňující faktory a požadavky na zařízení	28
3.3.	Emise ze spalování biomasy	28
3.3.1.	Certifikované kotle pro spalování agropelet	29
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
4.1.	Stanovení vlhkosti paliva.....	30
4.2.	Stanovení spalného tepla paliva	31
4.3.	Stanovení výhřevnosti paliva.....	32
4.4.	Stanovení obsahu popele paliva	32
4.5.	Stanovení teplot tavitelnosti popele.....	33
4.5.1.	Charakteristické teploty popele pro slunečnici	34
4.5.2.	Charakteristické teploty popele pro seno	35
4.5.3.	Charakteristické teploty popele pro slámu	36
	ZÁVĚR.....	37
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	39

ÚVOD

Technologie výroby biopaliv patří mezi aktuální a celosvětově diskutovaná témata. Toto souvisí především s rostoucí spotřebou fosilních paliv. S tím souvisí také jejich postupně klesající zdroje těžby, s rostoucím množstvím odpadů a problematikou jejich zpracování a ekologické likvidace. [3]

Biomasa používaná pro výrobu dřevních i rostlinných pelet má v dnešní době mnoho příznivců, ale i odpůrců. Nejčastějším argumentem je tvrzení, které však není pravdivé, že výroba a distribuce pelet, ať už dřevních nebo rostlinných, je energeticky příliš náročná a energetický výtěžek z tohoto paliva není dostatečný. Toto tvrzení bohužel degraduje ekonomiku a ekologičnost používání tohoto moderního paliva. To ovšem není vůbec pravda. Převážně dřevní pelety, pelety vyrobené z náročné dřevní hmoty, jsou doposud nejrozšířenějším typem pelet, které se využívají jako palivo především v domácnostech v malých zdrojích tepla do 200 kW. Stále víc však v dnešní době dostávají slovo i tzv. rostlinné pelety, pelety vyrobené z nedřevní biomasy. Ty mohou pocházet ze zemědělského odpadu nebo také z cíleně pěstovaných energetických plodin, bylin. Tyto pelety byly doposud spalovány především ve velkých zdrojích tepla, ale s přibývajícím poptávkou o dřevní pelety dostaly prostor právě pelety rostlinné a stále více se o nich hovoří také jako o alternativním palivu pro malé zdroje [11]. Proto si představíme základní vlastnosti a rozdíly mezi dřevní a rostlinnou biomasou, potažmo rozdíly mezi peletami těchto dvou paliv s tím, že si konkrétněji představíme právě rostlinnou biomasu a pelety z této biomasy.

1. BIOMASA

Biomasu lze popsat podle několika definic. Všechny však vychází ze stejného základu, a to z výroku, že biomasa je veškerá hmota organického původu [2].

Jedna z definic biomasy označuje biomasu jako substanci biologického původu – pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady. Jiná definice popisuje biomasu jako biologicky rozložitelné frakce výrobků, odpadů a zbytků ze zemědělství (včetně rostlinných a živočišných látek), lesnictví a příbuzných odvětví, jako jsou také biologicky rozložitelné frakce průmyslového a komunálního odpadu [1, 2].

1.1. Rozdělení biomasy

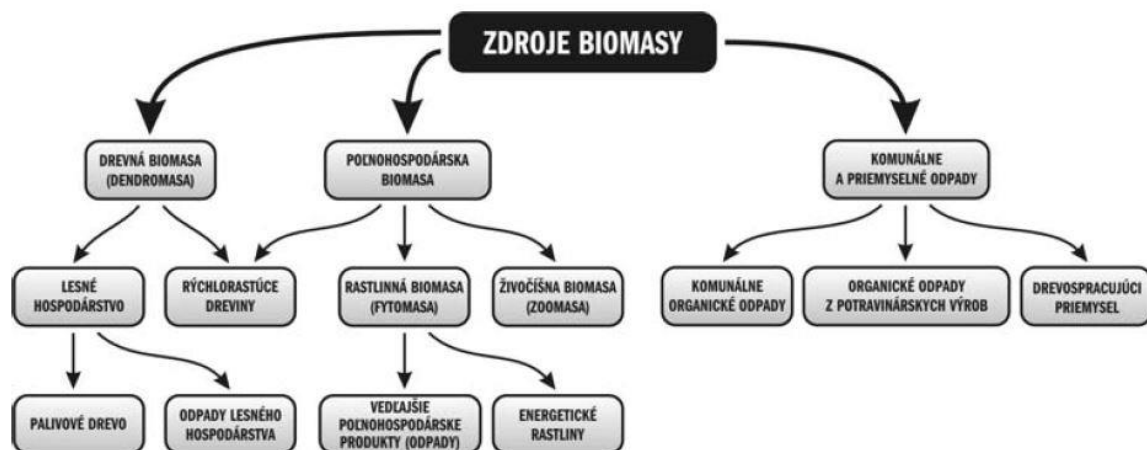
Biomasu lze rozdělit do několika skupin podle několika kritérií [1, 2].

Biomasa z hlediska jejího původu:

- rostlinná biomasa
 - dendromasa – dřevní biomasa
 - fytomasa – jednoleté rostliny
- živočišná biomasa
 - zoomasa
- komunální a průmyslové odpady (jejich biologicky rozložitelné frakce).

Rozdělení biomasy podle zdroje vzniku (obr 1):

- lesní biomasa – palivové dřevo, kořeny, kůra, piliny apod.
- zemědělská biomasa
 - fytomasa – např. obilná sláma, obilí apod.
 - živočišná biomasa (zoomasa) – např. exkrementy, odpady
- průmyslové a komunální odpady (jejich biologicky rozložitelné frakce).



Obr. 1 Rozdělení biomasy podle zdroje vzniku [2].

Rozdělení biomasy z hlediska energetického využití:

- záměrně pěstovaná biomasa
 - rychle rostoucí dřeviny
 - topol, olše, vrba
- energetické rostliny s vysokým obsahem cukru na výrobu alkoholu
 - cukrová řepa, brambory, obilí, atd. a bionafta (řepka olejná)

- Odpadová biomasa
 - dřevo a dřevní odpad z lesního hospodářství a dřevozpracujícího průmyslu
 - palivové dřevo, kůra, šišky, pařezy, odřezky, piliny, atd.
 - rostlinné odpady ze zemědělské výroby a údržby krajiny
 - sláma (kukuřičná, obilná, řepková), ostatky po likvidaci křovin, seno, atd.
 - odpady z živočišné výroby
 - exkrementy z chovu hospodářských zvířat, ostatky krmiv apod.
 - komunální organické odpady
 - kal z odpadní vody, organické zbytky z tuhých komunálních odpadů apod.
 - organické odpady z potravinářských výrob
 - odpady z mlékáren, lihovarů, konzerváren a masokombinátů

1.2. Dendromasa – dřevní biomasa

Dřevo je zcela jistě jedno z nejdůležitějších paliv, které máme k dispozici. Hlavním zdrojem dendromasy je lesní hospodářství, kde se používá část vytěžené suroviny, která není vhodná pro dřevozpracující průmysl. Dalším velkým zdrojem dendromasy je právě dřevozpracující průmysl, který produkuje dřevní odpady (piliny apod.), které jsou vhodné pro energetické využití. Ekonomicky vhodným zdrojem jsou tzv. rychle rostoucí dřeviny [2].

1.2.1. Rychle rostoucí dřeviny

Plantáže pro rostliny s krátkou obměnní dobou (plánovaná produkční doba v hospodářských lesích) jsou účelným způsobem pro využití přebytečné zemědělské půdy [1].

Tyto dřeviny se nejlépe pěstují v oblastech s mírným podnebím a na půdách, které mají dobrý obsah vody a živin. V horších klimatických podmínkách není zaručený dobrý výnos, dřeviny mohou uschnout nebo také zmrznout. Rychle rostoucí dřeviny lze využít také v oblastech se zvýšenými imisemi, kde jsou omezené možnosti pěstování rostlin pro potravinářské účely. Jednou z hlavních podmínek pro pěstování těchto dřevin je extrémně vysoký růst v mládí, to je spojeno s krátkou obměnní dobou. Nejčastější dřeviny pěstované pro tyto účely jsou např. topoly, vrby, akáty, olše a břízy [1].

1.2.2. Vlhkost a výhřevnost dřevin

Dřevo má velkou výhodu v tom, že si při dobrém uložení uchovává svůj energetický potenciál, který se dokonce v prvních dvou, třech letech, kdy palivo schne, zvyšuje. S dřevem je spojena i jeho kůra, která se využívá k energetickým účelům. Ideální vlhkost dřeva je 15–20 %. Schnutí dřeva je velmi důležité, jinak se uložená vlhkost ve dřevě uvolňuje až ve spalovacím zařízení a snižuje tak výhřevnost dřeva a zároveň zvyšuje jeho spotřebu při spalování [5]. Obsah vody ve dřevě 40 % zvýší spotřebu paliva téměř o polovinu a při obsahu vody 50 % je spotřeba paliva až dvojnásobná. Vyšší spotřeba je dána tím, že se část dřevní hmoty využije pouze na odpaření vody. V *tab. 1.1* je uvedena skutečná výhřevnost dřeva a kůry v závislosti na vlhkosti [2].

Tab. 1.1 Skutečná výhřevnost dřeva a kůry v závislosti na obsahu vody [2].

Obsah vody	Palivo	
	Dřevo	Kůra
[%]	[MJ·kg ⁻¹]	[MJ·kg ⁻¹]
0	18,5	18,8
10	16,4	16,7
20	14,3	14,6
30	12,2	12,5
40	10,1	10,5
50	8,0	8,4
60	6,0	6,3

Z tabulky je patrné, že kůra má dokonce o trochu větší výhřevnost než samotné dřevo. Zcela patrné a také důležité je však to, že s přibývajícím vlhkostí rapidně klesá celková výhřevnost paliva, což způsobuje např. snížení teploty spalování a vznik nežádoucích produktů kvůli nedokonalému spalování a také zvýšení spotřeby paliva, protože se z paliva nejprve musí vypařit voda a až poté se projeví jeho energetický potenciál. Z těchto důvodů je velmi důležité sklizené dřeviny sušit. Procesu sušení napomáhá naporcování dřeva na malé kousky, aby se z nich mohla voda vypařit rychleji. Dále lze výslednou vlhkost paliva snížit různými procesy zpracování dřevin, jako je například lisování a peletování, kdy se vlivem působících tlaků značně sníží obsah vody v palivu. O této a jiných výhodách je psáno v následující kapitole. Pro představu rozdílných vlhkostí a jiných parametrů lze nahlédnout do tab. 1.2.

Tab. 1.2 Průměrné zastoupení hořlaviny, vody a popela ve dřevě [2].

Palivo	Hořlavina [%]	Voda [%]	Popel [%]
Dřevo po těžbě	20–40	60–80	0,1
Dřevo (po vyschnutí)	79–82	17–20	0,5
Dřevní pelety	91	8	1

Můžeme vidět, že po vyschnutí se logicky sníží obsah vody ve dřevě, ale také se rapidně zvýší podíl hořlaviny, což napomáhá dobrému hoření při vytváření produktů dokonalého spalování. Samotné pelety mají však ještě lepší parametry pro hoření. Proto jsou pelety vhodné pro domácí použití jak z ekonomických, tak z ekologických perspektiv.

1.3. Fytomasa – rostlinná biomasa

Mezi fytomasu patří veškeré organické látky rostlinného původu vznikající v přírodě v průběhu fotosyntézy, tj. při zachycování slunečního krátkovlnného záření ve vlnových délkách 400–700 nm a procesu syntézy organických sloučenin představovaných zejména glukózou z oxidu uhlíkatého a vody a určitého množství anorganických látek jako je draslík, vápník, fosfor, dusík a dalších stopových prvků [6]. Největší význam mají rostliny víceleté a trvalé, které vytvářejí dostatečné množství nadzemní fytomasy. Produkce takových rostlin je mnohem efektivnější, neboť odpadá každoroční opakovaná kultivace, jako tomu je při pěstování jednoletých rostlin [2]. Do této skupiny tedy patří i dřevní rostliny, v této části se však zaměříme pouze na rostliny nedřevní, neboť jsme si dřevní biomasu, dendromasu, představili v předchozí části. Porovnáme tak některé aspekty těchto druhů biomasy.

1.3.1. Rostlinné odpady

Patří sem veškeré zemědělské zbytky, a to zejména obilná a řepková sláma, které mají široké uplatnění. U nás se pro energetické využití uplatňuje v zemědělských podnicích, ale také při vytápění částí měst nebo vesnic. Je zde mylný argument proti spalování slámy, že veškerá sláma, která v daném roce na polích na rostla, musí přijít zpět do půdy jako hnojivo. Ve skutečnosti však sláma obsahuje velice málo živin (např. obsah dusíku pod 1 %). Hnojení slámou má v současnosti význam jen u těžších půd (nepropustných pro vodu), jinak se v dnešní době hnojí kejdou nebo jiným dusíkatým hnojivem. Při rozkládání slámy si bakterie berou potřebný dusík z půdní zásoby. Po jejich zániku mizí část dusíku v atmosféře, podobně jako oxid uhličitý ze spálené slámy. Proto přiměřené využití slámy jako paliva nemůže ohrozit úrodnost půdy [2, 7].

Nejlepším druhem slámy je řepková sláma, se svou výhřevností 15–17,5 MJ/kg se přibližuje lepším druhům hnědého uhlí. Jinde než v energetice se prakticky nevyužívá, pro živočišnou výrobu či zaorání do půdy není příliš vhodná. Další využitelné rostlinné odpady jsou např. kukuřičná sláma, seno, odpady ze sadů a vinic nebo odpady ze zeleně a travnatých ploch [7]. V tab. 1.3 lze porovnat výhřevnosti některých druhů slámy.

Tab. 1.3 Výhřevnost některých druhů slámy [2].

Druh slámy	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]
Sláma z obilí	10	15,5
Sláma z kukuřice	10	14,5
Sláma z řepky	10	16

1.3.2. Energetické rostliny nedřevnaté

Vedlejší skupina rychle rostoucích dřevin. Jejich růst a hlavně objemová produkce při intenzivním pěstování výrazně převyšuje průměrné hodnoty ostatních plodin ve sledované oblasti [7].

Jejich největší výhodou je fakt, že dosahují vysokých výnosů a dají se jednoduše sklízet běžnými sklizňovými stroji a jsou víceleté, čímž odpadá každoroční opětovná kultivace. Mezi tyto rostliny patří šťovík, ozdobnice, srha laločnatá, lesknice rákosovitá, sveřep bezbranný a ovsík vyvýšený. Tyto energetické rostliny se od potravinářských liší tím, že jsou pěstovány pro výnos hmoty a ne pro výnos živin [6, 7].

1.3.3. Energetické využití některých druhů rostlin

1.3.3.1. Krmný šťovík

Čeď laskovcovitých, jedná se o křížence šťovíku zahradního a šťovíku tjanšanského. Tento kříženec je kvalitnější než původní rostliny. Převyšuje je kvalitou krmivářské produkce a také výnosem nadzemní hmoty a semen [7].

Sklizeň energetického šťovíku musí být prováděna před plným dozráváním semen, aby se během sklizně nevydrolila. Na počátku července je šťovík dostatečně vysušený, což je pro energetické potřeby velmi výhodné, není zapotřebí dodatečné vysoušení. Výnosy se pohybují okolo 5–10 t/ha suché hmoty [7].

1.3.3.2. Kukuřice setá

Patří do rodu lipnicovitých. Kukuřice setá je robustní jednoletá tráva, dorůstající obvykle délky 1–3 m. Nejlépe roste za podmínek dostatečného slunečního záření a i přes dobře vyvinutý kořenový systém potřebuje pro svůj růst velké množství vody. Nejlepší výnosy má na půdách s neutrálním pH [7].

Správná doba sklizně této rostliny se určuje poměrně obtížně. Nejlépe jí lze stanovit podle obsahu sušiny rostliny (odříznout a nakrájet několik rostlin a usušit je v troubě), toto lze však provádět jen v malých domácnostech, na farmách to není praktické. Přesná doba pak závisí na dané rostlině, ale také na dostupnosti smluvního partnera. Slámu z kukuřice lze pak nařezat na hrubou řezanku a poté jí přímo spálit nebo můžeme slámu dále upravit, např. slisovat od pelet. Kukuřičná sláma obsahuje velký podíl popelovin, což značně snižuje její výhřevnost. Při 9% vlhkosti má sláma výhřevnost $13,7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Vyšší podíl dusíku přispívá ke tvorbě NO_x při spalování. Chlór v palivu snižuje teplotu přehřáté páry. Popel má nízký obsah těžkých kovů a lze ho tedy použít jako hnojivo [7].

1.3.3.3. Pšenice

Do této čeledi lipnicovitých a rodu jednoděložných rostlin patří přibližně 20 druhů rostlin. Pšenice jsou jedny z nejstarších rostlin pocházejících z jihozápadní Asie. Mezi nejvýznamnější odrůdy patří pšenice setá a pšenice tvrdá (těstovinová pšenice) [7].

Pšenici lze sklízet žacími mlátičkami, kde sláma zůstává v řádcích na poli, dosychá a poté je balíkována nebo jinak zpracována. Lze sklízet i celou plodinu, pak je možné sklízet samojízdným lisem nebo samojízdným peletovacím lisem, se kterým se pelety vyrábí přímo při sklizení na poli. Při sklizni celé rostliny pomáhá samotnému procesu peletování obsah škrobu v rostlině, který zlepšuje pojivost materiálu. Výnos slámy je v průměru 4 t/ha. Pšenice je poměrně kvalitní palivo, oproti dřevu obsahuje větší podíl síry, chlóru a popela. V popelu je malé množství těžkých kovů a jsou nízké i teploty tavitelnosti, což má za následek riziko spékání popela v ohništi způsobující komplikaci při provozu kotle. Při dobrém skladování má pšenice vlhkost pod 10 % a výhřevnost až $15 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [7].

1.3.3.4. Řepka olejka

Jednoletá nebo dvouletá rostlina pěstovaná především pro svá olejnatá semena, využívaná hlavně pro výrobu olejů. Patří do kategorie brukvovitých, ve které je přes 100 druhů rostlin. Vzhledem ke snížení zásob fosilních paliv, rostoucí životní úrovni, spotřebě zboží a energetické produkci, začala být rostlina vnímána jako perspektivní materiál pro výrobu energie [7].

Pro energetické využití je řepka zpracována zejména do formy paliva pro vznětové motory, přídavky do motorové nafty. Sláma z řepky není vhodná pro zkrmení, není dobré jí používat ani jako stelivo pro zvířata a po zaorání se špatně rozkládá. Používá se tedy jako levné palivo, které se zpracovává stejně jako pšenice. Výnos řepkové slámy je 2,8–4,5 t/ha. Oproti dřevu má mnohem vyšší obsah popela, ale také síry a chlóru. Jako u ostatních obilovin má popel malý obsah těžkých kovů. Teploty tavitelnosti jsou u řepky vysoké natolik, že při spalování nehrozí spékání popela v ohništi. Při dobrém skladování má sláma vlhkost pod 10 % a výhřevnost asi $15 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ [7].

1.3.3.5. Slunečnice

Rod vysokých bylin z čeledi hvězdnicovitých, celý rod obsahuje až 70 druhů. Z těch to druhů se dva z nich, slunečnice roční a slunečnice topinambur, pěstují po celém světě. Je to vzpřímená, nerozvětvená, jednoletá rostlina s typicky velkou zlatou hlavou, jejíž semena jsou často konzumována v neupraveném stavu, ale slouží také k výrobě oleje. Obsahuje polynenasycené kyseliny, které člověk potřebuje [7].

Nejvhodnější doba sklizně je tehdy, kdy je spodní část úboru slunečnice žlutá a vnější listeny začínají hnědnout. Rostlinu lze sklízet kombajnem na obilniny. Harvestor (přístroj na sklizení) musí být v přední části vybaven speciální hlavicí, která zajistí bezpečný přenos květenství do dopravníku. Po sklizni olejnatého semene zbývá z rostliny velká nadzemní část. Tato část se dá použít pro spalování, je však potřeba ji nejdříve vysušit a upravit do vhodných tvarů [7].

1.3.3.6. Žito seté

Jednoletá i víceletá cizoprašná rostlina, která je opylována větrem. Rostlina má 1–2 metry a má modravý nádech. Má mohutný kořenový systém a lze ji tak pěstovat i na chudších půdách. Je pěstováno na plochách v mírných až chladných oblastech, převážně v severní části zeměkoule. Největší množství se pěstuje ve východní Evropě [7].

Žito se sklízí najednou, v plné zralosti pomocí kombajnu. Nejčastěji se sklízí v první nebo ve druhé části srpna. Produkce suché hmoty se pohybuje okolo 10–12 t/ha, což je z ekonomického hlediska fytoenergetiky výhodné množství. Výhřevnost slámy s obsahem vody 10 % se pohybuje okolo 15 MJ·kg⁻¹ [7].

1.3.3.7. Tráva

Z hlediska zemědělství patří mezi travní porosty louky, pastviny, proměnlivé travní porosty a dočasné travní porosty. Je to velmi významný způsob využití půdy, protože travnaté porosty pokrývají asi 2/3 rozlohy zemědělské půdy. Travní porosty se vyskytují ve všech zeměpisných šířkách naší planety [7].

Produkce se především zelená píce pro krmení zvířat. Vyrábět se může také seno, siláž a hať. Výnos čerstvé trávy se pohybuje v rozmezí 20–40 t/ha [7].

1.3.3.8. Triticale

Tato rostlina je hybridní obilnina, která vznikla křížením žita a pšenice, odtud její český název „žitovec“. Její klasy dorůstají větších velikostí, odrůdy mají geneticky fixovaný vysoký výnosový potenciál a jsou tolerantnější k horším pěstitelským podmínkám než pšenice [7].

Sklizeň této rostliny lze zajistit posekáním na řádky a po doschnutí celý objem hmoty sebrat a slisovat do balíků. Termín sklizně je potřeba stanovit tak, aby obilí nebylo příliš přezrálé, protože by mohlo dojít ke ztrátám v důsledku výdrolu zrna. Při skladování je třeba zajistit ochranu proti hlodavcům. Produkce suché hmoty (sláma + zrno) je v rozmezí 10–12 t/ha, což je ekonomicky přijatelné množství. Výhřevnost slámy při vlhkosti 10 % je okolo 15 MJ·kg⁻¹ [7].

2. PELETY, PELETOVÁNÍ

Ve velkých spalovacích zdrojích se používají spíše paliva slisovaná do balíků, které se přivádějí na roštech do ohniště. Pro malé spalovací zdroje, domácnosti, jsou k použití vhodné pelety, které lze používat jako palivo do automatických kotlů, které toto palivo pálí ekonomicky s pravidelným přídatkem do kotle.

2.1. Technologie výroby pelet

Pelety lze vyrábět po přepravě k zařízení ve formě slisovaných balíků nebo je možné pelety vyrábět přímo při sklizni, kdy odpadají finanční náklady na přepravu a lisování do balíků, ale pelety nejsou tak kvalitní jako při výrobě na velké paletizační lince [1]. Lze také použít malou granulační linku (MGL), která je vhodná pro každou domácnost a je možné si na ní vyrobit domácí pelety [8]. Rostlinné pelety se vyrábějí z již vysušených rostlin. Tyto rostliny byly sklizeny za suchého počasí. Je totiž ekonomicky nevýhodné dosušovat tento materiál a je mnohem jednodušší jej sklízet už suchý [9].

2.1.1. Výroba ze slisovaných balíků

Existují různé systémy pro výrobu pelet. Jsou zde protlačovací, granulační lisy, odvozené od granulačních lisů pro výrobu tvarovaných krmiv na bázi slámy. Rozlišujeme dva typy lisů, s kruhovou, vertikální matricí (obr. 3) a horizontální deskovou matricí [1].

Sláma je na poli levný zdroj a energetické rostliny nám dávají velký výnos energie, když porovnáme jejich vstupy a výstupy. Největší překážkou jsou vysoké investiční náklady na stroje, které jsou potřebné ve zpracovatelské lince. Tato linka je tvořená z manipulačního zařízení, rozpojovače balíků, drtiče a peletizačních protlačovacích lisů [1].

2.1.1.1. Příjem suroviny a rozduřování balíků

Slámu či jiné rostlinné palivo dostáváme pomocí manipulátoru z dopravního prostředku na podávací stoly rozduřovačů. Ze slisovaných balíků je potřeba manuálně odstranit motouzy, které by mohly způsobit značné problémy při rozduřování balíků. Balíky se s již odstraněnými motouzy rozduřují speciálním strojem, rozduřovačem (obr. 2) [9].



Obr. 2 Rozduřovač PR 2000,
ROZDRUŽOVADLA SENÁŽE, SENA A SLÁMY. Agrokonzulta [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
<http://www.agrokonzulta.cz/katalog/rozduzovadla-senaze-a-slamy/produkt/pr-2000-nesene>.

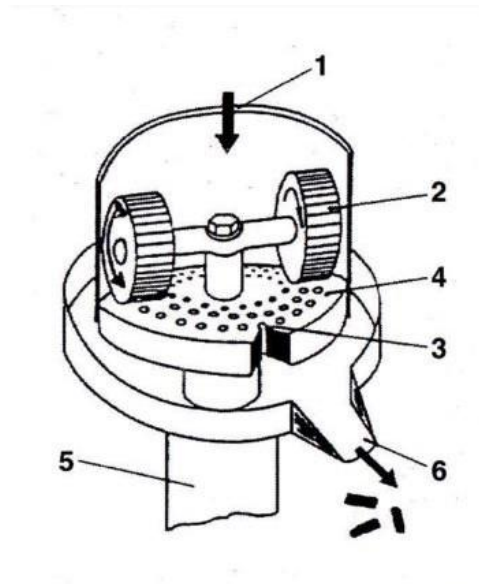
2.1.1.2. Drcení slámy

Vstupní surovinu musíme před peletizací nejprve upravit do vhodné zrnitosti pro paletizační přístroje. Např. na drcení slámy se používají kladívkové drtiče. Tyto drtiče mají výhody v tom, že mají nízkou pořizovací cenu, levné náhradní díly a vysoký výkon. Požadovaná výstupní frakce se reguluje pomocí výměnných sít. Energetická náročnost drcení je závislá na druhu vstupní suroviny, jejím obsahu vody, velikosti otvoru sít a technických možnostech drtiče [9].

2.1.1.3. Peletizace řezanky slámy

Granulační lis s plochou matricí mohou mít výkonnost i větší než $1 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ pelet při příkonu motoru do 150 kW. Pelety se tvoří při lisování materiálu vhodné zrnitosti po drcení za vysokého tlaku a teploty, kdy lignin obsažený v materiálu plastifikuje a přejímá funkci pojiva. Při tomto lisování dochází k objemové redukci vstupního materiálu až 12:1 [1].

Granulační lis s plochou matricí (vertikální i horizontální) jsou založeny na stejném principu. Je založen na ploché, talířové matrici, po jejímž povrchu rotují rolny, které protlačují materiál skrz otvory matrice. Důležitým požadavkem pro bezpečnou práci a chod motoru je rovnoměrné pokrytí stykové plochy matrice a rolen surovinou. Délka vyrobených pelet pod matricí se reguluje výškově nastavitelnými noži umístěným pod matricí, které jednoduše odlomí pelety od matrice [9].



Obr. 3 Matricový protlačovací granulační lis s horizontální matricí a svislými protlačovacími koly, 1 – vkládání drcené slámy, 2 – protlačovací kola, 3 – protlačovací otvory matrice, 4 – horizontální matrice, 5 – pohon, převodovka, elektromotor, 6 – odvod vyrobených granulí [1].

2.1.1.4. Kvalita pelet

Pro plynulou výrobu pelet je zapotřebí mít připraveno více matric s různou hloubkou a průměrem lisovací otvorů. Matrice se totiž musí přizpůsobit surovině, požadovanému výkonu přístroje a kvalitě pelet. Výroba pelet ze suché, ale „vymoklé“ slámy potřebuje delší lisovací komoru, naopak čerstvá sláma vyžaduje kratší lisovací komoru [9].

Složení suroviny udává konečnou tvrdost a odolnost pelet. Surovina z pole nikdy neodpovídá stejným požadavkům, záleží na odrůdě, způsobu hnojení, pozemku a použitých pesticidech. Parametry pro výrobu jednotlivých pelet záleží na zkušenosti obsluhy, neboť se nikdy nedají jednoznačně určit vstupní parametry suroviny [9].

Lisovací otvory v matrici musí být naprosto hladké, což nám zajistí vysokou třecí plochu a lepší vlastnosti vyrobených pelet. Hladkého povrchu lze dosáhnout pomocí speciální směsi písku, transformovaného oleje a otrub. Tato směs se používá i pro zaběhnutí nových matric, a to po dobu alespoň 30 minut [9].

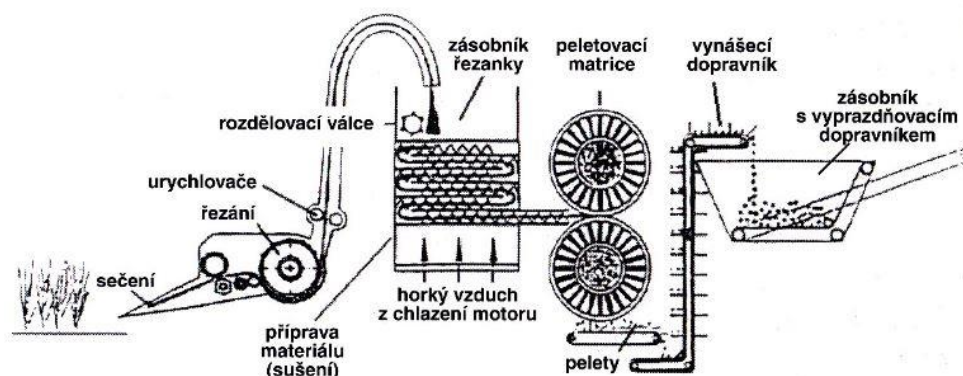
Je možné také regulovat hustotu pelet, a to tzv. kompresním poměrem (délka:průměr lisovacích otvorů). Hustota pelet roste s exponenciálně se zvyšujícím lisovacím tlakem v závislosti na kompresním poměru. Hustota také samozřejmě závisí na vlastnostech materiálu, jeho obsahu vody, aditivu, kvalitou frakce řezanky a teplotou matrice. Se zvyšující se teplotou matrice klesá lisovací tlak. Je známo, že po 30 minutách provozu se teplota matrice ustálí na 93–100 °C. Z toho důvodu je třeba dbát na to, aby se studený granulátor nepřetěžoval, protože by mohlo dojít k „zapečení matrice“, které je pak potřeba mechanicky odstraňovat [9].

2.1.1.5. Chlazení pelet

Z granulátoru vypadávají pelety s vysokou teplotou, asi 85 °C. Při této teplotě jsou pelety velmi křehké, protože se z nich stále odpařuje voda, která narušuje její stabilitu. Po vychlazení na teplotu okolo 30 °C pelety získávají svou stabilitu a tvrdost, kdy se také zredukuje obsah vody na 2–4 %. Pelety se chladí proudem studeného vzduchu, který prochází přes vrstvu pelet, tímto jsou také odlučovány tuhé prachové částice pomocí vírového cyklonu. Pokud to prostory dovolují, pak je chladicí zařízení řazeno přímo pod granulátorem, jinak je potřeba pelety dopravovat pomocí pásového dopravníku, na kterém už se samotné pelety také chladí. Dále se také oddělují jemné částice z pelet pomocí vibračního zařízení. Tyto částice jsou dopravovány zpět do peletačního zařízení pro opětovnou peletaci. Pelety musí být dopravovány tak, aby se při cestě zbytečně nerozbíjely [9].

2.1.2. Výroba pomocí samojízdného peletovacího stroje

Je čím dál tím větší zájem o zpracování suroviny přímo při sklizni. A to například z důvodu finančních při přesunu materiálu ze sklizně k peletovacím zařízením. Prozatím jediným řešením je systém HAIMER (obr. 4), projekt vyrobený v SRN, kde je sklízecí samojízdná řezačka se žacími nebo sběracími ústrojími, na kterou navazuje dosoušecí a provětrávací zařízení a lisovací peletovací ústrojí. Motory v soupravě mají výkon 353 kW a veškeré odpadní teplo z procesu je využito k dosoušení materiálu. Finálním produktem je jakási nekonečná „čokoláda“ o šířce asi 100 mm a tloušťce do 25 mm, která se při průchodu strojem rozlamuje na menší částice. Hustota finálního produktu se pohybuje mezi 850 a 1000 kg·m⁻³, což je přibližně stejně jako u pelet o průměru do 35 mm. V tab. 2.1 lze porovnat produkty systému HAIMER a běžného protlačovacího lisu [1].



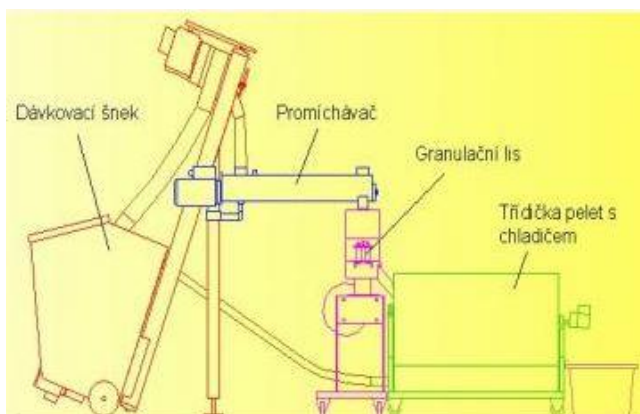
Obr. 4 Schéma systému HAIMER [1].

Tab. 2.1 Porovnání technických údajů mobilního tvarovacího stroje HAIMER a běžného protlačovacího lisu na tvarování slámy celého obilí, *) při lisování slámy se zrnem [1].

Údaj	Jednotka	HAIMER	Pelety
Výkonnost (sláma)	t·h ⁻¹	3	3
Výkonnost (sláma + zrno)	t·h ⁻¹	7	9
Potřeba energie	MJ·h ⁻¹	590	600
Tvar výrobku	–	vlnovice	váleček
Délka výrobku	mm	30 x 100	5–50
Průměr, tloušťka	mm	12	6–35
Hustota	kg·m ⁻³	850–1000	přes 1000
Sypká hmotnost	kg·m ⁻³	300–500*)	450–650*)

2.1.3. Výroba pomocí MGL

Při výrobě pelet na malé granulační lince (MGL, obr. 5, obr. 6) lze zpracovávat všelijaké materiály, piliny ze dřeva, biomasu, slámu, všeobecně lze granulovat potravinářské a krmné směsi papíru, atd. Pro výrobu pelet se linka skládá z dávkovacího šneku s uzavřenou násypkou, do které se nasype materiál pro granulování. Následně šnek vynáší materiál k dávkovacímu otvoru, kde přesně nastavená dávka propadáva do míchacího zařízení. Zbytek hmoty je přepadem odváděn zpět do násypky a šnekem znovu dávkován. Propadaná hmota, která prošla dávkovačem do míchacího zařízení do promíchávače hmoty se může smíchat s případnými dalšími komponenty nebo jí lze napařit párou či zvlhčit vodou pro zlepšení pojivost a poté propadáva přímo na granulační kola granulátoru. V granulátoru se pod tlakem a teplotou lisují pelety, které propadávají do třídičky, kde se separuje nepotřebný prach a špatně vylišané pelety. Při průchodu třídičkou se pelety zároveň i ochladí, čímž se zabrání jejich pozdějšímu rozpadávání vlivem vysoké teploty [10].



Obr. 6 Schéma MGL [10].



Obr. 5 Fotografie MGL [10].

2.1.4. Zapečení matrice paletovacího lisu

Zapečení matrice je hlavním technickým problémem při peletizaci slámy, kdy se lisovací otvory postupně stávají neprůchodné, a tím zvyšují teplotu vstupní suroviny i matrice. Teplota v lisovacím mechanismu může vzrůst až na 160 °C do okamžiku, kdy se celá matrice stane neprůchodnou. Pokud se matrice takto „zapeče“, pak je nutné demontovat a otvory odvrtnat pomocí vrtačky s příklepem. Tento problém většinou nastává, pokud se volí nevhodný kompresní poměr matrice, pokud se matrice opotřebuje používáním. Dále může být tento

problém způsoben zvýšeným obsahem jílů, který se s vodou z pozemku snadno dostane do balíku slámy nebo také nevhodnou obsluhou a údržbou matrice [9].

2.1.5. Lignin a aditiva

Látky, které zaručují pojivost materiálu při peletování. Lignin je již součástí struktury materiálu. Aditiva jsou látky, které přidáváme do procesu peletování, aby se zlepšily pojivé vlastnosti suroviny.

2.1.5.1. Lignin

Látka lignin je organická látka, která pomáhá spojovat buňky rostlin a zaručuje nám tak dřevnatění buněčných stěn. Tato látka procesem peletizace, kdy na materiál působí velký tlak a vyšší teplota, plastifikuje a pojí tak surovinu ve formě pelety stejně jako lepidlo spojuje papír. Ve slámě je obsah ligninu okolo 14–17 % hm. a ve dřevní hmotě i 25–35 % hm. [9]. Z čísel je patrné, že dřevo se ve formě pelet pojí mnohem lépe než rostlinné pelety, jako je sláma, které obsahují méně ligninu a mají tak zhoršené pojivé vlastnosti. Tento problém řeší použití aditiv.

2.1.5.2. Aditiva

Aditiva zlepšují pojivost pelet a také vlastnosti popela, Pro tyto účely je možné použít různá aditiva, jako je např. hydroxid vápenatý, škrob, žitná či kukuřičná mouka apod. U pelet pro velkoodběratele se však nepoužívají, protože navyšují samotnou výrobní cenu pelet. Proto jako aditivum bohatě postačí použít malý přídavek vody.

Použitím vody se nemyslí prolévání suroviny vodou, nýbrž prohřátí parou, což sníží opotřebení matrice a zvýší právě pojivost pelet. Ve výrobě se postupuje tak, že se obsah vody vstupní suroviny změří v balíku pomocí vlhkoměru. Samotným vlhčením zvýšíme pojivost u samotné řezanky, ale vlhčení je vhodné použít u suroviny s obsahem vody méně než 10 %. Pojivost pelet se u velkovýroby kontroluje každých 20 minut a také se kontroluje obsah vody ve vyrobených peletách, který je vhodný okolo 8 – 12 % hm., tomu odpovídá obsah vody u vstupní suroviny (řezanky) 10 – 14 % hm. Pravidelné měření obsahu vody v řezance za drtičem v dnešní době není vyřešené a záleží pouze na zkušenosti obsluhy [9].

2.2. Složení suroviny pro pelety

Pokud využíváme tuhou biomasu jako palivo, musíme brát v potaz konstrukci spalovacích zařízení vzhledem k jejímu chemickému a fyzikálnímu složení [2].

2.2.1. Chemické složení biomasy

V rostlinné biomase představují největší podíl uhlík (C), vodík (H₂) a kyslík (O₂). Právě oxidací uhlíku a vodíku dochází k uvolňování tepelné energie. Z toho nejpodstatnější složkou je uhlík, kyslík při chemických reakcích teplo neuvolňuje. Kromě těchto základních prvků obsahuje biomasa také prvky, které mají velký vliv na produkci škodlivých látek při jejím spalování. Patří mezi ně prvky: síra (S), chlór (Cl) a dusík (N₂). K produktům spalování, které také zatěžují prostředí, patří popel. Při zvýšeném množství těchto prvků v palivě se projevuje zvýšený obsah škodlivých látek ve spalinách. V tab. 2.2 můžeme, pro porovnání, vidět chemické složení některých druhů fosilních paliv a biomasy. V biomase se samozřejmě nachází nespočet dalších stopových množství anorganických prvků, které nepřímo ovlivňují spalovací proces, vznik škodlivých látek, tvorbu nánosů apod. patří mezi ně olovo (Pb), draslík (K), sodík (Ca), mangan (Mn), křemík (Si), měď (Cu), železo (Fe) a další [2].

Tab. 2.2 Chemické složení biomasy a fosilních paliv [2].

Palivo	Složky paliva v suché hmotě [%]					
	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	Cl
Smrkové dřevo s kůrou	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015	0,005
Bukové dřevo s kůrou	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015	0,006
Topol – krátké výhonky	47,5	6,2	44,1	0,42	0,031	0,004
Vrba – krátké výhonky	47,1	6,1	44,3	0,54	0,045	0,004
Kůra z jehličnatého dřeva	51,4	5,7	38,7	0,48	0,085	0,019
Žitná sláma	46,6	6,0	42,1	0,55	0,085	0,400
Pšeničná sláma	45,6	5,8	42,4	0,48	0,082	0,190
Triticale sláma	43,9	5,9	43,8	0,42	0,056	0,270
Ječmenná sláma	47,5	5,8	41,4	0,46	0,089	0,400
Řepková sláma	47,1	5,9	40,0	0,84	0,270	0,470
Pšeničné zrno se slámou	45,2	6,4	42,9	1,41	0,12	0,090
Triticale zrno se slámou	44,0	6,0	44,6	1,08	0,180	0,140
Zrno pšenice	43,6	6,5	44,9	2,28	0,120	0,040
Zrno triticale	43,5	6,4	46,4	1,68	0,110	0,070
Řepkové semeno	60,5	7,2	23,8	3,94	0,100	0,000
Ozdobnice čínská	47,5	6,2	41,7	0,73	0,150	0,220
Zemědělské seno	45,5	6,1	41,5	1,14	0,160	0,220
Ozdobnice čínská	46,1	5,6	38,1	1,34	0,140	1,390
Černé uhlí	72,5	5,6	11,1	1,30	0,940	< 0,1
Hnědé uhlí	65,9	4,9	23,0	0,70	0,390	< 0,1

Vidíme, že stébelniny mají na rozdíl od dřeva či uhlí vyšší obsah chlóru, což může vést k vysokoteplotním korozím, pokud spalujeme za vysokých teplot. Naopak sláma má na rozdíl od černého uhlí o polovinu menší obsah dusíku, který podporuje vznik NO_x při spalování za vysokých teplot. Plyny NO_x jsou velmi nebezpečné a při spalování je snaha omezit jejich tvorbu. Samotné uhlí má podstatně vyšší obsah uhlíku než ostatní paliva, s tím také souvisí to, že má uhlí z těchto paliv nejlepší výhřevnost. Ovšem jedná se o fosilní palivo, jehož zásoby jsou omezené na rozdíl od biomasy, obnovitelného zdroje energie. Nevýhodou stébelnin oproti dřevu je vyšší obsah síry palivu, která má za následek podporu tvorby sloučenin síry, které způsobují například kyselá deště. Tento obsah je však stále velmi nízký oproti fosilním palivům.

2.2.2. Části paliva

Veškeré tuhá paliva můžeme rozdělit na hořlavinu (h), obsah popela (A) a obsah vody (w). Všeobecně lze složení paliva zapsat takto:

$$h + A + w = 1 \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]. \quad (2.1)$$

Hořlavinou rozumíme tu část paliva, která oxidací uvolňuje teplo, tj. chemicky vázaná energie v palivu. Hořlavina se skládá ze dvou částí, první část hořlaviny se skládá z prvků uhlík, vodík a síra. Tyto prvky jsou tzv. aktivní látky hořlaviny, u kterých při oxidaci vzniká teplo. Druhou částí hořlaviny jsou tzv. pasivní prvky, které nedodávají teplo, ale jsou vázané na organickou hmotu. Do druhé části hořlaviny patří prvky kyslík a dusík, které při chemické reakci neuvolňují teplo [2].

Nepřízeň paliva (balast) tvoří popel a voda. S růstem balastu v palivě klesá spalné teplo, resp. jeho výhřevnost a snižuje se tak jeho cena. Popel je důsledek reakcí minerálních látek s kyslíkem přítomných v biomase. Popel je pevný zbytek, který vznikne po dokonalém laboratorním spálení paliva. Tvořený je tedy minerálními látkami obsaženými v palivu. Pokud bereme popel z chemického hlediska, je tvořený zejména směsí oxidů organických látek (K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 apod.). Samotné množství popela je závislé na podmínkách spalování [2].

Je důležité znát teplotu tavení popela pro jednotlivé suroviny, abychom zabránili případnému spékání popela přímo v kotli. Následná struska je pak potřeba mechanicky odstranit, protože zanáší konstrukci spalovacího zařízení. Tavení popele je při spalování rostlinné biomasy vážnou věcí, neboť některé druhy slámy mají poměrně nízkou teplotu tavitelnosti popele. Touto problematikou se zabývá část týkající se spalování biomasy.

Popel se podle teploty tavení dělí na tyto tři druhy [2]:

- lehko tavitelné popely, s teplotou tavení popela 1000–1200 °C,
- středně tavitelné popely, s teplotou tavení popela 1200–1450 °C,
- těžce tavitelné popely, s teplotou tavení popela > 1450 °C.

V tab. 2.3 lze porovnat teploty tavení popela, obsah popela a spalné teplo, resp. výhřevnost některých druhů paliva. V rostlinné biomase se obsah popela pohybuje od 0,5 do 8 % a obsah popela v dřevní biomase je od 0,5 do 2,0 % [2]. I z tohoto je patrné, že větší problémy při spékání popela vznikají při spalování rostlinné biomasy.

Tab. 2.3 Výhřevnost, spalné teplo, obsah popela a teplota tavení v suchém stavu [2].

Palivo	Složky paliva v suché hmotě [%]			
	Výhřevnost (Q_i)	Spalné teplo (Q_s)	Obsah popela (A)	Teplota tav. popela
	[MJ·kg ⁻¹]	[MJ·kg ⁻¹]	[kg·kg ⁻¹]	[°C]
Smrkové dřevo s kůrou	18,8	20,2	0,6	1426
Bukové dřevo s kůrou	18,4	19,7	0,4	-
Topol – krátké výhonky	18,5	19,8	1,8	1335
Vrba – krátké výhonky	18,4	19,7	2,0	1283
Kůra z jehličnatého dřeva	19,2	20,4	3,8	1440

Pokračování Tab. 2.3.

Žitná sláma	17,4	18,5	4,8	1002
Pšeničná sláma	17,2	18,5	5,7	998
Triticale sláma	17,1	18,3	5,9	911
Ječmenná sláma	17,5	18,5	4,8	980
Řepková sláma	17,1	18,1	6,2	1273
Pšeničné zrno se slámou	17,1	18,7	4,1	977
Triticale zrno se slámou	17,0	18,4	4,4	833
Zrno pšenice	17,0	18,4	2,7	687
Zrno triticale	16,9	18,2	2,1	730
Řepkové semeno	26,5	-	-	-
Ozdobnice čínská	17,6	19,1	3,9	973
Zemědělské seno	17,4	18,9	5,7	1061
Ozdobnice čínská	16,5	18,0	8,8	-
Černé uhlí	29,7	-	8,3	1250
Hnědé uhlí	20,6	-	5,1	1050

2.2.3. Spalné teplo a výhřevnost

Tyto dvě vlastnosti jsou z hlediska energetického využití biomasy nejdůležitější.

Spalné teplo Q_s [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva, kde voda ve spalínách je v kapalném stavu [4].

Výhřevnost Q_i [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva, kde voda ve spalínách je v plynném stavu. Souvislost mezi těmito dvěma údaji je taková, že výhřevnost se spočítá ze spalného tepla odečtením výparného tepla vody podle vztahu:

$$Q_i = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}], \quad (2.2)$$

kde r [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] je výparné/kondenzační teplo vody, $r = 2454 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, W^r [-] je obsah vody v palivu a H_2 je obsah vodíku v surovém palivu (z 1 kg vodíku vznikne 8,94 kg vody) [4].

Z tab 2.3 lze porovnat jednotlivé výhřevnosti některých druhů biomasy a fosilních paliv. Je zřetelné, že výhřevnost suchého dřeva je poměrně vysoká a pohybuje se od 18 do 19 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Vyšší výhřevnost má také sláma z obilnin a travin, a to v rozsahu 16,5 až 17,5 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou při nulové vlhkosti paliva. Ve skutečnosti tomu tak není a každé palivo obsahuje nějakou část vody, většinou nejméně 10 %. Balíková sláma ve skladech má až 16 % vlhkosti. Tato voda se při hoření odpařuje a snižuje tak výhřevnost sušiny biomasy. Výhřevnost taktéž klesá s časem, a to vlivem působení mikroorganismů, hub a plísní [2]. Proces peletizace paliva výhřevnost paliva zvyšuje, neboť při stlačení paliva do pelet se „vymáčkne“ část vody v palivu a sníží se tak jeho vlhkost, což má za následek zvýšení samotné výhřevnosti paliva.

3. SPALOVÁNÍ BIOMASY

Hoření pevného paliva se poměrně liší od hoření paliv kapalných či plyných. Tento rozdíl je dán tím, že u pevných paliv musí nejprve proběhnout ohřev částice, poté odpaření vlhkosti a odplynění a nakonec musí proběhnout heterogenní reakce mezi kyslíkem a pevným povrchem uhlíku [5].

Proces hoření částice pevného paliva probíhá následovně:

- ohřev částice,
- odpaření vlhkosti,
- uvolnění prchavé hořlaviny,
- hoření prchavé hořlaviny,
- hoření uhlíku,

kde hlavní úlohu při hoření pevného paliva (a tím i při hoření biomasy) má hoření uhlíku. Toto je dáno tím, že uhlík zaujímá velký podíl v prvkovém složení pevného paliva. Čím vyšší obsah uhlíku palivo má, tím vyšší má palivo výhřevnost [5].

U dřeva a slámy je využívání tepla spalováním to nejúčelnější a nejekonomičtější řešení. Právě u energeticky využitelného zbytkového dřeva a slámy, které je ročně k dispozici, je potenciál odpovídající ekvivalentu topného oleje asi 4–5 miliónů tun. Pokud vezmeme v potaz úvahu účinnosti kotlů, bylo by možné vyrábět asi 7 % energie používané pro vytápění místností z biomasy [6].

3.1. Vlastnosti paliva

3.1.1. Obsah prchavé hořlaviny v palivu

Biomasa má, oproti ušlechtilým klasickým palivům (uhlí, koks), vysoký podíl prchavé hořlaviny. Při spalování se prchavá hořlavina nejprve uvolňuje z paliva v podobě uhlovodíků (teploty 200 až 500 °C) a až poté nastává hoření neodplyněného zbytku. V části nad roštem uhořívá pouze část prchavé hořlaviny, zbytek postupuje spolu se spaliny kotle do části s nižšími teplotami. Pokud tedy hořící uhlovodíky prchavé hořlaviny přijdou do styku s chladnějším prostředím, potažmo s chladnou stěnou kotle, ochladí se a dojde k jejich rozkladu na H_2 a C, kde vzniklý amorfní uhlík má vyšší zápalnou teplotu a nevyhoří tedy. Namísto toho se ukládá na výhřevných plochách v podobě sazí. Z těchto důvodů je nutné kotle na biomasu konstrukčně upravit tak, aby se na vhodných místech dávkoval do zařízení na spalování sekundární, případně terciální vzduch, který podpoří hoření i v oblastech dále nad ohništěm, čímž se spálí veškerá prchavá hořlavina. Obecně zde platí, že čím více prchavé hořlaviny palivo obsahuje, tím větší je poměr součtu množství sekundárního a terciálního vzduchu k množství primárního. V tab. 3.1 jsou uvedeny množství prchavé hořlaviny některých tuhých paliv [5].

Tab. 3.1 Obsah prchavé hořlaviny v palivu [5].

Palivo	Rašelina	Řepková sláma	Dřevní hmota	Obilní sláma
V [% _{hm}]	cca 70	80–86	80–86	Až 88

3.1.2. Vlastnosti popelovin v palivu

Biomasa jako taková se vyznačuje nízkým obsahem popelovin. Díky tomu mají kotle na biomasu méně složitou soustavu na jejich odvod než kotle na klasická paliva, kde tvoří popeloviny až 40 %. Výhoda nízkého obsahu popela je snížena tím, že oproti uhlí má popel biomasy nepříznivé vlastnosti. Nejlépe se popeloviny porovnávají pro paliva v bezvodém stavu.

Dřevní hmota obsahuje pouze 0,3 až 2 % popelovin, přičemž kůra ze dřevin může mít tuto hodnotu i několikanásobně vyšší, kdežto stébelniny mohou obsahovat až 8 % popelovin. Samotné složení a vlastnosti popela mohou výrazně ovlivnit bezporuchový chod a životnost kotle. Proto jsou velmi důležité pro návrh a provoz kotlů charakteristické teploty popelovin a obsah alkalických kovů [5].

Popel jako takový ztěžuje přístup kyslíku k hořlavině. Částečky popela se také usazují na teplosměnných plochách, vytvářejí nánosy a zhoršují přenos tepla v kotli. Díky nim se ochlazuje spaliny a roste komínová ztráta. Tahy, které jsou v kotli ucpané nánosy, kladou průtoku spalin větší odpor a příkon sacího ventilátoru tak roste. To může vést až k erozi (ošlehávání) trubek popílkem. Tyto skutečnosti vedou k nutnosti zvětšení teplosměnných ploch kotle a ke snížení rychlosti průtoku spalin [4].

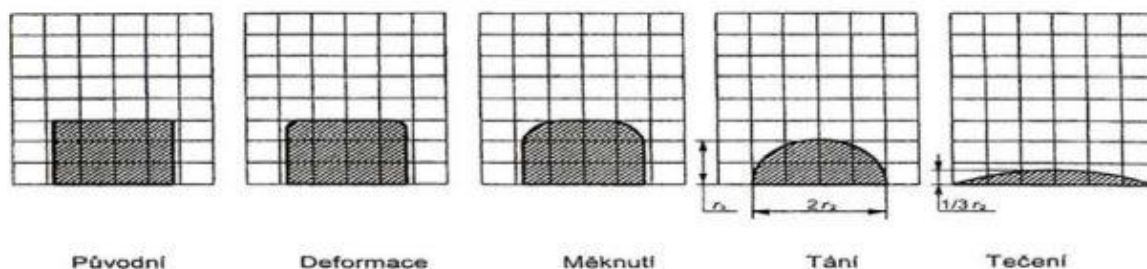
3.1.2.1. Druhy popelovin

Popel může ze spalovací komory odcházet ve formě strusky, škváry nebo popílku [4].

Struska jsou minerální zbytky paliva, které se spálí při teplotách nad teplotou tečení popela. Pokud se struska rychle ochladí, vytvoří sklovitou hmotu, která se velmi obtížně mechanicky odstraňuje. Další forma, škvára, vzniká při spalování, které probíhá při teplotách, při kterých dochází ke spékání a tavení, tj. část minerálních zbytků dosáhne měknutí nebo teplot tavení popela a nastane spojení jednotlivých zrn ve větší či menší kusy. Popílek jsou drobné minerální částice, které unášejí samotné spaliny kouřovodem do ovzduší [4].

3.1.2.2. Charakteristické teploty popele

Tyto teploty jsou velmi důležité pro stavbu a provoz kotlů, určují nám chování popele při různých, charakteristických teplotách. Jedná se o teplotu sintrace (deformace), měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c). Jedním z možných způsobů určení těchto teplot je metoda založená na sledování deformace volného zkušebního tělíska (dle ČSN ISO 540). Tato metoda spočívá v ohřívání válečku nebo jehlanu o hraně 3 mm vylišovaného ze zkušební popele. Při teplotě měknutí t_a je charakteristické ohnutí špičky jehlanu, teploty tavení t_b se dosáhne, když se jehlan zhroutí v polokouli a teplota tečení t_c je, když se vzorek rozteče na podložce. Pro váleček je situace patrná z obr. 7 [4].



Obr. 7 Segerova metoda jehlanů,

Energie z biomasy XV: Lednice, Česká republika [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 2014 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: www.eu.fme.vutbr.cz/file/313_1_1/.

Z praktického hlediska je teplota měknutí t_a minimální teplota, kdy začne docházet k nalepování popele na výhřevné plochy a tím ke zhoršení prostupu tepla ze spalin do média. Teplota tečení t_c určuje situaci, kdy dojde k roztavení popele [4]. V tab. 3.2 je možné porovnat charakteristické teploty popele některých druhů paliv.

Tab. 3.2 Charakteristické teploty popela [5].

Palivo	Rašelina	Řepková sláma	Dřevní hmota	Šťovík	Obilní sláma
t_a [°C]	900	750	1160	1306	830
t_b [°C]	x	x	1340	> 1500	850–900
t_c [°C]	x	x	1350	> 1500	850–900

Lze vidět, že teplota měknutí t_a u rašeliny, řepkové slámy a obilné slámy je oproti dřevu nižší o 300 až 400 °C. Pouze u šťovíku je tato teplota oproti dřevní hmotě vyšší asi o 150 °C. Dále je patrné, že u některých paliv z rostlinné biomasy vzniknou potíže se spékáním popelovin a zalepováním stěn spalovací komory sklovitou hmotou, kterou běžnými prostředky nelze odstranit. Z těchto důvodů je potřeba spalovací komoru uzpůsobit tak, aby byl plamen co nejlépe a nejdříve vychlazen pod teplotu měknutí t_a . Tohoto lze dosáhnout použitím dostatečně velké spalovací komory, také vhodným pásmováním vzduchu a vyšším přebytkem vzduchu nebo recirkulací spalín. Použití vyššího přebytku vzduchu je technicky jednodušší, avšak tento způsob zvětšuje komínovou ztrátu. Použití recirkulace spalín je naopak konstrukčně náročnější, ale co se týče míry spotřebovaného paliva o něco úspornější opatření, je nutné počítat s náklady na provoz recirkulačního zařízení [5].

3.2. Ovlivňující faktory a požadavky na zařízení

Proces spalování pevných fytopaliv ovlivňuje řada faktorů [6]:

- vysoký podíl z paliva uvolňovaných plynných těkavých látek při teplotách nad 200 °C, který může tvořit více než 80 % hmotnosti sušiny paliva,
- dlouhé plameny při hoření fytopaliv tvořené velkým množstvím spalných plynů a obtížnosti průniku potřebného kyslíku do nich pro dokonalé spálení,
- relativně dlouhá doba prohořívání spalných plynů, která trvá až několik vteřin, podle výkonu kotle a velikosti dohořívacích komor, během které nesmí být plamen nikde a ničím ochlazen, protože by docházel ke tvorbě sazí,
- teploty měknutí, tečení a tavení dřevního popele a popele ze stébelin (860–1100 °C),
- paliva ze stébelin s vyšším obsahem chlóru vyžadují zvláštní opatření u parních kotlů s vyšší teplotou u přehříváků než 550 °C s ohledem na vysokoteplotní korozi.

Projektová příprava kotelny na spalování fytopaliv tak vyžaduje velmi zodpovědný přístup a znalosti především o palivu, jeho vlastnostech, množství, způsobu dodávky a skladování i způsobu spalování [6].

Spalování stébelin je složitější v porovnání se spalováním dřevní biomasy. Díky nízké teplotě měknutí je třeba kotle provozovat na nízkých parametrech páry, aby nedocházelo k zastruskování [4].

Je vždy výhodnější, aby oblast zplyňování paliv a oblast dohoření spalných plynů byly odděleny. Zplyňování pak může probíhat za nižších teplot 600 až 800 °C (pod 600 °C je nebezpečí vzniku velkého množství kouře), aby se vznikající popel nespékal a prohořívání spalných plynů a teplotách kolem 1000 až 1100 °C. Při vyšší teplotě je prohořívání zbytečné, neboť se zatěžuje konstrukce topeniště a výměníků a ve větší míře vznikají NO_x [6].

3.3. Emise ze spalování biomasy

Základní látky vznikající při spalování biomasy jsou stejné jako při spalování jiných organických paliv. Jedná se především o CO_2 a H_2O . Při různých podmínkách spalování vzniká

při spalovacím procesu množství jiných látek, které jsou považovány za látky znečišťující. V první řadě se jedná o oxid uhelnatý (CO), který je produktem nedokonalého spalování. Pokud jsou teplota a množství přivedeného vzduchu dostatečné, CO oxiduje na CO₂ a jeho emise jsou tak minimální. Dále mohou vznikat oxidy dusíku NO_x. Pokud jde o vysoké teploty, které ale při spalování biomasy nejsou běžné, mohou vznikat termické NO_x. Při teplotách, které jsou pro spalování biomasy běžné (700 až 900 °C), vznikají především palivové NO_x, z dusíku obsaženého v palivu. Velkou předností pro spalování biomasy jsou velmi nízké emise ze síry, emise SO₂, síry je v palivu obsaženo do 0,1 % hmotnosti. Na základě zákonného ustanovení musí být topeniště na biomasu ve většině případů vybaveno zařízením na odstraňování prachu [1]. Při spalování slámy a jiných rostlinných paliv je nebezpečí značného úletu jemného popílku, který mohou vdechovat živé organismy. Tyto frakce jsou velmi přísně sledované, a proto musí být používány výkonné odlučovače a filtry, ale také vodou chlazené rošty [6]. V úvahu pak přichází použití tkaninových filtrů, cyklonů a elektrických filtrů. U tkaninových filtrů je známo, že skrývají určité nebezpečí požáru, který může být způsoben vysokou rychlostí proudění vzduchu s prachem a následným třením částic prachu o sebe a stěny odlučovače, přičemž má tkanina nízkou teplotu vzplanutí. Proto nelze doporučit tkaninové filtry pro spalování biomasy [1].

3.3.1. Certifikované kotle pro spalování agropelet

U nás je jedním z kotlů certifikovaných pro, mimo jiné, spalování agropelet automatický kotel MultiBio 199. Tento kotel je certifikovaný pro spalování dřevěných pelet s emisní třídou kotle 5, dále pro rostlinné pelety a nepeletované rostlinné materiály s emisní třídou kotle 3 a nakonec pro hnědé uhlí s emisní třídou kotle 3. Tento kotel toleruje tyto paliva: zbytky z rostlinné výroby, hořčice, řepka, slunečnice, oves, pelety z rašeliny a další zemědělské produkty, papírové pelety, odpady po čištění obilnin. Pro spalování tolerovaných paliv je vhodné raději kontaktovat výrobce pro konzultaci nastavení provozu hořáku. Tento kotel si snadno poradí se spékavostí popela. To je dáno konstrukcí válcové rotační spalovací komory, kde případné spečence v průběhu hoření odvaluje do prostoru popelníku a neobtěžuje tím obsluhu kotle. Kotel má nastavitelný výkon od 60 do 200 kW s účinností spalování kotle 92,2 % a účinností spalování hořáku až 96 %. Jelikož je kotel certifikovaný, splňuje při správném nastavení přísné emisní limity pro spalování biomasy. Stejný výrobce nabízí i další, certifikované, kotle pro spalování agropelet [8].

Dalším kotlem, který umí spalovat velkou škálu paliv včetně agropelet je kotel Verner A251 s výkonem 25 kW. Tento kotel je určen pro úsporné a ekologické vytápění rodinných domů, zemědělských budov, škol, apod. Tento kotel umí spalovat biomasu v různé formě včetně pelet. S emisní třídou 5 je tento kotel certifikován pro spalování dřevěných pelet, agropelet a obilí. Předepsané palivo pro tento kotel je: oves, pšenice, kukuřice, hořčice, pelety z řepky, dřevní pelety s kůrou, dřevní pelety bez kůry s účinností spalování 91 %. Kotel umí spalovat i paliva, které mají vyšší spékavost popela a kromě předepsaného paliva umí spalovat i mnoho dalších druhů paliv [12].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

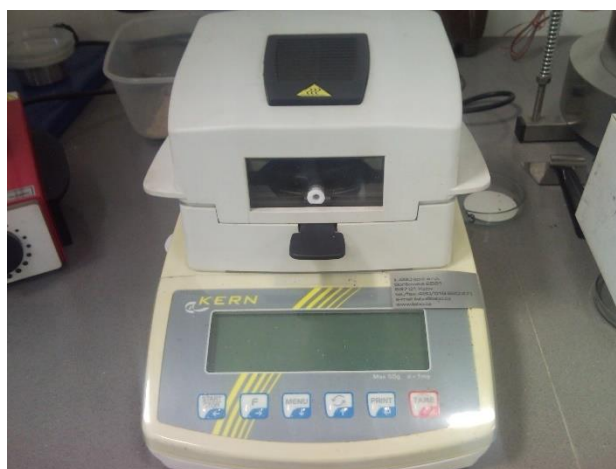
V experimentální části bylo za úkol stanovit vlastnosti vybraných paliv, a to jejich vlhkost, spalné teplo, resp. výhřevnost, obsah popele a teploty tavitelnosti popele. Dál se měla ověřit tvorba emisí TZL na pilotní jednotce, tato část se bohužel z časových důvodů nestihla a nebyly tedy naměřeny její výsledky. Agropelety, které se použily v tomto experimentu, byly z pšeničné slámy, sena a slunečnice (viz obr. 8).



Obr. 8 Zleva - sláma, slunečnice, seno.

4.1. Stanovení vlhkosti paliva

Vlhkost paliva se stanovila v přístroji KERN MLS (obr. 9), který používá metodu termogravimetrie. Přístroj se zahřál na teplotu 120 °C a toto tepelné záření pronikalo dovnitř vzorku, kde se transformovalo na tepelnou energii a k ohřevu materiálu tak docházelo zevnitř ven. 120 °C je teplota, která při atmosférickém tlaku přivádí vodu ke změně skupenství z kapalného na plynné, ale není dost vysoká na to, aby zažehla měřený vzorek.



Obr. 9 Přístroj na měření vlhkosti KERN MLS.

Pro každý vzorek bylo vybráno náhodné množství a vlhkost každého vzorku byla změřena jednou. Jednotlivé naměřené vlhkosti jsou viditelné v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Vlhkosti agropelet ze slunečnice, slámy a sena.

Palivo	Slunečnice	Sláma	Seno
Vlhkost [%]	11,27	10,02	13,15

Z tabulky je patrné, že nejsušší je sláma, která má očekávaných 10 % vlhkosti, naopak seno má poměrně vysokou vlhkost 13 %, což bylo nejspíše způsobeno sklizní ve špatnou dobu nebo skladováním ve vlhkých podmínkách.

4.2. Stanovení spalného tepla paliva

Hodnota spalného tepla se stanovila v přístroji Kalorimetr C 200 (viz obr. 10). Zařízení stručně funguje tak, že je odměřený vzorek, který váží asi 1 gram, spálen a ohřívá okolní vodu. Zařízení určí spalné teplo ze známých vlastností vody a také ze znalosti kalorimetrické rovnice. Vzorek je umístěn v tlakové nádobě, která je naplněna kyslíkem a poté je zapálen pomocí bavlněného provázku, který je zažehnut odporovým drátem. Díky okolnímu kyslíku proběhne prudká exotermická reakce, při které je vzorek spálen a vzniklé teplo je předáno okolní vodě.



Obr. 10 Kalorimetr C 200 s potřebným příslušenstvím.

Pro každý vzorek byl náhodně vybrán asi 1 gram hmotnosti s tolerancí 0,1 gramu, který byl následně otestován pro výpočet spalného tepla. Spalné teplo každého vzorku bylo měřeno třikrát. V tab. 4.2 jsou naměřené hodnoty spalných tepel pro všechny tři paliva.

Tab. 4.2 Spalné teplo měřených paliv.

Číslo měření	Spalné teplo [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]		
	Slunečnice	Seno	Sláma
1	17,61	15,35	16,69
2	17,98	15,24	16,55
3	18,20	15,10	16,60
Průměrná hodnota	17,93	15,23	16,61

Z tabulky lze vidět, že seno má nejmenší hodnotu spalného tepla, to je dáno tím, že má každé palivo jiné vlastnosti a zejména také tím, že má seno ze všech vzorků největší vlhkost paliva (viz tab. 4.1). Hodnoty spalného tepla lze porovnat s teoretickými hodnotami uváděných v literatuře, důležité je však porovnání výhřevností, protože hodnota výhřevnosti je u paliva mnohem důležitější než hodnota spalného tepla.

4.3. Stanovení výhřevnosti paliva

Výhřevnost se určí pomocí spalného tepla a naměřené vlhkosti paliva. Spalné teplo je celkové uvolněné množství energie, kdežto výhřevnost je velikost spalného tepla snižená o měrné výpalné teplo vody, protože nechceme, aby nám v zařízení vznikala vlhkost [4]. Výsledná výhřevnost se ze spalného tepla vypočítá pomocí vztahu 2.2 (str. 25).

Jako vzor pro výpočet je použita průměrná hodnota spalného tepla slámy. Prvkové složení jednotlivých druhů paliv je viditelné v *tab. 2.2*.

$$Q_i = 16,61 - 0,2453 \cdot (0,1002 + 8,94 \cdot 0,058) = 16,46 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}. \quad (2.3)$$

Ostatní hodnoty výhřevností byly spočítány z průměrných hodnot spalného tepla analogicky a jsou znázorněny v *tab. 4.3*. Pozn.: Pro slunečnici nebyla nalezena hodnota obsahu vodíku a byla použita hodnota obsahu vodíku 6 %, která je téměř u všech rostlinných paliv.

Tab. 4.3 Výhřevnosti měřených paliv.

Palivo	Slunečnice	Seno	Sláma
Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	17,77	15,06	16,46

Z tabulky je patrné, že nejlepší výhřevnost, přestože nemá nejnížší vlhkost, má slunečnice. To je dáno výhodnými vlastnostmi hoření tohoto paliva. Slunečnice má však menší obsah ligninu než některá ostatní paliva a je tak problém se soudružností pelet. Nejnížší výhřevnost má seno, protože má také nejvyšší vlhkost z měřených paliv. Pšeničná sláma má vypočtenou hodnotu výhřevnosti při 10% vlhkosti o trochu vyšší, než kolik udává *tab. 1.3*. Tabulkové hodnoty z literatury jsou však pouze orientační a liší se v závislosti na skladovacích podmínkách, podmínkách při pěstování apod. Z naměřených vzorků se výhřevnost slunečnice blíží nejvíce výhřevnosti dřevních paliv.

4.4. Stanovení obsahu popele paliva

Obsah popele u rostlinných paliv je oproti palivům fosilním značně nižší, avšak je v řádech jednotek procent vyšší než u paliv dřevěných [5]. Pro určení obsahu popele je využita jednoduchá pec (viz *obr. 11*), ve které je vysušený vzorek žihán při teplotě cca 550 °C po dobu několika hodin.



Obr. 11 Pec pro žhání měřených paliv.

Množství popela se stanoví z rozdílu hmotností paliva na začátku a hmotnosti popela po spálení podle rovnice 2.4.

$$A = \frac{m_p}{m_v} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.4)$$

kde A [%] je procentuální množství popela, m_p [kg] je hmotnost popela po spálení a m_v [kg] je hmotnost původního suchého vzorku před spálením.

V tab. 4.4 jsou naměřené hodnoty hmotnosti původních suchých vzorků paliva, dále hmotnosti popele spáleného paliva a také výsledné procentuální množství popela, vypočítaného pomocí rovnice 2.4, obsaženého v jednotlivých měřených palivech.

Tab. 4.4 Naměřené a vypočtené hodnoty týkající se množství popele měřených paliv.

Palivo	m_v [g]	m_p [g]	A [%]
Slunečnice	12,29	0,51	4,14
Seno	22,95	2,71	11,79
Sláma	22,19	1,32	5,97

Z tabulky je patrné, že největší obsah popelovin obsahuje seno, které má zároveň i největší vlhkost z měřených paliv. Z těchto dvou vlastností lze usoudit, že ze tří měřených vzorků má seno tyto dvě vlastnosti nejhorší. Obsah popelovin v seně je téměř dvojnásobný oproti obsahu popelovin ve slámě, což představuje značný problém při spékání popela a je proto nutné mít konstrukci spalovacího zařízení dělanou pro takovýto druh popela. Tyto vlastnosti určují charakteristické teploty tavitelnosti popele, jejichž výsledky měření jsou v následující části.

4.5. Stanovení teplot tavitelnosti popele

Teploty tavitelnosti popele byly stanoveny pomocí metody založené na sledování deformace volného zkušebního tělíska (dle ČSN ISO 540) [4]. Základní teoretické informace o těchto teplotách jsou psány v části 3.1.2.2. *Charakteristické teploty popele*, která se věnuje i pozorování vzorků pomocí Segerovy metody jehlanů a porovnávání s danými obrázky této metody. Tyto teploty byly stanoveny na základě pozorování vzorků v elektrické superkanthalové pozorovací peci typu 0116 E (viz obr. 12), která byla v laboratoři k dispozici. Tato pec se zdvihovým mechanismem je určena k tepelnému zpracování a pozorování vzorků při teplotách do 1500 °C pomocí odporového ohřevu.



Obr. 12 Elektrická superkanthalová pozorovací pec typu 0116 E.

Pro stanovení těchto teplot je nejprve nutné několik hodin vzorky žíhat v peci při teplotě cca 550 °C, následně musí být popel jednotlivých vzorků vylisován v lisovacím zařízení (viz obr. 13) do tvaru válečků, jejichž deformace jsou pozorovány.

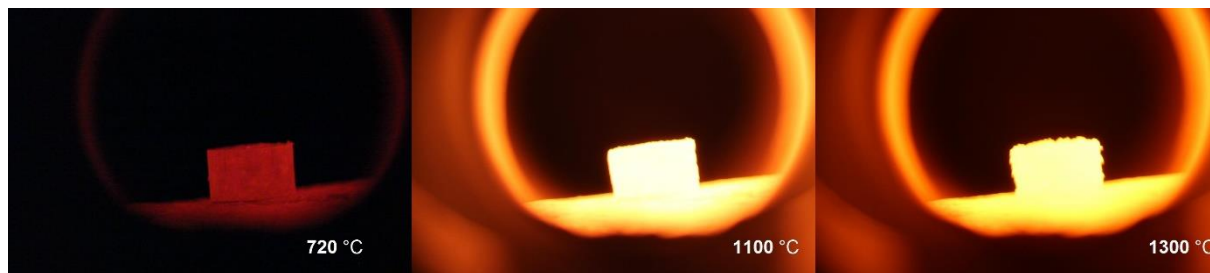


Obr. 13 Lisovací přístroj pro lisování válečků.

Tyto popelové válečky jsou následně vsunuty do kanthalové pece, kde jsou od teploty asi 700 °C pozorovány se zvyšující se teplotou až do konečné teploty, teploty tečení popele t_c . Takto bylo postupováno u všech tří měřených vzorků popele. Měřeno bylo pomocí fotoaparátu, který snímal pozorovaný vzorek skokově každých 10 °C, pec byla nastavena, aby zvýšila teplotu o 10 °C/min do teploty 1200 °C a poté fotoaparát pořizoval snímky každých 10 sekund, pokud to bylo u vzorku nutné. Tento fotoaparát byl připojen k notebooku, který zapisoval jednotlivé údaje při měření. Na základě těchto fotografií byly určeny charakteristické teploty pro jednotlivé druhy popele.

4.5.1. Charakteristické teploty popele pro slunečnici

Pro stanovení charakteristických teplot pro slunečnici byla tato metoda neúčinná, neboť se popelový váleček spekl a nijak nezměnil svůj tvar. Popel byl zahříván až do teploty 1300 °C, ale nebyly zpozorovány žádné změny týkající se roztékání popele, pouze se na povrchu objevily malé „hrbolky“, které ale nikterak nezměnily tvar válečku (obr. 14).

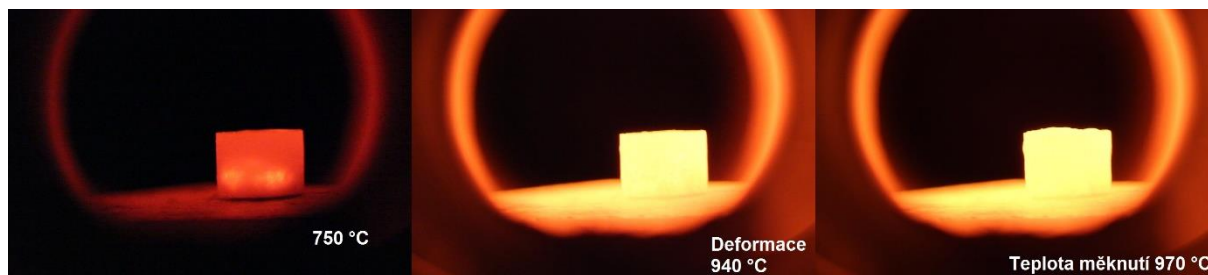


Obr. 14 Pozorovaný váleček popeloviny ze slunečnice při různých teplotách.

Z obrázku je patrné, že ještě při teplotě 1100 °C se se vzorkem téměř nic nedělo. Hrbolky, viditelné na obrázku při teplotě 1300 °C, se vytvořily okolo teploty 1150 °C a poté se se vzorkem již nic nedělo, protože se spekl a zatuhnul. Touto metodou tedy nemohly být naměřeny charakteristické teploty pro palivo slunečnici.

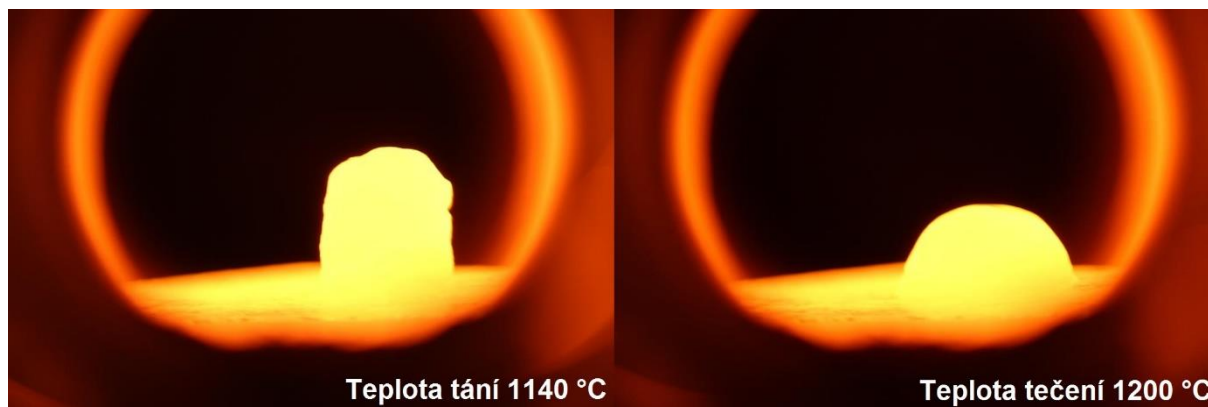
4.5.2. Charakteristické teploty popele pro seno

Při stanovení charakteristických teplot popela pro seno již byla tato metoda účinná, protože bylo dosaženo i konečné měřené teploty, teploty tečení t_c . Hodnoty jednotlivých charakteristických teplot jsou patrné z následujících obrázků (obr. 15 a obr. 16).



Obr. 15 Původní vzorek, teplota sintrace a teplota měknutí pro popel sena.

U sena, jak je patrné z obrázku, nastává lehká deformace při teplotě asi 940 °C, přičemž tato deformace vzorku přechází v měknutí, při kterém je měřená teplota měknutí t_a při 970 °C. Tyto teploty jsou při hoření poměrně nízké a je s nimi potřeba počítat při spalování ve spalovacím zařízení.

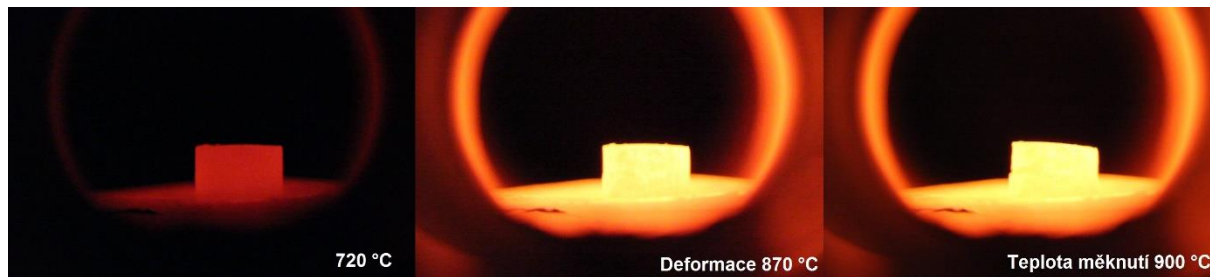


Obr. 16 Teplota tání a teplota tečení pro popel sena.

Hodnota teploty tání je jen o pár desítek stupňů vyšší, než kolik udává tab. 2.3, ve které je teplota tání pro zemědělské seno udávána 1061 °C. Vzhledem k tomu, že prohořívání spalných plynů u rostlinné biomasy probíhá při teplotách 1000 až 1100 °C a zplyňování paliva probíhá za teplot 600 až 800 °C [6], není zde takové riziko spékání popele, ale stále je zde riziko, že se při nesprávné obsluze zvýší teplota při zplyňování paliva a může pak nastat tavení popele. Protože již při teplotě měknutí, která byla naměřena na 970 °C, dochází k nalepování popele na výhřevné plochy a tím dochází ke zhoršené prostupu tepla ze spalín do media [4].

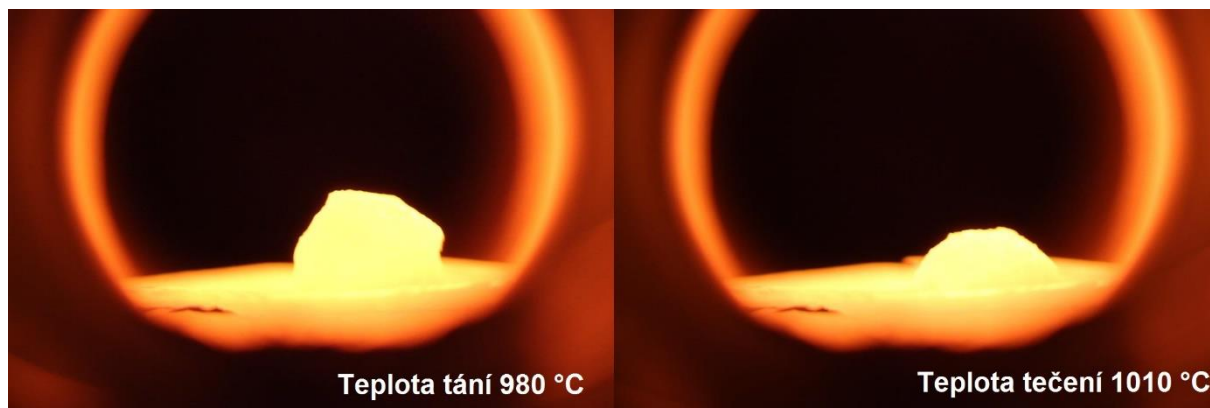
4.5.3. Charakteristické teploty popele pro slámu

Tato metoda byla účinná taktéž i pro pšeničnou slámu. Z pozorování bylo jasné poznat, kdy nastává jaká změna s pozorovacím válečkem a bylo tedy možné zřetelně rozeznat jednotlivé charakteristické teploty porovnané pomocí Segerovy metody jehlanů (válečků). Výsledky z pozorování lze vidět na následujících obrázcích (obr. 17 a obr. 18).



Obr. 17 Původní vzorek, teplota sintrace a teplota měknutí pro popel slámy.

Vidíme, že u slámy nastává měknutí materiálu a následné nalepování na výhřevné plochy již při 900 °C. Toto značí i nízké teploty tání a tečení. Dále počáteční deformace vzorku nastává již při teplotě okolo 870 °C, což je také velmi nízká teplota.



Obr. 18 Teplota tání a teplota tečení pro popel slámy.

Lze posoudit, že i konečná teplota tečení, kdy při ochlazení vzniká z popela tvrdá, sklovitá hmota, kterou nelze jednoduše odstranit, nastává okolo 1010 °C. Tato teplota je velmi nízká a je téměř zaručené, že při spalování slámy se bude popel spékat a je potřeba těmto okolnostem přizpůsobit spalovací zařízení, nejlépe pořídit si kotel certifikovaný na spalování těchto paliv, který je uzpůsoben na odvádění spečené strusky ven ze spalovacího zařízení.

Oproti dřevu jsou tyto teploty i o několik stovek stupňů Celsia nižší (v porovnání s tabulkovými hodnotami charakteristických teplot dřevní hmoty). Je to tedy jeden z důvodů, proč je spalování agropelet konstrukčně náročnější než spalování pelet ze dřeva.

ZÁVĚR

Paliva z biomasy představují budoucnost, co se týče spalování, protože zásoby fosilních paliv nejsou nekonečné a tak je biomasa, jako obnovitelný zdroj energie, více než dobrou náhradou. Vzhledem ke zvětšující se poptávce o palivo ze dřeva se začaly společnosti zabývat výrobou paliv z energetických rostlin a odpadů z rostlinného zemědělství (např.: sláma). Tyto rostliny mají velký ekonomický potenciál, neboť se jejich výhřevnost dokáže přiblížit výhřevnosti hnědého uhlí. Další výhodou těchto rostlin je, že se před použitím nemusí dosoušet, neboť je splněna podmínka sklizení za suchého počasí a vlhkost těchto paliv před slisováním je okolo 15 %. Oproti tomu dřevo má při sklizni vlhkost až 50 % a je potřeba ho různými způsoby dosoušet, protože vlhkost snižuje samotnou výhřevnost dřeva a také zhoršuje energetickou výkonnost spalovacích zařízení, protože je energie vynaložena nejprve na odpaření vody z paliva, tím se také spálí část paliva. Po slisování rostlinných pelet klesne jejich vlhkost na asi 10 %, což je při spalování velmi výhodné, protože mají poměrně vysokou výhřevnost. Výhřevnost je stále značně nižší oproti fosilním palivům, ale předností jsou nízká pořizovací cena a poměrně snadná dostupnost, protože rostlinný odpad vzniká v každé zemědělské společnosti.

Při výrobě rostlinných pelet musíme brát na zřetel jejich obsah ligninu, který je v rostlinných palivech zastoupen asi z 15 %, dřevní hmota obsahuje až dvojnásobek ligninu oproti rostlinné biomase. To znamená, že pelety vyrobené z rostlin mají zhoršenou pojivost při peletování a je potřeba tuto vlastnost zlepšovat přidáváním různých aditiv jako je například škrob. Tyto aditiva však zvyšují cenu samotných pelet a je mnohem jednodušší nechat palivem prostoupit horkou vodní páru, která značně zlepšuje pojivost materiálu, toto je doporučeno u materiálů, které mají vlhkost pod 10 %. S vlhkostí nad 10 % dosáhneme již dobré pojivosti při lisování. S tímto nízkým obsahem ligninu mají rostlinné pelety také nižší životnost, oproti dřevu asi o 15 %, a proto je dobré pelety spálit co nejdříve a neskladovat je delší dobu. Další nevýhodou oproti dřevu je fakt, že při skladování musíme zamezit přístupu hlodavcům, kteří by mohli požírat rostlinné palivo, neboť se vyrábí také ze zbytků krmných rostlin.

Další nevýhodou jsou nízké teploty tavitelnosti při spalování. Ty jsou oproti dřevu i o stovky stupňů Celsia nižší a proto je u rostlinných pelet vysoké riziko spékání popela, a to zejména u spalování slámy, jak bylo zjištěno i experimentálně. Toto je velký problém při spalování, neboť se popel spéká a lepí na výhřevné plochy a jiná místa ve spalovacím zařízení a brání tak snadnému průchodu spalín a výměně tepla mezi horkými spalínami a médiem. Z tohoto důvodu nelze používat kotle na spalování dřevní hmoty a uhlí pro spalování rostlinných pelet, protože tyto kotle nejsou konstrukčně stavěny na odvod spékající se strusky popela a je tedy potřeba koupit kotel, který je certifikovaný speciálně i na spalování agropelet. Při spalování rostlinného paliva vznikají malé částičky prachu, které mohou vdechovat živočichové a jsou proto stanoveny přísné limity TZL pro spalování rostlinných paliv. Tyto emise musí být snižovány zabudováním různých odlučovačů a filtrů spalín, které vedou do komína spalovacího zařízení.

Závěrem je třeba říci, že pokud člověk investuje do kotle pro spalování agropelet, v rámci jistého období se mu tato investice vrátí, protože agropelety jsou levnější až o 2 Kč/kg oproti dřevním peletám. Je dobré však mít výrobce blízko od bydliště, aby odpadly náklady za cestování pro palivo, ale tento problém lze vyřešit doručením poštou, která vyjde na větší vzdálenosti levněji než pohonné hmoty pro automobil na cestu pro palivo a zpět.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 8086534065.
- [2] JANDAČKA, Jozef - MALCHO, Milan - MIKULÍK, Marian. Biomasa ako zdroj energie, 2007, ISBN 978-80-969161-4-6
- [3] KRÁTKÝ, Lukáš a Tomáš JIROUT. Moderní trendy předúprav biomasy: pro intenzifikaci výroby biopaliv druhé generace. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05720-9.
- [4] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 9788021439559.
- [5] TRÁVNÍČEK, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 9788075092069.
- [6] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. Alternativní zdroje energie. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 800102802X.
- [7] KOLONIČNÝ, Jan a Veronika HASE. Využití rostlinné biomasy v energetice. I. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 9788024825410.
- [8] MultiBio [online]. Rakovník: Petrojet Trade s.r.o., 2016, [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.horakypetrojet.cz/>
- [9] Zpracování slámy na topné pelety. Zemědělec [online]. Praha: Profi Press s. r. o., 2013 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://zemedelec.cz/zpracovani-slamy-na-topne-pelety-2/>
- [10] Granulační linky - výroba pelet. KOVO NOVÁK, Citonice [online]. Znojmo: Kovo Novák, 2014 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.kovonovak.cz/cs/mala-granulacni-linka>
- [11] Biom [online]. Praha: CZ Biom - České sdružení pro biomasu, 2001 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: www.biom.cz
- [12] Kotel VERNER A251. VERNER [online]. Bratislava: VERNER SK s.r.o., 2016 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251#tab1>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

h	obsah hořlaviny v palivu	$[-]$, $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$
A	obsah popele v palivu	$[-]$, $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$, $[\%]$
w	obsah vody v palivu	$[-]$, $[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Q_s	spalné teplo	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
Q_i	výhřevnost	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
r	výparné/kondenzační teplo vody	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
W^r	obsah vody v palivu	$[-]$
H_2	obsah vodíku v surovém palivu	$[-]$
V	obsah hořlaviny v palivu	$[\%_{\text{hm}}]$
t_a	teplota měknutí popele	$[\text{°C}]$
t_b	teplota tání popele	$[\text{°C}]$
t_c	teplota tečení popele	$[\text{°C}]$
m_v	hmotnost suchého vzorku před spálením	$[\text{kg}]$
m_p	hmotnost popele po spálení	$[\text{kg}]$