



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ AGROPELET

ENERGY USE OF DIGESTATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Zahnaš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Ladislav Zahnaš
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Energetické využití agropelet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem či výrobu elektrické energie. Spalovací vlastnosti však nejsou optimální a mluví se i o některých negativních jevech s využíváním biomasy souvisejících. Práce bude pojednávat o energetickém využití agropelet vyráběných z odpadní biomasy ze zemědělství.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je posouzení možností využití agropelet pro výrobu tepelné energie v malých kotlích. Konkrétní cíle jsou:

- rešerše o druzích a vlastnostech biomasy
- stručná rešerše škodlivin vznikajících při spalování biomasy
- provedení experimentu
- vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, Jozef. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina: BALPO, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALÁŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá energetickým využitím agropelet vyráběných z odpadní biomasy v zemědělství, především z hlediska plnění emisních limitů při jejich spalování. První část tvoří stručná rešerše o biomase obecně a o způsobech jejího zpracování. Druhá část pojednává o emisích vznikajících spalováním agropelet a třetí část tvoří experiment, v jehož rámci bylo spalováno několik druhů pelet a vyhodnoceny jejich emise.

Klíčová slova

Biomasa, spalování, agropelety, obnovitelné zdroje, emise.

ABSTRACT

This thesis deals with energetical use of agropellets made from agricultural residues especially in the terms of compliance with emission limits. First part is brief research of biomass in general and about methods of its processing. Second part deals with emissions from agropellets combustion and third part consists of an experiment where several types of pellets were burned, and their emissions evaluated.

Key words

Biomass, combustion, agropellets, renewable sources, emissions.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAHNAŠ, L. *Energetické využití agropellet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Energetické využití agropelet** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Ladislav Zahnaš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Otakaru Štelcovi za pomoc při experimentální části práce.

podpis

Obsah

ÚVOD	11
1 Biomasa	12
1.1 Agrolelety	12
1.2 Energetické plodiny	13
1.3 Popis vybraných energetických plodin	14
1.3.1 Brukev řepka	14
1.3.2 Pšenice.....	15
1.3.3 Šťovík.....	15
1.4 Odpadní biomasa	15
1.4.1 Rostlinné zbytky z polnohospodářské výroby a údržby krajiny	15
1.4.2 Odpad ze živočišné výroby	16
1.4.3 Komunální organické odpady	16
1.4.4 Organické odpady z potravinářských a průmyslových provozů	16
1.4.5 Odpady z lesního hospodářství	16
1.5 Úprava a zpracování biomasy pro energetické účely	16
1.5.1 termo-chemická přeměna	16
1.5.2 bio-chemická přeměna	17
1.5.3 mechanicko-chemická přeměna	17
1.6 Mechanická úprava pevných biopaliv	17
1.6.1 Stříhání	17
1.6.2 Sekání	17
1.6.3 Drcení	18
1.6.4 Paketování	18
1.6.5 Briketování a peletování.....	18
1.7 Mechanická úprava energetických stébelnin	19

1.7.1	Sběrací lisy.....	19
1.7.2	Briketování a peletování suchých stébelnin	19
2	Emise	21
2.1	Emise při spalování pelet	21
2.1.1	Oxidy uhlíku (CO _x).....	21
2.1.2	Oxidy dusíku (NO _x).....	21
2.1.3	Oxidy síry (SO _x)	22
2.1.4	Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU).....	22
2.1.5	Tuhé znečišťující látky (TZL)	22
3	Experiment.....	23
3.1	Použité přístroje.....	23
3.1.1	Kotel	23
3.1.2	ULTRAMAT 21 a ULTRAMAT 22	25
3.1.3	Ostatní použité přístroje.....	25
3.2	Palivo.....	26
3.3	Průběh měření.....	27
3.3.1	Dřevní pelety	27
3.3.2	Pelety z řepky	28
3.3.3	Pelety z pšenice.....	29
3.4	Vyhodnocení měření	30
3.4.1	Dle normy ČSN EN 303-5.....	30
3.4.2	Dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES.....	31
	Závěr.....	35
	Seznam použitých symbolů a zkratk	38
	Seznam použitých zdrojů.....	39

ÚVOD

Lidská společnost je již od pradávna úzce spjata s využíváním biomasy k získávání energie. V jejích počátcích využívala biomasu pouze jako zdroj tepla a bezpečí, ale s vývojem společnosti se také vyvíjel význam biomasy a její využití. Nicméně postupem času začaly biomasu vytlačovat fosilní paliva. Jejich spotřeba neustále rostla a roste i dnes. Víme však, že jejich zásoby nejsou nevyčerpatelné.

Předpovědi ohledně vyčerpání poslední kapky ropy a vytěžení posledních kilogramů uhlí se liší, shodují se však v tom, že v průběhu pár stovek let budou všechny fosilní paliva vyčerpány. Nezanedbatelným faktem je, že spalování těchto paliv uvolňuje do ovzduší spoustu škodlivin.

Do popředí se tedy stále více dostává využití biomasy jako alternativního způsobu energie. Zejména biomasa v podobě odpadů z různých odvětví průmyslu. Sběr zbytků (mnohdy jinak nevyužitelných) z výroby a jejich přeměna na palivo by mohl hrát významnou roli v budoucnosti energetiky. Je tedy důležité zabývat se možnými způsoby přeměny odpadní biomasy na palivo a procesem jeho spalování.

1 BIOMASA

Biomasa je definována jako substance biologického původu (pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Biomasa je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti, nebo se jedná o využití odpadů ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z komunálního hospodářství, z údržby krajiny a péče o ni. [1]

Biomasa může být použita ve své původní podobě jako palivo, nebo může být zpracována na různé druhy pevných, plyných, nebo kapalných biopaliv. Tato paliva mohou být využita ve všech odvětvích společnosti, pro produkci elektrické energie, ohřev, nebo výrobní procesy.

Ve vyspělých zemích je bioenergie považována za alternativní, popřípadě více udržitelný zdroj, který by mohl částečně nahradit uhlovlodíky, zvláště co se týče dopravních paliv jako je bioetanol a biodiesel a dřevo v kombinované výrobě tepla a elektrické energie a vytápění budov. V rozvojových zemích představuje bioenergie příležitosti pro místní industriální rozvoj a ekonomický růst. V nejméně vyvinutých zemích je tradiční biomasa často dominantním domácím palivem, zvláště v zemědělských oblastech bez přístupu k elektrické energii nebo jiným energetickým zdrojům. Světová spotřeba biomasy stále stoupá. (Tabulka 1) [2]

rok	komunální odpad	průmyslový odpad	pevná biomasa	bioplyn	kapalná biopaliva
2000	0,74	0,47	41,1	0,28	0,42
2005	0,94	0,40	44,7	0,50	0,85
2010	1,15	0,68	49,1	0,84	2,44
2014	1,32	0,80	52,6	1,27	3,21

Tabulka 1: Celková světová výroba energie z biomasy v exajoulech [2]

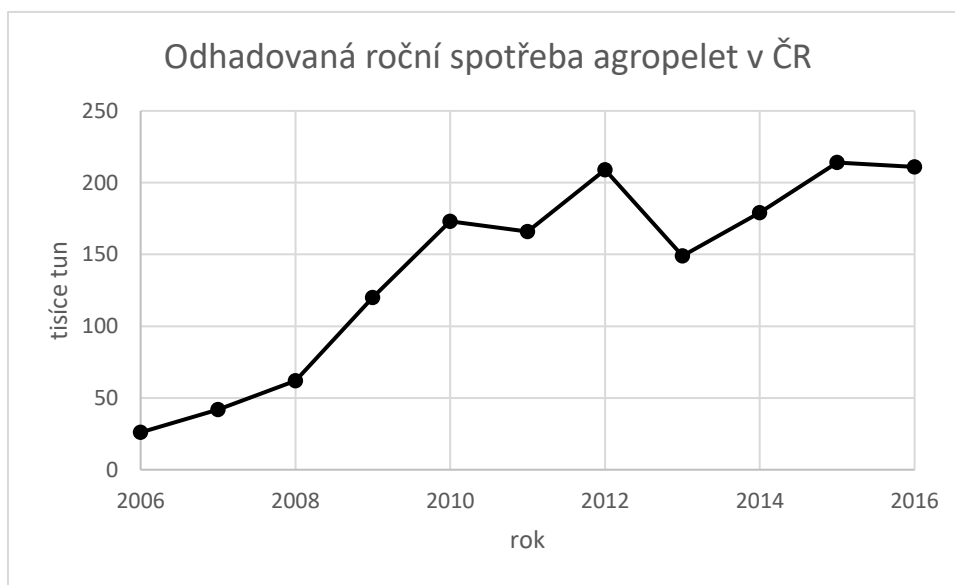
Co se týče místní legislativy, tak podle zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie se biomasou rozumí „Biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětvích, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a biologicky rozložitelná část průmyslového a komunálního odpadu“. [3]

1.1 AGROPELETY

Pelety vyráběné lisováním zemědělských komodit – energetických rostlin, řepkové slámy, obilné slámy, odpadů po čištění obilnin a olejnin apod. Tyto pelety jsou relativně ekologickým palivem vhodným pro automatické spalování ve speciálních kotlích. Jsou to lisované granule o průměru 6–14 mm. Jejich velkou výhodou je, že se většinou vyrábí z již dále nevyužitelných surovin. Například když zemědělec sklídí pole s řepkou, z jejích semen vylisuje olej a zbyde mu stonek a vymačkané zbytky semen. Ideální využití pro takové zbytky

je právě jejich slisování do podoby pelet. Celkový trend využívání rostlinných pelet v ČR je rostoucí. (viz. Graf 1)

Při ideálních podmínkách spalování by se emise ze spalování agropelet neměly moc lišit od těch dřevních, některá konvenční paliva dokonce předčí, co se týká emisí, nebo výhřevnosti. Podíl biopaliv na výrobě tepla v domácnostech ČR rok od roku stoupá a stoupá i spotřeba agropelet, ke kterým se lidé obracejí jako k levné a účinné náhražce konvenčních paliv. Je tedy třeba brát do budoucna zřetel na rozvoj technologií pro pěstování energetických rostlin a spalovacích zařízení určených pro jejich spalování.



Graf 1: Spotřeba agropelet v ČR zdroj: MPO.cz

1.2 ENERGETICKÉ PLODINY

Cíleně pěstované rostliny, které se využívají pro energetické účely. energii z energetických rostlin lze získat chemickými, popřípadě bio-chemickými procesy. Základním procesem je spalování a doplňují je další způsoby.

Ideální energetická plodina (ideotyp) by měla splňovat následující kritéria:

- rychlý růst
- použitelná část rostliny by měla být nad zemí, sklizeň nadzemní části není tak nákladná a chrání půdu
- nízký obsah prvků, zvláště dusíku (N), a to především ve sklizených částech
- charakter vytrvalé rostliny, vyrůstající z rhizomů a pařezů, pak se totiž nemusí financovat každoroční setí a další potřebné pěstební technologie. Měly by dobře přežívat zimní období
- rašení časně na jaře a ukončení vegetace pozdě na podzim s návratem části živin do přežívajících částí rostliny. Plodina by měla růst relativně rychle též při nízkých teplotách – recyklace živin umožňuje nízké inputy živin

- vysokou odolnost proti chorobám: Dokonce je možná i přítomnost jedovatých alkaloidů, které napomáhají rezistenci plodin – plodiny nejsou určeny pro potravu, ale pro energetické využití
- vysokou konkurenceschopnost proti plevelům. Jestliže porostou rychle brzy na jaře bude menší problém s plevelely
- nízkou spotřebu vody a odolnost proti suchu
- nízké ekonomické vstupy do pěstování rostlin, zejména do zakládání porostů apod. [4]

Energetické byliny – nedřevnaté rostliny pěstované za účelem produkce energie. Dále se dělí na byliny jednoleté, byliny víceleté a vytrvalé a energetické trávy. Nejznámějšími zástupci této skupiny jsou rákos, konopí seté a šťovík krmný. Náklady na jejich pěstování jsou nižší než náklady na pěstování dřevin.

Rychle rostoucí dřeviny – poskytují dostatečně rychlý růst, dobrou výhřevnost a jsou odolné vůči škůdcům. Hlavní rozdíl při pěstování energetických dřevin na plantážích oproti běžnému způsobu je v době mezi sázením stromů a těžbou dřeva, která je u energetických plantáží kratší (2-8 let). Pro zřizování plantáží rychle rostoucích dřevin se nejlépe hodí eukalypty, platany, topoly, akáty, vrby, olše. Pro naše podmínky nejlépe vyhovuje pěstování topolů. Z ostatních druhů, které jsou však málo výkonné, je možno uvažovat o akátu, bříze, olši, osice. Zakládáním plantáží rychle rostoucích dřevin je možno účelně využít uvolněnou zemědělskou půdu, nebo nevyužívanou půdu např. kolem dálnic, silnic, na důlních výsypkách nebo složitých popele, lokalitách ohrožených imisemi apod. [5]

Rostliny na výrobu olejů metylesterů – Zástupci této skupiny jsou zejména řepka olejka, slunečnice, nebo len. Z nich nejvyužívanější pro energetické účely je řepka olejka, z jejích semen se lisuje olej, který se za působení katalyzátoru a vysoké teploty mění na metylester řepkového oleje, jenž je použitelný jako bionafta.

Rostliny na výrobu bioetanolu – Technologií alkoholového kvašení se bioetanol vyrábí z rostlin s větším obsahem sacharidů. Nejčastěji používané rostliny k tomuto účelu jsou cukrová třtina, cukrová řepa, kukuřice, nebo brambory.

1.3 POPIS VYBRANÝCH ENERGETICKÝCH PLODIN

Tato kapitola popisuje 3 druhy energetických plodin, řepku a pšenici z důvodu jejich využití při experimentu v této BP a šťovík z důvodu energetické významnosti.

1.3.1 Brukev řepka

Olejnatá plodina, pěstovaná primárně pro její olejnatá semena, energeticky využitelné jsou však i ostatní části rostliny. Je nejvýznamnější olejninou pěstovanou v ČR, s podílem na celkové produkci olejniny v ČR asi 95 %. Je skvělou předplodinou pro obilniny, odpleveluje, je přirozeným zdrojem organického hnojiva, brání erozi půdy, snižuje její znečištění. Představuje tedy pro zemědělce spoustu výhod, které by pro ně mohly být motivační a mohly by napomoci rozvoji agropaliv. Řepkové pelety mají větší výhřevnost než dřevo a jejich výhodou je také nízká cena.

1.3.2 Pšenice

Pšenice patří do rodu jednoděložných rostlin z čeledi lipnicovitých. Je to jedna z nejstarších zemědělských plodin, pocházející z jihozápadní Asie. Dle archeologických nálezů je možno určit, že se pšenice pěstovala již 6000 let př. n. l. Na území dnešního Íránu. Na území České Republiky se datuje její objev na asi 500 let př. n. l. Zpracovává se celá rostlina, semena, stébla (sláma) i otruby (semenné slupky). Využívá se v potravinářském průmyslu, jako krmení pro zvířata, ale také se dá využít jako palivo. V souvislosti s použitím pšenice jako agropaliva hovoříme hlavně o zpracování přebytkového nebo degradovaného materiálu, který je pro zemědělce výhodné použít jako palivo pro vlastní účely, nebo jej prodat. Výhodou je snadná skladovatelnost a trvanlivost.

Za zmínku také stojí, že pro část populace je použití pšenice jako paliva neakceptovatelné. Vzhledem k využívání zejména přebytků z úrody, nebo pšenice kvalitou nevhodné pro potravinářský průmysl však tyto stížnosti nejsou vždy na místě.

1.3.3 Šťovík

Zejména odrůda Rumex OK2, tedy krmný šťovík, je mnohými zdroji označována jako nejdůležitější energetická rostlina. Jedná se o křížence šťovíku zahradního a šťovíku tjaňanského, významně však převyšuje tyto odrůdy výnosem nadzemní hmoty a semen. Je to vysokoprodukční vytrvalá plodina, nenáročná na pěstování. Při sklizni je možno použít běžnou zemědělskou techniku, což zaručuje nízké provozní náklady. Biomasa šťovíku se dá využít nejen k přímému spalování, ale také jako přísada do fermentoru pro výrobu bioplynu.

Palivo	výhřevnost [MJ/kg]
šťovíkové pelety (Ø 11 mm)	15,16
pelety z obilné slámy (Ø 10 mm)	16,53
řepkové pelety (Ø 10 mm)	16,42
pelety topolové (Ø 10 mm)	16,84
černé uhlí	26,40
hnědé uhlí	17,12

Tab2: Srovnání výhřevnosti vybraných paliv [9]

Hlavní výhody, které z něj činí jedno z nejvýhodnějších agropaliv: velice vytrvalý, brzká doba sklizně, sklizeň v suchém stavu (nevyžaduje dosušení), vysoká výhřevnost, vysoké výnosy, protierozní působení. [9]

1.4 ODPADNÍ BIOMASA

1.4.1 Rostlinné zbytky z polnohospodářské výroby a údržby krajiny

Využívat se dá obilná sláma, řepková sláma, odpadové zrno i seno z trvalých travnatých porostů, zbytky po likvidaci křovin a lesních náletů, odpady ze sadů a vinic atp. Nejdůležitější z uvedených zdrojů je sláma, její předností je fakt, že je dostupná ve velkém

množství, obsahuje málo vody (do 15 %) a malé množství popelovin, nevýhodou nízká měrná hmotnost. [5]

1.4.2 Odpad ze živočišné výroby

Největší podíl odpadů vznikajících při živočišné výrobě představují exkrementy hospodářských zvířat. Tuto organickou hmotu je možné energeticky využít za pomoci bioplynových stanic, ve kterých řízenou anaerobní fermentací nastane přeměna organické hmoty na bioplyn, s vysokým obsahem metanu. [6]

1.4.3 Komunální organické odpady

Komunální sféra patří k dalším významným zdrojům odpadní biomasy. Biologicky odpad tvoří asi 40 % komunálního odpadu. Důležitým zdrojem biomasy jsou také odpady z údržby zeleně a kaly z čistíren odpadních vod. Mezi vyříděný organický odpad patří kuchyňské zbytky vzniklé při výrobě jídel, zbytky jídel, odpad po údržbě zeleně v domácnostech, papír a podobné. [7]

1.4.4 Organické odpady z potravinářských a průmyslových provozů

Mezi organické odpady průmyslové a potravinářské výroby zařazujeme zbytky z jídelen a kuchyní, odpady z provozů na zpracování a skladování rostlinné produkce, dále odpady z mlékáren, lihovarů, konzerváren a odpady z vinařských provozů. Nejčastějším zdrojem bývají dřevozpracující výroby, které často jako odpadní produkt poskytují piliny, odřezky, hoblinu, kůru atd. Dalším zdrojem odpadu je papírenský průmysl, kde taktéž vznikají významné zdroje odpadních produktů, použitelné k energetickým účelům. [8]

1.4.5 Odpady z lesního hospodářství

Zdrojem je odpadová dřevní biomasa z těžby v lesních porostech. Při těžbě dřeva zůstává v lese část biomasy, která je nevyužitá. Jedná se hlavně o kořeny, vrchní části stromů, větve a části stromů, popřípadě celé stromy. Dřevní odpad má tak různorodý charakter, od kulatiny až po odřezky, štěpku, hoblinu a piliny. [1]

1.5 ÚPRAVA A ZPRACOVÁNÍ BIOMASY PRO ENERGETICKÉ ÚČELY

1.5.1 termo-chemická přeměna

- **Pyrolýza** – proces se zamezením přístupu kyslíku, vzduchu nebo jiných zplyňovacích látek. Tímto procesem můžeme zpracovávat různé druhy materiálů na bázi uhlíku. (produkce plynu, oleje)
- **Zplyňování** – ze suché biomasy se za působení vysoké teploty uvolňuje dřevoplyn. Pokud jde o zahřívání bez přístupu kyslíku, vzniklý dřevoplyn je odveden do kogenerační jednotky, kde se spaluje stejně jako jiná plynná paliva. (produkce plynu) [9]

1.5.2 bio-chemická přeměna

- **Fermentace** – přeměna organických látek působením mikroorganismů a jejich enzymů, z jednoduchých sacharidů vzniká etanol, který se poté dále používá jako biopalivo. (produkce etanolu)
- **Anaerobní vyhnívání** – bez přístupu vzduchu a ve vlhkém prostředí dochází vlivem působení metanových bakterií k tvorbě metanu. (produkce bioplynu)

1.5.3 mechanicko-chemická přeměna

- **Lisování olejů** – za pomoci vysokého tlaku se lisují olejnaté části rostlin (produkce kapalných paliv, oleje),
- **Esterifikace surových bio-olejů** – reakcí alkoholu a mastných kyselin vznikají lipidy (výroba bionafty a přírodních maziv)
- **Štípaní, drčení, lisování, peletace, mletí** – mechanická úprava paliv, pro zlepšení jejich spalovacích vlastností (výroba pevných paliv) [10]

1.6 MECHANICKÁ ÚPRAVA PEVNÝCH BIOPALIV

Před použitím biomasy jako paliva je vhodné ji nejprve mechanicky upravit. Je možné upravit ji jako palivo jednoduše sekáním, nebo jiným dezintegračním procesem a následně spálit v kotli. Nebo lze použít složitější úpravu, biomateriál nejdříve rozdělít na menší části a z těch poté vytvořit výsledné palivo (pelety, brikety).

1.6.1 Stříhání

K přípravě klasického kusového palivového dřeva, hlavně z tenčiny a bočních kusových odřezků z dřevozpracujícího průmyslu se používají stříhací zařízení s jedním nožem na principu gilotiny. Ve velkých kotelnách se používají stříhací zařízení s větším počtem nožů. Slouží hlavně k homogenizaci odpadového dřeva, které se dá jinak štěpkovat obtížně.

1.6.2 Sekání

Beztrískové dělení dřeva řezným účinkem sekacích nožů napříč vlákny, pomocí sekaček. Ty se dají podle sekacího ústrojí rozdělít na:

Diskové sekačky – Nejrozšířenější a nejvýkonnější zařízení pro výrobu štěpky. Uvnitř sekačky je disk s ostřím, který pohání motor. Díky velkému setrvačnému momentu je možno použít spalovací motor menšího výkonu s tím, že materiál se seká přerušováním podávání až do té doby, než výkon motoru přestane být dostatečný pro sekání vzhledem k tloušťce dřeva. Nevýhodou je velikost vstupního otvoru, která je omezená poloměrem sekacího disku.

Bubnové sekačky – Sekací nože jsou uloženy na obvodu rotujícího válce. Jsou konstruovány pro menší výkony a surovinu menších rozměrů. Používají se ke zpracování různého odpadu. Zařízení je celkově menších rozměrů, je vhodné k sekání chaotického materiálu. Není však vhodné k sekání dřeva větší tloušťky a tloušťka štěpky kolísá, není tedy tak kvalitní.

Šroubové sekačky – Malé jednoúčelové sekačky k sekání tenkých stromků a kmínků velikosti asi 10x10 cm na palivovou štěpku s tloušťkou okolo 1 cm. Sekací orgán má tvar šroubovice se stoupajícím průměrem. Šroubovice se při otáčení postupně zařezává do dřeva a zároveň vtahuje dřevo k většímu průměru.

1.6.3 Drcení

Způsob úpravy dřeva, které není možné sekat sekačkami. Jedná se o dřevo drobné, mimořádně netvárné (křoviny apod.) nebo znečištěné (pařezy, stavební odpad). Podle počtu otáček dělíme drtiče na:

Nízkootáčkové – určeny hlavně k drcení rozměrově nehomogenního odpadu z nábytkářské výroby. Činným orgánem je obvykle válec, po jehož obvodu jsou spirálovitě rozmístěné nožiky různých tvarů. Podle tvaru nožů je tvarován i protinůž.

Vysokootáčkové – určeny k homogenizaci odpadového dřeva z lesa. Podle tvaru drtícího orgánu se dále dělí na:

- **Diskové** – disk je umístěn ve vertikální poloze s malými noži zabudovanými v čelní ploše. Dřevo je k disku přitlačováno hydraulicky ovládanou protější stěnou. Těmito drtiči je vhodné drtit pařezy, kusový odpad apod.
- **Bubnové** – drtící orgán je vybaven spirálovitě rozmístěnými noži nebo kladivy. Drtiče vybavené noži se dají využít na drcení větví nebo kusového odpadu, drtiče opatřené kladívky se dají využít pro drcení tenkých větví apod.

1.6.4 Paketování

Metoda homogenizace těžebního odpadu, při které se klestí lisuje do balíků obdobně jako sláma. Lisovací tlaky jsou však podstatně vyšší než u lisů na slámu, protože větve namáhané při lisování na vzpěr kladou větší odpor. Balíky jsou pak vhodné pro dopravu, manipulaci a skladování.

1.6.5 Briketování a peletování

Pístové hydraulické nebo **mechanické lisy** jednorázové, univerzální na slámu, piliny, papír, pazdeří, které většinou pracují v kombinaci s kalibrovaným drtičem

Šnekové lisy jednovřetenové nebo dvouvrřetenové. Brikety z těchto lisů se vyznačují vysokým stupněm stlačení a velkou trvanlivostí. Tyto lisy jsou vhodné na lisování pilin, není je však vhodné používat pro lisování stébelnin.

Protlačovací, granulační lisy, odvozené od granulačních lisů na výrobu tvarovaných krmiv na bázi slámy. Rozlišují se dva typy lisů, s kruhovou, vertikální maticí a horizontální deskovou maticí. [1]

Dřevěné brikety a pelety se tvoří lisováním materiálu vhodné zrnitosti za vysokých tlaků a teplot, při kterých lignin plastifikuje a stává se pojivem. Současně dochází ke zmenšení objemu vstupního materiálu v poměru přibližně 12:1. Také je možné vyrábět brikety a pelety kombinované z dřevního odpadu a uhelného prachu. Pak se do nich přimíchává malé množství mletého vápence, který váže síru z uhlí a ta se pak neuvolňuje do

ovzduší v takovém množství, ale zůstane vázána v popelových komponentech (popel, popílek, úlet). Výroba pelet má oproti výrobě briket jednu velkou výhodu, nevyžaduje totiž žádné speciální strojní vybavení a palivové pelety lze vyrábět i na linkách sloužících k výrobě granulovaných krmiv.

1.7 MECHANICKÁ ÚPRAVA ENERGETICKÝCH STÉBELNIN

1.7.1 Sběrací lisy

Pro sklizeň energetických stébelnin za sucha, tj. slámy obilnin a olejnin, energetických obilnin a rákosovitých travin, se stále ve větším množství používají sběrací lisy na velké hranaté nebo válcové balíky.

Lisy na válcové balíky – Jejich výhodou je nízká pořizovací cena, což z nich činí nejoblíbenější typ sběracích lisů. Vítaná je také možnost změnit velikost balíků s ohledem na druh zpracovávaného materiálu a řezací ústrojí.

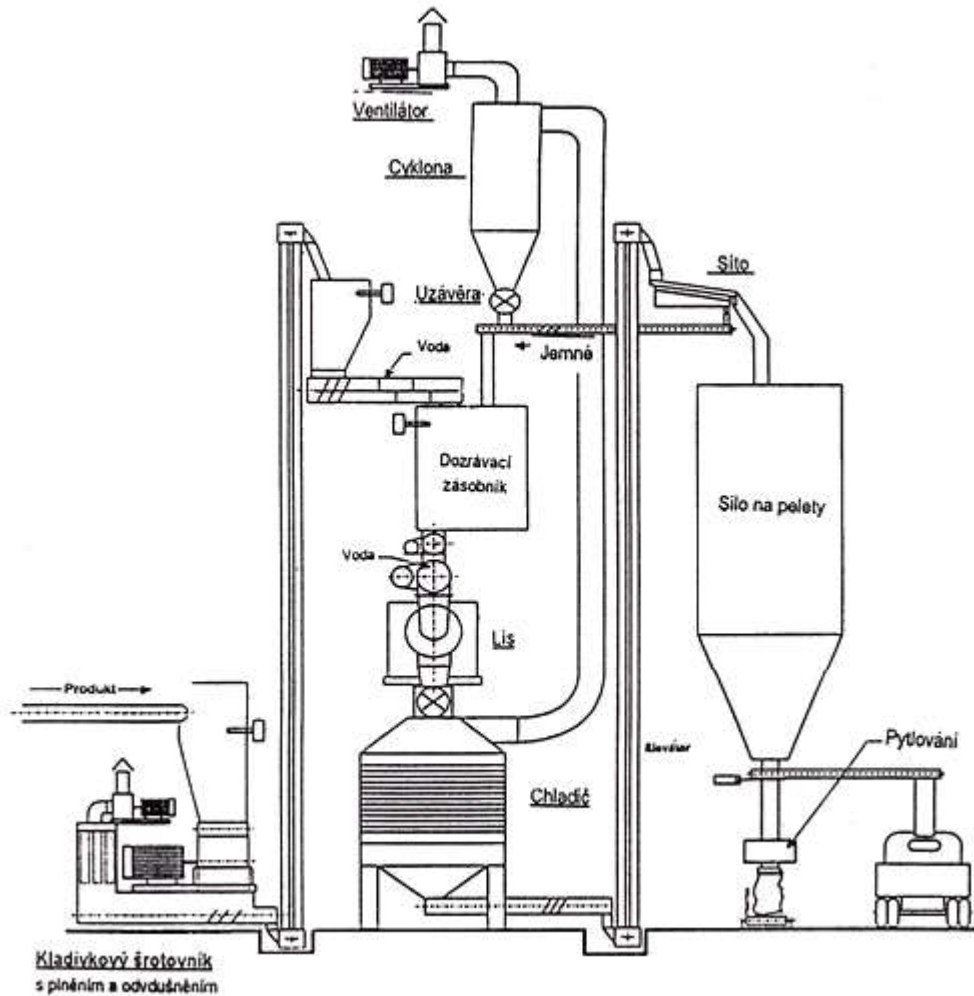
Lisy na hranaté balíky – Balíky jsou tvořeny ve dvou základních rozměrech, hranatý tvar zajišťuje lepší využití prostoru při uskladnění.

Svinovací lisy – Využívají svinování, starého způsobu úpravy, původně využívaného při výrobě lan. Tento způsob úpravy spočívá ve svinování a současném stlačování slámy do dlouhých provazců, dělených dělicím nástrojem.

1.7.2 Briketování a peletování suchých stébelnin

Sláma na poli je potenciální levný zdroj paliva a energetické obilí dává v porovnání se vstupy vysoký výnos energie. Spotřeba přídavné energie na výrobu pelet je velmi malá. Překážkou jsou pouze vysoké investiční náklady na potřebné stroje ve zpracovatelské lince. Ta je tvořena manipulačním zařízením, rozpojovačem balíků, drtičem u peletizačních protlačovacích lisů a vlastními lisy. Stacionární výroba tvarovaných paliv ze slámy je v rozporu s jinak výhodnou sklizní sběracími lisy, protože jednou slisovaný materiál se znovu rozpojuje, nebo dokonce šrotuje a opět lisuje. [1]

Proces výroby pelet ze suchých stébelnin je téměř totožný s výrobou dřevních pelet. Významný rozdíl při výrobě je tvorba prachu při upravování stébelnin před peletováním. Pelety ze stébelnin obsahují více prachu než pelety dřevní, kvůli jejich úpravě před peletováním.



Obr.1.1 Schéma procesu tvorby pelet ze sypkého materiálu [1]

2 EMISE

Pojmem emise, v souvislosti s ochranou ovzduší, označuje vnášení látek do ovzduší. Tento děj může probíhat ustáleně, nerovnoměrně, cyklicky, nebo nahodile, záleží na technologických a biologických podmínkách určujícího procesu.

Znečišťující látky se uvolňují do ovzduší hlavně řízeným vypouštěním odpadních plynů z komínů, výduchů odsávacích a vzduchotechnických systémů, výpustí odlučovacích zařízení atd. Tento děj lze zaznamenat měřením hmotnostního toku emisí.

Emise při spalování závisí na palivu, jeho kvalitě, spalovacím zařízení a jeho nastavení. Paliva, která vykazují nízké hodnoty emisí při laboratorních měřeních, jich mohou v praxi produkovat více, vinou špatného nastavení spalovacího procesu, nebo použitím daného paliva ve spalovacím zařízení, které k tomu není určeno. Nedokonalost spalování indikují zejména oxid uhelnatý, polycyklické aromatické uhlovodíky a polétavý prach.

Emisními limity a srovnáním s normou ČSN EN 303-5 a směrnicí Evropského parlamentu a Rady, Ekodesign 2009/125/ES, se tato práce zabývá v experimentální části při porovnávání a vyhodnocování emisí měřených paliv. [11, 12]

2.1 EMISE PŘI SPALOVÁNÍ PELET

Při spalování dřevních, nebo agropelet jsou nejvýznamnějšími složkami emisí oxidy uhlíku, oxidy dusíku, oxidy síry, polycyklické aromatické uhlovodíky a tuhé znečišťující látky. Všechny tyto látky vznikající při spalování zatěžují životní prostředí včetně živých organismů (zvláště TZL). Biomasa se považuje za neutrální palivo, neboť CO₂ se při spalování uvolňuje ale téměř stejné množství je z atmosféry opět odebráno pomocí fotosyntézy při jejím růstu.

2.1.1 Oxidy uhlíku (CO_x)

Mezi tyto sloučeniny lze zařadit především oxid uhelnatý. Oxid uhelnatý je hořlavý a jedovatý plyn, bez barvy a zápachu. Je to hlavní produkt nedokonalého spalování uhlíkatého paliva. Vzniká zejména při nízké teplotě spalování a nedostatečném přístupu kyslíku. V atmosféře reaguje s jinými látkami a tyto reakce zvyšují koncentraci přízemního ozonu a metanu v ovzduší. Při větších koncentracích představuje závažné zdravotní riziko, při nízkých může způsobit potíže lidem s kardiovaskulárními chorobami.

Hlavním produktem spalování dokonalého je oxid uhličitý. V porovnání s oxidem uhelnatým není v nízkých koncentracích jedovatý, řadí se však mezi skleníkové plyny, které se podílí na vytváření skleníkového efektu. Nárůst jeho množství v atmosféře je považován za jednu z hlavních příčin globálního oteplování. [13, 14]

2.1.2 Oxidy dusíku (NO_x)

Bezbarvý plyn bez zápachu, jehož zdrojem jsou zejména motorová vozidla, je však produkován také spalováním paliv obsahujících dusíkaté látky. Je jedním ze skleníkových

plynů. Ve vyšších koncentracích životu nebezpečný. Vzniká při spalování zejména při vyšších teplotách oxidací dusíku. Emise NO_x jsou tedy především problémem spalovacích zařízení, pracujících při vysokých teplotách. Jejich produkce lze tedy omezit konstrukcí kotle, či používáním dusíkatých paliv ve spalovacích zařízeních, využívajících nižších teplot. Do ovzduší při spalování uniká NO . Také patří do skupiny skleníkových plynů. [15]

2.1.3 Oxidy síry (SO_x)

Bezbarvý plyn. Při spalování tuhých paliv přechází na SO_2 přibližně 95 % v nich obsažené síry. V ovzduší oxiduje na oxid sírový. Při nedostatku zásaditých částic ve vzduchu dochází k okyselení srážkových vod, čímž vznikají kyselé deště. Vyšší koncentrace způsobují poškození očí a dýchacích orgánů. Oxid siřičitý má tedy významný negativní vliv na životní prostředí a lidské zdraví. U dřevních pelet jsou však emise oxidů síry zanedbatelné z důvodu velmi nízkého obsahu síry v palivu (cca 0,01 % hm.) a u alternativních pelet téměř zanedbatelné (pelety z řepky cca 0,11 % hm., pelety pšeničné cca 0,05 % hm.) ve srovnání s černým (2,5 % hm.) nebo hnědým uhlím (3,8 % hm.) [16, 9]

2.1.4 Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)

Jako PAU se označuje široká skupina látek obsahujících ve své molekule kondenzovaná aromatická jádra. Vznikajících při spalování uhlíkatých paliv, pokud není spalování dokonalé. Jsou toxické pro většinu živých organismů, mohou způsobovat rakovinu, mutaci u zvířat a poruchy reprodukce. Schopnost transferu a atmosférou na velké vzdálenosti. [17]

2.1.5 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Dále se dělí na polétavý prach (PM_x), který po rozptýlení do ovzduší začne sedimentovat a aerosoly, které se shlukují do větších celků a poté sedimentují. Polétavý prach jsou tuhé, kapalné, nebo směsné částice o velikosti 1 nm - 100 μm . Nejvýznamnějším antropogenním zdrojem je spalování a jiné vysokoteplotní procesy. Z ovzduší se dostává do ostatních složek životního prostředí. Snižuje aktivní plochu listů jejich zaprášením, proniká do plic, může obsahovat toxické látky. PM_x obsahuje částice menší než x , běžně se rozlišuje PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a $\text{PM}_{1,0}$. [18]

3 EXPERIMENT

Experiment se zabývá spalováním pelet v kotli a měřením vybraných látek vznikajících při jejich spalování. Spalovány byly dva druhy agropelet a jeden druh dřevních pelet. Cílem je porovnání naměřených emisních hodnot s normami.

Všechna měření byla provedena ve zkušební kotli, energetického ústavu VUT. Za pomoci Ing. Otakara Štelcla.

3.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

3.1.1 Kotel

Ke spalování pelet byl použit automatický teplovodní kotel VERNER A251 se jmenovitým výkonem 25 kW a udávanou účinností 92 %. Předepsaná paliva pro tento kotel jsou pelety o průměru 6–14 mm, obilí a zrno kukuřice.

Parametry kotle VERNER A251	
Jmenovitý výkon	25 kW
regulovatelnost kontinuální provozem	7,5 - 28 kW
účinnost	92 %
spotřeba dřevních pelet	5,8 kg/h
spotřeba rostlinných pelet	6,3 kg/h
spotřeba obilniny (kukuřice, pšenice)	6,8 kg/h
teplota spalin na výstupu při jmen. výkonu	160 °C
prac. rozsah výstupní teploty vody	65–90 °C
min. Teplota vratné vody v provozu	60 °C
max. Hladina hluku	58 dB
průměrný příkon při provozu	100 W
emisní třída	3

Tab3: parametry kotle VERNER A251

Základní části kotle:

Kotlové těleso – Svařeno z ocelových plechů tloušťky 4 a 5 mm, v rizikových místech 8 mm. Stěny ve styku s plamenem jsou dvojité, chlazené vodou. Ve spodní části tělesa je hořákový prostor. V horní třítahový žárotrubný spalinový výměník, který tvoří 42 trubek o světlosti 50 mm.

Hořák – Prostor na spalování pelet, obložen tvarovkami ze speciální jakostní keramiky. Dno spalovacího prostoru tvoří rošt opatřený pohyblivými roštnicemi. Ve svislé stěně pod výstupem z hořáku, je umístěn otvor pro vybírání popela z prostoru pod roštem.

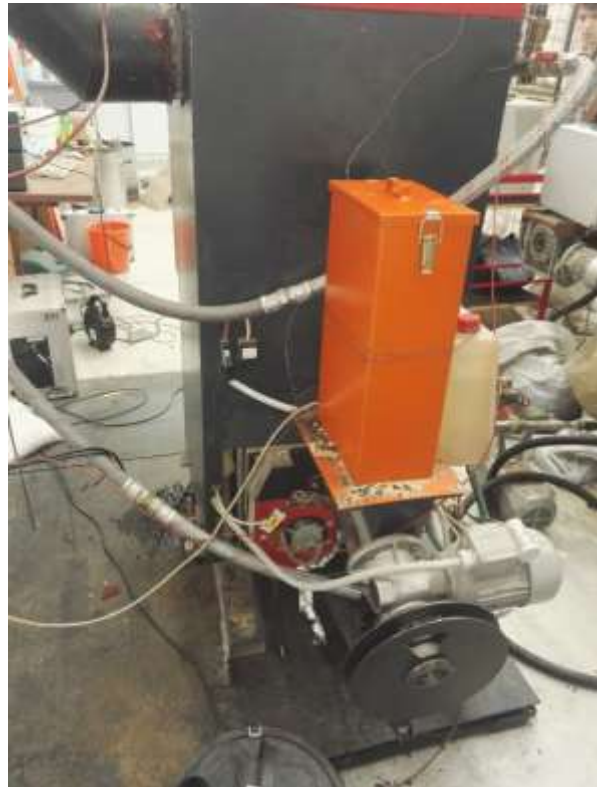
Pohon – Základním elementem pohonu je převodovka s elektromotorem, v jejímž výstupu je uložena hřídel šnekového dopravníku. Pod šnekovým dopravníkem je pákový mechanismus pohonu roštnic. Pohon roštovacího mechanismu je opatřen koncovým

spínačem, který zajišťuje, že se roštnice po roštování zastaví v zadní poloze tak, aby nedocházelo k jejich opalování.

Násypka – Plechová nádoba připevněná k zadní straně kotle, ve spodní části ústí do trubky se šnekovým dopravníkem. Je v ní uložena zásoba pelet, které se pohybem šnekového dopravníku dopravují do hořáku.

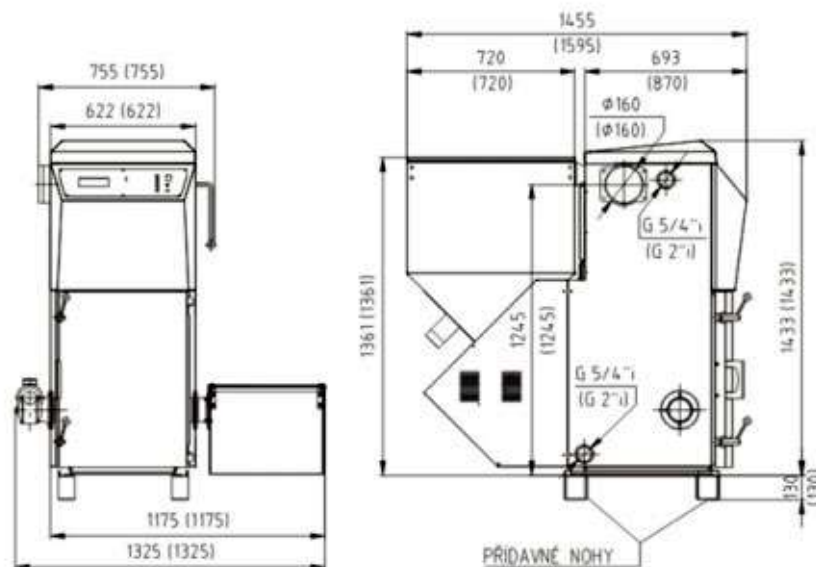
Vzduchování – Zajišťuje přívod vzduchu do kotle. Tvořeno obdélníkovým tělesem připevněným k tělesu kotle. Vzduch se zde před vstupem do prostoru hořáku ohřívá zapalovací tyčí.

Turbulátory – Součásti umístěné do horních proudů pro zvýšení účinnosti kotle. Snižují ztrátu teplem spalin.



Obr.3.1 Zásobník na pelety a pod ním šnekový dopravník

Regulátor – Elektronická jednotka, umístěná pod hlavním panelem. Zajišťuje automatický provoz kotle, včetně roztápění a odstavení. Lze k němu připojit další zařízení, například lambda sondu pro optimalizaci spalování, pokojový termostat, nebo zařízení pro externí ovládání kotle (třeba pomocí SMS).



Obr 3.2 schéma kotle VERNER A251 [19]



Obr.3.3 Kotel VERNER A251



Obr.3.4 Kotlové těleso s roštem

3.1.2 ULTRAMAT 21 a ULTRAMAT 22

Tyto analyzátoři spalin byly použity pro zjištění koncentrací sledovaných látek ve spalinách. Byly připojeny hadicí k měřicí soustavě, konkrétně ke kouřovodu. (obr.3.2) Tyto přístroje měřily koncentraci NO, CO a O₂ a byly připojeny k počítači kde se vykreslovaly průměry naměřených hodnot v minutových intervalech a současně se hodnoty zaznamenávaly do souboru. ULTRAMAT 21 a ULTRAMAT 22 v sestavě s počítačem s měřícím programem viz obr. 3.2.

3.1.3 Ostatní použité přístroje

- Digitální váha Mettler Toledo ICS6x9.
- Počítač s programem Lab View, pomocí kterého byl monitorován výkon kotle.
- Kalorimetrická jednotka FLOMAG pro měření průtoku spalin.



Obr.3.5 Detail zapojení měřících přístrojů ke kouřovodu.



Obr.3.6 ULTRAMAT 21 (nahore), ULTRAMAT 22 (dole) a připojený počítač s analyzačním programem.



Obr.3.7 Kalorimetrická jednotka FLOMAG

3.2 PALIVO

Spalovány byly tři druhy pelet. Dřevní pelety A1 o průměru 6 mm, sloužící pro porovnání emisí zaužívaných pelet s peletami alternativními. Pelety z řepky o průměru 10 mm a pelety z pšenice, také o průměru 10 mm.



Obr.3.8 Pelety z řepky



Obr.3.9 Pšeničné pelety



Obr.3.10 Dřevní pelety A1

3.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Cílem měření bylo změřit emise při spalování tří druhů pelet, z řepky, pšenice a dřeva. Byla sestavena měřicí soustava, zapnuty potřebné přístroje, vyčištěno kotlové těleso i zásobník na palivo, poté vynulována váha. Následně byl zásobník naplněn prvním palivem (dřevěné pelety), kotel spuštěn a zvoleno vhodné nastavení (viz Tab.3.1). Pro měření emisí bylo zapotřebí počkat až kotel dosáhne stabilního provozu, pak byly hodinu měřeny emise, nasypáno další palivo (pelety z řepky) a počkáno na dohoření paliva starého, aby se mohl opět nastavit kotel a ustálit výkon. Měření třetího paliva (pelety z pšenice) probíhalo stejně.

Problém se vyskytl u spalování pelet z řepky, po nastavení kotle a započetí měření bylo zjištěno, že není k dispozici dostatek měřeného vzorku. Měření tedy probíhalo pouze půl hodiny, po konzultaci s panem Ing. Otakarem Štelclem jsem však usoudil, že tento nedostatek v měření nebude mít vliv na naměřené hodnoty.

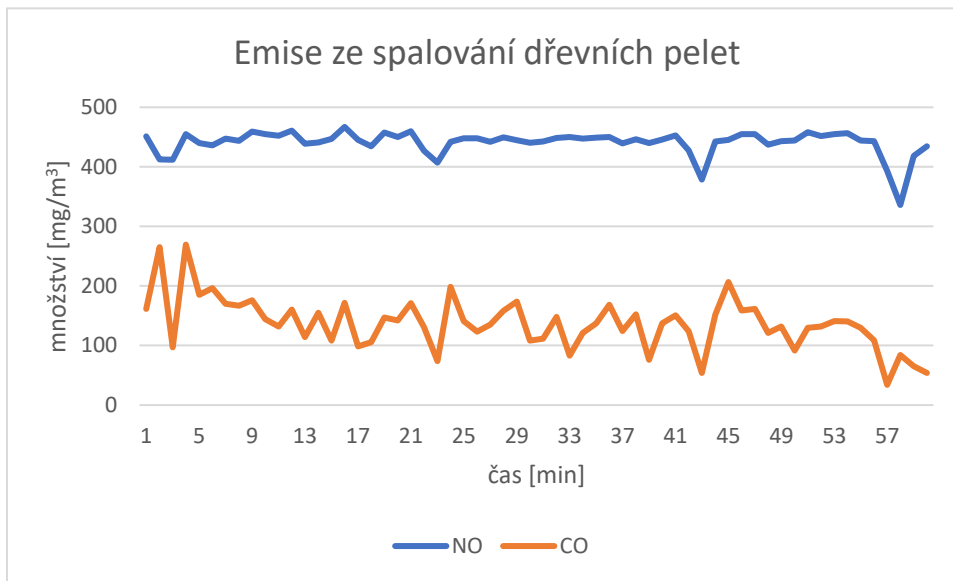
Nastavení kotle						
	čas	interval [s]	plnění [s]	ventilátor	rošt [min]	
dřevní pelety	13:20	18	3	3	20	
	13:25	16	3	3	20	
	13:35	16	3	3	20	
	13:45	16	3	3	20	začátek stabilního provozu
pelety z řepky	14:55	18	3	4	5	
	15:10	18	3	4	5	začátek stabilního provozu
	15:40	18	3	4	5	
pšeničné pelety	15:45	18	3	4	5	
	15:55	18	3	4	5	začátek stabilního provozu
	16:55	18	3	4	5	
interval = doba od začátku plnění, do začátku dalšího plnění = doba činnosti šnekového dopravníku ventilátor = stupeň ventilace rošt = doba od začátku posunu roštu, do začátku dalšího						

Tab.3.1 Časový harmonogram měření

Ve výše uvedené tabulce jde v čase 13:24 vidět snížení intervalu plnění na 16 sekund z důvodu nízkého výkonu kotle, 13:45 začal stabilní provoz při výkonu 28 kW. Dále pak v čase 14:50 zvýšení frekvence roštování kvůli vyšší popelnatosti alternativních pelet. Začátek stabilního provozu značí také začátek měření emisí příslušného paliva.

3.3.1 Dřevní pelety

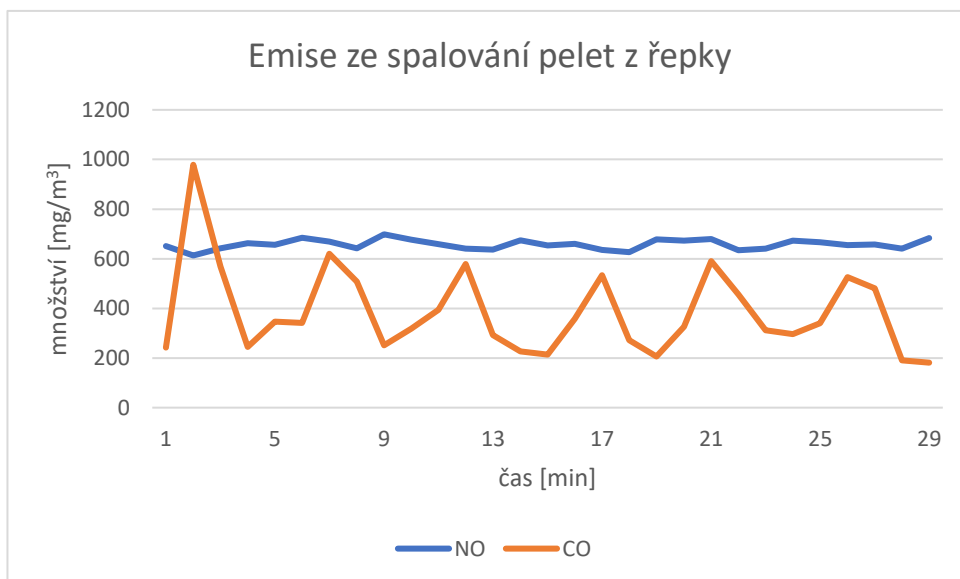
Měření začalo v čase 13:45 a trvalo 60 minut. Počínaje třetí minutou, jdou z grafu vyčíst dle poklesu množství emisí intervaly roštování (tedy 20 minut). Měření probíhalo při stabilním výkonu cca 28 kW, lze tedy očekávat nepatrně vyšší hodnoty emisí než při jmenovitém výkonu. (Graf 3.1) Průměrná hodnota emisí NO byla 441 mg/m³ a emisí CO 137 mg/m³, při průměrné koncentraci O₂ 7,31 %. Malá popelnatost.



Graf 3.1 Emise ze spalování dřevních pelet

3.3.2 Pelety z řepky

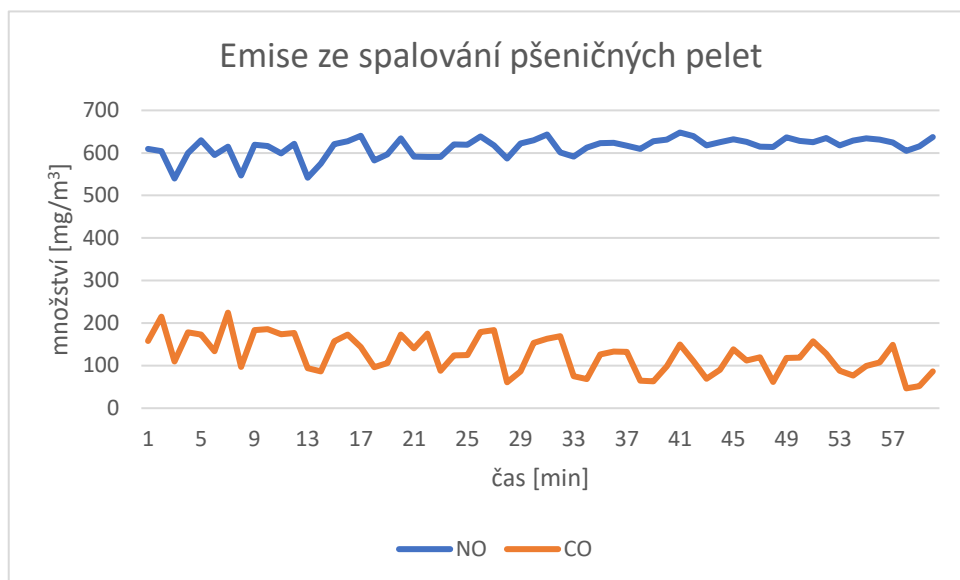
Měření začalo v čase 15:10 a z důvodu nedostatku vzorku trvalo pouze 30 minut, při výkonu cca 30 kW. Průměrná hodnota emisí NO byla 657 mg/m^3 a emisí CO 386 mg/m^3 , při průměrné koncentraci O_2 9,92 %.



Graf 3.2 Emise ze spalování pelet z řepky

3.3.3 Pelety z pšenice

Měření začalo v čase 15:55 a probíhalo při stabilním výkonu cca 29 kW. Průměrná hodnota emisí NO byla 614 mg/m³ a emisí CO 124 mg/m³, při průměrné koncentraci O₂ 9,65 %. Pšeničné pelety se zdaleka nespalovaly dokonale a v kotli po nich zůstaly spečené zbytky pelet. (Obr.3.11 a Obr.3.12)



Graf 3.3 Emise ze spalování pšeničných pelet



Obr.3.11 Spečené zbytky pelet v kotli



Obr.3.12 Spečené zbytky pelet, velikostní sronání

3.4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Závěrečnou částí experimentu bylo srovnání naměřených hodnot emisí s platnou emisní normou ČSN EN 303-5. Tato norma se zabývá emisemi oxidu uhelnatého, organického uhlíku a prachu, při 10 % O₂. V rámci experimentu je tedy možné využít pouze srovnání s emisemi CO.

3.4.1 Dle normy ČSN EN 303-5

Hodnoty uvedené v normách jsou platné při 10% obsahu kyslíku, je tedy nutné převést je na odpovídající hodnoty pro jednotlivá měření, Dle vzorce 3.1.

$$CO = CO_{prům} \cdot \frac{21 - O_{2norm}}{21 - O_{2prům}} \quad (3.1)$$

Kde:

CO [mg/m³]hodnota CO přepočítaná objem O₂ dle normy

CO_{prům} [mg/m³] naměřená průměrná hodnota CO

O_{2norm} [%obj] objem O₂ dle normy

O_{2prům} [%obj] naměřený průměrný objem O₂

Výsledky měření po přepočítání emisí CO na objem O₂ dle normy:

hodnoty CO přepočtené na 10 % O ₂	Množství [mg/m ³]
dřevní pelety	110
pelety z řepky	383
pelety z pšenice	122

Tab.3.2 Hodnoty CO, přepočteny na 10 % O₂

Mezní hodnoty emisí dle ČSN EN 303-5:

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			kW	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
	3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5		
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000	150	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	100	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	100	125						
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000	100	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	80	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	80	125						

Tab.3.3 Mezní hodnoty emisí dle ČSN EN 303-5 [20]

Srovnáním naměřených hodnot z tabulky (Tab.3.2) a mezních hodnot emisí pro samočinné kotle na biopaliva, s výkonem menším nebo rovným 50 kW (Tab.3.3) lze zjistit, že kotel VERNER A251 při spalování v rámci tohoto experimentu plnil emisní třídu 5. Při spalování dřevních pelet a pelet z řepky dokonce s velkou rezervou.

3.4.2 Dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES

V říjnu 2014 byla schválena Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES, která od 1.1.2020 nastavuje nové emisní limity pro kotle na tuhá paliva se jmenovitým tepelným výkonem do 120 kW. Kotle na tuhá paliva budou podle této směrnice od roku 2020 vyhovovat 5. emisní třídě dle ČSN EN 303-5. [21]

Mezní hodnoty emisí dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES:

Kotle na tuhá paliva – parametry pro Ekodesign	Limitní hodnoty – platnost od 1.1.2020
sezónní energetická účinnost vytápění [%]	75 (kotle o výkonu \leq 20 kW) 77 (kotle o výkonu $>$ 20 kW)
pevné částice (PM)	40 (automaticky provozované kotle) 60 (manuálně provozované kotle)
organické plynné sloučeniny (OGC) [mg/m ³]	20 (automaticky provozované kotle) 30 (manuálně provozované kotle)
oxid uhelnatý (CO) [mg/m ³]	500 (automaticky provozované kotle) 700 (manuálně provozované kotle)
oxidy dusíku (NO _x) [mg/m ³]	200 (kotle na biomasu) 350 (kotle na fosilní paliva)

Tab.3.4 Mezní hodnoty emisí dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES

Jak již bylo zmíněno, emise CO ve Směrnici o Ekodesignu odpovídají páté emisní třídě dle normy ČSN EN 303-5. Novinkou je nastavení limitů pro emise oxidů dusíku a sezónní energetické účinnosti vytápění. Hodnoty emisí NO byly přepočítány stejně jako emise CO na 10 % O₂, pomocí vzorce. (3.1)

Výsledky emisí po přepočítání emisí NO na objem O₂ dle normy:

Hodnoty NO přepočtené na 10 % O ₂	Množství [mg/m ³]
dřevní pelety	354
pelety z řepky	652
pelety z pšenice	595

Tab.3.5 hodnoty emisí NO přepočtení na 10 % O₂

Dle měření tedy spalování daných paliv v kotli VERNER A251 nevyhovuje budoucím limitům pro oxidy dusíku.

Výpočet účinnosti kotle:

Výpočet účinnosti kotle nepřímou metodou, vychází z úvahy, že kotel má teoretickou účinnost 100 % v reálném provozu sníženou o jednotlivé ztráty. [22]

Součet ztrát $\sum Z_i$:

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv} \quad (3.2)$$

Kde:

Z_C [%]..... ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích
 Z_{CO} [%]..... ztráta způsobená únikem hořlaviny ve spalinách
 Z_f [%]..... ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích
 Z_k [%]..... ztráta způsobená únikem tepla ve spalinách
 Z_{sv} [%]..... ztráta tepla způsobená přestupem tepla sáláním a vedením

Po poradě s panem Ing. Štelclem jsem se rozhodl zanedbat ztráty únikem tepla v tuhých zbytcích a ztráty sáláním, jelikož nejsou tak významné.

Stanovení objemu spalin:

Závislost objemu spalin na výhřevnosti paliva je prakticky lineární, a to pro jednotlivé druhy paliv s relativně malým rozptylem. Pro tuhá a kapalná paliva lze tedy použít vzorec (3.3) pro stanovení objemu suchých spalin pomocí výhřevnosti paliva.

$$V_{SS} = 0,2365 \cdot Q_i + 0,4467 \quad (3.3)$$

Kde:

V_{SS} [m³/kg] objem suchých spalin
 Q_i [MJ/kg] výhřevnost paliva

Také je nutné přepočíst objem těchto spalin (V_{SS} jsou teoretické spaliny při 0 % O₂) na reálné hodnoty pomocí vzorce (3.4).

$$O_p = \frac{V_{SS} \cdot 20,95}{20,95 - O_2^{ref}} \quad (3.4)$$

Kde:

O_p [m³/kg]..... objem suchých spalin při referenčním obsahu kyslíku
 O_2^{ref} [%] referenční obsah kyslíku [23]

Výpočet komínové ztráty Z_k :

$$Z_k = \frac{O_p \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{in})}{Q_i} \quad (3.5)$$

Kde:

c_p [J/kg] střední měrná tepelná kapacita spalin (výpočet viz přílohy)
 t_{out} [°C]..... teplota spalin
 t_{in} [°C]..... teplota nasávaného kyslíku

Výpočet ztráty únikem plynné hořlaviny ve spalínách:

Dílčí výpočty:

$$V_{cel} = m_{pal} \cdot O_p \quad (3.6)$$

$$m_{CO} = CO_{avg} \cdot V_{cel} \quad (3.7)$$

$$V_{CO} = \frac{m_{CO}}{M_{CO}} \cdot 22,41 \quad (3.8)$$

$$\omega_t = \frac{0,001 \cdot V_{CO}}{V_{cel}} \quad (3.9)$$

Kde:

V_{cel} [m³] celkový objem spalín
 m_{pal} [kg] hmotnost spáleného paliva
 m_{CO} [g] hmotnost uhlíku ze spáleného paliva
 CO_{avg} [mg/m³] průměrné emise CO
 V_{CO} [dm³] objem CO z celkového objemu spalín
 M_{CO} [g/mol] molární hmotnost CO (28 g/mol)
 ω_t [-] objemový podíl CO

Hlavní výpočet:

$$Z_{CO} = \frac{Q_{CO} \cdot \omega_t \cdot O_p}{Q_i} \quad (3.10)$$

Kde:

Q_{CO} [J/kg] výhřevnost CO
 Q_i [J/kg] výhřevnost paliva

Ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích:

$$Z_C = \frac{A_r \cdot C_x \cdot Q_C}{Q_i \cdot (1 - C_x)} \quad (3.11)$$

Kde:

A_r [kg] obsah popele v kilogramu paliva
 C_x [kg] obsah uhlíku v kilogramu popele
 Q_C [J/kg] výhřevnost uhlíku [22]

Účinnost kotle

Za pomoci výše uvedených vzorců byly vypočítány účinnosti spalování pro jednotlivá paliva (viz přílohy) a porovnány se Směrnicí o Ekodesignu 2009/125/ES. Ta udává, že nejnižší dosažitelná účinnost kotlů nad 20 kW by od roku 2020 měla být 77 %. Srovnáním

s vypočtenými účinnostmi lze zjistit, že přípustná účinnost byla dosažena při spalování všech třech druhů pelet. (viz Tab 3.6)

palivo	účinnost [%]
dřevní pelety	88,96
pelety z řepky	82,38
pšeničné pelety	82,65

Tab.3.6 účinnost kotle při spalování jednotlivých paliv

Vzorový výpočet účinnosti pro dřevní pelety v programu SMath:

$A_{r\%} := 3,02$	obsah popele [%]
$C_{\%} := 47,37$	obsah uhlíku [%]
$O_{2ref} := 7,31$	obsah kyslíku při spalování dřevních pelet[%]
$t_{in} := 17,5$	teplota vzduchu na vstupu do kotle [°C]
$t_{out} := 224$	teplota spalin na výstupu z kotle [°C]
$Q_{ox} := 32600000$	výhřevnost uhlíku [J/kg]
$Q_i := 17180000$	výhřevnost paliva [J/kg]
$CO_{prům} := 137$	průměrná hodnota emise CO [mg/m ³]
$m_{pal} := 6,5$	hmotnost spáleného paliva [kg]
$CO_{2\%} := 8,06$	objem CO ₂ ve spalinách [%]

$$A_{rkg} := \frac{A_{r\%}}{100} = 0,0302 \quad \text{obsah popele v kilogramu paliva [kg]}$$

$$C_x := A_{rkg} \cdot \frac{C_{\%}}{100} = 0,0143 \quad \text{obsah uhlíku v kilogramu popele [kg]}$$

$$Z_c := \frac{A_{rkg} \cdot C_x \cdot Q_{ox}}{Q_i \cdot (1 - C_x)} \cdot 100 = 0,0832 \quad \text{ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích [%]}$$

$$V_{ss} := 0,2365 \cdot \frac{Q_i}{1000000} + 0,4467 = 4,5098 \quad \text{objem suchých spalin [m³/kg]}$$

$$O_p := \frac{V_{ss} \cdot 20,95}{20,95 - O_{2ref}} = 6,9267 \quad \text{objem spalin přepočten na reálný obsah O₂ při spalování [m³/l]}$$

$$C_{p1} := \left(0,361 + 0,008 \cdot \frac{t_{out}}{1000} + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{out}}{1000} \right)^2 \right) = 0,3645 \quad \text{střední měrná kapacita spalin}$$

$$C_{p2} := \left(0,085 + 0,19 \cdot \frac{t_{out}}{1000} + (-0,14) \cdot \left(\frac{t_{out}}{1000} \right)^2 \right) \cdot CO_{2\%} = 0,9715$$

$$C_{p3} := \left(0,03 \cdot \frac{t_{out}}{1000} + (-0,2) \cdot \left(\frac{t_{out}}{1000} \right)^2 \right) \cdot CO_{2\%} = -0,0267$$

$$C_p := (C_{p1} + C_{p2} + C_{p3}) \cdot 1000 = 1309,2925$$

$$Z_k := \left(\frac{O_p \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{in})}{Q_i} \right) \cdot 100 = 10,9008 \quad \text{komínová ztráta [\%]}$$

$$V_{cel} := m_{pal} \cdot O_p = 45,0233 \quad \text{celkový objem spalín [m^3]}$$

$$m_{CO} := \frac{CO_{prům}}{1000} \cdot V_{cel} = 6,1682 \quad \text{hmotnost CO v celkovém objemu spalín [g]}$$

$$V_{CO} := \frac{m_{CO}}{28} \cdot 22,41 = 4,9368 \quad \text{objem CO v celkovém objemu spalín [l]}$$

$$w_t := \frac{V_{CO}}{1000} = 0,0001 \quad \text{objemový podíl CO}$$

$$Z_{CO} := \frac{12,63 \cdot 10^6 \cdot w_t \cdot O_p}{Q_i} \cdot 100 = 0,0558 \quad \text{ztráta únikem plynné hořlaviny ve spalínách}$$

$$Z := Z_c + Z_k + Z_{CO} = 11,0398 \quad \text{celková ztráta [\%]}$$

$$\eta := 100 - Z = 88,9602 \quad \text{účinnost kotle [\%]}$$

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit produkci škodlivých látek při spalování agropelet. V první kapitole byl stručně popsán pojem biomasa, rozebráno její rozdělení a stručně okomentovány rostliny k výrobě pelet spalovaných v experimentální části, tedy řepky a pšenice. Následovala rešerše způsobů jejího sklizení, zpracování a přeměny na palivo.

Ve druhé kapitole byly zmíněny látky, které vznikají při spalování biomasy a jsou škodlivé pro člověka a životní prostředí. Tedy především oxidy uhlíku, oxidy dusíku, oxidy síry, tuhé znečišťující látky a polycyklické aromatické uhlovodíky. Při spalování vznikají i jiné látky, ty však nejsou z hlediska zdraví a životního prostředí tolik významné.

Poslední třetí část je popis experimentu, který proběhl na kotli VERNER A251 ve zkušebně kotlů, energetického ústavu VUT. V jeho rámci byly spalovány dřevní pelety, pelety z řepky a pelety z pšenice. Naměřené hodnoty byly přepočteny pro srovnání s hodnotami z norem, konkrétně s momentálně platnou českou normou ČSN EN 303-5 a Směrnicí o Ekodesignu 2009/125/ES, která začne pro kotle platit od roku 2020.

Všechny tři měřená paliva plní emisní limity nejpřísnější páté třídy dle ČSN EN 303-5. Při porovnání se Směrnicí o Ekodesignu, která kromě limitů pro oxid uhelnatý nově zavádí také limity pro oxidy dusíku však bylo zjištěno, že této normě při daném nastavení kotle nevyhovuje ani jedno z měřených paliv. Dřevní pelety překračovaly limitní hodnoty téměř dvojnásobně, pelety z řepky a pelety z pšenice pak přibližně trojnásobně.

Pro splnění limitů Směrnice o Ekodesignu je tedy nutné zvolit pro spalování těchto paliv kotel vyšší emisní třídy a vhodnou konstrukcí kotle upravit teplotu spalování, protože právě při vysoké teplotě spalování paliva se tvoří největší množství oxidů dusíku.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název veličiny	Jednotka
CO	hodnota CO přepočítaná na objem O ₂ dle normy	mg/m ³
CO _{prům}	naměřená průměrná hodnota CO	mg/m ³
O _{2norm}	objem O ₂ dle normy	% _{obj}
O _{2prům}	naměřený průměrný objem O ₂	% _{obj}
$\sum Z_i$	součet ztrát	%
Z _C	ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích	%
Z _{CO}	ztráta způsobená únikem hořlaviny ve spalínách	%
Z _f	ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích	%
Z _k	ztráta způsobená únikem tepla ve spalínách	%
Z _{sv}	ztráta tepla způsobená přestupem tepla sáláním a vedením	%
V _{SS}	objem suchých spalín	m ³ /kg
Q _i	výhřevnost paliva	MJ/kg
O _p	objem suchých spalín při referenčním obsahu kyslíku	m ³ /kg
O _{2ref}	referenční obsah kyslíku	%
c _p	střední měrná tepelná kapacita spalín	J/kg
t _{out}	teplota spalín	°C
t _{in}	teplota nasávaného kyslíku	°C
V _{cel}	celkový objem spalín	m ³ /kg
m _{pal}	hmotnost spáleného paliva	kg
m _{CO}	hmotnost uhlíku ze spáleného paliva	g
CO _{avg}	průměrné emise CO	mg/m ³
V _{CO}	objem CO z celkového objemu spalín	dm ³
M _{CO}	molární hmotnost CO	g/mol
ω _t	objemový podíl CO	-
Q _{CO}	výhřevnost CO	J/kg
A _r	obsah popele v kilogramu paliva	kg
C _x	obsah uhlíku v kilogramu popele	kg
Q _C	výhřevnost uhlíku	J/kg

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 8086534065.
- [2] KUMMAMURU, Bharadwaj. *WBA global bioenergy statistics 2017* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://worldbioenergy.org/uploads/WBA%20GBS%202017_hq.pdf.
- [3] Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: ASPI. Praha: Wolters Kluwer ČR [cit. 2018-05-18].
- [4] STRAŠIL, Zdeněk, ŠIMON, Josef: *Stav a možnosti využití rostlinné biomasy v energetice ČR*. Biom.cz [online]. 2009-04-20 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/stav-a-moznosti-vyuziti-rostlinne-biomasy-v-energetice-cr>. ISSN: 1801-2655.
- [5] HUTLA, Petr: *Tuhá biopaliva z místních zdrojů*. Biom.cz [online]. 2010-11-01 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/tuha-biopaliva-z-mistnich-zdroju>. ISSN: 1801-2655.
- [6] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie – projektování – stavba zařízení – příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6.
- [7] MUŽÍK, Oldřich, SLEJŠKA, Antonín: *Možnosti využití anaerobní fermentace pro zpracování zbytkové biomasy*. Biom.cz [online]. 2003-07-14 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-anaerobni-fermentace-pro-zpracovani-zbytkove-biomasy>. ISSN: 1801-2655.
- [8] KOLONIČNÝ, Jan a Veronika HASE. *Využití rostlinné biomasy v energetice*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2541-0.
- [9] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [10] BERANOVSKÝ, Jiří. *Energie biomasy* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://energetika.cz/index.php?id=171>.
- [11] Integrovaný registr znečišťování. *Důležité pojmy* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/23>.
- [12] HORÁK, Jiří. *Praktické zkušenosti s emisemi z malých topenišť* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapani/10240-prakticke-zkusenosti-s-emisemi-z-malych-topenist>.
- [13] Integrovaný registr znečišťování. *Oxid uhličitý* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxid_uhlicity.pdf.

- [14] Integrovaný registr znečišťování. *Oxid uhelnatý* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxid_uhelnaty.pdf.
- [15] Integrovaný registr znečišťování. *Oxidy dusíku* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxidy_dusiku.pdf.
- [16] Integrovaný registr znečišťování. *Oxidy síry* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Oxidy_siry.pdf.
- [17] Integrovaný registr znečišťování. *Polycyklické aromatické uhlovodíky* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/PAU_PAH.pdf.
- [18] Integrovaný registr znečišťování. *Polétavý prach* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/latky/Poletavy_prach.pdf.
- [19] *Schéma automatického kotle VERNER A251* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://esveko.esel.cz/Upload/WYSIWYG/Image/esveko/Automatick%C3%A9%20kotle/schema2.jpg>.
- [20] ČSN EN 303-5: 2013. *Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*. CEN, 2013
- [21] STUPAVSKÝ, Vladimír. *Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>.
- [22] HORÁK, Jiří. *Stanovení účinnosti kotlů* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>.
- [23] NEUŽIL, Vladimír. *Výpočet objemu spalin* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.emise.cz/userdata/file/Výpočet%20objemu%20spalin.pdf>.
- [24] Statistiky ministerstva průmyslu a obchodu. *Odhadovaná roční spotřeba agropellet v ČR* [online]. Dostupné z: www.mpo.cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie.