



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TVORBA TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK Z BIOMASY

FORMING OF SOLID POLLUTANTS FROM BIOMASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Denisa Havlínová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Denisa Havlínová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Tvorba tuhých znečišťujících látek z biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Domovní vytápění tuhými palivy s sebou nese ekologickou zátěž v podobě emisí tuhých znečišťujících látek. I přesto je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem či výrobu elektrické energie. V poslední době se ukazuje závislost tvorby TZL na formě a složení biomasy. Práce bude tuto závislost zkoumat.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše druhů biomasy a forem paliva
- popis tvorby a vlastností TZL
- zkoumání závislosti tvorby TZL na vlastnostech biomasy, zejména na zpracování paliva

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se dělí na dvě hlavní části. První část je rešeršní a zabývá se především biomasou a znečišťujícími látkami. V této části najdeme rozdělení biomasy ze dvou hledisek, srovnání forem paliva a pojednání o základních znečišťujících látkách se zaměřením na tuhé znečišťující látky. Druhá část je experimentální. Začíná palivovou laboratoří, ve které se určoval obsah vody, popelovin a spalné teplo zkoumaných biopaliv. Následuje zkoumání závislosti tvorby TZL na vlastnostech biomasy, které probíhalo měřením těchto TZL pomocí filtrů ve sběrném zařízení, zatímco se postupně spalovaly zkoumaná biopaliva na krbové vložce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Biomasa, pelety, brikety, znečišťující látky, TZL (tuhé znečišťující látky), emise, spalování, znečišťování, obnovitelné zdroje, popel

ABSTRACT

This bachelor's thesis is divided into two main parts. The first part is research and deals mainly with biomass and pollutants. In this section, we will find a two-dimensional distribution of biomass, a comparison of fuel forms and a discussion of basic pollutants with a focus on solid pollutants. The second part is experimental. It starts with a fuel laboratory, where the water, ash and heat content of the biofuels examined is determined. The following is an investigation of the dependence of the PM formation on the properties of the biomass, which was measured by the measurement of these PM by the filters in the collecting device, while the examined biofuels were gradually burned on the fireplace insert.

KEY WORDS

Biomass, pellet, briquette, pollutants, PM (particulate matter), emissions, combustion, pollution, renewable resources, ash

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAVLÍNOVÁ, Denisa. *Tvorba tuhých znečišťujících látek z biomasy* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116610>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Tvorba tuhých znečišťujících látek z biomasy** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marku Balášovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Haně Lisé Ph.D. za čas, který s námi strávila v palivové laboratoři.

OBSAH

ÚVOD	10
1 BIOMASA	11
1.1 DRUHY BIOMASY	11
1.1.1 Druhy biomasy dle původu a zdroje biopaliva	11
▪ Dřevní biomasa	11
▪ Bylinná biomasa	12
▪ Ovocná biomasa	13
1.1.2 Druhy biomasy z energetického hlediska	14
▪ Odpadní	14
▪ Záměrné pěstovaná biomasa	14
1.2 FORMY PALIVA	14
1.2.1 Pelety z biomasy	14
1.2.2 Brikety z biomasy	15
1.2.3 Pro srovnání – palivové dřevo	15
2 POPIS TVORBY A VLASTNOSTÍ TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK	16
2.1 Látky znečišťující ovzduší	16
2.1.1 Oxid siřičitý SO ₂	16
2.1.2 Oxidy dusíku	16
2.1.3 Přízemní ozon O ₃	17
2.1.4 Polycyklické aromatické uhlovodíky PAU	17
2.1.5 Oxid uhelnatý CO	17
2.1.6 Dioxiny	18
2.1.7 Polychlorované bifenyly PCB	18
2.2 TZL aneb polétavý prach PM ₁₀ a PM _{2,5}	19
2.2.1 Nebezpečí TZL	19
2.2.2 Znečištění TZL v Evropě a České Republice	20
3 PALIVOVÁ LABORATOŘ	22
▪ Noční briketa	22
▪ Briketa HARD TOP	22
▪ Briketa TOP	23
▪ Štípané dřevo – buk	23
3.1 Stanovení obsahu vody – metoda sušení v sušárně	23
3.1.1 Popis metody a postup	23
3.1.2 Naměřené hodnoty	24
3.1.3 Výpočty	25
3.1.4 Výsledky	25
3.1.5 Stanovení vlhkosti u štípaného dřeva	25
3.2 STANOVENÍ POPELOVIN	26
3.2.1 Popis metody a postup	26

3.2.2	Naměřené hodnoty	27
3.2.3	Výpočet	28
3.2.4	Výsledky	28
3.3	Stanovení spalného tepla.....	29
3.3.1	Popis metody a postup	29
3.3.2	Výpočet	30
3.3.3	Naměřené hodnoty a výsledky.....	30
4	ZÁVISLOST TVORBY TZL NA VLASTNOSTECH BIOMASY	31
4.1	Příprava vzorku.....	31
4.2	Popis experimentu.....	33
4.3	Naměřené hodnoty	37
4.4	Vyhodnocení výsledků experimentu.....	37
4.4.1	Hodnoty pro referenční obsah kyslíku.....	40
	ZÁVĚR	41
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ	46
	SEZNAM TABULEK	47

ÚVOD

V posledních desetiletích se usilovně hledají náhrady za spalování fosilních paliv, případně za využívání jaderné energie. Tyto energetické zdroje mají na svědomí obrovský podíl celosvětové produkce energie. Obojí má ale velké nevýhody. Nejde jen o to, že se tenčí zásoby uranové rudy, uhlí, ropy a zemního plynu, ale také o negativní vliv při jejich spalování na prostředí a klima. Už dávno je prokázáno spojení mezi spalováním fosilních paliv a globálním oteplováním. Dnes už se prostě nemůže popřít, že změna klimatu již začala. Můžeme se jen snažit mírnit její projevy. Z energetického hlediska je potřeba hledat jiné, obnovitelné zdroje energie, které nebudou zatěžovat prostředí. Vedle solárních, vodních a větrných elektráren leží nejstarší zdroj energie na Zemi, a to je biomasa.

Spalování biomasy patří mezi nejvyužívanější zdroj tepelné energie v domácnostech. Domovní vytápění dřevní biomasou s sebou ovšem nese také ekologickou zátěž, a to v podobě emisí tuhých znečišťujících látek. Hlavním cílem této bakalářské práce je zkoumání závislosti tvorby TZL na formě biomasy.

1 BIOMASA

Pojem biomasa sjednocuje veškerou hmotu z organického materiálu, zahrnuje těla veškerých živých organismů na naší planetě - živočichů, rostlin, ale i bakterií, hub a sinic. Z energetického hlediska je důležitá pouze biomasa, která je využitelná energeticky, což jsou především rostliny.

Rostliny vytvářejí biomasu fotosyntézou ve formě uhlovodíků. K tomuto procesu je naprosto nezbytná energie ze Slunce, dalším nepostradatelným zdrojem je voda. Fotosyntéza mění v rostlinách oxid uhličitý, vodu a pomocné látky (např. nerosty) na biomasu (tělo rostliny) a kyslík. Tvorba biomasy probíhá tímto způsobem pouze v rostlinách – živočichové umí biomasu pouze přetvářet z jiné biomasy, a bez rostlin by nepřežili.

Cíle současné energetiky jsou boj se změnou klimatu a snižování emisí uhlíku, tedy snaha o výrobu co nejčistější energie. Vedle využívání solárních, větrných a vodních elektráren leží další, více opomíjený, ale neméně důležitý zdroj obnovitelné energie, a tou je právě biomasa. [1], [3]

1.1 DRUHY BIOMASY

Základní rozdělení biomasy je na biomasu živočišnou a biomasu rostlinného původu. Rostlinnou biomasu dále dělíme podle původu a zdroje biopaliva (dřevní, bylinná a ovocná biomasa) a z energetického hlediska na odpadní a záměrně pěstovanou. [2][3]

1.1.1 Druhy biomasy dle původu a zdroje biopaliva

- **Dřevní biomasa**

Pojem dřevní biomasa zahrnuje lesní a plantážové dřevo, dřevozpracující průmysl, použité dřevo a směsi a příměsi.

Lesní a plantážové dřevo

Jedná se v podstatě surové, vytěžené dřevo, které neprochází žádnými dalšími složitými úpravami, a je účelně těženo jako palivo. Upravuje se pouze rozřezáním, odkorněním a vysušením.

Vedlejší produkty a zbytky dřevozpracujícího průmyslu

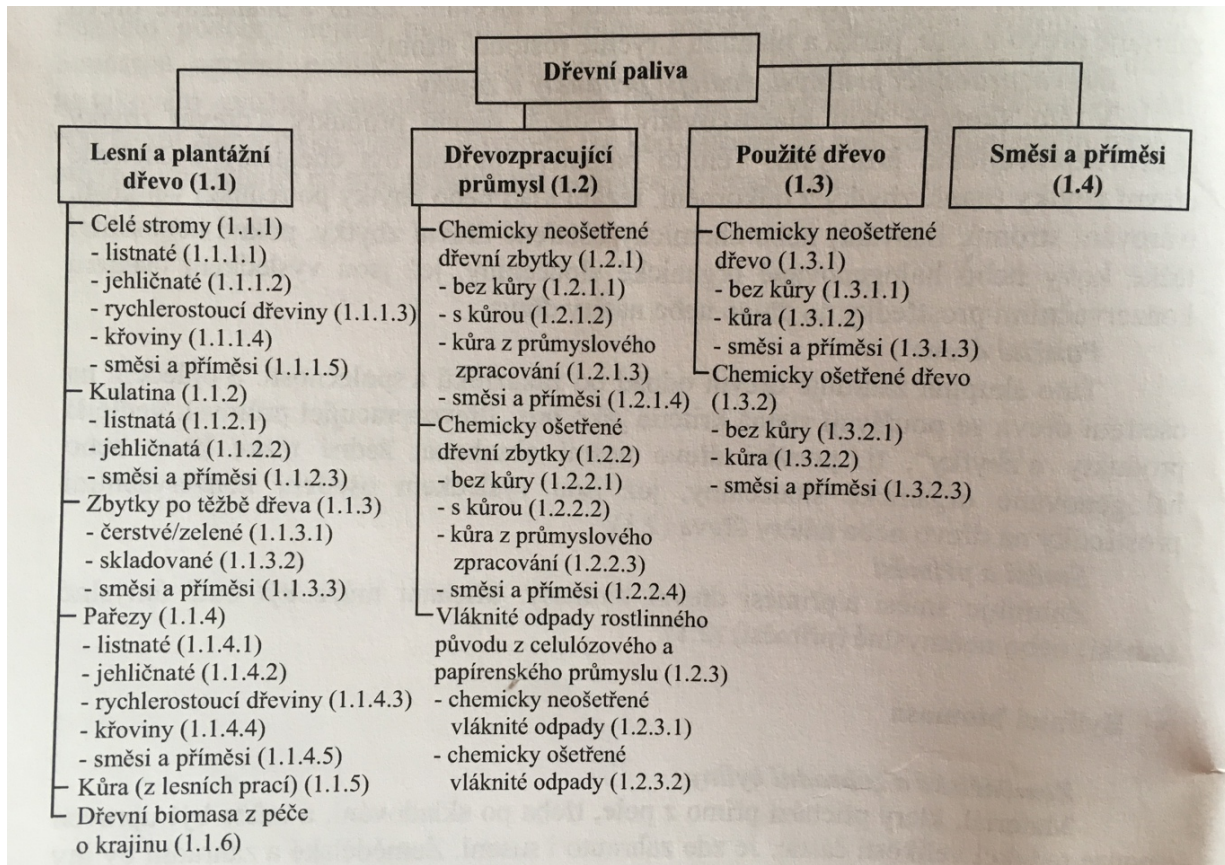
Dřevozpracující průmysl České republiky se zabývá především pilařskou výrobou, to je úprava lesního a plantážového dřeva na fošny, trámy, prkna, hranoly, latě a pražce. Dále stavebně truhlářskou a tesařskou výrobou, která zahrnuje výrobu oken, dveří, schodišť, obkladů, dřevěných podlah apod. Do této kategorie spadají veškeré vedlejší produkty a odpady této výroby, a to jak chemicky neošetřeny, tak i chemicky ošetřené dřevní zbytky, a dále vláknité odpady rostlinného původu z celulózového a papírenského průmyslu. Chemicky ošetřené dřevní zbytky musí splňovat podmínky ohledně obsahu těžkých kovů a halogenovaných organických sloučenin, tyto prvky může dřevo obsahovat v důsledku nátěrů, impregnací a jiných ošetřujících prostředků. [27]

Použité dřevo

Tato skupina zahrnuje dřevo, které zpracoval dřevozpracující průmysl a bylo využité nebo využívané spotřebitelem. Jedná se například o starý nábytek, okna, trámy, palety a další. U tohoto použitého dřeva platí stejné podmínky ohledně obsahu chemikálií a organických sloučenin jako u předchozí kategorie.

Směsi a příměsi

Pokud dřevní biomasa obsahuje úmyslně přidané látky, jedná se o směsi. Pokud je míchání neúmyslné, jedná se o příměsi.



Obrázek 1: Klasifikační schéma dřevních paliv podle původu a zdrojů [3]

▪ Bylinná biomasa

Zemědělské a zahradní byliny

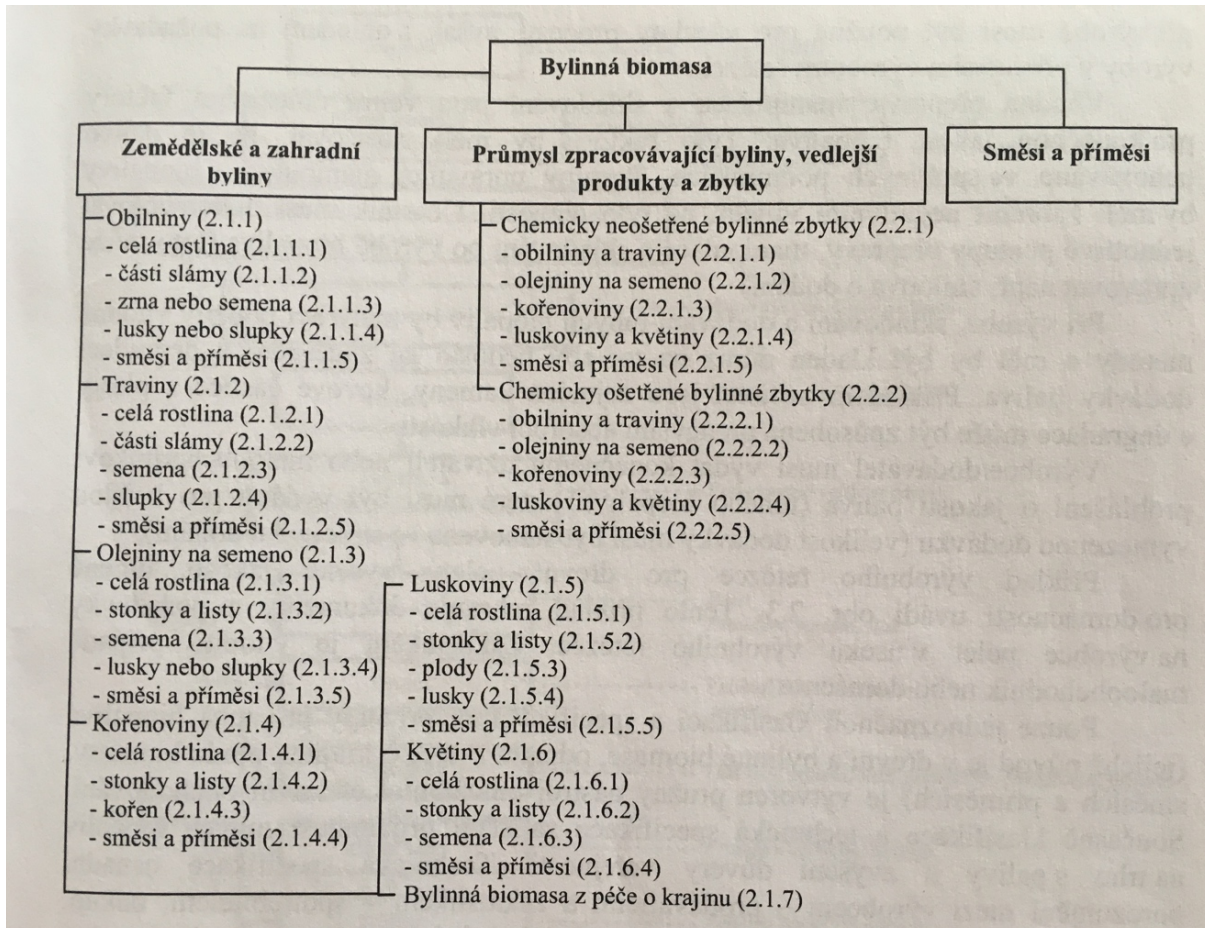
Bylinný materiál, který přichází přímo ze zemědělských a zahradních polí, zahrad a parků. Jedná se o celé rostliny, stonky, listy, semena, lusky, slupky nebo kořeny bylin. Typický zástupce této kategorie je například seno a sláma.

Vedlejší produkty a zbytky průmyslu zpracovávajícího byliny

Zbytky po průmyslovém zpracování bylinné biomasy, například zbytky z výroby cukru z cukrové řepy, zbytky z ječného sladu z výroby piva a zbytky z řepky olejky při výrobě řepkového oleje.

Směsi a příměsi

Pro lepší vlastnosti nebo usnadnění nakládání s bylinnou biomasou se účelně přidávají směsi. Pokud je míchání neúmyslné, jedná se o příměsi.



Obrázek 2: Klasifikační schéma bylinné biomasy [3]

▪ Ovocná biomasa

Sadové a zahradní ovoce

Jak napovídá název, patří sem ovoce ze stromů a křovin, ale také plody z bylin.

Vedlejší produkty a zbytky průmyslu zpracovávajícího ovoce

Řadí se sem zbytky ovocné biomasy, které zbydou po průmyslovém zpracování ovoce jako vylišované slupky a dužiny při výrobě džusů, vína nebo olivového oleje.

Směsi a příměsi

Analogicky jako u dřevní a bylinné biomasy, může být míchání úmyslné (směsi) nebo neúmyslné (příměsi). [3]

1.1.2 Druhy biomasy z energetického hlediska

▪ Odpadní

Odpady ze zemědělské prvovýroby – sláma, náletové dřeviny, ořezy ze sadů

Odpady ze živočišné výroby – zbytky krmiv, exkrementy zvířat, odpady z potravinářského průmyslu, hnůj, kejda

Odpady z lesní těžby – dřevní hmota, kůra

Odpady z dřevozpracujícího průmyslu

Komunální odpady – kaly, organický komunální odpad

▪ Záměrné pěstovaná biomasa

Rostliny jednoleté a víceleté – laskavec, konopí seté, sléz přeslenitý, světlice barvířská, komolice bílá, pupalka dvouletá, hořčice sarepská

Víceleté a vytrvalé rostliny (dvouděložné) – jestřabina východní, čičorka pestrá, topinambur, šťovík krmný, oman pravý, sléz vytrvalý, bělotrn kulatohlavý

Energetické trávy – sveřep bezbranný, sveřep horský, psineček veliký, lesknice rákosovitá, kostřava rákosovitá, ovsík vyvýšený, ozdobnice čínská (sloní tráva)

Rychle rostoucí dřeviny – topoly, vrby, olše, břízy [4] [2]

1.2 FORMY PALIVA

Pro vytápění je rozhodně nejvhodnější dřevní biomasa, která se používá v mnoha formách. Těžené dřevo se používá buď dále v dřevozpracujícím průmyslu, nebo se řeže na kulatiny stejné délky a štípe, ručně nebo mechanicky, na štěpiny. Ty se pak využívají k vytápění. Důležité je ale zpracovat i různé menší větve, odřezky, kůru, štěpky, hobliny a piliny. Koncové technologie takového zpracování se nazývají briketování a peletování. Speciální lisy je lisují do požadovaných tvarů, větší kusy dřeva jako hobliny a štěpky, občas i kůra, se lisují do tvaru větších válců nebo kvádrů, nazývaných brikety. Piliny se zpracovávají na drobnější dřevné pelety.

Při těchto úpravách není potřeba přidávat žádné pojivo, dřevo je schopné se za vysokého tlaku spojit ligninem, který je v něm obsažen. Při lisování se jednotlivé částice přiblíží na minimální molekulovou vzdálenost, ve které působí Van der Walsovy síly. Pokud je tlak dostatečný a dřevní odpad má požadovanou vlhkost (maximálně 15 %), pak mají brikety a pelety po zpracování stabilní tvar.

Brikety a pelety mohou být vyrobeny z dřevní i rostlinné biomasy, liší se od sebe hlavně svým tvarem a způsobem použití. Zatímco dřevěné brikety můžete spalovat v různých topných zařízeních na dřevo, pro pelety je nejvhodnější speciální kotel.

1.2.1 Pelety z biomasy

Pelety se vyrábí z pilin, které jsou odpadním materiálem například při odkornování nebo řezání dřeva. Tyto piliny se následně lisují v prstencovém granulovacím lisu do tvaru válečků, nejčastěji o průměru 6 až 20 mm a délce 1 – 5 cm.

Nejprve musíme rozlišit dva druhy pilin – světlé a tmavé. Světlé jsou samozřejmě kvalitnější, jelikož na rozdíl od pilin tmavých neobsahují dřevní kůru. Piliny jsou před lisováním vysušeny nejčastěji na 10 - 15 % vlhkosti, přičemž pochází ze dřeva s 40 - 60 %

vlhkostí. Palivové dřevo při dvouletém skladování dosahuje vlhkosti 15 – 20 % a výhřevnosti 14 MJ/kg, zatímco výhřevnost pelet se pohybuje mezi 18 – 19 MJ/kg. Tím pádem pelety dosahují vyšší výhřevnosti a kvality než běžné dřevo.

Mezi hlavní výhody pelet patří vysoká výhřevnost, snadná a čistá manipulace, nenáročnost na prostor. Pelety se často spalují v automatických kotlech, pak je navíc proces prakticky bezobslužný, podobně jako u elektrických nebo plynových kotlů. Jejich vysoká výhřevnost při spalování je navíc zařazuje mezi černé a hnědé uhlí, ale na rozdíl od uhlí, které má až 30 % popelu, mají pelety odpadu pouze 0,5 – 1 %. Tento popel z pelet je navíc vhodné zahradní minerální hnojivo. Jedinou nevýhodou oproti běžnému palivovému dřevu je tedy nutnost zpracování – homogenizace pilin, sušení, granulování atd.

1.2.2 Brikety z biomasy

Brikety jsou ekologické palivo vyrobené z dřevní nebo rostlinné biomasy. Mohou mít různé tvary, ale nejčastěji se lisují se ve tvaru plných válců nebo válců s otvorem v různých velikostech vhodných k ručnímu přikládání do většiny druhů topných zařízení. Stejně jako pelety vznikají lisováním biomasy pod tlakem a při vysokých teplotách. Vyrábět je lze také z pilin, drtí, hoblin nebo kůry. Disponují nízkou vlhkostí a vysokou výhřevností (okolo 18 - 20 MJ/kg). Brikety poslouží jako ideální zdroj doplňkového tepla třeba pro krbová kamna. Často jsou baleny po pěti kusech, manipuluje se s nimi snadno a dobře se skladují. [3], [5]

1.2.3 Pro srovnání – palivové dřevo

Výhřevnost dřeva se pohybuje okolo 15 MJ/kg (v případě zhruba 20 % vlhkosti). Míra vlhkosti má na výhřevnost velký vliv, čím vyšší vlhkost, tím nižší energetický zisk. Dřevo se dá rozlišit podle své tvrdosti. Častý omyl je, že tvrdé dřevo má vyšší výhřevnost než dřevo měkké. Tvrdé dřevo má pouze větší hustotu, to znamená vyšší hmotnost při stejném objemu. Aby mělo tvrdé dřevo stejnou hmotnost jako dřevo měkké, musíme mít tohoto měkkého dřeva větší objem. Hmotnost bude ale stejná a výhřevnost podobná, jelikož ta je udávána v MJ/kg a závisí tedy na hmotnosti a ne na objemu. Nicméně měkké dřevo, právě díky své nižší hustotě, je vhodnější na podpal a rychlé vyhřátí prostoru. Tvrdé dřevo, díky své vyšší hustotě, je pak vhodnější na vytápění, protože déle vydrží.

Výhodou dřeva je snadná dostupnost a příznivá cena. Oproti peletám a briketám se dřevo hůře skladuje a potřebuje až dva roky na přirozené vyschnutí. [5]

2 POPIS TVORBY A VLASTNOSTÍ TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

2.1 Látky znečišťující ovzduší

Dle zákona č. 201/2012 Sb., ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší, se znečišťující látkou rozumí každá látka, která svou přítomností v ovzduší má nebo může mít škodlivé účinky na lidské zdraví nebo životní prostředí anebo obtěžuje zápachem. Znečišťování (emise) znamená vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do ovzduší. A úroveň znečištění se rozumí hmotnostní koncentrace znečišťující látky v ovzduší (imise) nebo její depozice na zemský povrch za jednotku času.

Emisním limitem se rozumí nejvýše přípustné množství znečišťující látky nebo skupiny znečišťujících látek vnášené do ovzduší ze stacionárního zdroje, emisním stropem nejvýše přípustné množství znečišťující látky vnesené do ovzduší za kalendářní rok. Imisní limit vyjadřuje nejvýše přípustnou úroveň znečištění stanovenou tímto zákonem. Emisní limity a stropy a imisní limity pro jednotlivé znečišťující látky určují přílohy tohoto zákona. [6]

Za základní znečišťující látky považujeme oxid siřičitý, oxidy dusíku (především oxid dusičitý), přízemní ozon, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), dioxiny, polychlorované bifenyly (PCB) a tuhé znečišťující částice (TZL) neboli polétavý prach PM10 a PM2.5. [7]

2.1.1 Oxid siřičitý SO₂

Oxid siřičitý vzniká především lidskou činností – zejména spalováním fosilních paliv obsahujících síru, tavením nerostných surovin obsahujících síru a při dalších průmyslových procesech a v domácích topeništích. Sopečná činnost také produkuje oxidy síry, ale v České republice se jedná o malé procento.

Oxid siřičitý reaguje s rostlinným barvivem chlorofylem a narušuje tak fotosyntézu, to způsobuje odbarvování listů a jehličí a následné opadávání, které vede k odumírání celých rostlin a snižuje tak úrodu. Navíc v ovzduší oxiduje se vzdušným kyslíkem za přítomnosti vody na kyselinu sírovou, která je spolu s kyselinou siřičitou příčinou kyselých dešťů.

Oxid siřičitý má také vliv na lidské zdraví, působí dráždivě na sliznice horních cest dýchacích a způsobuje kašel a ztížení dechu. Může také zapříčinit poškození očí a při velmi vysokých koncentracích tvorbu tekutiny v plicích (edém).

Znečištění oxidem siřičitým je problémem minulosti, k razantnímu poklesu jeho emisí (téměř o 90 % v porovnání let 1990 a 2006) došlo v 90. letech díky instalaci odsiřovacích zařízení a odlučovačů popílků, rekonstrukcí kotelních zařízení apod. Dříve byly emise SO₂ zodpovědné za vznik tzv. kyselých dešťů, které se například podílely na zničení lesních porostů v Jizerských a Krušných horách. Emise SO₂ klesají i z dopravy, což souvisí hlavně s omezením obsahu síry v motorové naftě. [8], [9], [22]

2.1.2 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku (oxid dusičitý NO₂, oxid dusnatý a další) mohou vznikat přirozeně bakteriální a sopečnou činností a také při bouřkách. Primárním zdrojem je ale lidská činnost, především spalovací motory v dopravě a spalovací procesy elektráren ale i domácností.

Hlavním zástupcem oxidů dusíku je NO_2 , který je společně s oxidy síry součástí kyselých dešťů. Oxid dusičitý současně s kyslíkem a těkavými organickými látkami přispívá k tvorbě přízemního ozonu a vzniku tzv. fotochemického smogu.

Oxidy dusíku mohou negativně ovlivňovat zdraví člověka, vdechování vysokých koncentrací může způsobit i smrt, nebezpečí hrozí především dětem a starším lidem. Předpokládá se, že se oxidy dusíku váží na krevní barvivo a zhoršují tak přenos kyslíku z plic do tkání. Některé náznaky ukazují, že oxidy dusíku mají určitou roli i při vzniku nádorových onemocnění. Vdechování vyšších koncentrací oxidů dusíku dráždí dýchací cesty.

Oxidy dusíku jsou pro lidské zdraví mnohem nebezpečnější než například oxid siřičitý. Problém se znečištěním oxidy dusíku spočívá především v neustálém růstu intenzity silniční dopravy. [10], [11], [22]

2.1.3 Přízemní ozon O_3

Na rozdíl od stratosférického ozonu, který tvoří ochrannou vrstvu nad zemí před slunečním UV-B zářením, je přízemní (troposférický) ozon považován za látku znečišťující ovzduší. Přízemní ozon nemá žádný významný zdroj, ale vzniká fotochemickými reakcemi v ovzduší, především pak reakcemi oxidů dusíku (z dopravy) a těkavých organických látek (VOC), za předpokladu, že nastanou vhodné meteorologické podmínky. Obecně platí, že koncentrace přízemního ozonu narůstají především v letním období od dubna do května, protože tvorba přízemního ozonu je závislá na přítomnosti slunečních paprsků a vyšší teplotě. Zvyšující se relativní vlhkost vzduchu naopak koncentraci troposférického ozonu snižuje. Celkově zastupuje přízemní ozon přibližně 10 % celkového ozonu v zemské atmosféře, zbylých 90 % připadá na ozon stratosférický.

Tento přízemní ozon poškozují listy rostlin, a způsobuje tak zemědělské škody. U lidí je příčinou dráždění dýchacích cest, podráždění očí a bolesti hlavy. Zvláště osoby s astmatem a malé děti by si měly dávat pozor na zvýšené koncentrace přízemního ozonu, a při tomto jevu se především v poledních a odpoledních hodinách venku vyhýbat fyzické aktivitě. [7], [13]

2.1.4 Polycyklické aromatické uhlovodíky PAU

Tyto polycyklické aromatické uhlovodíky vznikají převážně při nedokonalém spalování organických látek (biomasy, olejů, uhlí, nafty, benzínu a plastů) v nevhodných spalovacích zařízeních při teplotách 500 až 800 °C. Do této skupiny řadíme asi 100 organických sloučenin, mezi nejvýznamnější PAU znečišťující ovzduší patří například benzo(a)pyren. Jsou to perzistentní látky - mají velice dlouhou dobu rozkladu a v prostředí přetrvávají velice dlouho.

Bylo prokázáno, že tyto sloučeniny mají mutagenní a karcinogenní vlastnosti a ohrožují zdravý vývoj plodu. [14], [15]

2.1.5 Oxid uhelnatý CO

Oxid uhelnatý je jednou z nejrozšířenějších látek znečišťující ovzduší. Jeho velké procento vzniká přirozenými procesy, například fotochemické reakce v troposféře, vulkanická činnost, lesní požáry a další přírodní procesy doprovázené hořením. Když vynecháme přírodní zdroje, na znečištění CO se podílí především doprava a veškeré průmyslové procesy, kde probíhá spalování. Tvoří se především při nedokonalém spalování, při kterém nedostatek kyslíku, nízká teplota a krátký čas nedovoluje materiálu oxidovat za vzniku oxidu uhličitého. Nezanedbatelné množství oxidu uhelnatého je produkováno i oxidací metanu v atmosféře nebo cigaretovým kouřem.

Nebezpečí CO spočívá především v tvorbě karboxyhemoglobinu. Po vdechnutí oxid uhelnatý proniká z plic do krevního řečiště, kde se váže na železo v krevním barvivu hemoglobin za vzniku karboxyhemoglobinu, tím znemožní nebo značně omezí přenos kyslíku z krve do tkání. Tkáně pak trpí nedostatkem kyslíku, tzv. hypoxií, což se začne nejdřív projevovat poruchami funkce orgánů a tkání, které kyslík potřebují nejvíc – mozek, srdce, kosterní svalstvo, vyvíjející se plod. Otrava CO se projevuje ztmavnutím kůže, křečemi, kómatem a nakonec smrtí. Lidé se často otráví například při požárech, ale proces je do určité míry zvrátelný v závislosti na množství vdechnutého CO. I při jeho nízkých koncentracích v atmosféře může zdravý člověk pociťovat únavu, člověk se srdečními problémy bolest na prsou.

CO je možné považovat za nepřímo působící skleníkový plyn. [16], [17], [22]

2.1.6 Dioxiny

Název dioxiny slučuje dvě skupiny chemických látek: polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF). Vznikají jako odpadní produkt při spalování fosilních paliv a odpadu obsahujícího chlorované látky (např. PVC), do ovzduší se také uvolňují během průmyslové výroby, která s chlorem souvisí – chemický, papírenský a textilní průmysl, metalurgie.

Jejich nebezpečí pro lidi a živočichy spočívá v tom, že se váží na tukovou tkáň. Dlouhodobé působení dioxinů vede k poškození imunitního a nervového systému, dále ke změnám endokrinního systému (zejména štítné žlázy) a reprodukčních funkcí. Otrava vysokými dávkami se projevuje jako tzv. chlorakné. Nejrizikovější je konzumace kontaminované potravy.

Dioxiny patří mezi vůbec nejnebezpečnější látky znečišťující životní prostředí, ve kterém přetrvávají velice dlouhou dobu. [18]

2.1.7 Polychlorované bifenyly PCB

Polychlorované bifenyly (PCB) jsou syntetické, organické sloučeniny, které byly dříve účelně vyráběny a používány v chladicích, izolačních a mazacích systémech, běžně se přidávaly do barev, lepidel, vosků, plastů, pesticidů i balících papírů. Dodnes jsou přítomny v transformátorech a kondenzátorech. Dříve se do prostředí PCB dostávaly během výroby a používání, dnes je rizikové především nevhodné zacházení s nebezpečným odpadem. Vznikají také jako nezamýšlené vedlejší produkty různých průmyslových výroby, např. V hutnictví, při spalování odpadů i při hoření olovnatého benzínu.

PCB jsou velmi odolné látky schopné bioakumulace, kontaminují všechny složky životního prostředí – ovzduší, vodu, půdu, živočichy, rostliny. Pro lidi je nebezpečný jakýkoli kontakt s nimi, vdechnutí, pozření i kožní kontakt. Jsou to karcinogenní látky, schopné se akumulovat v organismu. Častější jsou chronické otravy, působí téměř na celý organismus – nervový systém, krevní oběh, imunitní systém, játra, ledviny, reprodukční systém a štítnou žlázu. [19]

2.2 TZL

Pod pojmem tuhé znečišťující látky si lze představit prach, popel, saze, dým nebo kouř. V literatuře je běžný i název suspendované částice nebo aerosol, který z definice obsahuje jemné tuhé nebo i kapalně částice v plynu. [32]

Jsou to částice pevného skupenství různých velikostí, tvarů, původu, struktury i složení, které se vyskytují v ovzduší. Některé jako prach, saze a kouř jsou dost velké a tmavé, abychom je zaznamenali pouhým okem. Jiné jsou tak malé, že je můžeme detekovat pouze elektronovým mikroskopem.

TZL mohou vznikat jak přírodním, tak lidským zaviněním. Vznik a šíření přírodních TZL neovlivníme, vznikají například sopečnou činností nebo lesními požáry, dále mezi přírodní TZL patří pyl a mořský aerosol. Tuhé znečišťující látky, které má na svědomí lidská činnost, vznikají například spalováním fosilních paliv, tavením rud, otěry pneumatik a vozovek, dále se produkují na nepevněných cestách, staveništích, ale především chemickými reakcemi v průmyslech. Čím menší průměr má částice, tím déle zůstává v ovzduší.

Rozdělit lze TZL na dvě skupiny - PM10 a PM_{2,5}. PM10 označuje vdechnutelné částice s průměrem 10 mikrometrů a menší. PM_{2,5} tedy označuje jemnější pevné částice s průměrem 2,5 mikrometrů a menším. [20], [22], [23]

2.2.1 Nebezpečí TZL

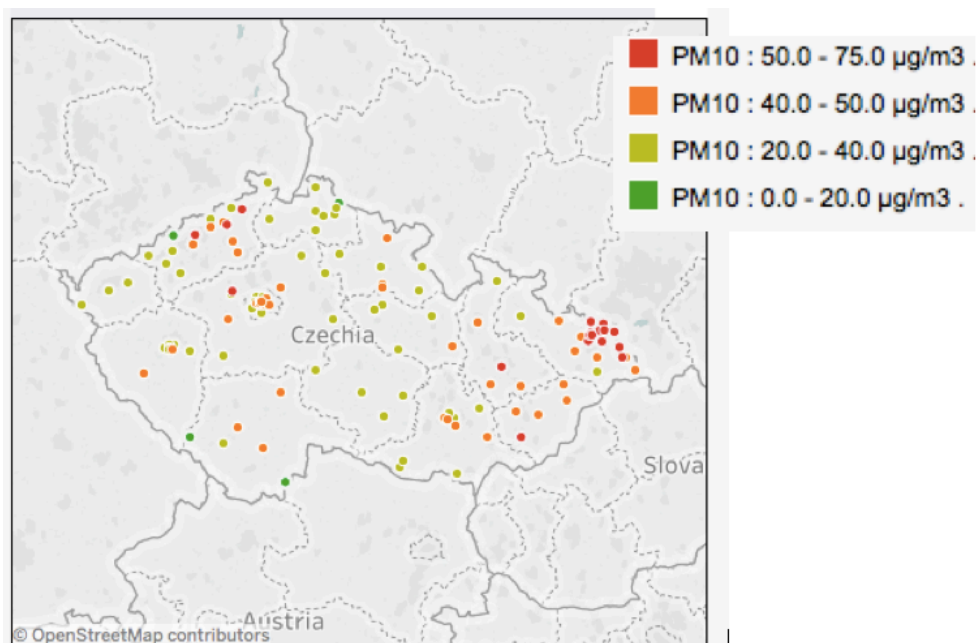
Tuhé znečišťující látky jsou nebezpečné jak pro environmentální prostředí, tak přímo pro lidské zdraví. Právě částice o průměru menším než 10 mikrometrů se mohou usazovat v plicích, některé se dokonce dostanou i do krevního řečiště. Vystavení těmto částicím tak může postihovat plíce i srdce a působit vážné zdravotní problémy. Vědecké studie už dokázaly spojit znečištění TZL se spoustou zdravotních problémů, jako snížená funkce plic, infarkty, nepravidelný srdeční tep, zhoršení astma, zvýšené respirační symptomy, jako je podráždění dýchacích cest, kašel nebo dýchací potíže. TZL na sebe navíc dokážou navazovat těkavé látky, které jsou pro organismus toxické.

Částice mohou být přenášeny větrem na velmi dlouhé vzdálenosti, poté se usazují na zemi nebo ve vodě. V závislosti na jejich chemickém složení mohou způsobovat spoustu problémů. Mohou okyselovat řeky a jezera, mění rovnováhu živin v pobřežních vodách a řekách, poškozují citlivé lesy a zemědělské plodiny, ale hlavně ovlivňují ekosystémy a přispívají k účinkům kyselých dešťů. Jemné částice PM_{2,5} jsou také příčinou snížené viditelnosti – mlžných oparů.

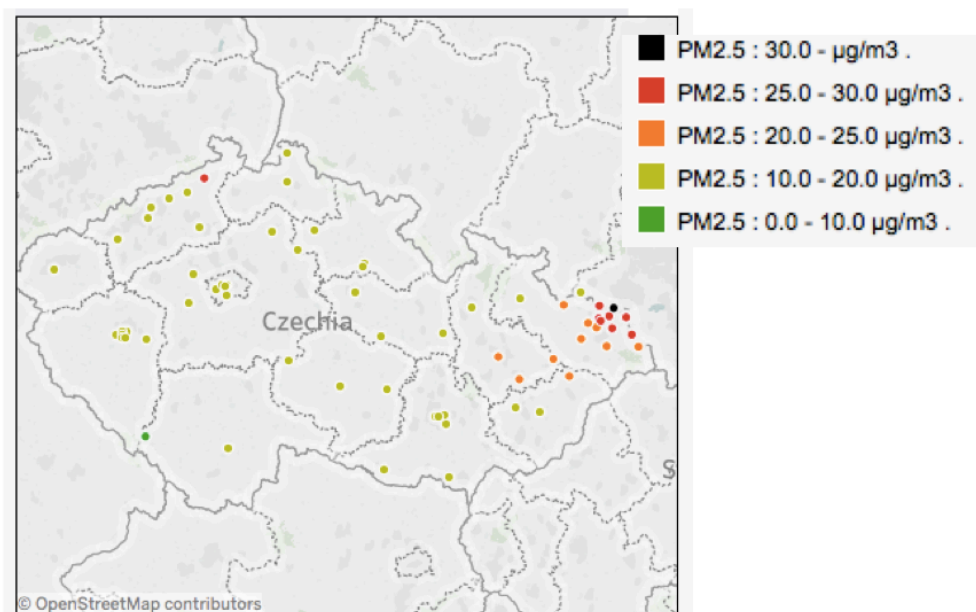
TZL mohou kromě prostředí a lidského zdraví poškozovat i majetek, včetně kulturně důležitých objektů. [21]

2.2.2 Znečištění TZL v Evropě a České republice

Následující dva obrázky ukazují hustotu koncentrací PM₁₀ a PM_{2,5} z roku 2016 v České republice. Lze vidět, že největší denní limitní hodnoty u částic PM₁₀ byly naměřeny v Ostravě a okolí. Nepřesáhly však denní limitní hodnoty určené EU. Ostrava a okolí ale přesáhla roční limitní hodnotu EU koncentrace PM_{2,5}.

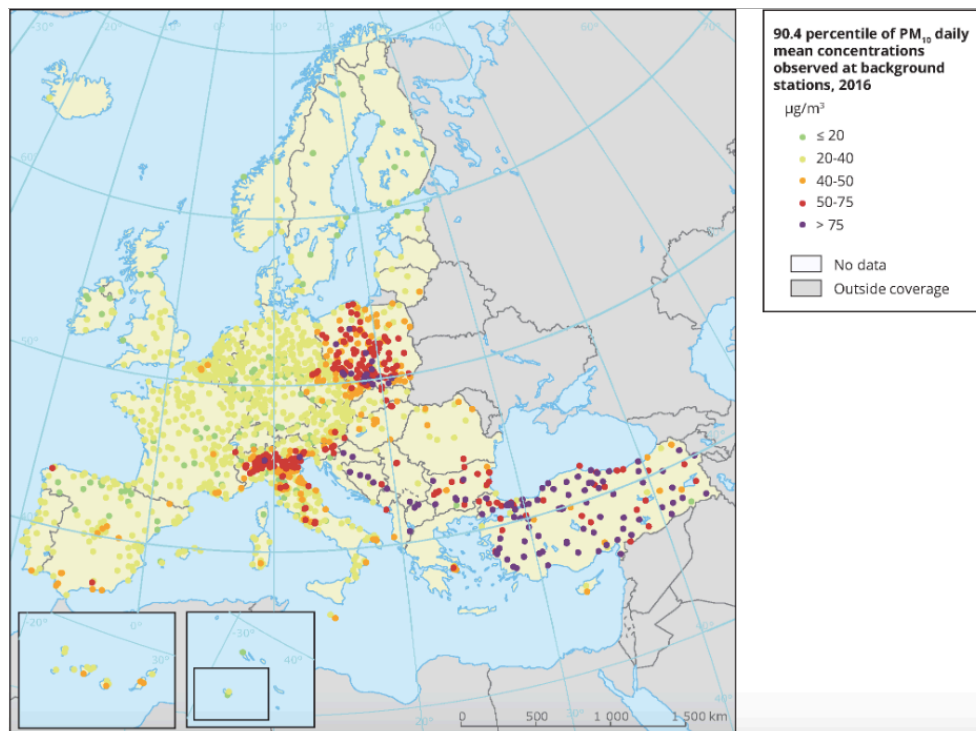


Obrázek 3: Koncentrace PM₁₀ v České republice, průměrné hodnoty z roku 2016 porovnané vzhledem k EU denní limitní hodnotě ($50 \mu\text{m}^3$) [24]

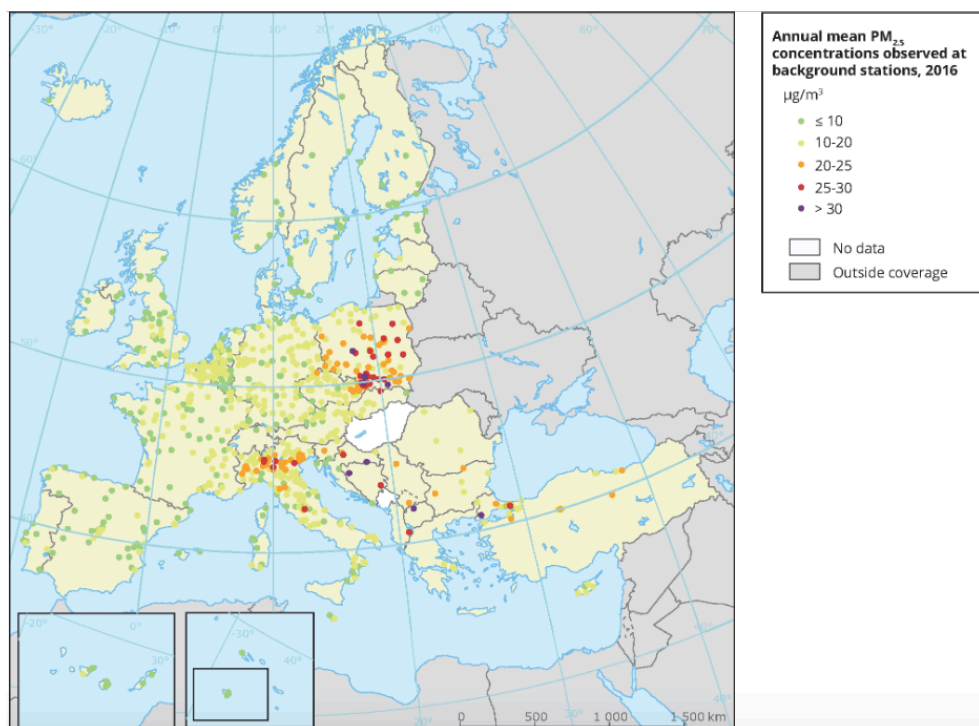


Obrázek 4: Koncentrace PM_{2,5} v České republice, průměrné hodnoty z roku 2016 porovnané vzhledem k EU roční limitní hodnotě ($25 \mu\text{m}^3$) [24]

Následující dva obrázky ukazují ty samé údaje, průměrné denní limity koncentrace PM10 a průměrnou roční koncentraci PM2,5 v rámci Evropy. Je zajímavé pozorovat, že střední, západní a severní Evropa včetně České republiky má tyto koncentrace velice nízké, zatímco státy východní Evropy a Itálie dosahují podstatně vyšších koncentrací.



Obrázek 5: Průměrné denní koncentrace PM10 pozorované v roce 2016 [25]



Obrázek 6: Průměrné roční koncentrace PM2.5 pozorované v roce 2016 [26]

3 PALIVOVÁ LABORATOŘ

V rámci praktické části bakalářské práce, která se zabývala spalováním palivového dřeva a dvou druhů briket, bylo potřeba získat a ověřit určité údaje materiálů. Proto se v palivové laboratoři měřila vlhkost, popeloviny a spalné teplo kusového dřeva (buk), dvou dřevěných briket a nočních briket, které byly vyrobeny z kůry. U briket byly navíc tyto údaje uvedené na obalu, takže bylo možné porovnat udávané údaje s těmi naměřenými v palivové laboratoři.

▪ Noční briketa

Jedna noční briketa vážila okolo $2 \text{ kg} \pm 5 \%$, dle údajů na obale se jednalo o briketu ideální pro noční topení s dobou žhnutí 8-10 hodin vyrobené z čistě vyprané stromové kůry bez pojiv a příměsí. Obal dále udával množství zbytkového popela 3,7 % výhřevnost 18,4 MJ/kg.



Obrázek 7: Noční briketa

▪ Briketa HARD TOP

Dle údajů na obalu se jedná o brikety o hmotnosti $2 \text{ kg} \pm 5 \%$, ideální pro udržení teploty. Vyrobeny jsou z čistých hoblin bez pojiv a příměsí. Obal dále udával množství zbytkového popela 0,35 % výhřevnost 18,7 MJ/kg.



Obrázek 8: Briketa HARD TOP

- **Briketa TOP**

Dle údajů na obalu se jedná o brikety o hmotnosti $2 \text{ kg} \pm 5 \%$, ideální pro udržení teploty. Vyrobeny jsou z čistých hoblin bez pojiv a příměsí. Obal dále udával množství zbytkového popela 0,28 % výhřevnost 18,9 MJ/kg.



Obrázek 9: Briketa TOP

- **Štípané dřevo – buk**

Poslední palivo, které jsme zkoumali, bylo obyčejné bukové štípané dřevo.

3.1 Stanovení obsahu vody – metoda sušení v sušárně

3.1.1 Popis metody a postup

Tuto metodu popisuje norma ČSN ISO 18134 – 2 s názvem: Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda. Podstatou metody je několikahodinové sušení zkušebního podílu tuhého biopaliva v sušárně ve vzduchové atmosféře při teplotě 105°C . Po dosažení konstantní hmotnosti se určí úbytek hmotnosti vzhledem k původnímu zkušebnímu vzorku, z tohoto úbytku se pak spočítá obsah vody v procentech.

Briketa se odebrala přímo z originálního balení od výrobce a do laboratoře se dopravila ve vzduchotěsném sáčku, ve kterém se následně nadrtla kladivem. Vážení proběhlo na váhách s přesností $\pm 0,01 \text{ g}$. Odebírali se tři sady vzorků po cca 300 g zkušebnímu vzorku s přesností na 0,1 g. Vzorky byly naváženy na plechy z tepelně odolného materiálu, které se také jednotlivě zvažily ještě před nabíráním vzorku.

Následně se navážené vzorky vložily do sušárny s teplotou $105 \pm 2^\circ\text{C}$ a sušily se do konstantní hmotnosti. Konstantní hmotnost je definovaná jako změna nepřevyšující 0,2 % absolutní počáteční hmotnosti zkušebnímu podílu během doby sušení 60 min. Po dosažení této hmotnosti jsme vzorky ze sušárny vytáhli a ještě horké zvažili, aby nedošlo k absorpci vzdušné vlhkosti. [30]



Obrázek 10: Sušárna Venticell

3.1.2 Naměřené hodnoty

	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]
noční briketa, vzorek 1	12,7	123,4	110,7
noční briketa, vzorek 2	11,5	121,5	110,0
noční briketa, vzorek 3	11,6	125,1	113,5
HARD TOP briketa, vzorek 4	13,0	121,9	108,9
HARD TOP briketa, vzorek 5	13,0	126,7	113,7
HARD TOP briketa, vzorek 6	12,9	126,2	113,3
TOP briketa, vzorek 7	11,7	127,0	115,3
TOP briketa, vzorek 8	12,9	133,1	120,2
TOP briketa, vzorek 9	11,4	126,7	115,3

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro stanovení vlhkosti u briket

m_1 ... hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl [g]

m_2 ... hmotnost plechu se zkušebním podílem před sušením (váženo při laboratorní teplotě) [g]

m_3 ... hmotnost plechu se zkušebním podílem po sušení (váženo, pokud je ještě teplý) [g]

M_{ar} ... obsah vody ve zkušebním podílu [%]

3.1.3 Výpočty

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

3.1.4 Výsledky

	Obsah vody M_{ar} [%]	Průměrný obsah vody M_{ar} [%]
noční briketa, vzorek 1	10,828	10,77
noční briketa, vzorek 2	10,940	
noční briketa, vzorek 3	10,536	
HARD TOP briketa, vzorek 4	6,893	6,81
HARD TOP briketa, vzorek 5	6,759	
HARD TOP briketa, vzorek 6	6,778	
TOP briketa, vzorek 7	9,991	10,00
TOP briketa, vzorek 8	10,134	
TOP briketa, vzorek 9	9,887	
Štípané dřevo, vzorek 10	5,865	5,96
Štípané dřevo, vzorek 11	6,013	
Štípané dřevo, vzorek 12	6,001	

Tabulka 2: Výsledný obsah vody u briket

Z tabulky vyplývá, že nejnižší procento vlhkosti bylo naměřeno u štípaného dřeva. Největší vlhkost vykazuje noční briketa, která je vyrobena z kůry, což je logické. Obsah vody bohužel etikety briket neudávaly, takže není s čím naměřené hodnoty srovnat.

3.1.5 Stanovení vlhkosti u štípaného dřeva

Předchozí metoda se provedla pouze u briket. U štípaného dřeva se vyzkoušel jiný postup. Navázilo se kolem 10 g dřevní štěpky a spustil se přístroj Kern, který nám procentuální vlhkost přímo počítal.

Surové dřevo [g]	Sušina [g]	Vlhkost (%)
10,758	10,127	5,865
9,663	9,082	6,013
12,881	12,108	6,001

Tabulka 3: Naměřené hodnoty a výsledná vlhkost u dřeva



Obrázek 11: Kern při stanovování vlhkosti u štípaného dřeva

3.2 STANOVENÍ POPELOVIN

3.2.1 Popis metody a postup

Nadrcený materiál se navážil na analytických vahách do dvou vzorků po cca 10 g. Dále se materiál vložil do chladné pece a zahřival se podle teplotního programu. Nejdříve se teplota pece zvyšuje rovnoměrně na 250 °C po dobu 30 – 50 minut (rychlost zahřívání v této době je 4,5 – 7,5 °C/min). Na této teplotě poté program setrvá jednu hodinu, během které se ze zkušební podílu uvolní těkavé látky. Poté následuje nárůst teploty na cca 550 °C během 30 minut (rychlost zahřívání 10 °C/min). Na této teplotě pak setrvá další dvě hodiny.

Pak následuje asi 6 hodin žihání. Poté se vzorky vyjmou z pece, nechají 5 – 10 minut ochladit a vloží se do exsikátoru. Po dosažení laboratorní teploty se kelímek s popelem zváží s přesností na 0,1 mg a hmotnost se zaznamená. Z této hodnoty, hmotnosti kelímku a hmotnosti zkušební podílu s kelímkem poté pomocí vzorce spočítáme obsah popelovin ve vzorku. [30]



Obrázek 12: Pec s teplotním programem pro určení obsahu popelovin

3.2.2 Naměřené hodnoty

	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]
noční briketa, vzorek 1	49,576	64,625	50,993
noční briketa, vzorek 2	47,914	64,806	49,666
noční briketa, vzorek 3	43,258	59,112	44,558
HARD TOP briketa, vzorek 4	49,663	62,078	49,724
HARD TOP briketa, vzorek 5	45,299	63,613	45,384
HARD TOP briketa, vzorek 6	55,468	66,374	55,512
TOP briketa, vzorek 7	41,863	48,677	41,900
TOP briketa, vzorek 8	56,541	61,299	56,570
TOP briketa, vzorek 9	45,312	55,488	45,370
Štípané dřevo, vzorek 10	40,414	48,282	40,469
Štípané dřevo, vzorek 11	44,348	53,830	44,414
Štípané dřevo, vzorek 12	43,987	50,420	44,027

Tabulka 4: Naměřené hodnoty pro výpočet obsahu popelovin

m_1 ... hmotnost prázdného kelímku [g]

m_2 ... hmotnost kelímku se zkušebním podílem [g]

m_3 ... hmotnost kelímku s popelem [g]

M_{ar} ... obsah vody ve zkušebním podílu použitým ke stanovení [%]

A_d ... obsah popela v bezvodém stavu vyjádřený jako hmotnostní zlomek [%]

3.2.3 Výpočet

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ar}}$$

3.2.4 Výsledky

	A_d [%]	Průměr A_d [%]
noční briketa, vzorek 1	10,559	10,458
noční briketa, vzorek 2	11,649	
noční briketa, vzorek 3	9,167	
HARD TOP briketa, vzorek 4	0,528	0,483
HARD TOP briketa, vzorek 5	0,497	
HARD TOP briketa, vzorek 6	0,424	
TOP briketa, vzorek 7	0,610	0,636
TOP briketa, vzorek 8	0,669	
TOP briketa, vzorek 9	0,628	
štípané dřevo, vzorek 10	0,713	0,704
štípané dřevo, vzorek 11	0,739	
štípané dřevo, vzorek 12	0,658	

Tabulka 5: Výsledný obsah popelovin

Obal noční brikety sliboval zbytkový podíl popelovin 3,7 %, průměrný výsledek našeho měření ale zjistil hodnotu 10,46 %.

Brikety HARD TOP měly obsahovat 0,34 % zbytkového popela, nám vyšla průměrná hodnota 0,48 %.

Údaje na obalu brikety TOP udávaly 0,28 % zbytkového popela, my jsme naměřili výsledek 0,64 %.

Štípané dřevo obsahovalo 0,7 % zbytkového popela, takže jsme alespoň potvrdili, že v tomto ohledu mají brikety HARD TOP a TOP lepší kvalitu.

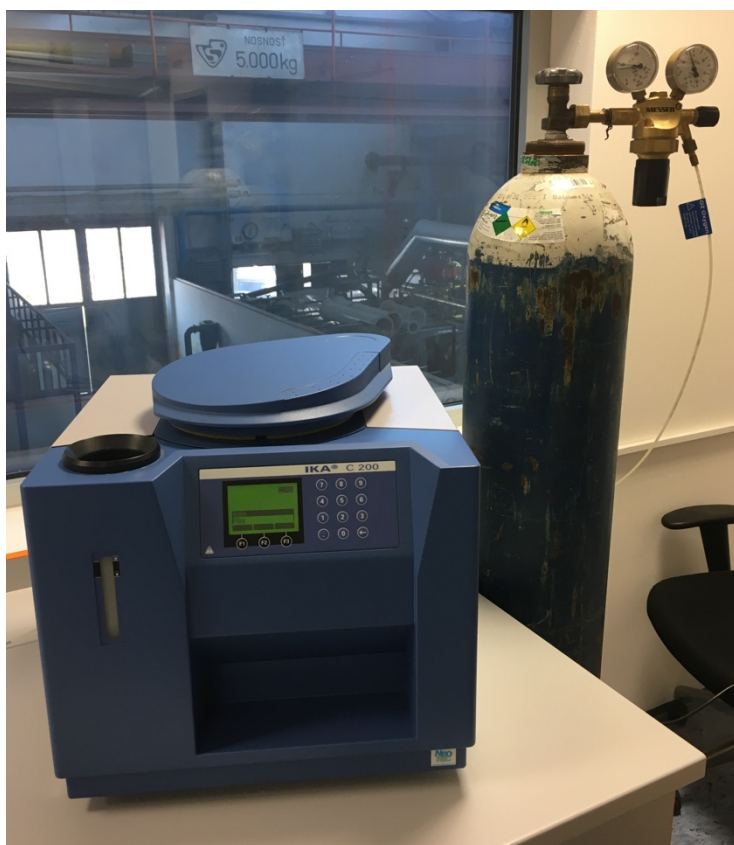
3.3 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti

3.3.1 Popis metody a postup

Stanovení spalného tepla je nezbytný krok pro určení výhřevnosti materiálu. Spalné teplo definuje množství tepla, uvolněné úplným spálením paliva v kalorimetrické tlakové nádobě v prostředí stlačeného kyslíku při teplotě 25 °C, vztažené na jednotku jeho hmotnosti. Výhřevnost je pak spalné teplo, zmenšené o výparné teplo vody, vzniklé z paliva během hoření.

Zkouška se provádí na poloautomatickém kalorimetru IKA C 200. Nejdřív bylo potřeba vybrat vzorek s hmotností kolem 1 g a tu zaznamenat, protože se později zadávala do kalorimetru. Takto připravená navážka se vložila do spalovací misky, na zapalovací drátek (pevná součást kalorimetrické tlakové nádoby) se připevnila zapalovací bavlněná nitka tak, aby mohla vzorek zapálit.

Do kalorimetrické nádoby se nalil cca 1 dcl vody o laboratorní teplotě, následně se nádoba uzavřela šroubovací maticí a naplnila kyslíkem na přetlak 2,5 až 3,5 MPa – na plnicí stanici byl potřebný tlak již nastaven. Poté se na víko nádoby nasunul zapalovací adaptér a nádoba se vložila do kalorimetru do definované pozice. Do zásobníku kalorimetru se před měřením nalilo asi 2 l vody, která měla být o 0,5 – 1,5 °C nižší než teplota vody v plášti kalorimetrické nádoby. Přesné množství vody do kalorimetrické nádoby na začátku měření si kalorimetr nadávkoval automaticky.



Obrázek 13: Kalorimetr IKA C 200 a kalorimetrická tlaková nádoba při tlakování

Po sestavení kalorimetru a jeho naplnění vodou se přístroj uzavřel víkem. Nastavila se na něm váha zkušební vzorku a odsouhlasilo se, že je zásobník naplněný vodou a je uzavřené víko. Poté se přístroj spustil. Po několik minutách, během kterých měřil, při jaké teplotě se vzorek zapálí a shoří, nám dal výsledek v podobě spalného tepla.

Poté se se zvednutím víka začala vypouštět voda z kalorimetrické nádoby do sběrné nádoby, pak se vyjmula tlaková nádoba a uvolnil přetlak. Po odšroubování matice a rozebrání tlakové nádoby se kontroloval vnitřek, zda vzorek dokonale shořel. Pokud ano, výsledek byl platný. Pro každý materiál jsme provedli dvě platná měření.

Noční briketa byla kvůli homogenizaci namleta na mlýnu FRITSCH PULVERISETE 14, znovu se vytvořili pelety na lisu BRIO BSL-2 a pak se teprve určovalo spalné teplo. [30]

3.3.2 Výpočet výhřevnosti

$$Q_i^r = Q_s - r(W^r + 8,94 H_2)$$

Q_i^r ... výhřevnost [J/g]

Q_s ... spalné teplo [J/g]

r ... koeficient odpovídající hodnotě 24,42; odpovídá 1 % vody ve vzorku při teplotě 25 °C [J/g]

W^r ... obsah vody v analytickém vzorku [%]

8,94 ... koeficient pro přepočítání vodíku na vodu [-]

H_2 ... obsah vodíku v analytickém vzorku [%] [28]

3.3.3 Naměřené hodnoty a výsledky

	m [g]	Q_s [MJ/kg]	H_2 [%]	Q_i^r [MJ/kg]	Průměr Q_i^r [MJ/kg]
noční vzorek 1	0,8742	18,528	5,69	17,015	16,98
noční vzorek 2	0,8886	18,45	5,69	16,937	
HARD TOP vzorek 3	0,6386	18,393	6,6	16,943	16,86
HARD TOP vzorek 4	0,559	18,234	6,6	16,784	
TOP vzorek 5	0,546	18,414	6,6	16,964	16,97
TOP vzorek 6	0,645	18,423	6,6	16,973	
dřevo vzorek 7	0,4283	18,555	6	17,237	17,24
dřevo vzorek 8	0,4396	18,556	6	17,238	

Tabulka 6: Naměřené hodnoty spalného tepla pro určení výhřevnosti

Za základě informací na etiketách briket bylo očekáváno, že největší výhřevnost bude naměřena u brikety TOP. Vzhledem k tomu, že její výhřevnost vyšla téměř stejně jako u noční brikety, a briketa HARD TOP se také příliš neliší, nevidím smysl v porovnání těchto hodnot. Zajímavé je, že největší výhřevnost vykazuje palivové dřevo.

4 ZÁVISLOST TVORBY TZL NA VLASTNOSTECH BIOMASY

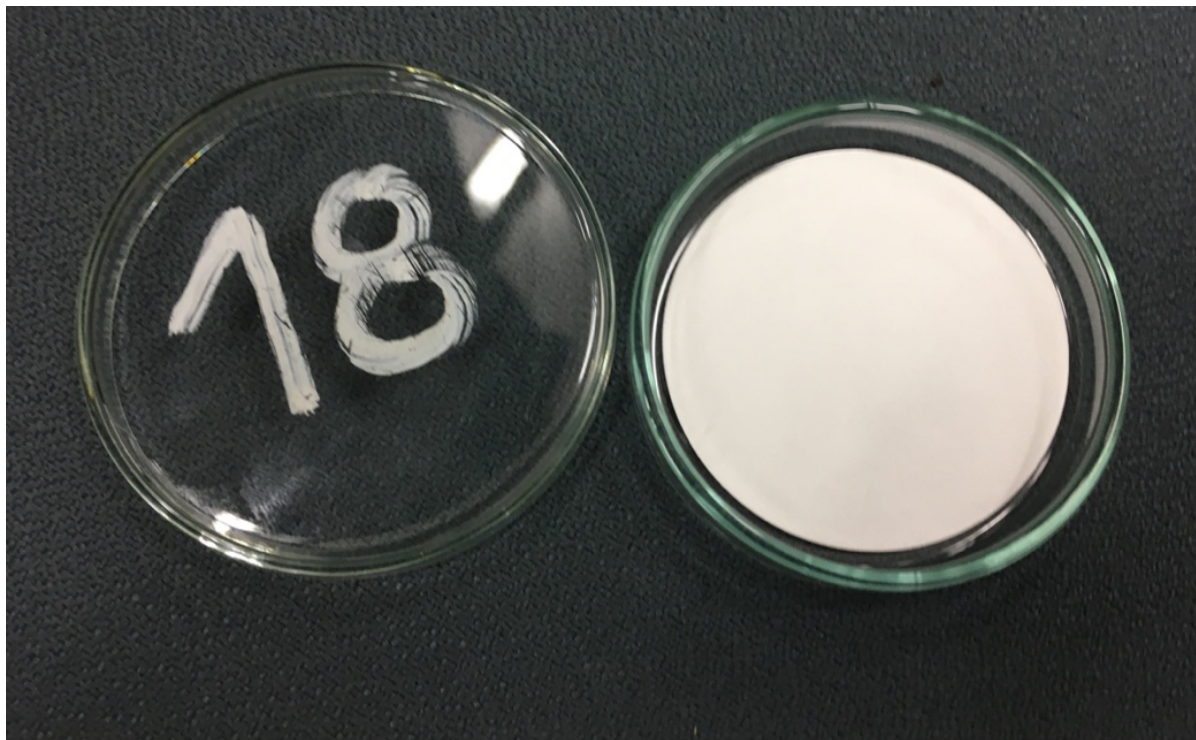
Zadáním experimentu bylo zkoumání závislosti tvorby tuhých znečišťujících látek na vlastnostech biomasy, zejména na formě zpracování paliva. Jelikož se palivo spalovalo na obyčejné krbové vložce, nevhodné pro pelety, zkoumali jsme pouze štípané dříví (buk) a dva druhy briket. Jedna briketa byla vyrobena z čistých hoblin bez pojiv a příměsí, druhá, noční briketa pak ze stromové kůry bez pojiv a příměsí. Měření probíhalo u každého vzorku dvakrát na normální režim a pak dvakrát na noční režim. Tyto režimy takto pracovním pojmenovali sami, rozdíl byl v délce spalování dané hmotnosti paliva a v přístupu vzduchu. Na denní režim bylo spalováno palivo 45 minut a na noční 90 minut za sníženého přívodu vzduchu.

Princip měření TZL byl v podstatě velmi jednoduchý – množství pevných částic ve spalinách se zjistilo pomocí filtrů, které byly umístěny do sběrného zařízení vždy na 30 minut během spalování paliva.

Experiment byl prováděn ve výzkumné laboratoři NETME Energetického ústavu na Fakultě strojního inženýrství.

4.1 Příprava vzorku

Filtrační papíry se před použitím musely připravit. Měli jsme jich potřebovat 12, ale počítali jsme i s neúspěšnými pokusy a připravovali jsme jich 18. V uzavřených skleněných Petriho miskách jsme je nejdříve žihali – to znamená sušení v peci Venticell při 110 °C alespoň 1 hodinu.



Obrázek 14: Filtr v Petriho misce



Obrázek 15: Pec Venticell

Poté, co se žiháním zbavily vlhkosti, jsme filtry vložili do exsikátoru, aby vychladly a nenasály vzdušnou vlhkost. Asi po třech hodinách plně vychladly a zvažily se na laboratorní váze Denver Instrument SI-234. Naměřené hmotnosti jsme si zaznamenali do tabulky a filtrační papíry byly připraveny k pokusu.



Obrázek 16: Exsikátor



Obrázek 17: Laboratorní váha

4.2 Popis experimentu

Nejdříve proběhlo sestavení měřícího zařízení, jehož hlavní součásti byly: krbová vložka STEKO Venus 12.1 s výkonem 8 kW, sběrné zařízení, výměník pro chlazení proudu spalin a soustava pro měření objemového průtoku plynu.

Po sestavení měřícího zařízení se roztopila krbová vložka, odstranil se přebytečný popel z ohniště a vložilo se spočítané množství paliva pro experiment, a to takové, aby vydrželo hořet 45 minut. U nočního režimu bylo stejné množství paliva použito na 90 minut. Během devadesátiminutového nočního režimu se TZL odebírali rovnou dvakrát. Každé odebrání trvalo 30 minut.

Potřebná hmotnost paliva pro experiment byla spočítána podle následujícího vzorce, kde se za výkon krbové vložky dosadila hodnota 8 kW a za odhadovanou účinnost 80 %. Za výhřevnost materiálu se dosadily hodnoty udávané na obalu briket a pro dřevo 16,5 MJ/kg.

$$m_p = \frac{P}{\eta \cdot Q_i^r}$$

m_p ... hmotnost paliva [kg]

P ... výkon krbové vložky [W]

η ... odhadovaná účinnost [-]

Q_i^r ... výhřevnost paliva [J/kg]

- **Normální režim**

V tomto režimu byl nastaven přístup vzduchu tak, aby palivo dobře hořelo celých 45 minut. Pro tento čas bylo také spočítáno vhodné množství paliva.

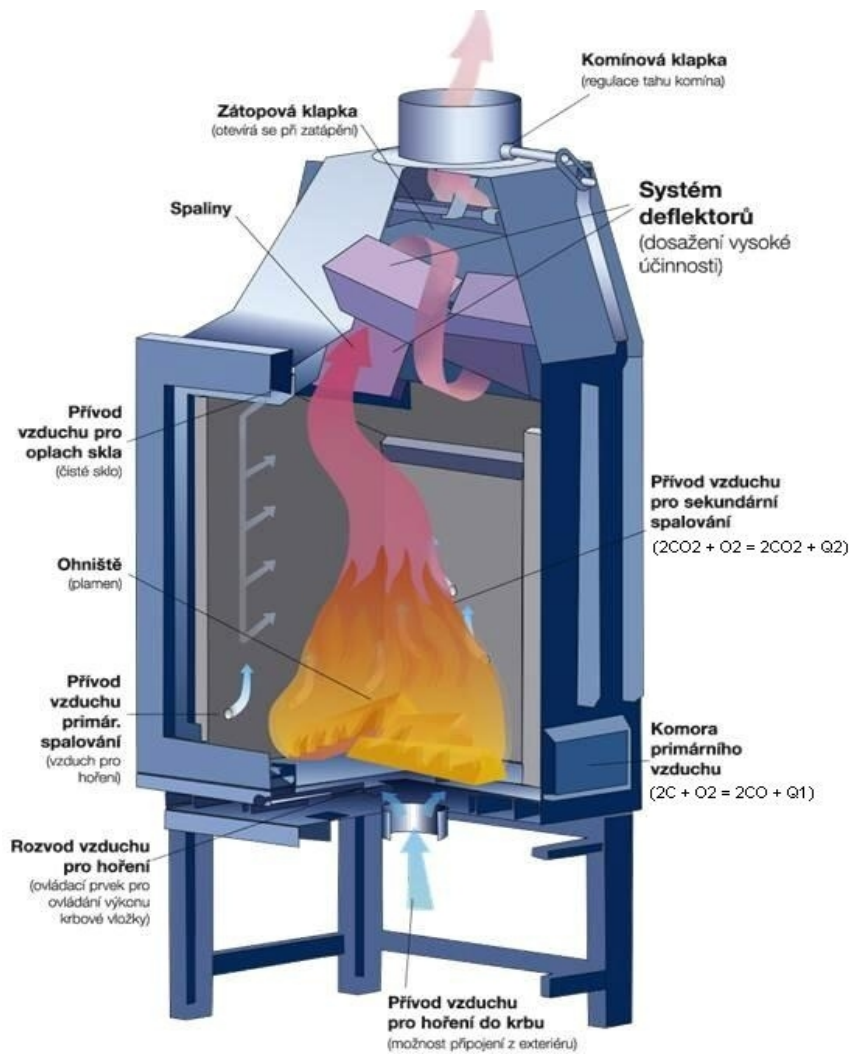
- **Noční režim**

Hmotnost paliva zůstala stejná, ale prodloužil se čas hoření na dvojnásobek, tedy na 90 minut. Podle toho byl také omezen přísun vzduchu, aby palivo vydrželo tuto dobu hořet.

Asi po deseti minutách od přiložení měřeného paliva do krbu byl vložen filtr do sběrného zařízení. Po 30 minutách se opatrně vyjmul a uložil zpět do Petriho misky. Jakmile se provedly všechny měření se všemi druhy paliva, filtry se opět vyžíhaly a nechaly vychladnout. Poté se opět zvažily a zaznamenala se jejich hmotnost.



Obrázek 18: Měřicí zařízení, krbová vložka, sběrné zařízení a výměník (vlevo)



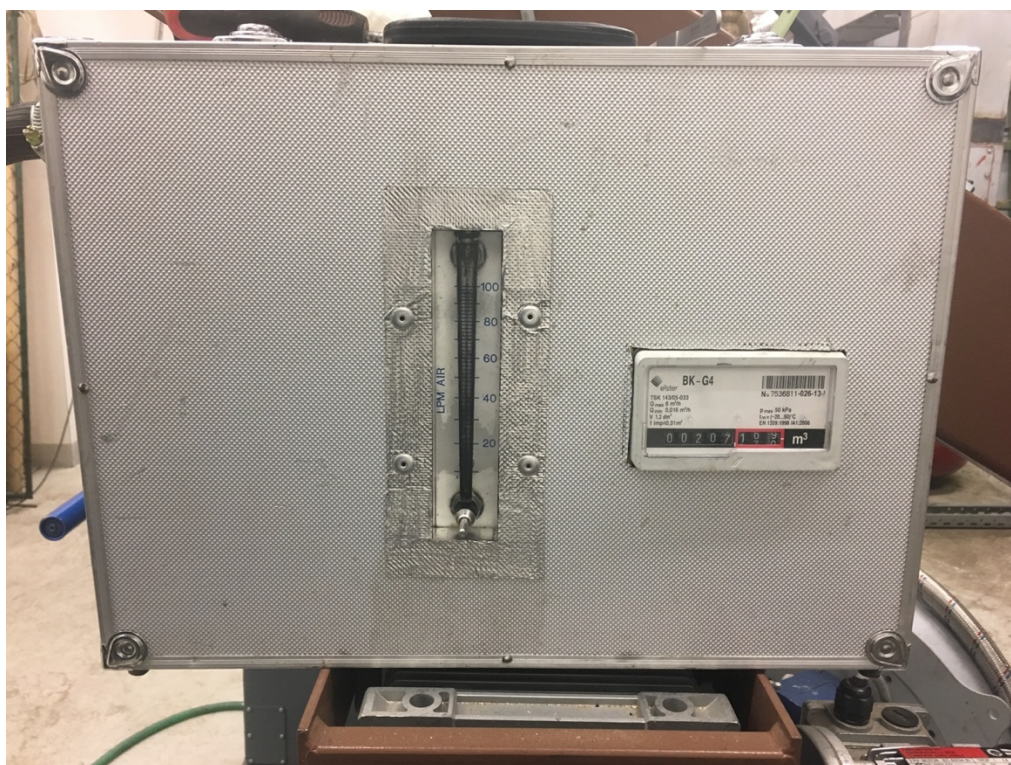
Obrázek 19: krbová vložka STEKO Venus 12.1 s výkonem 8 kW



Obrázek 20: Štítek krbové vložky



Obrázek 21: Sběrné zařízení



Obrázek 22: Soustava pro měření objemového průtoku plynu

4.3 Naměřené hodnoty

Následující tabulka obsahuje časy podpalu, hmotnost přiloženého paliva, čas začátku a konce měření a počáteční a konečný stav plynoměru. Poslední sloupec pak značí, že při měření vzorku 10 nebylo zapnuto proudění spalin přes sběrné zařízení, takže nebyly odebrané TZL. Při měření vzorku 14 palivo vyhaslo předčasně a měření bylo ukončeno dříve.

vzorek	režim	t_p [h:min]	m_p [kg]	t_1 [h:min]	V_1 [m ³]	t_2 [h:min]	V_2 [m ³]	pozn.
štípané dřevo 1	denní	11:47	1,56	11:50	730	12:20	104	
štípané dřevo 2		12:32	1,72	12:40	104	13:10	531	
štípané dřevo 3		14:16	1,56	14:30	531	15:00	87	
štípané dřevo 4	noční	15:05	1,64	15:20	87	15:50	508	
štípané dřevo 5				16:00	508	16:30	852	
briketa HARD TOP 6	denní	11:15	1,46	11:30	852	12:00	200	
briketa HARD TOP 8		13:20	1,44	13:27	373	13:57	787	
briketa HARD TOP 9	noční	15:38	1,46	15:48	787	16:18	193	
briketa HARD TOP 10				16:28	193	16:58	332	nezapnut
noční briketa 11	denní	10:25	1,48	10:30	353	11:00	617	
noční briketa 12		11:45	1,48	11:50	617	12:20	75	
noční briketa 15		15:24	1,48	15:30	708	16:00	920	
noční briketa 13	noční	13:18	1,44	13:30	75	14:00	510	
noční briketa 14				14:10	510	14:27	708	vyhaslo

Tabulka 7: Zaznamenané hodnoty při odebrání TZL

t_p ... čas podpalu

m_p ... hmotnost paliva

t_1 ... čas začátku měření, umístění filtru

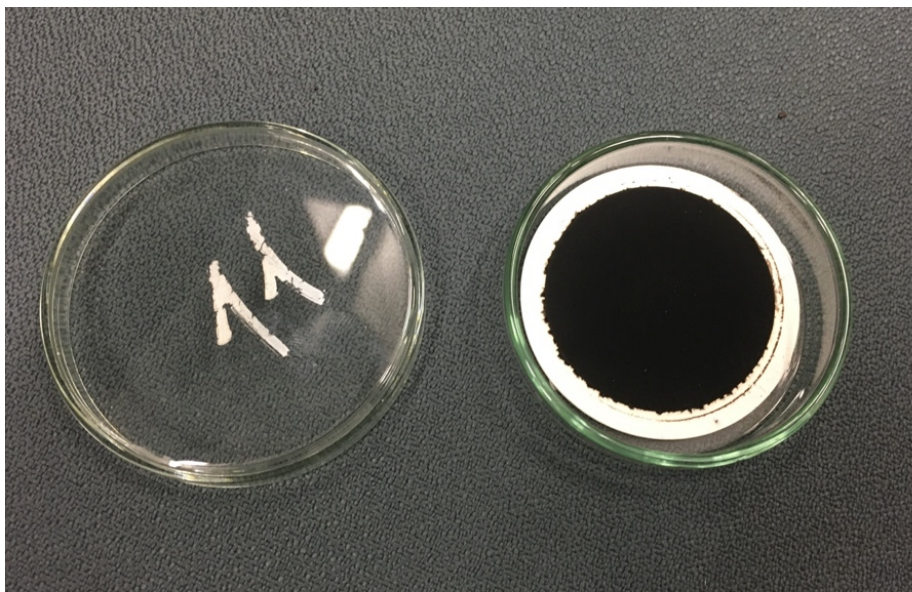
t_2 ... čas konce měření, odebrání filtru

V_1 ... počáteční stav plynoměru

V_2 ... konečný stav plynoměru

4.4 Vyhodnocení výsledků experimentu

Pro odpovídající výsledky experimentu muselo být splněno několik podmínek. Především bylo potřeba dosáhnout před každým měřením stejné teploty spalin, přívodu vzduchu, hmotnosti a rozložení hmoty paliva – poslední zmíněné se dalo splnit alespoň u briket, které měly všechny stejný válcový tvar. Také bylo potřeba hlídat průtok hadicí, ve které se tuhé částice odebíraly. Ne vždy se všechny podmínky povedlo dodržet, zvlášť když palivo předčasně vyhaslo. Přesto výsledky experimentu potvrdili některé naše předpoklady.



Obrázek 23: Odebrané TZL na filtru



Obrázek 24: Vážení filtru s odebranými TZL

Následující tabulka obsahuje hmotnosti vyžíhaných filtrů před a po odebrání tuhých znečišťujících látek při denním a nočním spalovacím režimu. Je v ní také zaznamenaná výsledná hmotnost TZL a celkový průtok spalin při každém měření. Poslední sloupec vyjadřuje hmotnostní koncentraci TZL ve spalinách, spočítanou podle následujícího vzorce, ale převedenou na $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pro lepší názornost.

$$c_{real} = \frac{m_v}{V_c}$$

vzorek	režim	m_1 [g]	m_2 [g]	m_v [g]	V_c [m ³]	c_{real} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
štípané dřevo 1	denní	33,5853	33,6145	0,0292	374	78,075
štípané dřevo 2		33,8763	33,8980	0,0217	427	50,820
štípané dřevo 3		33,5438	33,5607	0,0169	556	30,396
štípané dřevo 4	noční	33,7033	33,8527	0,1494	421	354,869
štípané dřevo 5		35,8655	36,1193	0,2538	344	737,791
briketa HARD TOP 6	denní	35,8611	35,8671	0,0060	348	17,241
briketa HARD TOP 8		34,1567	34,1654	0,0087	414	21,014
briketa HARD TOP 9	noční	34,0554	34,0638	0,0084	406	20,690
briketa HARD TOP 10		34,2967			139	
noční briketa 11	denní	35,4217	35,5879	0,1662	264	629,545
noční briketa 12		34,3344	34,5853	0,2509	458	547,817
noční briketa 15		35,8681	35,9180	0,0299	212	235,377
noční briketa 13	noční	34,1543	34,4102	0,2559	435	588,276
noční briketa 14		34,6364	34,6962	0,0322	198	302,020

Tabulka 8: Zaznamenané hmotnosti filtrů před a po odebrání TZL, výsledná hmotnost TZL

m_1 ... hmotnost vyžíhaného filtru s petriho miskou [g]

m_2 ... hmotnost filtru s TZL [g]

m_v ... výsledná hmotnost TZL [g]

c_{real} ... hmotnostní koncentrace TZL [g/m^3]

V_c ... objem vlhkého vzorku plynu za provozních podmínek [m^3]

Jak je uvedeno v tabulce 1, při měření vzorku 15 oheň vyhasnul a odebrání TZL bylo ukončeno předčasně. Při měření vzorku 10 bohužel nebylo zapnuto proudění spalin přes sběrné zařízení, takže nebyl získán žádný výsledek.

U štípaného dřeva výsledky vypadají reprezentativně, při denním režimu jsme naměřili výrazně nižší koncentrace než při nočním režimu.

Zjištěné hmotnostní koncentrace u briket HARD TOP jsou velice podobné, bohužel se nepovedl druhý odběr TZL při nočním režimu. Každopádně koncentrace jsou nižší než u štípaného dřeva a nočních briket.

Hmotnostní koncentrace TZL u nočních briket, vyrobených z kůry, v průměru dosahují nejvyšších čísel a to hned několikanásobně. Tento výsledek jsme očekávali.

4.4.1 Hodnoty pro referenční obsah kyslíku

Reálné koncentrace bylo potřeba přepočítat na hodnoty koncentrací pro referenční obsah kyslíku (10 %). Tento výpočet byl proveden dle následujícího vzorce:

$$c_{ref} = c_{real} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2real}} \quad [31]$$

c_{ref} ... referenční hodnota koncentrace TZL

O_{2ref} ... referenční obsah kyslíku (10 %)

O_{2real} ... reálný obsah kyslíku, jeho aritmetický průměr z hodnot, které byly měřeny každou sekundu během odebrání TZL

21 ... konstanta reprezentující procentuální podíl kyslíku v atmosféře

vzorek	režim	O_{2ref} [%]	O_{2real} [%]	c_{ref} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
štípané dřevo 1	denní	10	9,134	72,377
štípané dřevo 2		10	8,789	45,778
štípané dřevo 3		10	10,435	31,646
štípané dřevo 4	noční	10	13,435	515,989
štípané dřevo 5		10	16,646	1863,861
briketa HARD TOP 6	denní	10	12,830	23,212
briketa HARD TOP 8		10	13,870	32,420
briketa HARD TOP 9	noční	10	10,903	22,540
briketa HARD TOP 10		10		
noční briketa 11	denní	10	13,850	968,581
noční briketa 12		10	17,593	1768,614
noční briketa 15		10	17,562	2102,785
noční briketa 13	noční	10	16,111	679,593
noční briketa 14		10	16,976	643,429

Tabulka 9: Tabulka výpočtu referenční hodnoty koncentrace TZL

Výsledné koncentrace TZL ve spalinách pro referenční obsah kyslíku se příliš neliší od hodnot v tabulce 9, kde nebyl vliv obsahu kyslíku zahrnut. U štípaného dřeva je stále pozorovatelné řádové zvýšení hodnot koncentrací při nočním režimu. Briketa HARD TOP se zdá nejekologičtější z možností, díky naprosto nejmenším koncentracím TZL. Zatímco noční briketa se zdá být volbou nejhorší s naprosto nejvyššími hodnotami koncentrací TZL ve spalinách.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zkoumat závislost tvorby tuhých znečišťujících látek na formě a složení biomasy. Než byl tento experiment proveden, bylo zapotřebí věnovat se teoretickým částem práce. Proto byl nejdříve vysvětlen pojem biomasa a její rozdělení ze dvou hledisek, z energetického a dle zdrojů a původu biopaliva. V rámci části věnované biomase byly popsány i formy paliva, především výhody a nevýhody pelet, briket a štípaného dřeva.

Rešeršní část pokračovala kapitolou o znečišťujících látkách, kde jsou všechny jmenovány a stručně popsány. Jednalo se o oxid siřičitý, oxidy dusíku, přízemní ozon, polycyklické aromatické uhlovodíky, oxid uhelnatý, dioxiny, polychlorované bifenyly a TZL. Největší prostor byl věnován vzhledem k zadání právě poslednímu jmenovanému, bylo popsáno nebezpečí TZL vzhledem ke klimatu a zdraví člověka. Dále kapitola o TZL obsahuje obrázky s koncentracemi znečištění těmito látkami v roce 2016 v rámci České republiky a Evropy.

Více prostoru bylo pak věnované praktické části. Začíná v palivové laboratoři, kde se určoval obsah popelovin, vlhkosti a výhřevnost tří druhů briket a štípaného dřeva.

Co se týká obsahu vlhkosti a popelovin, skončila na posledním místě noční briketa. Výhřevnosti vyšly u všech vzorků velice podobně, nemá tedy smysl je porovnávat.

Dle etikety na obalu briket HARD TOP a TOP měly mít obě stejné složení. Přesto byly naměřeny rozdílné hodnoty obsahu vlhkosti, u brikety HARD TOP to bylo 6,8 % a u brikety TOP 10 %. Briketa TOP obsahovala i větší procento vlhkosti než briketa HARD TOP. Pokud by byly obě brikety za stejnou cenu, bylo by vhodnější spalovat briketu HARD TOP.

Pro srovnání byla provedena tato měření i u štípaného dřeva. To obsahovalo nejnižší procento vlhkosti, ale hned po noční briketě také největší obsah popelovin.

Poslední část se konečně věnuje měření TZL ve spalinách, což bylo cílem bakalářské práce. Výsledné koncentrace jsou vypočteny vzhledem k referenční hodnotě kyslíku 10 %. U štípaného dřeva lze pozorovat rozdíly mezi normálním a nočním režimem, koncentrace pro noční režim jsou několikanásobně vyšší. Briketa HARD TOP překvapila výrazně nižšími koncentracemi TZL než ostatní vzorky. Nejhůře měření dopadlo dle předpokladu pro noční briketu, jejíž koncentrace dosahují nejvyšších hodnot.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [2] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [4] PETŘÍKOVÁ, Vlasta: Biomasa z energetických rostlin. *Biom.cz* [online]. 2006-04-19 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-z-energetickych-rostlin>>. ISSN: 1801-2655.
- [5] *Jaký je rozdíl mezi dřevěnou briketou a peletou* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/uspora-energie/jak-na-usporne-vytapeni/jaky-je-rozdil-mezi-drevenou-briketou-a-peletou>
- [6] Zákon č. 201/2012 Sb.: O ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 2012. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/Z%20201_2012.pdf
- [7] *Látky znečišťující ovzduší* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://arnika.org/látky-znečišťující-ovzduší>
- [8] *Oxid siřičitý* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=129>
- [9] *Oxidy síry* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxidy-siry>
- [10] *Oxidy dusíku* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxidy-dusiku>
- [11] *Oxidy dusíku* [online]. [cit. 2019-04-112]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=130>
- [13] BRZEZINA, Jáchym. *Není ozon, jako ozon* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/08/01/neni-ozon-jako-ozon/>
- [14] *Polycyklické aromatické uhlovodíky: PAHs* [online]. [cit. 2019-4-12]. Dostupné z: <https://arnika.org/polycyklicke-aromaticke-uhlovodiky-pahs>
- [15] *Polycyklické aromatické uhlovodíky* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/76519.aspx>
- [16] *Oxid uhelnatý* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=168>

- [17] *Oxid uhelnatý* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxid-uhelnaty>
- [18] *Dioxiny* [online]. In: . [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://arnika.org/dioxiny-pcdd-pcdf>
- [19] *Polychlorované bifenyly* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://arnika.org/polychlorovane-bifenyly-pcb>
- [20] *Particulate Matter (PM) basics* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [21] *Health and Environmental Effects of Particulate Matter* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- [22] *Přirozené znečištění ovzduší* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=55071
- [23] *KVALITA OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICE: SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/IV1_PM_CZ.html
- [24] *Air pollution in the Czech Republic* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/czech-republic>
- [25] *90.4 percentile of daily mean PM10 concentrations observed at background stations, 2016* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/90-4-percentile-of-pm10-5>
- [26] *Annual mean PM2.5 concentrations observed at background stations, 2016* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm2-5-concentration-8>
- [27] *Dřevozpracující průmysl v ČR* [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/ochrana-a-uprava-dreva/drevozpracujici-prumysl-v-cr>
- [28] *Phyllis 2* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://phyllis.nl>
- [30] konzultace a opory od Ing. Hany Lisé Ph.D
- [31] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X
- [32] *Suspended particulates: TSP/SPM* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/2-9167-057-X/page021.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A_d	obsah popela v bezvodém stavu vyjádřený jako hmotnostní zlomek	[%]
CO	oxid uhelnatý	
c_{real}	reálná hmotnostní koncentrace TZL	[g/m ³]
c_{ref}	referenční hodnota koncentrace TZL	[g/m ³]
H_2	obsah vodíku v analytickém vzorku	[%]
M_{ar}	obsah vody ve zkušebním podílu	[%]
NO_2	oxid dusičitý	
O_{2ref}	referenční obsah kyslíku (10 %)	[%]
O_{2real}	reálný obsah kyslíku, jeho aritmetický průměr z hodnot, které byly měřeny každou sekundu během odebírání TZL	[%]
O_3	přízemní ozon	
P	výkon krbové vložky	[W]
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky	
PCB	polychlorované bifenyly	
$PCDD$	dibenzo-p-dioxiny	
$PCDF$	polychlorované dibenzofurany	
PM	particulate matter	
PVC	polyvinyl chlorid	
Q_i^r	výhřevnost	[J/g]
Q_s	spalné teplo	[J/g]
r	koeficient odpovídající hodnotě 24,42; odpovídá 1 % vody ve vzorku při teplotě 25 °C	[J/g]
SO_2	oxid siřičitý	
TZL	tuhé znečišťující látky	

V_c	objem vlhkého vzorku plynu za provozních podmínek	[m ³]
VOC	těkavé organické látky - volatile organic compounds	
W^r	obsah vody v analytickém vzorku	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Klasifikační schéma dřevních paliv podle původu a zdrojů [3]	12
Obrázek 2: Klasifikační schéma bylinné biomasy [3].....	13
Obrázek 3: Koncentrace PM10 v České republice, průměrné hodnoty z roku 2016 porovnané vzhledem k EU denní limitní hodnotě ($50 \mu\text{m}^3$) [24]	20
Obrázek 4: Koncentrace PM2.5 v České republice, průměrné hodnoty z roku 2016 porovnané vzhledem k EU roční limitní hodnotě ($25 \mu\text{m}^3$) [24].....	20
Obrázek 5: Průměrné denní koncentrace PM10 pozorované v roce 2016 [25].....	21
Obrázek 6: Průměrné roční koncentrace PM2.5 pozorované v roce 2016 [26]	21
Obrázek 7: Noční briketa.....	22
Obrázek 8: Briketa HARD TOP	22
Obrázek 9: Briketa TOP	23
Obrázek 10: Sušárna Venticell	24
Obrázek 11: Kern při stanovování vlhkosti u štípaného dřeva.....	26
Obrázek 12: Pec s teplotním programem pro určení obsahu popelovin.....	27
Obrázek 13: Kalorimetr IKA C 200 a kalorimetrická tlaková nádoba při tlakování	29
Obrázek 14: Filtr v Petriho misce.....	31
Obrázek 15: Pec Venticell.....	32
Obrázek 16: Exsikátor	33
Obrázek 17: Laboratorní váha	33
Obrázek 18: Měřicí zařízení, krbová vložka, sběrné zařízení a výměník (vlevo).....	34
Obrázek 19: krbová vložka STEKO Venus 12.1 s výkonem 8 kW	35
Obrázek 20: Štítek krbové vložky	35
Obrázek 21: Sběrné zařízení.....	36
Obrázek 22: Soustava pro měření objemového průtoku plynu	36
Obrázek 23: Odebrané TZL na filtru.....	38
Obrázek 24: Vážení filtru s odebranými TZL	38

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro stanovení vlhkosti u briket	24
Tabulka 2: Výsledný obsah vody u briket.....	25
Tabulka 3: Naměřené hodnoty a výsledná vlhkost u dřeva.....	25
Tabulka 4: Naměřené hodnoty pro výpočet obsahu popelovin	27
Tabulka 5: Výsledný obsah popelovin	28
Tabulka 6: Naměřené hodnoty spalného tepla pro určení výhřevnosti	30
Tabulka 8: Zaznamenané hodnoty při odebírání TZL.....	37
Tabulka 9: Zaznamenané hmotnosti filtrů před a po odebírání TZL, výsledná hmotnost TZL	39
Tabulka 10: Tabulka výpočtu referenční hodnoty koncentrace TZL.....	40