

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV ENERGETIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF ENERGY

TAVENÍ POPELE Z BIOMASY
SINTERING OF CHAR FROM BIOMASS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VLASTIMIL HANUS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN LISÝ, PH.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vlastimil Hanus

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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 diplomové práce:

Tavení popele z biomasy

v anglickém jazyce:

Sintering of Char from Biomass

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést rešerži metod používaných ke stanovování charakteristických teplot popelovin a provést jejich experimentální srovnání.

Cíle diplomové práce:

1. Provést rešerži problematiky spékání popelovin při spalování biomasy
2. Provést rešerži metod stanovování charakteristických teplot popelovin
3. Experimentálně ověřit jednotlivé metody a vliv základních parametrů na stanovené teploty

Seznam odborné literatury:

Malat'ák, J., Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie, ČZU Praha, 2008 ISBN 978-80-213-1810-6

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

Zdroj z internetu

Normy ČSN

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt: Vlastimil Hanus: Tavení popela z biomasy. Diplomová práce magisterského studia 5. ročníku, školní rok 2009/2010, studijní skupina 5O/2. FSI VUT v Brně, Ústav energetiky, odbor Energetické inženýrství, květen 2010. Projekt vypracovaný v rámci magisterského oboru Energetické inženýrství předkládá návrh práce Tavení popela z biomasy. Náplní práce je provedení rešerše metod používaných ke stanovování charakteristických teplot popelovin. Experimentálně ověřit jednotlivé metody a vliv základních parametrů na stanovené teploty.

Abstract: Hanus Vlastimil: Melting of ashes from biomass. Diploma Thesis Masters 5th year, school year 2009/2010, the study group 5O/2 FSI VUT Brno, Department of Energy, Department of Energy Engineering, May 2010. The project developed under the Energy Master field engineering design work by Melting of ash from biomass. Job description is to undertake research of methods for determining the characteristic temperatures of ash. Experimentally verify the individual methods and the influence of basic parameters on the temperature.

Klíčová slova: teplota, tavení, spalování, prvky, rozbor

Key words: temperature, fusion, combustion, elements, analysis

Bibliografická citace mé práce:

Bc. HANUS VLASTIMIL Tavení popele z biomasy, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. Diplomová práce, 49 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

P r o h l á š e n í

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Tavení popela z jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne :

Podpis:

P o d ě k o v á n í

Děkuji tímto pánům Ing. Jiřímu Moskalíkovi a Ing . Martinu Lisému , Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. BIOMASA.....	9
2.1 Co to vlastně je?	9
2.2 Zdroje biomasy	11
2.3 Energeticky lze biomasu využít procesy:	12
2.4 Parametry biomasy jako paliva	16
3. VZNIK NÁPEKU NA ROŠTU KOTLE	19
3.1 Paliva náchylná ke vzniku nápeku	19
3.2 Charakteristika popela z biomasy	20
3.3 Prvkové složení popela při rozdílných teplotách	21
3.3.1 Zhodnocení obsahu prvků v jednotlivých palivech	27
3.3.2 Metody analýz popela.....	27
3.4 Určení teplot tání popela	28
4. ŽÁROVZDORNÉ VYZDÍVKY.....	30
4.1 Poškození vyzdívek korozí taveninou popela.....	30
4.2 Poškození vyzdívky prudkou změnou teploty	32
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
5.1 Norma ČSN ISO 540	34
5.1.1 Definice teplot	34
5.2 Příprava vzorku popela dle ČSN ISO 540	35
5.3 Přístroje a pomůcky	35
5.4 Tvar zkušebního tělesa.....	36
5.5 Protokol o zkoušce	36
5.6 Postup laboratorního ověřování	37
5.7 Některé vlastnosti zkoumaných paliv	39
5.8 vyhodnocení experimentálního měření.....	40
5.8.1 Porovnání teplot deformace při rychlostech ohřevu 5 a 20°C/min	41
5.8.2 Porovnání teplot měknutí při rychlostech ohřevu 5 a 20°C/min	42
5.8.3 Šťovík	43
5.8.4 Sláma	43
5.8.5 Dřevo	44
5.8.6 Spékání dvou vzorků popela.....	45

6. ZÁVĚR.....	45
7. LITERATURA	47
PŘÍLOHY	49

1. ÚVOD

Cílem diplomové práce je zjistit informace o vlastnostech nápeku z popelovin po spálení biomasy. Určit následný vliv na vnitřní zařízení kotle a zplyňovacích zařízení. Jako palivo berme v potaz hlavně stébelniny jako jsou sláma, len či technické konopí. Hlavní výhodou těchto rostlin je, že jsou to jedno, dvou i více leté rostliny a je to opravdu rychle rostoucí zdroj energie. V porovnání například se dřevem, kdy například olše je též řazena do skupiny rychle rostoucích. Zkoumání budou podrobeny i vzorky dřeva či šťovíku. Dalším z hledisek je teplota měknutí a tavení popele což představuje jeden z hlavních problémů, které sebou spalování biomasy přináší. Rovněž nastává otázka jaký dopad má vzniklý nápek nejen na samotné zařízení a funkčnost kotle, ale také co přináší z hlediska ekonomického. Tento problém vzniklého nápeku je rovněž otázkou pro zplyňovací zařízení, kde je biomasa též spalována. Otázka jaký je ekonomický dopadu byl vždy jednou z hlavních věcí, která provozovatele zařízení zajímá, tudíž chce těmto problémům předcházet, omezit jejich následky.

Experimentální část diplomové práce bude zahrnovat měření teplot tavení popelovin ve spalovacím zařízení a určení, jaký je vliv různých příměsí obsažených v palivu. Budeme zkoumat vliv jednotlivých experimentálních metod pohledu na samotný problém věci. Jedná se tak vlastně o navrhnutí, jak budeme teploty tavení popela zkoumat a jaké k tomu zvolíme metody. Například rychlost spalování paliva ve spalovací peci a rychlost ohřevu v pozorovací peci. Dále například výběr biopaliva vhodných parametrů, počet zkoumaných paliv a porovnání naměřených hodnot podle zvolených parametrů. Tato část by měla vést k seznámení se s metodami měření a zkoumání teplot tavení popelovin, ale i různých vlastností zkoumaných vzorků paliva. Porovnání jednotlivých parametrů získaných řadou měření, jejich početnému opakování a vyvození příslušných závěrů z měření.

2. BIOMASA

2.1 CO TO VLASTNĚ JE?

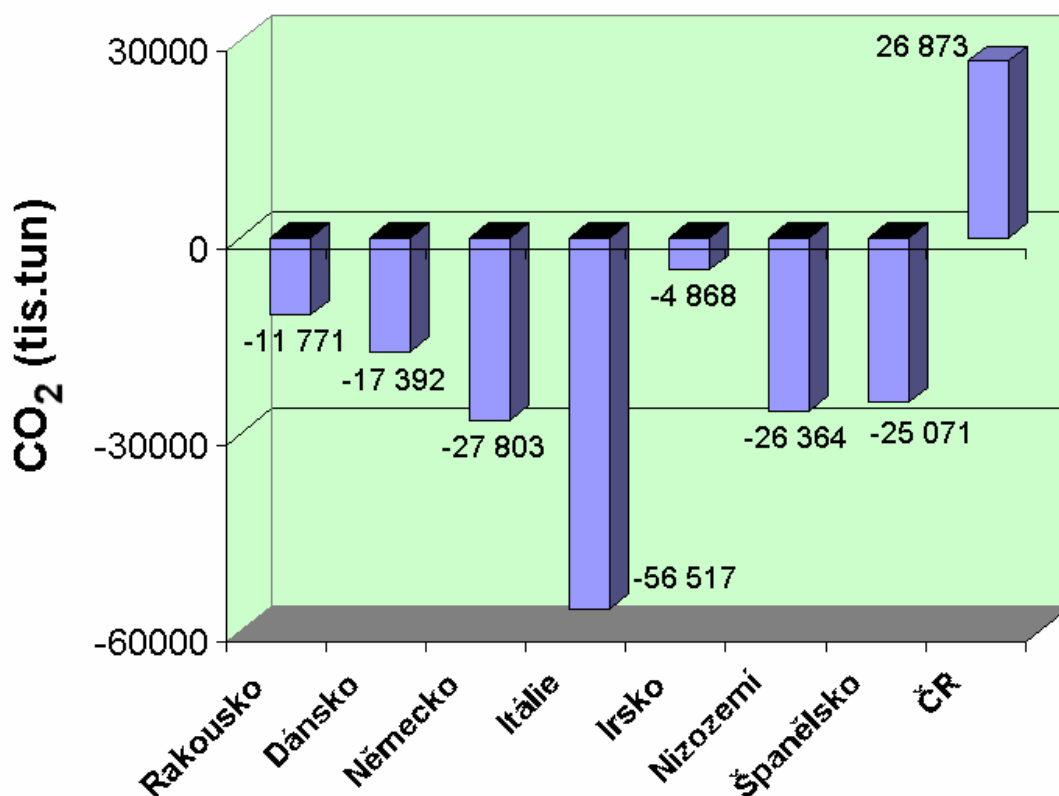
Je prakticky prvním palivem, které kdy člověk použil k výrobě tepelné energie. S časovým ohledem se jedná rovněž o první používané palivo, ostatní paliva přišla mnohem později. Biomasa je palivem, bez kterého se v budoucnu jistě neobejdeme, nechceme-li nadále zatěžovat životní prostředí spalováním fosilních paliv. V dnešní době se biomasa hlásí znovu o slovo a to z několika důvodů. Jako hlavní lze uvést očekávaný úbytek fosilních paliv v budoucnosti. Podle aktuálních zásob by měla například zásoba ropy vydržet na dalších 50 let, uhlí při současném tempu spotřeby v přibližných odhadech 12 až 130 let. Naproti tomu biomasu v podobě různých odřezků, pilin či jiného přírodního odpadu lze v některých případech získat za cenu nižší, než je cena jiného paliva o stejné výhřevnosti (protože náklady na produkci biomasy jsou v tomto případě započítány v ceně hlavního produktu), cena biomasy cíleně pěstované pro spalování či produkci biopaliv je ale v současnosti mnohdy poněkud vyšší než např. cena hnědého uhlí nebo jiných “tradičních” paliv. Další z důvodů je vznik velkého množství znečišťujících látek, které se uvolňují při spalování fosilních paliv.

Hlavně se jedná o plynné emise: CO_2 , SO_2 , CO , pevné: popílek a kapalné například různé úniky ropy nebo jiných látek do životního prostředí. Tyto látky mají vliv na dění kolem nás, především globální oteplování a klimatické změny. V dnešní době nejsou žádnou výjimkou záplavy, sněžné bouře nebo zemětřesení a pocítujeme to stále častěji, mnohde na vlastní kůži. Řada vědců to také potvrzuje. Je důležité, že si toto začíná uvědomovat i obyvatel modré planety. Kjótský protokol vstoupil v platnost k rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách. Průmyslové země se v něm zavázaly ke snížení emise skleníkových plynů o 5,2 %. Jedná se o šest druhů plynů, respektive jejich průměrné emisní hodnoty. Tyto plyny jsou CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC_s (fluorovodík), SF_6 (fluoridu sírového) a PFC_s (polyfluorovodík). Kjótský protokol získal svůj název podle japonského města Kjóto. Zde byl v roce 1997 dojednán. [1], [5]



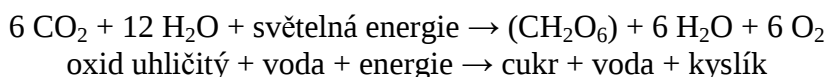
Obr.1 Zelené země smlouvu ratifikovaly, červené nikoli a šedé nepodepsali

Evropská unie si stanoví cíle ve využívání obnovitelných zdrojů energie, návrh zákona o podpoře výroby elektřiny z nich přijali naši politici a jeho schválení je v moci prezidenta republiky. Současné emisní trendy ukazují, že v mnoha zemích Evropské Unie bude nutno dojít ke značnému snížení emisí CO_2 .



Graf 1: Emisní limity v evropských zemích [23]

České republiky má již uspořeno dostatek, takže může prodávat emisní kvóty zemím méně úspěšným. Jak je vidět z grafu, tak mnoho zemí dojde díky využití biomasy k možnému snížení emisních limitů. Obecně lze biomasu definovat jako hmotu všech organismů na Zemi. Velké množství organických látek vzniká při fotosyntéze z oxidu uhličitého a vody za spolupůsobení enzymů, chlorofylu a světelné energie. Schematicky to lze znázornit následovně:



Při jejím spalování logicky opět oxid uhličitý vzniká. Dochází tedy k uzavřenému procesu, kdy rostliny za svého růstu odebírají z ovzduší CO₂ a při spalování ho do ovzduší opět vracejí. Její množství se činností organismů neustále obnovuje a nedochází tak k jednostrannému narušení rovnováhy prvků a energie v biosféře. Skleníkový efekt se nenavysuje. Zde je její jednoznačná přednost. Když by jsme srovnaly vlastnosti biomasy (objemová hmotnost, výhřevnost, vlhkost) s uhlím, docházíme k jasnému závěru. Biomasa, by měla být zužitkována v místě jejího vzniku. Dlouhý transport do vzdálených elektráren nebo kotlen podstatně zvyšují její cenu. Při výrobě elektřiny v elektrárně se využije zpravidla něco kolem 30 až 55 % energie z paliva, to proto, že odpadní teplo, které se odvádí z kondenzátorů a předává se do okolí (oblaka kouře z chladících věží elektráren). A další ztrátu vidíme hned za elektrárnou, kdy je elektrická energie rozváděna ke spotřebitelům se ztrátou 3 až 4 % a zde je často měněna neefektivně opět na teplo potřebné k vytápění. V uplynulých deseti letech bylo u nás zrealizováno a uvedeno do provozu více než 20 centrálních výtopen na spalování biomasy s instalovaným výkonem od 1 do 9 MW, z těch nejvýznamnějších můžeme jmenovat Zlaté Hory, Žlutice, Bystřice nad Pernštejnem nebo Hartmanice. Účinnost těchto kotlen se pohybuje mezi 60 a 80 %. A ať už byly tyto náročné

investice jakkoliv efektivní, pak v době teroristických útoků a houpajících se cen ropy a zemního plynu jsou velkým plus dávajícím regionům jakousi záruku energetické soběstačnosti. V posledních letech je pozornost směřována ke kogeneraci, která při využití technologie ORC dosahuje celkové účinnosti téměř 90 %.[2]

2.2 ZDROJE BIOMASY

Můžeme je rozdělit například následujícím způsobem na odpadní a záměrně pěstovanou.

a) odpadní biomasa:

Do této skupiny můžeme zařadit slámu, lesní odpad, odpad živočišné výroby, rostlinné výroba, dřevozpracujícího průmyslu, potravinářského průmyslu a dalších výrobních odvětví. Odpadní palivo nás vlastně nic nestojí, je to zbytek po předešlé užité činnosti. Jako příklad berme slámu ležící na poli z níž můžeme následně udělat balíky slámy, pelety nebo jen spalovat jako volně ložené palivo. Dřevěný odpad se týká volně ležících hromad větví a zbytků stromů po těžbě dřeva. Tento odpad je v mnoha případech dostat pouze za odvoz, kdy je spokojenost na obou stranách. Je spokojený správce lesního porostu za vyčištění lesa a rovněž ten, kdo palivo získá zdarma. Pak už zbývá jen zpracovat odpad na použitelné palivo jako je štěpka nebo pelety. Cena tuny štěpky se po vlastním zpracování pohybuje od 400 – 600Kč za tunu paliva. Cena koupené pak i 1200Kč za tunu. Další příklad je cena 750Kg pytle pelet za 3300Kč s DPH. [19]. Po dřevozpracujícím průmyslu se dají využít piliny pro lisování pelet nebo briket. Jako zbytky po živočišné výrobě jsou využívány exkrementy hospodářských zvířat. Fermentace organické hmoty je proces využívaný v bioplynových stanicích, umožňuje při zachování hnojivých účinků exkrementů. Využije se část energie vázané v organické hmotě (odpadu) k produkci bioplynu (s obsahem 50 - 75% metanu) k výrobě tepelné a elektrické energie. Zbytek se pak dá využít jako kvalitní hnojivo s větší koncentrací draslíku a fosforu. [20].

b) záměrně pěstovaná biomasa:

Poměrně novým zdrojem biomasy jsou porosty speciálních plodin, jejichž cílem je záměrná produkce biomasy k energetickému a průmyslovému využití. Jsou to druhy dřevin, trvalek či bylin, schopných vysokého výnosu. Jejich růst a zejména objemová produkce (tuny/hektar/rok) při intenzivním pěstování výrazně převyšuje průměrné hodnoty ostatních plodin ve sledované oblasti. Pro rychle rostoucí dřeviny považujeme za nadprůměrné výnosy od 8–10 tun a za vynikající nad 15 tun sušiny/ha/rok (100% sušiny). Patří sem energetické dřeviny (topol, vrba), nedřevěné rostliny (olejníky, řepka, obilniny, sloní tráva, šťovík, len..) nebo palivové dříví. [21] Některé formy biomasy hlavně organického původu a nedřevnaté rostliny uvedené výše jsou vhodné převážně k výrobě bioplynu nebo jiných biopaliv. Různé formy biomasy se postupně stávají žádanou surovinou pro průmysl (např. pro výrobu bioplastů). Ty se již využívají v automobilovém a stavebním průmyslu. V poslední době je význam zaměřen směrem k využití záměrně pěstované biomasy pro výrobu biopaliv (tzv. rychlou pyrolýzou) a jako zdroj vodíku do palivových článků. Některé z těchto oblastí mohou být v budoucnu významným a ekonomicky zajímavým odběratelem biomasy. [14]



Obr. 2 Pole záměrně pěstované biomasy [22]

2.3 ENERGETICKY LZE BIOMASU VYUŽÍT PROCESY:

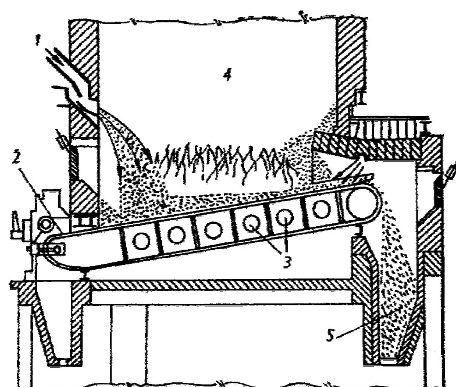
Termochemickými :

Spalování $C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + Q$

Spalování biomasy většinou nevyžaduje předběžnou speciální úpravu paliva. Je přijatelná i vyšší vlhkost suroviny. Vzhledem k charakteru biomasy a jejímu proměnnému složení je nutno věnovat značnou pozornost optimálním podmínkám při spalování a při čištění výstupních spalin, kde je nutno především kontrolovat emise oxidu uhelnatého a tuhých látek. Spalování biomasy je v současnosti technicky dostatečně vyřešeno a to ve dvou koncepcích:

- **spalování na roštu:** Tuhé palivo je dávkováno do reakční komory nejčastěji pomocí vhozové šachty umístěné ve stropě nebo v horní části reakční komory a uzavřené pecními dvířky, spalovací vzduch je přiváděn (pomocí ventilátoru nebo tahem exhaustoru) pod rošt (nejčastěji rovný, šikmý nebo stupňový), případně je přiváděn i sekundární vzduch nad rošt pomocí speciálních trysek.

- **spalování potažmo zplyňování na fluidní vrstvě:** Fluidní spalování je proces, který je možné charakterizovat jako vznášení se drobných částic paliva působením dynamického účinku protékajícího fluidního média. Fluidizačním médiem může být kapalina nebo plyn. Pro fluidní spalování je jím nejčastěji vzduch. Při fluidním zplyňování je využíván rovněž vzduch, ale často se používá vodní páry, vzduchu obohaceného o kyslík nebo čistého kyslíku za účelem zvýšení výhřevnosti produkovaného plynu.



1. přívod paliva
2. šikmý řetězový rošt
3. přívod fluidního vzduchu
4. spalovací vzduch
5. odvod škváry

Obr. 3 Fluidní spalování [17]

Rozšířenější je dosud spalování na roštu, avšak fluidní technologie má některé významné výhody a její technický vývoj stále postupuje. Složitější metodou je termochemická přeměna biomasy při vyšších teplotách a za nedostatku kyslíku. Produkty takového procesu jsou odlišné podle procesních podmínek, k nimž patří především teplota, doba setrvání částic biomasy v reakční zóně a další způsob zpracování. Jestliže se teplota při reakci v reaktorech pohybuje v oblasti 800°C až 900°C a doba setrvání částic je delší (sekundy až desítky sekund), je produktem z větší části syntézní plyn. Tento proces je označován jako zplyňování. [9]

Zplyňováním $C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + CO + CH_4 + H_2$

Zplyňování je proces, kde biomasa pod vlivem tepla a s minimálním nebo žádným přívodem kyslíku vytváří spalitelný plyn, který by mohl být použit jako palivo například pro plynovou turbínu nebo spalovací motor. Ve zplyňovači je biomasa vysušena, pyrolyzována, spalována a redukována v různých zónách procesu zplyňování. Teplota zplyňování biomasy je 800 - 900 °C a vyrobený plyn obsahuje z podstatné části kysličník uhelnatý, vodík a metan. Zplyňování může probíhat v těchto formách:

- zplyňování v generátorech s pevným ložem
- zplyňování ve fluidních generátorech.

První z obou metod je jednodušší, méně investičně náročná, avšak je použitelná jen pro malé tepelné výkony. Zplyňování probíhá při nižších teplotách (kolem 500°C) [9] a za atmosférického tlaku ve vrstvě biomasy. Vzduch jako okysličovací médium proudí buď v souproudu (směr dolů) nebo v protiproudu (směrem nahoru) vzhledem k postupnému pohybu zplyňovaného biopaliva. Popelové zbytky se odvádějí ze spodní části reaktoru. Nevýhodou tohoto systému je značná tvorba dehtových látek, fenolů a pod., jejichž odstranění je pak největším problémem. U druhé metody probíhá zplyňovací proces při teplotách 850 až 950°C. Souběžně zde probíhá vývoj ve dvou základních směrech. [3]. Jedná se o zplyňování při atmosférickém tlaku a pod tlakem.

- **zplyňování při atmosférickém tlaku:** Atmosférické zplyňování. Jestliže ke zplyňování dochází za atmosférického tlaku, musí být plyn ochlazován na nízkou teplotu a pečlivě čištěn dříve, než může být stlačen na tlak požadovaný pro plynovou turbínu. Kompresor musí tlakovat plyn. Chlazení horkého plynu ze zplyňovače snižuje tepelnou účinnost, pokud nelze vyrábět teplo. Tento proces umožňuje krakování dehtu a čištění plynu, proto se zdá, že zajišťuje dobré možnosti pro výrobu plynu požadované kvality pro plynovou turbínu nebo spalovací motor.

-**zplyňování pod tlakem:** Pokud ke zplyňování dochází za zvýšeného tlaku, plyn je možno přivést přímo k plynové turbíně nebo motoru bez stlačování. Plyn se musí pouze ochladit na méně než 400 °C a filtrovat. Pro stlačení vzduchu do zplyňovače se používá kompresor pro plynové turbíny. Přibližně 10 % průtoku vzduchu se odebírá z ventilu kompresoru a tlakové ztráty v částech zplyňovače jsou kompenzovány v pomocném kompresoru. Zplyňovač je navržen tak, aby zajišťoval základní krakování dehtu a prach je odstraňován ve vysokoteplotním filtru za zplyňovačem. Potíž u tohoto procesu tkví v tom, že palivo musí být přiváděno do zplyňovače navzdory vysokému tlaku, přibližně 0.2MPa.

Oba způsoby mají své výhody a nevýhody. Tlakové zplyňování biomasy vycházelo bezprostředně z vývoje zplyňovacích technologií uhlí, v nichž byly z mnoha důvodů používány výlučně tlakové generátory. Obecně menší jednotkové výkony zařízení s biomasou a její specifické vlastnosti vedou k tomu, že v současné době je dávana přednost systémům s atmosférickým zplyňováním a s tlakovým zplyňováním se uvažuje až u případných budoucích projektů tepelných centrál s výkony většími než asi 60 MWe. Výhřevnost vyrobeného plynu se pohybuje v rozmezí 4 až 6 MJ / m³, přičemž tento plyn je bez větších úprav použitelný pro spalování v klasických kotlových hořácích, a po dodatečné vyčištění i ve spalovacích komorách spalovacích turbín a upravených spalovacích motorů. [3], [9]

Biochemickými :

Alkoholové kvašení

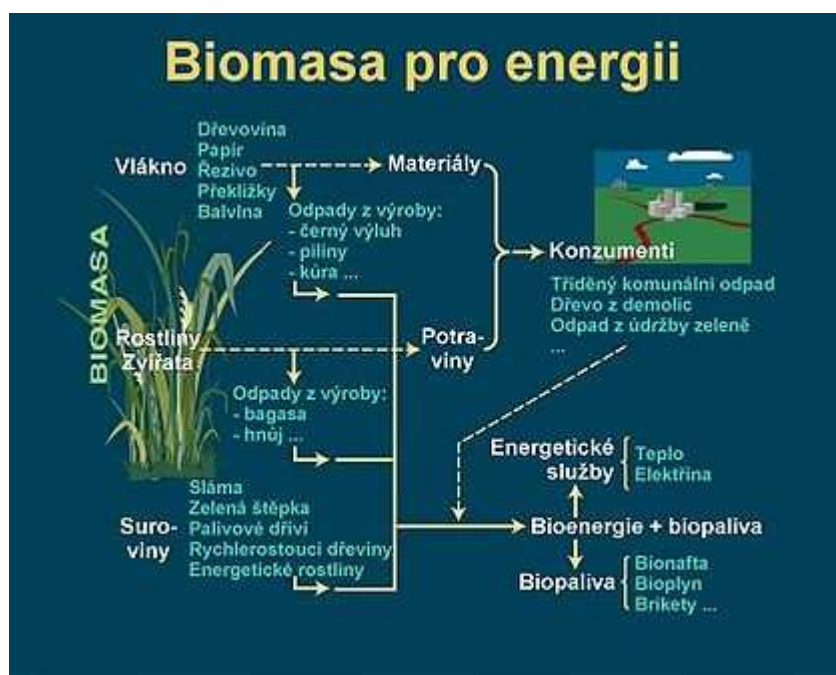
Z rostlin, které obsahují cukry a škrob (např. obiloviny, řepa, brambory, cukrová třtina, ovoce atd.) je možné získat organickou fermentací v mokřím prostředí a následně destilací vysokoprocentní alkohol (etanol). Teoreticky lze z 1 kg cukru získat 0.65 l čistého etanolu. V praxi je však energetická výtěžnost 90 – 95% protože vedle etanolu vznikají další produkty např. glycerín → líh

Metanové kvašení Zpracování organických látek se současným vznikem bioplynu se nazývá anaerobní fermentace dříve metanogenní kvašení (vyhňívání, rozklad). Bioplyn (dříve kalový plyn) je směs plynů: 50 až 75% metanu, 25 až 40% oxidu uhličitého, 1 až 3% dalších plynů (dusík, vodík, vzácné plyny, sirovodík, vodní páry) [3]

Fyzikálními : Štěpkování

Lisování (z drobného odpadu) na brikety nebo pelety

Některé druhy biomasy se musí před vlastním energetickým zpracováním nejdříve upravit na použitelné biopalivo. Ty můžeme rozdělit na: tuhá, kapalná a plynná paliva. [2]



Obr.4 Zdroje biomasy [2]

Tuhá paliva: jsou paliva, jež se chovají při skladování, dopravě a transportu pro energetické využití v tuhém stavu. Patří sem zejména tyto paliva: dřevo ve formě polen, štěpka (2.5 až 5 cm), brikety, pelety nebo piliny. Sláma a seno ve formě briket nebo pelet.

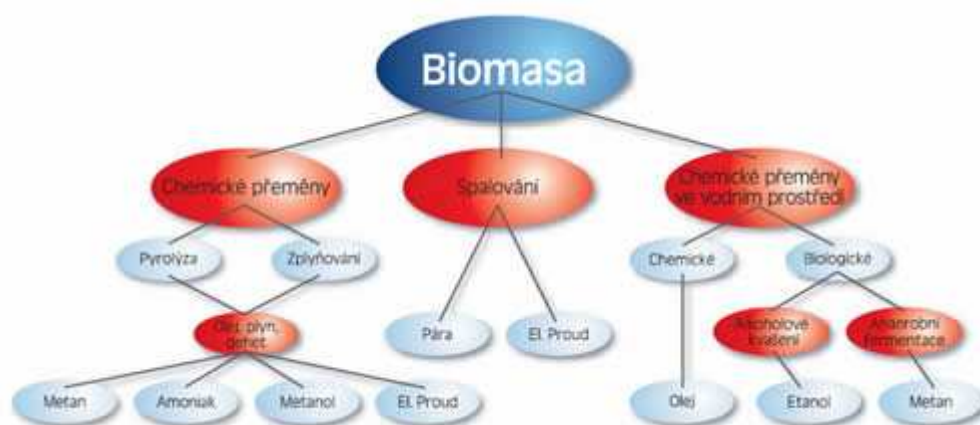


Obr.5 dřevěné a slaměné brikety [2]

Kapalná paliva: jsou paliva, jež se chovají při skladování, dopravě a transportu pro energetické využití ve stavu kapalném. Mezi kapalná biopaliva jsou řazena následující: etanol z rostlin, které obsahují škrob a sacharidy jako jsou brambory, kukuřice, obilí, biooleje a živočišné tuky pro výrobu bionafty. Dále ještě zkapalněné dřevo a bioplyn na uhlovodíky.

Plynná paliva: Mluvíme o bioplynu, který se skládá se z oxidu uhličitýho (CO_2) a metanu (CH_4), je produkovaný přirozeným rozkladem na skládkách odpadů nebo v zemědělských provozech. Dřevoplynu složeném z oxidu uhelnatého (CO) a vodíku vyráběný zplyňováním

biomasy. Posledním z paliv je vodík vyrobený štěpením jakéhokoli uhlovodíkového biopaliva. [2]

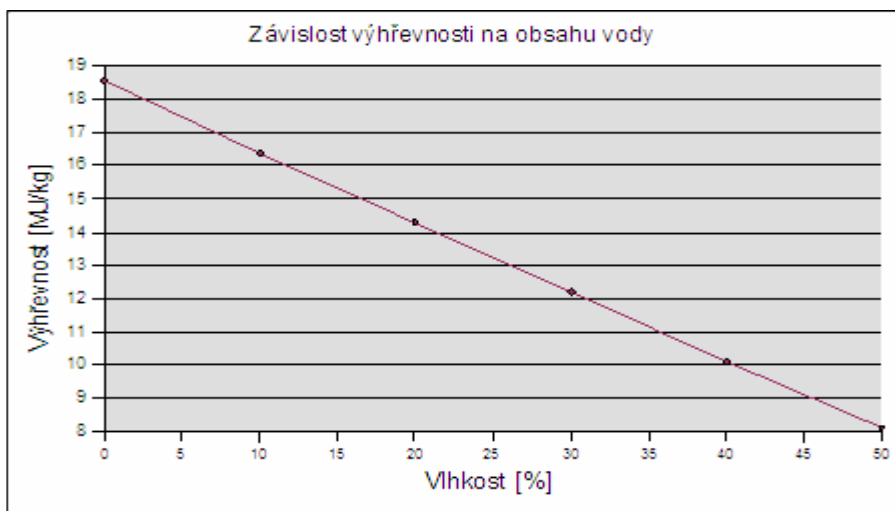


Obr.6 Možnosti využití biomasy [8]

2.4 PARAMETRY BIOMASY JAKO PALIVA

Typickou z vlastností biomasy je vyšší a hlavně proměnný obsah vody. Mezi chemické charakteristiky lze zařadit: elementární složení, obsah popele, mikrobiální odbourávání. K energetickým charakteristikám patří především spalné teplo, výhřevnost, hustota energie. Podíl hořlaviny jak prchavé tak i neprchavé, teploty měknutí, tavení a tečení popelovin, korozní poměry, tvorba aerosolu, Mezi fyzikální charakteristiky patří: rozměry a forma, zrnitost, hustota, sypná hmotnost, soudržnost, sypnost, sklon ke klembovitost, otěruvzdornost, tvorba prachu atd. K hygienickým charakteristikám patří především tvorba hub a plísní při skladování. Pro energetické využití je obsah vody velmi nepříznivým ukazatelem, který může způsobit uvedené problémy:

- Snižuje poměr využitelného tepla a hmotnosti biomasy
- Při odpaření vody se spotřebuje část tepla → snížení výhřevnosti
- Vlhké palivo způsobí výrazné snížení účinnosti spalovacího zařízení. Zvyšuje se množství vzniklých spalin a tím komínová ztráta. [6]



Graf.2: Vliv vlhkosti na výhřevnost paliva [4]

Producent biomasy tak musí mít stále na paměti, aby co nejvíce minimalizoval výše uvedená negativa a snažil se zajistit, aby používané palivo mělo co nejmenší obsah vody. Biomasa vždy obsahuje alespoň 10% vody, ale průměrná hodnota pro dřevo nebo štěpku je kolem 30%. Zvýšení obsahu vody ve dřevě z 20 na 40 % zvyšuje spotřebu paliva téměř o polovinu. Když hodnota obsahu vody stoupne na 50 %, což je běžný případ, zvyšuje se tím spotřeba paliva na dvojnásobek. Ideálním stavem je možnost využití přirozeného způsobu sušení jako například vhodným skladováním přímo na zemědělské ploše nebo na lesních skládkách. Při umělém sušení v sušárnách s vyráběnou tepelnou energií je většinou ekonomicky nevýhodné. Protože obsah vody může v biomase značně kolísat (např. obsah vlhkosti v tzv "čerstvém" palivovém dřevu se pohybuje v rozsahu 25% až 65 i více %) tak je vhodné uvádět některé parametry biomasy vztažené na suchou hmotu na skutečný, tedy vlhký stav.

Výhřevnost biopaliv:

Je teplo uvolněné dokonalým spálením paliva a zchlazením vzniklých spalin na původní teplotu, přičemž veškerá vodní pára vzniklá při spálení nekondenzuje a zůstane ve formě páry. Výhřevnost dřeva v suchém stavu se pohybuje od 17 - 19 MJ/Kg a obdobné hodnoty mají i stébelniny jako sláma obilovin a travin. Tyto hodnoty tvoří asi 50% výhřevnosti ropných paliv. Výhřevnost biopaliva se snižuje s rostoucí vlhkostí a také s časem, zejména činností mikroorganismů, hub a plísní. Parametry výhřevnosti, obsahu vody a hustoty energie ovlivňují velikost zařízení. Koncentrace dusíku (N), síry (S), chlóru (Cl) a také podstatných popelotvorných elementů vápníku (Ca), hořčíku (Mg) a draslíku (K) v biopalivech, jak potvrzují prováděné rozborů vzorků, je poměrně velmi široká - viz tab. 1. Právě z důvodu vysokého množství minerálních látek - popelovin je nutné považovat slámu a další stébelniny za technicky obtížnější palivo. Možnosti ovlivňování tvorby dusíku vyplývají z geometrie spalovacího prostoru a z odstupňovaného přívodu spalovacího vzduchu. Nejvíce limitujícím faktorem koncentrace chlóru v biopalivu je jeho korozivní účinek při spolupůsobení s alkalickými prvky. [7]

Chemické složení hořlaviny paliva:

Chemické složení hořlaviny různých druhů biomasy je uvedeno v tab.1. Výhodou dřevnatých paliv je, že neobsahují síru, a tak během spalování nevzniká škodlivý oxid siřičitý SO_2 .

Tabulka 1: Chemické složení hořlaviny [7]

Palivo	Roz- mezí	Výhřevnost	Podíl Elementární složení prchavé hořlaviny	Obsah popelovin	Vlh- kost	Složky paliva				
						C	H	O	N	S
		[MJ/kg]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Sláma	Min	15	70	3.5	12	43.9	5.4	38	0.3	0.05
	Max	17.5	82	6.5	25	48	6.4	43.3	0.7	0.2
Seno	Min	13.5	70	4.2	15	45	6	38.8	0.8	0.08
	Max	17.7	75	4.8	25	48.6	6.6	44.3	1.1	1.12
Sloní tráva		17.6	79	8	40	49	6.4	41.3	1.7	0.3
Dřevo	Min	16.9	70	0.2	10	45	5.3	41.4	0.1	0.02
	Max	19	85	3	60	52	6.5	46	1.7	0.3
Hnědé uhlí	Min	14	20	3	10	27.5	2.5	12	0.3	0.5
	Max	23	55	33	30	64	5.8	33	1.5	6
Černé uhlí	Min	27	10	3.7	10	65	2.8	5	0.9	0.5
	Max	32.5	40	17	30	84	5	9.1	2	1.5
Koks	Min	30	4	3	5	65	1	1	0.1	0.1
	Max	32.5	13	15	15	90	2	2	0.5	0.5
Řepkový olej		35	100	0	>0.5	77	12	11	0.1	0
Etanol		77	100	0	>2	52	13	25	0	0

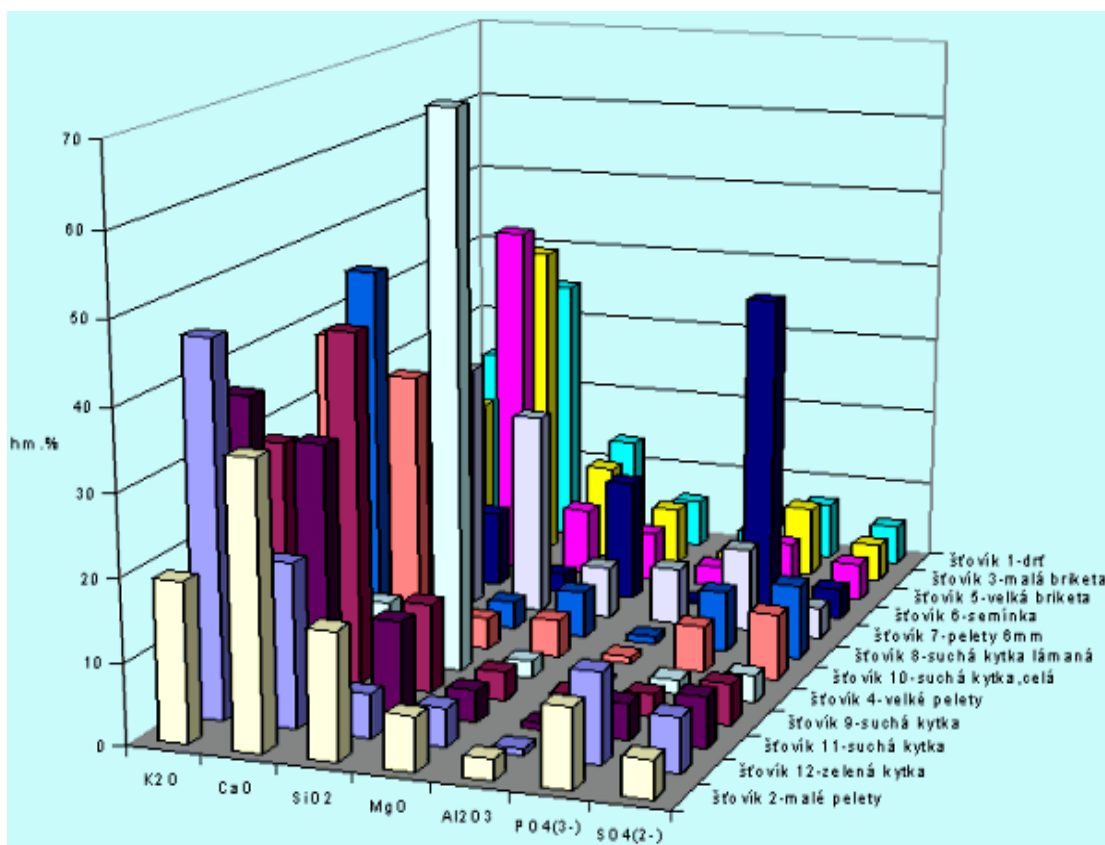
3. VZNIK NÁPEKU NA ROŠTU KOTLE

3.1 PALIVA NÁCHYLNÁ KE VZNIKU NÁPEKU

Uvažujme o palivech nejvíce náchylných ke tvorbě nepříjemného nápeku na vnitřním zařízení kotle. Jedná se především o problémy způsobující paliva ze stébelnin (ve tvarech briket, pelet nebo balíků). Sláma má mnoho rozmanitých forem paliva od volně ložené, řezané vyznačující se nepatrnou měrnou hmotností a malou energetickou hustotou, přes balíky až po brikety s peletami. Sláma se ještě podstatně rychleji zplyňuje a to při nižší teplotě než jiná biopaliva..

U malých topenišť se nedosahuje takové teploty, aby prohořela zbylá uhlíkatá část a částice se tak dostávají do komínových plynů a do ovzduší. U velkých topenišť probíhá spalování dokonale, ale za teplot nad 600°C nutných pro dobré prohořívání se objevuje agresivita prvků ve slámě obsažených. Je to například obsah dusíku, který se účastní tvorby nežádoucích NO_x. Podle odborné literatury (STREHLER) je při obsahu dusíku 1.5% problém zvládnutelný, pokud teploty při spalování nepřekročí 1100 - 1200°C, kdy vznikají NO_x i ze vzduchu. Obsah dusíku se liší u jednotlivých energetických plodin i v závislosti na roční době. Například rákos sklizený na jaře má hodnotu 0.5%, křídlatka 0.4%. Oproti tomu seno 1.8% a vojtěška i 2.8%. Z dalších zkušeností se přišlo na to, že je výhodné nechat stébelniny nějaký čas na poli vymoknout a dojde tak k vyplavení některých látek způsobujících problémy. Síra a těžké kovy jsou obsaženy ve stébelninách jen v nepatrném množství, do popela se dostávají hlavně minerální látka jako draslík, křemík, fosfor a vápník. Další látkou nepříznivě působící je především chlor, který se mění na chlorovodík (HCl). To má jediný důsledek v tom, že je nutno udělat opatření proti jejímu nežádoucímu působení..

Praxe ve skandinávských teplárnách ukázala, že je vhodné si vypomáhat přidavkem vápna nebo vápence do systému fluidního spalování a současným spalováním uhlí se slámou, kdy se nám draslík ze slámy váže se sírou z uhlí. Velkým problémem je tvorba škváry a sklovitých koláčů ze slaměného popele. Měkne a taví se již při teplotách kolem 900°C. Obsah popelovin může dosahovat až 9%. Pak je nutné dodržet spalné teploty v topeništi a rychlé ochlazení popele. Pro vhodné ochlazení se používají vodou chlazené rošty, přebytky sekundárního vzduchu a protiproudé vedení plamene proti palivu směrem od vznikajícího popele. Hlavní problémem, který nastává při spalování biomasy, zejména stébelnin jsou poměrně nízké teploty měknutí a tavení popela. Popel ze stébelnin je anorganickým zbytkem po spálení s obsahem několika procent nedopalu (kolínka stébel). Oproti dřevnímu popelu má vyšší obsah draslíku a křemíku (45 - 55%). To způsobuje nižší hodnoty lepení popele (800 - 1000°C). Spolu s vyšším podílem popelovin v sušině stébelnin tak vznikají problémy s nalepováním popelovin na vyzdívku topenišť. Problém s popelem ze stébelnin způsobuje rovněž příměs zeminy, zejména písek a jíla. Celkově můžeme shrnout negativní působení do několika skupin. Dochází k poškození vyzdívky kotle reakcí s alkalickými sloučeninami, korozi taveninou popela, prudkou změnou teploty, kyselými spaliny jež napadají rovněž kovové teplosměnné plochy. [12]



Graf 3: Hlavní prvky obsažené v popelu z biomasy [11]

3.2 CHARAKTERISTIKA POPELA Z BIOMASY

Popel z biomasy obsahuje pouze stopové množství těžkých kovů čím se z nich stává poměrně vhodná hmota jako hnojivo použité na zemědělskou půdu nebo jako zdroj minerálů užitečných v lesních porostech. Složení látek obsažených v popelu kolísá dle různých faktorů (viz.kapitola 3.1) a druhu rostlin. Obsah popela určuje rozhodujícím způsobem druh separace popela, jeho dopravu a využití. Rozdělení velikosti zrn popílku u různých druhů biomasy ukazuje na podstatně větší množství částic polétavého popílku u stébelnin oproti dřevním biopalivům. To je spojeno s podstatně vyšším znečištěním výměníku tepla a následným požadavkem na jeho vhodnou konstrukci umožňující automatické čištění (svislé uspořádání a možnost použití tlakového vzduchu). Zatímco vápník (Ca) a hořčík (Mg) zvyšují bod tání popele, tak draslík (K), chloridy a nízko tající alkalické silikáty vedou k poklesu bodu tání. U kritického druhu stébelnatých paliv jako sláma, celé rostliny obilovin a seno by neměla být teplota spalovacího prostoru vyšší než 800 - 900 °C. Také v závislosti na druhu spalování a podmínkách pěstování. Hlavní složky popela jsou stejné, ale je důležité mít přehled o složení popela před jeho dalším využitím. Zatím jsme se zabýval pouze základním složením popelů, ale ne zcela sloučeninami a formováním popela během spalování. Ke zjištění toho, co se děje při spalování paliva je důležité zjistit, jaké existují sloučeniny v popelu a jak se projevují jejich účinky při formování popela. Ze studovaných vzorků slámy ječmene, řepky a pšenice byla nejnižší teplota zjištěna u ječmene. [14] Koncentrace těžkých kovů v biopalivech - z ekologického hlediska jsou aktuální v případě popela z biomasy, především koncentrace

kadmia (Cd) a zinku (Zn) - ovlivňuje složení popela a mají proto vliv na použitelnost jednotlivých frakcí: podroštový popel, cyklónový, polétavý popílek a jemný polétavý popílek (na tkaninových filtrech). Na obsah těžkých kovů v palivu má vliv i podloží, kde biopalivo vyrůstá. Výsledek výzkumu ukazuje, že tento jemný popílek v množství 2 - 10 % hm. obsahuje nejvíce těžkých kovů. To z technologického a ekologického hlediska znamená, že jemný polétavý popílek je třeba odděleně shromažďovat.

Tab.2 Charakteristika popela ze dřeva a slámy po spálení při 500°C [14]

palivo	50%kůra, 50% štěpka	60%kůra, 40% štěpka	sláma-50% pšenice, 50% ječmen
	% popela (%suchého paliva)	% popela (%suchého paliva)	% popela (%suchého paliva)
Vápník [Ca]	28.5(0.7)	22.6(0.49)	8.03(0.34)
Křemík [Si]	5.95(0.15)	11.9(0.26)	21.9(0.91)
Draslík [K]	5.56(0.14)	4.74(0.1)	18.6(0.77)
Hořčík [Mg]	1.49(0.04)	2.08(0.04)	1.19(0.05)
Hliník [Al]	1.98(0.05)	1.58(0.03)	0.94(0.04)
Železo [Fe]	1.19(0.03)	2.37(0.05)	1.19(0.05)
Sodík [Na]	0.64(0.02)	0.62(0.01)	1.49(0.06)
Zinek [Zn]	0.41(0.01)	0.27(0.006)	0.03(0.001)
Kadmium [Cd]	0	0.006(0.0001)	0
Chlór [Cl]	0.23(0.01)	0.18(0.004)	1.44(0.06)
CO ₂	22.1	17.4	1.92

3.3 PRVKOVÉ SLOŽENÍ POPELA PŘI ROZDÍLNÝCH TEPLITÁCH

Mějme opět tři vzorky paliva z Tab.2 (50%kůra 50% štěpka, 60%kůra, 40% štěpka a sláma - 50% pšenice, 50% ječmen) ve formě pelet. Spalování bylo provedeno při stechiometrii v intervalech 0.60 - 1.65 a průměrných teplot 1100°C - 1200°C pro dřevěné palivo. Slaměné pelety byly spáleny za teplot o něco nižších a to 1000°C - 1100°C. Po každém spálení byl popel z roštu sebrán a podroben prvkové analýze. Všechny vzorky byli připraveny za teploty 400°C. [14]

Tab.3 Prvkové složení paliva 50% kůra 50% štěpka [14]

Přebytek vzduchu	0.79	1.01	1.23
Teplota[°C]	1043	1120	1053
Teplota [°C]	1197	1175	1184
	% popela	% popela	% popela
Vápník [Ca]	40.0	40.5	34.2
Křemík [Si]	7.98	8.23	15.9
Draslík [K]	1.57	1.70	2.69
Hořčík [Mg]	2.12	2.31	2.56
Hliník [Al]	2.97	2.97	2.10
Železo [Fe]	1.21	1.64	2.79
Sodík [Na]	0.42	0.42	0.72
Zinek [Zn]	0.02	0.043	0.032
Kadmium [Cd]	0.0025	0.002	0.002

Tab.4 Prvkové složení paliva 60% kůra 40% štěpka [14]

Přebytek vzduchu	0.70	0.98	1.26
Teplota[°C]	1073	1144	1100
Teplota[°C] _{Max}	1135	1224	1096
	% popela	% popela	% popela
Vápník Ca	38.8	40.3	32.2
Křemík [Si]	7.57	8.75	16.5
Draslík [K]	2.71	2.55	2.71
Hořčík [Mg]	2.25	2.28	2.64
Hliník [Al]	2.67	2.87	2.11
Železo [Fe]	1.04	1.34	2.09
Sodík [Na]	0.66	0.46	0.64
Zinek [Zn]	0.037	0.037	0.033
Kadmium [Cd]	0.0039	0.0030	0.0030

Tab.5 Prvkové složení paliva sláma - 50% pšenice 50% ječmen [14]

Přebytek zduchu	0.75	1.03	1.13
Teplota[°C]	955	1044	1045
Teplota[°C] _{MAX}	1102	1126	1118
	% popela	% popela	% popela
Vápník [Ca]	9.94	10.0	10.8
Křemík [Si]	25.6	24.7	23.5
Draslík [K]	12.06	13.08	13.43
Hořčík [Mg]	0.99	1.15	1.02
Hliník [Al]	1.38	1.31	1.3
Železo [Fe]	0.49	0.51	0.61
Sodík [Na]	1.18	1.41	1.22
Zinek [Zn]	0.019	0.036	0.024
Kadmium [Cd]	0.08	0.0015	0.0019

Analýzy složení popela byli provedeny dle standardních metod pomocí atomové absorpční spektrometrie a plazmové atomové spektrometrie iontově selektivní elektrodou. Pro detekci krystalických látek byl použit rentgen difrakční analýzi. Vzorky popela spálené při teplotě 400°C jsou opět zahřáty na teplotu 650°C a poté dohřívány na teploty uvedené v tabulkách 3 až 5 při rychlosti ohřevu 50°C za minutu. Po spálení byl každý ze vzorků popela podroben difrakční práškové analýze. Spékání popela na roštu kotle bylo zkoumáno podle termogravimetrického měření. Zkoumané natavené vzorky slámy ze spalovacích experimentů byli vyšetřeny skenovaní elektronovou mikroskopií. Pro měření se používá elektronový mikroskop s takzvaným "zařízením mikrosondy" založené na energii disperzního rentgenu fluorescenčního vyšetření nám dává prvkové složení vzorku.

Prvky z popela tří paliv je uvedených v Tab.2. Jako hlavní prvky převládají vápník, křemík a draslík. Obsah draslíku byl vyšší u popela ze slámy než u paliv ze dřeva s kůrou. Vysoký obsah křemíku může být částečně způsoben přimýsením písku při sklizni a dopravě slámy. Analýzy popela z kůry a dřeva se liší. U kůry je vyšší obsah křemíku a vápníku zatímco draslíku a sodíku je obsaženo více v dřevě. Výšetřování spékání a tání popela při postupném zahřívání v pecích ukázalo měknutí popela slámy při teplotách 700°C a tání v rozmezí 975°C - 1025°C. Popel ze dřeva s kůrou mekne při teplotách 1000°C - 1200°C. Pro vzorky 50%kůra 50% štěpka je teplota tání 1470°C a pro 60%kůra 40% štěpka je telota stanovena na 1480°C podle termografických metod. Ztráty hmotností u těchto paliv ve spojení s endotermickými rekce proběhlo při nižších teplotách 400°C - 465°C a končí při teplotách 615°C - 775°C pro popel z paliva 50%kůra 50% štěpka a u paliva 60%kůra 40% štěpka při 615°C - 720°C. To při výzkumech vedlo k závěrům, že hlavní rekce způsobující tyto efekty jsou CO₂ vznikající z uhličitánů, ale hlavně CaCO₃. Prvkové analýzy popelů jsou uvedeny v tabulkách 3 - 5. Rozdíly ve složení jsou obvykle malé, ale některé trendy jsou vidět převážně u případů dřevěných paliv. Železo a křemík se zdají být účinněji vázány ve škváře při oxidační podmínkách než za podmínek snížených. Podobný trend byl pozorován u draslíku v paliva 50%kůra 50% štěpka, ale ne u z paliva 60%kůra 40% štěpka. Pro vápník to však platí v obráceném pořadí, nižší obsah v popelu byl zjištěn při oxidační atmosféře. Tyto popele byli brány z roštu z posledního spáleného paliva, protože většina z popela při dřívějších spalování následovala plyny ven z pece. Z tohoto důvodu je zřejmé, že pouze část popela má vliv na oblast roštu kotle. Z vyhodnocení výsledků rentgenu difrakční analýzy nevykazovaly žádné významné rozdíly ve fázových skladbách z důvodu spalování v atmosférických podmínkách. Identifikované fáze jsou uvedeny v Tab.6. [14]

Tab.6. Identifikované fáze popela

Palivo	Sloučeniny	Stopy sloučenin
50% kůra 50% štěpka	$\text{CaO}^S, \text{SiO}_2^S, \text{MgO}^S$	$\text{CaCO}_3^W, \text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{Ca}_2\text{SiO}_4^W, \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7^W, \text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2^W$
60% kůra 40% štěpka	$\text{CaO}^S, \text{SiO}_2^S, \text{MgO}^S$	$\text{CaCO}_3^W, \text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{Ca}_2\text{SiO}_4^W, \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7^W, \text{K}_2\text{CaSiO}_4^W$
50% pšenice 50% ječmen	$\text{SiO}_2^S, \text{K}_2\text{SO}_4^S, \text{KCl}^S$	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{Ca}_2\text{SiO}_4^W, \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$

S - silný signál pro identifikaci, M – střední signál, W – slabý signál

Celkově bylo vycházeno s počtem vzorků 8, 16 a 17 pro dřevěné palivo s obsahem štěpky 50%, 40% a slámy z ječmene s pšenicí. Rentgenu difrakční analýzy bylo rovněž využito při zkoumání vzorků popela, jež byli postupně zahřívány na teploty od 400°C až do 1190°C. Výsledky analýz jsou uvedeny v tabulkách 7 - 9, [14] kde jsou vidět krystalické sloučeniny. Lze konstatovat, že popel z dřevěných paliv s obsahem křemíku je poměrně reaktivním materiálem s řadou sloučenin, které vznikají během zpopelnění.

Tab. 7 Změna krystalické fáze v popelu paliva 50% kůra 50% štěpka

Teplota [°C]	Sloučeniny	Stopy sloučenin
400	$\text{CaCO}_3^S, \text{SiO}_2^S$	$\text{K}_2\text{SO}_4^M, \text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W$
650	$\text{CaCO}_3^S, \text{SiO}_2^S$	$\text{K}_2\text{SO}_4^M, \text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W, \text{K}_2\text{CaSiO}_4^W, \text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$
700	$\text{CaO}^S, \text{SiO}_2^S,$	$\text{CaCO}_3^W, \text{MgO}^W, \text{K}_2\text{SO}_4^W, \text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W, \text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3^W, \text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{CaSiO}_3^W, \text{Ca}_2\text{SiO}_4^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$
750	$\text{CaO}^S, \text{SiO}_2^S, \text{MgO}^M$	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W, \text{K}_2\text{CaSiO}_4^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$
800	$\text{CaO}^S, \text{MgO}^M$	$\text{SiO}_2^W, \text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_3^M, \text{K}_2\text{CaSiO}_4^W, \text{KAlSi}_3\text{O}_8^W, \text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$
850	$\text{CaO}^S, \text{MgO}^M$	$\text{SiO}_2^W, \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^M, \text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2^W, \text{CaSiO}_3^W, \text{Ca}_2\text{SiO}_4^W$
900	$\text{CaO}^S, \text{MgO}^M, \text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4^W$
1000 - 1150	$\text{CaO}^S, \text{MgO}^M, \text{Ca}_3\text{SiO}_7^M, \text{Ca}_3\text{SiO}_4^M$	

Tab. 8 Změna krystalické fáze v popelu paliva 60% kůra 40% štěpka

Teplota [°C]	Sloučeniny	Stopy sloučenin
400	CaCO_3^S , SiO_2^S $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$	K_2SO_4^M
700	CaO^S , SiO_2^S	$\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$, $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3^W$
750	CaOS , SO_{2S} , $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$, $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3^M$	
800 - 900	CaO , SiO_2	$\text{K}_2\text{CaSiO}_4^W$, $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3^W$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$, C , MgO^W
950	CaO^S , SiO_2^S , MgO^M , $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^M$	$\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)\text{C}$
1000	MgO^M	CaO^W , $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, CaSiO_3^M , $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^W$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4^W$, SiO_2^W , $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2^W$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7^W$, Fe_2O_3^W
1100 - 1190	MgO^M , $\text{Ca}_2\text{SiO}_4^M$, CaSiO_3^M , $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7^M$, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2^W$, Fe_2O_3^W

Tab. 9 Změna krystalické fáze v popelu 50% pšenice 50% ječmen

Teplota [°C]	Sloučeniny	Stopy sloučenin
400	CaCO_3^S , SiO_2^S , KCl^M , $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$	
650	K_2SO_4^M , KCl^M	SiO_2^W , $\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4^M$
700 - 750	K_2SO_4^M , KCl^M	SiO_2^W , CaCO_3^W , $\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4^M$
800 - 1000	K_2SO_4^M , KCl^M	SiO_2^W , $\text{K}_2\text{CaSiO}_4^M$, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8^M$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4^M$

Z poznatků jednotlivých analýz vyplývají následující zjištění:

1)Vápník (Ca) a křemík (Si) jsou stabilnější při vyšších teplotách v křemičitých sloučeninách než oxidy.

2)Draslík (K), vápník a křemík jsou spojovány s lehce hořlavými, biologickými materiály nebo s kontaminovanými písky. Krystalický popela obsahuje tyto prvky již při spalování za teploty 400°C.

3)Oxid hořečnatý (MgO) se neobjevuje jako krystalická složka popela při teplotách nižších než 700°C. To ukazuje, že hořčík (Mg) se při vyšších teplotách objevuje jako oxid a v některých případech ve formě křemičitanů.

4)Přítomnost chloridu draselného (KCl) byla zjištěna pouze v popelu ze slámy.

Sloučeniny se silnou difrakcí jsou uvedeny v tabulkách 7 – 9 při teplotě 400°C. Vápník obsažený v uhličitanech a křemenech je obsažen téměř ve všech vzorcích popela. Obsažen je také síran a chlorid draselný. Sulfáty draslíku jsou obsaženy ve vzorcích dřeva se štěpkou. Ukázalo se, že některé měřicí přístroje pro analýzu vzorků ukazují některé rozdíly. Jedná se o přístroje Siemens D5000 a Philips. Kromě fází v tabulkách 7 – 9 analyzovaných přístrojem Siemens D5000 se ukázala přítomnost uhličitanu draselného ve všech třech vzorcích, ale pouze ve stopové množství křemičitanu draslíku hlinitého. Vzhledem k tomu, že připravené vzorky nejsou nikdy totožné, tak ani zjištěné sloučeniny nemohou být úplně stejné. Pouze spékání nebo tání bylo zjištěno u slaměných paliv. Slinuté hrudky vznikly při stechiometriích 0.75, 1.03 a 1.13 a zjištěny byli pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Dominuje zde struktura slinutých materiálů ve formě pevné taveniny. Sodík, hořčík, fosfor a železo (Fe) byli především nalezeny v tuhnutí tavenině. Draslík je přítomen jak ve fázi taveniny tak i v krystalické formě. Prvky křemíku a železa jsou účinněji vázány v popelu spáleném za oxidačních podmínek. Slinuté kousky slámy jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Analýza slinutých kousků popela ze slámy

Stecheometrie	Pozorovaná fáze	Prvky [% hmotnosti]									
		Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Mn	Fe	O ²
0.75	Světlý krystal				24.06	0.5		33.82			41.59
	Světlá tavenina	3.62	1.68	0.40	23.65	2.3	13.05	11.8	0.23	2.53	40.76
	Světlá tavenina	3.60	1.39	0.30	25.22	1.9	13.66	12	0.21	0.41	41.36
	Temný krystal			10.5	30.39		12.56				46.55
	Černý křišťál				46.74						53.26
1.03	Světlý krystal				24.44		0.61	33.6			41.37
	Světlá tavenina	1.12	2.63	0.97	26.56	2.4	10.52	10.7		1.84	43.28
	Temná tavenina		0.95		28.20		4.98	2.78	0.16	0.08	62.85
	Černé částice			0.39	46.05		0.61				52.94
	Temný krystal			10.5	30.84		11.46	0.29			46.93
1.13	Světlý krystal				20.02		0.37	19.7			59.92
	Světlá tavenina	1.58	1.59	0.54	21.01	1.5	7.70	6.42	0.05	0.23	59.42
	Temná tavenina	0.93	1.66	0.52	22.81	1.2	7.70	4.66		0.21	60.30
	Temný krystal			10.5	30.49		12.00	0.39			46.66

Mezi hlavní prvky z popela ze dřeva, kůry, štěpky a slámy patří vápník, draslík, křemík a síra. Ty s popelem tvoří uhličitan, sírany a chloridy. Popel ze slámy obsahuje více draslíku než palivo ze dřeva a kůry což je zajímavé, protože se vyskytuje častěji u paliv s nízkým bodem tání. To vše bylo prokázáno při sekvenčním topení, při prvních pokusech a zkoumání popela se jako první jeví prvky vápníku, draslíku, křemíku, síry, sírany, chloridy a malé množství křemičitanů. Oxid hořečnatý se jeví jako krystalická látka v popelu připraveného za teplot 700°C. To naznačuje, že se hořčík transformuje z biologického materiálu přes amorfni stav do oxidu hořečnatého. Síra byla detekována v sloučeninách K₂SO₄ a K₂Ca₂(SO₄)₃ a CaSO₄. V dalších biopalivech byla obsažena CaSO₄ ve formě anhydritu rovněž obsažena v popelu. Při vyšších teplotách a delších intervalech spalování se křemičitan a oxidy stali dominantní složkou. Některé ze sloučenin zde detekovaných mohou mít původ v píscích a

drobných kamínkách přimýsených v palivu. Jedná se o křemen (CaSO_4) a živec (KAlSi_3O_8). Přítomnost draslíku je uváděna jako příčina spékání slámy při spalování. Přestože je přítomnost draslíku a jiných alkálií v palivu do určité míry dovolaná jsou to právě tyto prvky, které mají za následek slinování popela. Některé ze sloučenin obsahujících draslík jsou nalezeny v popeli jako KCl při teplotě 700°C a K_2SO_4 při 1069°C . U K_2CaSiO_4 se ukázala nejvyšší teplota tání 850°C . [14]

3.3.1 Zhodnocení obsahu prvků v jednotlivých palivech

Obsah draslíku je obecně vyšší u slaměných paliv (jednoletých rostlin), než u paliv ze dřeva s kůrou, kde jsou více zastoupeny uhličitany. Draslík byl hlavně analyzován ve sloučeninách vzniklých tavením popela ze slámy za nižších teplot. CaSO_4 a SiO_2 byli identifikováni jako hlavní krystalické látky z paliva dřevo a kůra zpopelněných při 400°C . Zatímco v popelu ze slámy převládali sloučeniny CaCO_3 , SiO_2 , KCl a K_2SO_4 . U dřevěných paliv s větším obsahem síry byla zjištěna přítomnost i K_2SO_4 jako u slámy. Další látky přítomné v menších či stopových množstvích jsou K_2CO_3 , $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO})_3$, KAlSi_3O_8 . MgO byl zjištěn v popeli z kůry spálené při 700°C . [14]

3.3.2 Metody analýz popela

Skenovací elektronové mikroskopie:

Novou část dějin mikroskopie otvírá německý vědec Ernst Ruska (1906 – 1988), vynálezce elektronového mikroskopu, přesněji řečeno transmisního elektronového mikroskopu (TEM). Toto zařízení umožňuje zvětšení výrazně překračující možnosti optického mikroskopu, který je limitován délkou světelného paprsku ($400 - 600 \text{ nm}$). Jaký je princip elektronové mikroskopie? Světelné paprsky jsou zde nahrazeny svazkem urychlených elektronů, jehož vlnová délka, výrazně nižší než vlnová délka světla, je závislá na urychlujícím napětí (lze dosáhnout 6 pm). Skleněné čočky, regulující sbíhavost a rozbíhavost paprsku světla u optického mikroskopu, jsou zde nahrazeny elektromagnetickými čočkami. Každý TEM se z tohoto důvodu skládá z osvětlovací a zobrazovací soustavy, ze zdrojové a ovládací soustavy, doplněné o vakuovou trubici. Zjednodušený popis činnosti transmisního elektronového mikroskopu pak vypadá takto: zrychlený, usměrněný proud elektronů emitovaný zdrojem je veden vakuem a probíhá tenkým mikroskopovaným vzorkem - zde se využívá toho, že se část elektronů odráží od atomů a molekul tvořících hmotu vzorku. Jejich opětovným soustředěním pomocí magnetové čočky se vytváří „stínový obraz“ mikroskopovaného vzorku.

K jeho zviditelnění se u zdokonalených typů elektronových mikroskopů využívá stejného principu, na jehož základě vzniká obraz na monitoru počítače. Tento mikroskop, umožňující do té doby nevídané zvětšení, začal jako první ve své vědecké práci uplatňovat. Výsledný obraz, jehož lze docílit transmisním elektronovým mikroskopem, může být až stotisíckrát větší než pozorovaný předmět. Podle způsobu zobrazování se elektronové mikroskopy dnes dělí na transmisní, emisní a odrazové (v praxi málo používané) a novější řádkovací (skenovací či rastrovací). Není jistě nutno zvlášť zdůrazňovat, že se elektronový mikroskop stal cenným nástrojem v řadě vědeckých odvětví, od mikrobiologie a medicíny po fyziku a technologii materiálů. Díky němu byly s vysokou rozlišovací schopností studovány jednotlivé části buňky i pochody, které v nich probíhají, stejně jako např. povrch a struktura krystalů řady materiálů. [15]

Rentgenová difrakční analýza:

Rentgenová difrakční analýza je metoda založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v pružném (bezfotonovém) rozptylu. Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické fázi dochází po rozptylu a následné interferenci rentgenového záření ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Studium tohoto difrakčního obrazce pak umožňuje zpětně studovat krystalické složení vzorku a jeho mikrostrukturu. Rentgenová spektrální analýza je metoda založená na interakci rentgenového záření s elektrony atomů spočívající v absorpci fotonu rtg záření, excitaci elektronu zpravidla z K-té hladiny do nejvyšší volné hladiny a následující přechod atomu z tohoto excitovaného stavu do základního za postupného vyzáření charakteristických fotonu K-té, L-té atd. série daného atomu.

Metoda je schopna podávat prvkové složení jak pevné, tak kapalné fáze. Elektronová mikroanalýza (SEM, EPMA) je metoda založená na interakci elektronů se vzorkem (vodivým) s následnou detekcí sekundárních elektronů SE (morfologie povrchu), detekcí zpětně odražených elektronů BSE (kontrast daný složením vzorku) a detekcí charakteristického rtg záření EDS či WDS (chemická analýza). Metoda je schopna podat vizuální obraz zkoumaného objektu, prostorové rozložení fází a jejich prvkové složení v objektech velikosti řádově mikrometrů. Elektronová difrakce zpětně odražených elektronů umožňuje stanovit fázové složení na vyleštěných vzorcích. [16]

3.4 URČENÍ TEPLOT TÁNÍ POPELA

Tání popela probíhá v širokém intervalu teplot jdoucích až po hodnoty přesahující 1500°C u šťovíku. Tento interval je charakterizován teplotami měknutí, tání a tečení. Tyto teploty jsou důležité pro provoz topenišť, jelikož podle nich je možné určit, jak vysoké mohou být spalovací teploty v ohništi, aby nevznikly poruchy ve funkci spalovacího zařízení. Poruchy mohou být způsobeny roztavením popela na roštu a zalitím mezer v roštu struskou, nalepováním měkkých popelových částic na stěny ohniště nebo tvořením nánosů. Dále dochází k nalepování sklovitého nápeku na keramické součásti vnitřního zařízení kotle. Údaje z analýz popelů ukázaly, že mezi látky v něm obsažené patří zejména draslík a vápník. Podle chemického složení se jeví popele jako nízkotavitelná skla. Orientační zkoušky ukazují teplotu vzniku skelného nápeku na žáruvzdorné vyzdívce již při teplotách okolo 1000°C. Určení těchto teplot probíhá podle ISO 1171 a je rovněž popsána v ČSN ISO 540.

Hodnocené teploty u popela:

- Teplota měknutí [°C] je dolní mez intervalu tavitelnosti popela
- Teplota tání [°C] se může nacházet kdekoliv v rozmezí intervalu tavitelnosti popela, ale vyšší než teplota měknutí. Je závislá na složení popela a na okolní atmosféře ve spalovacím prostoru
- Teplota tečení [°C] je horní mez intervalu

Teploty měknutí a tání některých paliv jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Teploty tání a měknutí některých popelů [13]

Palivo	Teplota měknutí [°C]	Teplota tavení [°C]
Dřevo	1150	1170
Šťovík	1255	1280
Šťovík + chrastice 1:1	860	905
Šťovík + piliny 1:1	875	920
Obilné zbytky	980	1035
Řepková sláma + uhlí 9:1	1225	1315
Seno	1080	1170

4. ŽÁROVZDORNÉ VYZDÍVKY

Žárovzdorné stavební konstrukce tvoří velmi důležitou součást pracovních částí pecí a kotlů. Pro zhotovování vyzdívek se využívá celá škála žáromateriálů. Od klasických pálených, přes netvarové a tvarové žarobetonu až po různé druhy izolací. Tyto materiály jsou využívány v řadě zařízení jako například u energetických kotlů, spaloven odpadů, topenišť - hořákové kameny plynových a olejových kotlů, náletové stěny fluidních kotlů, tvarovky kotlů na spalování biomasy, vyzdívky dřevokotlů, tvarovky různých malých topenišť, vyzdívky kremačních pecí atd. Je zřejmé, že vyzdívky jsou ve svém použití velice rozmanité a jejich rozčlenění pro spalovací zařízení vypadá nejlépe při rozdělení dle výkonu do tří skupin.

a) Malá (výkon do 200 kW): Převážně se jedná o teplovodní kotle pro vytápění rodinných domů nebo menších budov. Konstrukčně jsou řešeny jak pro přímé spalování biomasy, tak pro prvotní zplyňování a následné spalování dřevoplynu. Po stránce vyzdívek se jedná především o tvarový materiál. Vzhledem ke komplikovaným tvarům převládají žarobetonové tvarovky, především u zplyňovacích kotlů.

b) Střední (výkon 200kW až 2MW): Z hlediska výkonu se jedná o zařízení určena převážně pro vytápění velkých obytných budov, průmyslových objektů nebo obytných částí vesnic nebo měst. Jsou řešena především pro přímý ohřev, ale v této výkonové skupině se začínají objevovat i zplyňovací zařízení ve spojení s kogenerační jednotkou. Vyzdívky jsou opět řešeny z tvarovek, pro jednoduché tvary z pálené keramiky a tvary komplikované ze žarobetonových tvarovek.

c) Velká (výkon nad 2 MW): Zde již převažují klasické teplárenské a elektrárenské kotle určené pro výrobu páry pro pohon parní turbíny nebo vytápění. Konstrukce vyzdívek vychází z typu a velikosti zařízení, zde již nabývají na významu monolitické žarobetonové vyzdívky instalované přímo na místě.

4.1 POŠKOZENÍ VYZDÍVEK KOROZÍ TAVENINOU POPELA

Převážná část ze zbytků biopaliv jako jsou obilná sláma tvoří nízkotavitelné látky s vysokým podílem sloučení alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Pokud jsou v tepelném zařízení ve formě taveniny tak reagují velmi agresivně s keramickou žárovzdornou vyzdívkou. Ta je pak v poměrně krátkém čase poničena. V Tab.4 je uvedeno chemické složení nalepené hmoty na poškozených vyzdívkách nebo zkorodované vrstvy.

Tab. 12: Chemické složení nálepu a korodované vrstvy vyzdívky (hm. %) [10]

Popel	Kotel na slámu-nálepek na vyzdívce	Zplyňovací kotel na dřevonálepek na vyzdívce	Kotel na dřevní odpad-nálepek na vyzdívce	Kotel na dřevonálepek na vyzdívce	Kotel na dřevonekorod. vyzdívka	Kotel na dřevonkorodovaná vyzdívka
SiO ₂	6.1	7.0	36.2	19.4	47.8	39.8
TiO ₂	0.2	0.1	4.6	0.4	1.0	0.8
Al ₂ O ₃	5.0	0.8	27.1	22.4	46.5	39.9
Fe ₂ O ₃	0.5	0.7	1.8	1.5	1.3	0.8
CaO	47.3	4.8	14.2	30.2	1.5	3.0
MgO	4.3	15.9	3.9	2.0	0.2	0.2
K ₂ O	24.6	34.9	10.6	14.8	1.1	8.6
Na ₂ O	0.6	0.3	0.4	0.2	0.2	0.1
Σ	88.1	64.5	98.8	90.9	99.6	93.2

Při výrobě vyzdívky a pro dosažení dlouhé životnosti je základním požadavkem udržet teplotu v místě, kde spalujeme palivo pod bodem měknutí popela, ten je pak tvořen jen velmi viskózní hmotou, kdy platí že s rostoucí teplotou nám klesá viskozita taveniny, ale roste nám rychlost koroze žárovzdorného materiálu. Tuto podmínku ale nejde vždy splnit, například z konstrukčních důvodů a nelze tak z topeniště odstranit všechna místa se zvýšenou teplotou. To může způsobit i rozdílná kvalita ve výhřevnosti paliva. Při skladbě vyzdívky se volí žárovzdorné materiály s vyšší odolností proti korozi taveninám. Metody pro testování žáromateriálu vůči korozi jsou dvě. Kelímkový a prstový test.

a) Kelímkový test (dle DIN 51069)-je normovaný. Použitelnost tohoto testu naráží v praxi na některé nedostatky. Může zde dojít k nasycení korozního média zkorodovaným žáromateriálem, protože při této zkoušce je poměrně malý poměr mezi množstvím korozního média a povrchem zkušební vzorku. Při zkoušce chybí pohyb korozní lázně. [10]

b) Prstový test – je bližší použití v praxi. I přes vyšší náklady na zkoušky převažují její přednosti: - vyšší poměr mezi množstvím korozního média a povrchem zkušební vzorku
- odsun uvolněných látek z reakční zóny
- dobrá možnost hodnocení z hlediska techniky měření.

Použití prstové metody dáváme přednost. Samotná zkouška je velmi jednoduchá. Máme žárovzdorné tělísko částečně ponořené do taveniny popela. Při vyhodnocení zkoušek vycházíme z úbytku plochy řezu v daném žáromateriálu. Úbytek hodnotíme v místě hladiny a pod hladinou. Hodnocení probíhá i po vizuální stránce, kdy se zkoumá vzhled kontaktní vrstvy. Vývoj v této oblasti stále probíhá, po laboratorním vyhodnocení nastupují dlouhodobé zkoušky v provozních zařízeních. Při výběru vhodného žárobetonu se musí zvažovat i ekonomické hledisko, protože korozi odolnější vyzdívky jsou na bázi výrazně dražších surovin. Materiály, které jsou nejvíce odolné proti roztaveným popelům jsou žárobetonové směsi, převážně typu ULCC, vysocehlinité, s podíly zirkonia a případně oxidu chromitého. [10]

Tab.13: Žárobetony odolné proti korozi roztavenými popely [10]

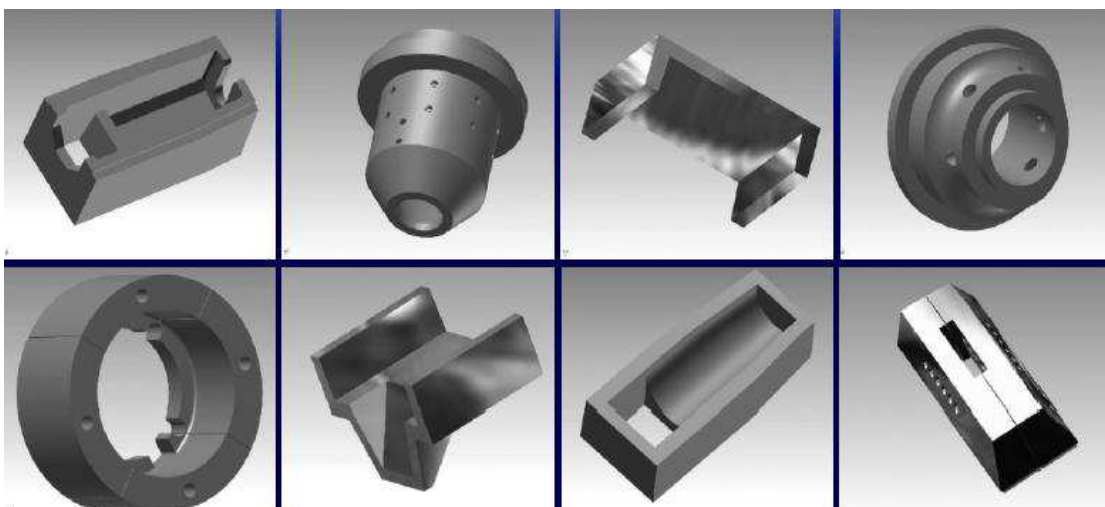
		ULTRABET 1700-ZM	MASSE X-6	FLOBET 1600-MZ
Materiálová báze		zirkonmullit, mullit	zirkonmullit	Vysoce hlinitý šamot,zirkon
Obsah Al_2O_3	[%]	63	53	52
Obsah SiO_2	[%]	24	15	21
Obsah CaO	[%]	0.7	0.7	1.5
Obsah ZrO_2	[%]	9.8	29	11
Klasifikační teplota	[°C]	1700	1700	1600
Rozdělovací voda	[l/100kg]	4.0-4.6	5.0-5.5	5.0-5.5
Obj. hmotnost 110°C	[kg/m ³]	2640	2940	2780
800°C	[kg/m ³]	2610	2900	2740
1500°C	[kg/m ³]	2610	2900	2620
Pevnost v tlaku 110°C	[Mpa]	50	30	80
800°C	[MPa]	70	40	90
1500°C	[MPa]	120	100	110
Zd. Pórovitost 800°C	[%]	11	16	14
1500°C	[%]	14	17	16
Trvalé dél.zm. 800°C	[%]	-0.1	-0.2	-0.3
1500°C	[%]	-0.3	±0.2	0.9

4.2 POŠKOZENÍ VYZDÍVKY PRUDKOU ZMĚNOU TEPLoty

Vlivem teplotních rozdílů působících na vyzdívku dochází k rozšiřování již vzniklých prasklin a k postupné destrukci žáruvzdorného materiálu a degradaci jeho vlastností. Tento problém nebudí velké obavy u výkonově větších kotlů spalujících biomasu, ale jedná se hlavně o kotle menších výkonů. Zařízení s velkým výkonem většinou pracují v nepřetržitém provozu a tak zde neprobíhají velké teplotní výkyvy. Další věcí je podstatně větší objem a tloušťka vyzdívky, která teplo akumuluje a tak při případné odstávce dochází k pomalejšímu chladnutí a uvolňování napětí. Daleko větším problémům jsou vystaveny výkonově menší agregáty, zejména se jedná o zplyňovací zařízení. Spalování dřevoplynu je velmi často přerušovaný proces, což vede ke značnému kolísání teplot v topeništi. Teplotní výkyvy jsou v řádech stovek °C během krátkého časového intervalu. Mohou být během dne odstaveny i na několik hodin a dojde k výraznějšímu poklesu teplot vyzdívky. Takže vypínání a zapínání má jistě neblahý vliv na stav vyzdívky.

Další problémy mohou být způsobeny samotným tvarem vyzdívek obr.8. Mnohdy jsou navrhovány komplikované tvary, aby se výrobcům kotlů podařilo dodržet emisní limity a

dobrou účinnost. Bohužel jsou tvarovky vyráběny často jen odlitím žárobetonové směsi. Do materiálu jsou tak pro zlepšení jeho žáruvzdorných vlastností přidávány drobné jehličky z žárovevých ocelí. Tyto jehličky se nazývají rozptýlená výztuž.



Obr.7 Komplikované tvarovky vyzdívek [10]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části diplomové práce jsem se zabýval ověřením jednotlivých metod spalování na vlivu teploty spékání popelovin. Ověřování spočívalo v porovnání a zjištění teplot deformace, měknutí, tání a tečení u vybraných druhů biopaliv. Jednalo se o šťovík, dřevo a slámu. Jako první byl zkoušen parametr vlivu rozdílné teploty při spálení paliva na výše uvedené teploty. Teploty spalování byly 400°C, 600°C a 800°C. Vzniklý popel se spěchoval do zkušebního vzorku buďto ručním lisem nebo v laboratorním lisu BSL - 2 – FR a zahříval v pozorovací peci. Dle normy ČSN ISO 540 je několik druhů tvaru zkušebního tělesa a to: jehlan, krychle, válec a komolý kužel. Při tomto měření se zkoušely určit teploty deformace, měknutí, tání a tečení pomocí vyhodnocení ze zhotovených fotografií. Ty byly zaznamenány v průběhu každého měření v závislosti na změně tvaru pozorovaného tělíska vyhodnoceny a byl zpracován protokol o provedeném měření. Jako další parametr zkoumání byla pozorována rychlost ohřevu vzorku popela v pozorovací peci, ty byly zvoleny 5°C/min a 20°C/min. Rozdíl teplot byl zvolen v dostatečném rozsahu od sebe, pro případné lepší rozlišení vlivu na hodnoty teplot. Jako poslední byl zkoumán vliv teploty v pozorovací peci na dva vzorky téhož popela a určení teploty, kdy se k sobě přilepí. Tímto pokusem jsme se snažili zjistit, při jaké teplotě dojde k nalepování popela při spalování v místě ohniště jak u kotlů tak při zplyňování, kde se rovněž v hojné míře využívá biopaliv.

5.1 NORMA ČSN ISO 540

Mezinárodní organizace pro normování ISO je celosvětovou federací národních normalizačních orgánů. Mezinárodní normy jsou připravovány technickou komisí ISO. Mezinárodní organizace též úzce spolupracuje s Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) ve věcech týkajících se normalizace v elektrotechnice. Nové návrhy ke schválení nových mezinárodních norem jsou přijaty technickými komisemi a rozeslány členům ISO. Pro vydání mezinárodní normy je třeba 75% souhlas členů při hlasování o zařazení normy. „Mezinárodní norma ISO 540 byla vypracována technickou komisí ISO/TC 27 Tuhá paliva SC 5 *Metody analýz*.“. Specifikací této normy je stanovení charakteristických teplot tání popela tuhých paliv. [18]

5.1.1 Definice teplot

- Teplota deformace : v důsledku tání nastávají první příznaky zaoblení hrotu nebo okrajů zkušebního tělesa způsobené táním
- Teplota měknutí : projevuje se tím, že okraje zkušebního tělesa tvaru krychle nebo válce jsou již zcela zaobleny, ale nedochází ke změně výšky vzorku
- Teplota tání : při této teplotě vznikne ze zkušebního tělesa přibližně polokoule, kde její výška je třetina výšky zkušebního tělesa při teplotě tání
- Teplota tečení : popela se na podložce zcela rozteče ve vrstvě o výšce třetiny zkušebního tělesa při teplotě tání



Obr.8 Vzorky popela šťovíku a slámy při teplotě tečení (zahřáté na 1500°C)

Jak je na obou vzorcích jasně viditelné, má teplota tavení pro rozdílné materiály naprosto jiné vlastnosti. U vzorku vlevo (šťovík) si zachoval skoro původní tvar a došlo jen ke smršťení, vzorek vpravo (sláma) se při stejné teplotě zcela roztekl.

5.2 PŘÍPRAVA VZORKU POPELA DLE ČSN ISO 540

Příprava vzorku popela probíhá podle normy ČSN ISO 540, je potřeba zajistit dokonalé spálení paliva. Popel se v misce rozetře pro co největší množství částic (zrn do 0.075mm, aby se maximalizoval počet částic ve vrcholu zkušebního tělesa. Vhodné množství popela se buďto navlhčí destilovanou vodou nebo adhezním roztokem dextransu. Roztok je připraven z 10g dextransu ve 100ml vody. Vše se rozmíchá v pastu a vtlačí do formy. Pro snazší vyjmutí popela z formy se může forma vymazat tenkou vrstvou vazelíny. Forma se naplní a před vyjmutím se nechá tělísko viditelně oschnout. Po vyjmutí by mělo být tělísko připevněno pastou z popela na připravenou podložku tak, aby se nepoškodily jeho ostré hrany. Poté by mělo být prověřeno optickým zařízením a pokud nemá ostré hrany, mělo být vyraženo. Tělísko je pak zahříváno v pozorovací peci do okamžiku jeho vyschnutí a potupně se z něho dostane všechna organická hmota. [18]

5.3 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

Elektricky vyhřívaná pícka

- musí dosáhnout maximální teplotu, při které se mají vlastnosti popela stanovit
- musí poskytovat odpovídající pásmo rovnoměrné teploty v níž se zahřívá zkušební tělísko
- musí zajistit zahřívání zkušebního tělíska stejnou rychlostí od 815°C
- musí být schopna udržovat požadovanou zkušební atmosféru okolo zkušebního tělíska
- musí být zajištěno pozorování změn tvaru zkušebního tělíska při měření

Pyrometr s termočlánkem platina/platina- rhodium

Formička z mosazi, korozivzdorné oceli nebo jiného materiálu vhodného pro přípravu zkušebních tělísek

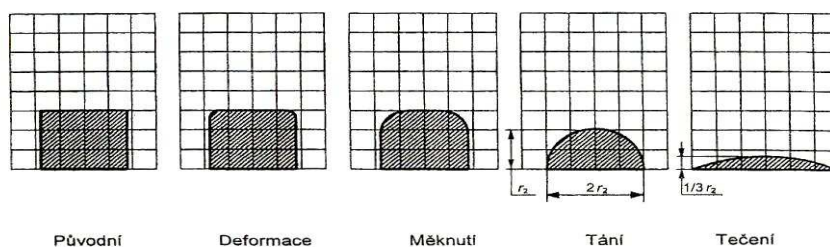
Podložka pod zkušební tělísko z materiálu, jež se nedeformuje ani nereaguje nebo neabsorbuje popela během procesu, použitý materiál byla platina 2.5x2.5 cm

Optický přístroj pro umožnění pozorování vzorku během stanovení, byl použit fotoaparát [18]

5.4 TVAR ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Pro porovnání je třeba splnit podmínku o ostrých hranách zkušebního tělíska, není to bezpodmínečně nutné, ale je to vhodné pro snazší vizuální pozorování jednotlivých fází vzorku při ohřevu. Jako zkušební tělesa jsou brány tvary:

- Jehlanu se základnou rovnostranného trojúhelníka, výška tělesa do 20mm
- Váleček o průměru 3 až 9mm a stejné výšce
- Komolý kužel o výšce 4mm průměrem základny 3mm a horní plochy 1.5mm
- Krychlička o rozměrech stran 3 až 7mm



Obr. 9 Charakteristické tvar zkušebního tělesa tvaru krychle nebo válce [18]

5.5 PROTOKOL O ZKOUŠCE

Pro vyhodnocení každého měření bylo využito počítačového programu Mikroskop. Teploty byli zaznamenány a dle charakteristických tvarů zkušebního tělesa (Obr. 12) vyhodnoceny do výsledného protokolu. Dle normy ČSN ISO 540 musí protokol o zkoušce obsahovat:

- 1) Identifikaci o zkoušeného produktu
- 2) Odkaz na použitou metodu
- 3) Teplotu deformace, zaokrouhlenou na nejbližších 10°C
- 4) Teplotu měknutí, zaokrouhlenou na nejbližších 10°C
- 5) Teplotu tání, zaokrouhlenou na nejbližších 10°C
- 6) Teplotu tečení, zaokrouhlenou na nejbližších 10°C
- 7) Typ atmosféry (redukční nebo oxidační)
- 8) Jakékoliv neobvyklé skutečnosti zaznamenané během stanovení
- 9) Jakékoliv operace nezahrnuté v této mezinárodní normě [18]

5.6 POSTUP LABORATORNÍHO OVĚŘOVÁNÍ

Při laboratorním ověřování teplot měknutí, tání a tečení popela je nutno se řídit podle zvoleného postupu. V první řadě jsme provedli výběr tří paliv, které budeme v experimentální části zkoumat. Jedná se o slaměné, šťovíkové a dřevěné palivo dodané ve formě pelet.



Obr.10 Pelety slámy, dřeva a šťovíku

Pelety jsme před každým spálením v peci důkladně podrtili. Jako vhodný nástroj se zde osvědčily kombinační kleště. Při spalování jak nadrcených tak i celých pelet se neprokázal žádný velký rozdíl ve vzniklém popelu, pro prohrabávání při spalování by měl být používán zlatý drátek dle normy ISO 1171, při našem měření jsme tento drátek neměli k dispozici tak bylo použito nerezového drátu. Před samotným spálením proběhlo zvážení vzorku paliva na digitální váze EXPLORE PRO EP 114C s maximální zátěží 110g. Hodnot z digitální váhy bylo využito pro stanovení popelnatosti každého paliva. Pro spalování vzorků paliva byla použita pec VEB ELEKTRO o výkonu 2.8kW a maximální teplotě pro spalování 1200°C což pro naše měření zcela stačilo. Dle normy ISO 1171 byla vždy používána teplota spalování paliva 550°C. Při našem měření jsme zvolili tři různé teploty 400°C, 600°C a 800°C. Z popela byly následně vylisovány vzorky pro natavení v pozorovací peci CLASIC 1500 314695. Vylisovaný vzorek byl umístěn na platinovou destičku o rozměrech 2.5 x 2.5 cm. Zde jsme se rovněž rozcházel v našem postupu s normou ISO 1171 o přípravě vzorku, jelikož byl popel rovnou lisován v příslušném zařízení a vazelínu jsme nebyli nuceni vůbec používat. Ve většině případů šel popel snadno vyjmout z lisu a byl po vizuální kontrole po většinou shledán vhodným pro další část experimentu. Problém nastával pouze u popela z dřevěných pelet spálených při 400°C, kdy se jevil jako značně sypký pro lisování, v tomto případě byla použita pro jeho dobré formování destilovaná voda, potřebné množství bylo asi jedna kapka. Při zahřívání v pozorovací peci docházelo k jeho dodatečnému spalování, takže vzorky dřeva byli obecně problematické k pozorování. Destička se vzorkem vylisovaného popela byla umístěna na keramickou misku. V předchozích měřeních bylo použito misky z kovu, ten se však díky vysoké teplotě vyloženě zapekl do podkladu na němž

byl zasunut do pece, tím se ukázala jeho nevhodnost a volba tak padla na keramický materiál. Vše bylo zasunuto do pozorovací pece. Zde se popel zahříval z pokojové teploty až na hodnoty 1500°C a pomocí fotoaparátu byli snímány a foceny jednotlivá stádia vzorku jak se mění jeho tvar v závislosti na teplotě. Při zahřívání byla pozorována různá stádia změn tvaru. U některých popelů docházelo k napučání vzorku, nebo naopak k jeho smrštění a zachování si svého původního tvaru. Probíhali deformace či úplné změny tvaru kdy se pozorovaný vzorek téměř roztekl či se úplně spekl do malého kousku. Pozorovány byly různé podmínky, při nichž byl popela zahříván. Bylo zkoušeno pozorovat změny fází zkoumaných popelů v závislosti na teplotách spálení v peci a rovněž rozdílná rychlost zahřívání v pozorovací peci. Zkoumání byl rovněž podroben materiál paliv z hlediska nalepování. Vzorky připraveny pomocí ručního lisu, kde tlak dosahoval hodnot přibližně 1MPa. Ruční lis a pozorovací pec jsou na Obr.11.



Obr.11 Ruční lis vlevo a pozorovací pec vpravo

Po zahřátí v pozorovací peci do hodnot roztavení vzorku následuje jejich vyhodnocení dle normy ISO 540 a uložení vybraných fotografií do protokolu o měření. Všechna měření jsou zaznamenána a fotografie pořízené z měření sloužili k vyhodnocení různých faktorů při vyhodnocení měření.

5.7 NĚKTERÉ VLASTNOSTI ZKOUMANÝCH PALIV

Naměřené hodnoty vycházejí z hodnot přípravy vzorků pro spalování. Zde jsou podrobnosti o jednotlivých vybraných vlastnostech paliv.

Obsah vody: Je jednou ze základních charakteristik tuhých paliv. Vlhkost paliva je do určité míry nežádoucí vlastností se kterou se potýkáme. Je zde ale i malá výhoda v tom, že oproti snižování například energetické hodnoty paliva. Malý obsah vlhkosti může někdy působit i blahodárně na rychlost hoření nebo teplotu v kotli. Vlhkost závisí na druhu paliva, místě jeho zisku, jeho úpravě... Hodnoty obsahu vlhkosti v palivu se u biomasy pohybují ve značném rozsahu při minimální hodnotě alespoň 10% až po hodnoty 50% u mokrého dřeva.

Popelnatost: Udává nám, jaké procento hmotnosti dostaneme po dokonalém spálení. Popel vzniká z minerálních složek obsažených ve spalovaném palivu, které se nazývají popeloviny. Při spalování paliva se popeloviny teplem rozkládají v oxidační atmosféře a těkavé podíly přecházejí do spalin. Popel je tedy netěkavá součást popelovin. Popel je stejně jako voda nežádoucí složkou paliva, jak z hlediska výhřevnosti, tak z hlediska chování paliva.

Výhřevnost: Je vlastnost paliva udávající množství energie po dokonalém spálení paliva bez kondenzace vodních par ve spalinách. Proti spalnému teplu není v hodnotě výhřevnosti zahrnuto měrné skupenské teplo páry, obsažené ve spalinách. Předpokládá se, že její teplo uniká v plynném stavu se spalinami.

Spalné teplo: Udává takové množství energie uvolněné při dokonalém spálení paliva. Ale vodní pára zkondenzuje a energii chemické reakce není třeba redukovat o její skupenské teplo. O tuto hodnotu je energie spalného tepla vyšší než výhřevnosti.

Tab.14 Vlastnosti paliv

Palivo	Popelnatost [%]	Obsah vody [%]	Hustota [Kg/m ³]	Výhřevnost [MJ/Kg]	Spalné teplo [MJ/Kg]	Sypná hmotnost [g/l]
Sláma	5.0	7.8	1150.9	15-17.5	16.7	308.5
400 °C						
600 °C	6.6					
800 °C	6.1	7.3	1273.9	16.9-19	18.2	642.3
Dřevo	7.8					
400 °C						
600 °C	4.1					
800 °C	2.9	9.5	1129.2	14.9	16.3	664.3
Šťovík	6.2					
400 °C						
600 °C	7.3					
800 °C	5.1					



Obr. 12 Spalovací pec a vzorky popela

5.8 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Tabulky 15 a 16 ukazují porovnání teplot deformace, měknutí, tání a tavení zkušebních vzorků paliva při dané teplotě spálení 400°C, 600°C a 800°C ve spalovací peci a rychlosti ohřevu v pozorovací peci 5°C/min a 20°C/min. Výchozí teplota pro pozorovací pec byla vždy 700°C pro původní tvar u každého paliva. Vzorky slámy byli velice dobře pozorovatelné a každé ze stádií změn tvaru byla jasně viditelná od teploty deformace po teploty tečení. U vzorku dřeva byli poměrně dobře rozpoznatelné teploty deformací a měknutí, teploty tání s tečením už hůře.

Tab.15: Rychlost ohřevu 5°C/min

Palivo	Teplota spálení vzorku [°C]	Charakteristické tvary zkušebního tělesa při teplotách				
		Původní	Deformace	Měknutí	Tání	Tečení
Sláma	400	700	830	875	1195	1270
	600		850	890	1185	1290
	800		875	915	1200	1320
Šťovík	400	700	1320	1175		
	600		1210	1210		
	800		1340	1230		
Dřevo	400	700	965	1040	1210	1380
	600		950	1135	1290	1380
	800		975	1185	1300	1450

- Dochází pouze ke změně objemu, tvarové deformace nejsou dost dobře pozorovatelné

U vzorku popela ze šťovíku nebylo možno rozpoznat hranice pro určení teplot tání a tečení z materiálu pořízených fotografií. Nebyla patrná změna tvaru zkoušeného tělesa dle normy ČSN ISO 540. Velmi dobře rozpoznatelná změna tvaru byla při určení teplot deformace a měknutí, ale při dalším pozorování a porovnávání vzorků dle normy už nenásledovala další změna. Došlo pouze ke smršťení vzorku.

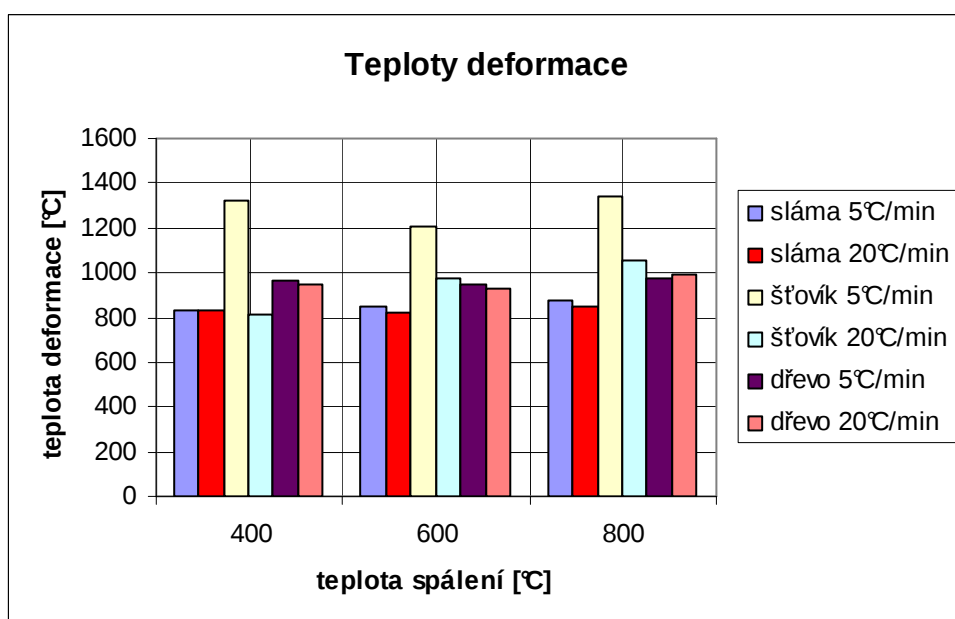
Tab.16: Rychlost ohřevu 20°C/min

Palivo	Teplota spálení vzorku [°C]	Charakteristické tvary zkušební tělesa při teplotách				
		Původní	Deformace	Měknutí	Tání	Tečení
Sláma	400	700	835	935	1180	1250
	600		820	925	1220	1290
	800		850	940	1270	1300
Šťovík	400	700	810	1260		
	600		975	1250		
	800		1055	1300		
Dřevo	400	700	950	1215	1315	1430
	600		930	1100	1305	1415
	800		990	1085	1295	1400

- Dochází pouze ke změně objemu, tvarové deformace nejsou dost dobře pozorovatelné

Stejně závěry jako z měření při rychlosti ohřevu 5°C/min byli vypořádováni i z měření při rychlosti 20°C/min. Pozorované vzorky téhož materiálu se chovali poměrně stále při obou rychlostech ohřevu.

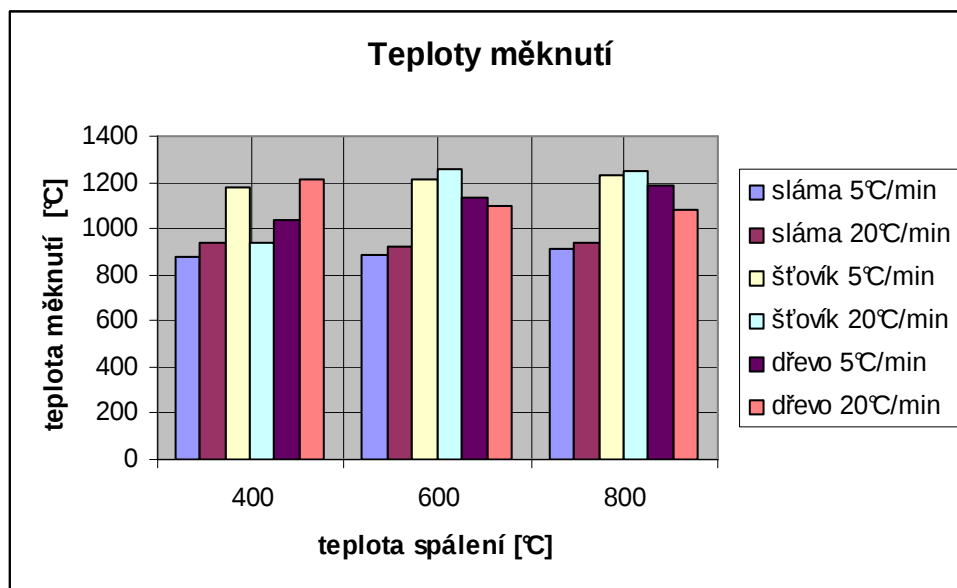
5.8.1 Porovnání teplot deformace při rychlostech ohřevu 5 a 20°C/min



Graf 4: Teploty deformace popela

Jak je vidět z hodnot teplot deformace jsou teploty u slámy přibližně na stejných hodnotách mezi 800 až 850 °C při obou rychlostech spalování popela. U šťovíku jsou teploty poměrně rozdílné, kdy při rychlosti spalování 5°C/min jdou od 1210°C až po 1340°C kdežto při rychlosti 20°C/min jsou mnohem níže. Od 810°C po 1055°C, což je skoro o 400°C nižší teplota začátku deformace a přibližně stejná jako teplota deformace popela ze slámy. U dřeva jsou teploty v rozmezí teplot 950°C až 990°C při obou rychlostech spalování, takže nenastal poměrně žádný rozdíl v pozorovaných teplotách, stejně jako u slámy.

5.8.2 Porovnání teplot měknutí při rychlostech ohřevu 5 a 20°C/min

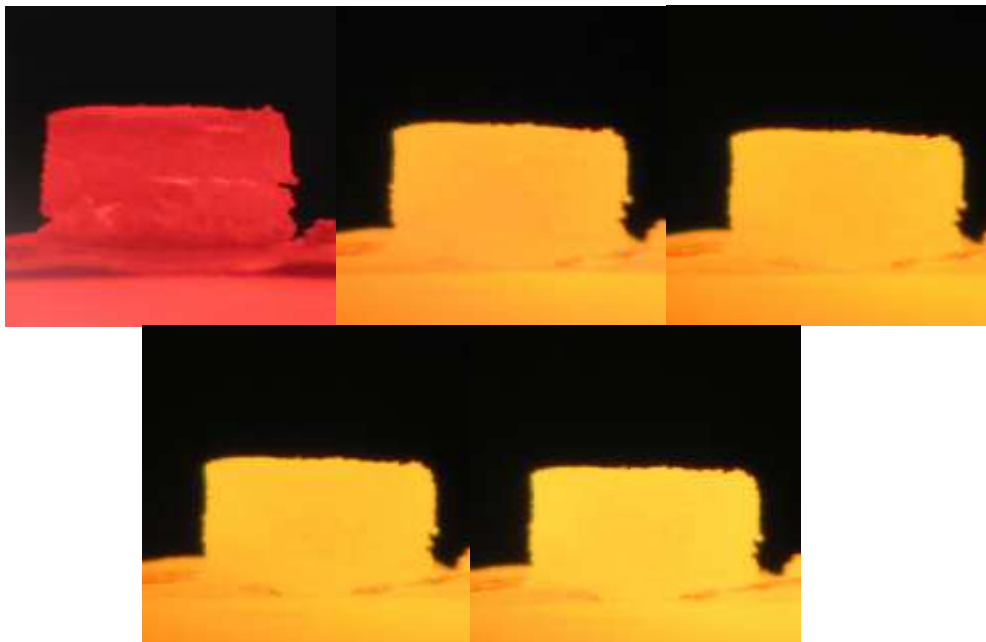


Graf 5: Teploty měknutí popela

Teploty měknutí jsou u slámy spálené rychlostí 5°C/min asi o 30°C níže než při rychlosti 20°C/min. Tedy žádný velký rozdíl. U šťovíku se pohybují teploty měknutí při rychlosti spalování 5°C/min od 1175°C do 1230°C a při rychlosti 20°C/min od 1260°C po 1300°C. Při této rychlosti spalování mají teploty měknutí vyšší hodnoty. U dřeva jsou teploty v rozmezí 1040°C až 1200°C pro obě rychlosti spalování. Vlivu rychlosti ohřevu popela 20°C/min a 5°C/min na teploty deformace, měknutí, tání a tečení se z výsledných teplot nezdá být podstatným.

5.8.3 Šťovík

Jeví se jako teplotně velmi stálý materiál, změna objemu přichází od teplot 700°C k hodnotám okolo 1150°C, jinak nejsou pozorovány výrazné změny dle normy ČSN ISO 540. Teploty měknutí lze pozorovat obtížně, teploty tání a tečení nelze téměř určit.

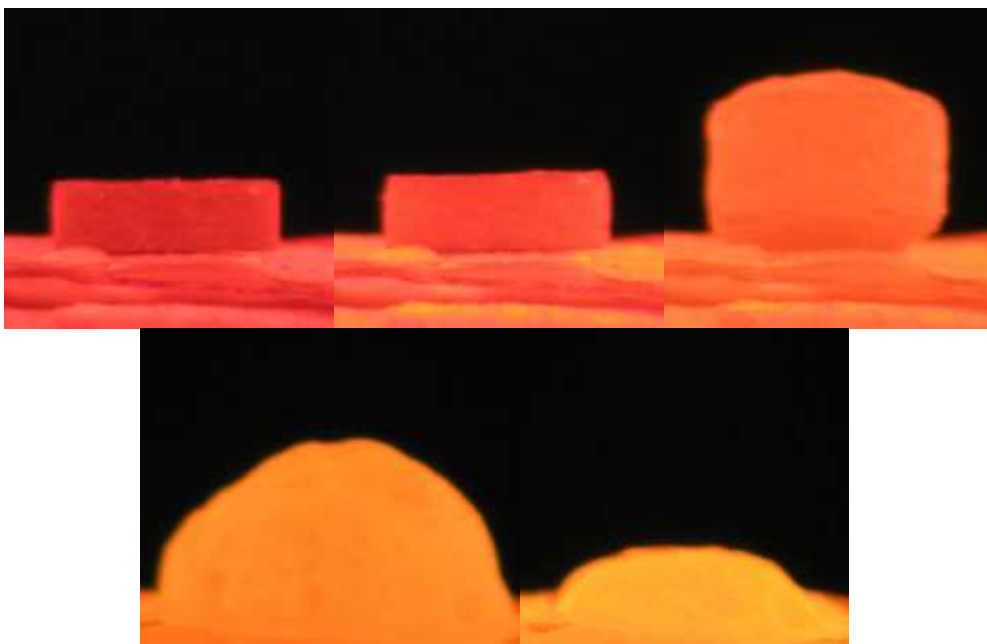


Obr.14 Teploty řazené za sebou: původní, deformace, měknutí°C, 1450°C, 1500°C

Jak je jasně vidět, určit teploty měknutí, tání a tečení je velice obtížné a obrázky posledních tří teplot se v zásadě neliší. Změna tvaru přišla defakto jen při teplotě deformace, ale ani zde nebyla změna tvaru nijak zásadní dle charakteristických tvarů zkušebního tělesa. Byli jsme omezeni teplotou 1500°C kterou bylo možno dosáhnout v pozorovací peci do níž jsme vzorky vkládali. Při zahřátí na vyšší teploty by se změny možná projevili. Pak by teploty tání a tečení bylo možno popřípadě určit s daleko větší přesností. Dle nových informací získaných po měření se jako teplota měknutí bralo, když začala probíhat výraznější změna objemu. Tato informace nebyla uvedena v normě ČSN ISO 540.

5.8.4 Sláma

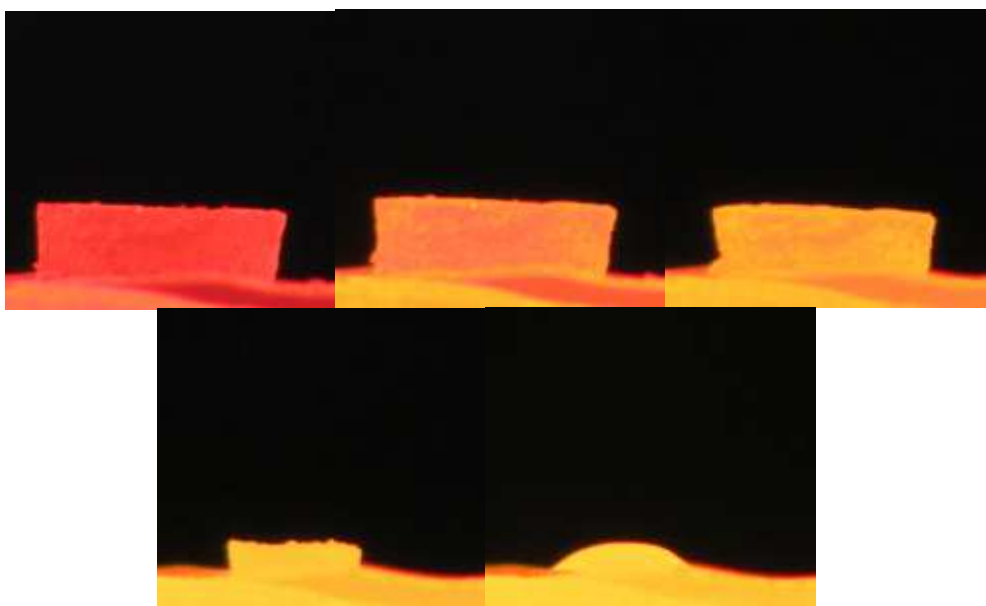
U slámy je vizuální pozorování poměrně snadné a dobře rozpoznatelné. Teploty jednotlivých fází jdou vzestupně od vzorků spálených při teplotě 400°C, kdy jsou nejnižší až po nejvyšší hodnoty u vzorků slámy spálených při 800°C. Je zde patrný mírný rozdíl teplot při rychlosti ohřevu 5°C/min, kdy jsou teploty vyšší oproti měření při rychlosti spalování v pozorovací peci při 20°C/min. Sláma se projevila jako dobrý pozorovací materiál, při zahřátí měnil vzorek značně svůj tvar.



Obr.15 Teploty: původní, deformace, měknutí, tání, tečení

5.8.5 Dřevo

Při měření jsme vypožorovali, že dochází zejména ke snížení objemu než k razantní změně tvaru, vzorek je při teplotách nad 1400°C již značně spečený a objemově zhruba na 10% původní velikosti.. Problematické bylo určování teplot jednotlivých deformací při vzorku spáleném při 400°C protože popel nebyl zcela vyhořelý a v pozorovací peci se ještě částečně spaloval. Vyhodnocené teploty měknutí a tání popela z experimentálního ověřování se liší od teoretických hodnot v Tab.3 Teploty tání a měknutí popela.



Obr.16 Teploty: původní, deformace, měknutí, tání, tečení

5.8.6 Spékání dvou vzorků popela

Jako další součást experimentální části měření jsme zkoumali při jakých teplotách se začnou spékat dva vzorky téhož popela vylišaného vzorku v pozorovací peci. Rychlost ohřevu byla 20°C/min. Vzorky byly zahřáty na hodnoty teplot pod bod deformace, čili dle Tab. 15 a 16 na hodnoty 20°C pod 700°C a pozorovali jsme při jaké teplotě se vzorky slepí k sobě. Jako optimální postup se osvědčil ohřev na zkoušenou teplotu a několika minutová výdrž. Oba vzorky byly posazeny na sebe a umístěny v pozorovací peci na platinovou destičku a zahřívány. Po dosažení teploty nad 700°C se po jemném postrčení horního z obou vzorků tenkým plechem se zjistilo, zda jsou k sobě oba kusy přilepené či nikoli. Když nikoli postupovali jsme v ohřevu na další vyšší teplotu. Jako vizuální znak slepení se ukázala ztráta linky, která tvořila hranici mezi oběma vzorky. Při spojení nedošlo ke změně tvaru, pouze ke spojení. Pozorování jsme podrobili vzorky slámy, šťovíku a dřeva. Uvedené teploty jsou v Tab. 17 a ukázkové fotografie slepených vzorků popela na Obr.17.

Tab.17 Teploty spečení

Vzorek	Teplota pozorovaného spečení [°C]
Sláma	780
Šťovík	720
Dřevo	Neurčeno

Vzorky dřeva se také měřily, ale stejně jako u předešlých měření dřevěného paliva se vzorek úplně rozpadl. Okamžik, při němž by se dala teplota spečení určit tak nebylo možné vůbec zachytit. Vzorky slámy a šťovíku byli snadno změřitelné a rovněž vyzkoumaná ztráta linky mezi oběma vzorky fungovala pouze u slaměného popela. U dřeva a šťovíku ne.



Obr. 17 Spečené vzorky popela slámy a šťovíku

Zkoušenou metodou jsme pozorovali, při jakých teplotách dojde ke slepení popela uvnitř spalovacího prostoru a ve velkých zařízeních pravděpodobně ke tvorbě větších kusů škváry. Výsledky teplot ukázaly, že teplota slepení je nižší než teplota deformace vzorků popela. Tím je vidět, že ke slepování dochází již za nižších teplot, než je teplota deformace popela. Určení těchto teplot může být vhodné pro informovanost provozovatelů při jakých teplotách již dochází ke slepování popela a tvorbě strusky. Pro určování teploty slepování popela jsme vycházeli z literární rešerše VUP Běchovice.

6. ZÁVĚR

V první část diplomové části jsem řešil rešerši teplot spékání popelu z biomasy. Nejprve bylo pojednáno co to vlastně biomasa je a jaké je její energetické využití jako paliva. Která paliva jsou náchylná ke vzniku příjemného nápeku na vnitřním zařízení kotle a charakteristické prvkové složení, které je ale do jisté míry ovlivněno dalšími aspekty. Zejména obsahem látek v půdě, které jsou poté obsaženy z části i v samotném palivu. Jedná se o draslík, křemík, vápník a fosfor a jejich vliv na samotné teploty spékání popela. Jsou hodnoceny teploty měknutí, tání a tečení popela. Paliva jako sláma nám pak tvoří sklovité povlaky uvnitř zařízení nepříjemné pro provoz topenišť. Prvkové složení jednotlivých popelů se zjistí díky metodám analýz popela (skenovací elektronová mikroskopie a rentgen difrakční analýzy).

Při experimentálním měření jsem se zabýval ověřením jednotlivých metod spalování a vlivu na stanovované teploty popela. Porovnali jsme jednotlivé teploty, kterých bylo u paliva dosaženo. Jako paliva bylo použito slámy, šťovíku a dřeva. Byl zkoušen vliv rozdílné teploty při spálení paliva na výše uvedené teploty. Měření a hlavně porovnání charakteristických teplot probíhalo podle normy ČSN ISO 540 a po každém z měření došlo k vytvoření protokolu o provedeném měření. Některé informace ale v normě uvedeny nebyly. Z normy ISO 1171 byla jako optimální teplota spalování určena 550°C a rychlosti ohřevu 3 až 7°C/min, kdežto v měření jsme zkoušeli různé teploty. Zkoušeny byli rozdílné teploty spálení paliva (400°C, 600°C a 800°C), rychlost ohřevu popela v pozorovací peci (5°C/min a 20°C/min). Zde se neprojevili nikterak velké rozdíly při srovnání pozorovaných teplot. Z dosažených výsledků pak vyplívá, že při tavení popelovin nezáleží ani tak na teplotě při níž popel vznikne ani na rychlosti ohřevu popela, ale hlavně na obsahu prvků v palivu.

7. LITERATURA

Internetové zdroje

- [1]<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2455>, Datum: 11.4.2010 / Autor: Ing. Jan Kunc, Ing. Libor Novák / Biomasa- efektivní zdroj paliva pro ORC
- [2]<http://cs.wikipedia.org/wiki/Biomasa>, Datum: 20.3.2010 / Wikipedia / Biomasa
- [3]http://hobby.idnes.cz/co-je-biomasa-a-jak-se-s-ni-topi-manual-nejen-pro-katerinu-jacques-pww-/hobby-domov.asp?c=A090407_171941_hobby-domov_mce, Datum: 8.4.2010 / Autor: Martina Čermáková / Co je biomasa a jak se s ní topí
- [4] www.topenidrevem.cz/FIMG/c1_graf.gif, Datum: 05.04.2010/ Autor: Karel Murtinger / Topení dřevem
- [5]http://cs.wikipedia.org/wiki/Kj%C3%B3tsk%C3%BD_protokol, Datum: 23.3.2010/ Wikipedia / Kjotský protokol
- [6]<http://www.infoenergie.cz/web/root/energy.php?nav01=121&nav02=624>, Datum: 13.5.2010 / Infoenergie / Jak obsah vody v biomase ovlivňuje její vlastnosti
- [7]https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=5288 Datum: 11.02.2010/ Autor: Ivana Požárová / Alternativní zdroje energie - biomasa
- [8]<http://ekowatt.cz/uspory/biomasa.shtml>, Datum: 4.4.2010 / Ekowatt / Biomasa obecně
- [9]<http://cs.wikipedia.org/wiki/Zply%C5%88ov%C3%A1n%C3%AD>, Datum: 18.3.2010 / Wikipedia / Zplyňování
- [10]<http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/clanky-pps-pdf/01.pdf>, Datum: 05.05.2010/ Autor: Milan Henek / Žárové vyzdívky tepelných zařízení pro spalování biomasy
- [11]<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=1&i=2> Datum: 17.5.2010 / Tzb-info / Obnovitelná energie
- [12]http://212.71.135.254/vuzt/poraden/prirucky/p2006_07.pdf, Datum: 15.02.2010/ Autor: Andert David, Sladký Václav, Abrahám Zdeněk / Energetické využití biomasy
- [13]http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iv/papers/hrdlicka.pdf, Datum: 28.03.2010/ Autor: Jan Hrdlička, Robert Vágner, Jitka Hejdová / Spalování speciálních energetických rostlin
- [14] Characterization of ashes from wood and straw.pdf , Datum: 15.04.2010/ Autor: Brigitta Olanders and Britt-Marie Stetnari / Characterization of ashes from wood and straw
- [15]<http://scienceworld.cz/fyzika/vek-elektronove-mikroskopie-3018>, Datum: 13.05.2010/ Science Word / Věk elektronové mikroskopie
- [16]<http://www.vscht.cz/clab/rtg/vyuka.html>, Datum: 28.03.2010/ VŠCHT Praha/ Výuka v laboratoři

- [17]<http://odpady.tf.czu.cz/p/spalpevpal.pdf>, Datum: 17.03.2010/ Autor: Ing. Jan Malat'ák
Ph.D / Spalování tuhých paliv, Spalovací zařízení
- [18]ČSN ISO 540
- [19]<http://www.drevo-pelety.cz/topne-peletky/cenik-pelet>, Datum: 05.03.2010/ Palivové
dřevo-ceník
- [20]<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplyn-z-odpadu-zivocisne-vyroby>, Datum:
22.05.2010/ Autor:Miroslav Kajan/ Bioplyn z odpadu živočišné výroby
- [21]<http://lesprace.silvarium.cz/content/view/579/57/>, Datum: 19.05.2010/ Autor:Ing. Jan
Weger / Biomasa pro energetické účely
- [22]www.nazeleno.cz/.../pestovani%20kopie.jpg, Datum: 17.03.2010/ Nazeleno / Biomasa
- [23]<http://biom.cz/cz52/odborne-clanky>, Datum: 11.05.2010/ Autor: Jean –Marc Jossart /
Společné projekty EU a ČR na energii z biomasy

PŘÍLOHY

Protokol o provedené zkoušce u popela ze slámy