



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**SLEDOVÁNÍ VLIVU ÚPRAVY VZORKŮ NA STANOVENÍ  
VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ BIOPALIVA**

MONITORING THE EFFECT OF SAMPLE TREATMENT IN DETERMINING SELECTED PROPERTIES OF  
BIOFUEL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kristýna Štenclová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Hana Lisá, Ph.D.**

**BRNO 2021**





# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	<b>Bc. Kristýna Štenclová</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Hana Lisá, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

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:

## **Sledování vlivu úpravy vzorků na stanovení vybraných vlastností biopaliva**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V dnešní době jsou biopaliva jedním z významných zdrojů energie. Před procesem spalování je však nutné tato paliva zpracovat. Aby byla energie v palivu uložená co nejefektivněji využita, je důležité znát charakteristické vlastnosti materiálu a jejich případné změny v mechanickém procesu úpravy vzorků. Z tohoto důvodu je práce zaměřena na sledování charakteristických vlastností materiálu biopaliva a na sledování změn těchto parametrů v závislosti na probíhajícím procesu úpravy vybraných vzorků.

### **Cíle diplomové práce:**

Rešerše metod možných úprav vzorků paliva před analýzou.

Nalezení a vypracování vhodných postupů stanovení vybraných vlastností biopaliv.

Studium změny sledovaných vlastností biopaliva způsobených jeho úpravou.

Zhodnocení provedených experimentů a jejich porovnání s nalezenou odbornou literaturou.

### **Seznam doporučené literatury:**

WICHTERLE, Kamil a Ivan KOUTNÍK. Technologie a analýza paliv: studijní opora. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3574-7.

OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1207-X.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na vliv úpravy biopaliva před spalováním na jeho vlastnosti. První část práce obsahuje rešerši zabývající se charakteristickými vlastnostmi paliva, přípravou vzorků, metodami analýzy jednotlivých vlastností a představení různých typů mlýnů. Druhá část práce je experimentální. Zabývá se analýzou vlastností vzorků mletých při různém nastavení mlýna s přihlédnutím k teplotě ve mlýně během mletí.

### **Klíčová slova**

Biopalivo, úprava, mletí, charakteristické vlastnosti

## **ABSTRACT**

Diploma thesis is focused on the treatment of biofuel prior to combustion and effect of this treatment on the biofuel characteristics. The first part is a review of literature encompassing characteristics of fuel, preparation of samples, methods of analysis of individual characteristics and a presentation of various types of mills. The second part of thesis is experimental. It is an analysis of sample characteristics under various mill settings with regard to the temperature in the mill during grinding.

### **Key words**

Biofuel, treatment, grinding, characteristics

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTENCLOVÁ, Kristýna. *Sledování vlivu úpravy vzorků na stanovení vybraných vlastností biopaliva* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132324>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Hana Lisá.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Sledování vlivu úpravy vzorků na stanovení vybraných vlastností biopaliva** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Haně Lisé, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování závěrečné práce.

## OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Biopalivo .....	11
1.1 Složení tuhého biopaliva.....	11
1.2 Vlastnosti tuhých biopaliv .....	13
2 Příprava vzorku .....	15
2.1 Zařízení na snížení velikosti částic .....	15
2.2 Metody dělení vzorku .....	15
3 Mlýny a drtiče.....	18
3.1 Kulový mlýn .....	18
3.2 Mlýn střížný – řezací .....	21
3.3 Hmoždířový mlýn .....	22
3.4 Rotorový mlýn .....	23
3.5 Čelistový drtič .....	25
3.6 Diskový mlýn.....	26
3.7 Diskový vibrační mlýn.....	27
3.8 Nožový mlýn.....	28
4 Metody měření vlastností biopaliva .....	30
4.1 Stanovení obsahu vlhkosti .....	30
4.2 Stanovení obsahu popela .....	32
4.3 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny .....	33
4.4 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti .....	34
4.5 Měření velikosti částic .....	34
5 Experimentální část .....	36
5.1 Použité přístroje a pomůcky.....	37
5.2 Stanovení obsahu vlhkosti .....	41
5.3 Stanovení obsahu popela .....	43
5.4 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny .....	46
5.5 Stanovení spalného tepla .....	49
5.6 Mletí.....	51
5.6.1 Surový materiál .....	55
5.6.2 Mletí bez cyklónu.....	57
5.6.3 Mletí s cyklónem .....	86
5.7 Síťová analýza .....	95
5.7.1 Mletí bez cyklónu.....	98
5.7.2 Mletí s cyklónem .....	104
5.7.3 Mletí bez cyklónu vs. s cyklónem .....	107
ZÁVĚR.....	109
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	111
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	120
SEZNAM PŘÍLOH .....	121

## **ÚVOD**

V dnešní době je postupně upouštěno od fosilních paliv, zejména od uhlí. Tato paliva jsou postupně nahrazována jinými, například biopalivy. Biopaliva je však zapotřebí nejprve zpracovat a upravit tak, aby byl získán co nejkvalitnější materiál vhodný pro spalování. Kvalitu paliva lze posoudit na základě znalosti jeho charakteristických vlastností. Je otázkou, jaký vliv na tyto vlastnosti biopaliv má nastavení mlýna, pomocí kterého je palivo upraveno.

Nejvíce je kvalita paliva závislá na obsahu vlhkosti. Biopaliva jsou velmi hygroskopická, proto je jejich obsah vlhkosti velmi proměnlivý. Kromě množství vody se jednotlivé materiály po úpravě často liší obsahem prchavé hořlaviny, popela či spalného tepla. Důležité jsou z hlediska změny těchto vlastností i metody přípravy a dělení paliva. Podstatná je úprava materiálu před samotným procesem spalování. Tato práce se zabývá mechanickou úpravou vzorku, konkrétně mletím. Složení paliva je ovlivněno způsobem a délkou jeho skladování, volbou konkrétního typu mlýna, výší nastavených otáček během mletí, délkou času mletí, jemností síta, použitím cyklónu apod. Tato práce se zabývá dopadem parametrů mlýna nastavených na začátku mletí (doba mletí, nastavení otáček, jemnost síta) na vlastnosti paliva.



## 1 Biopalivo

Palivo je označení pro směs látek hořlavých, které uvolňují při hoření teplo a látek nehořlavých, které uvolňování tepla spíše komplikují. Teplo uvolněné spálením paliva lze využít např. k zahřívání napájecí vody v ohříváku vody, k ohřívání spalovacího vzduchu, k přehřívání páry v přehříváku nebo k jejímu přehřívání v přehříváku apod. [1]

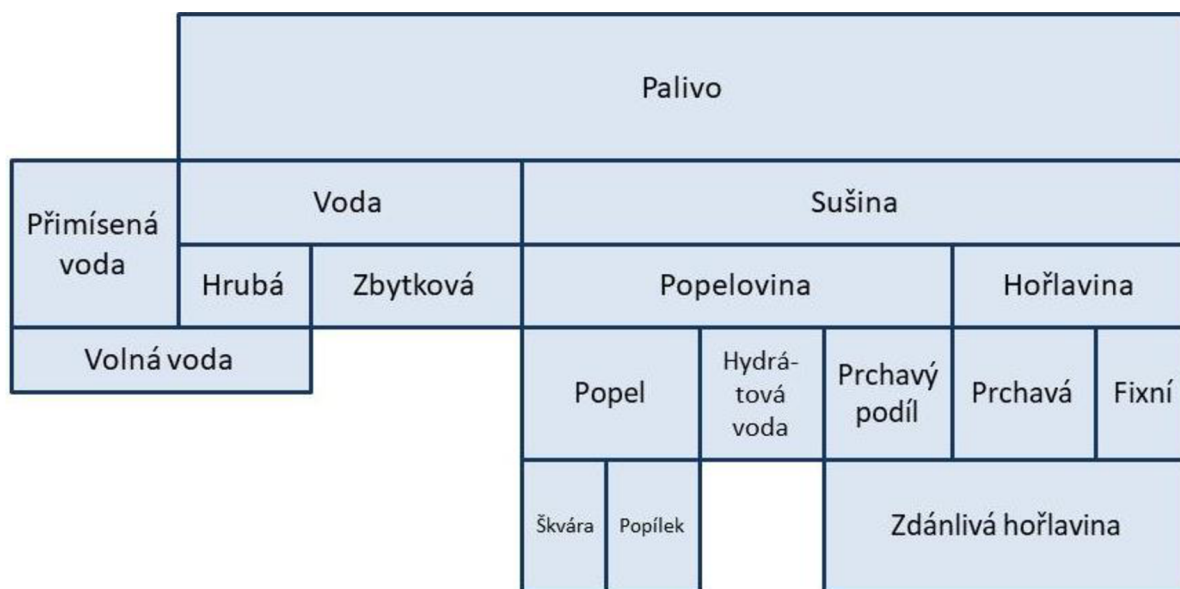
Palivo lze rozlišit podle různých kritérií. Lze je rozdělit např. podle skupenství použitého paliva na tuhá, kapalná a plynná. Tuhá paliva lze dále rozdělit na základě jejich původu na tuhá fosilní paliva, tuhá biopaliva a tuhá alternativní paliva. Tuhé fosilní palivo představuje např. uhlí. Tuhým biopalivem je např. dřevní štěpka, pelety apod. Tuhá alternativní paliva jsou paliva vyrobená z odpadů. [2]

Mezi výhody využívání biopaliv patří např. využití odpadu, možnosti úpravy paliva, stále dostupná energie, dostupnost technologií pro spalování, možnost využití v domácnostech, snížení zatížení ovzduší emisemi CO<sub>2</sub> a další. [3]

Nevýhodou je např. účinnost při výrobě elektřiny, náklady na úpravy paliva, náklady na dopravu, nutnost skladovacích prostor atd. [3]

### 1.1 Složení tuhého biopaliva

Na následujícím obrázku zpracovaného dle [4] je schematicky zobrazeno složení paliva.



Obrázek 1.1 Složení tuhého paliva [4]

Základní složení paliva se určuje pomocí prvkového nebo hrubého rozboru paliva. Prvkovým rozбором se stanovuje hmotnostní obsah [%] prvků C, H, S, N, O, případně Cl a F. [2], [5]

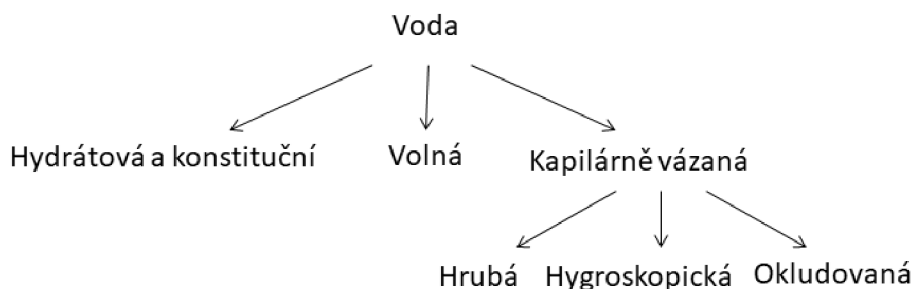
Hrubým rozбором se určuje výhřevnost paliva a je stanoven poměrný obsah hořlaviny  $h$  [%], popeloviny v surovém palivu  $A^r$  [%] a vody  $M_{ad}$  v surovém palivu [%], kdy platí [2]:

$$h + A^r + M_{ad} = 100 \% \quad (1.1)$$

### Vlhkost $M_{ad}$

Obsah vlhkosti v palivu je základním parametrem pro vyhodnocování paliva. V případě biopaliv je obsah vlhkosti poměrně vysoký a proměnný. Vysoká vlhkost paliva způsobuje řadu komplikací, např. snižuje výhřevnost paliva, což způsobuje nestabilní spalování. Je příčinou nižší účinnosti kotle a jeho kratší životnosti. Zvyšuje také komínovou ztrátu. Spaliny mohou způsobit při snížení jejich teploty pod hranici rosného bodu korozi kotle. [2], [5]

Vodu lze rozdělit následovně [6]:



Obrázek 1.2 Rozdělení vody

Hydrátová voda je vázána na popeloviny. Konstituční je chemicky vázána na organickou hmotu. Voda hydrátová a konstituční se neurčují. [6]

Analyzována je voda volná a vázaná (hrubá a hygroskopická). Volná a vázaná voda jsou zahrnuty v hrubém rozboru. Volná voda je oddělována mechanicky (např. odstředěním). Kapilárně vázanou vodu lze rozdělit na hrubou, hygroskopickou a okludovanou. Hrubá voda je odstraňována volným vysycháním při teplotě přibližně 20 °C. Hygroskopická voda se uvolňuje sušením paliva při 105 °C. Okludovaná voda není uvolňována sušením, ale při teplotách rozkladu paliva (při hoření). Do hrubého rozboru se nezapočítává. [6]

### Hořlavina

Hořlavina je část paliva obsahující chemicky vázanou energii, která se uvolní jejím spálením. [7] Je složena z uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Oxidací uhlíku, vodíku a síry je uvolňováno teplo. Tyto prvky jsou nositeli chemicky vázané energie a jsou označovány jako aktivní prvky hořlaviny. Dusík a kyslík jsou látky pasivní (nedodávají teplo). [2]

Hořlavina je také označována jako ztráta žiháním. Lze ji vypočítat jako vysušený vzorek bez obsahu popela v sušině [2]:

$$h^{dr} = 100 \% - A^{dr} \quad (1.2)$$

$A^{dr}$  [%] obsah popela ve vysušeném vzorku

$h^{dr}$  [%] obsah hořlaviny v sušině

Hořlavina se v palivu nachází ve formě prchavé hořlaviny a neprchavé (fixní) hořlaviny.

#### Prchavá hořlavina

Prchavá hořlavina je směs plyných uhlovodíků. Uhlovodíky se uvolňují při teplotách nad 150 °C z tuhé části paliva. Vznítí se při teplotě cca 500 °C. [8] Hoří v horní části spalovací komory, kam je přiváděn sekundární vzduch kvůli dostatečnému promíslení s plyným podílem prchavé hořlaviny. [5] Pokud nedojde k vyhoření prchavé hořlaviny, odchází se spaliny z kotle a vytváří tak ztrátu chemickým nedopalem. [2]

### Neprchavá hořlavina

Tato pevná část hořlaviny zůstává v palivu po uvolnění prchavé hořlaviny. Je tudíž vázána na pevný zbytek paliva, který kromě hořlaviny obsahuje také popeloviny. [7]

### **Popelovina**

Popelovina je tvořena minerálními látkami obsaženými v palivu před jeho spálením. Jedná se o křemičitany, uhličitany, sírany a další. Spálením paliva vzniká z popeloviny tuhý zbytek – popel. Zdrojem popela mohou být také nečistoty, které byly přimíseny během skládky, transportu nebo těžby paliva. [2]

Tuhé zbytky proces spalování komplikují, snižují například teplotu spalování. Popel také znesnadňuje přístup kyslíku k hořlavině paliva během hoření, případně může jejich styku i zcela zabránit. [1] Částičky popelu se nalepují na teplosměnné plochy, vytvářejí nanosy a zhoršují tak přenos tepla. Popel také zvyšuje komínovou ztrátu. [2]

Popel odchází ze spalovací komory ve formě strusky, škváry nebo popílku.

Drobné minerální částice unášené spalinami se nazývají popílek. [2]

Struska je tvořena minerálními zbytky paliva po jeho spálení při teplotách nad teplotu tečení popela. Pokud je struska rychle ochlazená, tvoří pak sklovitou hmotu. Struska se vyskytuje pouze u výtavných kotlů. [2]

K vytvoření škváry dochází, pokud spalování probíhá za teplot, při kterých nastává spékání a tavení popela. Jednotlivá zrna se spojují ve větší či menší kusy. [2] Škvára má bublinatou strukturu, je křehká ale pevná. Struska je oproti škváře hutnější, tekutá a obsahuje drobnější bublinky. [1]

Pro provoz kotle je důležité znát charakteristické teploty popela. Patří mezi ně teplota měknutí, tání, tečení a spékání. Tyto teploty jsou ovlivněny složením popela. Např.  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  teploty zvyšují. Jiné (např.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) naopak teploty snižují. [2]

## **1.2 Vlastnosti tuhých biopaliv**

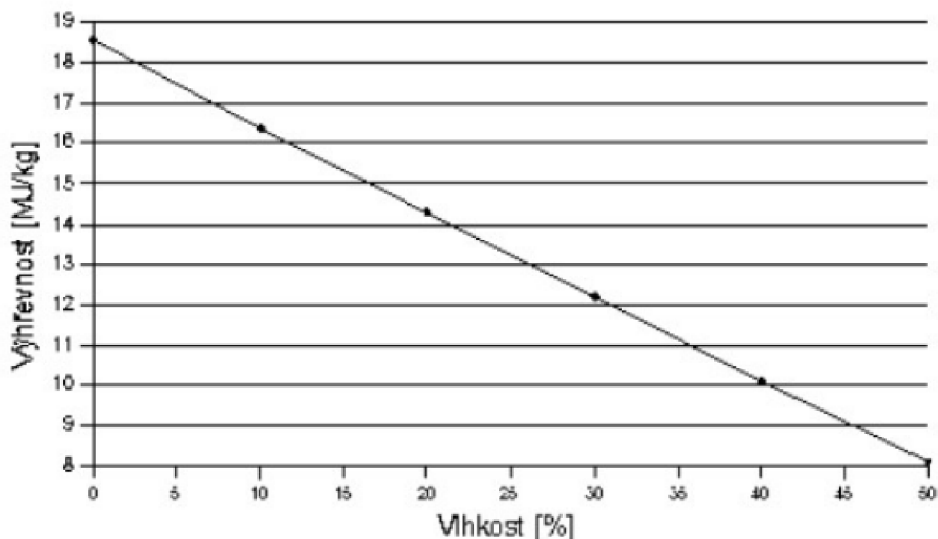
U tuhých biopaliv jsou sledovány stejné vlastnosti jako u běžných tuhých paliv. Kromě údajů z hrubého rozboru jsou zjišťovány také např. údaje z prvkového rozboru, výhřevnost, spalné teplo, měrná hmotnost a vlastnosti popelovin (charakteristické teploty – teplota tání, tečení, měknutí a spékání). [2], [9]

Biomasa je tvořena přibližně z 50 % C, 43 % O<sub>2</sub>, 6 % H<sub>2</sub> v hořlavině. Síra se v tuhém biopalivu téměř nevyskytuje. Může ale obsahovat Cl, F, K a těžké kovy. Tyto prvky způsobují korozi a poškozují životní prostředí. [5] V následující tabulce je zobrazen příklad prvkového složení biopaliva.

Tabulka 1 Složení hořlaviny dřevní hmoty [9]

Složka hořlaviny [%]	Druh dřevní hmoty		Průměrné složení
	Jehličnaté dřevo	Kůra	
Uhlík	51	51,4	51,2
Vodík	6,2	6,1	6,15
Kyslík	42,2	42,2	42,2
Dusík	0,6	0,3	0,45

Pro biopaliva je typický vysoký obsah prchavé hořlaviny. Pohybuje se přibližně v rozmezí od 70 % (sláma) do více než 80 % (tvrdé druhy dřeva). [5] Obsah popela v biopalivu je obvykle velmi nízký. U dřeva se pohybuje průměrně kolem 1 %. Spalné teplo je závislé na vodě obsažené v biomase. Vzhledem k tomu, že biomasa je velmi hygroskopická, pohybuje se obsah vlhkosti v širokém rozmezí (cca od 10 do 70 %). [10] Na obsahu vlhkosti biopaliva je přímo závislá jeho výhřevnost. Tato závislost je zobrazena na obrázku 1.3. [11]



Obrázek 1.3 Výhřevnost jako funkce obsahu vody [11]

#### Výhody a nevýhody biomasy

Mezi výhody využívání biomasy patří např. využití odpadu, možnosti úpravy paliva, dostupnost technologií pro spalování, možnost využití v domácnostech, snížení zatížení ovzduší emisemi CO<sub>2</sub> a další. [3]

Nevýhodou je např. účinnost při výrobě elektřiny, občasná nutnost úpravy paliva, náklady na úpravy paliva, náklady na dopravu, nutnost skladovacích prostor, výroba není bezemisní atd. [3]

## 2 Příprava vzorku

Příprava vzorku je zaměřená na redukci vzorků na laboratorní vzorky, laboratorních vzorků na dílčí vzorky a na základní analytické vzorky. [12]

Postup přípravy vzorku je normalizován podle ČSN EN ISO 14780. Podstata přípravy spočívá v redukci vzorku na jeden nebo více testovacích podílů, které jsou menší než původní vzorek. Testovací podíly se od původního vzorku neliší svým obsahem. V přípravě vzorku jsou zahrnuty metody dělení vzorku a snížení velikosti částic vzorku. Metody zmíněné v této kapitole lze použít např. z důvodu určení vlastností biopaliv. [12]

### 2.1 Zařízení na snížení velikosti částic

#### *Hrubý řezací mlýn a drtič dřeva*

Hrubý řezací mlýn je používán pro materiál o délce 10 – 30 mm. Je zapotřebí, aby při hrubém řezání nedocházelo k vysoušení materiálu a proudění vzduchu přes materiál. Aby bylo zabráněno snížení vlhkosti při redukci velikosti částic, lze použít mlýn nebo drtič s nízkými otáčkami. [12]

#### *Střížní mlýn*

Tento mlýn je určen pro biopaliva, u nichž je požadováno zmenšení horního jmenovitého rozměru vzorku na 10 až 30 mm. Mlýn musí být vybaven sítí s různými rozměry ok a sítím vhodným ke kontrole horního jmenovitého rozměru částic. Pokud řezné plochy obsahují významné množství prvků, který má být stanoven v analýze, je zapotřebí se použití tohoto mlýna vyvarovat. [12]

#### *Sekyra*

Používá se k sekání větví a kulatin na maximální tloušťku 30 mm (pro zpracování ve střížním mlýně s průměrem sít 30 mm). [12]

#### *Ruční pila*

Slouží k odřezávání dříví do maximální tloušťky 30 mm, případně vhodné velikosti pro střížní mlýn s průměrem sít 30 mm. [12]

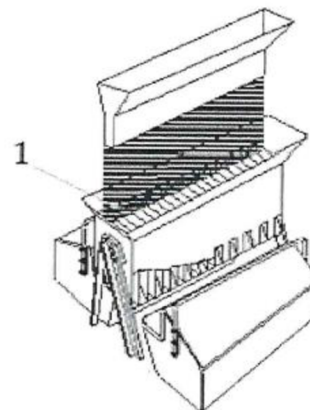
Použitím řetězové pily může být způsobena kontaminace vzorku s olejem. Pila by neměla být použita, pokud by mohlo dojít ke ztrátě vlhkosti vlivem tření. [12]

### 2.2 Metody dělení vzorku

#### *Žlábkování*

Ke žlábkování jsou používány příhradové děliče vzorků. Ty by měly mít na každé straně stejný počet drážek (minimálně šest). Tato metoda dělení není vhodná pro materiály obsahující protáhlé částice (např. sláma, kůra) ani pro vlhké (lepivé) materiály. [12]

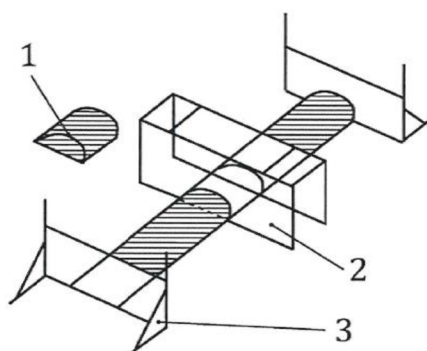
Princip této metody spočívá v umístění celkového vzorku v zásobníku žlábků tak, aby bylo množství zpracovávaného materiálu v zásobníku stejnoměrně rozděleno. Další dva zásobníky jsou umístěny pod žlábkem. Obsah je vysypáván dostatečně pomalu (z důvodu zabránění klenbování) z prvního zásobníku do středu ohraničení žlábků. Biopalivo, které spadlo do jednoho z náhodně vybraných zásobníků, je vyraženo. Proces žlábkování se opakuje do získání podvzorku požadované hmotnosti. [12]



Obrázek 2.1 Příklad příhradového děliče vzorků [12]

### Směšovací pás

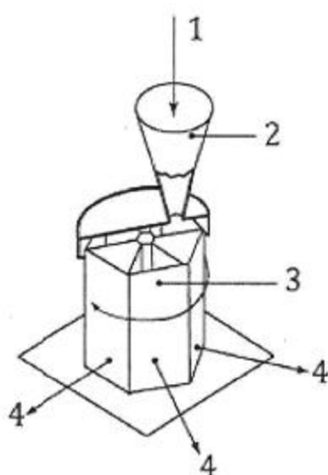
Tato metoda dělení je vhodná pro všechny materiály. Na čistý, tvrdý povrch je umístěn celkový vzorek, jeho promícháním lopatou dojde k homogenizaci. Poté je vytvořen pás o délce minimálně dvacetinásobku jeho šířky. Vzorek je rovnoměrně rozdělen a náhodně zpracováván od konce ke konci. Laboratorní vzorek je získán odebráním alespoň dvaceti dílčích vzorků, které jsou rovnoměrně rozmístěny podél pásu. Dílčí vzorek je odebrán pomocí dvou desek, které jsou svisle ponořeny do pásu vzorku. Veškerý materiál mezi deskami je následně odebrán. Do materiálu jsou ve stejný okamžik a ve stejné vzdálenosti od sebe ponořeny dvě desky tak, aby každý dílčí vzorek obsahoval stejné množství materiálu. [12]



Obrázek 2.2 Princip směšovacího pásu [12]

### Rotační dělič

Mechanická metoda využívající rotační dělič je používána k redukci hmotnosti vzorku v případě, kdy se jedná o suchý, volně tekoucí materiál. Zásobník rotačního děliče vzorků musí být nastaven tak, aby počet přihrádek vynásobený počtem otáček nebyl v průběhu dělení vzorku menší než 120. [12]

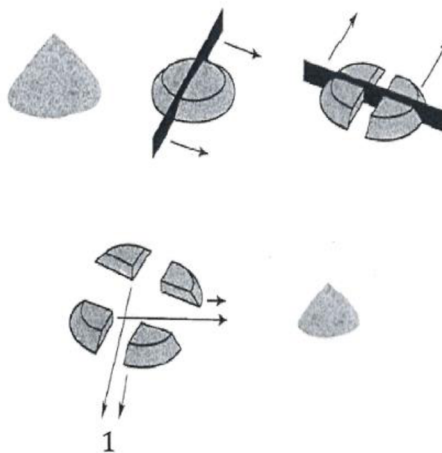


Obrázek 2.3 Příklad rotačního děliče vzorku [12]

### *Kuželování a kvartace*

Materiálem je manipulováno ručně pomocí lopaty. Tato metoda je vhodná např. pro piliny a dřevní štěpku. Z těchto materiálů jsou vytvářeny podvzorky do cca 1 kg. [12]

Vzorek je nasypán na čistý a tvrdý povrch, poté naházen lopatou na hromadu ve tvaru kuželu. Každá další plná lopata je nasypána na předcházející hromadu biopaliva takovým způsobem, aby materiál padal dolů všemi směry a byl rovnoměrně rozdělen, a aby částice o různých velikostech byly dobře promíchány. Tento postup je opakován třikrát, přičemž je pokaždé vytvořen nový kužel. Třetí kužel je zploštěn opakovaným a svislým položením lopaty nahoru na kužel. Vznikne plochá hromada o stejné tloušťce a průměru, která nesmí být vyšší než bok lopaty. Poté je hromada pomocí lopaty nebo plechu rozdělena dvěma kolnými řezy na čtvrtiny. Následně jsou vyřazeny dvě protilehlé čtvrtiny. Proces nasypání hromady ve tvaru kužele a postup kvartace je opakován, dokud není získán podvzorek o požadované velikosti. [12]



1... vyřadit

Obrázek 2.4 Proces kuželování a kvartace [12]



### 3 Mlýny a drtiče

Mletí slouží k redukci velikosti částic materiálu, případně k jeho předsušení. Mlýny a drtiče jsou také používány k homogenizaci tuhých vzorků. Pracují na principu sekání nožem, stříhání, roztloukání kladivem, drcení koulí nebo roztírání apod. [13] Mlýny jsou označovány jako střížné – řezací, rotorové, hmoždířové, kulové (planetové, oscilační, bubnové), diskové, diskové vibrační, úderové (křížové) a čelist'ové drtiče. [14]

#### 3.1 Kulový mlýn

Mezi kulové mlýny jsou řazeny mlýny planetové, oscilační a bubnové.

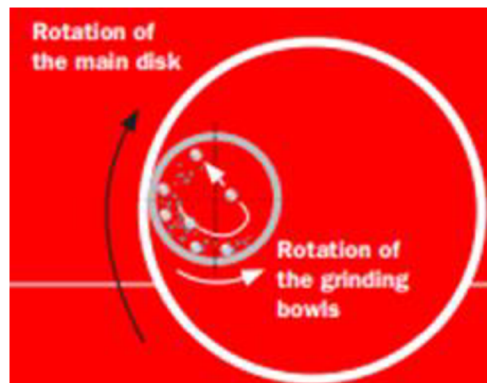
##### Planetový mlýn

Planetový mlýn mele velmi rychle a efektivně. Je mnohostranně použitelný a vhodný pro bezztrátové jemné mletí. Dosahovaná jemnost mletí je menší než  $0,1 \mu\text{m}$ . Mlecími prvky jsou kuličky a mísa, jejichž materiál závisí na typu mletého vzorku. Pracuje na principu rázu.

Mletí může být suché, mokré, v suspenzích nebo v ochranné atmosféře. Tyto mlýny jsou vhodné pro tvrdé, středně tvrdé, měkké, křehké, houževnaté, vlhké vzorky. Mívají jednu, dvě nebo čtyři mlecí stanice. [15]



Obrázek 3.1 Pulverisette 5 [15]



Obrázek 3.2 Princip planetového mlýnu [16]

Planetové mlýny vyrábí např. firma Fritsch, jejíž mlýny pracují v širokém rozmezí otáček – cca od  $50$  do  $1100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Může být dosaženo výsledné jemnosti menší než  $0,1 \mu\text{m}$ . Planetové mlýny vyrábí také firma Retsch. Jejich mlýny melou rychlostí v rozmezí cca od  $30$  do  $650 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , výsledná jemnost bývá menší než  $1 \mu\text{m}$ . Dále pak planetový mlýn vyrábí také firma LAARMANN, který pracuje při otáčkách v rozmezí od  $50$  do  $400 \text{ min}^{-1}$ . Vstupní velikost materiálu může být maximálně  $10 \text{ mm}$ , přičemž namletý materiál může dosáhnout výsledné zrnitosti menší než  $1 \mu\text{m}$ . Planetový mlýn je vyráběn i firmou 2 THETA. Tento mlýn je využíván k mletí v suchém stavu a je možné mlít až 4 vzorky současně. Vzorek může být mlet na jemnost menší než  $0,05 \text{ mm}$ . [15], [17], [18]



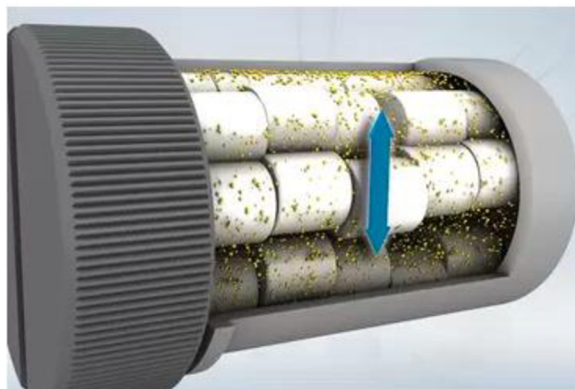
### Kulový mlýn pro X-ray difrakci

Speciálním typem kulového mlýnu je mlýn XRD-Mill McCrone firmy Retsch. Byl vyvinut pro přípravu vzorků pro následnou X-ray difrakci (XRD). Lze jej využít v mineralogii, geologii, chemii atd. [19]



Obrázek 3.3 Kulový mlýn pro XRD [19]

Tento mlýn funguje na principu tření 48 válcových mlecích prvků. Díky tomu je vzorek za krátkou dobu rozemlet velmi jemně a téměř bezztrátově. Krystalová struktura vzorku zůstává během mletí zachována. Vstupní velikost materiálu musí být menší než 0,5 mm. Materiál dosahuje výsledné jemnosti menší než 1  $\mu\text{m}$ . Mlýn se otáčí při 50 (60) Hz rychlostí 1000 – 1500  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . [19]

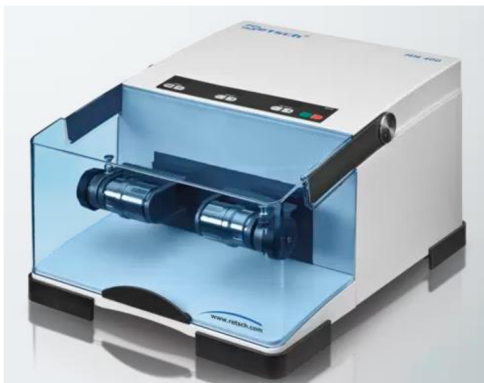


Obrázek 3.4 Mlecí prvky mlýnu pro XRD [19]

### Oscilační mlýn

Tento typ mlýnu je také řazen mezi kulové mlýny. Byl vyvinut pro suché, mokré a kryogenní mletí malých objemů vzorků. Je využíván k drcení a homogenizaci nejrůznějších materiálů (tvrdých, středně tvrdých, měkkých, křehkých, elastických, vláknitých), např. tabáku, chemických produktů, dřeva, elektroodpadu, uhlí, skla, keramiky, obilí atd. Je vhodný i pro narušení biologických buněk, pro DNA/RNA a proteinovou extrakci. Vstupní velikost materiálu musí být maximálně 10 mm, konečná jemnost vzorku je přibližně 5  $\mu\text{m}$ . Otáčky se pohybují v rozmezí 180 – 2100  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tyto mlýny mají nejčastěji dvě mlecí stanice, vyskytují se ale typy s jednou i se šesti stanicemi. [20], [21]

Mlýn obsahuje mlecí stanice vytvářející v horizontální poloze radiální oscilace. Mlecí stanice obsahují mlecí kuličky. Mletí je uskutečňováno v důsledku nárazů mlecích kuliček na vzorek materiálu v kulatých koncích mlecí nádoby. K rozbití biologických buněk je používáno více menších kuliček. [20]



Obrázek 3.5 Oscilační mlýn MM 400 [20]



Obrázek 3.6 Mlecí nádoby a kuličky [20]

Oscilační mlýny vyrábí zejména firma Retsch. Mezi její mlýny patří i speciální mlýn Cryomill, který byl vyvinut ke kryogennímu mletí. Je kontinuálně chlazen tekutým dusíkem před mletím i během něj. [22] Dalším speciálním typem je mlýn E<sub>MAX</sub> od firmy Retsch. Pro tento mlýn je typické rychlejší a jemnější mletí. Výsledná jemnost bývá menší než 80 nm. Při 50 (60) Hz pracuje rychlostí 300 – 2000 ot·min<sup>-1</sup>. Tento mlýn je kontinuálně chlazen vodou, navíc může být připojen k externímu chladiči. [23]



Obrázek 3.7 Oscilační mlýn E<sub>MAX</sub> [23]

### Bubnový mlýn

Tento mlýn slouží k suchému mletí velkých objemů vzorků o vstupní velikosti až 20 mm. Konečná jemnost mletí je menší než 15  $\mu\text{m}$ . Bubnové mlýny jsou používány pro měkké, tvrdé, křehké a vláknité vzorky. Slouží k homogenizaci uhlí, koksu, kostí, celulózy, skla, sádrovce, tkání, dřeva, keramiky a dalších. [24]



Obrázek 3.8 Bubnový mlýn TM 500 [24]

Buben mlýnu je naplněn mlecími kuličkami a otáčí se kolem své horizontální osy. K rozemletí dochází vlivem nárazu a tření materiálu o mlecí koule. Koule s menšími průměry melou materiál na vyšší jemnost. Bubnový mlýn pracuje rychlostí cca 10 až 50  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tyto mlýny vyrábí zejména firma Retsch. [24]

### **3.2 Mlýn střížný – řezací**

Tyto mlýny jsou vhodné zejména pro mletí měkkých až středně tvrdých, vláknitých nebo houževnatých materiálů (včetně plastů). Nejsou vhodné pro tvrdé materiály z důvodu vysokých otáček. Často jsou využívány pro mletí a přípravu heterogenních vzorků. Mlýny jsou rozebíratelné, což usnadňuje jejich čištění. Dávkování probíhá kontinuálně nebo po dávkách. Jemnost mletí závisí na velikosti ok síta. Použit lze materiály jako např. plasty, guma, nekovový odpad, sekundární paliva, uhlí, tablety, kukuřice, dřevo atd. Může být použit celá délka materiálů jako slámy, folie apod. Mlecími nástroji jsou řezací rotor a síta. Mlecí nástroje jsou vyrobeny z nerezové a nástrojové oceli. Mletí probíhá v rozmezí otáček cca 100 – 3400  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . [25], [26]



Obrázek 3.9 Střížný mlýn [27]

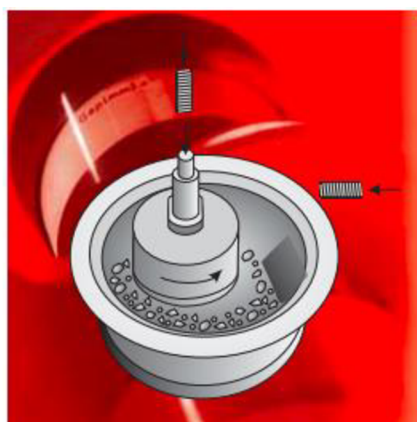
Firma Retsch vyrábí střížné mlýny, u nichž se konečná jemnost materiálu pohybuje v rozmezí od 0,25 mm do 20 mm. Pracují v širokém rozmezí otáček, nejvýkonnější mlýn dosahuje až 3000 ot·min<sup>-1</sup>. [28], [29] Firma Fritsch vyrábí mlýny, které obecně dosahují vyšších otáček. Nejvyšších dosahuje mlýn, který může mlít až při 3400 ot·min<sup>-1</sup>. Konečná jemnost materiálu bývá různá – od 0,2 mm až do 10 mm. [25], [26]



Obrázek 3.10 Střížný mlýn SM 200 [28]

### 3.3 Hmoždířový mlýn

Hmoždířový mlýn pracuje na principu tlaku a tření materiálu pomocí tloučku a misky. Materiál je přiváděn do otáčejícího se mlýna mezi misku a tlouček. Miska se excentricky otáčí, tlouček je pevně nastaven (nenachází se v centru misky). K jeho otáčení dochází vlivem kontaktu misky s rotujícím vzorkem. [30], [31]



Obrázek 3.11 Princip hmoždířového mlýnu [32]

Tento mlýn je využíván zejména v chemickém a farmaceutickém provozu, jelikož je určen především k drcení (mletí) tablet a pro výrobu past a krémů v laboratořích. Používají se materiály tvrdé - křehké i měkké - vlhké. Rotor se točí rychlostí cca 80 ot·min<sup>-1</sup>. [30], [31]

Firma Retsch je zastoupena mlýnem, který může mít rychlostí až 100 ot·min<sup>-1</sup> a materiál dosahuje konečné jemnosti menší než 10 μm při vstupní velikosti menší než 8 mm. [31] Firma Fritsch vyrábí hmoždířový mlýn, jehož konečná jemnost se pohybuje v rozmezí 10 – 20 μm a dosahuje rychlosti max. 80 ot·min<sup>-1</sup>. [30]



Obrázek 3.12 RM 200 [31]

### 3.4 Rotorový mlýn

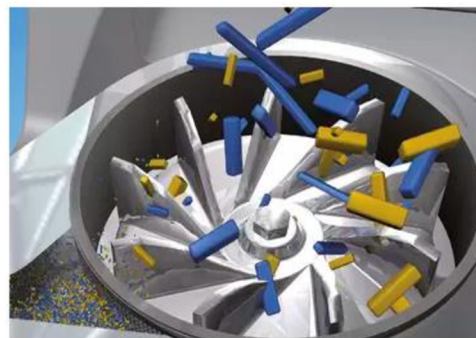
Jedná se o univerzální mlýn se širokým rozsahem využití. Používá se pro různé materiály – vláknité, suché, křehké, měkké, středně tvrdé, organické, anorganické atd. Materiál je přidáván v dávkách nebo kontinuálně. Parametry, jako např. otáčky mlýna, vstupní velikost materiálu, konečná jemnost a další, závisí na konkrétním typu mlýna. [33]

K redukci velikosti materiálu dochází působením energie nárazu a stříhu. Materiál je pomocí násypky veden na střed mlecí komory, kde je drcen mezi rotorem, sítím a mlecími vložkami. [33]

Mezi mlýny firmy Retsch patří rotorový mlýn pracující v rozmezí 3000 – 10000 ot·min<sup>-1</sup> a dosahující jemnosti materiálu menší než 50 μm. [33] Mezi další rotorové mlýny této firmy patří cyklónový mlýn s integrovaným cyklónem. Mletý materiál je v tomto mlýnu oddělen v cyklónu a následně zachycen ve vzorkové láhvi. Cyklón mimo jiné zajišťuje chlazení vzorku a mlecích nástrojů. [34]



Obrázek 3.13 Cyklónový mlýn Twister [34]



Obrázek 3.14 Cyklónový mlýn Twister [34]



Dalším rotorovým mlýnem firmy Retsch je i ultraodstředivý mlýn, který je vhodný pro jemné mletí, pracuje při 6000 až 18000 ot·min<sup>-1</sup>. Jeho rotor dosahuje obvodové rychlosti 31 až 93 m·s<sup>-1</sup>. Konečná jemnost materiálu je menší než 40 μm. Posledním zástupcem firmy Retsch je kladivový mlýn, který slouží pro hrubé i jemné mletí. Výsledná jemnost materiálu je menší než 100 μm a dosahuje maximální rychlosti 4000 ot·min<sup>-1</sup>. [35], [36]



Obrázek 3.15 Kladivový mlýn SK 300 [36]

Mlýn firmy Fritsch dosahuje nejvyšších otáček o velikosti 22000 ot·min<sup>-1</sup>, přičemž konečná jemnost materiálu je menší než 40 μm. Je vhodný pro mimořádně rychlé mletí měkkých až středně tvrdých, křehkých, vláknitých materiálů. Dalším zástupcem této firmy je mlýn, jehož nástrojem je ozubený kříž. Dokáže dobře rozemlít materiály až do tvrdosti 6 Mohsovy stupnice. Vhodným materiálem je např. jehličí, listy, pelety, uhlí, sádra, tablety, plasty, rašelina atd. [37], [38]



Obrázek 3.16 Úderový křížový mlýn Pulverisette 16 [39]

### 3.5 Čelistový drtič

Tento drtič slouží především k hrubování a k předemletí materiálu. Je vhodný pro středně tvrdý, tvrdý, křehký, houževnatý materiál (např. horniny, keramika, křemík, minerály, stavební materiál, žula, uhlí, sklo atd.). [40]

Materiál je vsypáván trychtýřem do mlecího prostoru. Drcení probíhá v šachtě ve tvaru klínu mezi čelistmi. Jedna čelist je pevná, druhá pohyblivá. Pohyblivá čelist je umístěna excentricky na hřídeli. K drcení dochází vlivem tlaku mezi čelistmi. Vzorek je drcen eliptickým pohybem, poté je vlivem gravitace posouván dolů. Nastavení vzdálenosti mezi čelistmi probíhá plynule pomocí stupnice. Konečná jemnost materiálu se pohybuje v rozmezí cca 1 až 15 mm. [40], [41]



Obrázek 3.17 Princip čelistového drtiče [40]

Čelistové drtiče firmy Retsch drtí materiál na jemnost 0,5 – 6 mm, přičemž vstupní velikost materiálu může dosahovat velikosti až 130 mm. [40], [42]



Obrázek 3.18 Čelistový drtič BB 300 [40]



Obrázek 3.19 Kombinace Pulverisette 1 a 13, classic line [43]

Firma Fritsch vyrábí čelistové drtiče, jejichž výsledná jemnost bývá 0,3 – 15 mm při vstupní velikosti materiálu až 95 mm. Kromě toho firma Fritsch nabízí také kombinaci dvou mlýnů – diskového mlýnu a čelistového drtiče. Díky tomu je dosaženo kvalitnějšího mletí a parametrů, kdy např. konečná zrnitost může být menší než 100  $\mu\text{m}$ . [41], [43]

### 3.6 Diskový mlýn

Tento mlýn je používán pro středně tvrdý, tvrdý a křehký materiál jako např. granit, křemen, křída, sklo, půda, slitiny železa, beton atd. Pracuje při přibližně  $440 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . [44]

Násypkou je materiál přiveden do prachotěsné komory na střed dvou svisle uložených mlecích disků. Jeden disk je pohyblivý, otáčí se proti stojícímu disku a nasává vstupní materiál. K mletí dochází vlivem tlaku a tření. Materiál je nejprve mlecím kotoučem předběžně nadrcen. Následně je materiál odstředivou silou přesunut do vnější oblasti mlecích kotoučů, kde dochází k jemnému mletí. Materiál je sřádán v zachytné nádobě. Štěrbinu mezi mlecími disky lze měnit kontinuálně. Rozsah štěrby je cca 0,05 – 12 mm. [45], [46]

Firma Retsch vyrábí diskové mlýny, které jsou vhodné pro předběžné a jemné mletí. Konečná jemnost materiálu s použitím těchto mlýnů může být menší než 50  $\mu\text{m}$ . [46]



Obrázek 3.20 Diskový mlýn DM 200 [45]

Pod firmu Fritsch patří mlýny, které dosahují konečné jemnosti 0,05 – 12 mm. Je mezi ně řazena také kombinace diskového mlýnu a čelistového drtiče, jak již bylo zmíněno u čelistových drtičů. [43], [44]

Kromě již zmíněných mlýnů jsou používány i mlýny firmy 2 THETA. Konečná zrnitost materiálu bývá pod 2 – 3 mm při vstupní velikosti 50 – 100 mm. [47]



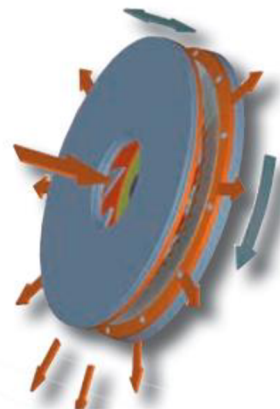
Obrázek 3.21 Diskový mlýn 2 THETA MTP-400 [47]



Na principu diskového mlýna fungují i některé stroje využívané např. v zemědělství, kde slouží k mletí krmiva na ideální strukturu. Jedná se např. o diskové mlýny firmy SKIOLD. Otáčky motoru dosahují rychlosti  $2800 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , průměr disku je  $300 - 550 \text{ mm}$  a výkonost stroje může být až  $12 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1}$ . [48]



Obrázek 3.22 Diskový mlýn SKIOLD [48]



Obrázek 3.23 Rotace mlýna SKIOLD [48]

### 3.7 Diskový vibrační mlýn

Tento mlýn je vhodný pro tvrdé, středně tvrdé a křehké materiály a používá se v hornictví, hutnictví, zemědělství aj. Pracuje při otáčkách až  $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . [49]

Tento diskový mlýn pracuje na vibračním principu. Materiál je drcen rázem a třením. Mlecí soustava je upevněna na pružném systému, který vlivem rotující nevyváženosti přejde do horizontálních kmitů. Kymácivý pohyb urychlí odstředivou sílu mlecích částí ležících v mlecí soustavě (prstenec a jádro). [49]

Firma Fritsch vyrábí mlýn, u něhož může být dosaženo konečné jemnosti materiálu  $10$  až  $20 \mu\text{m}$ . Maximální vstupní velikost materiálu je  $12 \text{ mm}$ . [49]



Obrázek 3.24 Diskový vibrační mlýn Pulverisette 9 [49]

Mezi diskové vibrační mlýny firmy Retsch patří mlýn, jehož talíř s mlecími nástroji je vystaven kruhovým horizontálním vibracím. U jiného typu mlýnu je talíř s mlecí sadou vystaven 3-D vibracím. U těchto mlýnů bývá konečná zrnitost materiálu menší než 20  $\mu\text{m}$  a vstupní velikost do 15 – 20 mm. [50], [51]

Dále je vyráběn například diskový vibrační mlýn firmy RMI, který rotuje rychlostí až 835  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tento typ mlýna je vyráběn i firmou 2 THETA. S použitím jejich mlýna může být dosaženo jemnosti mletého materiálu do 0,2 mm při vstupní velikosti materiálu do 12 mm (maximálně do 18 mm). [52], [53]

### 3.8 Nožový mlýn

Mlecí nádoba obsahuje dva ostré, robustní, otáčející se nože. Směr otáčení závisí na typu mletí. Předemletí je prováděno tupou stranou a jemné mletí ostrou stranou. [54]



Obrázek 3.25 Nože mlýnu [54]

Mlýn je vhodný nejen pro mletí suchých, měkkých a středně tvrdých produktů, ale také pro homogenizaci látek s vysokým obsahem vody, olejů, tuků. Lze jej využít také pro mletí a homogenizaci potravin a krmiv. U mletého materiálu je dosaženo konečné jemnosti menší než 300  $\mu\text{m}$  při vstupní velikosti 40 mm. [54]



Obrázek 3.26 Nožový mlýn Grindomix GM 200 [54]

Firma Retsch vyrábí nožové mlýny, které se otáčejí rychlostí v rozmezí od 500  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  do 10000  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  a vstupní velikost materiálu může dosahovat cca 130 mm. Podobné parametry má mlýn vyráběný firmou Fritsch. [54], [55], [56]



*Obrázek 3.27 Nožový mlýn Pulverisette 11 [56]*

Pro laboratorní účely jsou často využívány mlýnky firmy IKA. V těchto mlýncích je možné měnit nože v závislosti na tvrdosti vstupního materiálu. Chlazení je zajištěno zejména pomocí suchého ledu. Mlýnky ve většině případů pracují v rozmezí 3000 – 6000 ot·min<sup>-1</sup>. Na trhu se ovšem vyskytují i rychlejší. Nejvyšší rychlost, které je schopen dosáhnout mlýn z nabídky firmy IKA, odpovídá velikosti až 28000 ot·min<sup>-1</sup>. Konečná jemnost materiálu závisí na velikosti ok použitého síta (od 0,25 mm do 4 mm). Jsou vhodné zejména pro předúpravu vzorku před kalorimetrií. [57], [58]



*Obrázek 3.28 Nožový laboratorní mlýnek IKA A 10 basic [59]*

## 4 Metody měření vlastností biopaliva

Po úpravě a namletí materiálu dle požadavků lze přejít k analýze jeho charakteristických vlastností. Mezi nejčastěji stanovované veličiny patří obsah vlhkosti v palivu, obsah prchavé hořlaviny, obsah popela a spalné teplo. Z těchto vlastností lze nejlépe vyhodnotit, o jak kvalitní palivo se jedná.

### 4.1 Stanovení obsahu vlhkosti

Biopaliva jsou velmi hygroskopická – jejich obsah vody se mění vlivem prostředí, např. změnou vlhkosti v atmosféře, teplotou, tlakem apod. Vlhkost způsobuje řadu komplikací. Vyšší obsah vlhkosti v palivu ztěžuje proces spalování, způsobuje korozi, snižuje vlastnosti biopaliva jako např. spalné teplo, podíl prchavé hořlaviny a podíl popela. [2], [5], [11]

Obsah vlhkosti v biopalivu lze zjistit několika metodami. Tyto metody lze rozdělit na přímé a nepřímé. [11]

#### Přímé metody

Přímé metody jsou založeny na oddělení vody od pevné frakce paliva. Mezi přímé metody patří gravimetrická a xylenová metoda. [11]

#### **Metoda sušení v sušárně (gravimetrická metoda)**

Jedná se o nejpřesnější metodu určení vlhkosti dřeva a o referenční metodu při posuzování přesnosti jiných metod. Tato metoda spočívá ve výpočtu obsahu vody z úbytku hmotnosti zkušebního podílu, kdy je vzorek sušen při teplotě 105 °C ve vzduchové atmosféře do konstantní hmotnosti. Doba sušení je různá, závisí např. na velikosti částic materiálu. Pohybuje se v řádech hodin, nesmí však přesáhnout 24 hodin, aby nebyl způsoben únik těkavých složek paliva. Po vysušení jsou vzorky s váženkami ochlazeny na laboratorní teplotu a zváženy. [11], [60]

Obsah vody  $M_{ad}$  [%] ve zkušebním podílu (analytický stav) je poté stanoven pomocí vztahu [60]:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$m_1$  [g] hmotnost prázdné váženky a víčka

$m_2$  [g] hmotnost váženky se zkušebním vzorkem a víčka před sušením

$m_3$  [g] hmotnost váženky se zkušebním vzorkem a víčka po sušení

#### **Sušení v sušárně – referenční metoda**

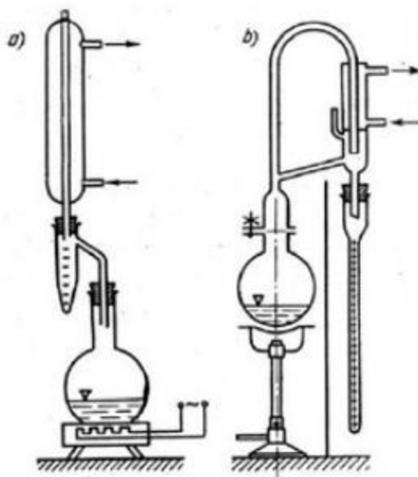
V případě referenční metody jsou používány dva plechy. Na jednom je rozprostřen analyzovaný materiál a druhý (prázdný) slouží jako referenční. Při této metodě je plech s materiálem i referenční plech sušen v sušárně při teplotě  $(105 \pm 2)$  °C do konstantní hmotnosti. Ani u této metody nesmí doba sušení přesáhnout 24 hodin, aby nedošlo k úniku těkavých složek paliva. Po vysušení jsou oba plechy ihned zváženy. Na základě rozdílů jejich hmotností je poté dopočítán obsah vlhkosti v biopalivu. Obsah vlhkosti v palivu (původní stav) je stanoven pomocí následující rovnice [61]:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$m_1$ [g]	hmotnost prázdného plechu použitého pro zkušební podíl
$m_2$ [g]	hmotnost plechu se zkušebním podílem před sušením
$m_3$ [g]	hmotnost plechu se zkušebním podílem po sušení
$m_4$ [g]	hmotnost referenčního plechu před sušením
$m_5$ [g]	hmotnost referenčního plechu po sušení

### Xylenová (destilační) metoda

Tato metoda je velmi přesná a je vhodná zejména pro biopaliva s vyšším podílem vlhkosti. Jedná se o metodu destruktivní. Princip této metody spočívá v destilaci paliva s rozpouštědlem, xylenem. Destilační baňka, ve které je umístěn vzorek přelítý xylenem, je ohřívána. Během destilace jsou páry vody strhávány párami rozpouštědla. Proces destilace je ukončen ve chvíli, kdy jsou kapky xylenu v chladiči čiré. [11]



Obrázek 4.1 Xylenová metoda - zkušební aparatura [11]

### Nepřímé metody

Nepřímé metody jsou založeny nikoliv na přímém odstraňování vlhkosti z paliva, ale na měření vybrané vlastnosti paliva, která je závislá na změně obsahu vody. [11]

Mezi nepřímé metody patří např. [11]:

- odporové měření vlhkosti
- neutronové měření
- mikrovlnná metoda – vysokofrekvenční měřiče vlhkosti
- kvantitativní analýza pomocí NIR spektrometrie
  - dvojúrovňové rentgenové záření
  - nukleární magnetická rezonance (NMR)

### **Odporové měření vlhkosti**

Principem této metody je měření změny vodivosti (odporu) dřeva, která závisí na jeho vlhkosti, integrovanou hrotovou sondou. Jedná se o bodové měření, kdy jsou hodnoty odporu přímo přepočítávány na absolutní vlhkost paliva pomocí integrovaných charakteristik. Přesnost této metody se pohybuje v rozmezí přibližně 0,2 až 0,5 %. [11]

### **Neutronové měření**

Tato metoda je vhodná zejména k určení vlhkosti sypkých materiálů. Jedná se o bezdotykové přístroje, kdy dochází k pružnému rozptylu rychlých neutronů na jádrech vodíku, které ze všech prvků nejúčinněji rozptylují a zpomalují neutrony. Je měřena intenzita neutronového záření po absorpci dřevem. Odezva toku neutronů je dána celkovou objemovou vlhkostí. Měřicí přístroj je složen minimálně ze zdroje rychlých neutronů a detektoru pomalých neutronů. [11]

### **Mikrovlnná metoda**

Principem mikrovlnné metody je dipólové chování molekul vody. Z mikrovlnného generátoru vychází harmonické elektromagnetické rezonanční pole. Dochází k interakci tohoto pole a vody obsažené v palivu. Detektor zjistí změny pole, ty jsou následně vyhodnoceny v CPU a uloženy. Při průchodu porézní látkou dochází ke změně elektromagnetického mikrovlnného záření, neboť záření je pohlcováno zejména volnou vlhkostí, dále pak pevnou fází dané látky. [11]

### **Kvantitativní analýza pomocí NIR spektrometrie**

Jedná se o rychlou nedestruktivní metodu chemické analýzy. Principem metody je měření odraženého/prošlého elektromagnetického záření vzorkem. Část energie záření je pohlcována absorberem. Z energie odraženého světla je možné vyhodnotit informace o chemickém složení vzorku. [11]

### **Dvojúrovňové rentgenové záření**

Emitor vysílá RTG záření skrz materiál. Naproti emitoru je umístěn detektor, který zachycuje zředění vzorku signálu původních dvou frekvencí vycházejících z emitoru. Touto metodou jsou měřeny materiály o vlhkosti cca 10 až 75 %. [11]

### **Nukleární magnetická rezonance (NMR)**

Atomy vodíku vykazují stejné chování jako magnety, proto se v magnetickém poli samy seřadí do určitého úhlu. Pohyb atomu požaduje určitou energii. Ta závisí na síle magnetického pole. Principem této metody je registrace pohybu atomů vodíku v magnetickém poli pomocí NMR spektroskopie. [11]

## **4.2 Stanovení obsahu popela**

Popel je anorganická část paliva zbývající v kotli po spálení organické hmoty, která je v biomase obsažena. Je tvořen z většiny minerálních látek původní biomasy. [62]

Jedná se o vedlejší produkt spalování. Na konci spalovacího procesu zůstane buď nadále ve formě popelu na dně spalovacího zařízení, nebo se nachází ve formě úletového popílku, který je zapotřebí odstranit. Známý obsah popela v biopalivu umožňuje zjistit zbytek paliva po spálení. Množství popela je také důležité znát kvůli jeho negativním dopadům na spalovací zařízení jako je např. zanášení, struskování či koroze. Popel může být buď ukládán, nebo použit k výrobě dalších výrobků. [63]

Průměrný obsah popela v biopalivech bývá cca 1 – 6 %. Množství a chemické složení popela v biomase může být ovlivněno mnoha faktory, mezi něž patří např. stáří a typ biomasy, typ půdy, prach, vlhkost, použití hnojiv, podmínky skladování, spalování apod. [62]

Metoda určení obsahu popela spočívá ve vyžihání zkušební vzorku v muflové peci s řízenou teplotou ( $550 \pm 10$ ) °C do konstantní hmotnosti. Vzorky jsou nejprve zváženy a umístěny do chladné pece. Poté jsou spáleny a po spálení opět zváženy. Na základě rozdílů hmotností před spálením a po něm je výsledný obsah popela v surovém stavu vypočítán pomocí následujícího vztahu [63]:

$$A^r = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Obsah popela v bezvodém stavu je počítán podle vzorce [63]:

$$A^{dr} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (4.4)$$

$m_1$ [g]	hmotnost prázdného kelímku
$m_2$ [g]	hmotnost kelímku se zkušebním podílem
$m_3$ [g]	hmotnost kelímku s popelem
$M_{ad}$ [%]	obsah vody ve zkušebním podílu použitém ke stanovení

### 4.3 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny

Prchavá hořlavina tvoří plynnou část hořlaviny v palivu. Její obsah závisí např. na geologickém stáří paliva – geologicky starší palivo má méně prchavé hořlaviny. [64]

Metoda pro stanovení obsahu prchavé hořlaviny spočívá ve spálení vzorku v muflové peci bez přístupu vzduchu při teplotě 900 °C po dobu 7 minut. Podmínky jako čas a teplota spalování musí být důsledně řízeny, aby nebyly ovlivněny výsledky. Obsah prchavé hořlaviny v původním stavu paliva je počítán jako rozdíl hmotností vzorku před a po spálení pomocí vzorce: [65]

$$V_r = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M_{ad} \right] \quad (4.5)$$

Pro bezvodý stav, kdy je odečtena hmotnost vody obsažená ve vzorku, je používána rovnice [65]:

$$V_d = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M_{ad} \right] \cdot \left( \frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (4.6)$$

$m_1$ [g]	hmotnost prázdného kelímku a víčka
$m_2$ [g]	hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka před zahříváním
$m_3$ [g]	hmotnost kelímku se zkušebním podílem a víčka po zahřívání
$M_{ad}$ [%]	hmotnostní procento obsahu vody v analytickém vzorku

#### 4.4 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti

##### Spalné teplo – kalorimetrická metoda

Spalné teplo je takové množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje. [2]

Při kalorimetrické metodě je stanoveno reakční teplo uvolněné spálením tuhého biopaliva. Zvážený vzorek je vložen do kalorimetru, kde je elektricky zapálen a následně spálen stlačeným kyslíkem. [66] Kalorimetr na základě rozdílu teploty soustavy vypočítá spalné teplo pomocí kalorimetrické rovnice [67]:

$$H_o = \frac{(C \cdot DT - Q_{Ext1} - Q_{Ext2})}{m} \quad (4.7)$$

$H_o$	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]	spalné teplo
$m$	[g]	navážená hmotnost vzorku paliva
$C$	[MJ·K <sup>-1</sup> ]	tepelná kapacita kalorimetrického systému
$DT$	[K]	vypočítaný nárůst teploty vody ve vnitřní nádobě měřicí komory
$Q_{Ext1}$	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]	korekční hodnota tepelné energie generované bavlněným vláknem potřebným ke vznícení
$Q_{Ext2}$	[MJ·kg <sup>-1</sup> ]	korekční hodnota tepelné energie vzniklé hořením jiných pomůcek

##### Výhřevnost

Výhřevnost je množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách nezkondenzuje. Výhřevnost paliva  $Q_i^r$  [kJ·kg<sup>-1</sup>] lze vypočítat ze známého spalného tepla např. pomocí vzorce [2]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (M_{ad} + 8,94 \cdot H_2) \quad (4.8)$$

$M_{ad}$	[-]	obsah vody v palivu
$r$	[kJ·kg <sup>-1</sup> ]	výparné teplo vody, $r = 2454$ kJ·kg <sup>-1</sup>
$H_2$	[-]	obsah vodíku v surovém palivu
$Q_s$	[kJ·kg <sup>-1</sup> ]	spalné teplo paliva

#### 4.5 Měření velikosti částic

##### Sítová analýza

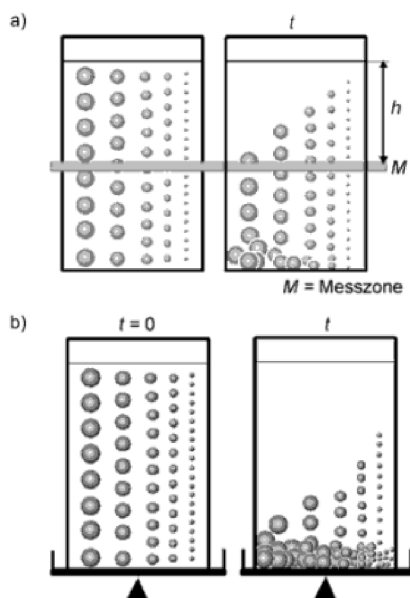
Tato metoda je založena na principu zachytávání částic na sítěch za použití síťového třídiče. Síta jsou tvořena drátěným pletivem. Mají čtvercový tvar ok o daných velikostech. Na horní části síťového třídiče je umístěno síto s největšími rozměry ok, směrem dolů jsou postupně umístěna síta s menšími oky. Pod posledním sítem je nádoba bez ok zachytávající veškerý zbytek, který byl prosítován všemi sítí. [68]

Navážený materiál je vysypán na horní síto. Spuštěné zařízení určené k síťové analýze vytváří vibrace o zadané amplitudě po nastavený čas. Materiál je díky vibracím a následnému zachytávání na sítěch tříděn na jednotlivé frakce. Materiál zachycený na jednotlivých sítích je nakonec zvážen. Měření může být ovlivněno např. směrem, intenzitou, dobou pohybu sít, staršími nebo špatně vyčištěnými sítí apod. Sítování může probíhat jako suché nebo mokré. [68]



### Sedimentační analýza

Metoda spočívá v určení velikosti částic v závislosti na jejich rychlosti klesání v klidném prostředí (kapalina, vzduch). Na začátku měření je koncentrace částic v suspenzi rovnoměrná. Průběžně nastává změna koncentrace v objemu kapaliny. Po určité době je v dané výšce usazování stanovena příslušná koncentrace. Tu lze určit pomocí RTG paprsků, gravimetricky nebo fotometricky. Pro tuto analýzu je pro většinu měření použita Andreasenova pipeta. [68]



Obrázek 4.2 Princip sedimentační analýzy [68]

### Laserová difrakce

Laserová difrakce je metoda využívaná zejména ve farmacii. Principem této metody je osvětlení velkého počtu částic současně a snímání difrakčního obrazu fotodetektozem. Dnešní přístroje založené na laserové difrakci pracují rychle a flexibilně. Nejsou náročné na přípravu vzorku a poskytují výsledky s vysokou reprodukovatelností. Z tohoto důvodu jsou ostatní metody, jako například sedimentační metoda, postupně nahrazovány laserovou difrakcí. [69]

### Dynamický rozptyl světla

Tato metoda, jinak nazvaná fotonová korelační spektroskopie, je vhodná pro měření velmi malých částic o velikosti menší než 1  $\mu\text{m}$  (tzv. submikronových částic). Princip měření spočívá ve fluktuaci rozptýlené intenzity světla a následném určení charakteristického času z autokorelační funkce (ACF). Pomocí difúzního koeficientu je přes Stokes-Einsteinovou rovnici definována informace o velikosti částic. Dolní limit velikosti je zachycen a určen šumem v signálu. Částice o největších velikostech jsou určeny díky sedimentaci částic. [69]

## **5 Experimentální část**

Cílem této práce bylo zjistit, jak výrazný vliv má mletí na vlastnosti mletého materiálu. Použitým materiálem byla štěpka a kůra z měkkého dřeva, konkrétně ze smrku. Materiál byl dodán z Pily Bystrc, Brno. Rozměrově byl použitý materiál poměrně různorodý, od prашných částic po kusy dosahujících jednotek centimetrů. K mletí však byly použity kusy velké maximálně 2 cm. Analyzovaný materiál byl skladován v pytlích při laboratorní teplotě. Při použití byl promíchán lopatkou.

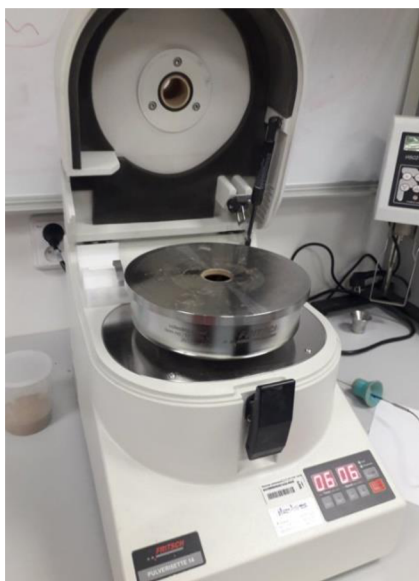


*Obrázek 5.1 Analyzovaný materiál*

Mletí bylo prováděno za různých podmínek. Dřevní štěpka byla mleta při otáčkách 6000, 10000 a 14000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Kromě odlišných otáček byl materiál mlet po různě dlouhou dobu – 2 minuty, 6 minut a 15 minut. Materiál byl také zpracován na rozdílnou výslednou jemnost – 0,5 mm a 1,5 mm. Ve dvou vybraných případech byl mlet i na frakci 1 mm. Během mletí byla za pomoci termočlánku průběžně sledována teplota uvnitř mlýna, kdy byl nejprve vsypán materiál do středu rotoru a poté byl vložen termočlánek. Po získání dostatečného množství mletého materiálu byly analyzovány charakteristické vlastnosti vzorku. Byl stanoven obsah vlhkosti, obsah popela, obsah prchavé hořlaviny, spalné teplo a byla zpracována síťová analýza.

## 5.1 Použité přístroje a pomůcky

### Rotorový rychlomlýnek Fritsch Pulverisette 14 classic



Obrázek 5.2 Rotorový rychlomlýnek Pulverisette 14

- 6000 – 20000 ot·min<sup>-1</sup>
- možnost cyklónového separátoru
- maximální mlecí množství 5 l·hod<sup>-1</sup>
- velikosti ok síta: 0,08 mm, 0,12 mm, 0,2 mm, 0,5 mm, 1,5 mm, 2,0 mm
- vhodné pro měkké a středně tvrdé materiály [70]

### Plášťový termočlánek typu T

- rozsah teplot: od –270 do 400 °C
- délka: 150 mm
- průměr: 1,5 mm
- nerezový plášť
- kladný vodič Cu, záporný vodič CuNi [71]

### Termočlánek typu K

- rozsah teplot: od –270 °C do 1300 °C
- kladný vodič NiCr, záporný vodič NiAl [71]



Obrázek 5.3 Termočlánek typu T

### Kalorimetr IKA C 200



Obrázek 5.4 Kalorimetr IKA C200

- různé měřicí režimy
- pevné a kapalné látky
- hmotnost měřeného vzorku: 0,3 – 1,3 g
- manuální plnění vodou a kyslíkem
- pracovní teplota: 18 – 25 °C
- rozsah měření: 0 – 40 MJ [72]

### Tabletovací hydraulický laboratorní lis Brio BSL-2



Obrázek 5.5 Lis Brio BSL-2

- vnitřní průměr tabletovacího přípravku 10 mm
- max. pracovní síla až 25 tun (dle použitého tabletovacího přípravku)
- hodnotu síly lze přímo odečíst na stupnici manometru
- vhodný k lisování pelet pro kalorimetrii, TGA, IČ spektroskopii apod. [73]

### **Laboratorní sušárna Venticell 111 komfort**



*Obrázek 5.6 Sušárna Venticell 111 [74]*

- rozmezí teplot: od 10 °C nad okolní teplotou do 250/300 °C
- nastavení otáček ventilátoru v rozsahu 0 – 100 % [74]

### **Analytické váhy Ohaus Explorer pro**



*Obrázek 5.7 Analytické váhy*

- průměr vážící misky: 90 mm
- maximální hmotnost váženého vzorku: 110 g
- přesnost: 0,1 mg [75]

### Muflová žhací pec LAC L 12/15



Obrázek 5.8 Muflová žhací pec LAC L 12/15

- regulátor HtIndustry (30 programů po 15 krocích)
- pracovní teplota do 1200 °C
- příkon 3,5 kW
- objem 15 litrů
- přívod ochranné atmosféry
- ke stanovení obsahu popela (ztráta žháním), prchavé hořlaviny [76]

### Vibrační síťový třídič Fritsch Analysette 3 Pro



Obrázek 5.9 Vibrační síťový třídič Fritsch Analysette 3 Pro

- síta o průměru 20 cm o velikosti ok od 0,045 mm do 5,6 mm
- amplituda 0,1 – 3 mm
- síťovací čas 1 – 30 min
- možnost síťování vzorku za mokra s promýváním vodou [77]



### Infrared analyzer ABYSS SynGas 700

- přenosný analyzátor plynu pro online měření CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
- kontinuální záznam výhřevnosti/spalného tepla v MJ·m<sup>-3</sup>
- průtok plynu 0,7 – 1,2 l·min<sup>-1</sup>
- možnost regulace jehlovým ventilem
- provozní teplota měřeného plynu 0 – 50 °C
- vstupní tlak plynu 20 – 100 mbar [78]

Kelímky, lžice, pinzety, plechy, vyžíhané/vysušené nádoby a víčka, štětec, exsikátor se silikagelem, ochranné pomůcky, ochranné (nitrilové) rukavice

### 5.2 Stanovení obsahu vlhkosti

Ke stanovení obsahu vody v materiálu byla aplikována gravimetrická metoda. K tomuto měření byly použity váženky a plechy, analytické váhy, gumové rukavice, exsikátor s vysoušedlem, lžička a sušárna.

Váženky s víčkem byly předem vysušeny v sušárně při teplotě 105 °C po dobu minimálně dvou hodin. Poté byly přeneseny a uchovávány v exsikátoru s vysoušedlem. Nadále s nimi bylo manipulováno v gumových rukavicích, aby nebyla na váženky přenesena vlhkost kůže a výsledky tak nebyly ovlivněny.

Nejprve byla zvážena prázdná váženka s víčkem. Poté byl do váženky vložen a rovnoměrně rozprostřen vzorek o hmotnosti cca 3 g a opět bylo vše zváženo. Všechny použité váženky a víčka byly označeny, aby bylo zamezeno záměně s jinými vzorky. Nepřikryté váženky byly přesunuty na plech a do sušárny. Proces sušení probíhal při teplotě 105 °C po dobu několika hodin, nejdéle však 24 hodin, aby zůstal zachován obsah prchavé hořlaviny. Ihned po vyjmutí ze sušárny byla váženka opět přikryta víčkem a přesunuta do exsikátoru. Zde byla ochlazená na laboratorní teplotu. Po vyjmutí z exsikátoru musela být váženka s víčkem a vysušeným vzorkem okamžitě zvážena, aby nebyla navázána vlhkost. Vše bylo váženo s přesností 0,1 mg na analytických vahách. Pro všechny namleté vzorky byla provedena tři měření z důvodu vyloučení rozdílných hodnot.

Po navážení všech potřebných hodnot hmotností před i po sušení byl obsah vlhkosti stanoven pomocí vzorce [60]:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

$m_1$  [g] hmotnost prázdné váženky a víčka

$m_2$  [g] hmotnost váženky a víčka se vzorkem před sušením

$m_3$  [g] hmotnost váženky a víčka se vzorkem po sušení

### Vzorový výpočet

Pro vzorový výpočet byl vybrán vzorek, který byl mlet po dobu 2 minut při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na velikost 0,5 mm a menší.

#### Výpočet obsahu vlhkosti $M_{ad}$

Podle rovnice (5.1) byl dopočítán obsah vlhkosti u prvního měřeného vzorku.

1. vzorek

$$M_{ad}^1 = \frac{(25,8909 - 25,6698)}{(25,8909 - 22,2104)} * 100 = 6,01 \%$$

Stejným způsobem byly dopočítány hodnoty vlhkosti pro druhý i třetí vzorek téhož namletého materiálu.

2. vzorek

$$M_{ad}^2 = 6,08 \%$$

3. vzorek

$$M_{ad}^3 = 6,03 \%$$

Následně byla pomocí vzorců z literatury [79] vypočtena průměrná hodnota výsledných obsahů vlhkosti, směrodatná odchylka a relativní směrodatná odchylka.

Aritmetický průměr pro všechna měření

$$\overline{M_{ad}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n M_{ad}^i = \frac{1}{n} \cdot (M_{ad}^1 + M_{ad}^2 + M_{ad}^3) \quad (5.2)$$

n... počet měření

$$\overline{M_{ad}} = \frac{1}{3} \cdot (6,01 + 6,08 + 6,03) = 6,04 \%$$

Na základě vypočítaného průměru lze usoudit, že nejvíce je od výsledků odchýlena hodnota obsahu vlhkosti vzorku č. 2, proto byl pro stanovení výsledné vlhkosti zvolen první a třetí vzorek.

Aritmetický průměr (vzorek č. 1 a 3)

$$\overline{M_{ad}} = \frac{1}{n} \cdot (M_{ad}^1 + M_{ad}^3) = \frac{1}{2} \cdot (6,01 + 6,03) = 6,02 \%$$

Směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 3)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (M_{ad}^i - \overline{M_{ad}})^2} \quad (5.3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot [(M_{ad}^1 - \overline{M_{ad}})^2 + (M_{ad}^3 - \overline{M_{ad}})^2]} = \sqrt{\frac{1}{2-1} \cdot [(6,01 - 6,02)^2 + (6,03 - 6,02)^2]}$$

$$s = 0,01 \%$$

Relativní směrodatná odchylka

$$s_r = \frac{s}{\overline{M_{ad}}} \cdot 100 \quad (5.4)$$

$$s_r = \frac{0,01}{6,02} \cdot 100 = 0,17 \%$$



### Výsledný obsah vlhkosti vzorku

$$M_{ad} \doteq (6,02 \pm 0,01) \%$$

### 5.3 Stanovení obsahu popela

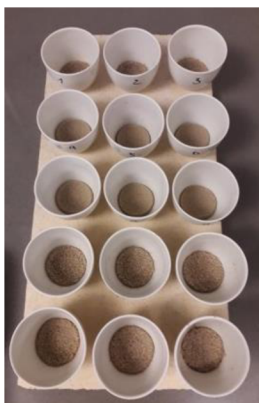
Pro zjištění obsahu popela byla použita muflová žihací pec, analytické váhy, nitrilové rukavice, lžice, kelímky a exsikátor se silikagelem.

Veškeré vážení bylo provedeno na analytických vahách s přesností 0,1 mg. S kelímky bylo manipulováno s použitím ochranných rukavic, aby nebyly ovlivněny výsledky v důsledku navýšení vlhkosti.

Před samotným měřením bylo zapotřebí připravit pracovní nádoby, v tomto případě kelímky. Kelímky byly vyžihány v peci vyhřáté na 550 °C po dobu minimálně 60 minut. Vyžihané kelímky byly nejprve přesunuty na cca 5 minut na odolnou desku. Poté byly uchovávány v exsikátoru se silikagelem.

Jako první byl zvážen prázdný vyžiháný kelímeček, do kterého byl posléze přisypán zkušební vzorek. Kelímeček byl i se vzorkem zvážen. Váha zkušební podílu se pohybovala v rozmezí (12 ± 3) g. Kelímeček se zkušebním vzorkem byl poté vložen do chladné pece. Po uzavření byla pec zapnuta a zvolen příslušný teplotní program. Po několika hodinách byl kelímeček se vzorkem vyjmut z pece a umístěn na tepelně odolnou desku na cca 5 – 10 minut. Poté byl přesunut do exsikátoru s vysoušedlem, kde byl ponechán do zchladnutí na laboratorní teplotu. Nakonec byl kelímeček s popelem zvážen.

Stejný postup byl proveden pro tři zkušební vzorky téhož laboratorního vzorku.



Obrázek 5.10 Chlazení zkušebních vzorků na odolné desce

Jakmile byly známy všechny potřebné hodnoty hmotností, byl obsah popela vypočítán pro původní stav vzorku a pro bezvodý stav. Pro případ stanovení obsahu popela pro původní stav vzorku byl použit vztah [63]:

$$A^r = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.5)$$

- $m_1$  [g] hmotnost prázdného kelímku
- $m_2$  [g] hmotnost kelímku se zkušebním vzorkem
- $m_3$  [g] hmotnost kelímku s popelem

Pro výpočet obsahu popela pro bezvodý stav vzorku byl použit vzorec [63]:

$$A^{dr} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (5.6)$$

$M_{ad}$  [%] obsah vody ve zkušebním podílu

### Vzorový výpočet

Pro vzorový výpočet byl použit vzorek mletý při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut s použitím síta o velikosti ok 0,5 mm.

- **Obsah popela v bezvodém stavu  $A^{dr}$**

$$A^{dr} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (5.7)$$

Podle vzorce (5.7) byl dopočítán obsah popela v bezvodém stavu pro všechny tři naměřené vzorky.

1. vzorek

$$A_1^{dr} = \frac{(42,7123 - 42,4068)}{(54,6951 - 42,4068)} * 100 * \frac{100}{100 - 6,02} = 2,65 \%$$

2. vzorek

$$A_2^{dr} = 2,81 \%$$

3. vzorek

$$A_3^{dr} = 2,67 \%$$

Aritmetický průměr pro všechna měření podle rovnice (5.2)

$$\overline{A^{dr}} = \frac{1}{3} \cdot (2,65 + 2,81 + 2,67) = 2,71 \%$$

Na základě vypočítaného aritmetického průměru lze říci, že největší odchylku vykazuje hodnota vzorku č. 2. V dalších výpočtech byly tedy použity pouze vzorky č. 1 a 3.

Aritmetický průměr (vzorek č. 1 a 3)

$$\overline{A^{dr}} = \frac{1}{2} \cdot (2,65 + 2,67) = \mathbf{2,66 \%}$$

Směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 3) podle rovnice (5.3)

$$s = \sqrt{\frac{1}{2-1} \cdot [(2,65 - 2,66)^2 + (2,67 - 2,66)^2]} = 0,01 \%$$

Relativní směrodatná odchylka podle rovnice (5.4)

$$s_r = \frac{s}{A^{dr}} \cdot 100 = \frac{0,01}{2,66} \cdot 100 = 0,38 \%$$

Výsledný obsah popela pro bezvodý stav (vzorek č. 1 a 3)

$$A^{dr} \doteq (2,66 \pm 0,01) \%$$

- **Obsah popela v surovém stavu  $A^r$**

$$A^r = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (5.8)$$

Podle rovnice (5.8) byl vypočítán obsah popela v surovém stavu pro všechny naměřené vzorky.

1. vzorek

$$A_1^r = \frac{(42,7123 - 42,4068)}{(54,6951 - 42,4068)} * 100 = 2,49 \%$$

2. vzorek

$$A_2^r = 2,64 \%$$

3. vzorek

$$A_3^r = 2,51 \%$$

Poté byla dopočítána a zaokrouhlena výsledná vlhkost z průměru prvního a třetího vzorku.

Výsledný obsah popela v surovém stavu (vzorek č. 1 a 3)

$$A^r \doteq 2,50 \%$$

Dále byla stejným způsobem jako u výpočtu obsahu popela v bezvodém stavu stanovena směrodatná odchylka a relativní směrodatná odchylka pro surový stav materiálu (vzorek č. 1 a 3).

Směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 3) podle rovnice (5.3)

$$s = 0,01 \%$$

Relativní směrodatná odchylka podle rovnice (5.4)

$$s_r = 0,42 \%$$

Výsledný obsah popela pro surový stav (1. a 3. vzorek)

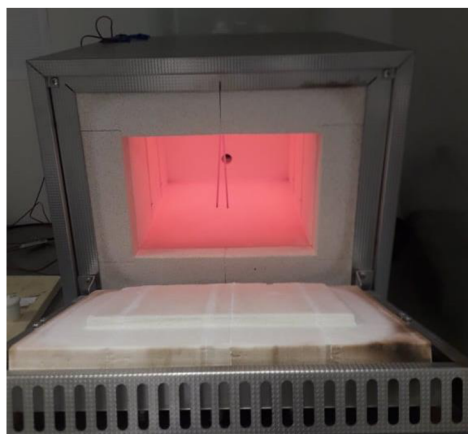
$$A^r \doteq (2,50 \pm 0,01) \%$$

#### 5.4 Stanovení obsahu prchavé hořlaviny

Ke zjištění obsahu prchavé hořlaviny byla využita muflová žíhací pec, analytické váhy s přesností 0,1 mg, exsikátor s vysoušedlem, kleště, vyžíhané kelímky s víčky, dva termočlánky typu K, lžička, ochranné rukavice, stopky, ochranné pomůcky jako např. plášť, ochranné brýle, tepelně odolné rukavice apod.

Kelímky s víčky byly předem vyžíhány po dobu 7 minut v peci ohřáté na 900 °C. Dále byly uchovávány v exsikátoru.

Byla určena hmotnost prázdného kelímku s víčkem. Pomocí lžičky byl do kelímku nasypán a rovnoměrně rozprostřen vzorek o hmotnosti přibližně 1 gram. Opět bylo vše zváženo. Víčko muselo být správně usazeno správně na kelímku, aby se zabránilo oxidaci paliva. Pec byla vyhřátá na teplotu 900 °C. Po otevření dvířek pece byl kelímek se vzorkem pomocí kleští urychleně přemístěn do středu pece. Po uplynutí 7 minut byl kelímek se vzorkem z pece vyjmut a umístěn na odolnou desku na cca 10 minut. Poté byl přesunut do exsikátoru na dochlazení na laboratorní teplotu. Nakonec bylo vše zváženo. Pro každý laboratorní vzorek byla provedena tři měření. Ve středu pece byly umístěny dva termočlánky. Během měření byla sledována a pomocí programu „Yocto-Visualisation“ kontrolována teplota.



Obrázek 5.11 Pec vyhřátá na 900 °C

Z naměřených hodnot hmotností byla dopočítána prchavá hořlavina pro bezvodý stav a pro surový stav vzorku. Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu byl stanoven pomocí rovnice [65]:

$$V_d = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \cdot \left( \frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (5.9)$$

Pro výpočet obsahu prchavé hořlaviny v surovém stavu byl použit vzorec [65]:

$$V_r = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \quad (5.10)$$

$m_1$	[g]	hmotnost prázdné váženky a víčka
$m_2$	[g]	hmotnost váženky a víčka se zkušební vzorkem před zahříváním
$m_3$	[g]	hmotnost váženky a víčka se zkušební vzorkem po zahřívání
$M_{ad}$	[%]	obsah vody ve zkušební vzorku

### Vzorový výpočet

Pro vzorový výpočet byl použit vzorek mletý při 6000 ot·min<sup>-1</sup>, po dobu 2 minut s použitím síta o velikosti ok 0,5 mm.

- **Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu  $V_d$**

$$V_d = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \cdot \left( \frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (5.11)$$

Pomocí vztahu (5.11) byl proveden výpočet obsahu prchavé hořlaviny v bezvodém stavu pro všechny navážené vzorky.

1. vzorek

$$V_d^1 = \left[ \frac{100 \cdot (22,6266 - 21,4760)}{22,6266 - 21,2164} - 6,02 \right] \cdot \left( \frac{100}{100 - 6,02} \right) = 80,41 \%$$

2. vzorek

$$V_d^2 = 80,55 \%$$

3. vzorek

$$V_d^3 = 80,69 \%$$

Aritmetický průměr pro všechna měření podle rovnice (5.2)

$$\overline{V_d} = \frac{1}{3} \cdot (80,41 + 80,55 + 80,69) = 80,55 \%$$

Ze zjištěných hodnot obsahu prchavé hořlaviny byly pro výpočet výsledného obsahu prchavé hořlaviny v bezvodém stavu vybrány dvě hodnoty s nejmenší odchylkou. V tomto případě byl zvolen vzorek č. 1 a 2. Z těchto hodnot byla vypočítána jejich průměrná hodnota. Nakonec byla k oběma vzorkům dopočítána směrodatná odchylka a relativní směrodatná odchylka.

Aritmetický průměr z vybraných hodnot (vzorek č. 1 a 2)

$$\overline{A^{dr}} = \frac{1}{2} \cdot (80,41 + 80,55) = 80,48 \%$$

Směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 2) podle rovnice (5.3)

$$s = \sqrt{\frac{1}{2-1} \cdot [(80,41 - 80,48)^2 + (80,55 - 80,48)^2]} = 0,10 \%$$

Relativní směrodatná odchylka podle rovnice (5.4)

$$s_r = \frac{s}{\overline{V_d}} \cdot 100 = \frac{0,10}{80,48} \cdot 100 = 0,12 \%$$

Výsledný obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu

$$V_d \doteq (80,48 \pm 0,10) \%$$

• **Obsah prchavé hořlaviny v surovém stavu  $V_r$**

$$V_r = \left[ \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] \quad (5.12)$$

Podle rovnice (5.12) byl dopočítán obsah prchavé hořlaviny v surovém stavu pro všechny naměřené vzorky.

1. vzorek

$$V_r^1 = \left[ \frac{100 \cdot (22,6266 - 21,4760)}{22,6266 - 21,2164} - 6,02 \right] = 75,57 \%$$

2. vzorek

$$V_r^2 = 75,71 \%$$

3. vzorek

$$V_r^3 = 75,84 \%$$

Výsledná hodnota byla určena ze vzorků č. 1 a 2, které vykazovaly nejmenší odchylku.

Aritmetický průměr obsahu prchavé hořlaviny v surovém stavu (vzorek č. 1 a 2)

$$\bar{V}_r = \frac{1}{2} \cdot (75,57 + 75,71) = 75,64 \%$$

Směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 2) podle rovnice (5.3)

$$s = 0,07 \%$$

Relativní směrodatná odchylka (vzorek č. 1 a 2) podle rovnice (5.4)

$$s_r = 0,09 \%$$

Výsledný obsah prchavé hořlaviny v surovém stavu

$$V_r \doteq (75,64 \pm 0,07) \%$$

## 5.5 Stanovení spalného tepla

Spalné teplo bylo měřeno kalorimetrickou metodou pomocí kalorimetru IKA C 200 zkalibrovaného kyselinou benzoovou. Kromě kalorimetru byly pro stanovení spalného tepla použity analytické váhy, lis, pomůcky k lisování, pinzeta, bavlněné vlákno, kyslíková bomba, tlakoměr, Petriho misky, odměrné válce, teploměr, kelímek, zapalovací drát.

### Lisování

Nejdříve bylo nutné vytvořit z namletého vzorku pelety za použití hydraulického lisu Brio BSL-2.

Nejprve bylo zapotřebí připravit lisovací přípravek. K tomu byl použit válec se sousým otvorem po celé výšce válce pro nasypání namletého vzorku. Válec byl z jedné strany uzavřen pomocí malého pístu a víčka. Z druhé strany byl naplněn vzorkem. Ten byl pomocí dalšího malého pístu a pomocného pístu uzavřen a stlačen. Takto sestavený lisovací přípravek byl následně přesunut do středu pracovního stolu lisu. Pomocí přítlačného šroubu byl přípravek zafixován. Poté byl zavřen ochranný kryt a dotáhnout přepouštěcí ventil. Pomocí dvojranné páky byl postupně zvyšován tlak v lisu na cca 2 MPa. Tlak byl sledován na manometru. Po dosažení požadovaného tlaku byl uvolněn přepouštěcí ventil a přítlačný šroub a otevřen ochranný kryt. S využitím pomůcek pro vysouvání pelet byla peleta vyjmuta z válce. Vyrobená peleta byla zvážena a hodnota zaznamenána. Vyrobená peleta byla uchovávána v Petriho misce. Po vytvoření pelety bylo přistoupeno k samotné kalorimetrii.



Obrázek 5.12 Hydraulický lis



Obrázek 5.13 Pomůcky pro výrobu pelet

### Kalorimetrická metoda

Na dno kyslíkové bomby bylo nalito cca 10 ml vody o teplotě přibližně 20 °C. Víčko bomby bylo tvořeno zapalovacím drátem a držákem kelímku. K zapalovacímu drátu bylo pomocí liščí smyčky přivázáno bavlněné vlákno a utaženo. Konce vlákna bylo možné držet prsty, se zbytkem bylo zapotřebí manipulovat např. pomocí pinzety. Kelímek byl vložen do stojanu pod zapalovací drát tak, aby byly konce vlákna umístěny na dně kelímku. Poté byla vytvořená peleta vložena do kelímku tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího kontaktu s oběma konci vlákna. Víčko se vzorkem bylo vloženo do bomby, utáhnuto a následně natlakováno kyslíkem na cca 3 MPa. Bomba pak byla umístěna do kalorimetru a uzavřena pomocí víčka. Do kalorimetru byla nalita voda o objemu cca 2 litry a teplotě přibližně 20 °C. Poté byl zapnut kalorimetr. Pomocí tlačítek na kalorimetru byla nejprve zapsána hmotnost vzorku. Poté bylo potvrzeno, že byla do nádrže nalita voda a víko kalorimetru bylo bezpečně

uzavřeno. Po těchto úkonech bylo zahájeno samotné měření kalorimetru. Měření bylo provedeno v tzv. dynamickém režimu. Po uplynutí doby měření (8,60 min) byla na displeji kalorimetru zobrazena vypočítaná hodnota spalného tepla.

Při naměření hodnot s minimální odchylkou bylo měření provedeno pro dva zkušební podíly jednoho laboratorního vzorku. Jestliže byla výsledná hodnota spalného tepla výrazně odchýlena od očekávané, bylo měření zopakováno. K výrazné odchylce mohlo dojít z několika důvodů, nejčastěji vlivem nehomogenity vyrobené pelety. Dále mohly být odchylky způsobeny úletem části vzorku z kelímku. Vzorek také nemusel být zapálen z důvodu špatného kontaktu vlákna se vzorkem.



Obrázek 5.14 Kalorimetr



Obrázek 5.15 Održená část vzorku

V programu MS Excel byly ze získaného spalného tepla vypočítány i ztráty žiháním a balastní podíl vzorku.

### Vzorový výpočet

Pro vzorový výpočet byl opět vybrán vzorek, který byl mlet po dobu 2 minut při  $6000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost  $0,5 \text{ mm}$  a menší. K výpočtu balastního podílu byly použity dříve vypočítané hodnoty obsahu vlhkosti a obsahu popela (v surovém i bezvodém stavu) vzorku.

#### Znamé hodnoty potřebné pro výpočet

→ Vlhkost vzorku

$$M_{ad} = 6,02 \%$$

→ Obsah popela v původním vzorku

$$A^r = 2,50 \%$$

→ Obsah popela v bezvodém stavu

$$A^{dr} = 2,66 \%$$

#### Ztráta žiháním (obsah hořlaviny) v původním vzorku $h^r$ [80]

$$h^r = 100 - A^r \quad (5.13)$$

$$h^r = 100 - 2,50 = 97,50 \%$$



Obsah hořlaviny v sušině  $h_{dr}$  [80]

$$h^{dr} = 100 - A^{dr} \quad (5.14)$$

$$h^{dr} = 100 - 2,66 = 97,34 \%$$

Spalné teplo původního vzorku (průměrná hodnota výsledků z kalorimetru)

$$Q_s = 18,609 \text{ MJ/kg}$$

Obsah sušiny [80]

$$w_{dr} = 100 - M_{ad} \quad (5.15)$$

$$w_{dr} = 100 - 6,02 = 93,98 \%$$

Spalné teplo sušiny [80]

$$Q_s^{dr} = \frac{Q_s}{w^{dr}} * 100 \quad (5.16)$$

$$Q_s^{dr} = \frac{18,609}{93,98} * 100 \doteq 19,801 \text{ MJ/kg}$$

Spalné teplo hořlaviny [80]

$$Q_s^{daf} = \frac{Q_s^{dr}}{h^{dr}} * 100 \quad (5.17)$$

$$Q_s^{daf} = \frac{19,801}{97,34} * 100 \doteq 20,342 \text{ MJ/kg}$$

Balastní podíl [81]

$$B^r = A^r + M_{ad} \quad (5.18)$$

$$B^r = 2,50 + 6,02 = 8,52 \%$$

## 5.6 Mletí

Experiment byl proveden pro různé hodnoty nastavených parametrů a následně byly analyzovány vlastnosti materiálu a dopad procesu mletí na ně. Analyzovanými vlastnostmi byly obsah vlhkosti ve vzorku, obsah popela v bezvodém stavu, obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu a spalné teplo paliva. Pro každý vzorek byla zpracována i síťová analýza.

K mletí byl použit rotorový rychlomlýnek Pulverisette 14. Termočlánek typu T byla během mletí sledována teplota. Nejprve bylo vždy zapotřebí správně sestavit jednotlivé části mlýna. Do otevřeného mlýna byla vložena sběrná miska, rotor se 12 noži, kolem rotoru síto s danými rozměry ok a nahoru víko. Poté byl mlýn uzavřen, připojen do zásuvky a připraven k mletí. Mlýn byl nastaven na požadované otáčky a čas a nakonec zapnut. Postupně byl do středu rotoru pomocí lžice přisypáván materiál.

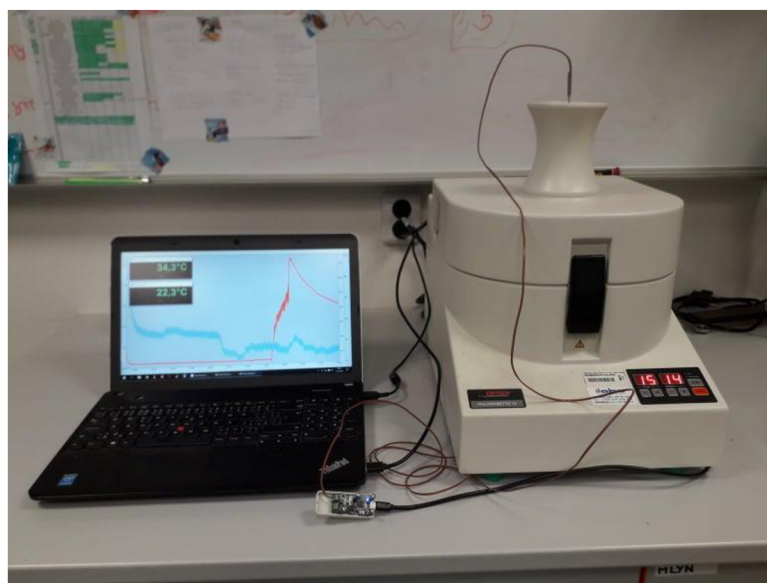


*Obrázek 5.16 Sestavený mlýn*



*Obrázek 5.17 Přisypávání materiálu*

Po každém vsypání byl do středu rotoru vložen termočlánek. Termočlánek byl připojen k počítači a pomocí programu „Yocto-Visualisation“ byla průběžně sledována teplota okolí i ve mlýně. Ve chvíli, kdy byla dosažena maximální teplota ve mlýně a začala mít opět sestupnou tendenci, byla přisypána další štěpka.



*Obrázek 5.18 Sestava pro sledování teploty okolí a ve mlýně během mletí*

Pokud byly během mletí zaznamenány zvuky naznačující problém (např. zaseknutí štěpky, které je ukázáno na obrázku 5.19), byl proces mletí zastaven a otevřen mlýn.



Obrázek 5.19 Zaseknutý vzorek

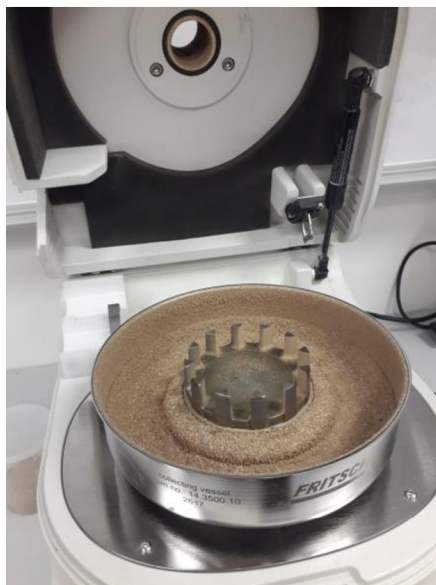
Přístroj je dimenzován na práci s otáčkami od 6000 do 20000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Aby bylo možné zjistit, jak výrazný má na vlastnosti paliva vliv požadovaná jemnost paliva, čas a rychlost mletí, byla zvolena poměrně široká rozmezí nastavení mlýna.

Pro analýzu vlastností paliva byly zvoleny otáčky 6000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , 10000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a 14000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Pro všechny varianty nastavení otáček bylo palivo mleto po dobu 2 minut, 6 minut a 15 minut. Byla použita síta o velikosti ok 0,5 mm a 1,5 mm. Ve dvou (krajních) případech byl namlet vzorek s použitím síta o velikosti ok 1 mm. Na tuto velikost byl v prvním případě vzorek mlet při 6000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po dobu 2 minut a ve druhém případě při 14000  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po dobu 15 minut. Pro lepší přehlednost jsou tato nastavení zobrazena v tabulce 2. Po namletí materiálu byly vzorky zanalyzovány. Pomocí MS Excel byly dopočítány vlastnosti jednotlivých vzorků a vytvořeny tabulky a grafy závislosti.

Tabulka 2 Přehled nastavení mlýna pro úpravu vzorků

<u>2 minuty</u>		
6000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	10000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	14000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- 0,5 mm	- 0,5 mm	- 0,5 mm
- 1,0 mm	- 1,5 mm	- 1,5 mm
- 1,5 mm		
<u>6 minut</u>		
6000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	10000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	14000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- 0,5 mm	- 0,5 mm	- 0,5 mm
- 1,5 mm	- 1,5 mm	- 1,5 mm
<u>15 minut</u>		
6000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	10000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$	14000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$
- 0,5 mm	- 0,5 mm	- 0,5 mm
- 1,5 mm	- 1,5 mm	- 1,0 mm
		- 1,5 mm

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny vzorky namleté na jemnost 0,5 mm a 1,5 mm.



Obrázek 5.20 Vzorek namletý na velikost  
0,5 mm



Obrázek 5.21 Vzorek namletý na velikost  
1,5 mm

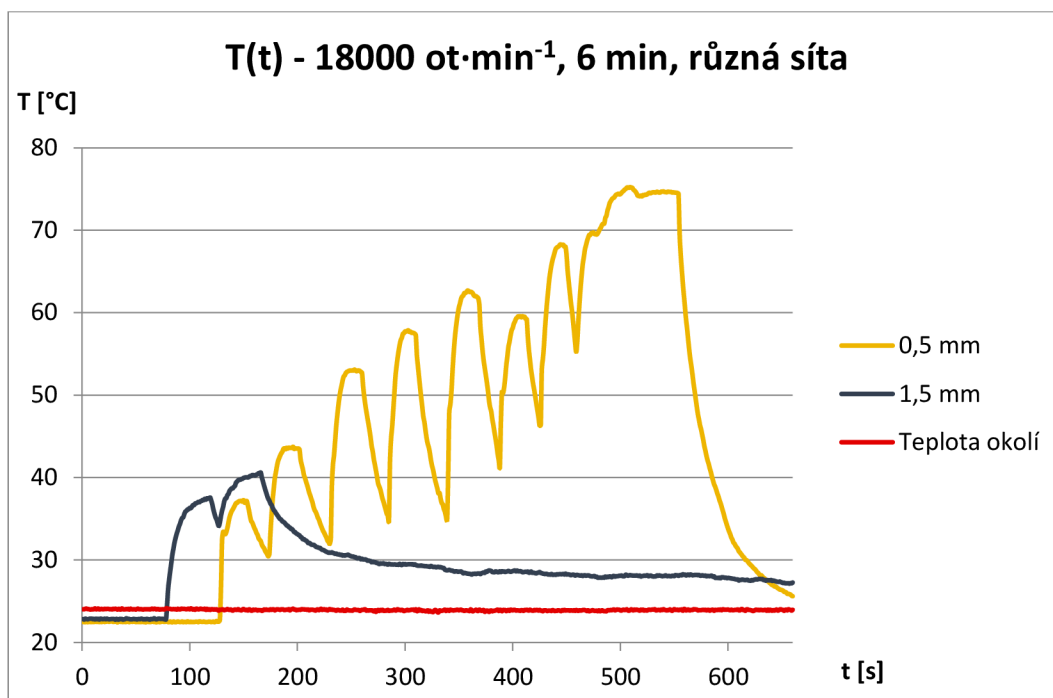
Z důvodu rozmezí otáček mlýna uvedených v manuálu byly původně stanoveny nejvyšší otáčky o velikosti  $18000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nejprve byl namlet vzorek na 0,5 mm s nastavenou dobou mletí 6 minut. Poté bylo zvoleno nastavení mlýna na stejné otáčky, stejný čas, ale na výslednou frakci 1,5 mm. V tomto případě ale nebylo mletí dokončeno z důvodu poruchy mlýna. Těsnění, na kterém bylo umístěno síto, bylo vlivem vysokých otáček roztrženo. V důsledku poškození těsnění bylo roztrženo i síto.

Roztržené síto i těsnění jsou zobrazeny na obrázku 5.22. Pro další měření bylo po obdržení nového kusu těsnění a síta od těchto vysokých otáček upuštěno.



Obrázek 5.22 Roztržené síto a těsnění

Na obrázku 5.23 je zobrazena průběžná teplota během mletí při 18000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na 0,5 mm, které bylo dokončeno, a teplota během mletí na velikost 1,5 mm do okamžiku poruchy a zastavení mlýna.



Obrázek 5.23 Průběh teploty ve mlýně během mletí při 18000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm a 1,5 mm

Lze vidět, že u vzorku mletého na 0,5 mm byla teplota po každém přísypání vzorku vyšší o cca 5 až 10 °C. Maximální dosažená hodnota odpovídala přibližně 75 °C. V případě mletí na hrubší frakci při těchto otáčkách lze postřehnout, že zastavení mlýna bylo provedeno po cca 2 minutách mletí. Nejvyšší dosažená teplota tohoto mletí odpovídala hodnotě blízké 40 °C, což bylo srovnatelné s teplotou dosaženou ve stejném čase během mletí na 0,5 mm. Nejvyšší zaznamenaná teplota tedy nebyla extrémní a pravděpodobně nebyla důvodem poruchy mlýna. Nelze jednoznačně určit, co bylo příčinou poruchy. Mohlo být opotřebované či poškozené těsnění. Mohl být také například zaseknut vzorek mezi rotorem a sítím. Pravděpodobně ale byla porucha způsobena vlivem vysokých otáček.

V další části práce budou již vyhodnocovány výsledky měření.

### 5.6.1 Surový materiál

Nejprve byl analyzován surový materiál, tedy štěpka a kůra z měkkého smrkového dřeva. Vlastnosti materiálu byly měřeny pro porovnání s vlastnostmi upravených vzorků. Získané hodnoty obsahu vlhkosti  $M_{ad}$ , obsahu popela v bezvodém stavu  $A^{dr}$ , obsahu prchavé hořlaviny v bezvodém stavu  $V_d$  i spalného tepla  $Q_s$  jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Vlastnosti nemletého materiálu

$M^{ad}$ [hm. %]	8,77
$A^{dr}$ [hm. %]	1,97
$V_d$ [hm. %]	82,81
$Q_s$ [MJ/kg]	17,883



Následně byla provedena síťová analýza surového paliva. Navážené hodnoty a vypočtené poměrné zbytky na jednotlivých sítích jsou zobrazeny v tabulce 4.

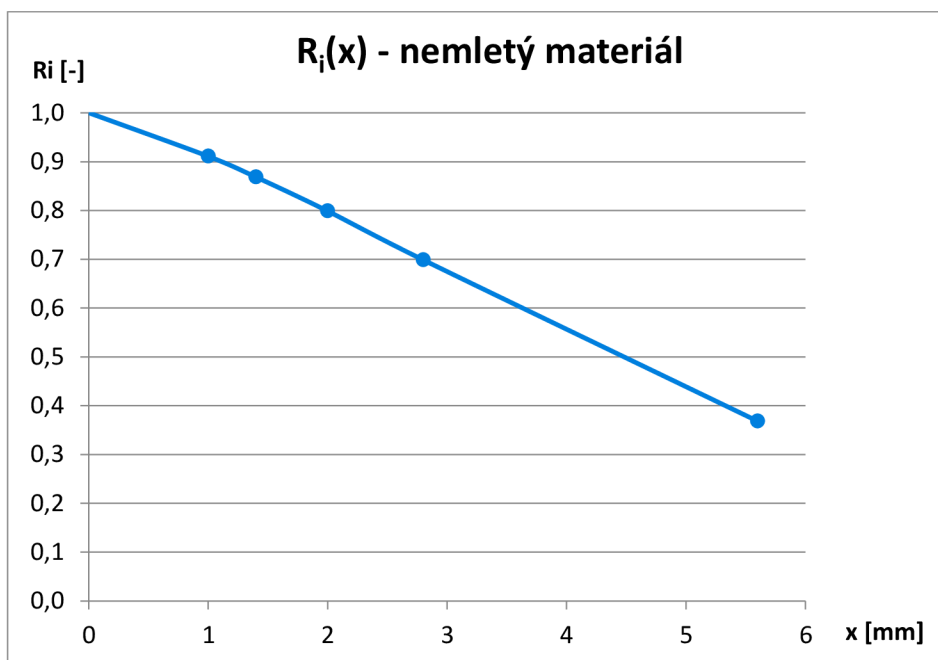
Počáteční hmotnost vzorku:

$$m_v = 52,18 \text{ g}$$

Tabulka 4 Síťová analýza surového materiálu

Síto	Velikost ok x [mm]	$m_i$ [g]	Poměrné zbytky na sítích $R_i$ [-]
1	5,6	19,21	0,37
2	2,8	17,24	0,70
3	2	5,22	0,80
4	1,4	3,63	0,87
5	1	2,22	0,91
Dno	0	4,65	1,00

Na základě dat z tabulky 4 byla pomocí MS Excel sestrojena rozseвовá křivka materiálu.



Obrázek 5.24 Rozseвовá křivka surového materiálu

Na tomto grafu lze vidět, že na rozseвовé křivce surového materiálu byl zaznamenán téměř lineární průběh. Největší množství částic bylo zachyceno na nejhrubším sítu (37 %). V původním materiálu bylo tedy obsaženo velké množství částic větších než půl centimetru a více než třetina materiálu byla tvořena částicemi většími než 5,6 mm. Srovnatelné množství materiálu bylo zachyceno na sítu o velikosti ok 2,8 mm. V tomto případě bylo naváženo 33 % částic materiálu. Pouze necelých 10 % materiálu bylo prosítováno až na dno.

### 5.6.2 Mletí bez cyklónu

Jak již bylo řečeno, mletí bylo provedeno nejprve bez použití cyklónu. V této podkapitole jsou interpretovány výsledky z těchto měření.

#### Obsah vlhkosti

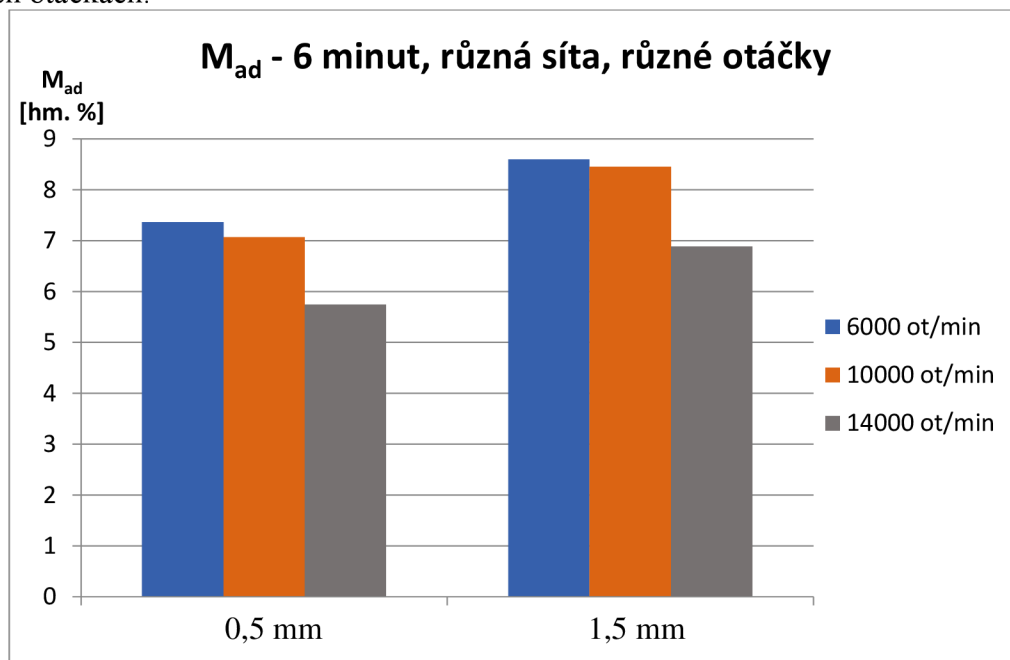
V tabulce 5 jsou zobrazeny vypočítané hodnoty obsahu vlhkosti jednotlivých vzorků.

Tabulka 5 Obsah vlhkosti

[min]	[ot·min <sup>-1</sup> ]	M <sub>ad</sub> [hm. %]	
		0,5 mm	1,5 mm
2	6000	6,02	8,44
	10000	<b>5,05</b>	6,56
	14000	5,86	6,89
6	6000	7,37	8,60
	10000	7,07	8,46
	14000	5,75	6,89
15	6000	6,60	<b>8,82</b>
	10000	5,07	5,93
	14000	5,32	6,05

Ze zjištěných hodnot množství vlhkosti jednotlivých vzorků je patrné, že s použitím jemnějšího síta byl zaznamenán nižší obsah vlhkosti. Nejnižší vlhkost (5,05 %) byla zjištěna u vzorku mletého po dobu 2 minut při 10000 ot·min<sup>-1</sup> s použitím síta o velikosti ok 0,5 mm. Nejvyšší obsah vlhkosti o hodnotě 8,82 % byl naměřen u vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut na velikost 1,5 mm.

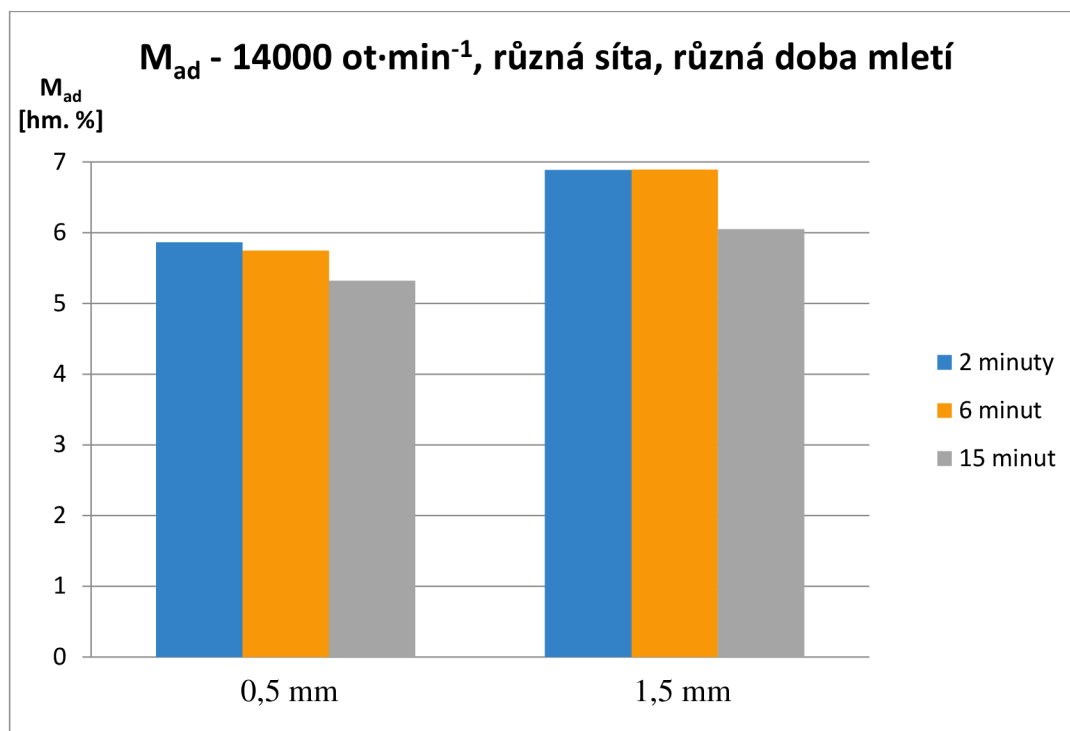
Na následujícím grafu je ukázán obsah vlhkosti vzorků obou frakcí mletých 6 minut při různých otáčkách.



Obrázek 5.25 Obsah vlhkosti vzorků mletých 6 minut na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při různých otáčkách

Lze si povšimnout, že s použitím vyšších otáček byl v případě obou použitých sít zaznamenán pokles obsahu vlhkosti materiálu. Výraznější pokles obsahu vlhkosti byl oproti nižším otáčkám postřehnout u vzorku mletého na nejvyšší otáčky. Tento rozdíl obsahu vlhkosti mezi mletými vzorky při nejnižších a nejvyšších otáčkách odpovídal přibližně 1,5 %. S vyššími otáčkami byl tedy zaznamenán vyšší únik vlhkosti, což mohlo být způsobeno např. větší odstředivou silou působící na částice vlivem vysoké rotace mlýna. Tento graf zároveň ukazuje vyšší výskyt vlhkosti v případě použití hrubšího síta. Nižší přítomnost vlhkosti ve vzorku mohla nastat v důsledku mletí na jemnější frakci a následné eliminaci dutin a pórů v částicích, kde mohla být vlhkost držena. V článku [82] byl zaznamenán stejný průběh, kde v důsledku snížení velikosti částic bylo zmenšeno množství pórů v nich. Zároveň byla u jemnějšího mletí zvýšena hustota částic a objemová hmotnost vzorku.

Na následujícím grafu jsou zobrazeny obsahy vlhkosti vzorků obou frakcí mletých po různě dlouhou dobu při nejvyšších otáčkách.

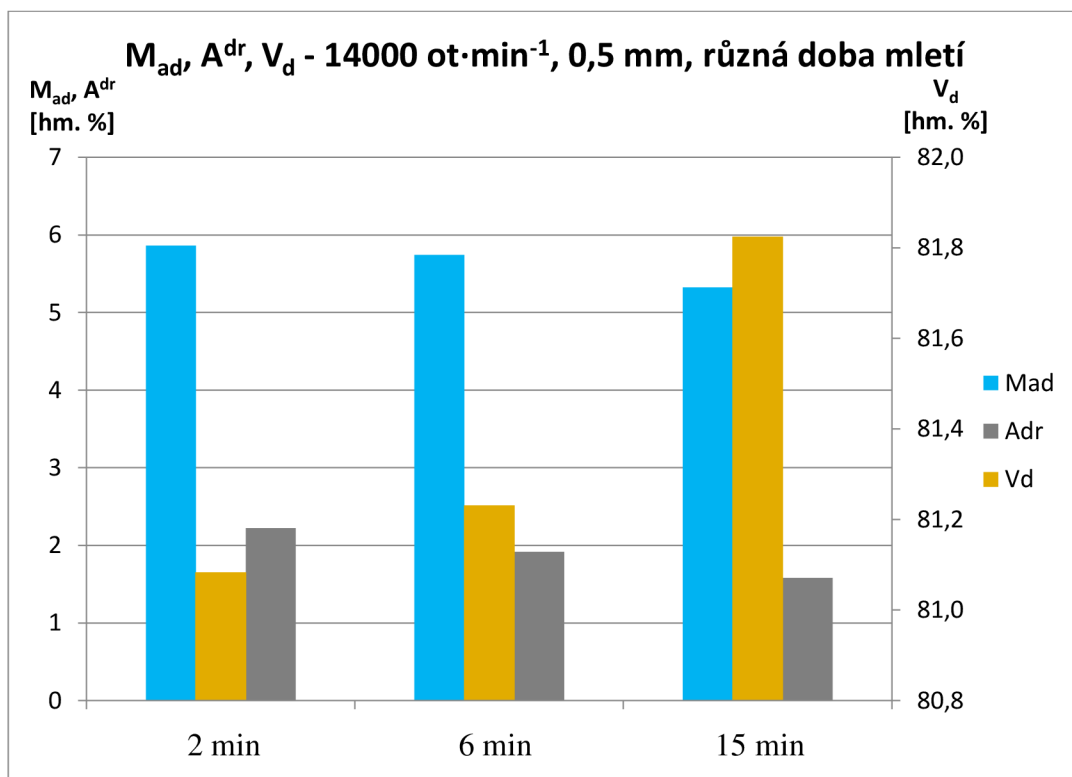


Obrázek 5.26 Obsah vlhkosti u vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost 0,5 mm a 1,5 mm po různě dlouhou dobu

Při těchto otáčkách byl u obou použitých sít s delším časem mletí zaznamenán pokles obsahu vlhkosti, přičemž nižších hodnot bylo dosaženo u vzorků mletých na 0,5 mm. Rozdíly v obsahu vlhkosti mezi jednotlivými časy mletí u této frakce nebyly tak výrazné jako v případě hrubšího síta. Při použití jemnějšího síta byl zjištěn rozdíl mezi nejkratší a nejdelší dobou mletí cca 0,5 %, zatímco u hrubšího síta tento rozdíl odpovídal téměř 1 %. S delší dobou mletí tedy bylo dosaženo výraznějšího vysušení vzorků. K tomu mohlo dojít např. vlivem delšího setrvání vzorku ve sběrné nádobě, kde byla udržována vyšší teplota v důsledku tření během mletí.



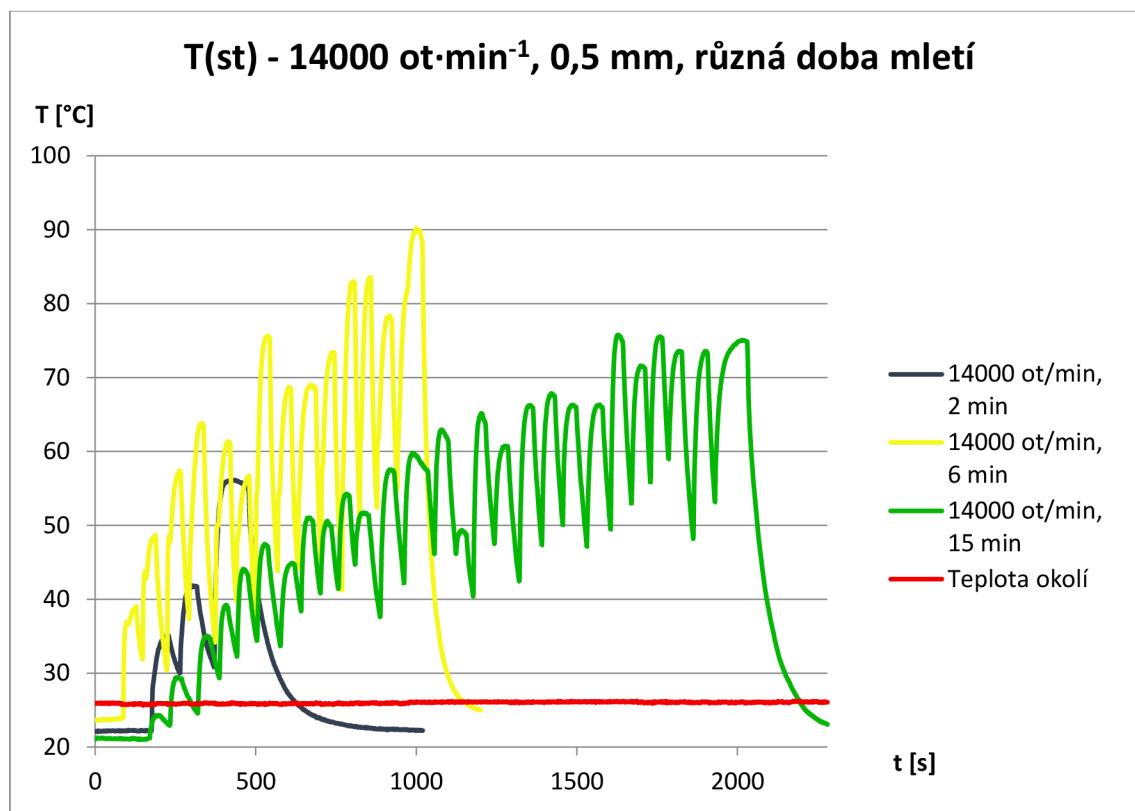
Na následujícím grafu je zobrazena změna vlastností paliva mletého po různě dlouhou dobu při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost  $0,5 \text{ mm}$  při klesající vlhkosti.



Obrázek 5.27 Vlastnosti vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost  $0,5 \text{ mm}$  po různě dlouhou dobu

Z grafu lze vyčíst, že vlivem většího vysušení vzorku v důsledku delší doby mletí byl způsoben nárůst obsahu prchavé hořlaviny a pokles obsahu popela. Největší rozdíly byly zjištěny mezi dobou mletí 6 minut a 15 minut. Tento rozdíl pro všechny zobrazené vlastnosti odpovídal přibližně  $0,5 \%$ .

Dále je ukázán graf s průběhy teplot během mletí při stejných podmínkách jako na obrázku 5.27. Jedná se tedy o různý čas mletí při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  se sítím o velikosti ok  $0,5 \text{ mm}$ .



Obrázek 5.28 Průběh teploty ve mlýně během mletí při 14000 ot·min<sup>-1</sup> na velikost 0,5 mm po různé dlouhý čas

Při mletí po dobu 2 minut bylo dosaženo nejvyšší teploty odpovídající přibližně 56 °C, přičemž největší teplotní skok o velikosti cca 19 °C byl zaznamenán po posledním vsypání materiálu. Výraznější nárůst teploty mohl být způsoben např. nasypáním většího množství vzorku, zaseknutím větší částice v rotorové části mlýna apod.

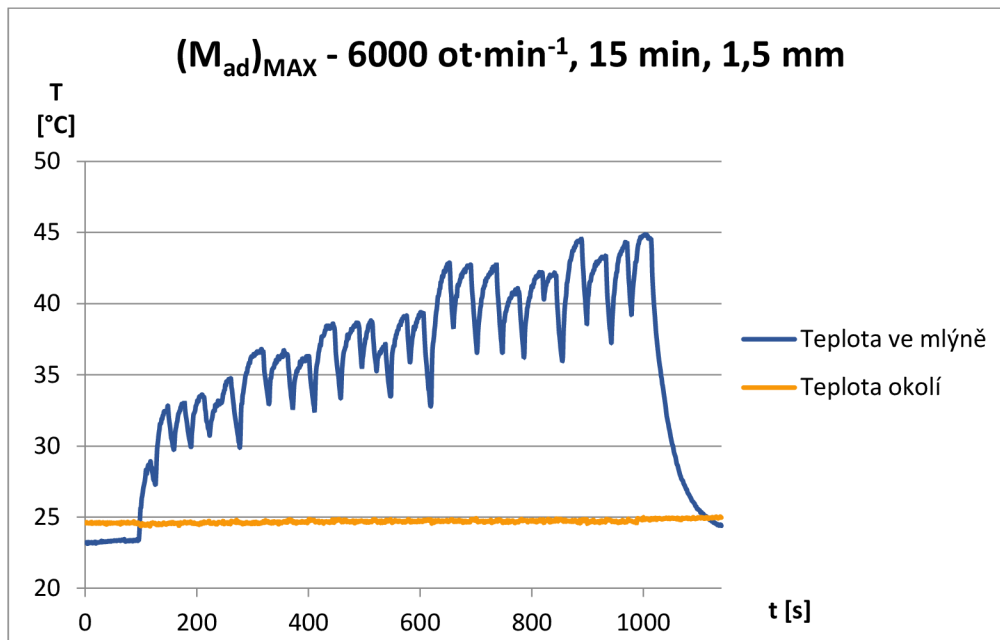
V případě mletí po dobu 6 minut bylo po postupném nárůstu teploty dosaženo její nejvyšší hodnoty odpovídající cca 90 °C. V průběhu měření byly zaznamenány i mírné poklesy teploty, jejichž příčinou mohly být např. menší částice původního materiálu nebo přisypání menšího množství materiálu do mlýna. Celkově ale zůstal zachován rostoucí trend teploty.

Maximální teplota, které bylo dosaženo během mletí po nejdelší dobu, odpovídala přibližně 75 °C. Tato teplota zůstala zachována posledních cca 5 minut mletí. V tomto případě byl vzorek zřejmě více a rovnoměrněji ochlazován vlivem vysokých otáček rotoru. Doba mletí tedy zřejmě nemá při vysokých otáčkách na ohřev ve mlýně výrazný vliv a není nezbytné nastavovat delší dobu mletí.

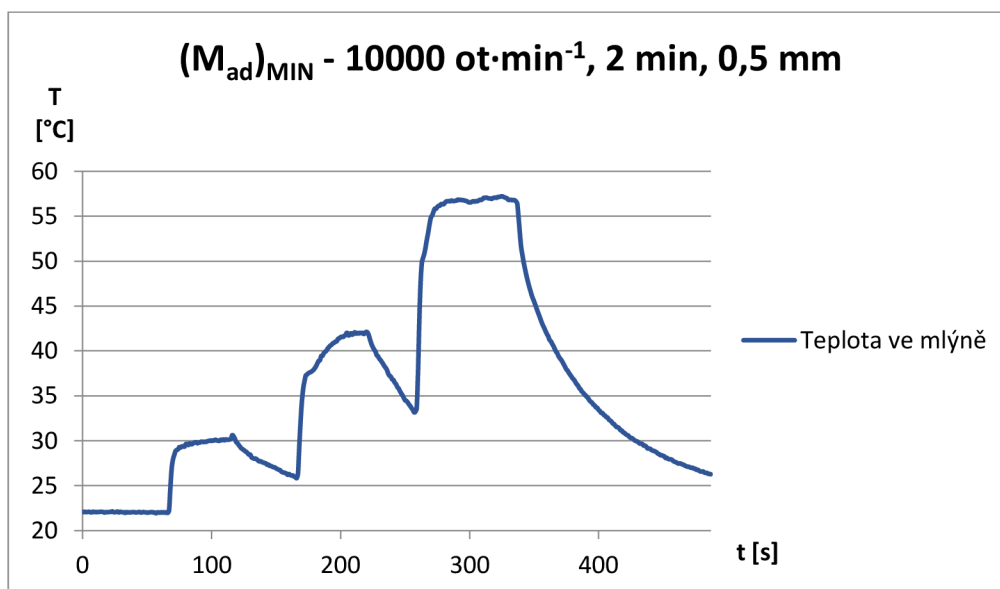
Ze zmíněných měření bylo tedy nejvyšší teploty dosaženo při mletí po dobu 6 minut. To mohlo být způsobeno vyšším třením v důsledku např. větší koncentrace materiálu ve středu rotoru nebo zaseknutí větší částice vzorku mezi břity rotoru. I přesto však byla nižší vlhkost naměřena v případě 15minutového mletí z důvodu delší doby setrvání vzorku ve sběrné nádobě mlýna a jeho následném ohřevu. Nižší obsah vlhkosti mohl být způsoben např. degradací složek hemicelulózy a celulózy, které jsou velmi hygroskopické. V literatuře [82], ve které byla analyzována lesní biomasa, byl mimo jiné sledován vliv teploty na tyto složky. Z výsledků této studie vyplývá, že vyšší teplotou byl způsoben pokles těchto složek. Z toho lze usoudit, že nižší vlhkost u vzorků této práce mohla být naměřena

právě v důsledku delšího setrvání vzorku ve sběrné misce, kde byla teplota permanentně vyšší.

Dále byly vytvořeny grafy interpretující průběhy teplot během mletí vzorků s nejnižší a nejvyšší zjištěnou vlhkostí.



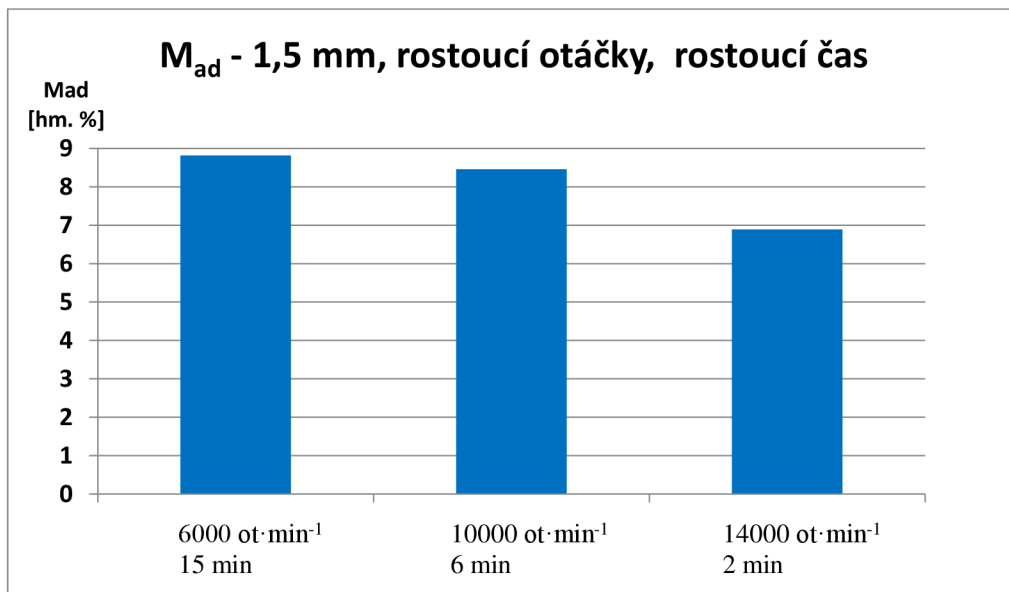
Obrázek 5.29 Průběh teploty ve mlýně a okolí pro vzorek s největším obsahem vlhkosti – mletí při 6000 ot·min<sup>-1</sup>, 15 min, 1,5 mm



Obrázek 5.30 Průběh teploty ve mlýně a okolí pro vzorek s nejmenším obsahem vlhkosti - mletí při 10000 ot·min<sup>-1</sup>, 2 min, 0,5 mm

Na základě vykreslených teplotních grafů lze konstatovat, že vyšší teploty ve mlýně v průběhu mletí bylo dosaženo při použití vyšších otáček. K většímu úniku vlhkosti mohlo dojít např. zvýšením teploty ve mlýně v důsledku intenzivnějšího tření.

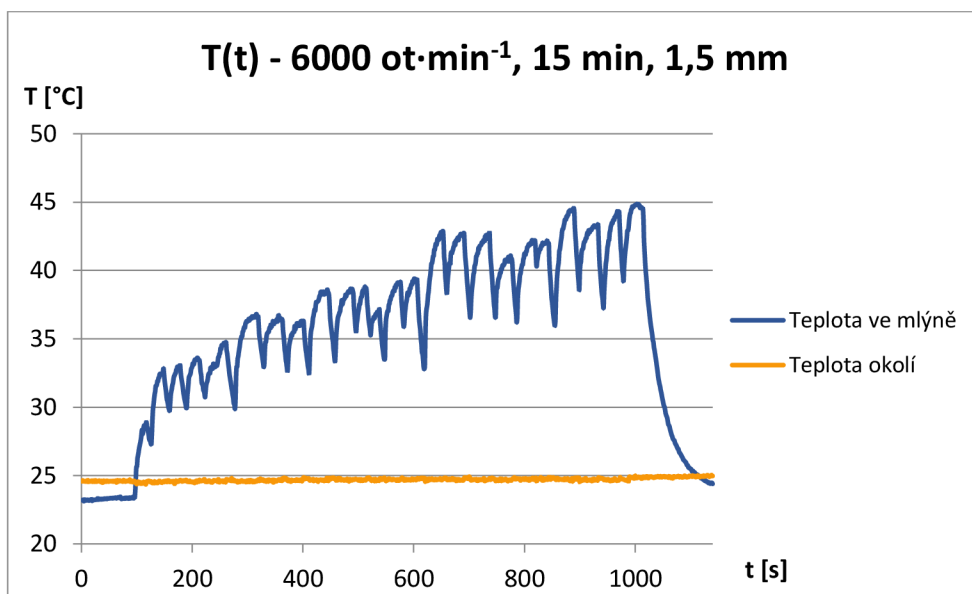
Na následujícím grafu je ukázána změna obsahu vlhkosti u vzorků mletých na zrnitost 1,5 mm za podmínek, kdy byly zvýšeny otáčky a zároveň zkrácena doba mletí.



Obrázek 5.31 Obsah vlhkosti vzorků mletých na velikost 1,5 mm při kratší době mletí a rostoucích otáčkách

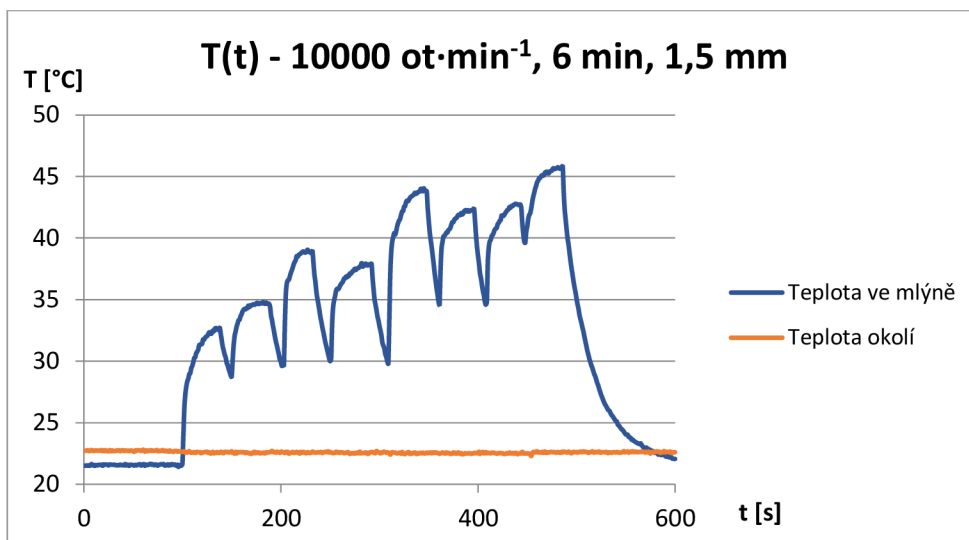
Pro síto o velikost ok 1,5 mm byl s použitím vyšších otáček mlýna současně s kratším časem mletí zaznamenán pokles obsahu vlhkosti. V případě obsahu vlhkosti byla tedy zjištěna větší závislost na výši otáček než na délce mletí. Většího úniku obsahu vlhkosti bylo dosaženo s vyššími otáčkami. Rozdíl mezi krajními případy odpovídal téměř 2 % obsahu vlhkosti ve vzorcích.

Dále jsou uvedeny grafy s průběhem teploty během mletí pro výše zmíněné vzorky.



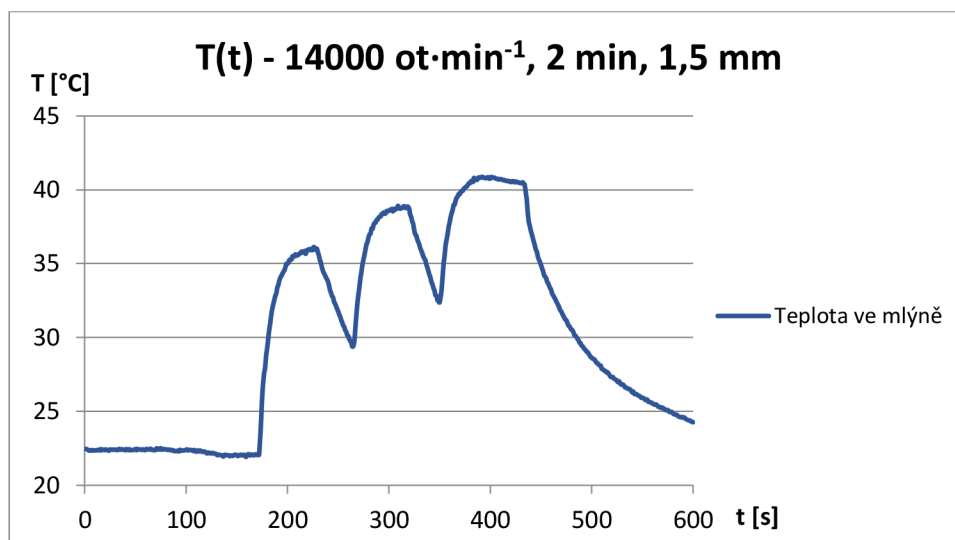
Obrázek 5.32 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorku mletého na velikost 1,5 mm při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut

V tomto případě, kdy byl vzorek mlet po nejdélejší dobu při nejnižších otáčkách, bylo dosaženo nejvyšší teploty (cca 45 °C) na konci mletí. V první polovině mletí byl zaznamenán rychlejší nárůst teploty. Ve druhé polovině nebyly výkyvy teploty větší než cca 5 °C. Menší teplotní rozdíly v této části mletí mohly být způsobeny např. přisypáváním menších částic původního materiálu, které mohly zůstat nashromážděny ve spodní části nádoby, ze které byl materiál odebíráán.



Obrázek 5.33 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorků mletého na velikost 1,5 mm při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut

Nejvyšší zaznamenaná teplota během mletí při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut dosahovala hodnoty přes 45 °C, což bylo srovnatelné s předchozím případem.



Obrázek 5.34 Průběh teploty ve mlýně během mletí vzorku mletého na velikost 1,5 mm při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut

Při nejvyšších otáčkách a nejkratší době mletí byla nejvyšší zaznamenaná teplota rovna přibližně 41 °C.

Z uvedených grafů lze vyvodit, že s vyššími otáčkami a kratším časem mletí bylo ve mlýně dosaženo menších hodnot teploty. To mohlo být způsobeno tím, že vzorek byl během mletí z poměrně velké části vysušen vlivem vysoké rychlosti rotace oproti mletí při menších otáčkách. Proto měl tento vzorek také menší podíl obsahu vlhkosti.

#### Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu $V_d$

V tabulce 6 jsou uvedeny vypočítané a zjištěné hodnoty obsahu prchavé hořlaviny v bezvodém stavu všech namletých vzorků.

Tabulka 6 Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu všech vzorků [hm. %]

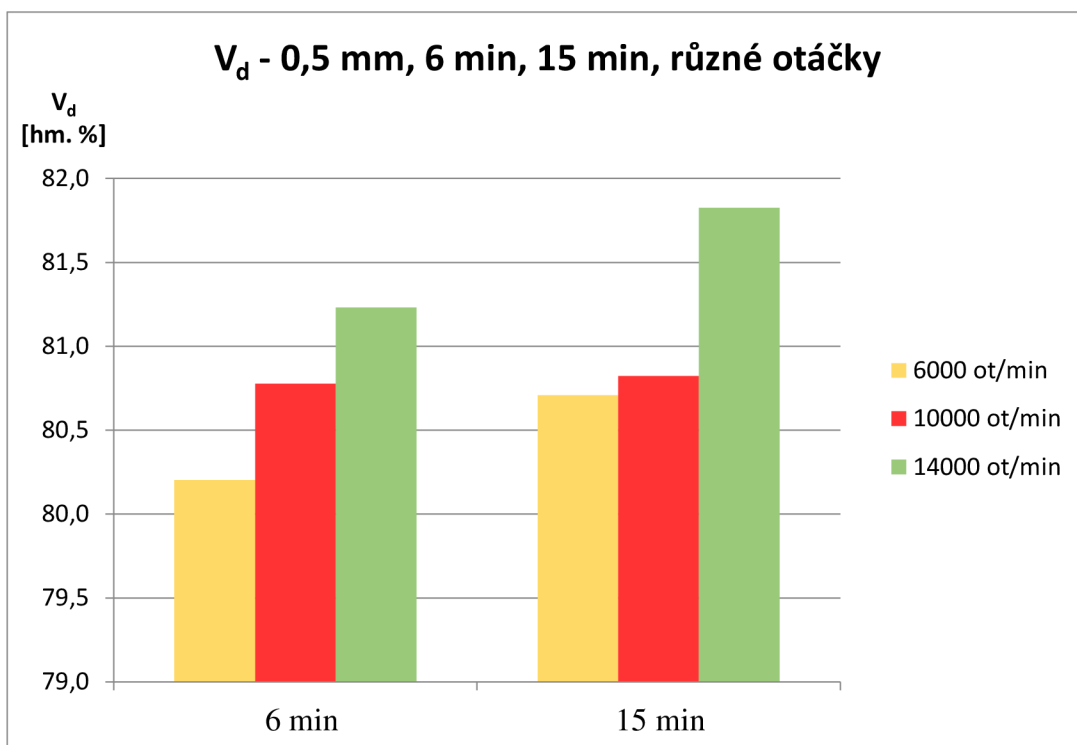
[min]	[ot·min <sup>-1</sup> ]	$V_d$ [hm. %]	
		0,5 mm	1,5 mm
2	6000	80,48	81,27
	10000	81,88	82,55
	14000	81,08	81,79
6	6000	80,20	81,94
	10000	80,78	81,83
	14000	81,23	82,51
15	6000	80,71	81,89
	10000	80,82	81,73
	14000	81,83	82,02

Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu surového paliva:

$$V_d = 82,81 \%$$

Ve všech případech namletých vzorků zůstala prchavá hořlavina v bezvodém stavu zachována ve velmi podobném množství, jaké bylo naměřeno u vzorku původního, nemletého. Nejvyšší podíl prchavé hořlaviny byl obsažen v nemletém materiálu o hodnotě 82,81 %. Nejmenší množství prchavé hořlaviny (80,20 %) bylo zjištěno u vzorku mletého 6 minut při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na jemnějším sítu. Obsah prchavé hořlaviny se tedy pohyboval v rozmezí  $\pm 2,5$  %.

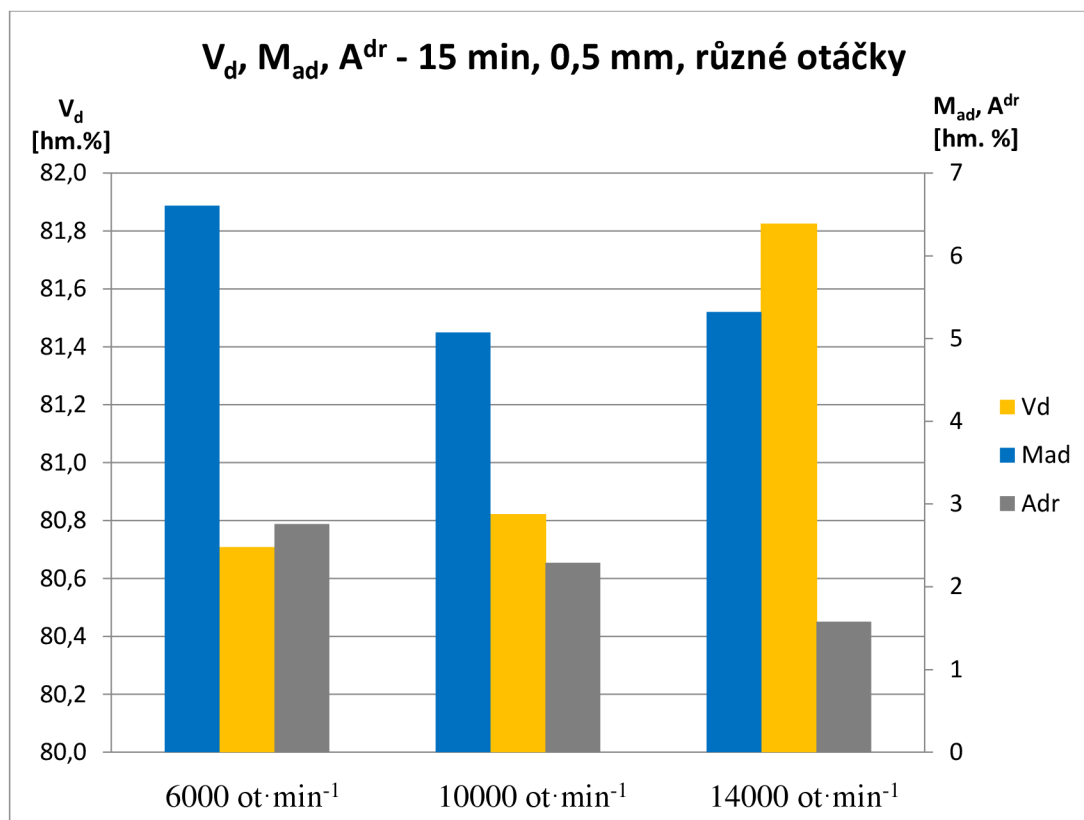
V následujícím grafu jsou zobrazeny obsahy prchavé hořlaviny v bezvodém stavu vzorků mletých 6 a 15 minut na velikost 0,5 mm při různých otáčkách.



Obrázek 5.35 Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm po dobu 6 minut a 15 minut při různých otáčkách

Během mletí po dobu 6 a 15 minut byl s použitím vyšších otáček zaznamenán nárůst podílu prchavé hořlaviny v palivu. V případě mletí po dobu 6 minut byl s vyššími otáčkami mlýna nárůst prchavé hořlaviny plynulejší než v případě 15 minut. U vzorků mletých tento časový úsek bylo pro otáčky  $6000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  dosaženo podobných hodnot podílu prchavé hořlaviny. Vyšší nárůst obsahu prchavé hořlaviny byl zjištěn v případě nejvyšších otáček mlýna. Zároveň zde byl zaznamenán nejvyšší podíl hořlaviny ze zobrazených vzorků. Hodnota tohoto obsahu odpovídala 81,83 %. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo u vzorku mletého 6 minut při  $6000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Z těchto vzorků byl rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou přes 1,6 %. Nárůst podílu prchavé hořlaviny mohl být zapříčiněn vyššími otáčkami a následným poklesem podílu vlhkosti ve vzorcích.

Na základě tohoto měření byl vytvořen následující graf. Jsou na něm zobrazeny vlastnosti paliva mletého 15 minut při měnících se otáčkách na výslednou jemnost 0,5 mm.

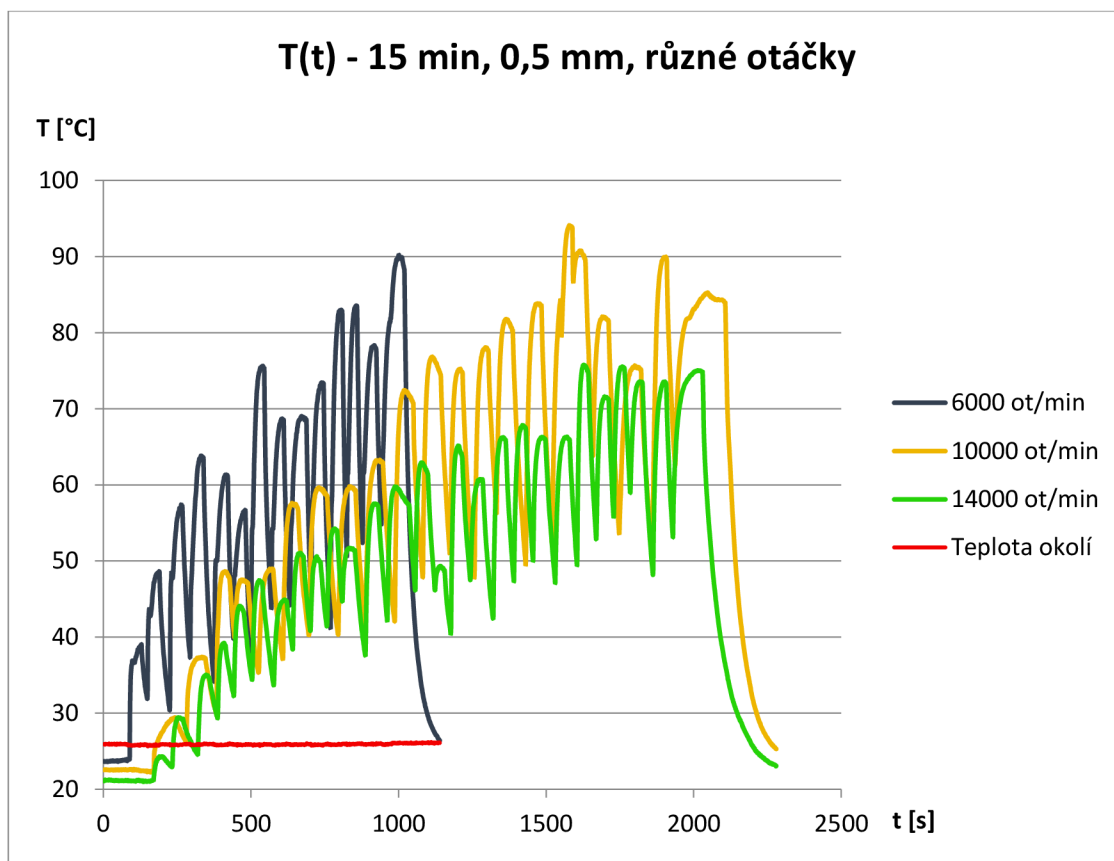


Obrázek 5.36 Vlastnosti vzorků mletých po dobu 15 minut na velikost 0,5 mm při různých otáčkách

Lze vidět, že se vzrůstajícím obsahem prchavé hořlaviny byl zaznamenán pokles podílu popela, a to nejvýrazněji opět mezi dvěma nejvyššími použitými otáčkami. Výše rozdílu mezi těmito podíly obsahu popela dosahovala přibližně 0,7 %. Obsah prchavé hořlaviny byl ovlivněn podílem vlhkosti ve vzorcích – její podíl dosáhl vyšší hodnoty pro vysušenější vzorek. Při vyšších otáčkách nebyl naměřen průběžný pokles vlhkosti, ovšem rozdíl v obsahu vlhkosti mezi otáčkami 10000 ot·min<sup>-1</sup> a 14000 ot·min<sup>-1</sup> nebyl příliš výrazný (cca 0,25 %).

Dále jsou uvedeny grafy s průběhy teplot těchto vzorků během mletí.



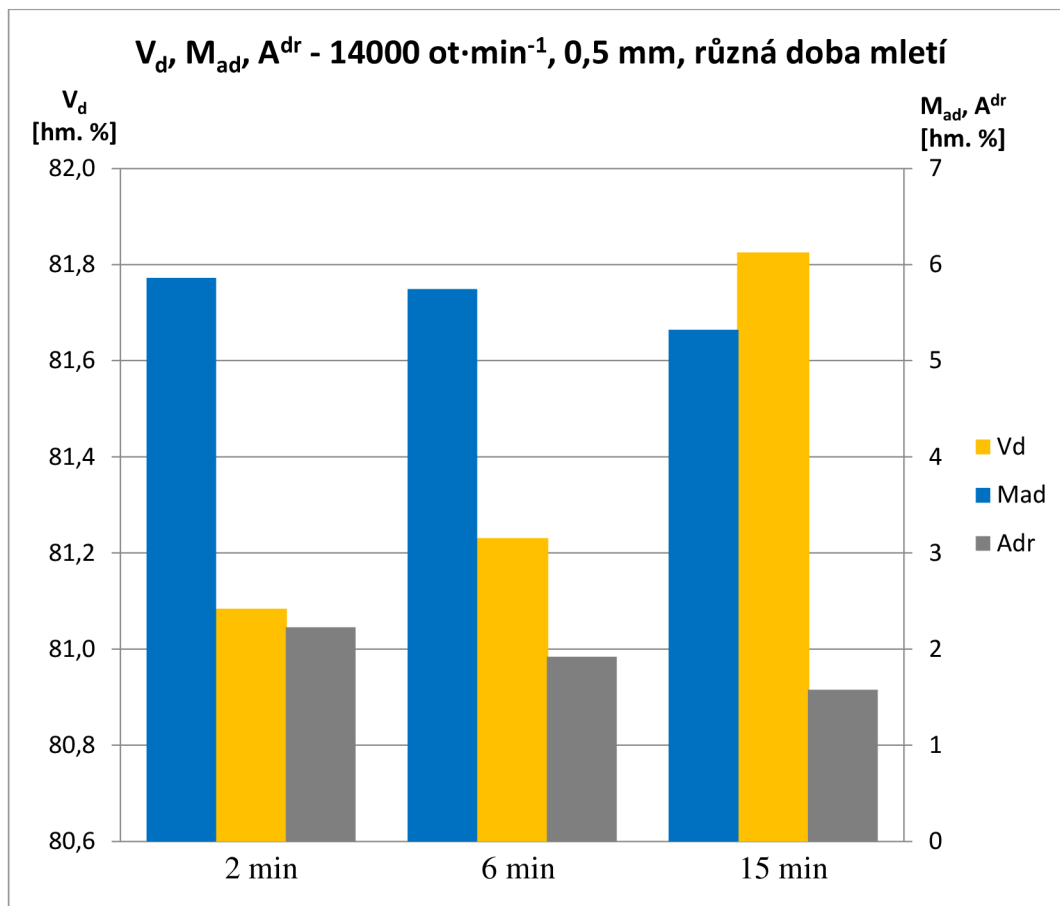


Obrázek 5.37 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí po dobu 15 minut na velikost 0,5 mm při různých otáčkách

V průběhu mletí při 6000 ot·min<sup>-1</sup> byl zaznamenán nárůst teploty až do dosažení její nejvyšší hodnoty (cca 90 °C) na konci mletí. Při nastavení otáček na 10000 ot·min<sup>-1</sup> bylo dosaženo nejvyšší teploty (cca 94 °C) přibližně v poslední třetině mletí. Po zbývající čas teplota střídavě klesala a opět narůstala. V případě použití nejvyšších otáček bylo zaznamenáno průběžné zvyšování teploty až do nejvyšší hodnoty odpovídající cca 75 °C (asi po 11 minutách). Po zbytek mletí zůstala přibližně tato teplota zachována.

Z předchozích grafů lze vyvodit, že nejvyšší teplota byla zjištěna během mletí při otáčkách 10000 ot·min<sup>-1</sup>. To mohlo být způsobeno např. zaseknutým vzorkem v rotorové části mlýna. Díky tomu mohl obsah vlhkosti z těchto tří namletých vzorků dosahovat nejnižší hodnoty. Rostoucí trend obsahu prchavé hořlaviny tím však příliš ovlivněn nebyl. Nárůst obsahu prchavé hořlaviny byl postřehnut u vzorků mletých s vyššími otáčkami. Z literatury [82], ve které byly analyzovány vzorky lesní biomasy v závislosti na teplotě během torefakce, vyplývají podobné postřehy - s vyšší teplotou byl zaznamenán pokles podílu prchavé hořlaviny. Obsah prchavé hořlaviny ve vzorku byl tedy zásadně ovlivněn chlazením v důsledku toku vzduchu během mletí při vysokých otáčkách rotoru.

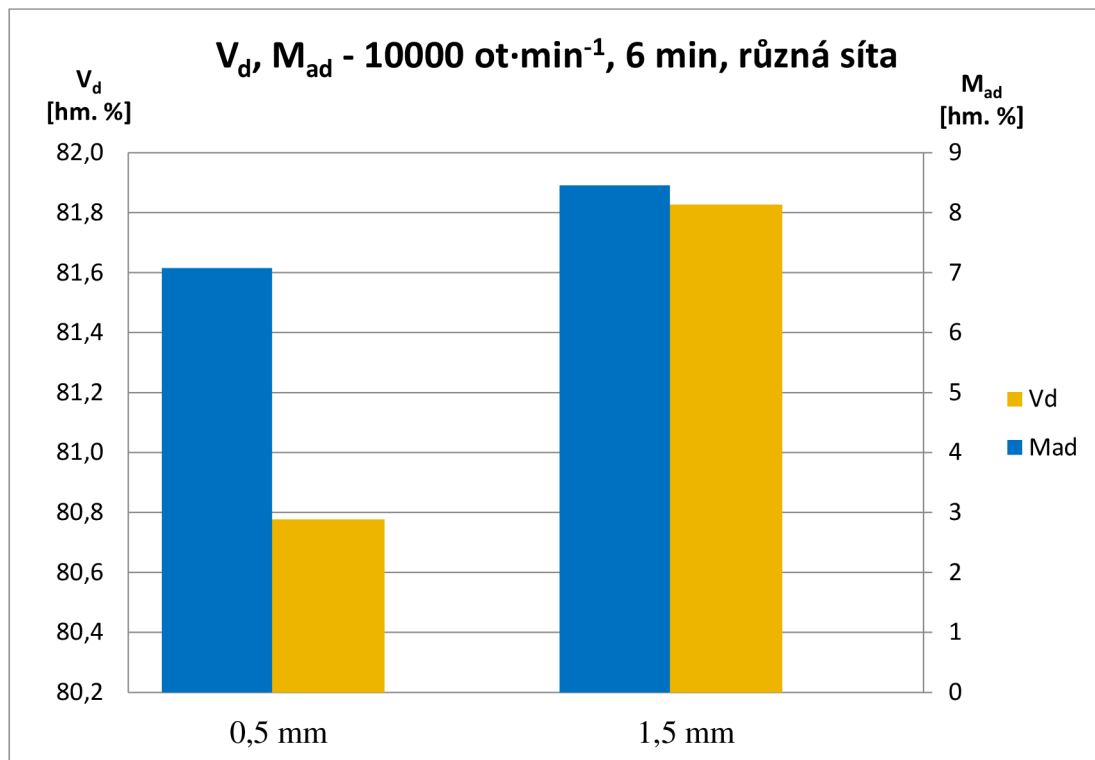
Na následujícím grafu jsou zobrazeny změny vlastností paliva mletého po různé dlouhou dobu při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na výslednou frakci  $0,5 \text{ mm}$ .



Obrázek 5.38 Vlastnosti vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost  $0,5 \text{ mm}$  po různé dlouhou dobu

Na tomto grafu lze vidět, že při otáčkách  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  byl s delším časem mletí zjištěn vyšší podíl prchavé hořlaviny. Rozdíl mezi nejkratším a nejdelším časem mletí paliva v podílu prchavé hořlaviny odpovídal cca  $0,7 \%$ . I v tomto případě lze říci, že se zvyšujícím se podílem prchavé hořlaviny byl podíl obsahu popela v palivu nižší. Rozdíl mezi krajními hodnotami času mletí se též i v případě podílu popela blížil  $0,7 \%$ . Na tomto grafu již lze postřehnout zřetelnější klesající trend obsahu vlhkosti s narůstajícím obsahem prchavé hořlaviny, přestože hodnoty obsahu vlhkosti pro časy mletí 2 minuty a 6 minut si byly velmi podobné. V případě podílu prchavé hořlaviny tedy byla podstatná i doba mletí.

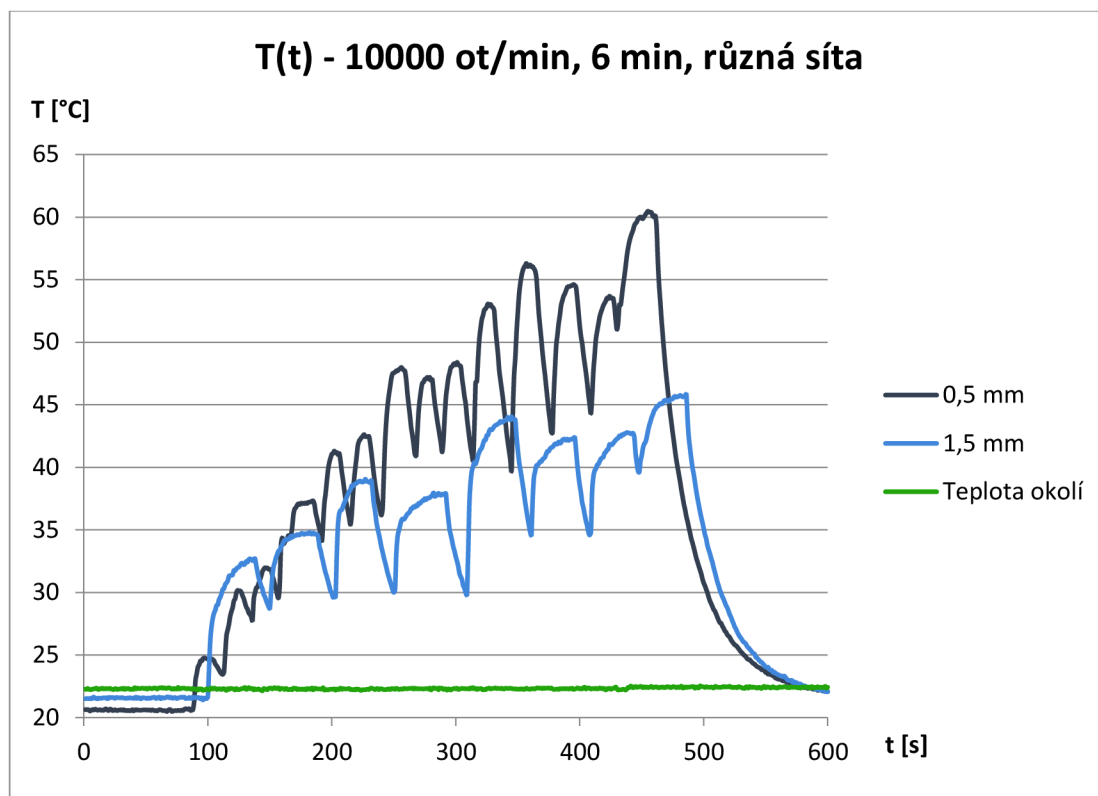
Na následujícím grafu je zobrazeno porovnání obsahu prchavé hořlaviny  $V_d$  a vlhkosti  $M_{ad}$  v závislosti na sítu použitým během mletí (jedná se o vzorky mleté po dobu 6 minut při  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ).



Obrázek 5.39 Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu a vlhkosti vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po dobu 6 minut

Jak již bylo řečeno v části o obsahu vlhkosti, poklesu obsahu vlhkosti bylo dosaženo u mletí na jemnější frakci. Lze ale postřehnout, že byl ve vzorku též zaznamenán pokles podílu prchavé hořlaviny, ačkoli byl podíl vlhkosti v palivu s jemnějším sítem nižší. Stejně změny těchto vlastností v závislosti na hrubosti síta byly zjištěny u všech namletých vzorků, tedy v případě všech použitých otáček a všech časech mletí. Větší únik podílu prchavé hořlaviny byl tedy pravděpodobně zapříčiněn intenzivnějším třením v důsledku použití menších ok síta.

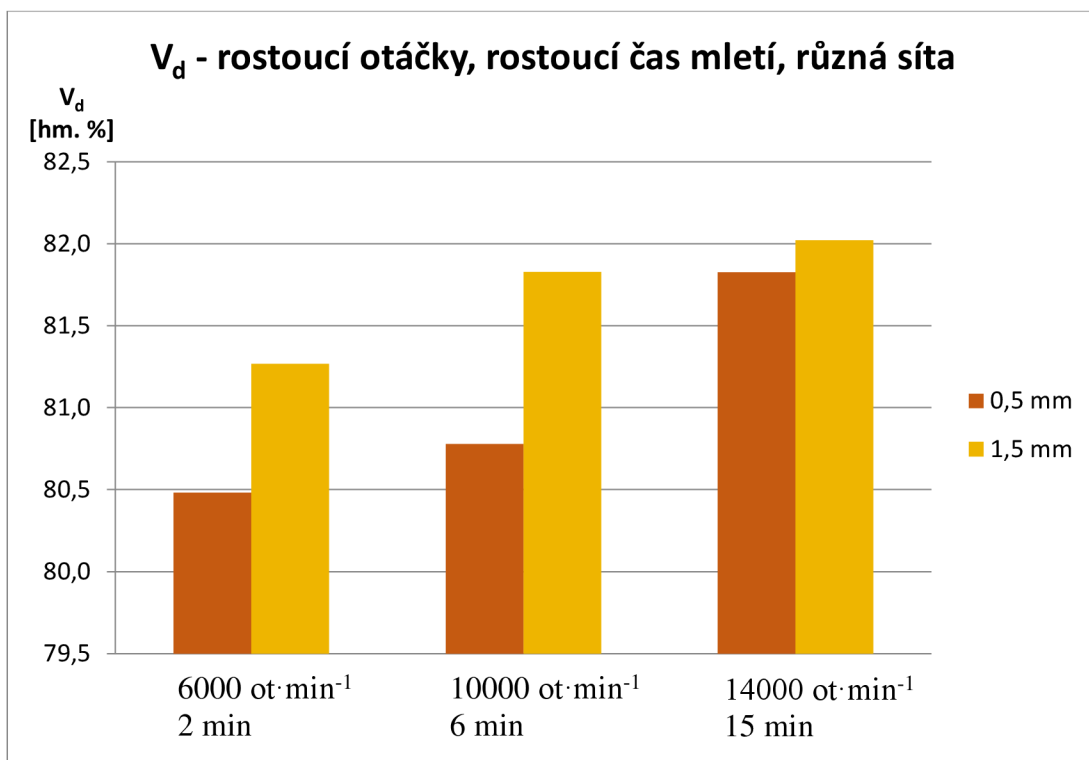
Níže jsou uvedeny teplotní grafy těchto vzorků.



Obrázek 5.40 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí při  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po dobu 6 minut na odlišnou výslednou frakci

Během 6minutového mletí při těchto otáčkách bylo dosaženo nejvyšší teploty o hodnotě cca  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  v případě použití jemnějšího síta. Vyšší teplota ve mlýně mohla být způsobena větším třením v důsledku menších ok síta. U mletí na jemnost  $1,5 \text{ mm}$  byl zaznamenán nárůst teploty k cca  $46 \text{ }^\circ\text{C}$  (tedy přibližně o  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  méně než u jemnějšího síta). Lze tedy říci, že pokud byla během mletí udržována v rotorové části mlýna nižší teplota, byl sice ve vzorku obsažen vyšší podíl vlhkosti, nebyla ovšem zjištěna výraznější ztráta obsahu prchavé hořlaviny. Snížení podílu prchavé hořlaviny mohlo být způsobeno únikem jejích složek v důsledku vyšší teploty ve mlýně.

Dále je ukázána změna podílu prchavé hořlaviny v palivu při prodlužujícím se čase mletí se současně narůstajícími otáčkami.

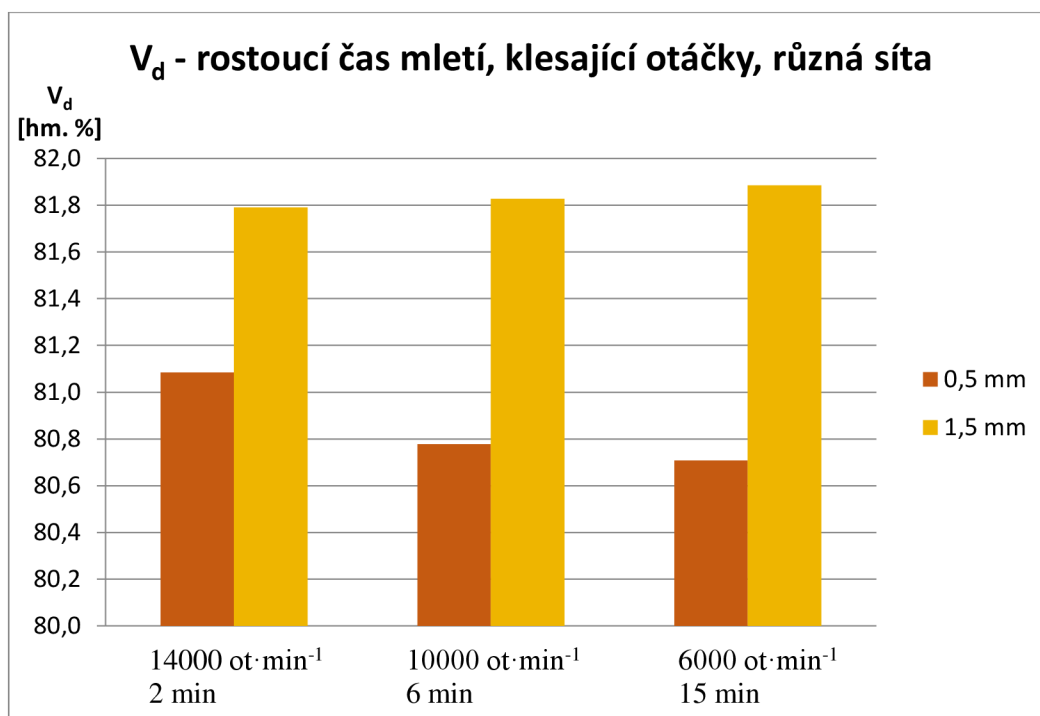


Obrázek 5.41 Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při rostoucích otáčkách se současně prodlužujícím se časem mletí

Pokud byly zvýšeny otáčky mlýna a zároveň prodloužena doba mletí, podíl prchavé hořlaviny byl u obou použitých sít zvýšen. Nejnižší podíl prchavé hořlaviny byl zjištěn v případě mletí s nejnižšími otáčkami po nejkratší dobu s použitím jemnějšího síta. Tento podíl odpovídal téměř 80,50 %. Nejvyššího podílu – přibližně 82 % - bylo dosaženo u vzorku mletého v případě opačných krajních podmínek mletí, tedy při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut se sítem o velikosti ok 1,5 mm. Lze si povšimnout, že vzorek mletý 6 minut na velikost 1,5 mm při 10000 ot·min<sup>-1</sup> dosáhl stejného podílu prchavé hořlaviny jako vzorek mletý 15 minut při nejvyšších otáčkách na jemnějším sítu. U vzorku mletého na jemnějším sítu po dobu 15 minut při nejvyšších otáčkách byla sice v průběhu mletí dosažena o cca 30 °C vyšší teplota (než v průběhu mletí vzorku mletého při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na 1,5 mm), rotorová část mlýna byla ale více a déle ochlazována vlivem vysoké rotace (Obrázek 5.37, 5.40). Proto mohlo u těchto vzorků dojít k podobnému podílu obsahu prchavé hořlaviny.

Zároveň lze na tomto grafu postřehnout stejný průběh, který byl zmíněn výše. Tedy že s použitím hrubšího síta bylo dosaženo vyššího obsahu prchavé hořlaviny. To mohlo být způsobeno nižší teplotou ve mlýně během mletí s hrubším sítem. Díky tomu mohl být zredukován únik složek prchavé hořlaviny.

Nyní byly do grafu 5.42, zobrazujícího množství prchavé hořlaviny, vybrány vzorky, u nichž byla postupně prodlužována doba mletí a současně snižovány otáčky.



Obrázek 5.42 Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při současném prodloužení doby mletí a snížení otáček

Zde lze u jednotlivých sít postřehnout opačný trend. Zatímco u vzorků mletých na velikost 0,5 mm s delším časem mletí při snižujících se otáčkách byl zaznamenán pokles podílu prchavé hořlaviny, v případě vzorků mletých na hrubším síti byl pozorován její nárůst. Tím byla opět potvrzena závislost podílu prchavé hořlaviny na teplotě ve mlýně během mletí, kdy vyšších teplot bylo dosaženo s použitím jemnějšího síta. Tím byl způsoben vyšší únik látek prchavé hořlaviny. Rozdíl podílu prchavé hořlaviny mezi síty byl postupně větší. Zatímco rozdíl mezi síty v prvním případě mletí odpovídal asi 0,7 %, u vzorků mletých nejdelší dobu při nejnižších otáčkách byl tento rozdíl roven téměř 1,2 %.

Obsah popela v bezvodém stavu  $A^{dr}$ 

Dle metody popsané v kapitole 5.3 byly naměřeny a vypočítány podíly popela v bezvodém stavu pro všechny namleté vzorky. Tyto podíly jsou zapsány v následující tabulce.

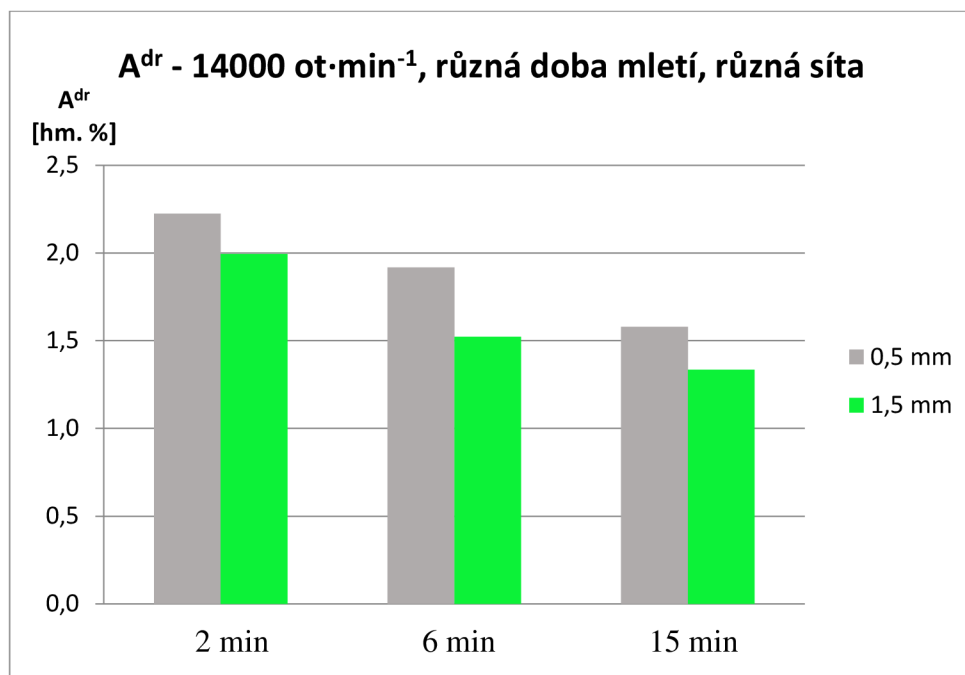
Tabulka 7 Obsah popela v bezvodém stavu všech vzorků

		$A^{dr}$ [hm. %]	
		0,5 mm	1,5 mm
2 minuty	6000 ot·min <sup>-1</sup>	2,66	2,25
	10000 ot·min <sup>-1</sup>	1,76	1,65
	14000 ot·min <sup>-1</sup>	2,22	1,99
6 minut	6000 ot·min <sup>-1</sup>	2,68	1,57
	10000 ot·min <sup>-1</sup>	2,20	1,60
	14000 ot·min <sup>-1</sup>	1,92	1,52
15 minut	6000 ot·min <sup>-1</sup>	2,76	2,10
	10000 ot·min <sup>-1</sup>	2,29	1,87
	14000 ot·min <sup>-1</sup>	1,58	1,33

Dle zjištěných výsledků nelze jednoznačně říci, zda byl v důsledku procesu mletí obsah popela v palivu zvýšen či snížen. Oproti původnímu (nemletému) palivu, jehož podíl popela v bezvodém stavu byl roven 1,97 %, byl zaznamenán vyšší obsah popela zejména u vzorků mletých na menší frakci (0,5 mm) při nižších otáčkách. Oproti původnímu palivu byl zjištěný podíl popeloviny v polovině případů vzorků vyšší, v polovině nižší.

U vzorků, které byly mlety po dobu 15 minut, byly naměřeny obě extrémní hodnoty, tedy nejnižší i nejvyšší obsah popela ze všech analyzovaných vzorků. Nejnižší hodnota (1,33 %) byla vypočtena u vzorku mletého při 14000 ot·min<sup>-1</sup> na velikost 1,5 mm. Nejvyšší podíl popela (2,76 %) byl získán ze vzorku, jenž byl mletý při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na 0,5 mm.

Na následujícím grafu je zobrazen naměřený podíl popela pro vzorky mleté při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .



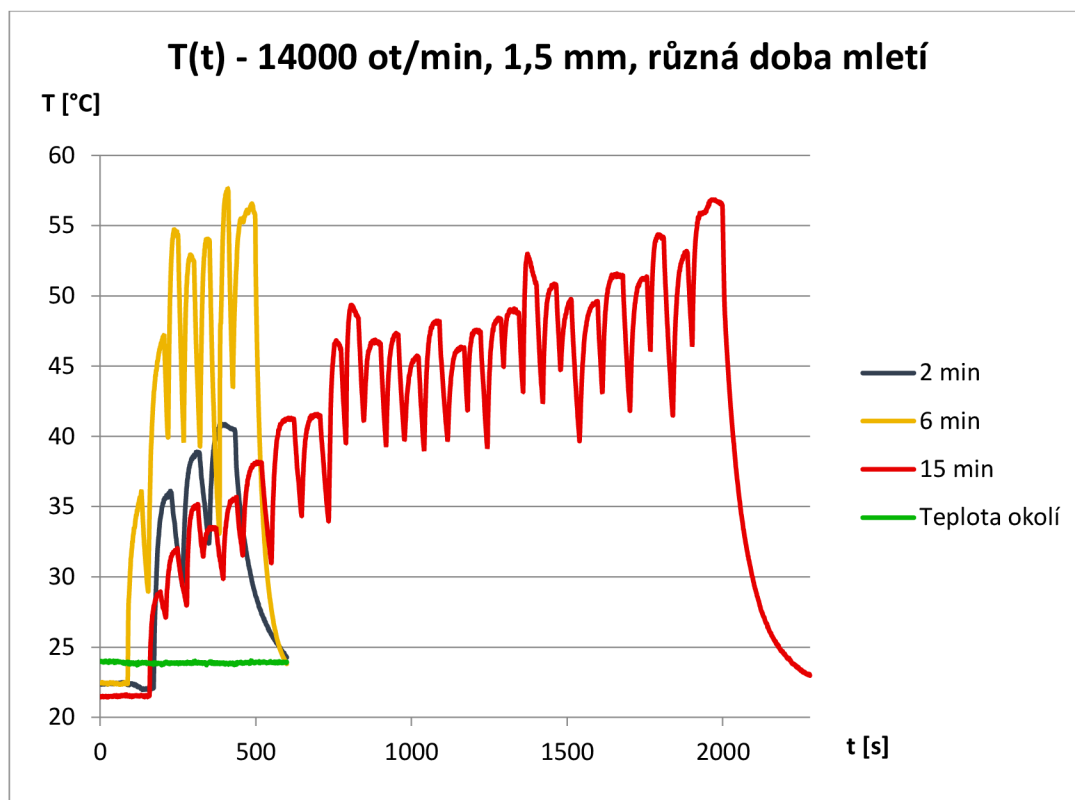
Obrázek 5.43 Obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po různě dlouhou dobu

Z tohoto grafu lze vyvodit, že při vysokých otáčkách byl s delším časem mletí snížen podíl obsahu popela. Vyšší podíly popela byly zaznamenány u vzorků mletých s použitím jemnějšího síta. Rozdíly mezi vzorky o různé jemnosti pro všechny časy mletí se pohybovaly v rozmezí cca 0,2 – 0,4 %. Nejvyšší podíl popela o hodnotě 2,22 % byl zjištěn u vzorku mletého po nejkratší dobu na jemnější frakci. Nejnižšího podílu popela (1,33 %) bylo naopak dosaženo u vzorku mletého 15 minut na velikost 1,5 mm. U vzorků mletých 6 minut na 1,5 mm a 15 minut na 0,5 mm byly zaznamenány velmi podobné hodnoty podílu popela.

Nižší podíl popela ve vzorku po nastavení vyšších otáček při mletí byl pravděpodobně způsoben vlivem snížení obsahu vlhkosti ve vzorku a vlivem nárůstu podílu prchavé hořlaviny.

Graf s průběhy teplot během mletí byl pro otáčky  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a jemnost 0,5 mm již uveden v části práce zabývající se obsahem vlhkosti (Obrázek 5.28). Na následujícím grafu jsou vykresleny teploty během mletí vzorků na velikost 1,5 mm.



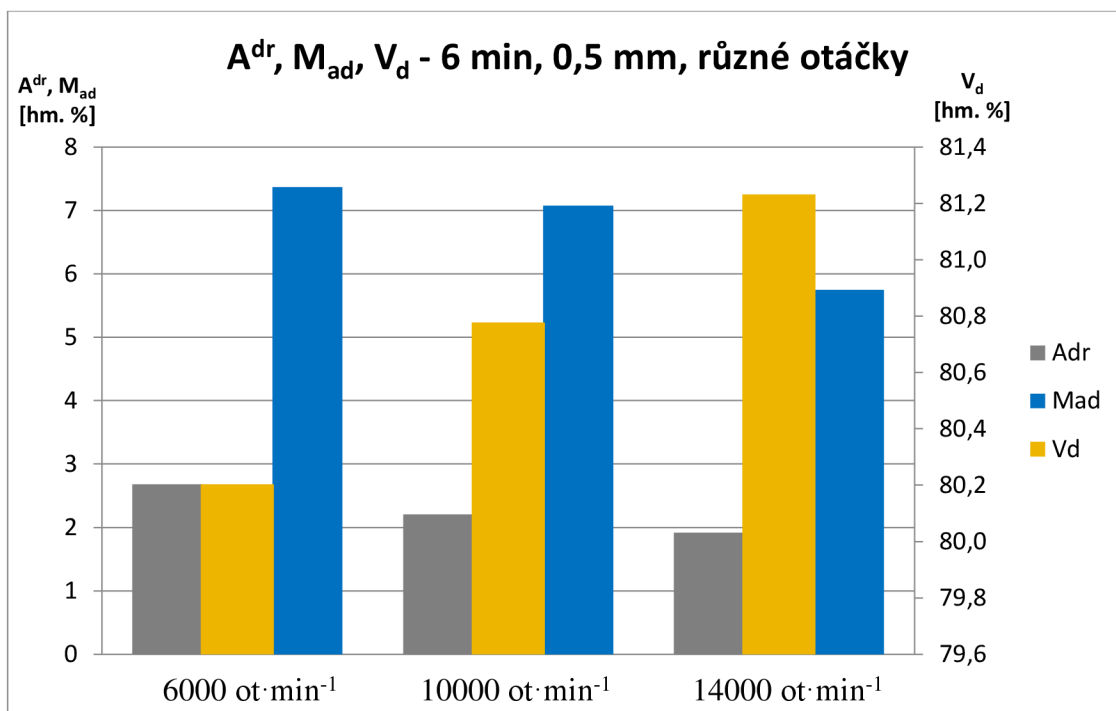


Obrázek 5.44 Průběh teploty ve mlýně během mletí při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  minut na velikost 1,5 mm po odlišnou dobu

V případě vzorku mletého 2 minuty bylo nejvyšší teploty o hodnotě cca  $41 \text{ }^\circ\text{C}$  dosaženo na konci mletí. Ze začátku 6minutového mletí byl zaznamenán průběžný nárůst teploty. Zbývající cca dvě třetiny mletí byla teplota ve mlýně udržována v rozmezí přibližně  $52$  až  $58 \text{ }^\circ\text{C}$ . V průběhu nejdelšího mletí byla teplota průběžně vyšší. Nejvyšší hodnoty (cca  $57 \text{ }^\circ\text{C}$ ) bylo dosaženo na konci mletí.

Nejvyšší teplota byla tedy zaznamenána v případě 6minutového mletí. U tohoto vzorku bylo dosaženo přibližně  $1,5 \%$  podílu popela. Podíl popela ve vzorku byl zřejmě ovlivněn delším setrváním na vyšší teplotě, jelikož nejnižší hodnota popela (cca  $1,3 \%$ ) byla naměřena u vzorku mletého 15 minut.

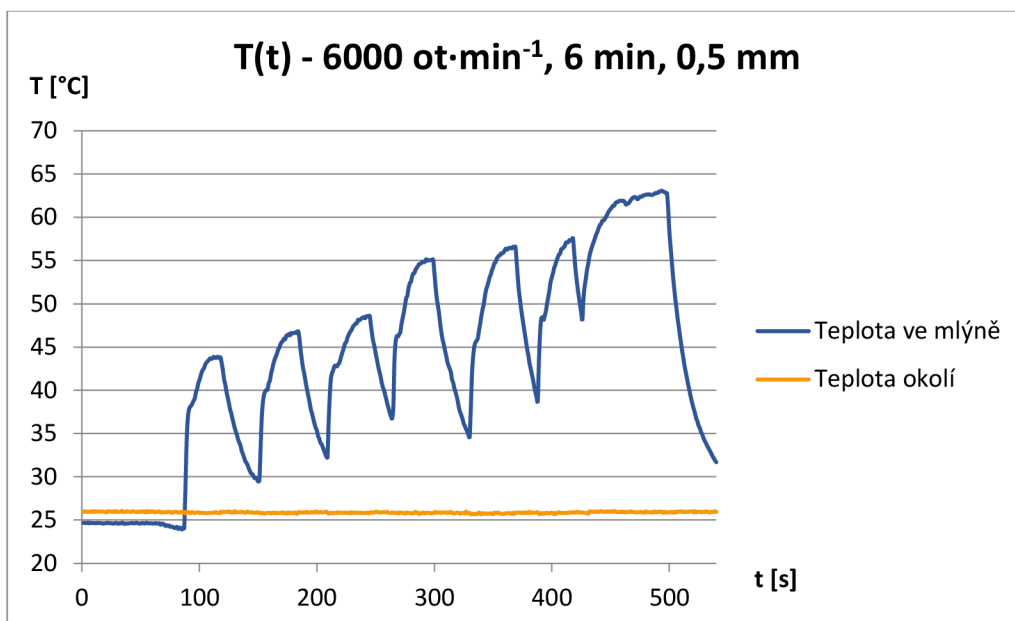
Dále jsou ukázány změny vlastností paliva mletého 6 minut na  $0,5 \text{ mm}$  se zvyšujícími se otáčkami.



Obrázek 5.45 Vlastnosti vzorků mletých po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm při různých otáčkách

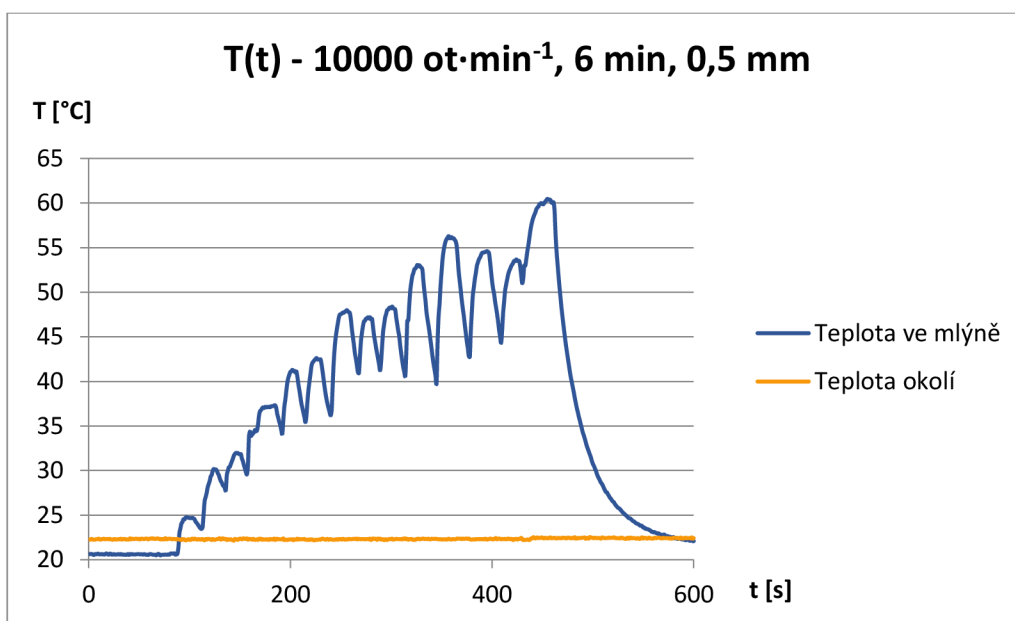
Během mletí po dobu 6 minut byl s vyššími otáčkami podíl popela v palivu nižší. Rozdíl mezi nejmenšími a největšími otáčkami odpovídal cca 0,8 % obsahu popela. S nižším podílem popela byla naměřena nižší vlhkost ve vzorcích, zároveň byl zaznamenán vyšší podíl podílu prchavé hořlaviny v palivu. Nejnižší hodnoty popela (1,92 %) bylo dosaženo v případě nejvyšších otáček. Hodnota dosaženého obsahu vlhkosti v tomto případě odpovídala 5,75 % a hodnota podílu prchavé hořlaviny 81,23 %. Tento obsah vlhkosti byl oproti mletí při nejnižších otáčkách odchýlen přibližně o 1,6 % a prchavá hořlavina o cca 1 %. Ke snížení obsahu vlhkosti a současně ke zvýšení podílu prchavé hořlaviny mohlo dojít např. změnou v rozměrech pórů obsažených ve vzorku v důsledku nastavení vyšších otáček. Změna v obsahu těchto vlastností ve vzorku mohla být příčinou přítomnosti nižšího podílu obsahu popela.

Dále jsou uvedeny grafy s průběhy teplot ve mlýně během těchto mletí (Obrázek 5.45).



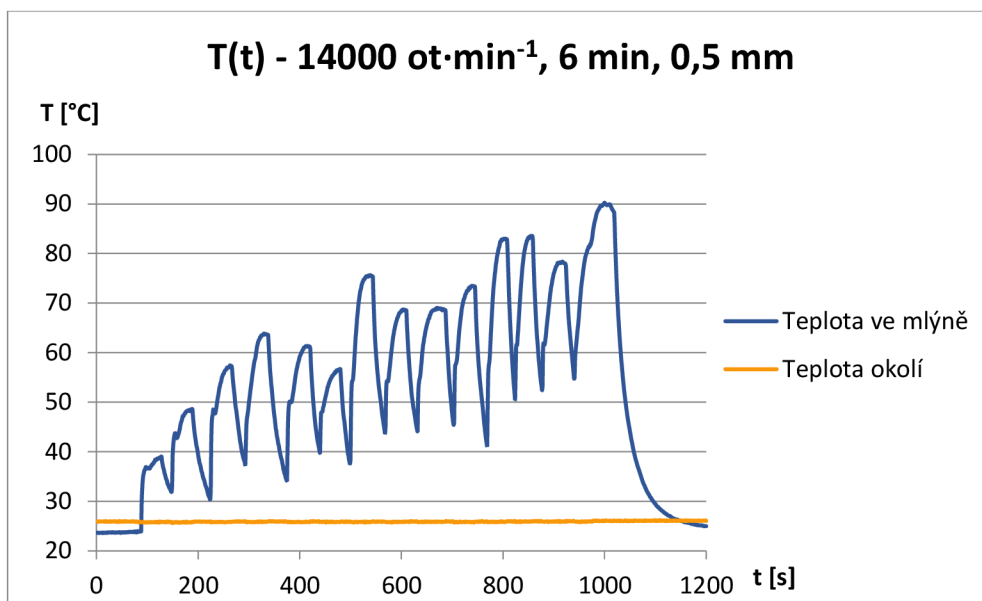
Obrázek 5.46 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm

Lze vidět, že při 6000 ot·min<sup>-1</sup> bylo po průběžném nárůstu teploty dosaženo nejvyšší hodnoty cca 63 °C.



Obrázek 5.47 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorku mletého při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm

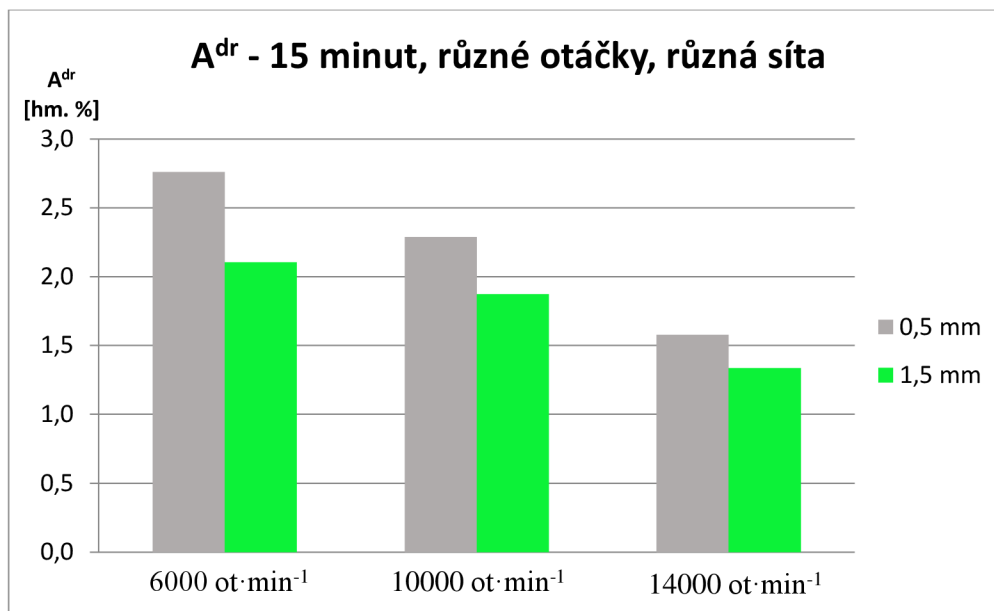
V tomto případě nastavení otáček bylo dosaženo maximální teploty o hodnotě cca 61 °C, tedy téměř stejné teploty jako v případě mletí při 6000 ot·min<sup>-1</sup>.



Obrázek 5.48 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorku mletého při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm

Během mletí při nejvyšších otáčkách bylo dosaženo nejvyšší hodnoty teploty ve mlýně na konci mletí. Tato hodnota odpovídala cca 90 °C, což bylo téměř o 30 °C více než v předchozích případech. Lze tedy říci, že vyšší teplotou během mletí byl způsoben pokles podílu popela ve vzorku a zvýšení podílu prchavé hořlaviny, přičemž byl vzorek více vysušen.

Na následujícím grafu je ukázán obsah popela v bezvodém stavu pro vzorky mleté 15 minut.

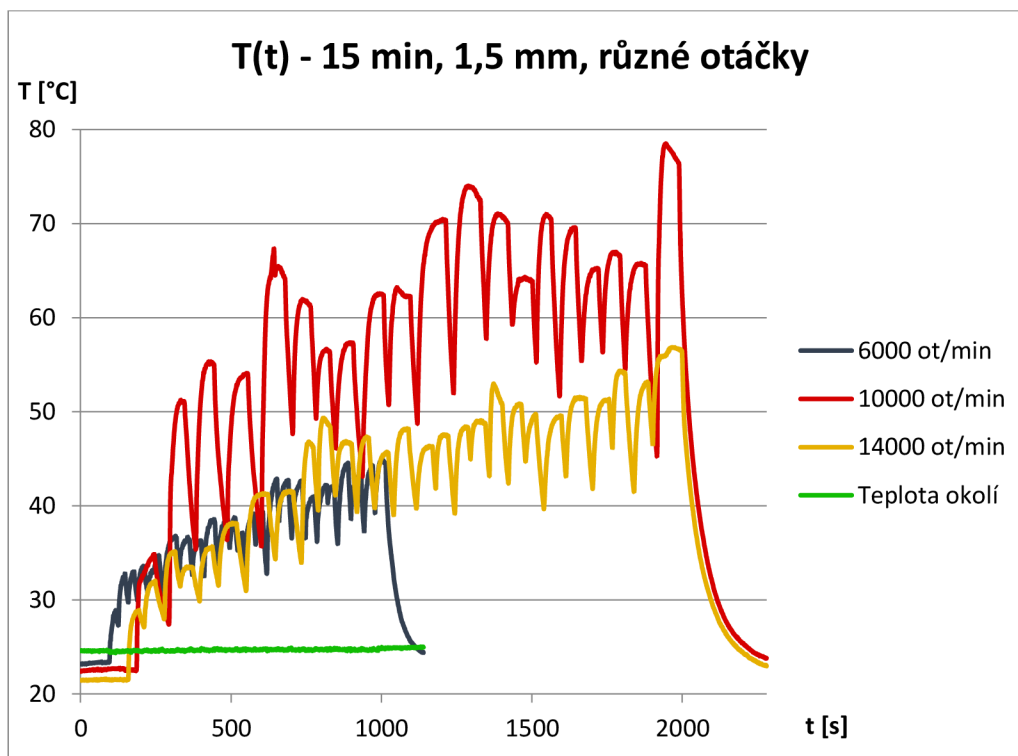


Obrázek 5.49 Obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm po dobu 15 minut při různých otáčkách

Během mletí po dobu 15 minut byl v případě obou sít při vyšších otáčkách zaznamenán nižší podíl popela. Lze si všimnout poklesu podílu popela s použitím hrubšího síta. Tento

poznatek byl zjištěn u všech namletých vzorků (Tabulka 7). Nejvyšší hodnota podílu popela byla zjištěna u vzorku mletého při nejnižších otáčkách na 0,5 mm a nejmenší hodnota u vzorku mletého při 14000 ot·min<sup>-1</sup> na 0,5 mm. Rozdíl mezi těmito hodnotami odpovídal cca 1,4 %. Vyšší podíl obsahu popela mohl být způsoben výraznějším třením vzorku s použitím jemnějšího síta, což mohlo vést např. k větší intenzitě spékání částic vzorku.

V části zabývající se obsahem prchavé hořlaviny byly na obrázku 5.37 ukázány průběhy teplot během mletí pro vzorky mleté na 0,5 mm při různých otáčkách po dobu 15 minut. Níže je uveden graf, na kterém je znázorněn průběh teplot pro vzorky mleté na 1,5 mm.

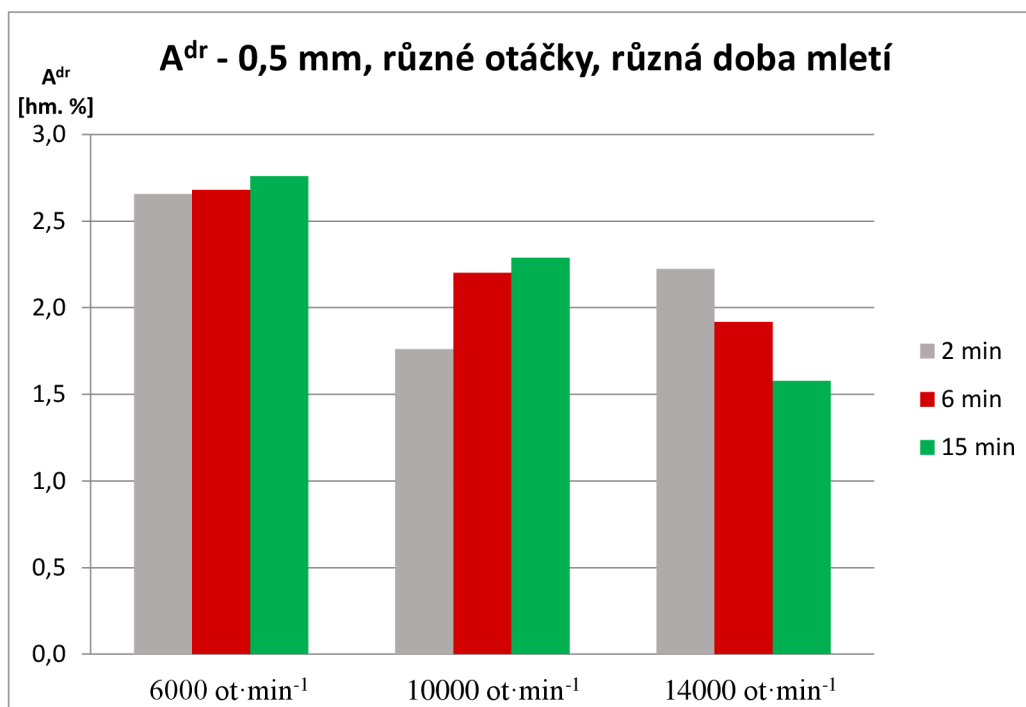


Obrázek 5.50 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí na velikost 1,5 mm po dobu 15 minut při odlišných otáčkách

Nejvyšší hodnoty (přibližně 45 °C) při 6000 ot·min<sup>-1</sup> během 15 minut bylo dosaženo na konci mletí. Posledních asi 7 minut mletí byla teplota udržována v rozmezí cca od 40 do 45 °C. Během mletí při 10000 ot·min<sup>-1</sup> byla v první polovině měření teplota postupně narůstala, dále ovšem byla zaznamenána spíše její klesající tendence. Maximální hodnoty, blízké se 79 °C, však bylo dosaženo až po posledním přisypání materiálu. Během měření teploty při nejvyšších otáčkách mletí byla nejvyšší dosažená teplota rovna přibližně 57 °C.

Obsah popela u vzorků mletých při nejnižších otáčkách této frakce byl odchýlen o cca 0,7 % od vzorků mletých při nejvyšších otáčkách. Nižší podíl popeloviny byl zaznamenán u vzorků mletých s nastavením vyšších otáček. Příčinou mohlo být intenzivnější chlazení během vyšší rychlosti rotace mlýna, díky které bylo zabráněno případnému spékání částic vzorku apod. Zároveň byl u těchto vzorků již dříve zjištěn pokles obsahu vlhkosti s použitím vyšších otáček rotoru. Pokles podílu popela tedy mohl souviset i s únikem vody ze vzorků.

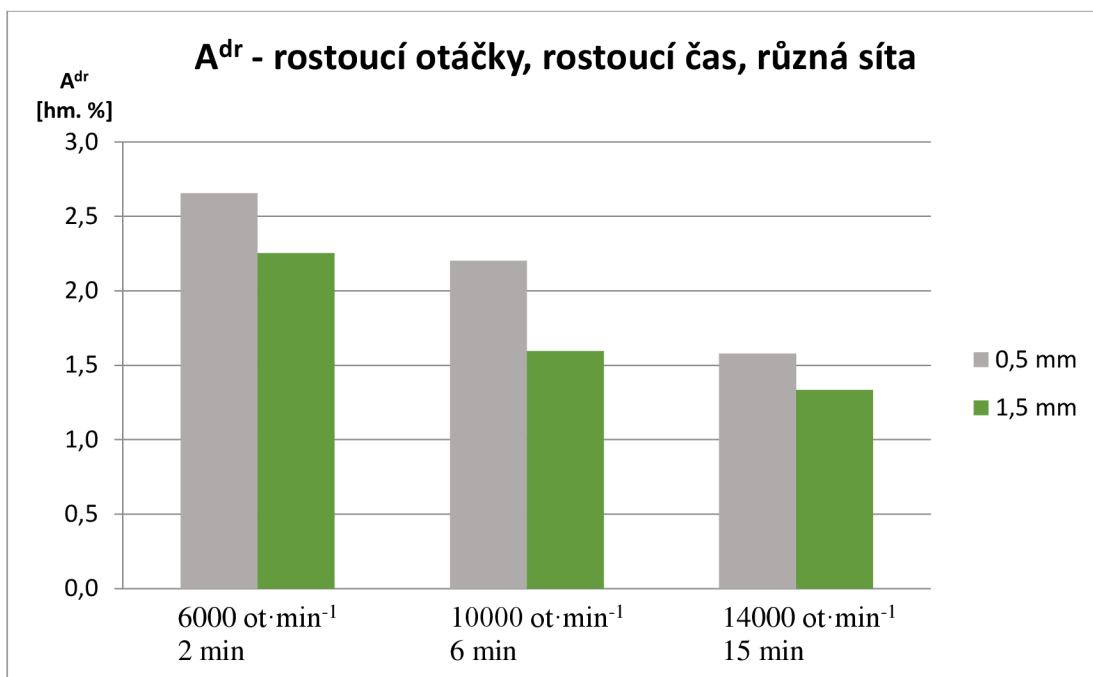
Na následujícím grafu je zobrazen podíl popela ve všech vzorcích mletých na frakci 0,5 mm.



Obrázek 5.51 Obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm při různých otáčkách a po různý čas

Na tomto grafu lze vidět v případě mletí s nejvyššími otáčkami opačný trend než u vzorků mletých při nižších otáčkách. Zatímco v případě nastavení mlýna na 6000 ot·min<sup>-1</sup> a 10000 ot·min<sup>-1</sup> byl s delším časem mletí zaznamenán vyšší obsah popela, u vzorků mletých při 14000 ot·min<sup>-1</sup> byl naopak obsah popela nižší. Nejmenší rozdíly lze postřehnout v případě mletí při nejnižších otáčkách. Podíl popela se mezi nejkratším a nejdelším časem mletí lišil pouze o 0,1 %. Ze všech těchto měření byl nejnižší podíl zjištěn u mletí při otáčkách 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut. Tomu blízká hodnota byla naměřena i u vzorku mletého 2 minuty při 10000 ot·min<sup>-1</sup>. V těchto dvou případech nebyly podíly popela odchýleny ani o 0,2 %.

Na následujícím grafu je zobrazena změna podílu popela pro situace, kdy byla nastavena delší doba mletí a současně vyšší otáčky.



Obrázek 5.52 Obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při současném prodloužení času a zvýšením otáček

Na tomto grafu lze vidět, že při zvýšení otáček mlýna se současným prodloužením doby mletí, byl zmenšen podíl obsahu popela. Ve dvou případech si byly hodnoty velmi blízké. V prvním případě se jednalo o vzorek mletý 2 minuty při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na 1,5 mm a vzorek mletý 6 minut při 10000 ot·min<sup>-1</sup> na 0,5 mm. Jejich podíl popela byl roven cca 2,2 %. Druhý případ podobných hodnot byl zjištěn pro vzorek mletý při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na hrubším sítu a vzorek mletý při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut na jemnějším sítu. Jejich hodnota odpovídala cca 1,6 %. Pokud tedy byla vhodně zvolena kombinace doby mletí a otáček mlýna, bylo dosaženo podobných hodnot u vzorků mletých na odlišnou frakci. Na tomto grafu je zároveň potvrzeno, že s použitím hrubšího síta byl obsah popela ve vzorku nižší. Vyšší podíl popela mohl být způsoben vyšším třením v případě vzorků mletých na jemnějším sítu. Tření mohlo způsobit komplexní změnu složení vzorku. Tato změna mohla pravděpodobně ovlivnit i obsah podílu prchavé hořlaviny a vlhkosti, které mají na podíl popela ve vzorku výrazný vliv.

### Spalné teplo $Q_s$

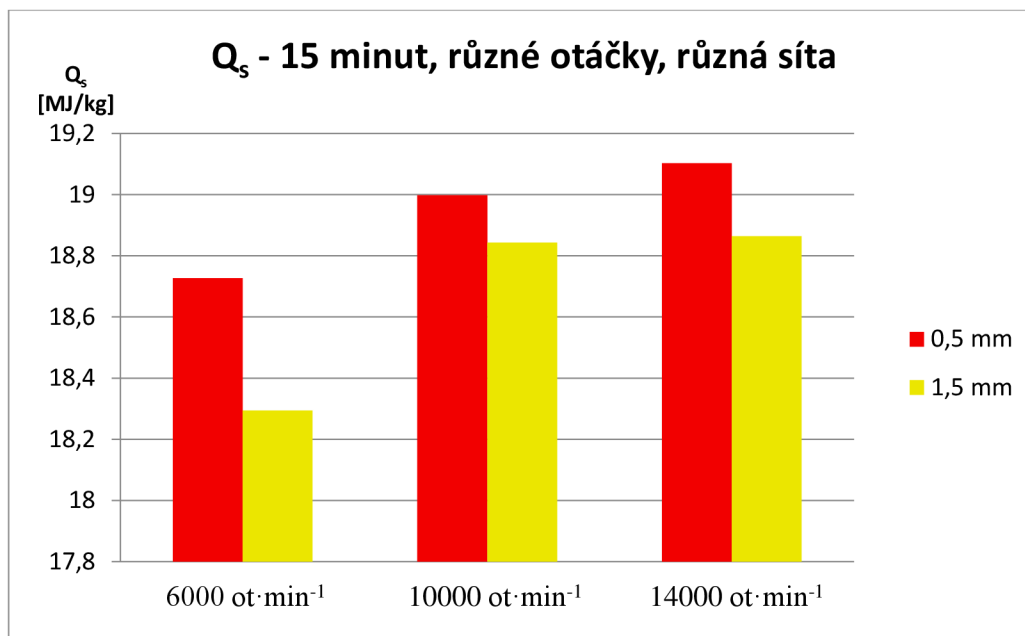
Spalné teplo bylo měřeno kalorimetrickou metodou. Výsledné hodnoty všech vzorků jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 Výsledné hodnoty spalného tepla [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

		$Q_s$ [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	
		0,5 mm	1,5 mm
2 minuty	6000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,609	18,335
	10000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	19,054	18,647
	14000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,930	18,642
6 minut	6000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,580	18,298
	10000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,679	18,368
	14000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,743	18,426
15 minut	6000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,727	18,294
	10000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	18,998	18,843
	14000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	19,103	18,865

Nejvyšší hodnoty spalného tepla bylo dosaženo v případě otáček  $14000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ , času 15 minut při mletí vzorku na velikost 0,5 mm, kdy zjištěná hodnota spalného tepla byla rovna  $19,103 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Nejnižší spalné teplo bylo zjištěno u vzorku mletého 15 minut při nejnižších otáčkách na 1,5 mm. Velikost tohoto spalného tepla odpovídala hodnotě  $18,294 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Na následujícím grafu je zobrazeno spalné teplo vzorků mletých 15 minut.



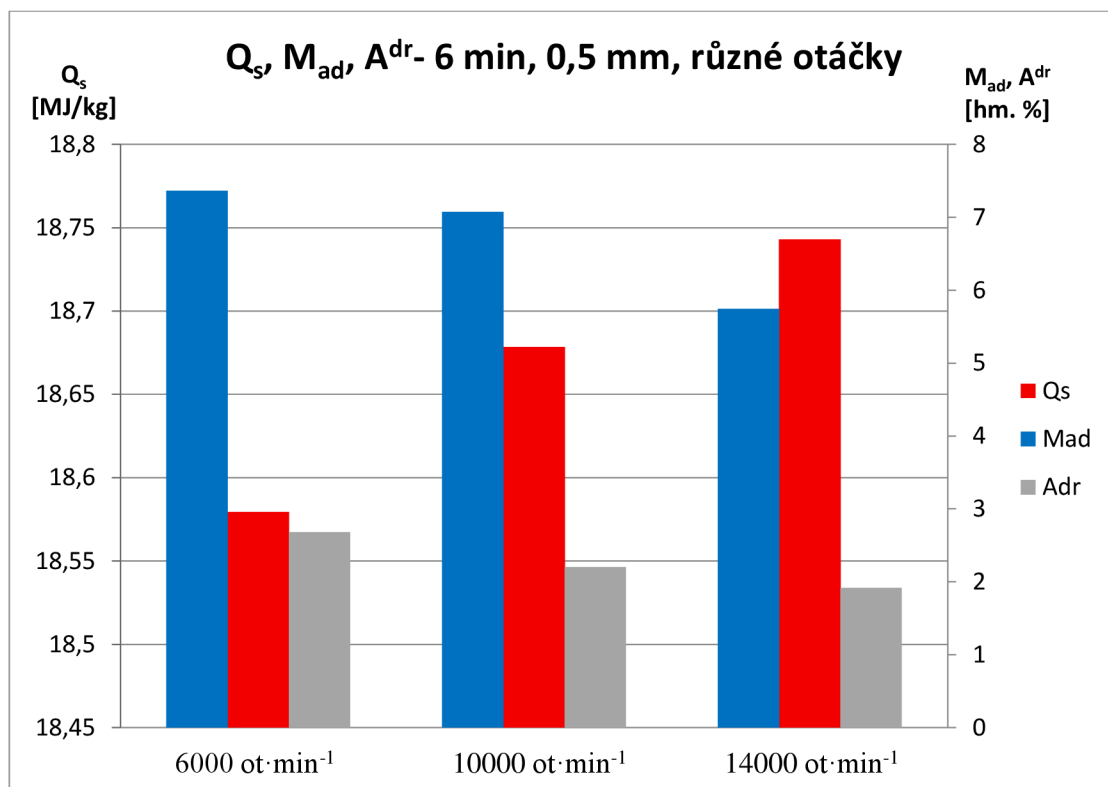
Obrázek 5.53 Spalné teplo vzorků mletých po dobu 15 min na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při různých otáčkách

Na tomto grafu lze vidět, že během 15minutového mletí byl s nižšími otáčkami zaznamenán pokles hodnoty spalného tepla (nezávisle na hrubosti síta). Větší rozdíl mezi nejnižšími a nejvyššími použitými otáčkami byl zjištěn u hrubšího síta, kdy tento rozdíl odpovídal hodnotě téměř  $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Rozdíl ve spalném teple mezi těmito otáčkami byl



v případě použití jemnějšího síta roven necelým  $0,3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . V tabulce 8 lze vidět, že v případě 6minutového mletí bylo také s vyššími otáčkami naměřeno větší spalné teplo (opět u obou sít). Lze si povšimnout, že vyšší hodnota spalného tepla byla naměřena s použitím jemnějšího síta. Tento poznatek byl zjištěn u všech vzorků uvedených v tabulce 8.

V dalším grafu jsou ukázány změny vlastností vzorků mletých na  $0,5 \text{ mm}$  po dobu 6 minut při různých otáčkách.

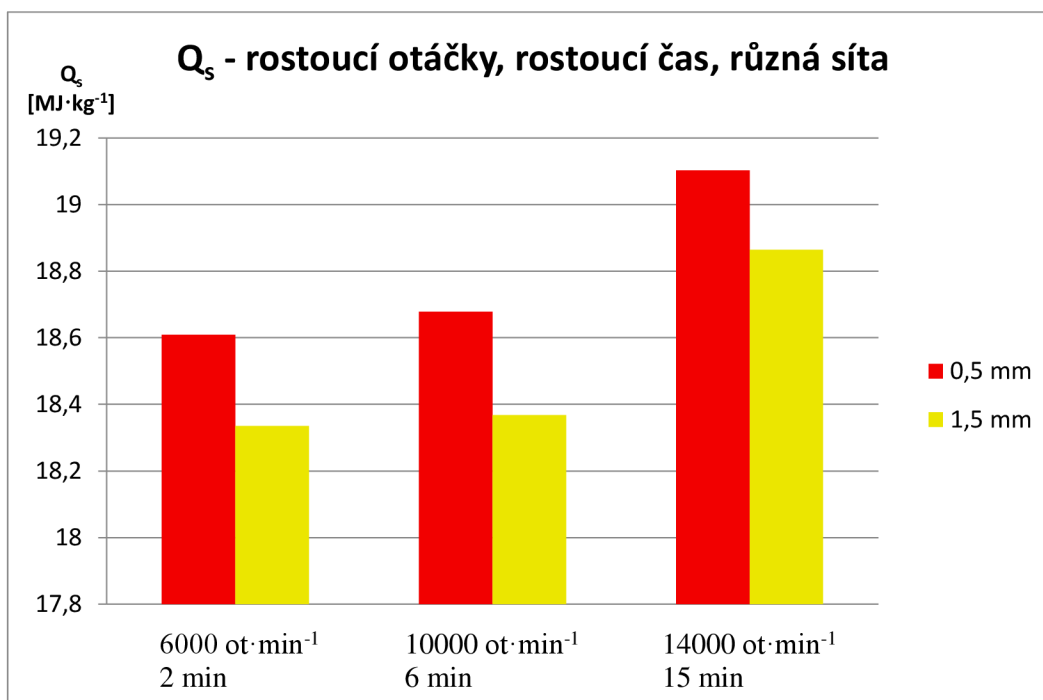


Obrázek 5.54 Spalné teplo, obsah vlhkosti, obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých po dobu 6 minut na velikost  $0,5 \text{ mm}$  při různých otáčkách

Na tomto grafu lze postřehnout snížení obsahu vlhkosti ve vzorku s vyšší hodnotou spalného tepla během mletí s vyššími otáčkami. Zároveň byl s vyšším spalným teplem zmenšen obsah popela. Nejvyšší spalné teplo bylo zjištěno u vzorku mletého při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , jehož hodnota odpovídala cca  $18,74 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Obsah vody byl v případě tohoto vzorku roven asi  $5,8 \%$  a obsah popela přibližně  $1,9 \%$ .

Spalné teplo bylo tedy ovlivněno změnami ostatních vlastností paliva. Vyšší spalné teplo bylo pravděpodobně způsobeno zahřátím vzorku. Jakmile byla zvýšena teplota ve mlýně, bylo zřejmě z paliva uvolněno větší množství vodíku. Únik vodíku z paliva vede k následnému úbytku vlhkosti. V nalezené literatuře, ve které byly analyzovány třísky borovice a zbytky z těžby, byl vyvozen stejný průběh. Tedy že hodnota spalného tepla byla vyšší s nárůstem teploty během torefakce. Zároveň zde byl zmíněn také únik vodíku a kyslíku a úbytek vlhkosti při vyšší teplotě. Ve článku byl zaznamenán i vyšší podíl uhlíku, kterým mohl být podmíněn nárůst spalného tepla. Spalné teplo vzorků této práce mohlo být ovlivněno všemi faktory zmíněnými v této literatuře. [82]

Na následujícím grafu je ukázána změna spalného tepla paliva se zvýšením otáček během mletí se současným prodloužením doby mletí.



Obrázek 5.55 Spalné teplo vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při současném zvýšení otáček a prodloužení doby mletí

Na základě tohoto grafu lze říci, že spalné teplo bylo nižší s kratší dobou mletí a zároveň nižšími otáčkami. Hodnoty spalného tepla vzorků mletých při 6000 ot·min<sup>-1</sup> a 10000 ot·min<sup>-1</sup> od sebe nebyly příliš odchýleny. Výraznější změnu lze postřehnout u mletí při nejvyšších otáčkách. Rozdíl spalného tepla mezi krajními případy podmínek mletí byl pro obě síta roven cca 0,5 MJ·kg<sup>-1</sup>. Změna spalného tepla byla zřejmě zapříčiněna obsahem ostatních vlastností ve vzorcích. Na základě dříve zmíněných zanalyzovaných vlastností si lze povšimnout nárůstu podílu prchavé hořlaviny a poklesu podílu popela (u obou sít) u vzorků se stejnými zvyšujícími se parametry. Lze tedy říci, že se jedná o významné parametry, jejichž obsahem bylo ovlivněno množství spalného tepla.

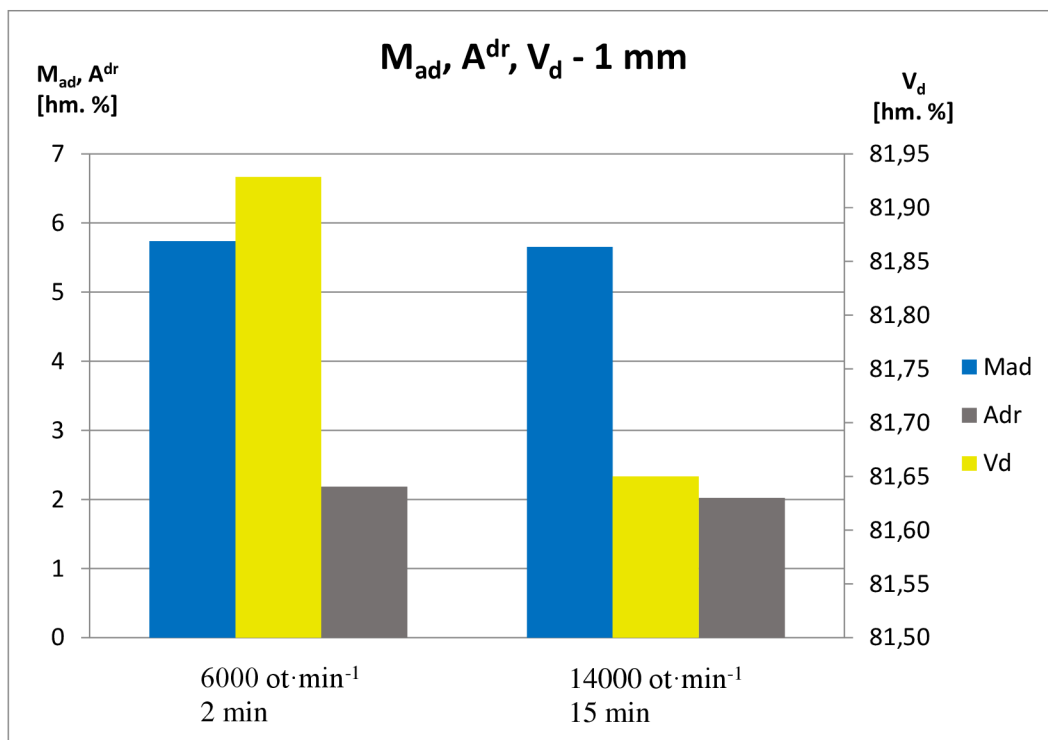
### Síto 1 mm

Síto o velikosti ok 1 mm bylo použito pouze v krajních případech – pro otáčky 6000 ot·min<sup>-1</sup> s časem mletí 2 minuty a pro otáčky 14000 ot·min<sup>-1</sup> s časem mletí 15 minut. Zjištěné hodnoty vlastností jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Vlastnosti paliva mletého na velikost 1 mm

	6000 ot·min <sup>-1</sup> 2 minuty	14000 ot·min <sup>-1</sup> 15 minut
M <sub>ad</sub> [hm. %]	5,74	5,65
A <sup>dr</sup> [hm. %]	2,19	2,02
V <sub>d</sub> [hm. %]	81,93	81,65
Q <sub>s</sub> [MJ/kg]	18,182	18,950

Oproti původnímu palivu byl u těchto vzorků zaznamenán pokles obsahu vlhkosti a podílu prchavé hořlaviny v bezvodém stavu. Naopak oproti nemletému materiálu byl zvýšen obsah popela v bezvodém stavu. K těmto změnám mohlo dojít změnou komplexního složení paliva v důsledku mletí.



Obrázek 5.56 Vlastnosti vzorků mletých na velikost 1 mm pro krajní případy nastavení mlýna

V případě použití síta o velikosti ok 1 mm lze vidět, že obsah vlhkosti, podíl prchavé hořlaviny v bezvodém stavu i podíl popela v bezvodém stavu byl nižší v případě vyšších otáček a delšího času mletí. K poklesu vlhkosti mohlo dojít vlivem intenzivnějšího zahřátí s následným větším únikem vodíku. Zároveň bylo zaznamenáno menší množství podílu popela, což mohlo být způsobeno např. intenzivnějším chlazením během mletí díky rychlejší rotaci, čímž bylo zamezeno spékání částic. Naopak nárůst byl u mletí s vyššími otáčkami rotoru zaznamenán v případě spalného tepla, což potvrzuje dříve zmíněnou závislost spalného tepla na ostatních parametrech paliva.

### 5.6.3 Mletí s cyklónem

Pro porovnání s již zjištěnými hodnotami vlastností byly namlety vzorky s použitím cyklónu během mletí. Vedle mlýna byl postaven držák, ve kterém byla umístěna skleněná nádoba, do které byl namletý vzorek shromažďován. Otvorem v horní straně držáku byl zaveden průmyslový vysavač, který byl po dobu mletí zapnut. Pomocí tahu vytvořeného vysavačem byl namletý vzorek odváděn ze sběrné misky do skleněné nádoby pod cyklónem.



Obrázek 5.57 Zapojení mlýna s cyklónem

Při použití cyklónu nebylo mletí provedeno pro všechny případy nastavení mlýna jako při mletí bez cyklónu. Byly zvoleny pouze tři případy tak, aby byly zahrnuty všechny varianty času a otáček. Zvolená síta a nastavení mlýna jsou uvedena v tabulce 10.

Tabulka 10 Nastavení mlýna s použitím cyklónu

2 minuty 6000 ot·min <sup>-1</sup>	6 minut 10000 ot·min <sup>-1</sup>	15 minut 14000 ot·min <sup>-1</sup>
0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm
1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm

S využitím cyklónu bylo tedy namlety 6 vzorků. Během mletí byla pomocí termočlánku typu T a programu „Yocto-Visualisation“ sledována průběžná teplota stejně jako ve všech předchozích případech. Mletí s cyklónem ovšem nevykazovalo žádné výrazné výkyvy teplot. Teplota ve mlýně se permanentně pohybovala v rozmezí cca od 20 do 25 °C. Pro všechny získané vzorky byl analyzován obsah vlhkosti v materiálu, obsah popela v bezvodém stavu, obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu a spalné teplo. Nakonec byla provedena i síťová analýza všech vzorků.

V tabulce 11 jsou uvedeny výsledné hodnoty vlastností pro vzorky mleté s cyklónem.

Tabulka 11 Výsledné hodnoty vlastností pro vzorky mleté s použitím cyklónu

	2 minuty 6000 ot·min <sup>-1</sup>		6 minut 10000 ot·min <sup>-1</sup>		15 minut 14000 ot·min <sup>-1</sup>	
	0,5 mm	1,5 mm	0,5 mm	1,5 mm	0,5 mm	1,5 mm
<b>M<sub>ad</sub></b> [hm. %]	4,03	5,36	3,63	4,86	3,99	4,69
<b>A<sup>dr</sup></b> [hm. %]	2,38	2,44	1,76	1,70	1,37	1,37
<b>V<sub>d</sub></b> [hm. %]	82,18	81,69	81,20	82,02	81,52	81,98
<b>Q<sub>s</sub></b> [MJ/kg]	19,086	18,889	19,311	18,991	19,161	18,949

Na základě hodnot z tabulky 11 lze říci, že s použitím jemnějšího síta byl zaznamenán pokles obsahu vody. Naopak s použitím většího síta bylo naměřeno menší spalné teplo.

V následující části práce je shrnuto srovnání vzorků mletých při stejných podmínkách mletí. Liší se pouze tím, zda byl použit cyklón či nikoli.

V tabulce 12 jsou zobrazeny výsledné hodnoty vlastností vzorků mletých s použitím cyklónu a vzorků mletých za stejných podmínek bez cyklónu.

Tabulka 12 Výsledné vlastnosti při stejném nastavení mlýna během mletí s cyklónem a bez cyklónu

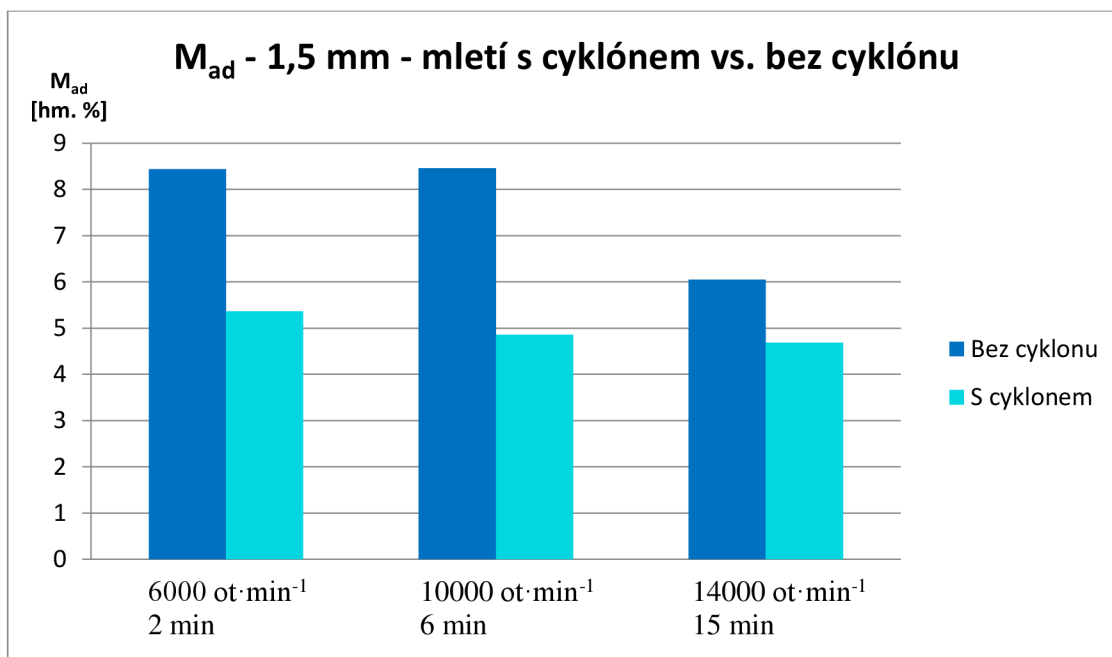
		M <sub>ad</sub> [hm. %]		A <sup>dr</sup> [hm. %]		V <sub>d</sub> [hm. %]		Q <sub>s</sub> [MJ/kg]	
		0,5 mm	1,5 mm	0,5 mm	1,5 mm	0,5 mm	1,5 mm	0,5 mm	1,5 mm
Bez cyklónu	6000 ot·min <sup>-1</sup> 2 min	6,02	8,44	2,66	2,25	80,48	81,27	18,609	18,335
	10000 ot·min <sup>-1</sup> 6 min	7,07	8,46	2,20	1,60	80,78	81,83	18,679	18,368
	14000 ot·min <sup>-1</sup> 15 min	5,32	6,05	1,58	1,33	81,83	82,02	19,103	18,865
S cyklónem	6000 ot·min <sup>-1</sup> 2 min	4,03	5,36	2,38	2,44	82,18	81,69	19,086	18,889
	10000 ot·min <sup>-1</sup> 6 min	3,63	4,86	1,76	1,70	81,20	82,02	19,311	18,991
	14000 ot·min <sup>-1</sup> 15 min	3,99	4,69	1,37	1,37	81,52	81,98	19,161	18,949

Vlastnosti vzorků mletých s cyklónem vykazují ve většině případů stejný průběh jako v případě vlastností vzorků mletých za stejných podmínek bez cyklónu. Na následujících stránkách jsou uvedeny a porovnány jednotlivé vlastnosti získané u vzorků mletých s cyklónem s vlastnostmi vzorků mletých bez použití cyklónu.

### Obsah vlhkosti $M_{ad}$

S použitím cyklónu byla zjištěna nejnižší vlhkost celkově ze všech měření provedených v této práci. Nalezená hodnota vlhkosti odpovídala 3,63 % a byla téměř o 1,5 % menší než nejnižší naměřená vlhkost u vzorků mletých bez cyklónu (5,05 %). Až na jeden případ bylo u všech obsahů vlhkosti dosaženo nižších hodnot s použitím cyklónu než byla nejnižší zjištěná hodnota u vzorků bez cyklónu.

Na obrázku 5.58 je zobrazen podíl vlhkosti ve vzorcích mletých na 1,5 mm s použitím cyklónu a bez něj.



Obrázek 5.58 Obsah vlhkosti vzorků mletých na velikost 1,5 mm s použitím cyklónu a bez cyklónu při stejně nastavených parametrech mlýna

Nejvyšší hodnoty vlhkosti – 5,36 % – při mletí s cyklónem bylo dosaženo u vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut. Hodnoty vzorků mletých delší čas při vyšších otáčkách byly srovnatelné. Pokles obsahu vlhkosti byl zaznamenán při vyšších otáčkách a delším čase mletí. Oproti mletí bez cyklónu byla vlhkost výrazně nižší. Pro nižší otáčky a kratší čas odpovídal rozdíl mezi mletím s cyklónem a bez něj více než 3 % vlhkosti. Pro první případ mletí, tedy za podmínek 6000 ot·min<sup>-1</sup> a 2 minuty, byl zaznamenán pokles obsahu vlhkosti při použití cyklónu cca o třetinu oproti mletí bez cyklónu. Pro případ vzorků mletých 6 minut při 10000 ot·min<sup>-1</sup> byl zjištěn pokles obsahu vlhkosti oproti mletí bez cyklónu o necelou polovinu (zejména s použitím síta 0,5 mm, viz tabulka 12). V případě nejvyšších otáček a nejdelšího času mletí tento rozdíl odpovídal cca 1,3 %.

Lze tedy říci, že použití cyklónu během mletí mělo na podíl vlhkosti ve vzorku výrazný vliv. Byl zaznamenán větší únik vlhkosti. To lze vidět i u vzorků mletých na jemnost 0,5 mm, kde bylo v případě mletí při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut dosaženo nejnižší vlhkosti o hodnotě 3,63 %.

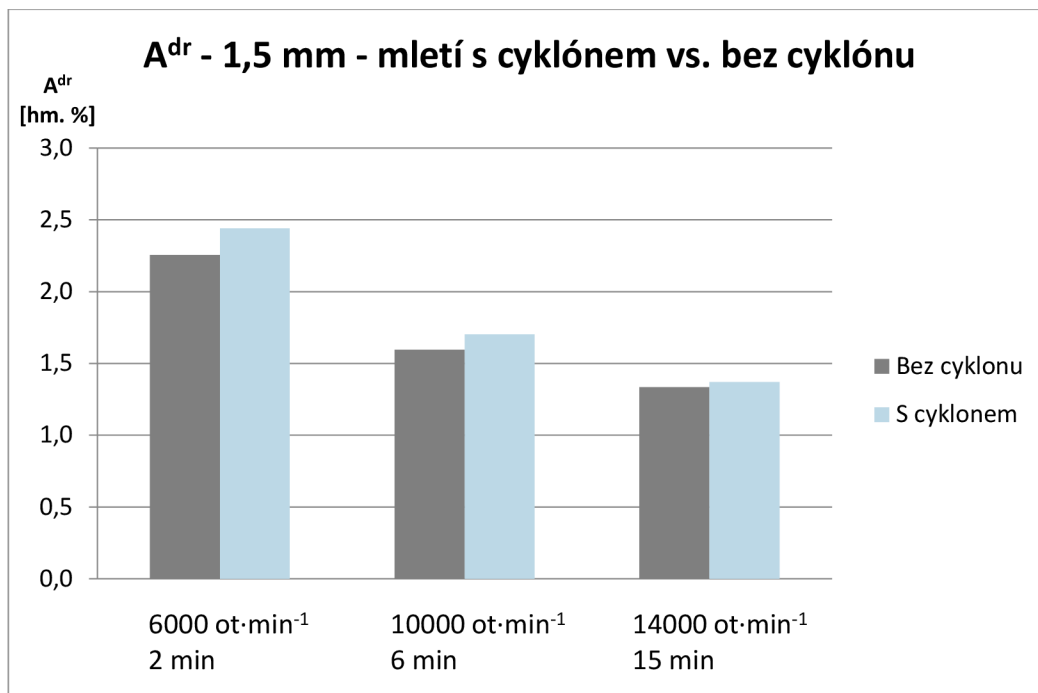
K většímu vysušení vzorku během mletí s cyklónem mohlo dojít např. silným proudem vzduchu a jeho vířením v důsledku tahu vysavače. Vzorek byl pak lépe promícháván a vlhkost mohla být odstraněna z většího množství částic, ve kterých mohla být zadržována např. v pórech a dutinách. U mletí bez cyklónu nebyly k takovému promísení vzorku



se vzduchem vhodné podmínky. To mohlo být důvodem významného snížení vlhkosti právě u vzorků mletých s cyklónem.

### Obsah popela v bezvodém stavu $A^{dr}$

Na následujícím grafu je zobrazen podíl popela v bezvodém stavu ve vzorcích mletých na 1,5 mm s použitím cyklónu a bez něj.



Obrázek 5.59 Obsah popela v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 1,5 mm s použitím cyklónu a bez cyklónu při stejně nastavených parametrech mlýna

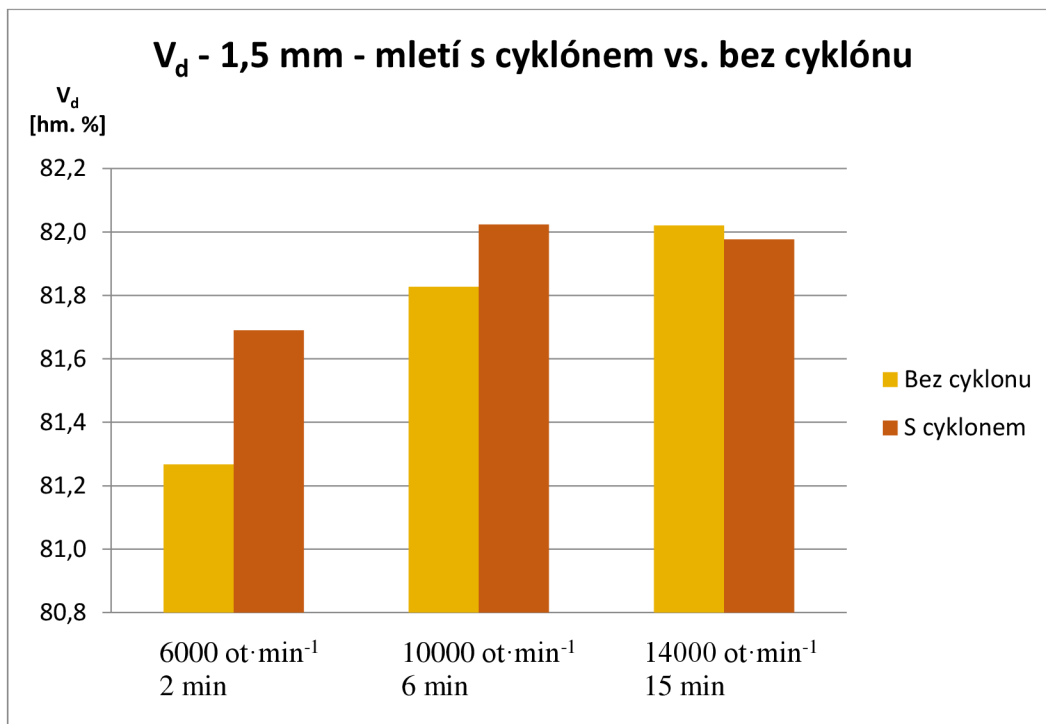
U vzorků mletých s použitím cyklónu při vyšších otáčkách po delší dobu byl zaznamenán pokles obsahu popela. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou popela odpovídal cca 1 %. Lze vidět, že při mletí na 1,5 mm bylo dosaženo vyššího podílu obsahu popela s použitím cyklónu. Jednotlivé rozdíly mezi obsahem popela u mletí s cyklónem a bez něj se pohybovaly v rozmezí řádů setin až cca dvou desetín procenta.

Podíl popela v bezvodém stavu byl odlišný v důsledku volby síta. Při mletí s použitím cyklónu na velikost 0,5 mm byl zaznamenán pokles podílu popela, zatímco se sítem o velikosti 1,5 mm bylo s využitím cyklónu dosaženo naopak vyššího podílu. To mohlo být způsobeno odsátím jemných částic vzorku mletého na 0,5 mm průmyslovým vysavačem, které byly tvořeny vyšším podílem popela v důsledku většího zahřátí během mletí. Ve vzorcích mletých na hrubší frakci zůstala oproti jemnějším vzorkům zachována vyšší vlhkost, která byla zřejmě příčinou vyššího podílu popela. Ve všech případech byl s rostoucími otáčkami a delším časem mletí zaznamenán pokles podílu popela. Stejný průběh byl u obou použitých sít zaznamenán i v části práce zabývající se obsahem popela ve vzorcích mletých bez cyklónu.



### Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu $V_d$

Na následujícím grafu lze vidět obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu ve vzorcích mletých na 1,5 mm s použitím cyklónu a bez něj.



Obrázek 5.60 Prchavá hořlavina v bezvodém stavu vzorků mletých na velikost 1,5 mm s použitím cyklónu a bez cyklónu při stejně nastavených parametrech mlýna

V případě mletí s cyklónem byl zaznamenán vyšší podíl prchavé hořlaviny u vzorků o frakci 1,5 mm s nastavením vyšších otáček a delšího času mletí. Podíl prchavé hořlaviny při tomto mletí s cyklónem se pohyboval v rozmezí od 81,69 % do 82,02 %. V tabulce 12 si lze povšimnout, že s použitím jemnějšího síta během mletí bylo dosaženo nejvyšší hodnoty podílu prchavé hořlaviny v případě nejkratšího mletí při nejnižších otáčkách. Tento podíl byl roven 82,18 %. U vyšších parametrů byly naměřeny nižší hodnoty podílu prchavé hořlaviny.

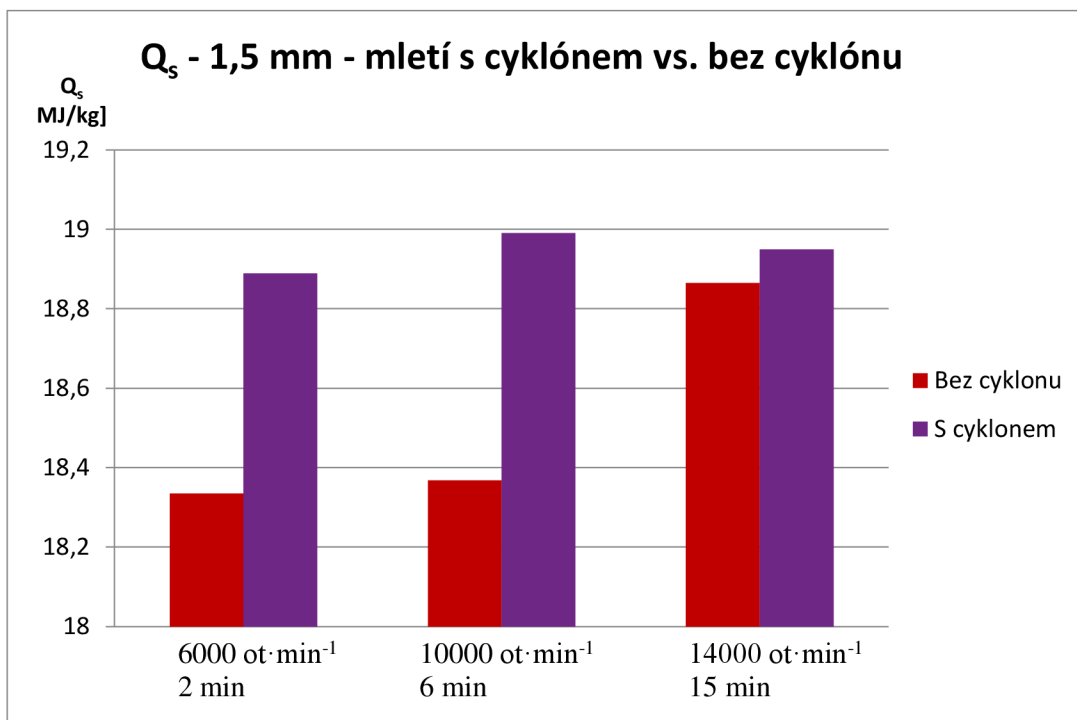
U dvou nižších nastavení parametrů mlýna byl podíl prchavé hořlaviny vyšší v případě mletí s cyklónem. V případě nastavení na nejvyšší otáčky a nejdélší čas rozdíl v obsahu prchavé hořlaviny mezi mletím s cyklónem a bez něj odpovídal 0,05 %.

K vyššímu podílu prchavé hořlaviny u vzorků mletých s cyklónem mohlo dojít vlivem proudícího vzduchu taženým do vysavače, díky kterému mohla být udržována nižší teplota ve mlýně. Tím mohlo být zabráněno úniku látek prchavé hořlaviny, které se uvolňují při vyšší teplotě. V případě nejvyšších otáček, kde byl podíl naopak menší než u mletí bez cyklónu, mohl být vyvolán mírný únik prchavých složek díky vyššímu tření vzorku o síto.

### Spalné teplo $Q_s$

Nejvyšší zaznamenaná hodnota spalného tepla ( $19,311 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) u mletí s cyklónem byla naměřena u vzorku mletého na velikost  $0,5 \text{ mm}$  při  $10000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 6 minut.

Na dalším grafu je zobrazeno spalné teplo vzorků mletých na velikost  $1,5 \text{ mm}$  s použitím cyklónu a bez něj při stejně nastavených parametrech mletí.

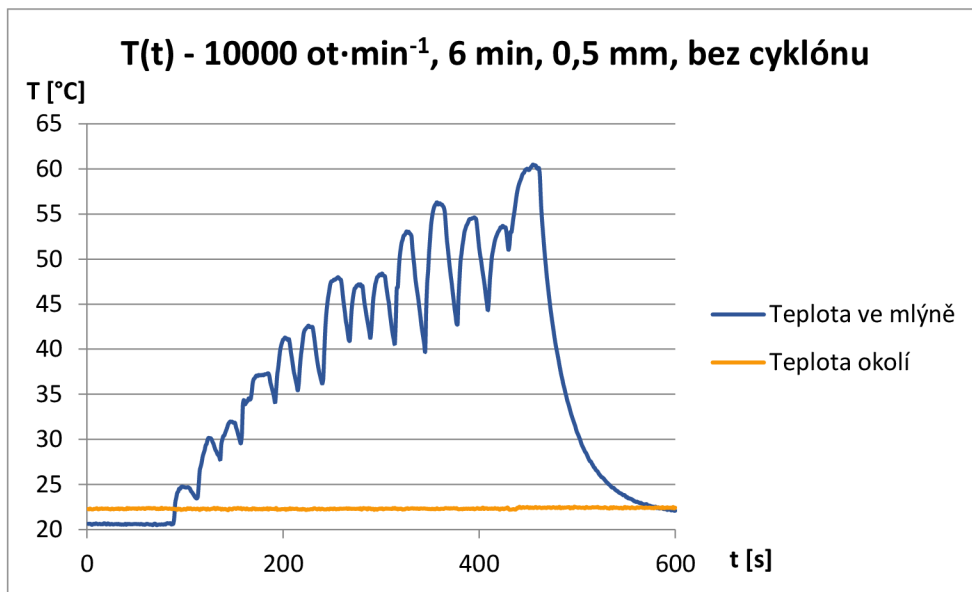


Obrázek 5.61 Spalné teplo vzorků mletých na velikost  $1,5 \text{ mm}$  s použitím cyklónu a bez cyklónu při stejně nastavených parametrech mlýna

Při mletí s cyklónem nebyly při různém nastavení mlýna zaznamenány příliš výrazné rozdíly spalného tepla. Hodnoty od sebe byly odchýleny o cca  $0,1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Lze však postřehnout značné rozdíly u vzorků mletých bez cyklónu a s cyklónem, zejména v případech mletí při  $6000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 2 minut a mletí při  $10000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 6 minut. Rozdíl ve spalném teple těchto vzorků byl  $\pm 0,5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Vzorky mleté při nejvyšších parametrech nastavení mlýna nebyly příliš odlišné (méně než  $0,1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). V tabulce 12 lze vidět, že spalné teplo bylo s použitím cyklónu oproti mletí bez cyklónu zvýšeno i v případě použití síta o velikosti ok  $0,5 \text{ mm}$ . S použitím cyklónu během mletí byl tedy zaznamenán nárůst spalného tepla materiálu. Zároveň lze na základě těchto dat říci, že při mletí s cyklónem bylo větší spalné teplo zjištěno u vzorků mletých s použitím jemnějšího síta.

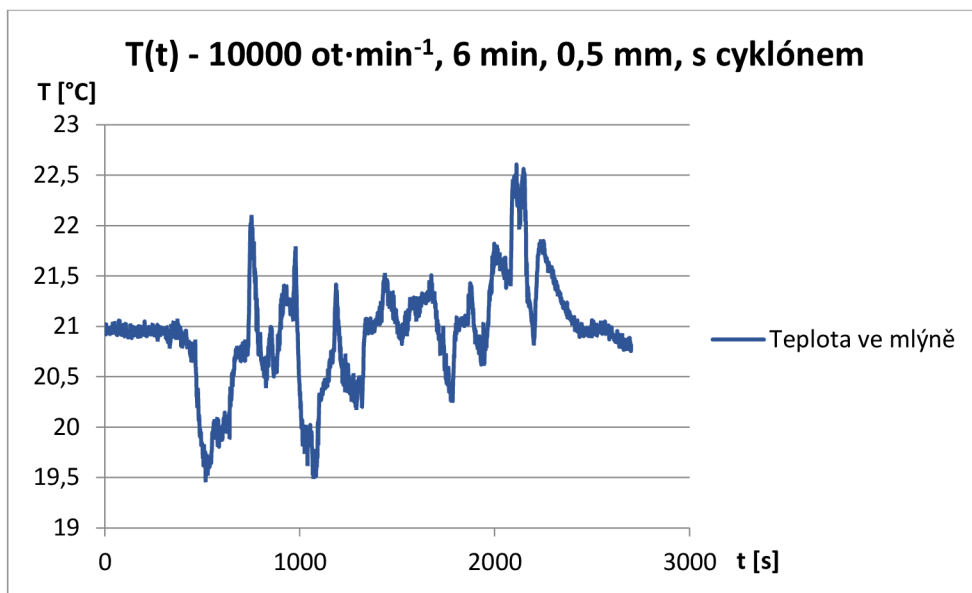
Vyšší hodnota spalného tepla u mletí s cyklónem mohla být způsobena např. intenzivnějším promísením materiálu se vzduchem, díky čemuž byl vzorek více provzdušněn. Tím bylo odstraněno větší množství vlhkosti a podíl prchavé hořlaviny byl zvýšen.

Na dalších grafech jsou ukázány průběhy teplot během mletí za stejných podmínek pouze s rozdílem, zda byl či nebyl použit cyklón.



Obrázek 5.62 Průběh teploty ve mlýně a okolí během mletí vzorku mletého při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm bez použití cyklónu

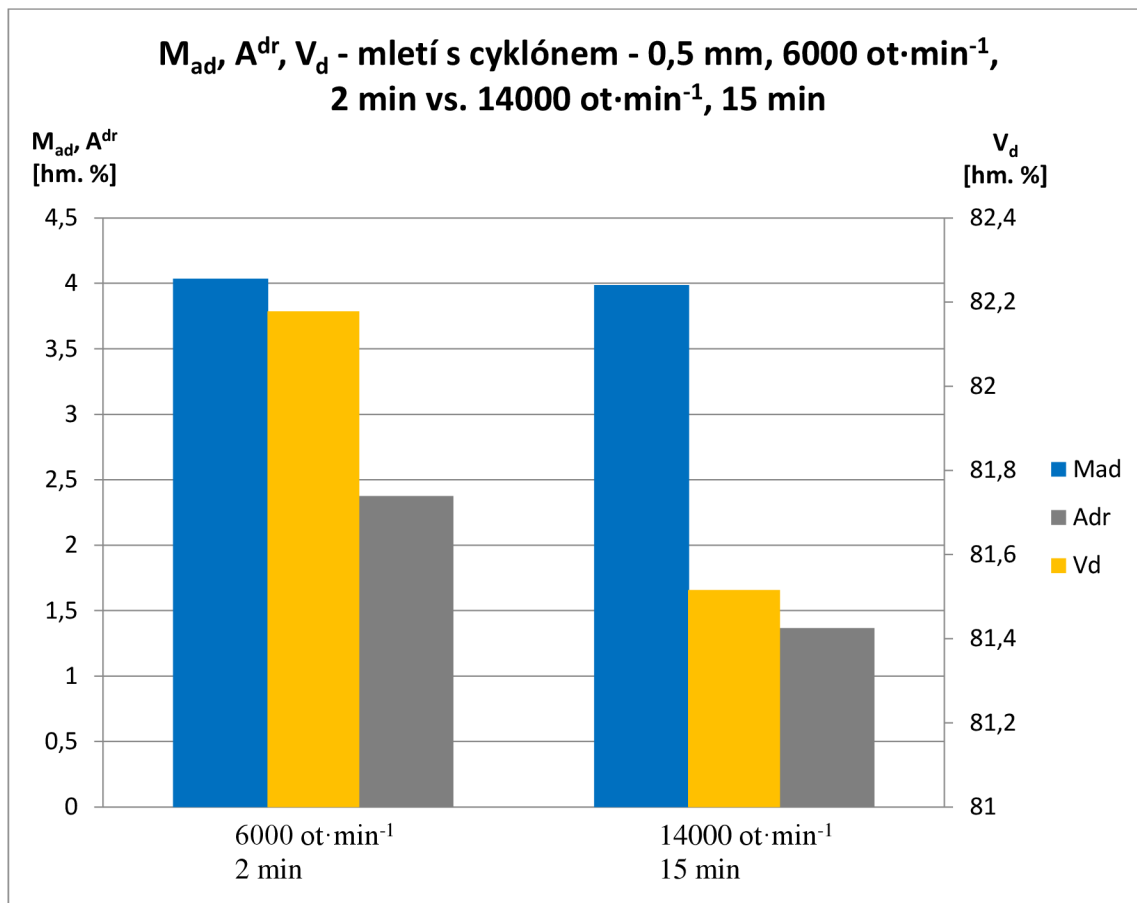
Na tomto grafu zobrazujícím změnu teploty během mletí bez cyklónu, byl s každým přisypáním vzorku do rotorové části mlýna zaznamenán průběžný nárůst teploty. Nejvyšší dosažená teplota odpovídala cca 60 °C.



Obrázek 5.63 Průběh teploty ve mlýně během mletí vzorku mletého při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu

Během mletí s cyklónem, nebyly zaznamenány žádné výrazné výkyvy teplot. Teplota se po celou dobu mletí pohybovala v rozmezí cca 19,5 až 22,6 °C. Použitím cyklónu během mletí bylo tedy dosaženo většího chlazení vlivem silnějšímu proudu vzduchu vytvořeného v důsledku tahu vysavače.

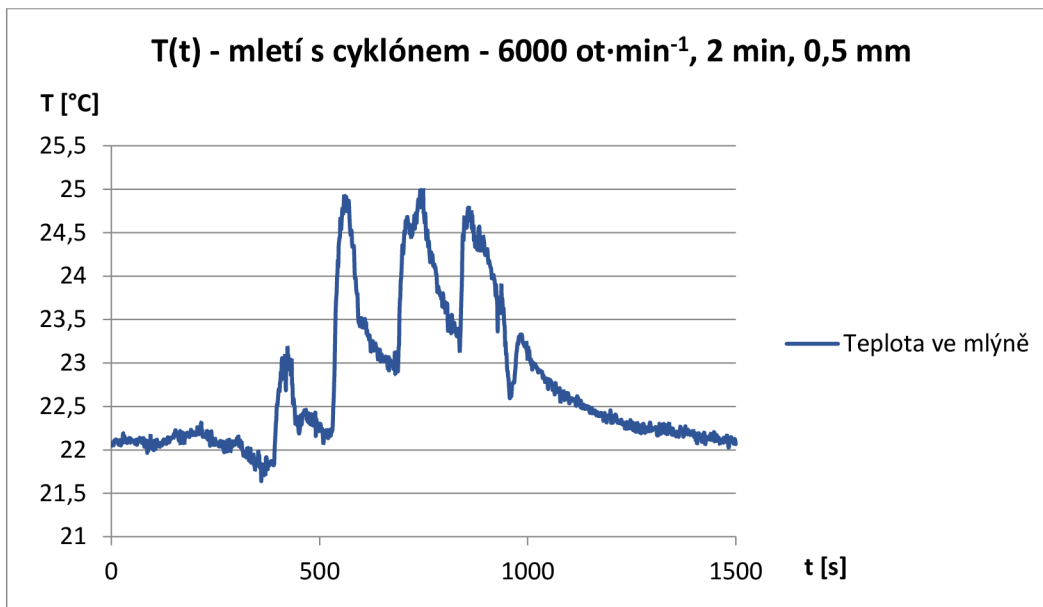
Na následujícím grafu jsou ukázány vlastnosti vzorků mletých s použitím cyklónu na jemnost 0,5 mm. Jedná se o vzorky mleté nejkratší čas při nejnižších otáčkách a vzorky mleté při nejvyšších otáčkách po nejdelší čas.



Obrázek 5.64 Vlastnosti vzorku mletého s použitím cyklónu na velikost 0,5 mm po dobu 2 minut při 6000 ot·min<sup>-1</sup> a vzorku mletého s použitím cyklónu na velikost 0,5 mm po dobu 15 minut při 14000 ot·min<sup>-1</sup>

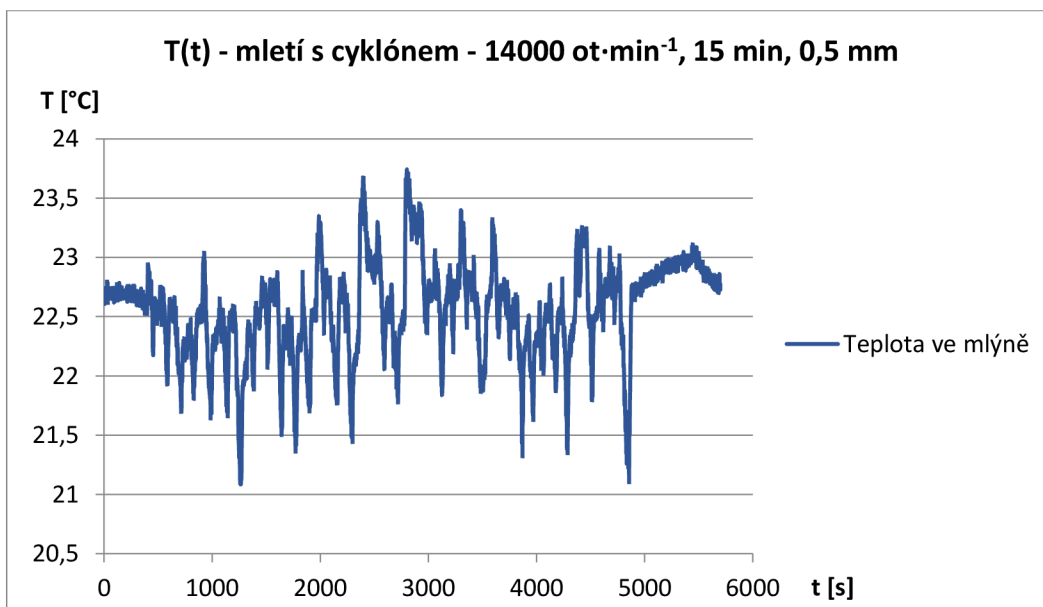
Při mletí s použitím cyklónu nebyly při nastavení různých otáček a času mletí zjištěny významné změny v obsahu jednotlivých vlastností paliva. Výraznější rozdíly byly postřehnuty v případě hodnot podílu prchavé hořlaviny a popela. U obou vlastností bylo dosaženo nižších hodnot s použitím vyšších otáček a delšího času mletí. V případě popeloviny odpovídal rozdíl cca 1 %, u prchavé hořlaviny byl rozdíl roven cca 0,7 %. Pro nižší otáčky a kratší čas bylo naměřeno spalné teplo o hodnotě 19,086 MJ·kg<sup>-1</sup>, pro vyšší otáčky a delší čas odpovídalo spalné teplo 19,161 MJ·kg<sup>-1</sup>. Celkově lze říci, že mezi jednotlivými podíly vlhkosti a hodnotami spalného tepla paliva s použitím cyklónu během mletí nebyly se změnou otáček pozorovány výrazné rozdíly. Vyšší otáček byl ovšem ovlivněn obsah prchavé hořlaviny a popela. Pokles jejich podílu ve vzorku mohl být způsoben vysokými otáčkami rotoru v kombinaci s vířením vzduchu v sestavě mlýna.

Jak již bylo řečeno dříve, během mletí s cyklónem nebyly zjištěny téměř žádné výkyvy teploty (bez ohledu na dobu mletí a výši otáček). Tato skutečnost je demonstrována na následujících obrázcích. Jsou zde ukázány průběhy teplot u vzorků mletých na 0,5 mm, jeden při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut a druhý při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut.



Obrázek 5.65 Průběh teploty ve mlýně během mletí vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu

Během tohoto mletí nebyl zaznamenán významný pokles ani nárůst teploty. Teplota byla stále udržována na hodnotě  $\pm 25$  °C.



Obrázek 5.66 Průběh teploty ve mlýně během mletí vzorku mletého při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu

V tomto případě bylo během mletí dosaženo nejvyšší naměřené teploty o hodnotě cca 23,7 °C. Ve srovnání s předchozím grafem byla teplota ve mlýně při vyšších otáčkách

oproti  $6000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  dokonce nižší. To mohlo být způsobeno intenzivnějším chlazením v důsledku kombinace proudu vzduchu z tahu vysavače a vysoké rotace rotoru. V obou případech mletí ale byla pracovní část mlýna permanentně a rovnoměrně ochlazována v důsledku vzduchu proudícího rotorovou částí. Z tohoto důvodu nebyly teplotní rozdíly příliš významné.

Při prvním spuštění mlýna byl mezi mlýn a cyklón připojen online analyzátor plynu. Díky analyzátoru bylo zjištěno, že koncentrace plynů odcházejících ze mlýna byla v důsledku naředění plynů přisávaným vzduchem téměř neměnná. Rozhodujícím faktorem u mletí bylo stanovení charakteristických vlastností vzorků. S přihlédnutím k tomuto faktu nebylo dále analyzátoru plynu využíváno.



Obrázek 5.67 Zapojení analyzátoru plynu

## 5.7 Sítová analýza

Pro všechny namleté vzorky byla provedena sítová analýza. K tomu byl použit vibrační sítový třídič Fritsch Analysette 3 Pro se síty s různými velikostmi ok, analytické váhy, miska z alobalu, štětec.

Nejprve byla připravena sítová sestava složená z pěti sít o velikostech ok zvolených dle jemnosti namletého materiálu. Zvolená síta pro jednotlivé zrnitosti jsou uvedena v tabulce 13. Nejprve byl navážen vzorek o hmotnosti cca 50 gramů. Ten byl nasypán na vrchní síto, které bylo následně zakryto víkem. Pomocí popruhů byla sestava zafixována. Na displeji přístroje byla dle manuálu zvolena amplituda 2 mm a čas sítování 10 minut. Poté byl přístroj zapnut. Po 10 minutách sítování byly popruhy uvolněny, víko odstraněno. Pomocí štětce byl vzorek zachycený v horním sítu přemístěn do alobalové misky a následně zvážen. Hodnota byla zaznamenána. Stejným způsobem bylo postupováno v případě všech sít a dna. Získané hodnoty hmotností byly zapsány do programu MS Excel, kde byly dopočítány údaje potřebné pro sestavení rozsekových křivek. Rozseková křivka ukazuje závislost poměrných zbytků z jednotlivých sít na velikosti ok sít.



Tabulka 13 Sestavy sít pro jednotlivé frakce materiálu

Síto č.	Nemletý vzorek	Vzorek 0,5 mm	Vzorek 1 mm	Vzorek 1,5 mm
1	5,6 mm	0,710 mm	1,40 mm	2,00 mm
2	2,8 mm	0,500 mm	1,00 mm	1,40 mm
3	2,0 mm	0,250 mm	0,71 mm	1,00 mm
4	1,4 mm	0,125 mm	0,50 mm	0,71 mm
5	1,0 mm	0,045 mm	0,25 mm	0,50 mm
Dno	Dno	Dno	Dno	Dno

### Vzorový výpočet

Vzorový výpočet sítové analýzy byl zpracován pro vzorek mletý při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut s použitím síta o velikosti ok 0,5 mm.

Amplituda sítování: 2 mm  
Čas sítování: 10 minut

Hmotnost vzorku

$$m_{vz} = 51,85 \text{ g}$$

Hmotnost alobalové misky

$$m_a = 0,98 \text{ g}$$

Hmotnost vzorku na jednotlivých sítích

$$m_i = m_{vz+a} - m_a$$

Hmotnost vzorku zachyceného na sítu č. 1 ( $x = 0,71 \text{ mm}$ )

$$m_1 = 1,80 - 0,98 = 0,82 \text{ g}$$

Tabulka 14 Síťová analýza vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut na velikost 0,5 mm bez použití cyklónu

Síto [-]	Velikost ok $x$ [mm]	$m_{vz+a}$ [g]	$m_i$ [g]	Poměrné zbytky $R_i$ [-]
1	0,71	1,80	0,82	0,02
2	0,5	5,83	4,86	0,11
3	0,25	21,84	20,86	0,51
4	0,125	10,80	9,83	0,70
5	0,045	9,08	8,10	0,86
Dno	0	7,70	6,73	0,99

Poměrné zbytky na sítích  $R_i$

$$R_1 = \frac{m_1}{m_{vz}} = \frac{0,82}{51,85} = 0,02$$

$$R_2 = \frac{m_1 + m_2}{m_{vz}} = \frac{0,82 + 4,86}{51,85} = 0,11$$

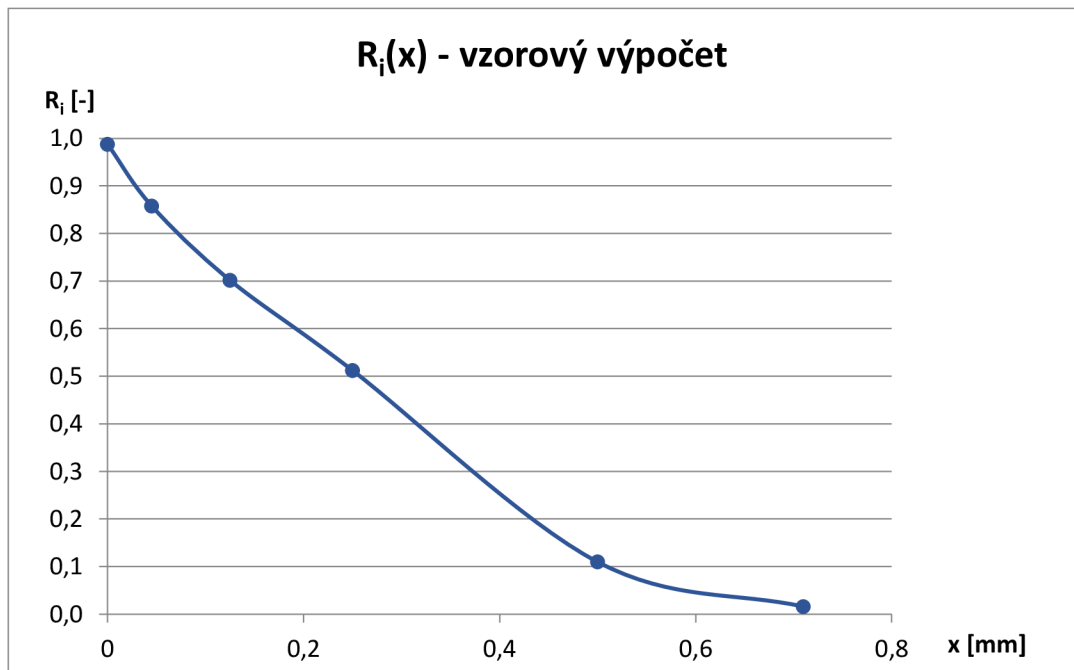
$$R_3 = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_{vz}} = \frac{0,82 + 4,86 + 20,86}{51,85} = 0,51$$

$$R_4 = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{m_{vz}} = \frac{0,82 + 4,86 + 20,86 + 9,83}{51,85} = 0,70$$

$$R_5 = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{m_{vz}} = \frac{0,82 + 4,86 + 20,86 + 9,83 + 8,10}{51,85} = 0,86$$

$$R_5 = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6}{m_{vz}} = \frac{0,82 + 4,86 + 20,86 + 9,83 + 8,10 + 6,73}{51,85} = 0,99$$

Z těchto údajů byla sestavena rozseвовá křivka.



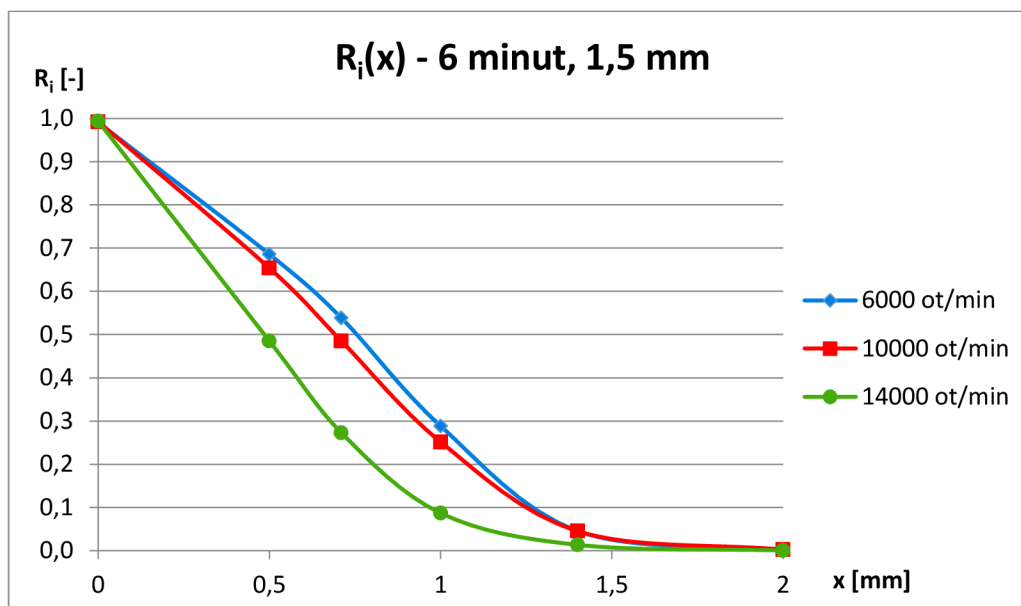
Obrázek 5.68 Rozseвовá křivka vzorku mletého při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut na velikost 0,5 mm bez použití cyklónu



### 5.7.1 Mletí bez cyklónu

#### Různé otáčky

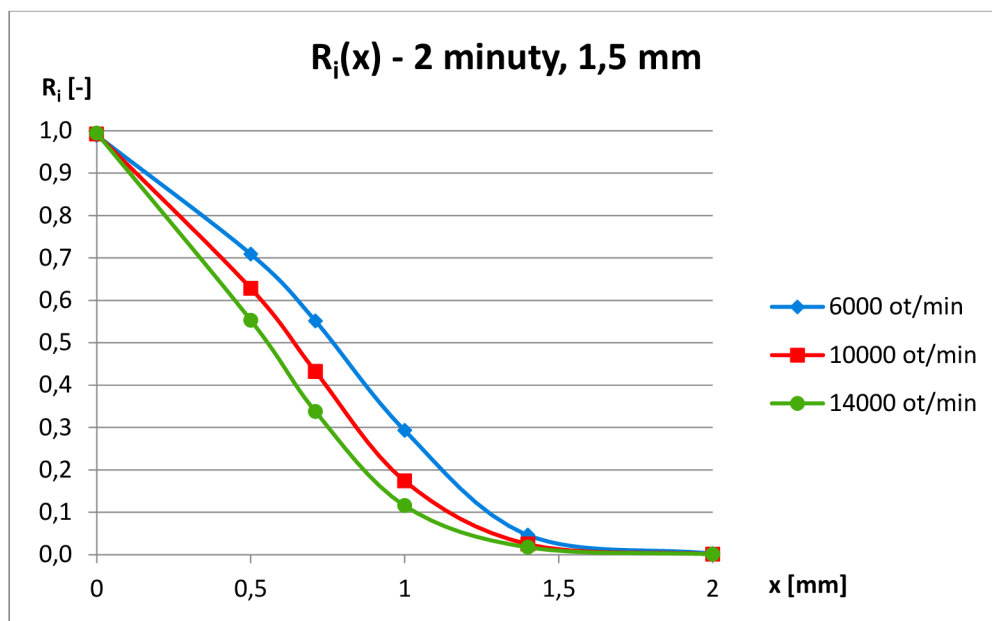
Na obrázku 5.69 je zobrazena rozseková křivka vytvořená ze sítové analýzy vzorků mletých bez použití cyklónu po dobu 6 minut při různých otáčkách.



Obrázek 5.69 Rozseková křivka vzorků mletých po dobu 6 minut na velikost 1,5 mm při různých otáčkách bez použití cyklónu

Na základě této rozsekové křivky lze říci, že ve všech případech použitých otáček bylo největší množství materiálu prosítováno všemi sítí a zachyceno na dně. Lze si povšimnout, že čím vyšší byly během mletí nastaveny otáčky, tím méně materiálu bylo průběžně na sítích zachyceno. Jinak řečeno, v materiálu mletém při nižších otáčkách bylo obsaženo více hrubších částic. Z toho vyplývá, že při sítové analýze vzorku mletého při nejnižších otáčkách byla z těchto měření až na dno prosítována nejmenší část materiálu. Čím vyšší tedy byly použity otáčky, tím jemnější frakce bylo dosaženo. Stejný průběh byl potvrzen i v článku [83] zabývajícím se analýzou vzorků mletých na mlýnu Szego, ve kterém bylo konstatováno, že se zvýšením otáček mlýna byly namlety částice menších rozměrů. To mohlo být způsobeno např. intenzivnějším drolením na jemnější částice v důsledku nastavení vyšších otáček.

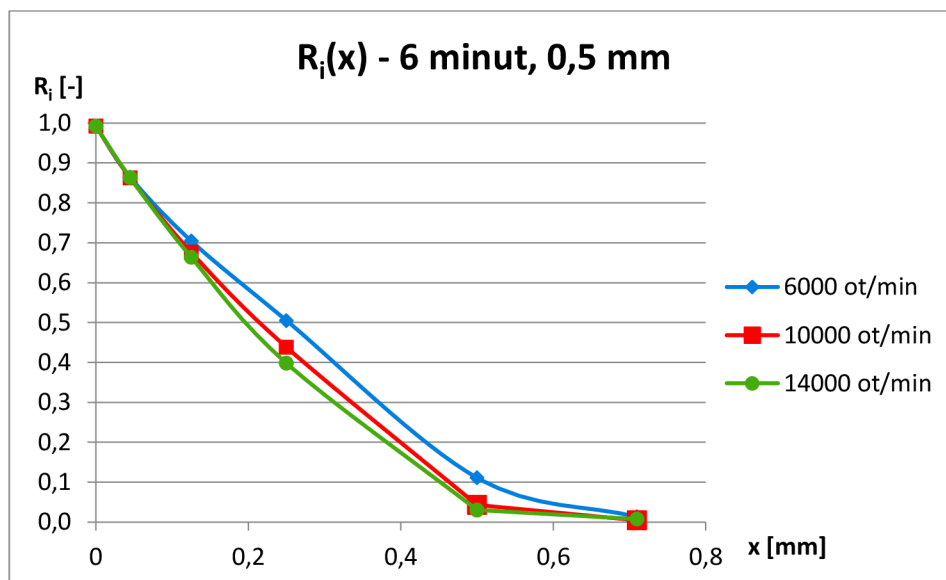
Pro porovnání s tímto časem mletí byl vytvořen graf rozsekové křivky pro mletí po dobu 2 minut na stejnou jemnost.



Obrázek 5.70 Rozseвовá křivka vzorků mletých po dobu 2 minut na velikost 1,5 mm při různých otáčkách bez použití cyklónu

Na základě vytvořeného grafu lze říci, že výše zmíněné průběhy byly potvrzeny. S použitím nižších otáček během mletí bylo při síťování na sítích zachyceno větší množství částic materiálu. Vzorek byl tedy z větší části složen z hrubších částic.

Na následujícím grafu jsou zobrazeny rozseвовé křivky pro vzorky mleté po dobu 6 minut na frakci 0,5 mm.



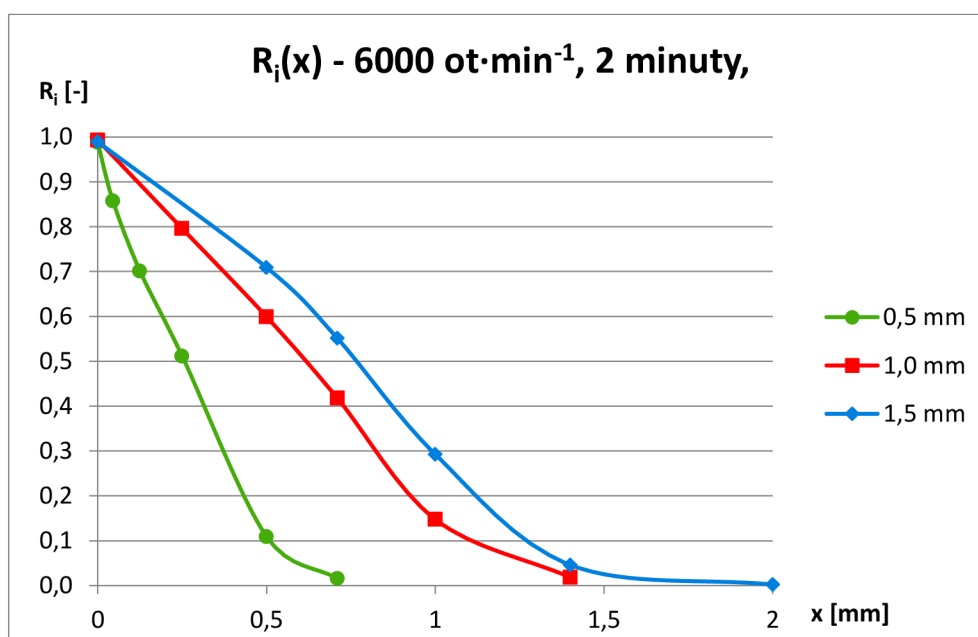
Obrázek 5.71 Rozseوصá křivka vzorků mletých po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm při různých otáčkách bez použití cyklónu

I v tomto případě lze říci, že s nastavením mlýna na nižší otáčky nebyly namlety tak jemné částice jako v případě vyšších otáček. Na sítích bylo oproti vzorkům mletých při vyšších otáčkách zachytáváno větší množství materiálu. Na sítu s rozměry ok

125  $\mu\text{m}$  bylo zaznamenáno postupné vyrovnávání rozdílů částic vzorku mezi použitými otáčkami při mletí. Oproti mletí na hrubší frakci nebyly však celkově rozdíly mezi jednotlivými otáčkami tolik výrazné (Obrázek 5.69). Na posledním sítu (o velikosti ok 45  $\mu\text{m}$ ) bylo zachyceno ve všech případech použitých otáček poměrově velmi podobné množství materiálu. I u těchto vzorků byly výsledky zřejmě ovlivněny třením. Ale vzhledem k intenzivnějšímu tření během mletí v důsledku použití jemnějšího síta nebyly rozdíly tolik výrazné jako v případě hrubší frakce.

### Různá síta

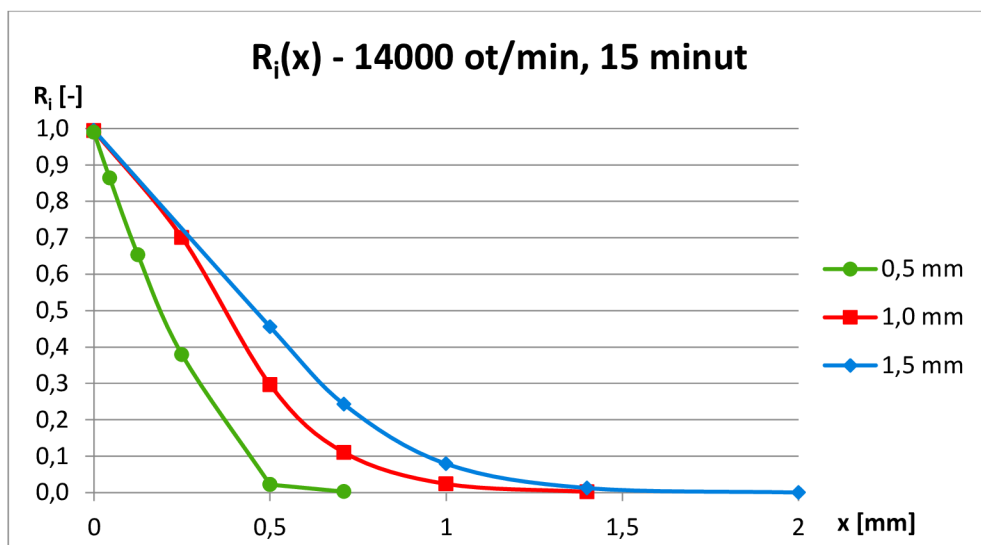
Na obrázku 5.72 jsou zobrazeny rozsekové křivky pro materiál mletý při 6000  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 2 minut na různou výslednou jemnost.



Obrázek 5.72 Rozseková křivka vzorků mletých při 6000  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 2 minut na různou velikost bez použití cyklónu

Na základě tohoto grafu lze konstatovat, že rozdíly mezi částicemi vzorků mletých na odlišnou výslednou jemnost byly již zřetelnější. U sít se stejnými rozměry ok lze postřehnout, že čím hrubší byla zvolena výsledná frakce materiálu, tím méně jemnějších částic bylo ve vzorku obsaženo. Na obrázku 5.40 byl prezentován průběh teploty během mletí vzorků mletých na odlišnou výslednou frakci (při 10000  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  po dobu 6 minut). Lze na něm vidět, že vyšších teplot během mletí bylo dosaženo s použitím jemnějšího síta. Velikost částic namletého vzorku mohl být tedy ovlivněn teplotou při mletí. Tato možnost byla podpořena i na základě článku [82], kde byl zaznamenán podobný důsledek vlivu teploty. Tedy že s nárůstem teploty byly ve vzorcích obsaženy menší částice. Zároveň zde byl potvrzen fakt, že vzorek po úpravě materiálu byl tvořen menšími částicemi než vzorek neupravený.

Na dalším grafu jsou zobrazeny křivky vytvořené ze sítové analýzy materiálu mletého po dobu 15 minut při 14000  $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$  na různé frakce.

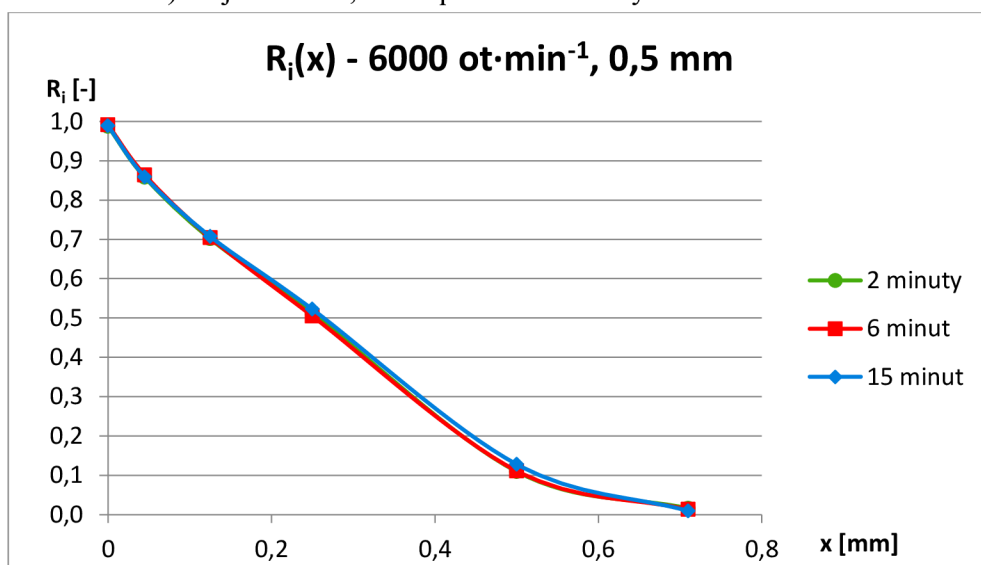


Obrázek 5.73 Rozseвовá křivka vzorků mletých při 14000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 15 minut na různou velikost bez použití cyklónu

Rozdíl mezi jednotlivými křivkami je zřetelný u mletí na různé frakce z hlediska prosévání až na dno. Například v případě 14000 ot·min<sup>-1</sup> byla až na poslední nádobu prosívána více než polovina materiálu mletého na 1,5 mm, zatímco při mletí na 0,5 mm bylo na dno prosíváno pouze cca 15 % materiálu. V případě síta o velikosti 1 mm množství na dně odpovídalo zhruba 30 % materiálu. Tyto rozdíly ovšem mohly být způsobeny např. nevhodnou volbou síta pro analýzu o velikosti ok 0,5 mm jakožto nejjemnějšího síta pro materiál mletý na 1,5 mm.

### Různý čas mletí

Na obrázku 5.74 jsou zobrazeny rozseвовé křivky materiálu mletého při nejnižších otáčkách (6000 ot·min<sup>-1</sup>) na jemnost 0,5 mm po různě dlouhý čas.

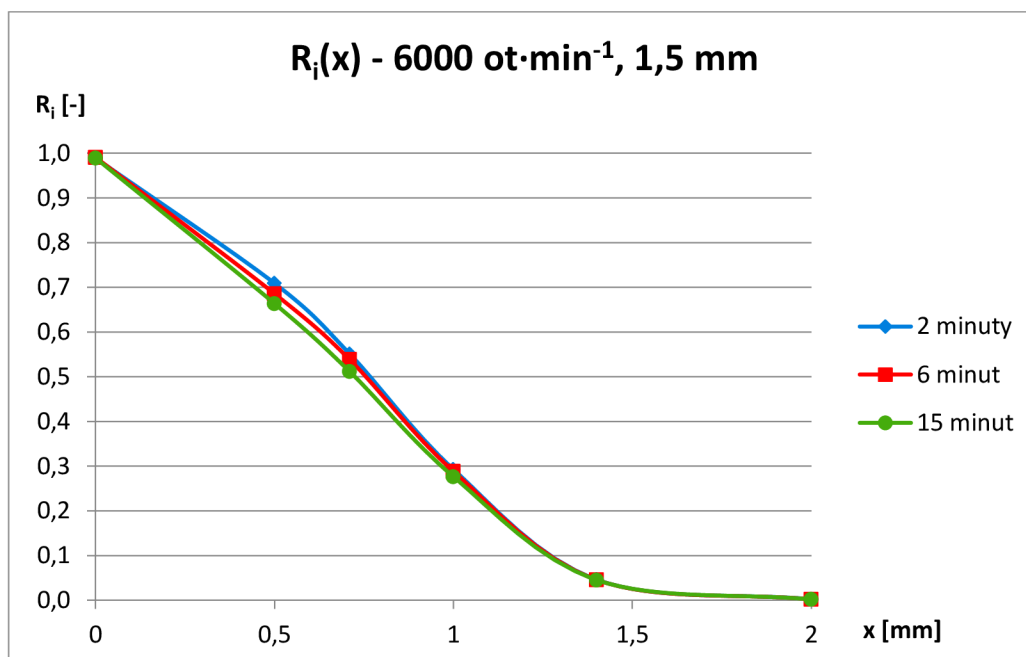


Obrázek 5.74 Rozseвовá křivka vzorků mletých při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na velikost 0,5 mm po různě dlouhou dobu bez použití cyklónu

Lze říci, že velikost částic materiálu nebyla u této frakce příliš ovlivněna časem mletí. U křivek pro všechny varianty doby mletí byly zaznamenány téměř totožné průběhy.

Na nejhrubším sítu nebyl zachycen téměř žádný materiál. Až na druhém sítu bylo zachyceno přibližně 10 % vstupního množství materiálu. Zbývající části křivek byly vykresleny takřka s lineárním průběhem zachytávání na jednotlivých sítích. Přibližně 40 % namletého materiálu bylo zachyceno na třetím sítu (o velikosti ok 0,25 mm). Zbývající množství materiálu (cca 50 %) bylo složeno z částic menších než 0,25 mm.

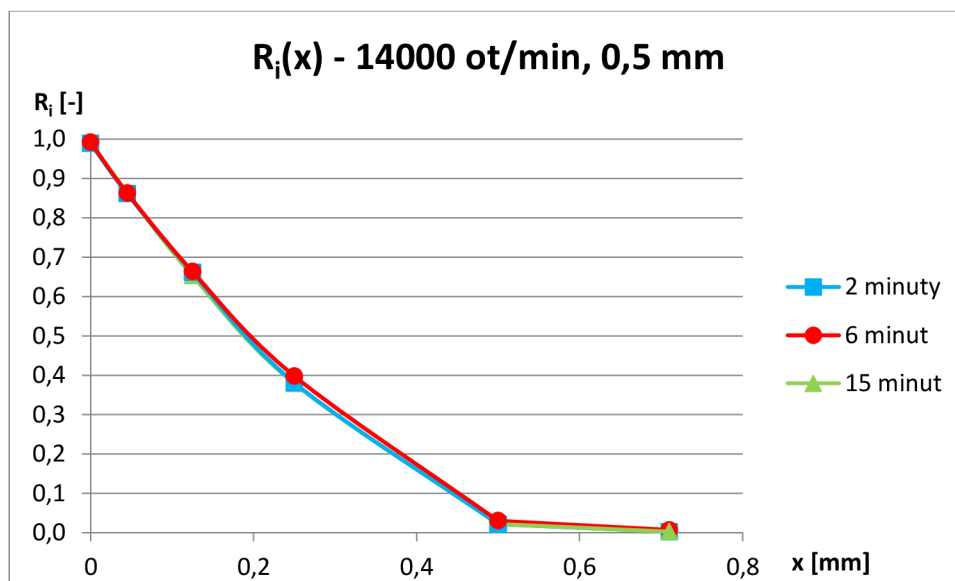
Na dalším grafu je uvedena rozseвовá křivka materiálu mletého při stejných otáčkách na výslednou frakci 1,5 mm.



Obrázek 5.75 Rozseвовá křivka vzorků mletých při 6000 ot·min<sup>-1</sup> na velikost 1,5 mm po různé dlouhou dobu bez použití cyklónu

Zde jsou již rozdíly mezi jednotlivými časy mletí znatelnější. Nejhrubším sítem bylo prosítováno veškeré množství materiálu. U všech měření bylo na sítu o velikosti ok 1 mm zachyceno téměř stejné množství vzorku. Na jemnějších sítích lze již postřehnout difference mezi jednotlivými časy mletí. Průběžně bylo na sítích během sítování zachytáváno nejvíce materiálu mletého po nejkratší čas. Čím déle byl materiál mlet, tím méně jej bylo na jednotlivých sítích zadrženo. O to více jej bylo proseto až na poslední nádobu bez ok. S delším časem mletí bylo tedy namleto větší množství jemnějších částic. Z posledního síta bylo až do nádoby na dně prosítováno v případě materiálu mletého po dobu 15 minut o cca 5 % vzorku více než v případě mletí po dobu 2 minut. To mohlo být způsobeno např. větším množstvím použitého surového materiálu, kde mohlo zůstat nashromážděno více jemnějších částic.

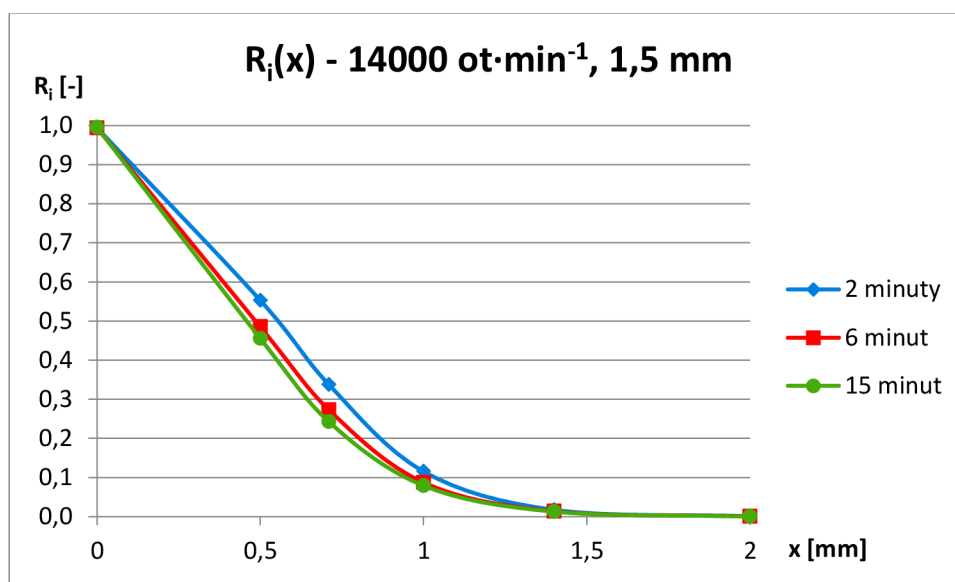
Na následujícím grafu lze vidět rozseвовou křivku pro materiál mletý bez použití cyklónu na jemnost 0,5 mm při nejvyšších otáčkách (14000 ot·min<sup>-1</sup>) po různé dlouhý čas.



Obrázek 5.76 Rozseвовá křivka vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost 0,5 mm po různých dlouhou dobu bez použití cyklónu

Podobně jako v případě otáček  $6000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  lze říci, že velikost částic materiálu nebyla časem mletí téměř ovlivněna. U křivek pro všechny varianty času mletí byl zaznamenán téměř stejný průběh. Na dvou nejhrubších sítích nebyl zachycen téměř žádný materiál. Část křivky zobrazující materiál zachycený mezi sítím  $45 \mu\text{m}$  a poslední nádobou byla opět téměř lineární. Největší část namletého materiálu byla zachycena na třetím síti, tedy o velikosti ok  $0,25 \text{ mm}$ . Tato část odpovídala přibližně 40 %.

Na dalším grafu je zobrazena rozseвовá křivka materiálu mletého při stejných otáčkách ale na výslednou velikost 1,5 mm.



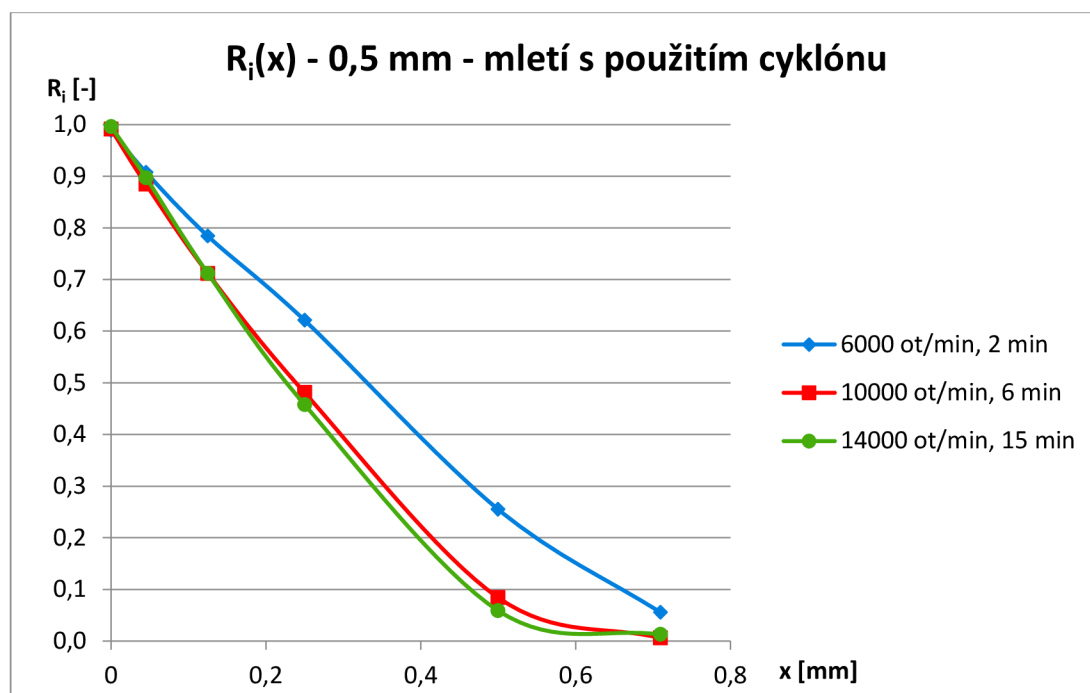
Obrázek 5.77 Rozseوصá křivka vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na velikost 1,5 mm po různých dlouhou dobu bez použití cyklónu

Na tomto grafu lze pozorovat výraznější rozdíly distribuce částic při různých časech mletí při vysokých otáčkách. Až na poslední nádobu bylo prosítováno nejmenší množství

vzorku v případě nejkratšího mletí. Zároveň lze vidět, že v průběhu síťování bylo na jednotlivých sítích zachyceno nejvíce materiálu právě v případě mletí po dobu 2 minut. Z toho lze vyvodit, že čím déle byl materiál mlet, tím jemnějšími částicemi byl pak tvořen. Na základě tohoto grafu lze také říci, že ačkoli bylo při mletí zvoleno síto 1,5 mm, přesto bylo cca 90 % materiálu tvořeno částicemi menšími než 1 mm. Na základě tohoto grafu a obrázku 5.76 lze vyvodit, že velikost částic byla ovlivněna dobou mletí spíše v případě mletí na hrubší frakci.

### 5.7.2 Mletí s cyklónem

Tato část práce se zabývá výsledky síťové analýzy pro vzorky mleté s použitím cyklónu. Na obrázku 5.78 jsou zobrazeny rozsevé křivky vytvořené pro stejnou výslednou frakci materiálu.

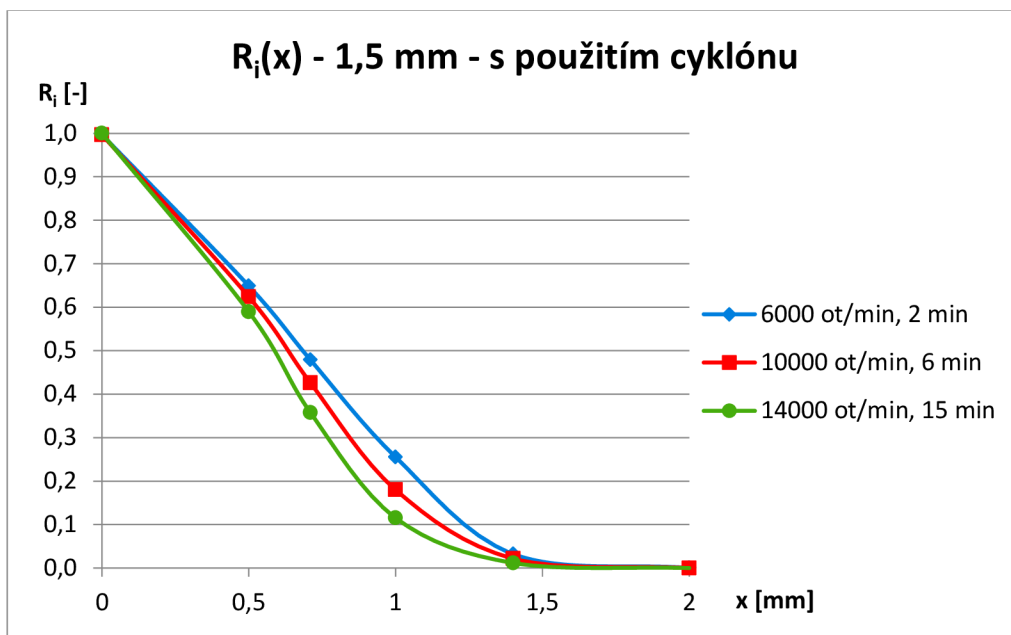


Obrázek 5.78 Rozsevé křivky vzorků mletých na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu při různých podmínkách mletí

U rozsevé křivky materiálu mletého za podmínek  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , 6 min a  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , 15 min byla zaznamenána značná podobnost. V těchto případech nastavení mlýna nebyl na nejhrubším síti zachycen téměř žádný materiál. Přes 90 % materiálu bylo tvořeno částicemi menšími než 0,5 mm. U vzorku mletého po nejkratší dobu při nejnižších otáčkách byla část materiálu zachycena již na prvním síti. Z tohoto důvodu nebyl počátek rozsevé křivky tohoto vzorku vykreslen v nule na ose  $R_i$ . To mohlo být způsobeno např. chybou vážení nebo ztrátou materiálu při vážení. Oproti ostatním vzorkům byl vzorek v tomto případě tvořen částicemi menšími než 0,5 mm pouze z cca 75 %. Stejně jako při mletí bez použití cyklónu je zřejmé, že během mletí při vyšších parametrech mlýna byl materiál mlet na jemnější částice.



Na dalším grafu jsou zobrazeny rozsevé křivky vzorků mletých na velikost 1,5 mm.

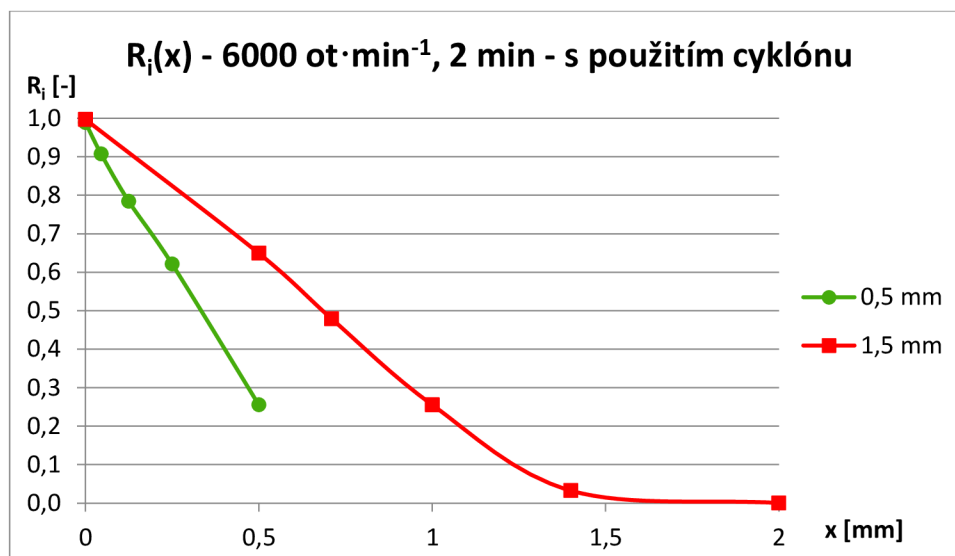


Obrázek 5.79 Rozsevé křivky vzorků mletých na velikost 1,5 mm s použitím cyklónu při různých podmínkách mletí

Na tomto grafu lze vidět rozdíly v průběhu rozsevé křivky mezi jednotlivými nastavenými parametry mlýna. Ve všech případech byla většina materiálu tvořena částicemi menšími než 1,4 mm. Lze říci, že čím byly nastaveny vyšší otáčky a delší čas mletí, tím jemnější částice byly namlety. Největší rozdíl byl zaznamenán u síta s velikostí ok 1 mm. Při sítování vzorku mletého při nejnižších otáčkách bylo oproti vzorku mletého při 14000 ot·min<sup>-1</sup> zachyceno o přibližně 15 % materiálu více. U jemnějších sít byl tento rozdíl nižší. U posledního síta rozdíl odpovídal pouze cca 5 %. V materiálu tedy bylo vlivem vyšších otáček opět obsaženo více menších částic.

Na následujícím grafu jsou zobrazeny vzorky mleté při stejných podmínkách mletí na odlišnou jemnost.

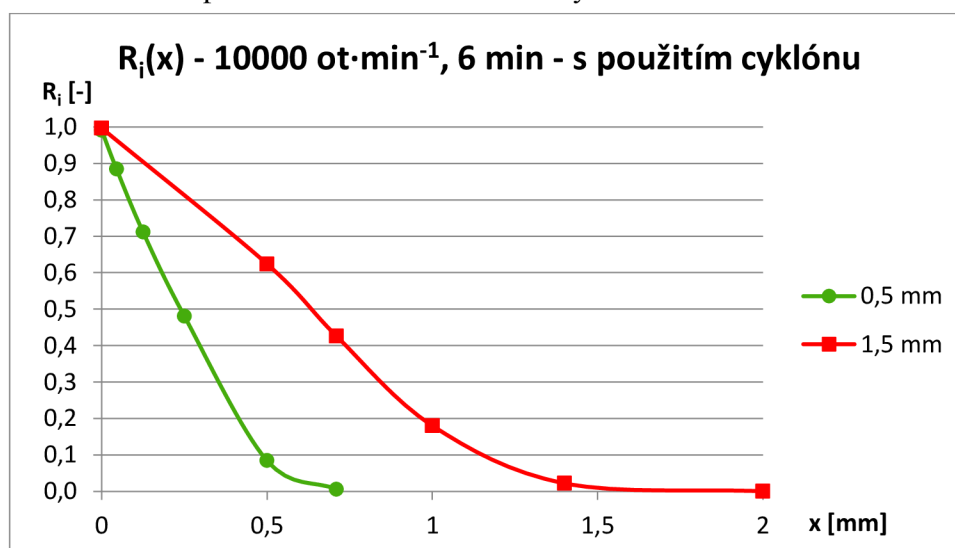




Obrázek 5.80 Rozseвовá křivka vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při 6000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 2 minut s použitím cyklónu

Do sítové analýzy těchto vzorků byla do sestavy zvolena dvě síta o stejných rozměrech ok – 0,5 mm a 0,71 mm. V případě vzorku 1,5 mm byla více než polovina materiálu tvořena částicemi menšími než 0,71 mm. U jemnějšího vzorku bylo těchto částic cca 95 %. Na sítu 0,5 mm bylo zachyceno přibližně 15 % částic hrubšího materiálu, v případě jemnějšího materiálu bylo na tomto sítu zachyceno cca 20 % částic. Pokud bylo tedy během mletí použito hrubší síto, byly ve vzorku také obsaženy jemnější částice než požadovaná frakce, ale v menším množství. To mohlo být způsobeno např. odsáváním drobnějších částic vzorku během mletí tahem vysavače.

Na následujícím grafu jsou vykresleny rozseвовé křivky vzorků mletých s použitím cyklónu při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut na různou výslednou frakci.



Obrázek 5.81 Rozseوصá křivka vzorků mletých na velikost 0,5 mm a 1,5 mm při 10000 ot·min<sup>-1</sup> po dobu 6 minut s použitím cyklónu

Vzorek mletý na frakci 0,5 mm byl tvořen pouze částicemi menšími než 0,71 mm, mletí tedy proběhlo úspěšně. Hrubší frakce byla tvořena téměř 60 % těchto částic. Na sítu sestavy

o velikosti ok 0,5 mm bylo zachyceno cca 20 % částic hrubšího vzorku, zatímco v případě jemnějšího vzorku jich bylo zadrženo necelých 10 %. Jemnější vzorek byl tedy tvořen z více než devadesáti procent částicemi menšími než nejvyšší požadovaná frakce materiálu (0,5 mm). V hrubším vzorku bylo těchto částic obsaženo pouze necelých 40 %.

### 5.7.3 Mletí bez cyklónu vs. s cyklónem

Pro porovnání sítové analýzy materiálu mletého bez cyklónu a s cyklónem byl zvolen vzorek mletý po dobu 15 minut při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na jemnost 0,5 mm. Změřené a navážené údaje jsou zobrazeny v tabulce 15.

#### Počáteční hmotnost vzorků

→ Bez cyklónu

$$m_v = 53,14 \text{ g}$$

→ S cyklónem

$$m_v = 50,31 \text{ g}$$

Tabulka 15 Porovnání sítové analýzy vzorků mletých při  $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  po dobu 15 minut na velikost 0,5 mm s cyklónem a bez cyklónu

Síto	Velikost ok x [mm]	Bez cyklónu		S cyklónem	
		$m_i$ [g]	$R_i$ [-]	$m_i$ [g]	$R_i$ [-]
1	0,71	0,15	0,00	0,63	0,01
2	0,5	1,03	0,02	2,33	0,06
3	0,25	18,97	0,38	20,06	0,46
4	0,125	14,56	0,65	12,77	0,71
5	0,045	11,19	0,86	9,34	0,90
Dno	0	6,68	0,99	4,98	1,00

x [mm]

velikost ok síta

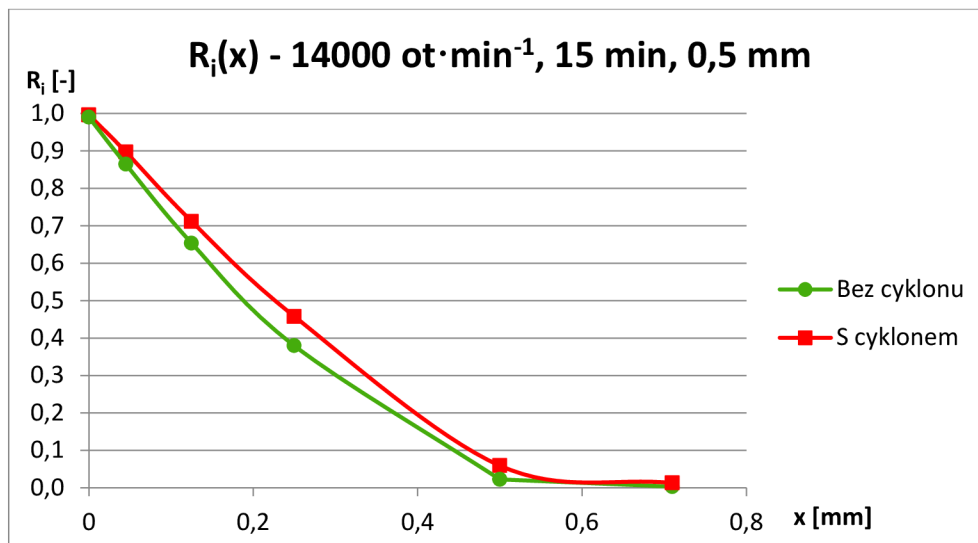
$m_i$  [g]

hmotnost vzorku na jednotlivých sítích

$R_i$  [g]

poměrné zbytky na sítích

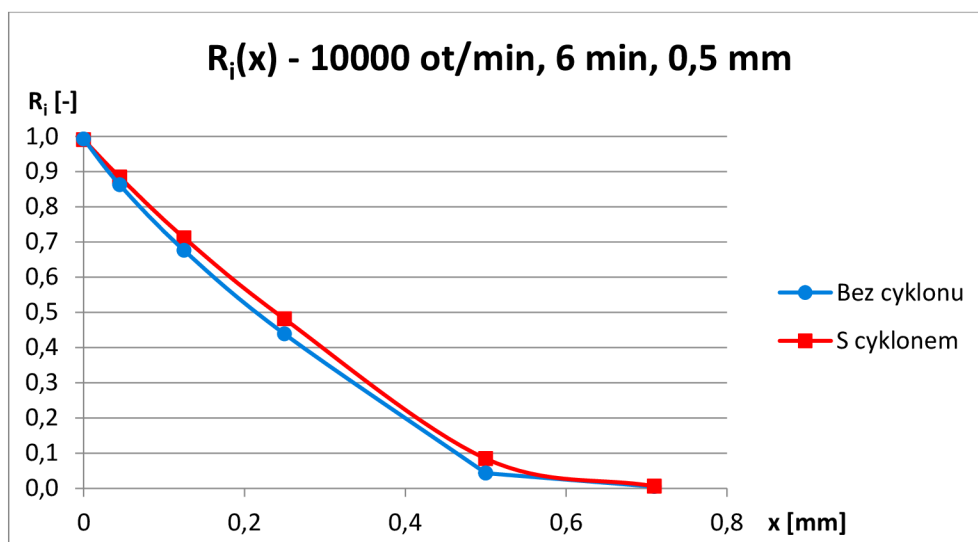
Z těchto dat byly vytvořeny rozsevé křivky.



Obrázek 5.82 Rozseková křivka vzorku mletého při 14000  $ot \cdot min^{-1}$  po dobu 15 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu a bez cyklónu

Na hrubších sítích síťového třídíče bylo zachyceno více částic mletých s použitím cyklónu. Jednalo se o případy prvních tří sít. Naopak u zbývajících, jemnějších sít bylo zachyceno větší množství částic mletých bez cyklónu. Tento jev mohl být způsoben vlivem tahu zapnutého vysavače při použití cyklónu, díky němuž byly jemnější částice zčásti odstraněny. V obou případech mletí bylo nejvíce částic zachyceno na prostředním sítu s rozměry ok 0,25 mm. V případě mletí bez cyklónu se jednalo o 36 % částic, v případě použití cyklónu o 39 % částic.

Pro porovnání s obrázkem 5.82 byl vytvořen graf pro vzorky mleté při otáčkách 10000  $ot \cdot min^{-1}$ , po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu a bez něj.



Obrázek 5.83 Rozseková křivka vzorku mletého při 10000  $ot \cdot min^{-1}$  po dobu 6 minut na velikost 0,5 mm s použitím cyklónu a bez cyklónu

Na tomto grafu lze vidět, že křivky vykazovaly podobný průběh jako v předchozím případě. V případě mletí s použitím cyklónu bylo průběžně zachytáváno méně částic, pravděpodobně z důvodu odsávání jemných částic během mletí.

## ZÁVĚR

V první části práce byla zpracována rešerše zabývající se základními vlastnostmi paliva, způsoby přípravy vzorku před jeho úpravou a možnostmi analýzy vybraných vlastností. Dále byl uveden přehled typů mlýnů, se kterými se lze setkat.

Druhá část práce byla založena na experimentu. Ten spočíval v analýze vybraných vlastností vzorků mletých při různých podmínkách mletí. Obměny spočívaly v nastavení různých otáček, různé doby mletí a použití různých sít určujících výslednou frakci paliva. Během mletí byla průběžně sledována teplota ve mlýně. Předmětem analýzy vzorků byl obsah vody, obsah popela, obsah prchavé hořlaviny a spalné teplo. Pro všechny vzorky byla zpracována síťová analýza.

Na základě výsledků této práce lze říci, že na vlastnosti paliva měla vliv výše nastavených otáček, doba mletí i použité síto. Palivo mleté na jemnější frakci vykazovalo nižší obsah vlhkosti i prchavé hořlaviny. Naopak byl u těchto vzorků zaznamenán vyšší podíl popela a hodnoty spalného tepla. Dále byl s vyššími otáčkami pozorován nižší obsah vlhkosti i podíl popela, ale vyšší hodnota spalného tepla a podílu prchavé hořlaviny. Nelze jednoznačně říci, jaký vliv měla na vlastnosti paliva doba mletí. S delším časem mletí byl zaznamenán pokles teploty ve mlýně během mletí. S nastavením nižších otáček bylo s delším časem mletí častěji dosaženo nižšího podílu prchavé hořlaviny. V případě nejvyšších otáček bylo s delší dobou mletí naopak zjištěno spíše zvýšení podílu prchavé hořlaviny. V případě popela byl naměřen při použití  $10000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  nárůst jeho podílu. Při nastavení na nejvyšší otáčky ( $14000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ) byl s delším časem mletí zaznamenán naopak výrazný pokles podílu popela. S kratší dobou mletí byly naměřeny menší hodnoty spalného tepla. Nejvhodnější úpravou materiálu by tedy mohlo být mletí po delší dobu s vyššími otáčkami a jemnějším sítem. Použitím jemnějšího síta sice vzorek ztrácí podíl prchavé hořlaviny, dochází však k výraznějšímu úniku vlhkosti, která proces spalování komplikuje.

Pro srovnání vlastností vzorků z těchto měření bylo provedeno i mletí s použitím cyklónu. S cyklónem bylo namleto pouze šest vzorků při podmínkách mletí volených tak, aby byly zahrnuty všechny otáčky, časy mletí i obě síta jako v případě mletí bez cyklónu. Následně byly analyzovány stejné vlastnosti jako u vzorků mletých bez použití cyklónu. Jednotlivé vlastnosti vykazovaly v závislosti na době mletí, nastavených otáčkách i na výběru síta podobné změny jako u mletí bez cyklónu. Lze říci, že použití cyklónu během mletí mělo významný vliv na obsah vlhkosti, na velikost částic i na ostatní vlastnosti vzorků.

Pro všechny vzorky mleté s použitím cyklónu byl oproti vzorkům mletých bez cyklónu zaznamenán výrazný pokles vlhkosti. V případě použití jemnějšího síta byl oproti mletí bez cyklónu zaznamenán pokles podílu popela. V případě hrubšího síta byly hodnoty podílu popela naopak vyšší. Ve většině případů byl naměřen vyšší podíl prchavé hořlaviny u mletí s cyklónem. Absence cyklónu během mletí měla za následek pokles spalného tepla oproti mletí s cyklónem. Použití cyklónu má tedy výrazný vliv pro dosažení co nejkvalitnějšího paliva pro spalování. Vhodné je zejména využití jemnějšího síta během mletí s cyklónem, které sníží podíl popela.

Na velikost částic mělo nejvýraznější vliv nastavení otáček a výběr síta. S vyššími otáčkami bylo detekováno větší množství jemnějších částic. Vzorky mleté s použitím hrubšího síta během mletí byly tvořeny menším množstvím jemnějších částic. Velikost částic nebyla téměř ovlivněna časem mletí. V případě použití hrubšího síta byly nepatrné rozdíly zaznamenány u vzorků mletých delší dobu. V tomto případě bylo zjištěno větší množství jemnějších částic. U mletí s cyklónem byl zaznamenán podobný průběh s ohledem na všechny nastavené podmínky mletí jako u mletí bez použití cyklónu. U vzorků mletých s použitím cyklónu bylo ve srovnání s mletím bez cyklónu zaznamenáno více hrubších částic. Kromě

vlastností vzorků byla tedy aplikací cyklónu během mletí ovlivněna i distribuce částic, kdy byly jemnější částice tahem průmyslového vysavače odstraněny. Je-li požadováno jemnější palivo, vhodnější úpravou paliva by bylo mletí bez použití cyklónu. Zároveň by bylo vhodné volit jemnější síto během mletí a nastavit vyšší otáčky.

V této práci byly zkoumány změny vlastností a distribuce částic vzorků v závislosti na nastavení parametrů rotorového rychlomlýnku. Tyto změny byly porovnány s výsledky uváděnými v literatuře.

Bylo dosaženo všech zadaných cílů práce. Pro lepší představu o vlivu mletí na palivo by bylo příhodné pokračovat s dalšími analýzami. Mohlo by být užitečné zaměřit pozornost například na použití jiných biopaliv (např. obilnin, stébelnin, olejnin apod.), na využití jiného typu mlýna, na určení průměrných velikostí částic namletých vzorků, případně na ekonomickou stránku mletí jako například náklady spojené s provozem mlýna, spotřeba surového materiálu atd.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČERMÁK, Josef. *Spalovací zařízení a kotle*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Řada strojírenské literatury.
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] VOBOŘIL, David. Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2017 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [4] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).
- [5] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006 [cit. 2021-04-22]. ISBN 80-248-1207-X. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/bio.pdf>
- [6] SKÁLA, Zdeněk. Výukové materiály k předmětu Palivové hospodářství: Přednášky LPH 2020. Energetický ústav, VUT v Brně.
- [7] LYČKA, Zdeněk. Kolik kilogramů pevného paliva je zapotřebí k výrobě GJ tepla. *Topin.cz* [online]. [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/kolik-kilogramu-pevneho-paliva-je-zapotrebi-k-vyrobe-gj-tepla-detail-6786>
- [8] TOMAN, Zdeněk. Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2011 [cit. 2021-4-14]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>
- [9] NOSKIEVIČ, Pavel. *Biomasa a její energetické využití*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. Phare. ISBN 80-7078-367-2.

- [10] WEGER, Jan. Biomasa jako zdroj energie. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>
- [11] BALÁŠ, Marek, MOSKALÍK, Jiří: Měření vlhkosti paliv. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [12] ČSN EN ISO 14780. *Tuhá biopaliva - Příprava vzorku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [13] CÍDLOVÁ, Hana, Miroslav FIALA a Irena PLUCKOVÁ. Mlýny a drtiče. In: *Laboratorní technika* [online]. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity, katedra chemie, c2007-2008 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech/pages/mlyny.html>
- [14] Mlýny FRITSCH. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-22]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/>
- [15] Pulverisette 5. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-22]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlynky/mlyny-planetove/prodej-laboratorni-techniky-planetovy-mlynek-pulverisette-5-fritsch/>
- [16] Planetary Mills - classic line. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: [https://www.ilabo.cz/UserFiles/File/eshop/636/e\\_classic\\_line\\_Planetary\\_Mills.pdf](https://www.ilabo.cz/UserFiles/File/eshop/636/e_classic_line_Planetary_Mills.pdf)
- [17] Planetary Ball Mill. *Laarmann* [online]. Roermond: Laarmann, c2008-2021 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.laarmann.eu/Products/planetary-ball-mill/>
- [18] Planetový kulový mlýn LAB 04-04. 2 THETA [online]. Český Těšín: 2THETA [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: [http://www.2theta.cz/uploads/Nove\\_veci/Planetovy\\_mllyn\\_LAB\\_04\\_04.pdf](http://www.2theta.cz/uploads/Nove_veci/Planetovy_mllyn_LAB_04_04.pdf)
- [19] XRD - Mill McCrone. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlynky/mccrone-xrd-mill/planetovy-kulovy-mlyn-pm-400/>

- [20] Oscilační mlýn MM 400. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlyny/mm-400/oscilacni-mlyn-mm-400>
- [21] Oscilační mlýn MM 500 nano. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlyny/mm-500-nano/funkce-a-charakteristiky/>
- [22] Kryogenní mlýn Cryomill. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlyny/cryomill/oscilacni-mlyn-cryomill/>
- [23] Vysoce výkonný kulový mlýn Emax. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlyny/emax/funkce-a-charakteristiky/>
- [24] Bubnový mlýn TM 500. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/kulove-mlyny/tm-500/funkce-vlastnosti/>
- [25] Pulverisette 15. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlyny/mlyny-strizne-rezaci/prodej-laboratorni-techniky-strizny-mlyn-pulverisette-15-fritsch/>
- [26] Pulverisette 19 - Střížný mlýn. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/strizne-rezaci-mlynky-pulverisette-fritsch/prodej-laboratorni-techniky-strizny-rezaci-mlyn-pulverisette-19-fritsch/>
- [27] Cutting Mills. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: [https://www.ilabo.cz/UserFiles/File/eshop/644/e\\_Cutting\\_Mills.pdf](https://www.ilabo.cz/UserFiles/File/eshop/644/e_Cutting_Mills.pdf)
- [28] Střížný mlýn SM 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/strizne-mlyny/sm-200/funkce-a-charakteristiky/>



- [29] Střížný mlýn SM 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/strizne-mlyny/sm-300/funkce-a-charakteristiky/>
- [30] Pulverisette 2 - hmoždířový mlýnek. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlyny/mlyn-hmozdirovy/prodej-laboratorni-techniky-mleti-hmozdirovy-mlynek-pulverisette-2-fritsch/>
- [31] Hmoždířový mlýn RM 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/hmozdirove-mlyny/rm-200/funkce-a-charakteristiky/>
- [32] Pulverisette 2. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/UserFiles/File/eshop/656/pulverisette%202.pdf>
- [33] Rotorový mlýn SR 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/rotorove-mlyny/sr-300/funkce-a-charakteristiky/>
- [34] Cyklónový mlýn TWISTER. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/rotorove-mlyny/twister/funkce-a-charakteristiky/>
- [35] Ultraodstředivý mlýn ZM 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/rotorove-mlyny/zm-200/funkce-a-charakteristiky/>
- [36] Kladivový mlýn SK 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/rotorove-mlyny/sk-300/funkce-a-charakteristiky/>
- [37] Pulverisette 14 premium line. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlyny/rotorovy-rychlomlynek/prodej-laboratorni-techniky-rotorovy-rychlomlynek-pulverisette-14-premium-line-fritsch/?search=rotorov%C3%BD>

- [38] Pulverisette 16 - úderový křížový mlýn. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlynky/mlyn-uderovy-krizovy/prodej-laboratorni-techniky-mleti-uderovy-krizovy-mlyn-pulverisette-16-fritsch/>
- [39] Pulverisette 16. *FRITSCHE* [online]. Idar-Oberstein: Fritsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/rotor-beater-mills/details/product/pulverisette-16-cast-iron/>
- [40] Čelist'ový drtič BB 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/celistove-drtice/bb-300/funkce-vlastnosti>
- [41] Pulverisette 1 - classic line - čelist'ový drtič. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/drtic-celistovy/prodej-laboratorni-techniky-mleti-celistovy-drtic-pulverisette-1-fritsch/>
- [42] Čelist'ový drtič BB 600. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/celistove-drtice/bb-600/funkce-vlastnosti/>
- [43] Kombinace pulverisette 1 a pulverisette 13, classic line. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/drtic-celistovy/kombinace-pulverisette-1-a-pulverisette-13-classic-line/>
- [44] Pulverisette 13 classic line - diskový mlýn. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/mlyn-diskovy/prodej-laboratorni-techniky-mleti-diskovy-mlyn-pulverisette-13-fritsch/>
- [45] Diskový mlýn DM 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/diskove-mlyny/dm-200/funkce-a-charakteristiky/>
- [46] Diskový mlýn DM 400. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/diskove-mlyny/dm-400/funkce-a-charakteristiky/>

- [47] Mlýn MTP-400. 2 *THETA* [online]. Český Těšín: 2THETA [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: [http://www.2theta.cz/uploads/Nove\\_veci/Mlyn\\_MTP\\_400.pdf](http://www.2theta.cz/uploads/Nove_veci/Mlyn_MTP_400.pdf)
- [48] SKIOLD Diskové mlýny. *Danagra* [online]. Plzeň [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: [https://www.danagra.cz/default\\_soubory/SK-2014-web.pdf](https://www.danagra.cz/default_soubory/SK-2014-web.pdf)
- [49] Pulverisette 9 - vibrační diskový mlýn. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/firmy/fritsch-vyhradni-zastoupeni-v-cr/laboratorni-mlyny/mlyn-diskovy-vibracni/prodej-laboratorni-techniky-mleti-vibracni-diskovy-mlyn-pulverisette-9-fritsch/>
- [50] Vibrační diskový mlýn RS 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/diskove-mlyny/rs-200/funkce-a-charakteristiky/>
- [51] Vibrační diskový mlýn RS 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/diskove-mlyny/rs-300/funkce-vlastnosti/>
- [52] 8530 Shatterbox. *RMI* [online]. Lázně Bohdaneč, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <http://www.rmi.cz/8530-shatterbox>
- [53] Laboratorní vibrační mlýn LAB 09-200. 2 *THETA* [online]. Český Těšín [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: [http://www.2theta.cz/uploads/Nove\\_veci/Vibracni\\_mlyn\\_LAB\\_09\\_200.pdf](http://www.2theta.cz/uploads/Nove_veci/Vibracni_mlyn_LAB_09_200.pdf)
- [54] Nožový mlýn GRINDOMIX GM 200. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/nozove/gm-200/funkce-a-charakteristiky/>
- [55] Nožový mlýn GRINDOMIX GM 300. *Retsch* [online]. Haan: Retsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/nozove/gm-300/funkce-a-charakteristiky/>
- [56] Pulverisette 11. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/laboratorni-mlynky-fritsch-mleti-drceni-homogenizace/mlyn-nozovy/mlyn-nozovy-novy/pulverisette-11/>

- [57] MF 10 basic - mikrojemný mlýnek. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/mlynky-ika/prodej-laboratorni-techniky-mleti-mlynek-mf10-basic-ika/>
- [58] Analytický mlýnek - A 11 basic. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/mlynky-ika/prodej-laboratorni-techniky-mleti-laboratorni-mlynek-ika-a11-basic/>
- [59] Mlýnek laboratorní A 10 basic IKA. *Ilabo* [online]. Kyjov: PS Works, c2011-2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.ilabo.cz/produkty/laboratorni-mlynky/mlynky-ika/prodej-laboratorni-techniky-mleti-laboratorni-mlynek-ika-a10-basic/>
- [60] ČSN EN ISO 18134-3. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 3: Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [61] ČSN EN ISO 18134-1. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 1: Celková voda - Referenční metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [62] OCHECOVÁ, Pavla, Pavel TLUSTOŠ, Jiřina SZÁKOVÁ, Zdeněk KOŠNÁŘ a Filip MERCL. Popel z biomasy - významný zdroj živin. *Biom.cz* [online]. 2015 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>
- [63] ČSN EN ISO 18122. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [64] HORÁK, Jiří. *Úvod do teorie spalování tuhých paliv* [online]. Ostrava: Výzkumné energetické centrum - VŠB - TUO [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://vec.vsb.cz/export/sites/vec/.content/galerie-souboru/194-spalovani-tuhych-paliv-1.pdf>
- [65] ČSN EN ISO 18123. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

- [66] KOTLÁNOVÁ, Alice. Metody zkoušení fyzikálně-chemických vlastností tuhých biopaliv. *Biom.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-5-3]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-zkouseni-fyzikalne-chemickyh-vlastnosti-tuhych-biopaliv>
- [67] Downloads. *IKA* [online]. Staufen, [2018] [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ika.com/en/Products-Lab-Eq/Calorimeters-Oxygen-Bomb-calorimeter-csp-330/C-200-Downloads-cpdl-8802500/>
- [68] SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie* [online]. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2021-5-3]. ISBN 978-80-248-3378-1. Dostupné z: [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskova-metalurgie/Skotnicova\\_Praskova-metalurgie.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/praskova-metalurgie/Skotnicova_Praskova-metalurgie.pdf)
- [69] PABST, W. a E. GREGOROVÁ. *Charakterizace částic a částicových soustav* [online]. Praha: VŠCHT, 2007 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization\\_of\\_particles/CPPS%20\\_Czech%20version\\_.pdf](http://old.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20_Czech%20version_.pdf)
- [70] Variable Speed Rotor Mill Pulverisette 14 classic line. *FRITSCH* [online]. Idar-Oberstein: Fritsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/rotor-beater-mills/details/product/pulverisette-14-classic-line/>
- [71] JANÍČEK, Jan. *Konstrakční příručka* [online]. 9. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2019 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.sensit.cz/cz/prirucka-sensit-5849/>
- [72] C 200. *IKA* [online]. Staufen, [2018] [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.ika.com/en/Products-Lab-Eq/Calorimeters-Oxygen-Bomb-calorimeter-csp-330/C-200-cpdt-8802500/>
- [73] Tabletovací lis BSL - 2. *BRIO Hranice* [online]. Hranice: BRIO Hranice, 2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://briohranice.cz/laboratorni-lis-bsl---2>
- [74] VENTICEL 111 - Eco line. *BMT* [online]. Brno - Zábřovice: BMT Medical Technology, c2008-2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.bmt.cz/venticell-61-venticell-111---ecoline18#&gid=null&pid=1>

- [75] Ohaus Explorer balance. *Merck* [online]. Darmstadt: Merck, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/z373346?lang=en&ion=CZ>
- [76] Laboratorní komorová pec L. *LAC* [online]. Židlochovice: LAC, c2000-2020 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/getattachment/Pece-a-susarny/Typizovane-pece-a-susarny/Laboratorni-pece-a-susarny/laboratorni-komorova-pec-L/Produktovy-list-L.pdf.aspx>
- [77] Vibratory Sieve Shaker Analysette 3 Pro. *FRITSCH* [online]. Idar-Oberstein: Fritsch, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/sieving/vibratory-sieve-shakers/details/product/analysette-3-pro/>
- [78] Přístrojové vybavení. *Energetický ústav* [online]. Brno, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/o-nas-laboratore-oei-pristrojove-vybaveni>
- [79] Hodnocení analytických výsledků. *Katedra analytické chemie* [online]. Olomouc, c2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://ach.upol.cz/ucebnice/hodnoceni3.htm>
- [80] KNOB, Jan. *Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech I* [online]. Brno, 2016 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60188>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vladimír Brummer.
- [81] LISÁ, Hana. *Základní fyzikální vlastnosti agropellet: pro projekt Ekogalva\_TH02020025* [interní zpráva]. Brno: VUT FSI OEI, 2019, 46 s. Poskytnuto od: Ing. Hana Lisá, Ph.D..
- [82] PHANPHANICH, Manunya a Sudhagar MANI. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* [online]. 2011, **102**(2), 1246-1253 [cit. 2021-5-3]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2010.08.028
- [83] KRAJNC, Mitja a Bojan DOLŠAK. The influence of drum chipper configuration on the quality of wood chips. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2014, **64**, 133-139 [cit. 2021-5-3]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2014.03.011

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$A^{dr}$	Obsah popela v bezvodém stavu	%
$A^r$	Obsah popela v surovém stavu	%
$B^r$	Balastní podíl	%
$h$	Hořlavina	%
$h^{dr}$	Obsah hořlaviny v sušině	%
$h^r$	Obsah hořlaviny v původním vzorku	%
$m_i$	Hmotnost	$g$
$M_{ad}$	Obsah vlhkosti	%
$Q_i^r$	Výhřevnost	$MJ \cdot kg^{-1}$
$Q_s$	Spalné teplo	$MJ \cdot kg^{-1}$
$Q_s^{daf}$	Spalné teplo hořlaviny	$MJ \cdot kg^{-1}$
$Q_s^{dr}$	Spalné teplo sušiny	$MJ \cdot kg^{-1}$
$R_i$	Poměrné zbytky na sítěch	–
$s$	Směrodatná odchylka	%
$s_r$	Relativní směrodatná odchylka	%
$t$	Čas	$s$
$T$	Teplota	$^{\circ}C$
$V_d$	Obsah prchavé hořlaviny v bezvodém stavu	%
$V_r$	Obsah prchavé hořlaviny v surovém stavu	%
$w_{dr}$	Obsah sušiny	%

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- 1 Výpočet v programu MS Excel