

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky 12118



Mletí odpadů s lignocelulózovým základem

Diplomová práce

Autor: Bc. Václav Bímon

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Procesní technika

Vedoucí: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Praha 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bímon** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **457636**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Mletí odpadů s lignocelulózovým základem

Název diplomové práce anglicky:

Mechanical size reduction of lignocellulosic waste

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled dostupnosti odpadů s lignocelulózovým základem. Diskutujte jeho charakteristiky (velikost částic, vlhkost, složení, atp.).
- 2) Zpracujte rešerši zaměřenou na principy, stroje a zařízení pro mletí biomasy s lignocelulózovým základem. Zabývejte se rovněž modelováním energetické náročnosti rozpojování v závislosti na charakteristikách biomasy.
- 3) Proveďte systematické experimenty zabývající se stanovením rozpojovací energie v závislosti na charakteristice biomasy. Pokuste se popsat danou závislost vhodným modelem.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**


doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

7.7.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své bakalářské práce ke studijním účelům.

V Praze dne

.....

Václav Bímon

Poděkování

Touto cestou děkuji doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za jeho cenné a podmětné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Jeho ochotný přístup mi byl cennou pomocí při tvorbě této práce.

Anotace

Hlavním cílem této diplomové práce je popsání jednotlivých faktorů ovlivňujících energetickou náročnost rozmělnění odpadů s lignocelulózovým základem a popsání jejího chování vhodným modelem, kterým by bylo možné hodnotu energetické náročnosti predikovat. V rámci teoretické rešerše je zpracován přehled o dostupnosti odpadů s lignocelulózovým základem a diskutovány vlivy jeho charakteristik na energetickou náročnost rozpojení. Dále práce obsahuje rešerši zaměřenou na principy a dezintegrační zařízení pro rozpojení suché dřevnaté biomasy.

Klíčová slova: Biomasa. Dezintegrační jednotky. Energetická náročnost rozpojení. Mlýny.

Annotation

The main goal of this diploma thesis is to describe individual factors that are influencing intensity specific energy comminution of waste based on lignocellulosic basis and to describe its behaviour by finding a suitable model which might predict the energy intensity value. Part of the theoretical research is an overview which would describe the availability of lignocellulosic based waste and discussed its characteristic during the energy disconnection. In addition to that the work is focused on the principles and disintegration equipment which is used for the separation of dry wooded biomass.

Keywords: Biomass. Mill. Size reduction machine. Specific energy consumption.

Obsah

Úvod	8
1 Odpad s lignocelulózovým základem	9
1.1 Dostupnost	10
1.2 Požadavky biorafinérií na kvalitu biomasy.....	11
2 Analýza částic biomasy	12
2.1 Možnosti měření velikosti částic.....	12
2.1.1 <i>Dynamická analýza obrazu</i>	12
2.1.2 <i>Sítová analýza</i>	13
2.2 Tvar částic a tvarové faktory.....	14
2.3 Rozdělení velikosti částic.....	16
2.4 Analytické vyjádření křivek zrnitosti.....	18
2.4.1 <i>Rozdělení velikosti částic dle RRSB metody</i>	18
3 Mechanická dezintegrace biomasy	20
3.1 Zařízení pro rozpojování biomasy	21
3.1.1 <i>Nožové mlýny</i>	22
3.1.2 <i>Úderové mlýny</i>	22
3.1.3 <i>Diskové mlýny</i>	23
3.1.4 <i>Kulové mlýny</i>	24
3.2 Energetická náročnost rozpojení	25
4 Faktory ovlivňující rozpojovací energii	26
4.1 Rychlost plnění a počet otáček.....	27
4.2 Stupeň rozpojení	28
4.3 Typ lignocelulózové biomasy	29
4.4 Obsah vlhkosti.....	32
4.5 Předúprava biomasy	33
4.6 Variabilita biomasy	34

5 Modelování energetické náročnosti rozpojování biomasy	35
5.1 Rittingerova teorie.....	35
5.2 Kickova teorie	37
5.3 Bondova teorie	38
5.4 Charlesův vztah.....	39
5.5 Výsledky literární rešerše.....	40
6 Modelování energetické náročnosti rozpojení bukové štěpky v nožovém mlýnu	44
6.1 Vstupní surovina	44
6.2 Postup měření.....	46
6.3 Výsledky	50
6.3.1 <i>Evaluace chyby měření</i>	50
6.3.2 <i>Vliv otáček</i>	56
6.3.3 <i>Analýza energetické náročnosti</i>	65
6.3.4 <i>Shrnutí výsledků</i>	68
7 Závěr.....	71
Seznam použitých symbolů	73
Seznam použité literatury.....	76
Seznam obrázků	80
Seznam tabulek.....	82

Úvod

S neustále zvyšující se světovou populací významně narůstá i poptávka po zdrojích energie a průmyslových komoditách. V dnešní době je však cca 85 % energie bráno z tzv. vyčerpatelných zdrojů jako je například uhlí či ropa. Neustále zvyšující se spotřeba fosilních paliv po celém světě je pak hlavní příčinou globálního oteplování a znečišťování životního prostředí. Z tohoto důvodu je zapotřebí nalézt nové zdroje a metody, které by dokázaly fosilní paliva alespoň částečně nahradit a zároveň by byly šetrné k přírodě.

Jednou z možných cest se jeví technologie využívající pro výrobu energie a biopaliv odpadní biomasu, přičemž lignocelulózové odpady jsou jejím nejlevnějším a nejhojnějším typem. Ty tím pádem představují jednu z nejvíce energeticky bohatých surovin, které jsou obnovitelné a zároveň v současné době z velké části nevyužité, což z nich vytváří velice perspektivní zdroj.

Při zpracování odpadů s lignocelulózovým základem je však v první řadě potřeba její mechanická dezintegrace. Tento proces, ač je v technologii velice energeticky náročný, tak výrazně zvýší následnou efektivitu zpracování a výtěžnost produktů.

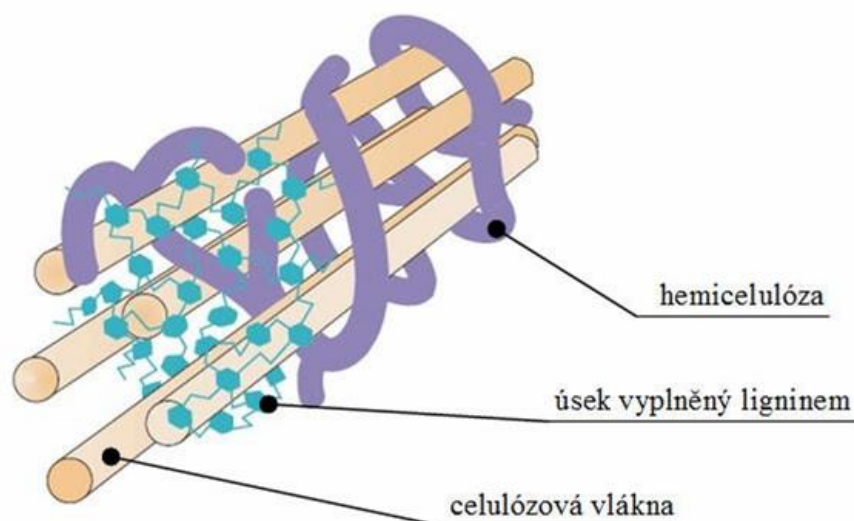
Vyhodnocení energetické náročnosti rozpojení při mechanické dezintegraci však není u biomasy s lignocelulózovým základem snadným úkolem. Energetická náročnost rozmělnění je totiž ovlivněná mnoha faktory, mechanické vlastnosti lignocelulózových materiálů jsou vzhledem k jejich složení a míře vlhkosti velice proměnlivé, a navíc zde přetrvává absence modelů, které by byly schopné u těchto surovin energetickou náročnost predikovat. Měrná rozpojovací energie se tak z tohoto důvodu musí získávat experimentálním měřením.

Cílem této diplomové práce je popsání jednotlivých faktorů ovlivňujících energetickou náročnost rozmělnění odpadů s lignocelulózovým základem a popsání jejího chování vhodným modelem, kterým by bylo možné hodnotu energetické náročnosti predikovat.

1 Odpad s lignocelulózovým základem

V roce 2012 činila odhadovaná celosvětová spotřeba ropy zhruba 90 milionů barelů denně, v roce 2020 je spotřeba však již okolo 100 milionů barelů denně a předpokládá se, že tato spotřeba bude i nadále stoupat (Patria, 2020). S rostoucí spotřebou ropy však zároveň klesají její zásoby. Možné řešení tohoto problému nabízejí biopaliva vyráběné z obnovitelných zdrojů. Biopaliva lze rozdělit do tří kategorií využívající k výrobě biomasu. První generace biopaliv využívá k výrobě zemědělské plodiny, které by za normálních okolností plnily funkci potravin a krmiv. Vhodnějšími varianty jsou proto generace následující, které k výrobě využívají plodiny nepotravinářské. V případě druhé generace se jedná o výrobu biopaliv a bioproduktů z odpadní biomasy jako je zemědělský odpad (obilná a kukuřičná sláma, odpad z cukrové třtiny apod.), dřevní odpadní biomasa, energetické plodiny či komunální odpad. Jelikož je tedy využíváno surovin, které jsou energeticky bohaté a z velké části v dnešní době nevyužité, jedná se o jeden z perspektivních zdrojů pro výrobu biopaliv a bioproduktů. Generace třetí využívá k výrobě biopaliv vodní řasy (Kumari a Singh, 2018).

Struktura lignocelulózové biomasy je znázorněna na obr. 1. Je převážně tvořena polymery celulózy, hemicelulózy a ligninu. Celulóza vytváří v rostlinném svazku lineární vláknitou strukturu. Hemicelulóza ovívá celulózová vlákna a tvoří jakýsi „ochranný“ kabát rostlinného svazku. Lignin ve struktuře biomasy působí jako pojivo, díky kterému je zajištěna jeho pružnost a pevnost (Krátký, 2015). Lignocelulózová biomasa je tedy kompozitní, heterogenní, ortotropní materiál s různými mechanickými vlastnostmi, které jsou závislé na jejím druhu a vlhkosti (Eisenlauer a Teipel 2020).



Obr. 1 Struktura lignocelulózové biomasy (Straka, 2006)

1.1 Dostupnost

Pro výrobu biopaliv a bioproduktů je možné použít širokou škálu odpadní biomasy s lignocelulózovým základem. Z tohoto důvodu je i nemalé jeho množství k potenciálnímu využití. Nejhojnější množství celosvětového odpadu v zemědělství pochází z pěstování kukuřice, pšenice, rýže a cukrové třtiny, jehož produkce je odhadována až na 5,4 miliard tun ročně (Krátký, 2015). Vysoké množství odpadů vzniká také při těžbě dřeva a dřevozpracujícím průmyslu, které se například jen v USA a v Kanadě odhaduje na 7,5 miliónu tun (Cho et al., 2020).

Přehled světové produkce odpadů s lignocelulózovým základem spolu s jednotlivými charakteristikami je zobrazen v tab. 1. Zpravidla je část z těchto odpadů využívána jako krmivo pro dobytek, k potravinářským účelům, ve spotřebním průmyslu či jen jako palivo. Po zvážení těchto faktorů činí pro operace v biorafinérii zhruba 15 až 40 % z celkové produkce odpadů (Kurian et al., 2013).

V České republice je největším potenciálním zdrojem biomasy dřevní odpad z dřevozpracujícího průmyslu a lesní těžby. Odhad množství jednotlivých zdrojů z roku 2010 lze vidět v Tab. 2.

Tab. 1 Světová produkce biomasy a její charakteristiky (Krátký, 2015)

typ biomasy	odpady z kukuřice	pšeničná sláma	rýžová sláma	odpady z cukrové třtiny	dřevní odpad
světová produkce v roce 2011 (10^6 t _{TS})	2714	1056	1084	502	574
celková sušina (hm. %)	86	70	25-50	85-90	20-80
hemicelulóza (hm. %)	28	26-32	23-28	19-24	20-38
celulóza (hm. %)	38-40	33-38	28-36	32-48	22-40
lignin (hm. %)	7-21	17-19	12-14	23-32	30-60
uhlík (hm. %)	35,2-44,7	45,5-46,7	36,1-42,2	39,7	18,6-43,8
vodík (hm. %)	5,6	5,1-6,3	4,6-5,4	5,5	2,0-7,9
kyslík (hm. %)	43,3	34,1-41,2	36,6-43,1	46,8	13,3-39,0
dusík (hm. %)	0,6	0,40-0,42	0,35-0,74	0,2	Neznámý údaj
síra (hm. %)	0,01	0,1	0,08	Neznámý údaj	Neznámý údaj

Tab. 2 Odhad odpadní biomasy pro ČR v roce 2010 (Ochodek et al., 2010)

Typ biomasy	Zdroj	Produkce (t/r)
Dřevo, kůra	Odpady z lesní těžby a dřevozpracujícího průmyslu	2 600 000
Sláma olejnin	25 % celkové sklizně slámy při výnosu 4 t/ha	1 600 000
Sláma olejnin	Do 100 % celkové sklizně při výnosu 4 t/ha	1 000 000
Traviny, rákos	Cca z 20 % trvalých porostů při výnosu min. 2 t/ha	800 000

1.2 Požadavky biorafinérií na kvalitu biomasy

Nehledě na cílenou aplikaci v biorafinériích, tedy ve flexibilních provozech zpracovávající odpadní biomasu na biomateriály, biochemikálie a biopaliva při souběžné výrobě energie či tepla, je zmenšení velikosti nevyhnutelným prvním krokem při zpracování (Krátký, 2015). Přehled požadavků na velikost částic pro jednotlivé způsoby zpracování odpadu s lignocelulózovým základem je znázorněn v Tab. 3.

Tab. 3 Požadavky na velikost částic dle způsobu zpracování biomasy (Oyediji et al., 2020)

aplikace	peletizace	zplyňování	pyrolýza	hydrolýza a fermentace	briketování
velikost částic (mm)	0,6-0,9	0,2-1,5	0,3-2	0,03-10	1,6-5,6

Velikost částic vstupního materiálu se promítá do výtěžku produktů různým způsobem. Například v případě pyrolýzy dochází při menších velikostech suroviny k většímu výtěžku pyrolýzního plynu a současně i k menšímu vzniku nežádoucích vedlejších produktů, a to dehtu a koksu. Toto chování je zřejmě zapříčiněno větším povrchem jednotlivých částic, které jsou následně díky lepšímu přenosu tepla a hmoty rychleji termicky rozloženy na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek (Luo a Xiao, 2010).

Kromě vhodné velikosti vstupní suroviny je pro termochemické procesy zpracování důležitá i vlhkost vstupní suroviny. Požadovány jsou částice nejlépe suché, případně do maximální vlhkosti 40 hm. %, jinak je konverze suroviny na výsledné produkty neúčinná, pomalá a hrozí klenbování materiálu v zásobnících materiálu (Krátký, 2015).

Totéž platí i pro biochemický rozklad, kde v případě neupravené rostlinné biomasy je její konverze v biopalivo velmi pomalá a celkové množství organických látek v něm často nepřesahuje 10–20 % (Krátký, 2015).

2 Analýza částic biomasy

Při cestě za co nejkorektnějším vyhodnocením či nejpřesnější predikcí energetické náročnosti rozmělnění libovolného polydisperzního materiálu, tedy materiálu obsahující částice různých velikostí, stojí nutnost správně analyzovat tvar, velikost a distribuci jeho částic. Určení těchto aspektů však není v případě biomasy jednoduchou záležitostí, a to především kvůli různorodému tvaru částic, který se mnohdy se snižující velikostí částic mění.

Velikost a tvar částic rozmělněvaného materiálu patří k významným fyzikálním parametrům mající vliv na výši potřebné energie k její dezintegraci. V případě tvaru je jeho správná definice potřebná především ke zjištění skutečné distribuce velikosti částic. Při použití odlišných metod analýzy lze totiž naměřit různé výsledky pro tytéž částice. Obdobně lze dosáhnout odlišných výsledků za přičiněním pouze odlišného předpokladu tvaru částic (VŠCHT, 2012).

2.1 Možnosti měření velikosti částic

Způsobů, kterými lze změřit velikost částic rozmělněné biomasy, není mnoho. V drtivé většině studií je k tomuto úkonu využita síťová metoda, což je způsobeno rychlostí této metody a dobrou dostupností potřebných komponentů, jejichž pořizovací cena není vysoká. Krom síťové metody lze však ještě použít dynamické analýzy obrazu. Jednotlivé metody měření jsou představeny v následujících kapitolách.

2.1.1 Dynamická analýza obrazu

Dynamická analýza obrazu představuje zdaleka nejdražší metodu měření částic, která je zde uvedena. Zároveň se však jedná o nejrychlejší, a přitom nejpřesnější způsob změření částic, kdy je analyzována jak jejich velikost, tak i jejich tvar. Výhoda dynamické analýzy obrazu je i v možnosti určení různých středních průměrů a vypočtení široké škály tvarových faktorů (Microtrac MRB, 2020).

Princip této metody tkví v projektování stínů jednotlivých částic. Ty jsou do oblasti měření dopraveny pomocí vibračního podavače, kde částice padají mezi planárním zdrojem světla a dvěma CCD kamerami. Projektované stíny částic jsou zachyceny rychlostí více než 60 snímků za sekundu. Díky tomuto způsobu záznamu není problém měřit řadu částic s velikostí od 20 μm do 30 mm (Microtrac MRB, 2020). Příklad takového analyzátoru lze vidět na Obr. 2.

Tuto metodu měření ve své práci využili například autoři Eisenlauer a Teipel (2020).



Obr. 2 Dynamický analyzátor obrazu CAMSIZER P4 od firmy Microtrac MRB

2.1.2 Sítová analýza

Způsob stanovení velikosti částic sítovým rozborem patří pro svoji jednoduchost, rychlost a nízkou cenu potřebného zařízení k nejpoužívanější měřicí metodě. Použita byla například v pracích od autorů Naimi et al. (2013), Temmerman et al. (2013) či Williams et al. (2017).

Sestava zařízení se skládá z několika, většinou kruhových, sad sít, které jsou umístěny nad sebou dle vzrůstajícího průměru propadových otvorů. Tyto otvory mohou být různého uspořádání a tvaru, přičemž mezi nejběžnější tvary patří kruhové a čtvercové. Takto na sobě umístěná síta jsou pak nejčastěji připevněna k vibračnímu či kruhovému třídíči (UJEP, 2015b).

Samotné třídění začíná umístěním tříděného materiálu do vrchního síta s největšími propadovými otvory. Po zapnutí třídíče pak dochází k prosévání částic tříděného materiálu do spodních pater, dokud nedojde k ustálení částic pro ně přijatelném sítu, nebo dokud nevyprší čas k sítování určený vybranou normou. Poté se zváží hmotnost nebo spočítá počet částic veškerého materiálu v jednotlivých sítích. Závěrem analýzy je vyhodnocení distribuce velikostí materiálu (UJEP, 2015b; Hemerka, 1994). Příklad zařízení pro sítovou analýzu je zobrazen na Obr. 3.

Tato metoda je jednoznačná, pokud sítované částice jsou stejného tvaru jako propadové otvory sít. V případě odlišných a dlouhých tvarů částic může dojít ke zkreslení

výsledku analýzy. Z tohoto důvodu je důležité správně definovat a popsat tvar částic (VŠCHT, 2012). Například normou ANSI/ASAE S424.1 MAR1992 (R2017).



Obr. 3 Zařízení pro síťovou analýzu (Indiamart, 2020)

2.2 Tvar částic a tvarové faktory

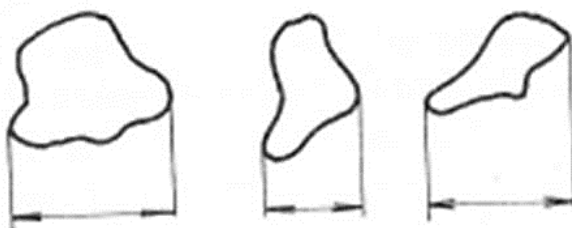
Podoba částic závisí především na způsobu jejich vzniku. Ideálním tvarem je koule a takové částice vznikají kondenzací a tuhnutí par látek. Při mechanických operacích jako drcení a mletí však částice nabývají tvaru mnohem složitějšího (Hemerka, 1994).

Obecně je tvar částice definován jako obrazec vytvořený všemi body, kde tvoří její vnější povrch. Pro stejnoměrné částice typu koule či kvádr stačí k popsání tvaru pouze jeden rozměr, u částic složitějších je už ale potřeba nejméně dvou (VŠCHT, 2012).

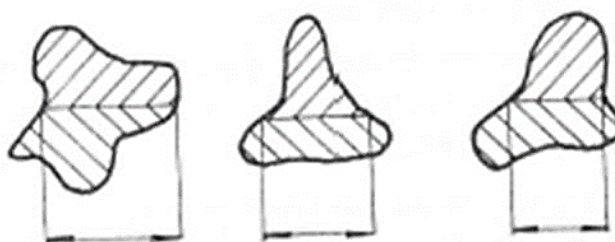
Tvar částic biomasy lze zařadit mezi anizometrické částice, které mohou být pro zjednodušení uvažovány jako sféroidy zploštělého (destičky) či protáhlého (tyčinky) tvaru. V praxi jsou však nejčastěji modelovány jako hranoly se zanedbatelnou tloušťkou, které jsou tím pádem považovány za rotačně symetrické částice, které lze řešit pouze ve 2D rozměru (Pabst a Gregorová, 2007).

Jelikož lze díky dynamickým analyzátorům obrazu změřit rozměry částic, je možné následně vyhodnotit různé tvarové faktory, které vypovídají mnohé o samotném tvaru částic. Pro vyhodnocení velikosti částice se nejčastěji užívá Feretova či Martinova průměru. Feretův průměr značí vzdálenost dvou rovnoběžných tečen, znázorněno na obr. 4. Zatímco Martinův

průměr měří délku tětivy, která průmět částice na dvě stejně velké poloviny, viz obr. 5. Oba používané průměry mají význam pouze při proměření většího počtu náhodně orientovaných částic, při kterém je vyhodnocení provedeno v jednom zvoleném směru (Hemerka, 1994).



Obr. 4 Feretův průměr



Obr. 5 Martinův průměr

Nejběžnější užívané tvarové faktory jsou následující (Pabst a Gregorová, 2007):

Heywoodův elongační poměr vyjadřuje poměr minimálního ku maximálnímu Feretovu průměru (vzdálenost dvou rovnoběžných tečen), viz rovnice (2.1). Tento faktor znázorňuje míru protáhlosti částice, kdy maximální hodnota je 1 (Pabst a Gregorová, 2007).

$$\text{Heywoodův elongační poměr} = \frac{D_{F_min}}{D_{F_max}} \quad (2.1)$$

Cirkularita neboli kruhovitost vyjadřuje poměr ekvivalentní plochy částice krát 4π ku druhé mocnině jejího obvodu, viz rovnice (2.2). Maximální hodnota nabývá 1, a to v případě kulaté částice.

$$\text{Cirkularita} = \frac{4\pi \cdot A_p}{O^2} \quad (2.2)$$

Sféricita je nejčastěji používaný součinitel tvaru, který je analogií tvarového faktoru cirkularity, který je přenesen do trojrozměrného prostoru. Je definována jako poměr povrchu koule stejného objemu jako má měřená částice ku skutečnému povrchu částice, tedy rovnice (2.3). Pro částice nekulového tvaru je, jako v předešlých případech, hodnota sféricity vždy menší jak jedna (Hemerka, 1994).

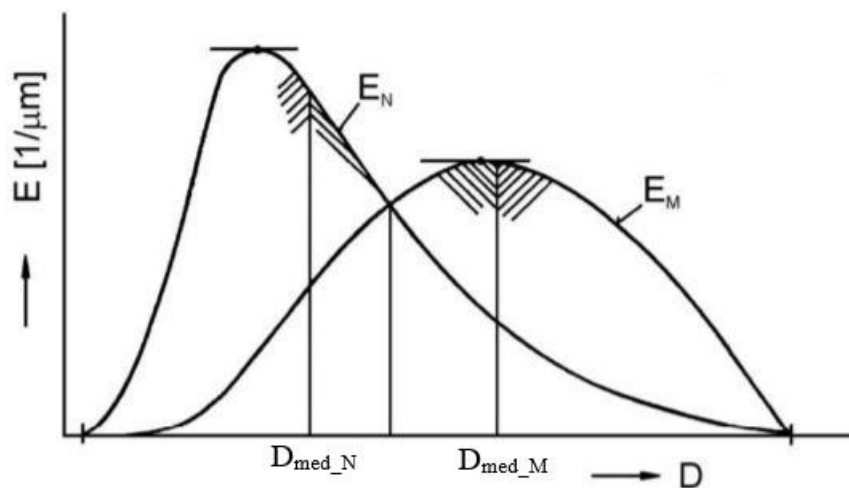
$$Sféricita = \frac{A_k}{A_{\zeta}} = \left(\frac{D_k}{D_{\zeta}}\right)^2 \quad (2.3)$$

2.3 Rozdělení velikosti částic

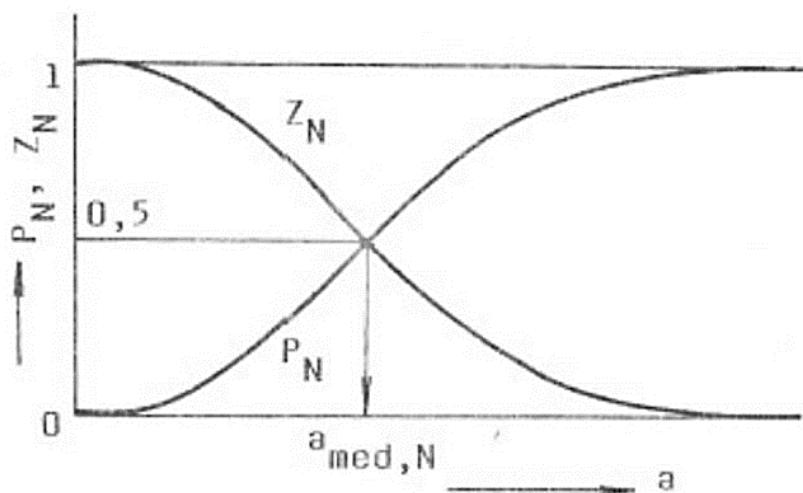
Částice rozmělněné biomasy mají zpravidla různé velikosti a tvoří tak polydisperzní soubor částic. Jeho základní charakteristikou je pak informace o rozdělení velikostí částic, rovněž nazývanou zrnitostí či granulo-metrickém složením. Zrnitost částic lze sledovat z různých hledisek, a proto je nutné definovat, zda se jedná o rozdělení dle počtu, průmětu nebo hmotnosti částic (Hemerka, 1994). Pro biomasu je nejjednodušší a nejpoužívanější distribuce dle hmotnosti.

Spojité rozdělení velikostí částic lze vyjádřit integrální (kumulativní křivka zrnitosti) či diferenciální (křivka relativní četnosti) funkcí. Diferenciální funkce udává četnost výskytu daného průměru v souboru všech částic, zatímco integrální funkce vyjadřuje podíl částic o průměru menším (křivka propadu) či větším (křivka zbytku) než je daný průměr částice D . Příklad distribuce znázorněné pomocí křivky relativní četnosti lze vidět na obr. 6, kde křivka E_N značí rozdělení velikosti dle počtu a E_M zrnitost podle hmotnosti částic. Obr. 7 znázorňuje příklad kumulativní křivky zrnitosti, kde Z_N značí křivku zbytku a P_N křivku propadu.

V příkladech je uveden i medián souboru označovaný též jako průměr částic D_{50} , který dělí plochu pod distribuční křivkou na poloviny. V případě integrální křivky ho lze nalézt v místě průniku křivky propadu a zbytku (Hemerka, 1994).



Obr. 5 Příklad distribuce znázorněné křivkou relativní četnosti (Hemerka, 1994)



Obr. 4 Příklad distribuce znázorněné kumulativní křivkou zrnitosti (Hemerka, 1994)

Důležitým údajem pro zrnitost souboru částic je určení střední velikosti, která může být vypočtena několika způsoby. V případě biomasy vychází většinou ze síťového rozboru dle hmotnosti částic.

Nejjednodušší způsob výpočtu lze nalézt u aritmetické střední velikosti, viz rovnice (2.4), kde \bar{a} značí střední velikost částice, M_i hmotnost částic na sítu i a x_i označuje průměr propadových otvorů síta i . Nevýhoda tohoto výpočtu je v předpokladu, že měřené frakce částic jsou ve směsi rozloženy symetricky, což pro biomasu nemusí platit a mohou tím pádem vycházet zkreslené výsledky (Naimi, 2016).

$$\bar{a} = \frac{\sum M_i \cdot x_i}{\sum M_i} \quad (2.4)$$

Velice častou volbou pro výpočet střední velikosti částic biomasy je metoda dle normy ANSI/ASAE S424.1 MAR1992 (R2017). Vzorec je vyjádřen rovnicí ((2.52.5), kde D_{gm} značí geometrickou střední hodnotu, M_i hmotnost částic na sítu i a \bar{x}_i označuje geometrickou střední hodnotu síta i , kterou vyjadřuje rovnice (2.6) (Naimi, 2016).

$$D_{gm} = \log^{-1} \frac{\sum M_i \cdot \log \bar{x}_i}{\sum M_i} \quad (2.5)$$

$$\bar{x}_i = (x_i \cdot x_{i-1})^2 \quad (2.6)$$

2.4 Analytické vyjádření křivek zrnitosti

Analytické funkce popisující rozdělení velikostí částic lze v zásadě rozdělit na dva typy, a to na dvouparametrové a tříparametrové funkce. Jelikož se tyto funkce pouze více či méně přibližují ke skutečné zrnitosti částic, nazývají se také jako aproximační funkce. Tříparametrové funkce jsou složitější a lze se jimi věrohodněji přiblížit k empirickým hodnotám. Pro většinu případů zrnitosti částic však při volbě vhodné aproximační funkce postačí jednodušší dvouparametrové funkce. Ty lze rozdělit na funkce s normálním rozdělením velikostí částic, logaritmicke-normální rozdělení velikostí částic a rozdělením velikostí částic dle RRSB. (Hemerka, 1994).

Ze studií autorů jako Srikanth Tangirala et al. (2004) či Williamse et al. (2017) zaměřující se na dezintegraci biomasy vyplývá, že RRSB metoda vystihuje, vzhledem k ostatním dvouparametrovým funkcím, rozdělení velikostí částic biomasy nejlépe a je vhodné její použití.

2.4.1 Rozdělení velikosti částic dle RRSB metody

Distribuce velikosti částic dle metody Rosina, Rammlera, Sperlinga a Benneta byla vytvořena pro vyjádření zrnitosti částic vzniklých mechanickými operacemi, tedy drcením a mletím, a jedná se o nejčastěji používanou metodou k rozdělení velikosti částic biomasy. Obvykle je tato metoda používána pro rozdělení částic na základě jejich hmotnosti, tudíž se před touto metodikou obvykle nachází síťový rozbor (Williams et al., 2017).

Vztah RRSB lze vyjádřit vzorcem 2.7(2.7).

$$1 - F = \exp \left[- \left(\frac{D}{D_p} \right)^n \right] \quad (2.7)$$

Ve vztahu 2.7 F vyjadřuje kumulativní křivku propadu, tedy procentuální podíl částic, které jsou menší než daná charakteristická velikost částice D (mm). Dále vzorec obsahuje dva parametry, a to parametr D_p představující charakteristickou velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 63,2 % hmotnosti a index polydisperzity n . Tento vztah lze následně linearizovat do vztahu (2.8).

$$\ln(-\ln(1 - F)) = n \ln D - n \ln D_p \quad (2.8)$$

A z této rovnice vyplývá vztah (2.9).

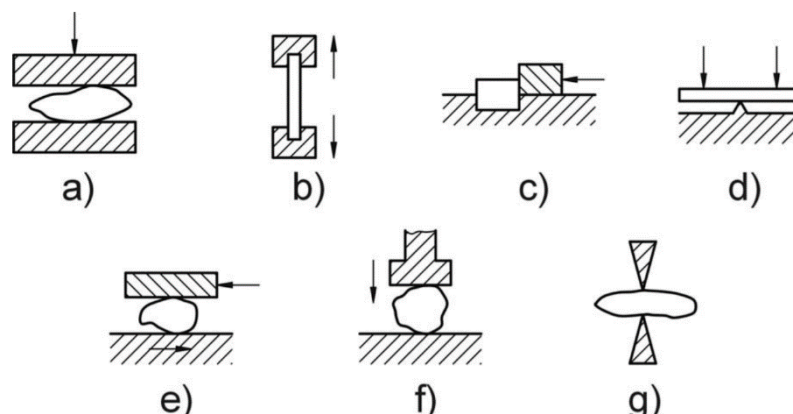
$$D_p \Rightarrow 1 - F = e^{-1} = 0,368 \rightarrow F = 0,632 \quad (2.9)$$

Hodnota parametru n se nejčastěji pohybuje v rozmezí od jedné do dvou, přičemž s rostoucí velikostí propadového síta dezintegrační jednotky jeho hodnota klesá (Srikanth Tangirala et al., 2004; Williamse et al., 2017).

3 Mechanická dezintegrace biomasy

Nehledě na cílenou aplikaci je mechanická dezintegrace u lignocelulóзовé biomasy neochvějnou a nevyhnutelnou součástí procesu při jejím zpracování. Během ní dochází jednak k samotnému zmenšení velikosti částic, tak i ke snížení stupně krystalinity celulózy, tedy ke zvětšení specifického povrchu biomasy a k narušení mikrobiálně netečné krystalické formy celulózy. Tímto procesem lze výrazně intenzifikovat přenos hybnosti, tepla a hmoty při termochemickém a biochemickém zpracování odpadní biomasy, čímž dojde ke zvýšení účinnosti transformace odpadu na žádaný bioprodukt a zvýšení výtěžnosti bioproduktu. Zmenšením velikosti suroviny se docílí také k jejímu rychlejšímu zpracování ve výrobě, ke zvýšení sypné hustoty či k minimalizaci tvorby odpadů. Lze tedy konstatovat, že mechanická dezintegrace suroviny má výrazný vliv na její energeticky-chemické využití a ekonomiku provozu celé technologie. Sníží se investiční náklady na pořízení reaktorů, jímek a skladovacích nádrží a zároveň i provozní náklady díky lepší regeneraci energie či náklady na likvidaci produkovaných odpadů. Na druhou stranu se v technologii díky dezintegračním zařízením objeví nové náklady spojené s jejich pořízením, údržbou a samozřejmě samotným provozem. Právě vysoká energetická náročnost mechanické dezintegrace je její hlavní nevýhodou. Například Schell a Hardwood (1994) uvádějí, že v případě výroby biopaliva dosahuje podíl energetické náročnosti samotné mechanické dezintegrace až 33 % z celkové spotřeby elektrické energie (Krátký, 2015).

Mechanická dezintegrace zahrnuje celou řadu principů rozpojování částic, a to drcení, trhání, smýkání, lámání, otírání (stříhu), rozbíjení a rozlupování, viz obr. 8. Dominance konkrétních principů při dezintegraci suroviny záleží na použitém dezintegračním zařízení a rozpojovaném materiálu. Drtiče a mlýny určené pro rostlinnou biomasu nejvíce uplatňují mechanismy smýkání, drcení a otěru (Krátký, 2015; Rieger et al., 2005).



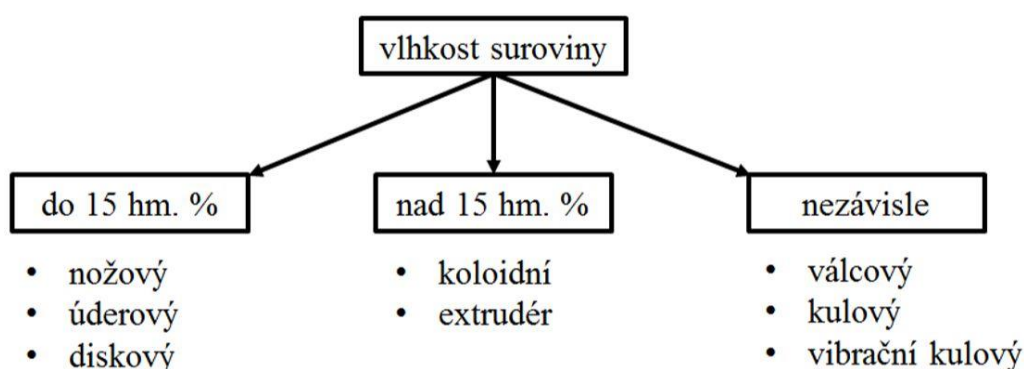
Obr. 6 Principy rozpojování pevných částic (Rieger et al., 2015)

a – drcení, b – trhání, c – smýkání, d – lámání, e – otírání, f – rozbíjení, g – rozlupování

3.1 Zařízení pro rozpojování biomasy

V současné době existuje celá řada typů dezintegračních jednotek. Ty lze rozdělit podle různých aspektů, přičemž zpravidla se rozdělují na dvě základní skupiny, a to na drtiče a mlýny. Přiřazení k první či druhé skupině závisí zejména na velikosti částic suroviny na výstupu. Pro drtiče je charakteristická výstupní velikost částic cca 10-30 mm, pro mlýny se tato hodnota pohybuje v rozmezí zhruba 0,2-2,0 mm. V praxi je však hranice mezi drtičem a mlýnem menší. Záleží především na použité konfiguraci dezintegračního zařízení, proto i některé typy mlýnu lze použít k drcení a naopak (Krátký, 2015; Rieger et al., 2005).

Výběr vhodného drtiče či mlýnu pak závisí především na vlhkosti vstupní suroviny. Pro sušší materiály s vlhkostí do 15 hm. % se k rozmělnění používají nožové, úderové či diskové drtiče a mlýny. Pro rozmělnění vlhkých surovin s vlhkostí nad 15 hm. % se volí koloidní mlýny či konstrukčně modifikované extrudéry. K univerzálnějším dezintegračním jednotkám patří kulové a válcové mlýny (Krátký, 2015). Přehled nejčastěji používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkosti vstupního materiálu lze vidět na obr. 9.



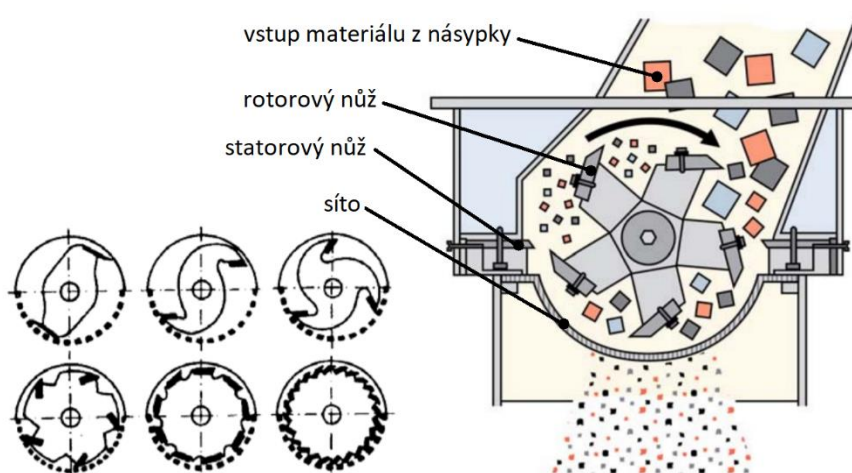
Obr. 7 Přehled používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkosti suroviny (Krátký, 2015)

Vzhledem k široké škále surovin s lignocelulózovým základem je v následujících kapitolách zpracován přehled dezintegračních jednotek vhodných k rozmělnění bukové štěpky s vlhkostí do 15 hm. % a vstupní velikosti cca 20 mm, neboť takovými charakteristikami disponuje i vzorek zvolený pro experimentální část této práce.

3.1.1 Nožové mlýny

Nožové mlýny se díky své efektivitě a rychlosti rozpojování řadí mezi nejpoužívanější dezintegrační jednotky pro sušší materiál s vlhkostí do 15 hm. % (Krátký a Jirout, 2011).

Již z názvu je patrné, že nožové mlýny k dezintegraci suroviny využívají nože, které jsou umístěné na rotoru i statoru. Rotor může být různého tvaru, přičemž nejběžnější je jeho tříbřitá verze. Princip rozpojování je v nožovém mlýnu založen na stříhu materiálu, vzniklým statickým účinkem tlakových sil na částici. Velikost výstupních částic suroviny je dána velikostí děr propadového síta, umístěného v dolní části mlecí komory. Krom suchých křehkých částic je nožový mlýn vhodný i k rozemletí vláknitých materiálů. Schéma nožového mlýnu spolu s typy rotorů je vyobrazeno na obr. 10. (Krátký, 2015; KSP.TUL, 2020)

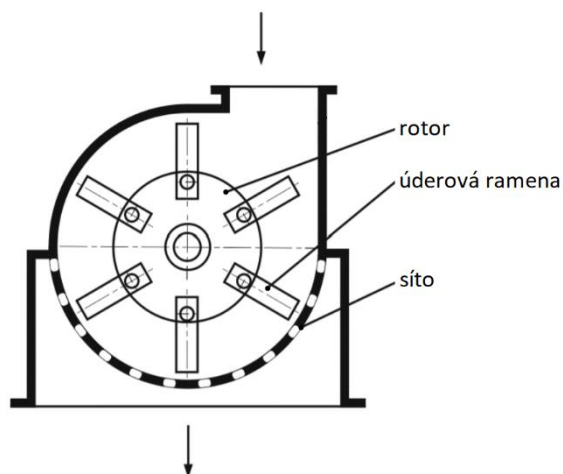


Obr. 8 Vpravo: nožový mlýn, vlevo: typy rotorů. (Hrnčířová a Lisý, 2015)

3.1.2 Úderové mlýny

Mezi další velmi rozšířený typ dezintegračních jednotek pro sušší biomasu s vlhkostí do 15 hm. % patří úderové mlýny, které jsou podle úderových ramen rovněž nazývány jako mlýny nárazové či kladivové (Macko, 2012).

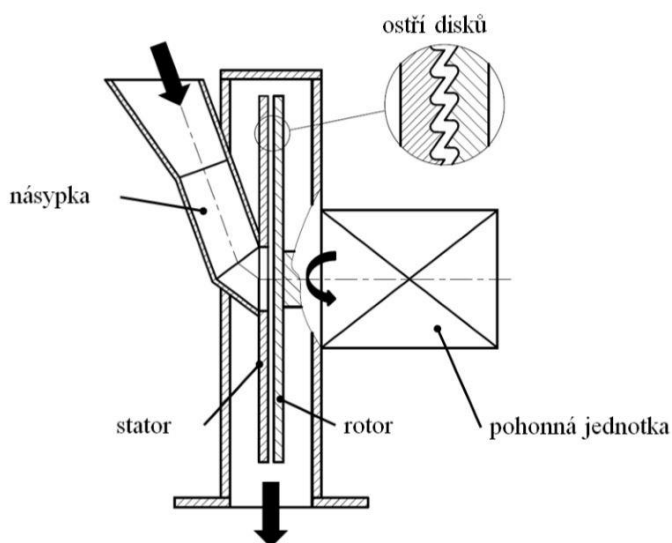
Základní konstrukce úderového mlýnu je obdobná jako u mlýnů nožových, liší se ale provedením rotoru, který má po svém obvodu místo nožů umístěná úderová ramena. Princip mletí je u těchto zařízení založen opět na stříhu materiálu, který je tu však vyvolán dynamickým účinkem tlakových sil na částici při vzájemném kontaktu ramen a drceného materiálu, nárazy materiálu do pláště drtiče či vzájemnými údery částic samotných. Výstupní velikost částic závisí především opět na propadovém sítu. Schéma úderového drtiče je zobrazen na obr. 11 (Krátký, 2015).



Obr. 9 Schéma úderového mlýnu (Macko, 2012)

3.1.3 Diskové mlýny

Posledním typem mlýnu, který je vhodný k rozmělnění sušší biomasy do 15 hm. % je diskový mlýn, u kterého princip rozpojování materiálu spočívá na jeho smýkání. Jeho typická konstrukční uspořádání se skládají z jednoho či dvou rotujících kotoučů, které mají různě profilované ostří. Samotné mletí začíná ve středu disku, kam je přiváděn vstupní materiál. Ten je poté usmýkáván ostřím nože a vlivem působících odstředivých sil je plynule odváděn na kraj kotoučů z pracovního prostoru. Diskové mlýny se zpravidla využívají pro dezintegraci tvrdých materiálů a jsou tedy vhodné pro bukovou štěpku s nízkou vlhkostí. Jejich velkou nevýhodou je vysoká energetická náročnost, která je způsobena neefektivním využitím energie. Většina dodané energie se totiž v důsledku tření přemění v odpadní teplo, která následně způsobí přehřátí a znehodnocení biomasy. Schéma diskového mlýnu je zobrazeno na obr. 12 (Krátký, 2015; Krátký a Jirout, 2011).



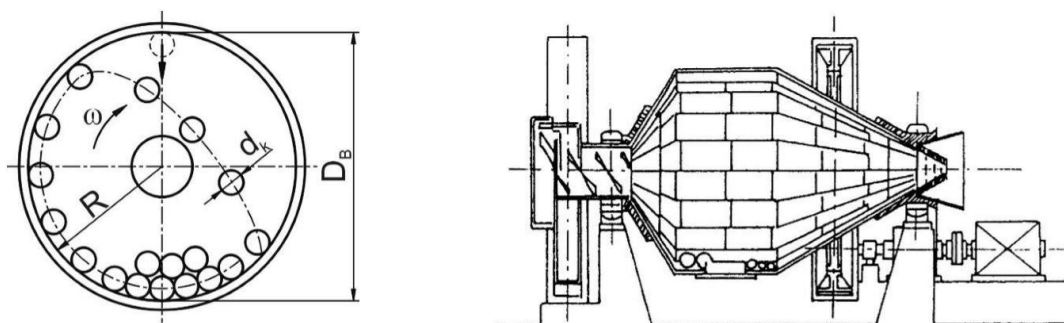
Obr. 10 Diskový mlýn (Alston a Bird, 2007; Krátký, 2015)

3.1.4 Kulové mlýny

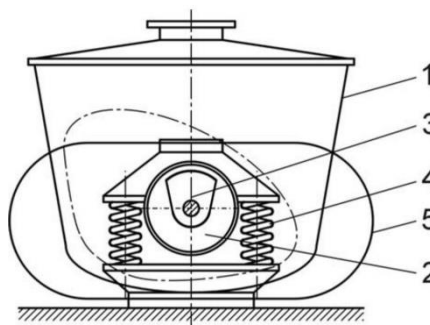
Jedná se o dezintegrační zařízení, které patří do skupiny mlýnu s volně uloženými tělesy. Rozmělnění probíhá v uzavřené válcové části, ve které se nachází spolu s materiálem mlecí tělesa, což jsou většinou koule z nerezové oceli či keramiky. Samotné rozpojování probíhá díky pomalému otáčení válce unášející mlecí tělesa, která následně svým pádem drtí a rozpojují rozmělnňovaný materiál (Rieger et al., 2005). Schéma kulového mlýnu je k vidění na obr. 13.

Kulové mlýny jsou zařazeny mezi dezintegrační zařízení, ve kterém je možné rozpojovat suchý i vlhký materiál. Na základě charakteristik rostlinného odpadu však závisí jeho účinnost rozmělnění, která nabývá nejmenší hodnoty u tvrdých materiálů. Lze tedy konstatovat, že z energetického hlediska jsou pro rozpojení suché bukové štěpky nožové a úderové mlýny lepší volbou. Kulový mlýn má však mnoho výhod, mezi které se řadí, krom možnosti dezintegrace vlhkých materiálů, vysoký kapacitní výkon či jednoduchou obsluhu a provoz (Krátký, 2015; UJEP, 2015a).

Mnohem energeticky výhodnější variantou kulového mlýnu je vibrační kulový mlýn, viz obr. 14. Oproti obyčejným kulovým mlýnům u nich dochází k mnohem intenzivnějšímu promíchávání suroviny, čímž je dosaženo lepší účinnosti rozmělnění částic (Krátký, 2015).



Obr. 11 Vpravo: Hardingův kulový mlýn, vlevo: princip funkce kulového mlýnu (Rieger et al., 2005)



Obr. 12 Vibrační kulový mlýn (Rieger et al., 2005)

1 – žlab, 2 – hřídel, 3 – excentrická závaží, 4 – válcové pružiny, 5 – plochý pružinový rám

3.2 Energetická náročnost rozpojení

Ač je mechanická dezintegrace v mnoha ohledech v technologiích zpracování odpadů potřebná, jedná se o energeticky velmi náročnou operaci. Se zmenšující velikostí částic také narůstá množství potřebné energie k jejich dosažení, což je vzhledem ať už z hlediska ekonomického či životního prostředí velmi nežádoucí. Už jen z těchto důvodů je vhodné vybrat co energeticky nejefektivnější dezintegrační zařízení (Krátký, 2015).

Hodnota energetické náročnosti je ovlivněna hned několika faktory. Dominantní vliv nese bezpochyby použitá dezintegrační jednotka a její konfigurace. Dále významně záleží na poměru vstupní a výstupní velikosti částic a v neposlední řadě na charakteristice dané rozpojované suroviny (Krátký, 2015).

V tab. 4 jsou uvedeny příklady energetické náročnosti rozpojení dezintegračních jednotek uvedené v této rešerši. Z uvedené tabulky je dobře patrné, že nejefektivnějším zařízením k dezintegraci vstupní suroviny s obsahem vlhkosti do 15 hm. % jsou nožové mlýny. Naopak energeticky nejnáročnější jsou mlýny kulové.

Tab. 4 Energetická náročnost mletí vybraných druhů rostlinné biomasy (Krátký, 2015)

surovina	počáteční / výstupní velikost částic (mm)	vlhkost	typ mlýnu	energetická náročnost (kWh t ⁻¹)	autoři
tvrdé dřevo	22,40 / 1,60	4-7	úderový	130,0	(Cadoche a Lopéz, 1989)
	22,40 / 6,30			95,0	
	22,40 / 1,60		nožový	130,0	
	22,40 / 6,30			25,0	
	19,05 / 1,60	6	úderový	130,0	(Himmel et al., 1985)
	19,05 / 6,40			100,0	
	19,05 / 1,60		nožový	130,0	
	19,05 / 6,40			27,0	
	19,05 / 1,60	6	diskový	200-400	(Himmel et al., 1985)
		22,00 / 0,15	11	vibrační kulový	800
rýžová sláma	< 2 / 0,250	4-6	Kulový	2500 (cyklus 5 min)	(Hideno et al., 2009)
pšeničná sláma	22,40 / 1,60	4-7	úderový	42,0	(Cadoche a Lopéz, 1989)
	22,40 / 3,20			21,0	
	22,40 / 1,60		nožový	7,5	
	22,40 / 6,30			5,5	

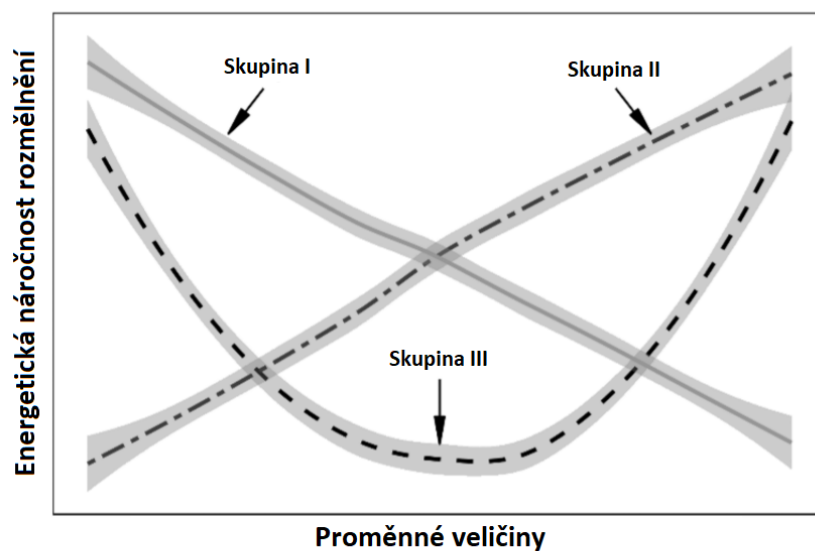
4 Faktory ovlivňující rozpojovací energii

Ač je mechanická dezintegrace u lignocelulóзовé biomasy zcela nevyhnutelnou součástí při jejím zpracování, jedná se jednoznačně o energeticky nejnáročnější část procesu. Tento fakt je způsoben nízkou účinností dezintegrace, kdy se až 99 % vstupní energie přemění na teplo, hluk, vibrace či elektrostatické náboje. Z tohoto důvodu je množství práce přiváděné do drtičů a mlýnů mnohem větší, než množství práce potřebné k samotnému vytváření nového povrchu zrna (Dinter, 1984; Oyedeji et al., 2020).

Množství energie potřebné k rozmělnění určují v podstatě tyto tři faktory:

1. Vlastnosti zdrobňovaného materiálu.
2. Způsob, kterým je daný materiál zdrobňován.
3. Stupeň rozpojení, tedy poměr vstupní a výstupní velikostí zrn (Dinter, 1984).

Tyto základní tři faktory lze pak rozdělit na konkrétnější proměnné, které jsou více rozebrány v následujících kapitolách. Obecně platí, že účinnost dezintegrace je závislá na vlastnostech lignocelulóзовé biomasy a procesních parametrech. Pro lepší znázornění této závislosti jednotlivých proměnných na energetické náročnosti je určen obr. 15.



Skupina I - velikost děr propadového síta, torefakce (teplota, čas), počáteční velikost částic, rychlost plnění

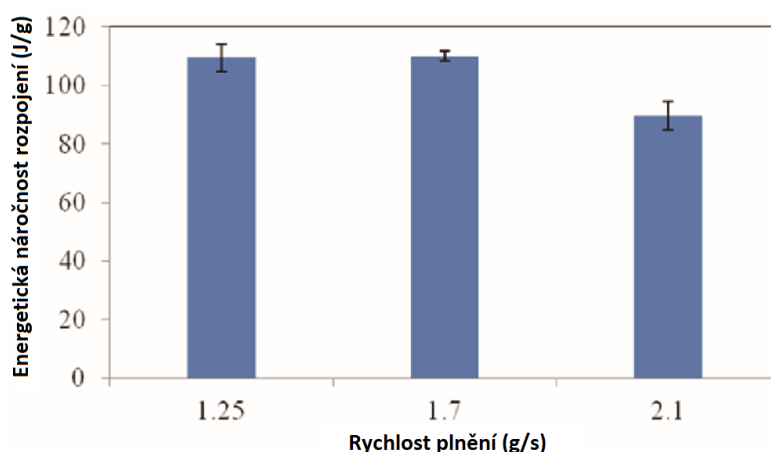
Skupina II - obsah vlhkosti, stupeň rozpojení, pružnost a pevnost suroviny

Skupina III - rychlost rotoru

Obr. 13 Přehled závislosti energetické náročnosti rozmělnění na proměnných veličinách (Oyedeji et al., 2020)

4.1 Rychlost plnění a počet otáček

Domněnka, že plnění a počet otáček je důležitý faktor ovlivňující energetickou náročnost rozmělnění, byla potvrzena mnoha studiemi. Balk (1964) ve svých studiích mletí v kladivovém mlýnu zjistil, že celková energie pro dezintegraci byla nepřímo úměrná rychlosti dávkování bez ohledu na velikost děr v sítu. Ve studii od Bitry et al. (2010) bylo zjištěno, že při zvyšující rychlosti plnění se celková energie pro rozmělnění neustále snižovala. K tomuto výsledku bylo docíleno na nožovém mlýnu při plnění od 60 do 660 kilogramů za hodinu. Ke stejnému závěru došel ve své práci i Naimi et al. (2013). Ten při mletí vrby vypočítával pokles energetické náročnosti při zvyšování rychlosti plnění z 1,25 na 2,1 g/s, během kterých energetická náročnost klesla ze 110 na 89 J/g. Při rychlosti 2,1 g/s však už docházelo k ucpávání. Pro zaručení kontinuálního mletí a předejití ucpání byla proto zvolena jako optimální rychlost 1,7 g/s. Grafické znázornění tohoto měření je zobrazeno na obr. 16.



Obr. 14 Závislost energetické náročnosti rozpojení na rychlosti plnění (Naimi, 2013)

Podobně jako rychlost plnění, tak i rychlost rotoru ovlivňuje účinnost a spotřebu energie. Studie na tuto problematiku ukazují, že provozní rychlost otáček může dosahovat hodnot od několika stovek otáček za minutu až několika tisíc, přičemž rychlost rotoru ovlivňuje energetickou náročnost dvěma způsoby. V prvním případě celková spotřeba energie neúměrně roste se zvyšující se rychlostí rotoru. Například v práci Bitry et al (2010) se spotřeba celkové energie při běhu na prázdko nožového mlýnu zvýšila z původních 1,55 kW při 200 ot min⁻¹ na 7,78 kW při 600 ot min⁻¹. Druhým způsobem je skutečnost, že energetická náročnost rozmělnění klesá do té doby, dokud není dosaženo jejího minima. Po něm energetická náročnost začne růst, viz obr. 15. Toto je způsobeno tím, že při nízkých otáčkách se více projeví pružnost mletého materiálu, čímž poklesne účinnost rozmělnění, zatímco

při vyšších otáčkách způsobuje nárůst energetické náročnosti samotná rychlost rotoru a zvýšení četnosti průchodu částic v mlecí komoře mezi noži statoru a rotoru (Oyedeggi et al., 2020).

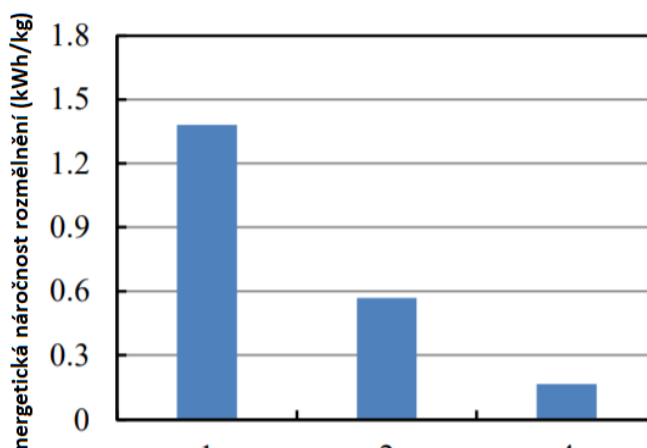
Z těchto důvodů je pro co nejpřesnější změření rozmělnovací energie materiálu a obecně pro efektivnější dezintegraci zapotřebí zvolit optimální rychlost plnění a optimální počet otáček za minutu.

4.2 Stupeň rozpojení

Stupeň rozpojení je bezrozměrná veličina vyjadřující míru schopnosti dezintegrační jednotky rozpojit materiál. Je definována jako poměr vstupní a výstupní velikosti rozmělnovaného materiálu, tedy vztahem (4.1), ve kterém D značí vstupní velikost částic a d velikost částic výstupních (Rieger et al, 2005).

$$s = \frac{D}{d} \quad (4.1)$$

Na energetickou náročnost rozmělnění lignocelulózové biomasy má stupeň rozpojení značný vliv, neboť s jeho nárůstem exponenciálně roste. Například Mani et al. (2004) změřil energetickou náročnost mletí pšeničné slámy v kladivovém mlýnu 11,36 kWh/t pro síto s rozměry děr 3,2 mm, ale pro síto s rozměry ok 0,8 mm energetická náročnost vzrostla na 51,55 kWh/t. Zhang (2014) měřil energetickou náročnost pro mletí štěpky topolu na nožovém mlýnu a z výsledku vyplývá, že při změně průměru děr propadového síta z 1 na 4 mm poklesla energetická náročnost o 1,22 kWh/kg, což zobrazuje obr. 17. Zvyšující se požadavky na dodanou energii jsou způsobeny hned několika příčinami, které souvisí se zvyšujícím stupněm rozpojení.



Obr. 15 Změna energetické náročnosti na výstupní velikosti (Zhang, 2014)

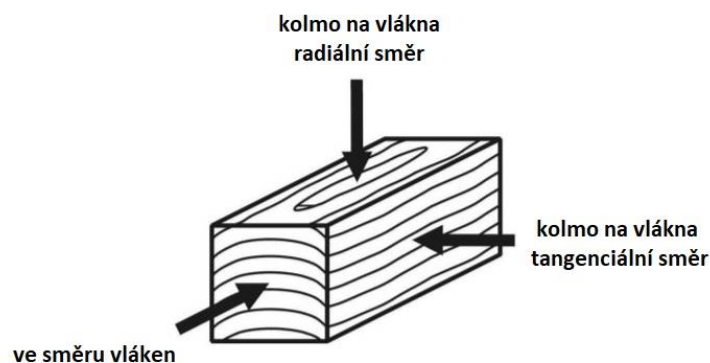
První příčinou je zvýšená odolnost vůči rozrušení. Jednotlivá zrna se při rozměňování rozpadají vždy v místech s menší pevností. Počet takových míst se ale s pokračujícím zdobňováním postupně snižuje. Ačkoliv se na rozměňovaných částicích mohou pod vlivem působících sil tvořit nové trhlinky a nová slabá místa, dochází zpravidla ke snížení celkového počtu takovýchto míst a částice se stávají vůči rozrušení odolnějšími (Oyedeki et al., 2020, Dinter, 1984).

Zvýšením stupně rozpojení, a tedy jemnější dezintegrace vstupních částic, také dochází k nárustu celkového počtu částic v mlecím prostoru, což způsobuje zvětšení podílu práce pohlcenou ztrátami. Ty jsou způsobeny zejména skutečností, že se v drtičích a mlýnech nerozměňují jednotlivá zrna, ale vždy soubory velkého počtu zrn, které jsou namáhány velmi nerovnoměrně. A pokud některé částice nejsou namáhány dostatečně a jejich elastické deformace nedosahují potřebného napětí k tomu, aby mohla být překročena jejich pevnost, tak je část vynakládané energie ztrátová (Oyedeki et al., 2020, Dinter, 1984).

Dokonalejším naplněním mlecího prostoru jsou zrna také k sobě více vzájemně stlačována, přičemž dochází k jejich vzájemnému tření i k jejich tření o pracovní plochy zařízení. Tím je další část energie pohlcena ztrátami, především ve formě tepla (Dinter, 1984).

4.3 Typ lignocelulózové biomasy

Rozdíly ve stavbě, chemickém složení a fyzických vlastnostech jednotlivých druhů lignocelulózové biomasy neopominutelně ovlivňují energetickou náročnost. Tento nepřekvapivý fakt se výrazně podílí na odolnosti vůči rozrušení částic (Oyedeki et al.).



Obr. 16 Základní anatomické směry ve dřevě (VŠB, 2020)

Odolnost materiálu vůči porušení vnějšími mechanickými silami lze charakterizovat jeho pevností, která se vyjadřuje napětím na mezi pevnosti σ_P , tedy takovém napětí, při kterém

nastane nevratná deformace. V případě dřeva, které je používáno jako konstrukční materiál, jsou důležité především jeho vlastnosti při statickém zatížení. Ty je možné rozdělit dle způsobu zatížení na pevnost v tlaku, v tahu, ve smyku, v krutu, v ohybu a ve vzpěru. Jelikož se jedná o anizotropní materiál, má v různých směrech působení sil různé i meze pevnosti. S ohledem na směr působící síly k orientaci vláken a letokruhům dřeva lze rozdělit pevnost ve směru vláken v rovině a pevnost napříč vláken, tedy ve směru radiálním a tangenciálním, viz obr. 18. Pro vybrané druhy dřeva mez pevnosti v tlaku znázorňuje tab. 5 a mez pevnosti v tahu jsou zobrazeny v tab. 6. Hodnoty pevností dřeva v uvedených tabulkách ovšem nelze brát jako konstanty, poněvadž jsou tyto veličiny závislé na metodice zkoušení, při které je zapotřebí definovat podmínky, za kterých se pevnost zjišťuje. V zásadě se jedná o velikost testovaného tělesa, postupu zkoušky a výpočtu výsledků (Mendelu, 2020; VŠB, 2020).

Tab. 5 Mez pevnosti v tlaku pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 hm. % a 30 hm. % a více (Mendelu, 2020)

druh dřeva	Mez pevnosti σ_p v tlaku (MPa)					
	ve směru vláken		napříč vláken ve směru radiálním		napříč vláken ve směru tangenciálním	
	H = 12 %	H > 30 %	H = 12 %	H > 30 %	H = 12 %	H > 30 %
modřín	64,5	25,5	4,5	2,7	6,1	2,5
smrk	44,4	19,5	3,4	2,3	4,0	2,0
dub	57,5	30,4	11,0	6,5	8,5	5,1
buk	55,5	26,0	12,9	7,3	8,5	5,3
habr	60,0	26,5	14,0	7,9	8,5	5,2

Tab. 6 Mez pevnosti v tahu pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 % hm. a 30 % hm. a více (Mendelu, 2020)

druh dřeva	Mez pevnosti σ_p v tahu (MPa)			
	ve směru vláken		napříč vláken ve směru radiálním	napříč vláken ve směru tangenciálním
	H = 12 %	H > 30 %	H = 12 %	H = 12 %
modřín	125	96	-	-
smrk	103	79	2,2	1,7
dub	132	100	5,8	-
buk	123	92	4,4	3,4
habr	-	-	4,6	3,8

V případě smykové (stříhové) pevnosti jsou průměrné hodnoty meze pevnosti pro vybrané druhy dřeva při 12 hm. % uvedeny v tab. 7, odkud je dobře patrné, že dřevo disponuje nejmenší smykovou pevností ve směru napříč vláken v rovině (Mendelu, 2020).

Tab. 7 Mez pevnosti ve stříhu pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 % hm. (Mendelu, 2020)

druh dřeva	Mez pevnosti σ_P (MPa) ve smyku při 12 hm. % vlhkosti					
	ve směru vláken v rovině		napříč vláken v rovině		stříhová pevnost	
	radiální	tangenciální	radiální	tangenciální	radiální	tangenciální
smrk	6,9	6,8	3,3	2,8	31,8	34,4
dub	10,2	12,2	7,9	7,5	-	-
buk	11,6	14,5	7,7	7,6	52,3	47,1
topol	6,1	7,2	3,5	3,8	31,1	20,5

Jednotlivé typy dřevní biomasy se logicky liší mechanickými vlastnostmi i při dynamickém zatížení. Dřevo má schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem, tato vlastnost se nazývá rázová houževnatost dřeva, která vyjadřuje potřebnou energii na přeražení dřeva definovaných rozměrů. Tyto vlastnosti se určují pomocí přerážecích kladiv, např. Charphyho kladivem. U této metodiky jsou opět velmi důležité testovací podmínky, při kterých je vzorek testován, dle kterých se pak může rázová houževnatost lišit. Lze ale konstatovat, že menší rázovou houževnatost má dřevo listnatých stromů (Mendelu, 2020). Příklady rázové houževnatosti lze vidět v tab. 8.

Tab. 8 Rázová houževnatost v ohybu pro vybrané druhy dřeva

Druh dřeva	Rázová houževnatost ($J \cdot cm^{-2}$)		
	Mendelu (2020)		Lokaj a Vavrušová (2010)
	H = 12 hm. %	H = 30 hm. %	H = 12 hm. %
modřín	5,2	4,3	-
smrk	3,9	3,3	6,0
dub	7,7	6,5	6,9
buk	8,0	6,9	7,0

Energetická náročnost rozmělnění je obecně vyšší pro dřevnatou biomasu než pro rostlinou, stejně tak pro tvrdé a měkké dřevo. Tyto dva jevy byly pozorovány v několika studiích, ale v žádné práci nebyl vliv složení a struktury na náročnost rozmělnění

jasně vysvětlen. Dřevní biomasa oproti travinám obsahuje vyšší množství celulózy a ligninu, což by vyšší potřebu energie k rozmělnění vysvětlovalo, avšak ne ve všech případech je to důvod dostačující. Například Mani et al. (2004) ve své práci studoval mletí v kladivovém mlýnu slámy z pšenice, ječmene, kukuřice a prosa. Jako energeticky nejnáročnější materiál k rozemletí bylo vyhodnoceno proso, což bylo podle autorů zapříčiněno nejen jeho chemickým složením, ale především díky jeho vláknité povaze (Oyeději et al.).

4.4 Obsah vlhkosti

Obsah vlhkosti je možná nejdůležitější a také nejčastěji uváděná vlastnost lignocelulózové biomasy při jeho rozmělnění, neboť vlhkost ovlivňuje řadu dalších fyzikálních vlastností drceného materiálu.

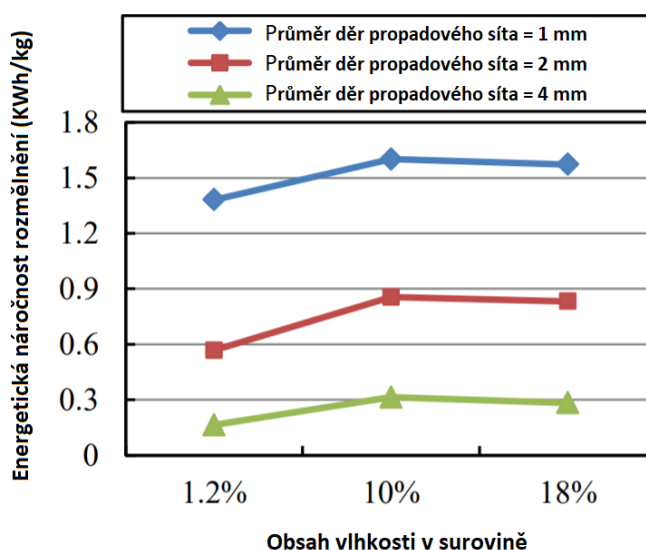
V důsledku zvýšeného obsahu vlhkosti klesá účinek tlakových sil a modul pružnosti suroviny, čímž se částice materiálu stávají pružnějšími a odolnějšími vůči stříhu. (Krátký, 2015). Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti suroviny se ještě více navýší při současném působení vysokých teplot. Příkladem je tab. 9, kde je znázorněn vliv vlhkosti a teploty na mez pevnosti dubu v tlaku (Mendelu, 2020).

Tab. 9 Mez pevnosti dřeva dubu v tlaku ve směru vláken vyjádřená v % meze pevnosti při 0 °C a 0 % vlhkosti (Mendelu, 2020)

Teplota (°C)	Vlhkost dřeva (hm. %)					
	0	10	15	30	45	60
25	92	60	47	31	31	31
45	85	50	39	25	24	24
60	79	43	32	19	20	19
80	73	33	24	13	13	12
100	66	24	15	7	6	6

Krom mechanických vlastností má vyšší obsah vlhkosti značný vliv i na chod dezintegrační jednotky. Nad 15 % hm. dochází již k značnému ucpávání propadového síta, což vede k jeho zahlcení či alespoň k prodloužení doby potřebné k rozmělnění (Krátký, 2015). Například Armstrong et al. (2007) zkoumal změnu potřebného času k rozemletí kukuřice při změně její vlhkosti a změřili, že při zvýšení vlhkosti z 9,25 % hm. na 15,41 % hm. vzrostl čas k rozmělnění z 20 na 29 s.

O vlivu vlhkosti na energetickou náročnost k rozmělnění lignocelulóзовé biomasy lze konstatovat, že s jejím zvyšujícím obsahem se nároky na energii zvyšují. Tato rostoucí tendence byla potvrzena mnoha studiemi. Například práce Součka et al. (2003), kde při zvýšení obsahu vlhkosti křídlatky z 9,18 na 19,66 % hm. energetická spotřeba stoupla z původních 0,053 na 0,232 kWh/kg. K poněkud odlišným výsledkům se dopracoval Zhang (2014). Ten při mletí štěpky topolu zpozoroval také nárůst energetické spotřeby při změně vlhkosti z 1,2 na 10 % hm., pro materiál s vlhkostí 18 % hm. však už byl zaznamenán její mírný pokles, viz obr. 19. Vysvětlení tohoto jevu se však v práci nenachází.

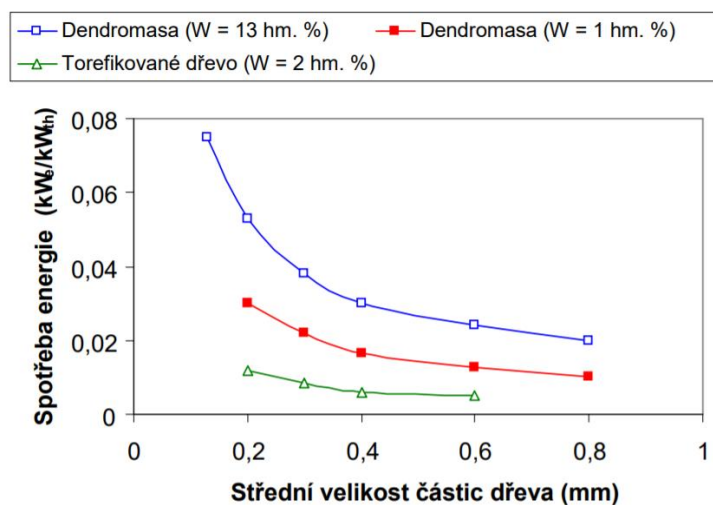


Obr. 17 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na obsahu vlhkosti v experimentu Zhanga (2014)

4.5 Předúprava biomasy

Jednou z možností, jak docílit energeticky méně náročné dezintegrace lignocelulóзовé biomasy, je její vhodná předúprava. Mezi nejrozšířenější a známe metody předúpravy biomasy se řadí torefakce, což je proces termického zpracování při teplotách 220 až 280 °C za podmínek pomalé pyrolýzy a nepřítomnosti kyslíku. Tato metoda je využívána především pro výrobu unifikovaných pevných paliv s vylepšenými vlastnostmi, ale u některých druhů biomasy může významně snížit náklady na její dezintegraci, viz obr. 20. Tento fakt je způsoben rozpadem ligninu a hemicelulózy. Phanphanich et al. (2011) ve své práci uvádí, že pro torefikované štěpky borovice byla energetická náročnost rozmělnění oproti syrové štěpce nižší o jeden řád. Podobně i Reppelin et al. (2010) v případě torefikovaného buku při teplotě 280 °C, kdy energetická náročnost klesla téměř o 90 %. Jelikož ale i samotná torefakce

spotřebovává značné množství energie, není zcela jasné, do jaké míry je tato předúprava prospěšná a smysluplná, a proto je zapotřebí více studií na toto téma (Oyedeji et al.).



Obr. 18 Porovnání závislosti spotřeby energie u mletí na žádanou střední velikost částic u torefikovaného, suchého a předsušeného dřeva (Svoboda, 2009)

V současné době se vyvíjí nové metody předúpravy, jako je například zmrazení, které by mohlo přinést větší úsporu energie ve srovnání s torefikací. Spotřeba energie však pravděpodobně bude stále relativně vysoká (Oyedeji et al.).

4.6 Variabilita biomasy

Anizotropní povaha a vysoká variabilita lignocelulózové biomasy představují velkou výzvu pro dokonalejší pochopení její dezintegrace. Široká variabilita a nekonzistentnost lignocelulózové biomasy vychází z fyziologických struktur biomasy či životních podmínek při růstu. To v praxi znamená, že struktury biomasy jsou ovlivněny životním prostředím (klimatické podmínky, příjem živin apod.), nebo její anatomickou stavbou. Vyšší pevnost v ohybu může mít například dřevo bližší kůře vůči jádru, nebo například u vojtěšky byla sledována narůstající energetická náročnost na stříh se zvyšující se výškou rostliny (Oyedeji et al., 2020).

5 Modelování energetické náročnosti rozpojování biomasy

Rozpojování suroviny je jedno z nejdůležitějších technologických procesů v četných průmyslových odvětvích. Nejvíce je využíváno pro úpravu a zpracování rud, při těžbě uhlí a ostatních nerostných surovin. Používá se i při těžbě a úpravě kameniva a pro výrobu stavebních surovin (Dinter, 1984).

S rozvojem průmyslu v 19. století se spolu se zvyšující se těžbou nerostných surovin zvyšovala i snaha o pochopení fyzikální podstaty samotné dezintegrace suroviny. Z tohoto úsilí pak vznikaly první matematické modely, které byly schopny predikovat alespoň přibližné množství potřebné energie k rozmělnění. (Naimi, 2016).

I přesto, že k dnešnímu dni již bylo vysloveno mnoho různých teorií zdobňování, není žádná z nich bez nedostatku. Mnoho z nich dostatečně nerespektuje fyzikální podstatu problému, nebo vychází z nesprávných předpokladů. A na druhou stranu některé teorie nejsou použitelné při řešení konkrétních úkolů vyskytujících se při drcení a mletí, i když vycházejí ze správných fyzikálních hledisek či se opírají a statistické rozdělení zrn. Drtivá většina vyřčených rozmělnovacích teorií byla navíc navržena na zdobňování křehkých částic nerostných surovin, a proto je jejich aplikace na pružný a vlhký materiál komplikovaná a nejistá (Dinter, 1984).

O modelech rozmělnování biomasy s lignocelulózovým základem je toho v dostupné literatuře podstatně méně a jejich výzkum probíhá výrazněji až během posledních deseti let. Výzkumníci se během těchto let nejprve zaměřili na známé modely zdobňování nerostných surovin a jejich použitelnost v případě biomasy. Ačkoliv bylo navrženo několik zdobňovacích modelů, tak největší pozornost byla věnována třem historicky nejzásadnějším, a to teoriím Rittingera, Kicka a Bonda. Tyto a na ně navazující teorie a modely rozmělnování jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.1 Rittingerova teorie

Rittingerova teorie, která byla zveřejněna roku 1867, je jedna vůbec z prvních teorií, ve které byla uvedena souvislost mezi spotřebou práce a stupněm rozpojení. Rittinger v ní předpokládal, že potřebná práce k rozmělnění jednotlivé částice je úměrná nově vytvořenému povrchu této částice, která zde zaujímá tvar krychle o velikosti D .

Tato interpretace však naráží na podstatný problém, a to zásadní rozdíl mezi zdrobňováním jednotlivých zrn a zdrobňováním zrn v kolektivu. Při dezintegraci jednotlivých částic je sice skutečně využita veškerá přiváděná energie k vytváření nového povrchu, u zdrobňování souboru zrn však dochází k jejich vzájemnému tření a převážná část vstupní energie se tak mění v teplo. Toto zjednodušení skutečného děje je jedním z důvodů, proč je rozšíření platnosti Rittingerovy teorie na rozměňování souboru zrn problematické (Dinter, 1984). Tvar Rittingerovy rovnice je uveden ve vztahu (5.1).

$$E = C_R \cdot \left(\frac{1}{D_{OUT}} - \frac{1}{D_{IN}} \right) \quad (5.1)$$

C_R zde značí empiricky nalezenou konstantu daného materiálu, D_{OUT} značí rozměr částice na výstupu a D_{IN} rozměr částice na vstupu.

Ačkoliv se Rittingerova teorie řadí k nejstarším svého druhu, z nedávných studií vyplývá, že se jedná o rozměňovací model, který lze využít k predikci energetické náročnosti biomasy s lignocelulózovým základem. S tímto závěrem přichází autoři Naimi et al. (2013) a Temmerman et al. (2013).

Naimi et al. (2013) se ve své práci zabýval měřením energetické náročnosti při mletí měkkého (jehličnan douglaska tisolistá) a tvrdého (odrůda vrby Godrun) dřeva v nožovém mlýnu. Průměr vstupní velikosti částic dřeva činil od 30 do 90 mm a délka větví byla nařezána na 20 až 30 mm. Vlhkost byla pomocí sušení jehličnanu a postřiku vodou vrby shodně upravena na 11,5 % hmotnosti. Takto předupravená štěpka byla mleta v nožovém mlýnu s velikostí jednotlivých ok síta 25,4 mm. Výsledkem mletí byly částice o geometrickém průměru 1,73 mm pro jehličnan a 2,23 mm pro vrbu. Naměřená data se poté snažil nafitovat na tři nejznámější rozměňovací rovnice, a to Rittingerovu, Kickovu a Bondovu. Ze vzájemného porovnání vyplynulo, že skutečné energetické náročnosti nejlépe odpovídá predikce Rittingerova modelu a pro takovou velikost částic může být tato teorie používána.

K podobnému závěru ve své práci došel i Temmerman et al. (2013). Jeho studie byly prováděny na čtyřech druzích dřeva – buku, dubu, borovice a smrku s maximální vlhkostí do 22 % hm. I zde byla Rittingerova rovnice zvolena jako nejvhodnější model pro výpočet energetické náročnosti. V této práci byla i samotná Rittingerova rovnice modifikována do tvaru (5.2).

$$E = MH \cdot \left(\frac{1}{D_{OUT}} - \frac{1}{D_{IN}} \right) \quad (5.2)$$

Rittingerova konstanta C_R zde byla nahrazena součinem konstanty M , charakterizující druh dřeva, a vlhkostí drceného materiálu H . Konstanta M byla v kontextu této studie vyhodnocena pro buk 5,11, pro dub 8,54, pro borovici 9,65 a 11,85 pro smrk. Tento vztah má výhodu v malém počtu parametrů, ale pro přesnější predikci energetické náročnosti rozměňování by bylo vhodné vztah rozšířit a spojit parametr M s dalšími fyzikálními vlastnostmi dřeva, jako je hustota částic či jejich pružnost. Samotná rovnice musí také být potvrzena v dalších typech mlýnů s různým nastavením (Temmerman et al. 2013).

5.2 Kickova teorie

Kick, na rozdíl od Rittingera, vycházel z předpokladu, že celkové množství technické práce odpovídá množství elastické deformační práci potřebné k rozrušení částice. V tomto pohledu je pak množství práce spotřebované při zdobňování jednotlivé krychle o délce hrany D na menší krychle o délce hrany $d = \frac{D}{2^k}$ k krát větší, než je spotřeba práce při rozměňování na malé krychle s hranami dlouhými $d = \frac{D}{2}$ (Dinter, 1984). Vztah pro zdobňování částic vyplývající z Kickovy teorie je vyjádřen rovnicí (5.3), kde C_K je empiricky zjištěná konstanta, D_{IN} průměrná velikost částic na vstupu a D_{OUT} značí průměrnou velikost částic po zdobnění na výstupu.

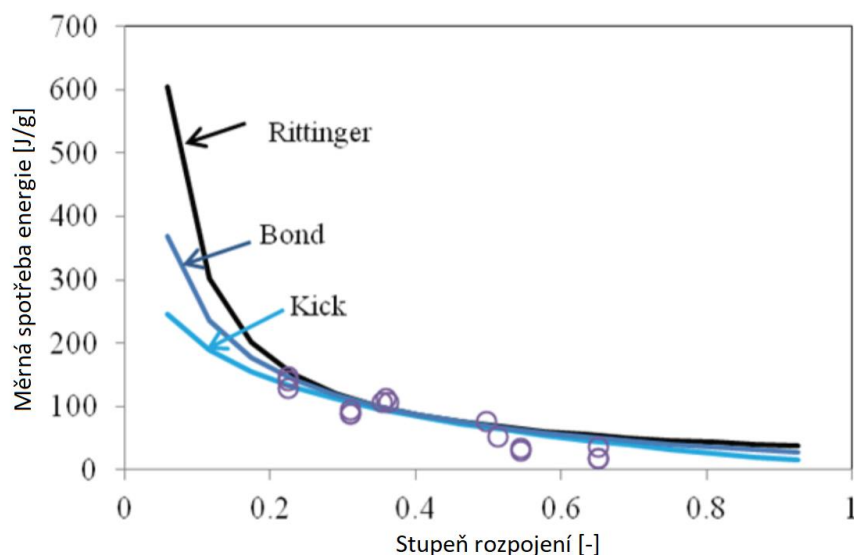
$$E = C_K \cdot \ln \frac{D_{IN}}{D_{OUT}} \quad (5.3)$$

Kickova teorie má společně s Rittingerovou teorií společný nedostatek, a to předpoklad, že rozměňované materiály jsou homogenní a izotropní. Tuto podmínku však nesplňují téměř žádné materiály. Dále se Kick ve své teorii mylně domnívá, že pevnost materiálu zůstává konstantní i přes změnu jeho velikosti a že tedy nezávisí na rozměru jednotlivých zrn. Tato domněnka je však v rozporu s teoreticky i prakticky ověřeným faktem, protože při zmenšování zrn dochází ke snižování počtu vadných a slabých míst, čímž se zrna stávají odolnějšími vůči dalšímu rozrušení (Dinter, 1984).

Vzhledem k uvedeným slabinám a nedostatkům lze konstatovat, že Kickova teorie zdobňování se přibližuje více skutečnosti při drcení. Oproti tomu Rittingerova teorie je pro predikci energetické náročnosti vhodnější při mletí, tedy při zdobňování vyznačujícím se větším povrchem (Dinter, 1984). Ke stejnému závěru došel ve své práci i Naimi et al. (2013) při mletí měkkého a tvrdého dřeva. Z tohoto měření vyšlo najevo, že při zmenšujícím se stupni

rozpojení se Kickův model stále více vzdaluje skutečné měrné energetické spotřebě. Grafické znázornění tohoto výsledku je k vidění na obr. 21.

Z uvedené literatury tedy vyplývá, že pro predikci energetické spotřeby lignocelulóзовé biomasy je Kickův model nevhodný.



Obr. 19 Měrná spotřeba energie v závislosti na stupni rozpojení dle Rittingera, Bonda a Kicka (Naimi, 2013)

5.3 Bondova teorie

Nejmladší takzvaná *třetí teorie zdrobňování* formulovaná F. C. Bondem roku 1952 vychází z modernějšího pojetí mechanismu rozrušování zrn, které se zaměřuje více na samotný průběh rozměňování. Podle Bondova pohledu závisí množství potřebné energie k rozmělnění jak na objemu částice, tak i na jejím povrchu. U této hypotézy vycházel z předpokladu, že množství potřebné energie k dezintegraci je sice úměrné objemu částice, ale vzhledem k nezbytné koncentraci energie podmiňující vznik nových trhlinek v blízkosti povrchu je potřebná energie současně úměrná i velikosti povrchu rozměňované částice (Dinter, 1984; Naimi, 2016). Vztah pro dezintegraci souboru zrn platí vztah (5.4), kde C_B představuje empiricky zjištěnou konstantu.

$$E = 2 \cdot C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{D_{OUT}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{IN}}} \right) \quad (5.4)$$

Podobně jako Rittingerova a Kickova teorie je i teorie Bondova pouze empirická, vychází však z hlubších znalostí zdrobňovacího procesu, které v době vzniku Rittingerovy a Kickovy teorie nebyly ještě známy a díky těmto vědomostem má v praktických ohledech

nepopíratelné přednosti. Tato praktičnost je způsobena odlišně zvoleným principem. Zatímco Rittingerovy a Kickovy teorie vycházely ze snahy stanovit množství práce potřebné k uskutečnění samotného zdrobňovacího děje, Bondova práce započítává do procesu rozměňování i ztráty v hnacím elektromotoru a v převodovém mechanismu dezintegračního zařízení (Dinter, 1984).

Z teoretického hlediska tak má oproti svým předchůdcům značné nedostatky. V zájmu hlubšího pochopení mechanismu zdrobňovacího děje je totiž zapotřebí zabývat se pouze prací spotřebovanou k překonání pevnosti a odolnosti různých materiálů vůči rozrušení a vyloučit různé proměnlivé vlivy způsobené samotnou konstrukcí rozměňovací jednotky (Dinter, 1984).

5.4 Charlesův vztah

Charlesův vztah (5.5) z roku 1957 shrnuje dohromady Rittingerův, Kickův a Bondův zákon a udává obecný vztah vyjadřující energii pro rozpojení materiálu, přičemž vychází z předpokladu, že změna měrné energie je přímo úměrná konstantě daného materiálu C a nepřímo úměrná charakteristické velikosti částic D , která je umocněna na exponent r (Rieger et al., 2005; Temmerman et al, 2013).

$$-\frac{dE}{dD} = C \cdot D^{-r} \quad (5.5)$$

Po integraci vztahu (5.5) získáme vzorec (5.6).

$$E = \frac{C}{r-1} \cdot \left(\frac{1}{D_{OUT}^{r-1}} - \frac{1}{D_{IN}^{r-1}} \right) \quad (5.6)$$

Hodnota exponentu r se liší dle typu dezintegrační teorie, přičemž pro zlepšení výsledku výpočtu je pro každou teorii doporučena i velikost částic.

- a) Pro Rittingera je $r = 2$, doporučováno pro průměr částice $D < 0,5$ mm.
- b) Pro Bonda je $r = 1,5$, doporučováno pro rozmezí $0,5 < D < 50$ mm.
- c) Pro Kicka je $r = 1$, doporučováno přibližně pro $D > 50$ mm.

Charlesův vztah byl v pozdějších letech následně rozvíjen a vylepšován (Temmerman et al., 2013). Například Hukki (1961) po experimentech na nerostných surovinách poukázal na fakt, že tyto hodnoty exponentu odpovídají pouze relativně omezenému rozsahu částic

a že exponent r není konstantní, nýbrž závisí i na samotné velikosti zdobňovaných zrn. Z těchto domněnek pak vychází vztah (5.7).

$$-\frac{dE}{dD} = C \cdot D^{-f(D)} \quad (5.7)$$

5.5 Výsledky literární rešerše

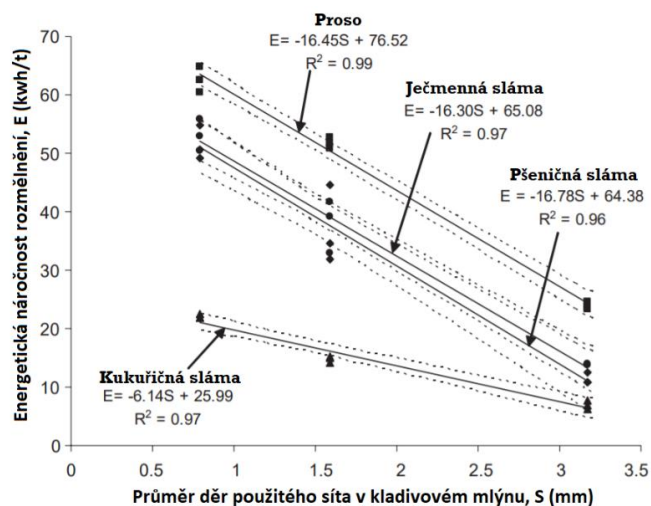
K dnešnímu dni bylo pro predikci energetické náročnosti pro rozmělnění celulózové biomasy navrhnuo i několik rovnic, které vychází přímo z konkrétních výsledků zdobňování biomasy. Jejich výhoda spočívá především v malých počtech proměnných. Jelikož je ale jejich původ pouze empirický, je zapotřebí více měření k prokázání jejich funkční predikci i na podobné typy odpadů s odlišnými provozními podmínkami.

Jeden z prvních empirických modelů na lignocelulózový materiál byl uveden Manim et al. (2004). Ten studoval energetickou náročnost pro rozmělnění kukuřice, prosa, pšeničné slámy a ječmenné slámy v kladivovém mlýnu s velikostí sít 3,2; 1,6 a 0,8 mm. Vlhkost každé suroviny byla upravena na 8 a 12 % hm. Energetická náročnost rozmělnění zde byla znázorněna pomocí polynomu prvního (5.8) a druhého stupně (5.9), ve kterém E značí energetickou náročnost (kWh/t) a g průměr jednotlivých ok síta kladivového mlýnu (Naimi et al., 2013).

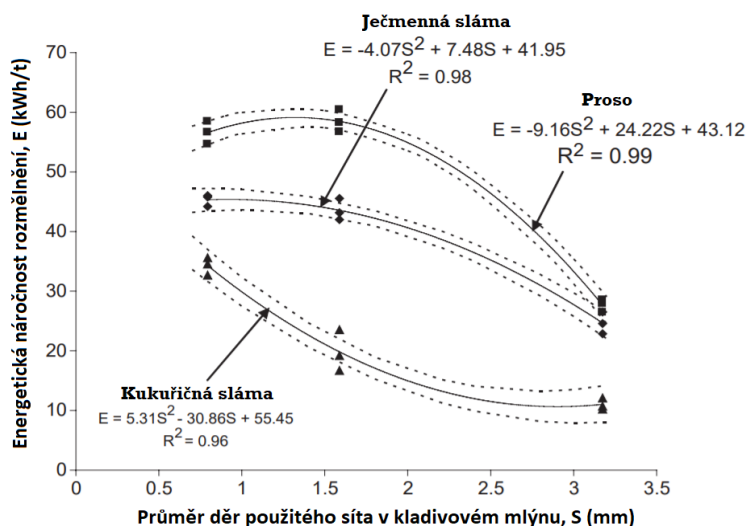
$$E = k_1 + k_2g \quad (5.8)$$

$$E = k_1 + k_2g + k_3g^2 \quad (5.9)$$

Z obr. 22 je patrné, že data z měření energetické náročnosti mletí pro materiál s vlhkostí 8 % hm. vykazují lineární průběh a odpovídají polynomu prvního stupně. Naopak data z měření vlhčího materiálu s 12 % hm. vystihuje polynom stupně druhého, viz obr. 23.



Obr. 21 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu při vlhkosti 8 % hm. (Mani et al, 2004)



Obr. 20 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu při vlhkosti 12 % hm. (Mani et al, 2004)

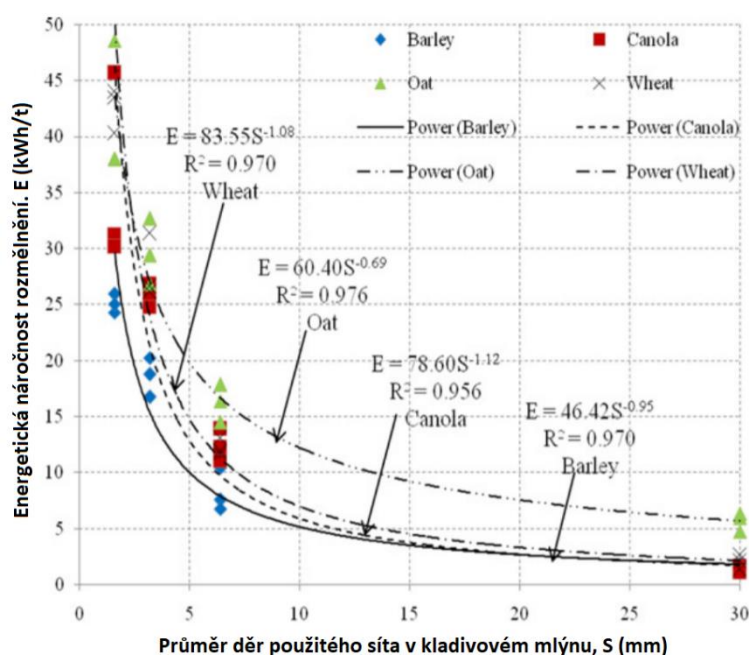
Bitra et al. (2009) měřil energetickou náročnost mletí prosa, ječmenné slámy a kukuřičné slámy v kladivovém mlýnu s rozměry ok síta 3,2 mm. Ve své práci se zaměřil především na sklon kladiv v mlýnu a rychlost otáček rotoru. Při testování s různými provozními parametry byla zjištěna silná korelace mezi celkovou měrnou energií a rychlostí otáček. Do naměřených dat byla poté implementována rovnice (5.10), kde E značí měrnou energetickou náročnost kladivového mlýna v MJ/t, ΔX_{gm} je rozdíl geometrický průměr na vstupu a K je funkce rychlosti otáčení N v ot min⁻¹.

$$E_e = K\Delta X_{gm}; K = f(N) \quad (5.10)$$

Adapa et al. (2011) se zabýval měřením energetické náročnosti rozmělnění slámy z ječmene, řepky, ovsa a pšenice. Vlhkost surovin byla upravena na několik hodnot pohybující se v intervalu od 10,3 do 15,6 % hm. Sláma byla nejprve předběžně nasekána a následně nadrcena v kladivovém mlýnu se sítím o průměru děr 30 mm. Poté surovina putovala do mlýnu s rozměry ok síta 6,4; 3,2 nebo 1,6 mm. Z naměřených dat byla navržena rovnice (5.11), ve které E označuje měrnou energii rozmělnění v kWh/t, PS rozměr ok použitého síta v mlýnu v mm a k_1 a k_2 konstanty.

$$E = k_1 PS^{-k_2} \quad (5.11)$$

Výsledky naměřených dat jsou k vidění na obr. 24.



Obr. 22 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu (překlad: Wheat – Pšenice, Oat – Oves, Canola – Řepka, Barley – Ječmen) (Adapa et al, 2011)

Miao et al. (2011) se svým týmem prováděli experimenty s tříletou travinou ozdobnicí obrovskou, tříletém prosu a třicetileté vrbě. Vlhkost vstupního materiálu byla upravena na 15 hm %. Lignocelulózový odpad byl rozmělněn v nožovém a kladivovém mlýnu vybavených sítí s různými rozměry otvorů od 1 do 10 mm. Autoři v této práci vypočítali energetické vztahy mezi požadavkem na energii a velikostí otvorů v sítích a vztah mezi spotřebou energie a stupněm rozmělnění. Z tohoto zkoumání byl poté vynesena rovnice (5.12), kde E je definována jako měrná spotřeba pro rozmělnění udávaná v J/g, x ve vzorci značí stupeň rozpojení, velikost jednotlivých ok použitého síta v daném mlýnu nebo geometrický

průměr velikosti částic (mm). Zbylé proměnné a a b jsou regresní koeficienty lišící se na zvoleném typu proměnné x .

$$E = ax^b \quad (5.12)$$

S výjimkou stupněm rozmělní měly všechny rovnice koeficient determinace na úrovni alespoň 95 %. Pro stupeň rozmělnění se kvalita modelu pohybovala lehce nad 90 %, výjimku tvořilo pouze proso, kde koeficient determinace pohyboval na hodnotě od 0,73 (Miao et al., 2011).

Ke stejnému závěru, tedy že mocninná funkce dokáže dostatečně popsat spotřebu energie pro rozmělnění libovolné lignocelulózové biomasy, došli i autoři Souček et al (2003). V této práci byly prováděny experimenty v kladivovém mlýnu s několika druhy biomasy, jako je například ovesná sláma či jabloň.

6 Modelování energetické náročnosti rozpojení bukové štěpky v nožovém mlýnu

V této kapitole je popsána metodika a výsledky provedených systematických experimentů zabývajících se stanovením rozpojovací energie v závislosti na charakteristice bukové štěpky.

Na základě teoretické části této práce a naměřených dat z experimentů je vytvořen empirický model predikující množství potřebné energie k rozpojení suroviny. A dále je navrhnout empirický model vhodný k predikci charakteristické výstupní velikosti částic na základě otáček rotoru a typu použitého propadového síta v nožovém mlýnu.

6.1 Vstupní surovina

Zvoleným typem suroviny pro experimenty se stala buková štěpka, která byla původně určena na uzení potravin. Tato vstupní surovina byla zakoupena ve 12 kg prodyšném pytli, který byl uskladněn za pokojové teploty. Velikost jednotlivých částic takto přijaté štěpky byla značně různorodá a pohybovala se v rozmezí cca od 5 až do 20 mm. Podobu této vstupní suroviny lze vidět na obr. 25.



Obr. 23 Velikost štěpky před rozmělněním

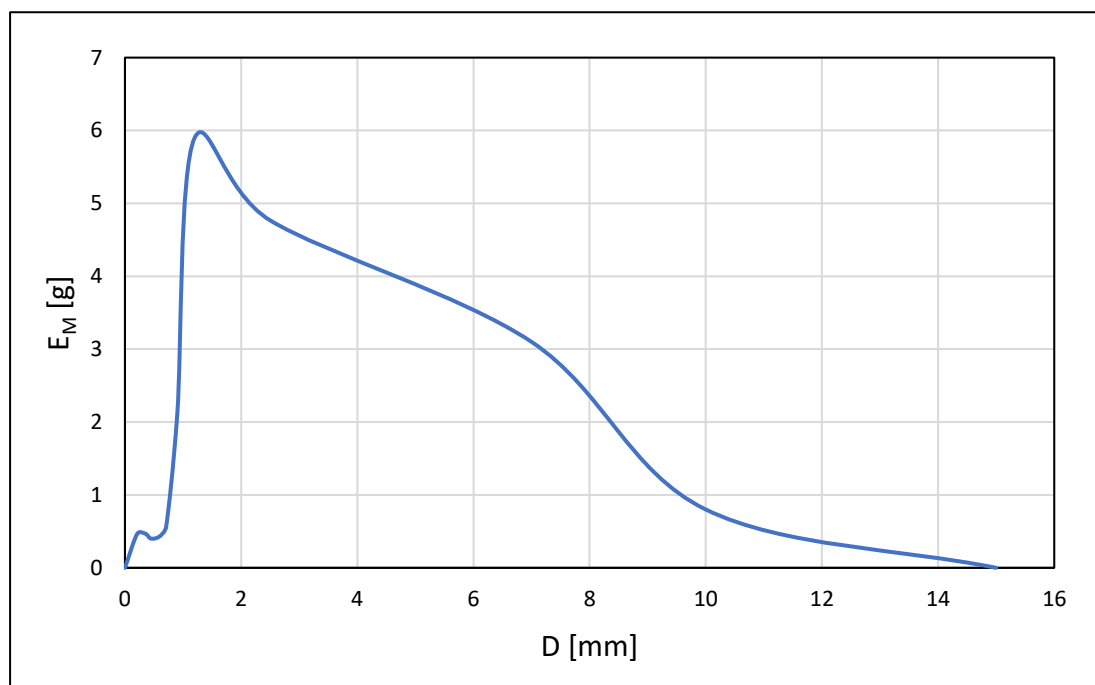
Buková štěpka vykazovala obsah sušiny $92,23 \pm 0,03$ % hm. a obsah $99,37 \pm 0,05$ % hm. látek organických. Pro analyzování obsahu sušiny a organických látek bukové štěpky byly z celkového množství náhodně odebrány 3 vzorky vážící okolo 15 gramů. Obsah sušiny byl měřen v sušárně KBC-25W (Binder Ltd., Tuttlingen, Německo) při teplotě 105 °C do doby ustálení na konstantní hmotnost. Obsah organických látek byl stanoven spálením již

vysušených vzorků v peci LE09/11 (LAC, s.r.o., Židlochovice, Česká republika) při teplotě 550 °C až do konstantní hmotnosti. Pro stanovení hmotnosti byla použita váha SDC31 (Mettler Toledo, Columbus, OH, USA).

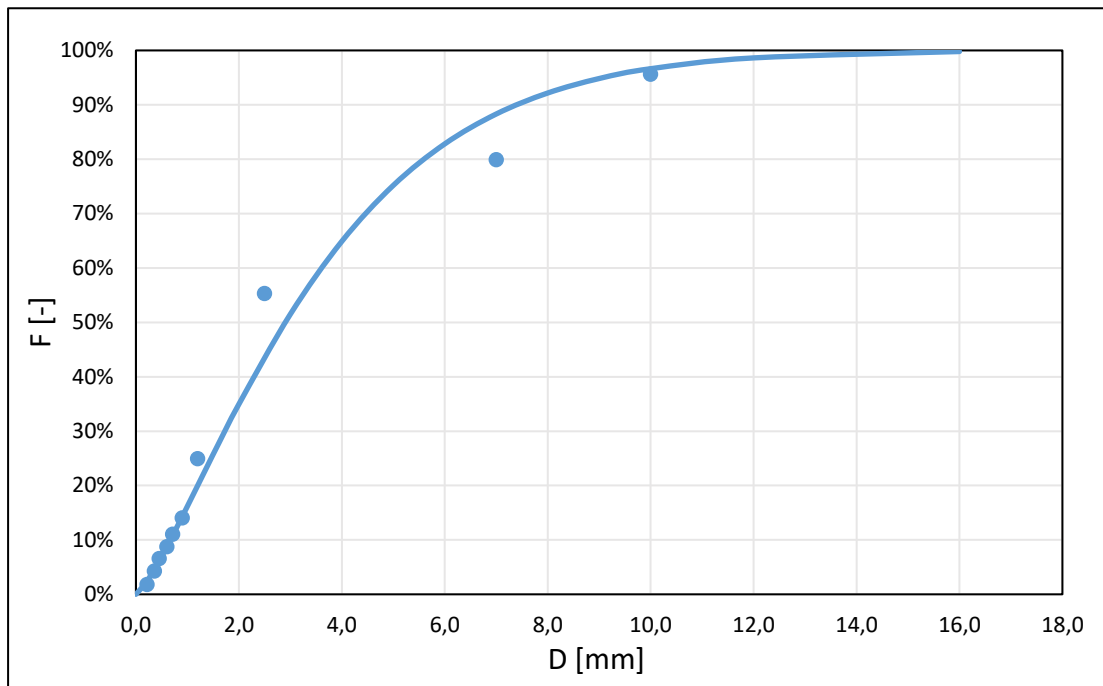
Před vlastními experimenty byla surová štěpka nejprve rozdrvena v nožovém mlýnu při 3000 ot min⁻¹ s propadovým sítem PS10 se čtvercovými otvory o velikosti 10 mm. Důvodem této předúpravy byla unifikace velikosti částic vzorku pro systematické experimenty. Výsledek tohoto drcení lze vidět na obr. 26. Znázornění distribuce vzorku pomocí křivky relativní četnosti lze vidět na obr. 27 a pomocí kumulativní křivky velikosti na obr. 28.



Obr. 25 Buková štěpka po mletí se sítem o velikosti děr 10 mm



Obr. 24 Distribuce vstupního vzorku znázorněné křivkou relativní četnosti



Obr. 26 Distribuce vstupního vzorku znázorněné kumulativní křivkou zrnitosti body – experimentální hodnoty, křivky – mocninná spojnice experimentálních hodnot

6.2 Postup měření

K dezintegraci bukové štěpky byl použit laboratorní nožový mlýn (SM300, Retsch Ltd., Haan, Německo) s tříbřitým typem rotoru o průměru 129,5 mm. Celý mlýn je k vidění na obr. 29, na obr. 30 lze vidět otevřenou mlecí komoru i detail rotoru se zbytkem nerozmělněné vstupní štěpky. Při mletí byl tvořen odtaž rozemletých částic z mlecí komory pomocí vysavače Nilfisk VP 930 do vírového odlučovače pevných částic, odkud částice směřovaly do sběrné nádoby.

Pro experimenty byly použity čtyři propadová síta se čtvercovými otvory, a to s velikostí stran 10 mm (PS10), 6 mm (PS6), 4 mm (PS4) a 2 mm (PS2). Další dvě propadová síta měla otvory v podobě lichoběžníků, a to ve velikostech 1,5 mm (PS1,5) a 1 mm (PS1). Jednotlivá síta lze vidět na obr. 31.

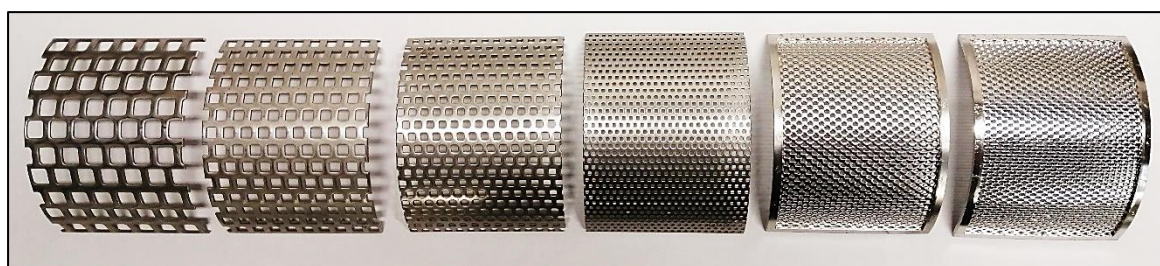
Samotný plán experimentu, viz tab. 10, byl založen na vzájemné kombinaci obvodové rychlosti rotoru, velikosti děr propadového síta a velikosti částic na vstupu.



Obr. 28 Nožový mlýn SM300



Obr. 27 vlevo : otevřená mlecí komora, vpravo: detail rotoru se zbytkem vstupní štěpky



Obr. 29 Propadová síta, zleva PS10, PS6, PS4, PS2, PS1,5, PS1

Tab. 10 Plán experimentu

Otáčky [ot min ⁻¹]	vstupní síto / výstupní síto
1000	PS10/PS6, PS6/PS4, PS4/PS2, PS2/PS1,5, PS1,5/PS1
1500	PS10/PS6, PS6/PS4, PS4/PS2, PS2/PS1,5, PS1,5/PS1
2000	PS10/PS6, PS6/PS4, PS4/PS2, PS2/PS1,5, PS1,5/PS1
2500	PS10/PS6, PS6/PS4, PS4/PS2, PS2/PS1,5, PS1,5/PS1
3000	PS10/PS6, PS6/PS4, PS4/PS2, PS2/PS1,5, PS1,5/PS1

Měření pak probíhalo dle následujícího postupu. Na začátku každého experimentálního cyklu byla vždy surová buková štěpka nejprve namleta při 3000 ot min⁻¹ přes čtvercové síto s velikostí propadových děr 10 mm. Poté byly nastaveny příslušné otáčky a o kategorii menší síto. Následovalo opět mletí, po kterém už ale došlo k měření celkové hmotnosti suroviny na výstupu a k odebrání reprezentujícího vzorku, který byl později podroben sítové analýze. Tento proces byl opakován až do doby, než bylo použito poslední síto PS1.

Hmotnost jednotlivých frakcí v rámci sítové analýzy byla měřena pomocí váhy Kern 573-46 (Kern & Sohn Ltd., Balingen, Německo). K vyhodnocení distribuce velikosti částic byla použita Rosin-Rammler-Sperling-Bennetova metoda. Pro snížení účinku jehlovitého tvaru částic byl použit korelační faktor 0,9 pro všechny částice větší než 1 mm. Tento korelační faktor je započítán do velikostí částic D_{10} , D_{50} a D_{90} .

Testováno bylo celkem 5 různých rychlostí otáček rotoru. Vzhledem k průměru rotoru 129,5 mm byly experimenty provedeny za obvodové rychlosti 6,8 m·s⁻¹ (1000 ot min⁻¹), 10,2 m·s⁻¹ (1500 ot min⁻¹), 13,6 m·s⁻¹ (2000 ot min⁻¹), 17 m·s⁻¹ (2500 ot min⁻¹) a 20,4 m·s⁻¹ (3000 ot min⁻¹).

Jádrem celého procesu bylo měření spotřeby energie k rozmělnění vstupní suroviny. To bylo docíleno nejprve nalezením energie potřebné čistě pro mletí suroviny E_A (W·s), které bylo stanoveno rozdílem výkonů nožového mlýna při běhu na prázdko P_{NP} (W) a při mletí P_M (W) za čas t , viz rovnice (6.1). Vstupní materiál byl do mlýnu přiváděn ručně, přičemž se kladl důraz na o co nejkonstantnější přívod materiálu, aniž by mohlo dojít k ucpání mlecí komory. Potřebný výkon k práci byl měřen pomocí analyzátoru Fluke 438II (Fluke Corporation, Everett, WA, USA), který zaznamenával činný výkon v časovém kroku 0,5 s.

$$E_A = \int_0^t P_M dt - \int_0^t P_{NP} dt \quad (6.1)$$

Samotnou energetickou náročnost rozmělnění vstupní suroviny E ($\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$) lze pak vypočítat jako poměr mezi energií potřebné čistě k mletí E_A ($\text{W}\cdot\text{s}$) a hmotností namleté suroviny m (kg), viz rovnice (6.2).

$$E = \frac{E_A}{m} \quad (6.2)$$

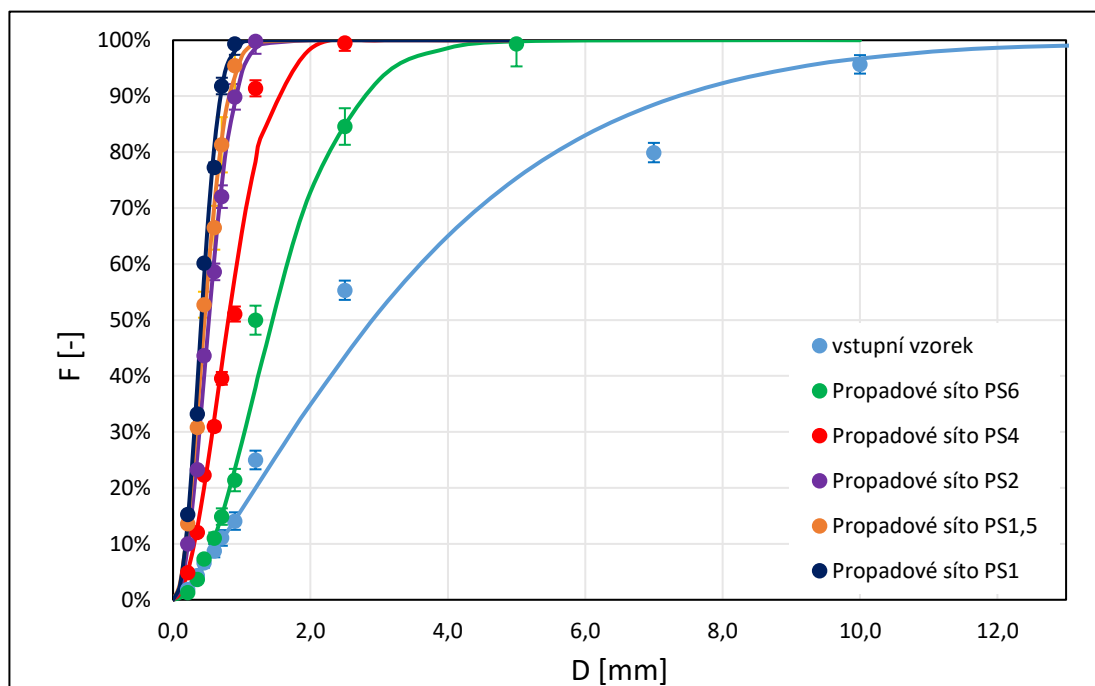
6.3 Výsledky

Z hlediska prezentace výsledků jsou systematické experimenty zabývající se stanovením rozpojovací energie bukové štěpky rozděleny na tři hlavní části, a to evaluaci chyby měření, vliv otáček na proces rozmělnění a analýzu energetické náročnosti rozpojení.

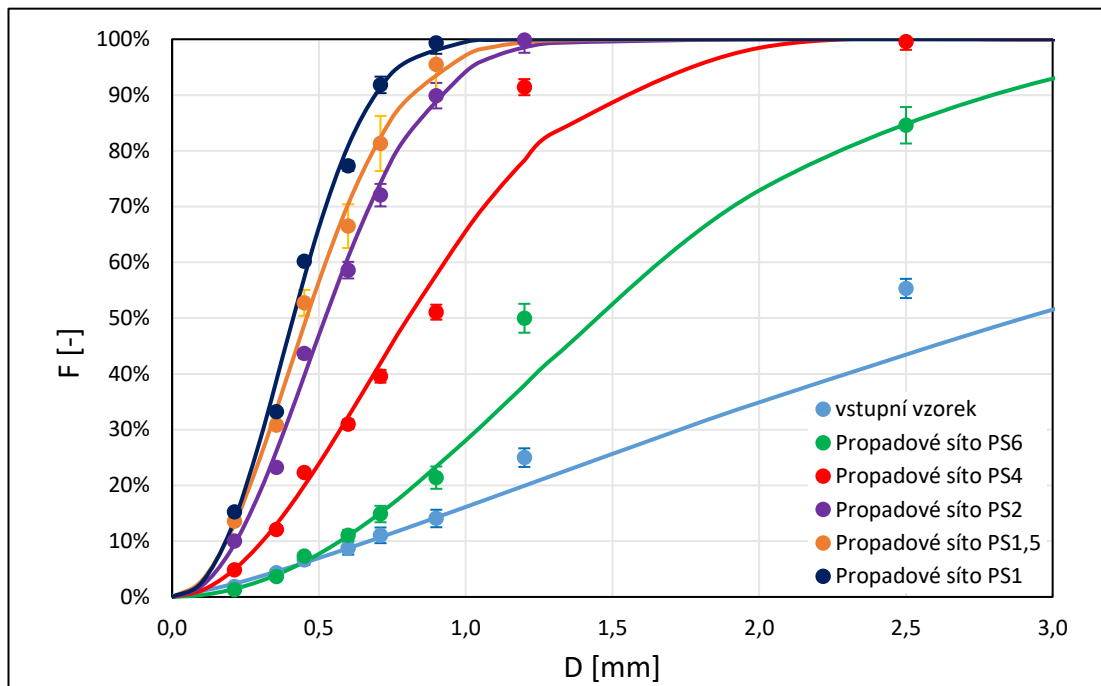
6.3.1 Evaluace chyby měření

Pro posouzení kvality výsledů predikujících modelů bylo zapotřebí vyhodnotit chybu měření. Z tohoto důvodu byly experimenty u 1500 ot min^{-1} a 3000 ot min^{-1} měřeny celkem třikrát. Stejně tak distribuce velikosti výstupních částic bukové štěpky po mletí se sítím PS10. Hodnoty tří měření pak byly zprůměrovány a vyneseny do grafu se směrodatnými odchylkami. Distribuci částic s chybovými úsečkami ve formě směrodatných odchylek pro $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze vidět na obr. 32 a pro $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na obr. 33. Jednotlivé body zde představují experimentální data a křivky popisují RRSB model.

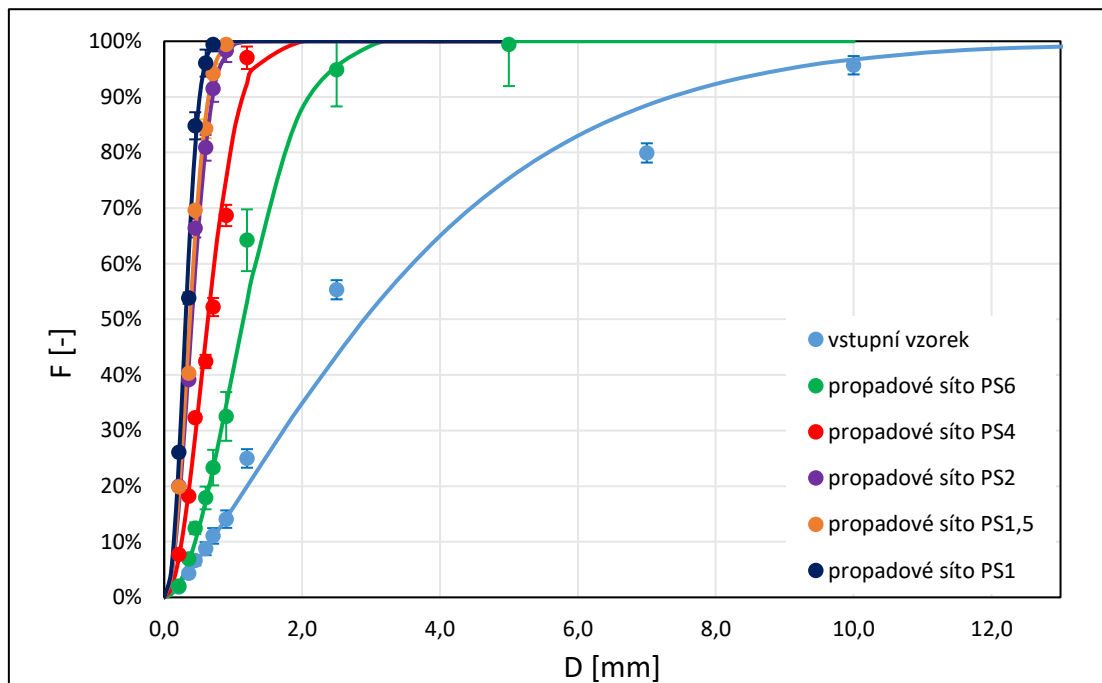
Dále byla vykreslena závislost charakteristické velikosti výstupních částic D_{10} , D_{50} a D_{90} na propadovém sítu, znázorněné na obr. 34 pro rychlost rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na obr. 35 pro $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z obou grafů je patrné, že chyba měření roste s velikostí částic, kdy největší chybu lze spatřit na propadovém sítu o rozměrech 6 mm, která činí u obou otáček shodnou chybu 18 %.



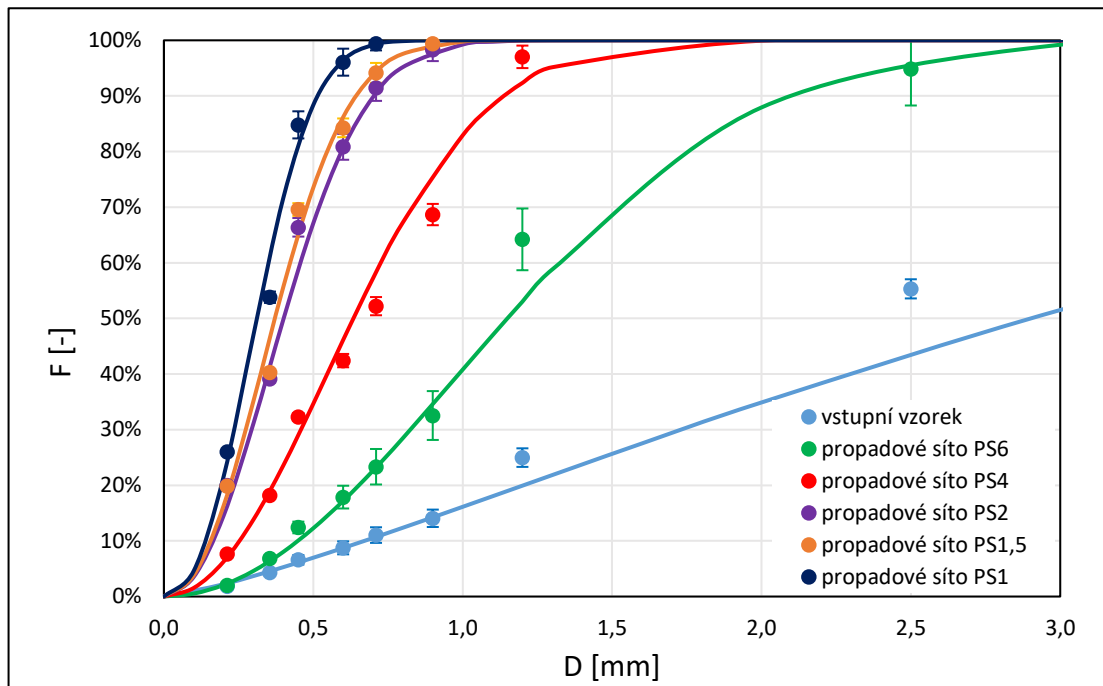
Obr. 32 A. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model



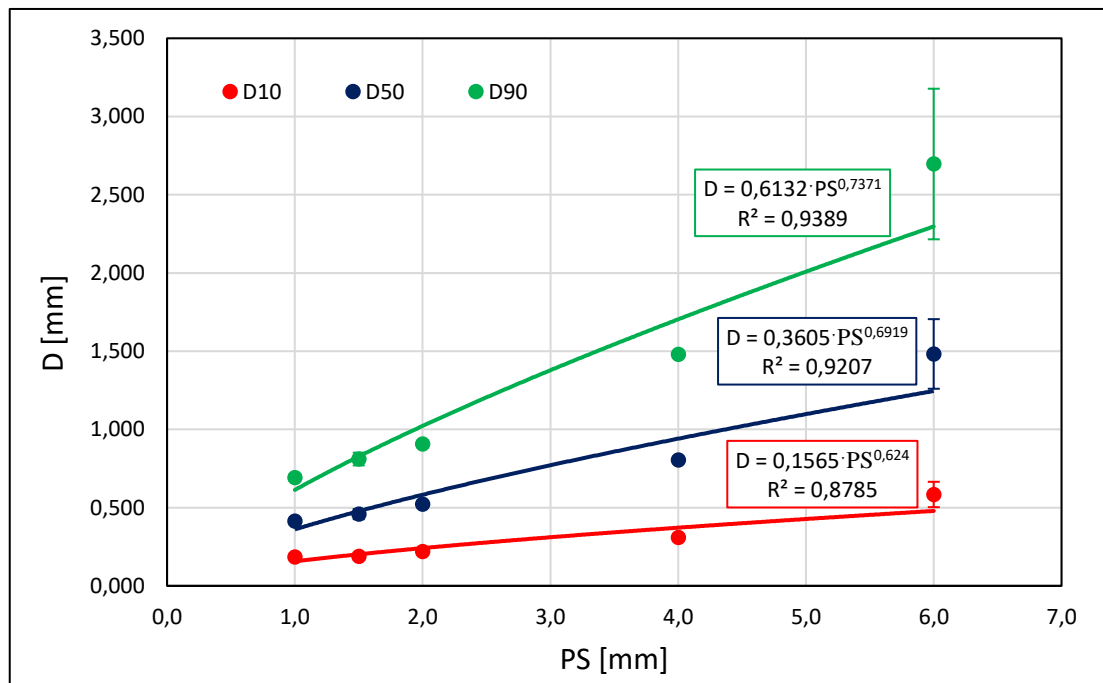
Obr. 30 B. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro propadová síta $0,5 - 3 \text{ mm}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model



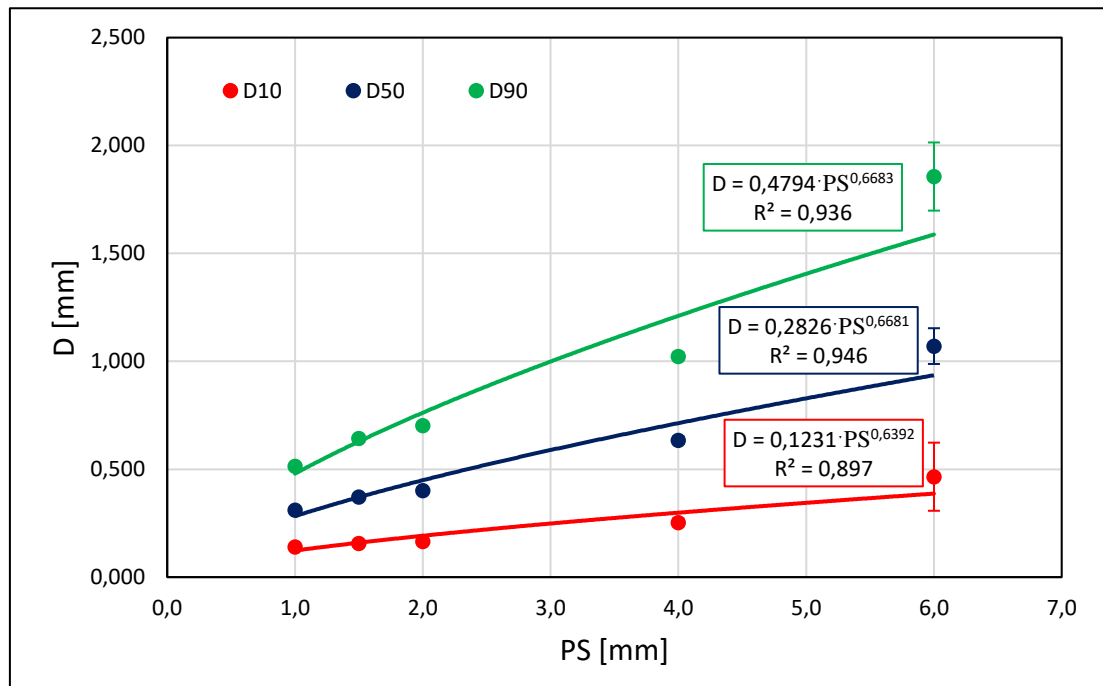
Obr. 33 A. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model



Obr. 31 B. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro propadová síta 0,5 – 3 s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model



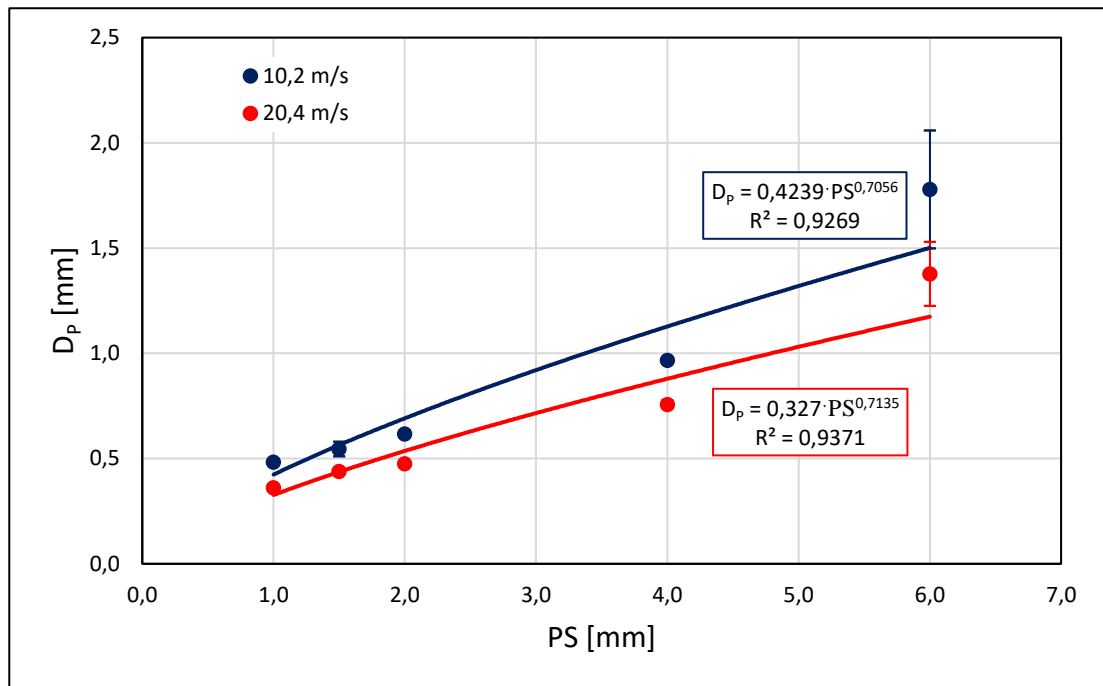
Obr. 32 Charakteristická velikost částic v závislosti na propadovém sítu při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot



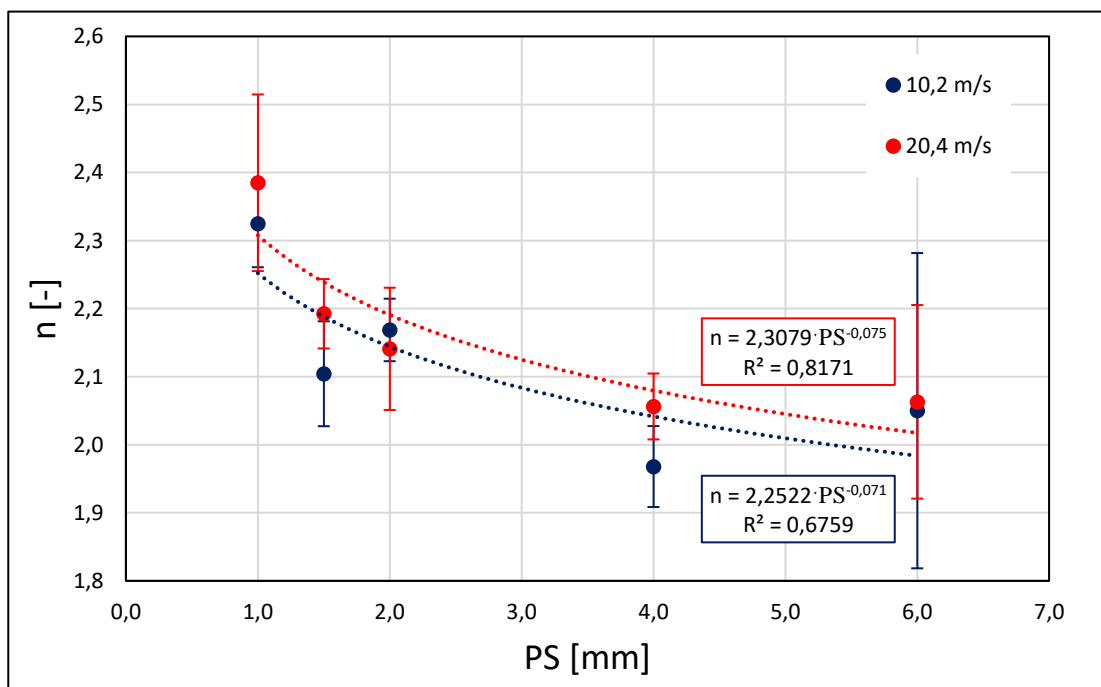
Obr. 33 Charakteristická velikost částic v závislosti na propadovém sítu při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocninná spojnice experimentálních hodnot

Dále pro porovnání chyby měření nízkých a vysokých otáček slouží obr. 36, který představuje průměrnou výstupní velikost částic D_P v závislosti na propadovém sítu PS a obr. 37, na kterém je ukázána závislost indexu polydisperzity n na propadovém sítu PS. I na těchto grafech lze dobře vidět, že největší chyba měření se vyskytuje u největších částic, což je způsobené zvyšující se odlišností od kulového tvaru a ukazuje to snižující vhodnost použití sítové metody pro složitější tvary částic.

Kromě chyby měření tyto grafy prezentují stejné závěry jako v dalších pracích obsažených v teoretické části této práce, jako například ve studii Srikanth Tangirala et al. (2004) či Williamse et al. (2017). Tyto grafy potvrzují fakt, že s rostoucí velikostí děr propadového síta se zvětšuje výstupní velikost mletých částic, zatímco index polydisperzity s jeho rostoucí velikostí klesá. Bohužel se tuto platnost nepodařilo potvrdit i u dalších rychlostí rotoru, které byly měřeny pouze jednou. Ačkoliv chyba měření u indexu polydisperzity dosahuje maximálně 10 %, nebylo možné u rychlostí rotoru $6,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $13,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ použít mocninný či jiný regresní model, který by náležitě vykreslil spojitost experimentálních dat.



Obr. 34 Průměrná velikost částic v závislosti na propadovém sítu pro 10,2 m·s⁻¹ a 20,4 m·s⁻¹ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocninná spojnice experimentálních hodnot



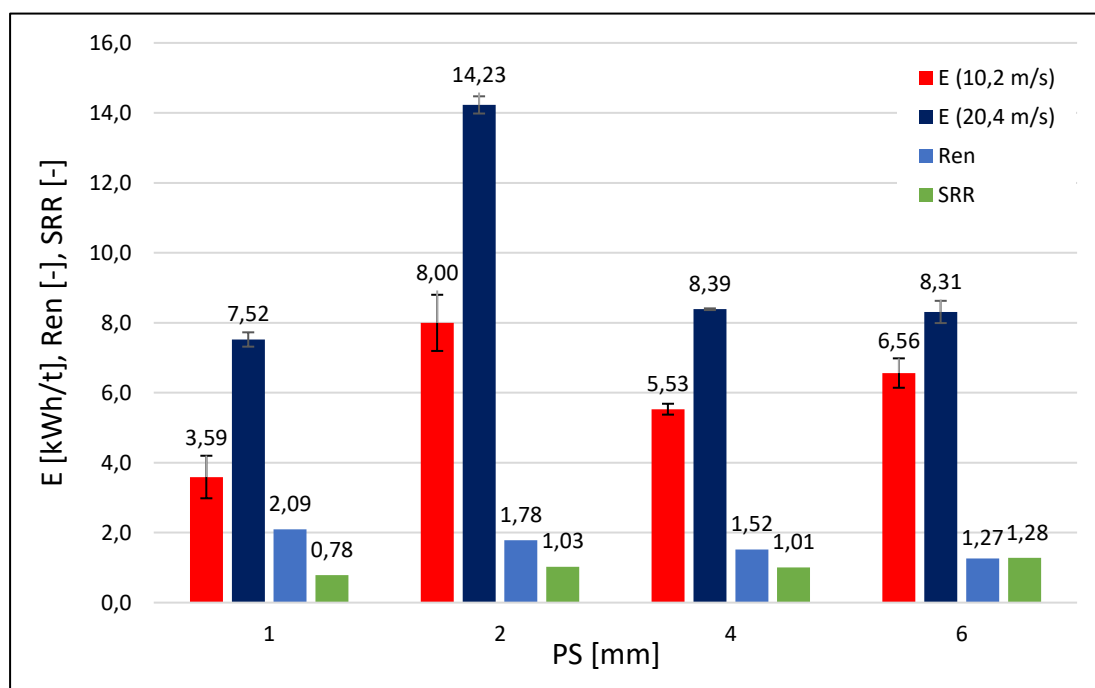
Obr. 35 Index polydispersity v závislosti na propadovém sítu s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocninná spojnice experimentálních hodnot

Pro přehlednost chyby měření energetické náročnosti slouží obr. 38, ve kterém je zobrazen i poměr energetické náročnosti rozmělnění R_{en} , který je definován rovnicí (6.3), a poměr střední velikosti výstupních částic SRR , který popisuje rovnice (6.4).

$$R_{en} = \frac{E(20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})}{E(10,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})} \quad (6.3)$$

$$SRR = \frac{SRR_{D50}(20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})}{SRR_{D50}(10,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})} \quad (6.4)$$

Díky poměrům R_{en} a SRR lze v tomto grafu vidět, že se snižováním propadového síta dochází při vyšších otáčkách k nárůstu potřebné energie k rozmělnění a zároveň ke snížení stupně rozpojení oproti otáčkám nižším. Princip tohoto chování energetické spotřeby spočívá v četnosti průchodu částic mezi statickými a rotačními noži mlýnu, která je u vyšších otáček ve srovnání s otáčkami nízkými za stejně dlouhou dobu vyšší. Z grafu je tedy patrné, že se snižováním průměru děr propadového síta se stávají vysoké otáčky pro mletí méně efektivními oproti otáčkám nižším.

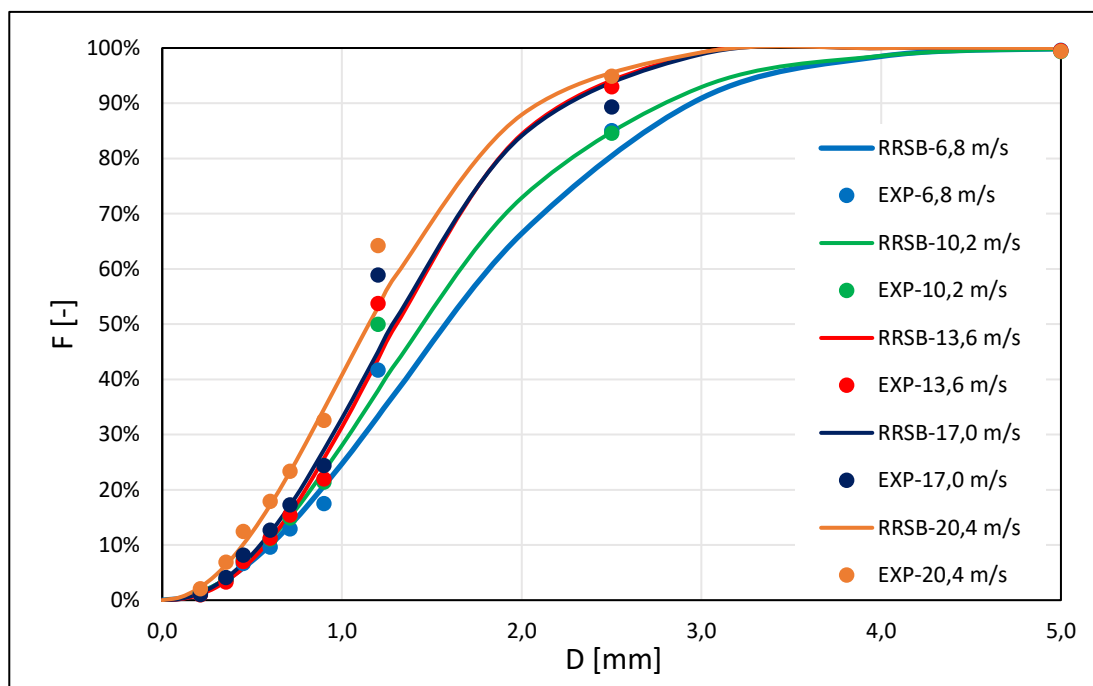


Obr. 36 Porovnání energetické náročnosti rozmělnění, poměru energetické náročnosti rozmělnění a poměru střední velikosti částic s chybovými úsečkami

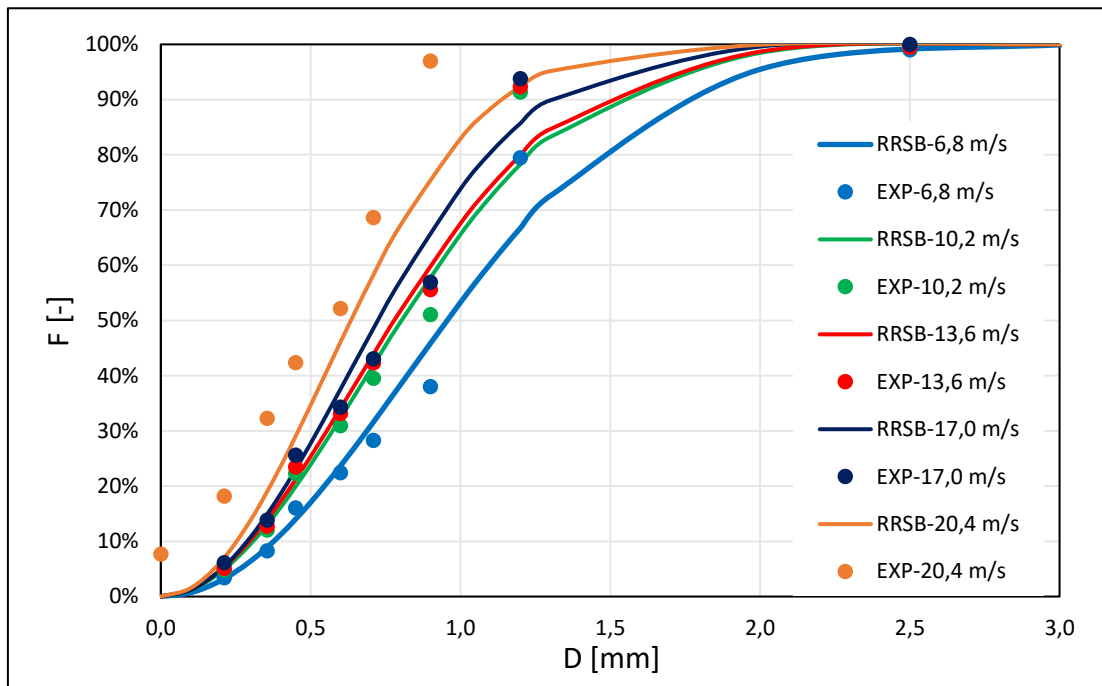
6.3.2 Vliv otáček

Tato kapitola je zaměřená na vliv otáček a jejich dopad na jednotlivé charakteristiky rozpojované bukové štěpky.

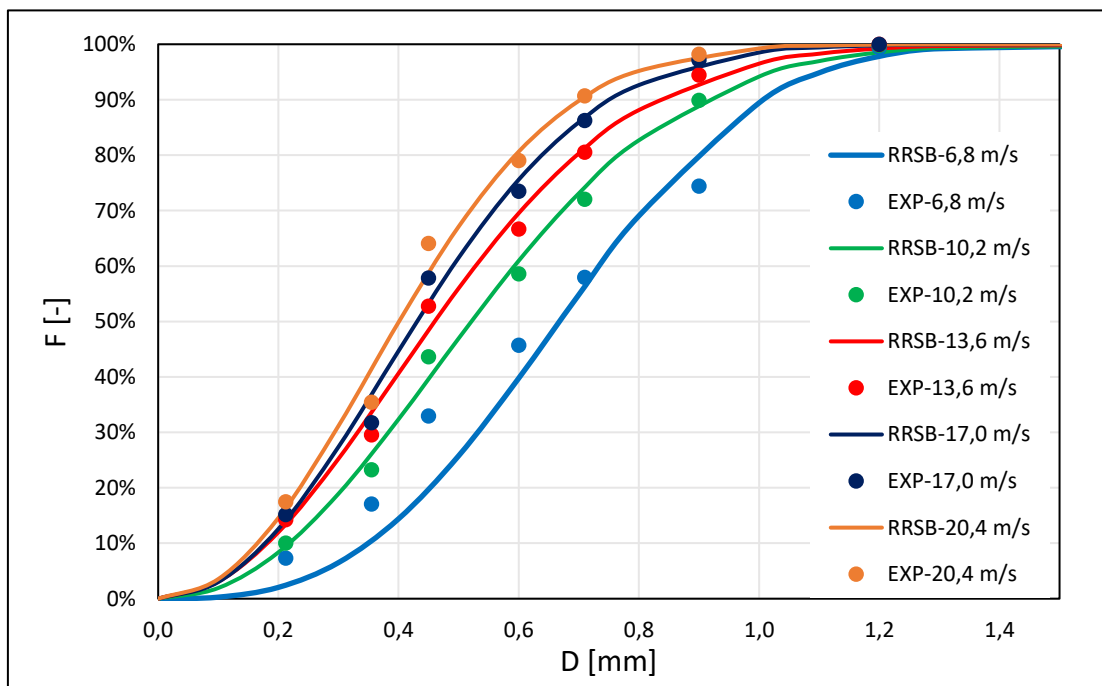
Vliv obvodové rychlosti rotoru na velikost výstupních částic pro jednotlivá propadová síta je zobrazen následujícími grafy. Pro propadové síto PS6 obr. 39, pro PS4 obr. 40, pro PS2 obr. 41, pro PS1,5 obr. 42 a pro PS1 obr. 43, kde body znázorňují experimentální hodnoty a křivky popisují RRSB model z naměřených dat. Na těchto grafech je jasně patrné, že s rostoucí obvodovou rychlostí rotoru dochází k jemnější distribuci velikosti částic. Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, je toto chování způsobeno zvýšenou četností průchodu částic dezintegrační oblastí mezi noži na statoru a noži rotoru, než se částice dostane přes propadové síto z mlecí komory nožového mlýna pryč.



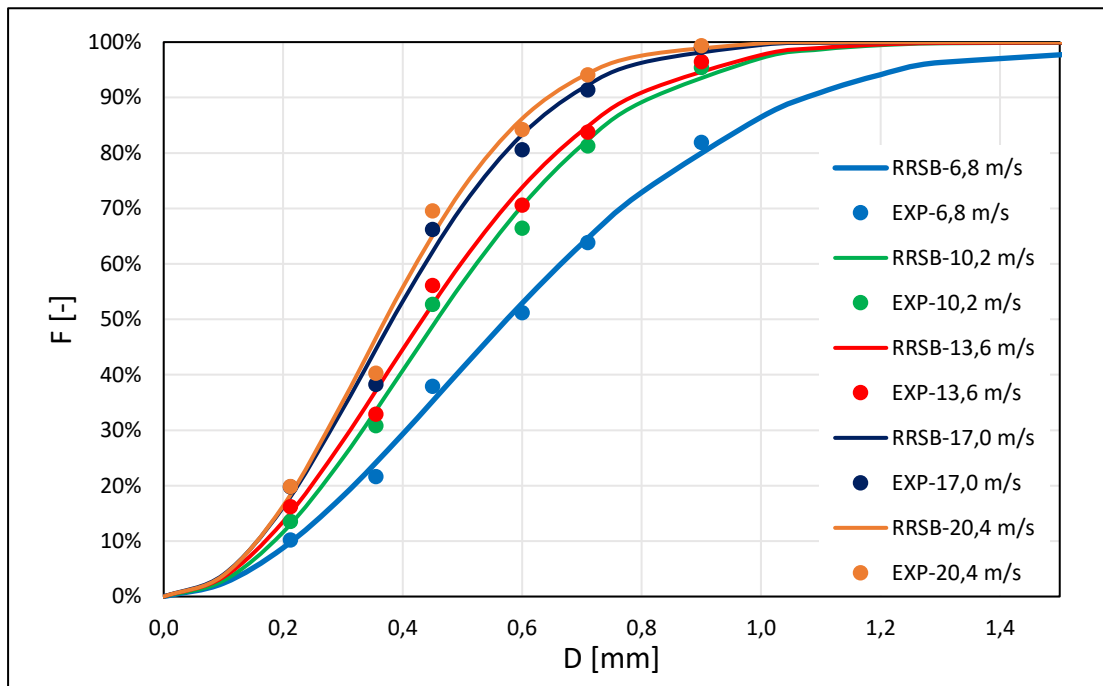
Obr. 37 Distribuce částic pro propadové síto PS6



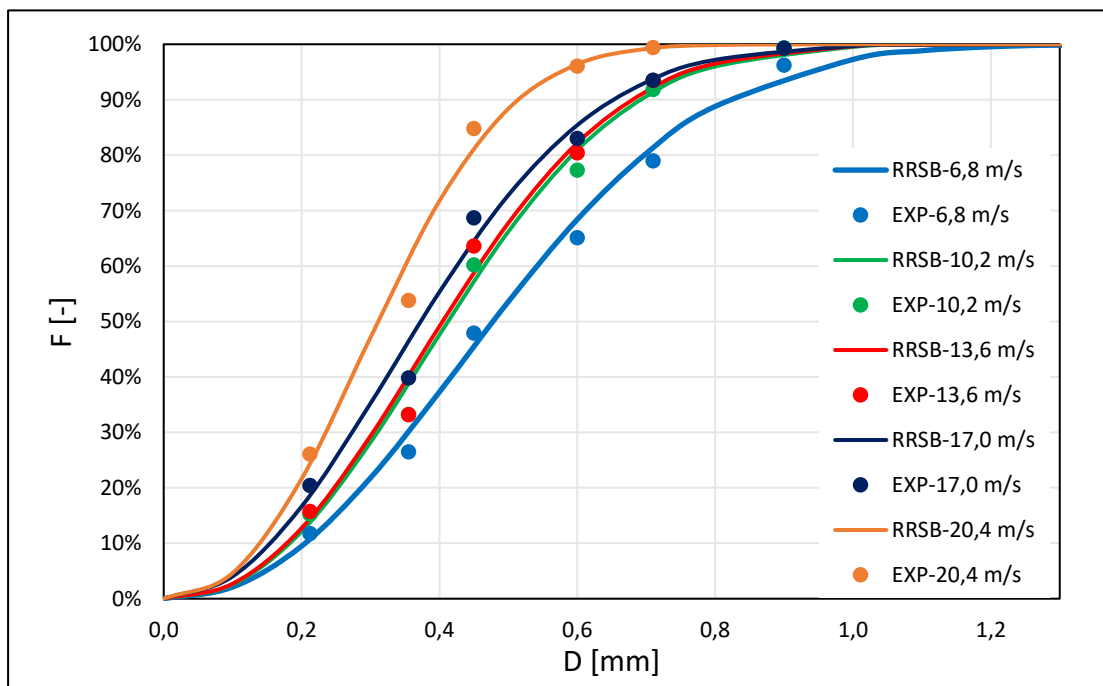
Obr. 38 Distribuce částic pro propadové síto PS4



Obr. 39 Distribuce částic pro propadové síto PS2



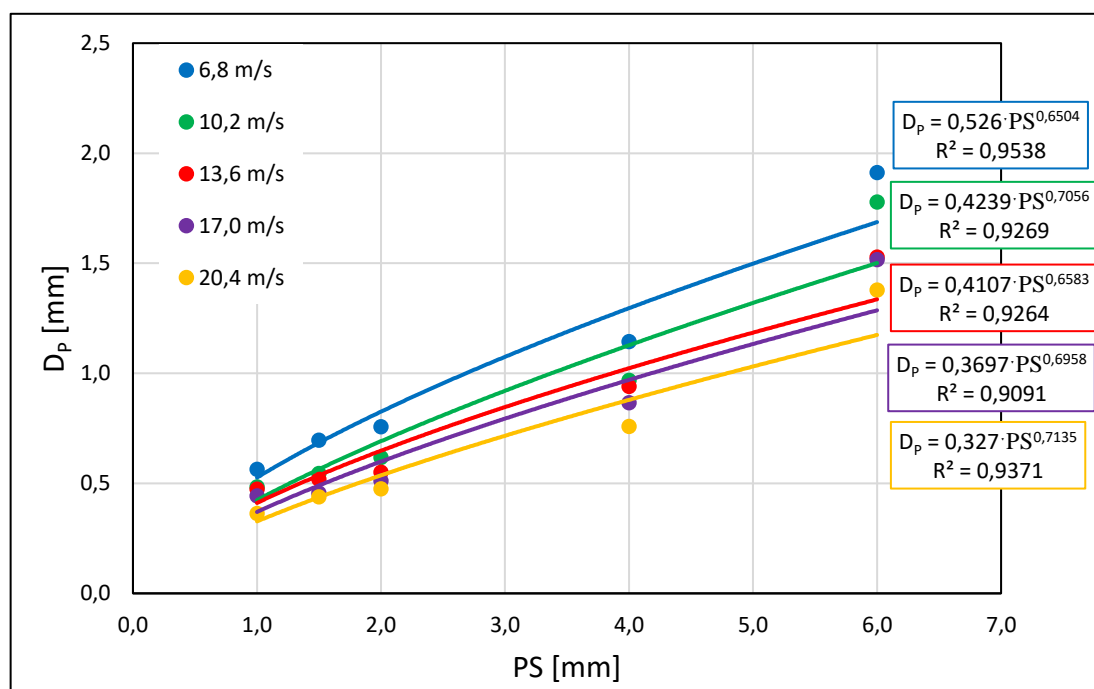
Obr. 40 Distribuce částic pro propadové síto PSI,5



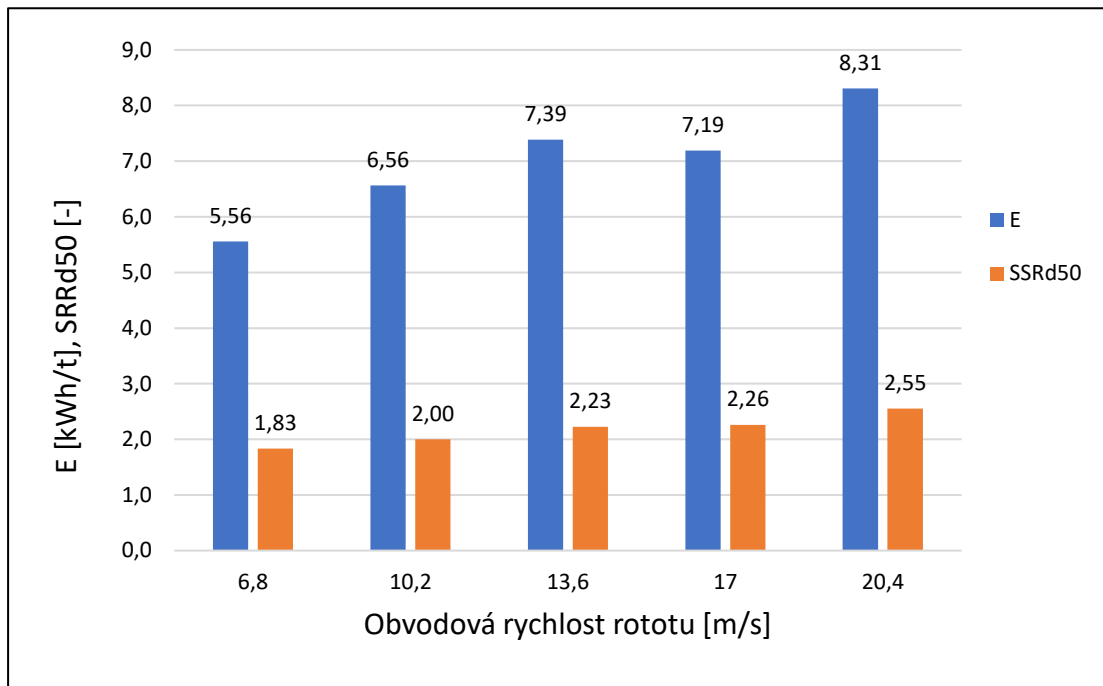
Obr. 41 Distribuce částic pro propadové síto PSI1

Na obr. 44 je vynesena závislost střední výstupní velikosti částic odpovídající 63,2 % hm. všech částic na zvoleném propadovém sítu. Pro vykreslení závislosti byly použity různé regresní modely metodou nejmenších čtverců, ale jako nejvhodnější se vždy jevil model mocninný. Toto zjištění přesně odpovídá výsledkům, ke kterým ve svých pracích došli autoři Miao et al (2011) a Souček et al (2003). Všechny modely použité v grafu jsou platné pouze pro charakteristiky zkoumané bukové štěpky, pro použitá propadová síta a použité obvodové rychlosti rotoru.

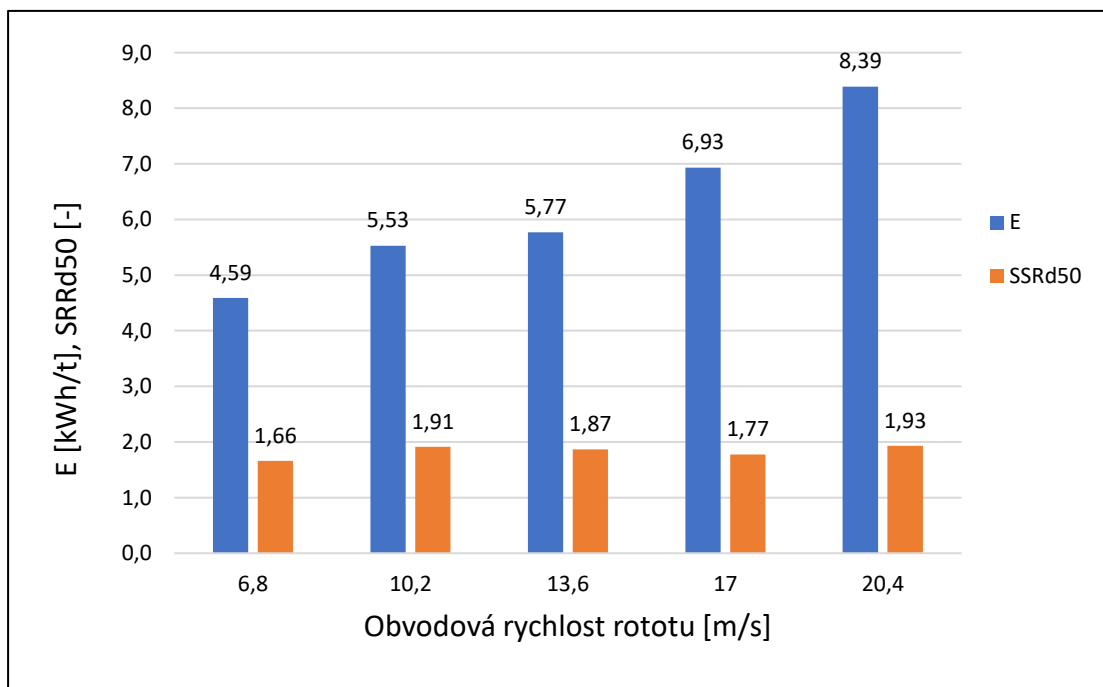
Pro znázornění a porovnání potřebného množství energie k rozmělnění bukové štěpky v závislosti na obvodové rychlosti rotoru pro jednotlivá propadová síta slouží následující grafy, na obr. 45 pro PS6, na obr. 46 pro PS4, na obr. 47 pro PS2, na obr. 48 pro PS1,5 a na obr. 49 pro PS1. Energetická náročnost se zde pohybuje v rozmezí od 1,59 kWh·t⁻¹ do 14,23 kWh·t⁻¹ při stupni rozpojení částic D₅₀ od 1,03 do 2,55. Na všech těchto grafech lze vidět zvyšující se energetickou náročnost rozmělnění při zvyšujících se otáčkách nehledě na použité propadové síta. Krom energetické náročnosti je zde zobrazen i stupeň rozpojení pro částice D₅₀, na kterém lze vidět, že s rostoucími otáčkami tento poměr roste.



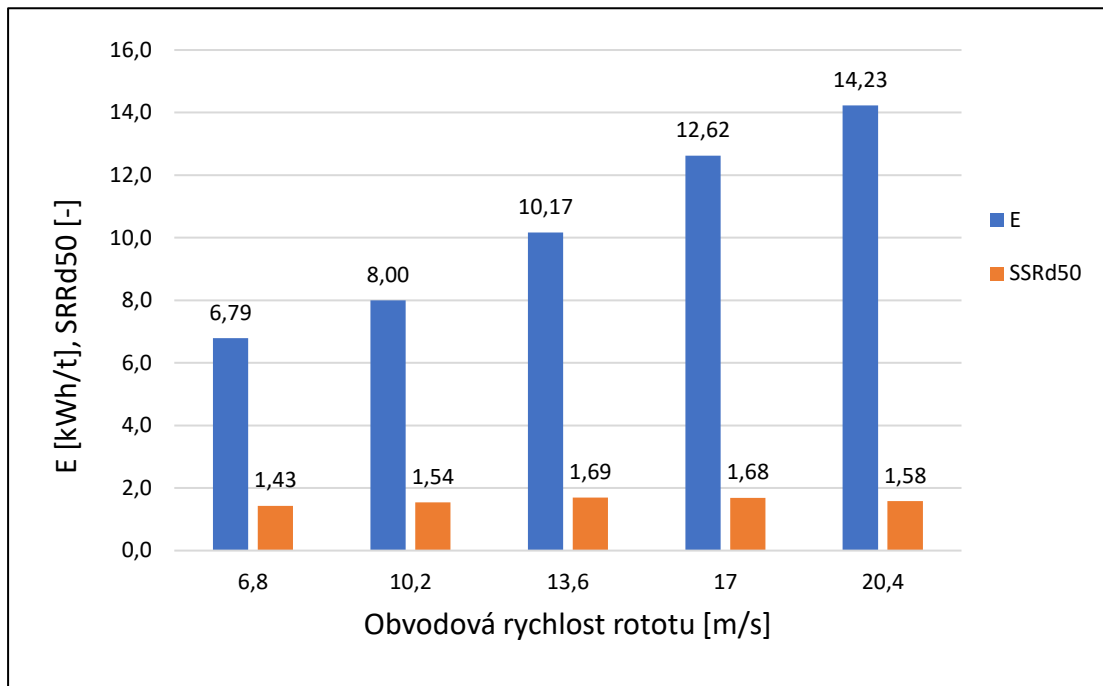
Obr. 42 Průměrná velikost částic v závislosti na propadovém sítu, body – experimentální hodnoty, křivky – mocninná spojnice experimentálních hodnot



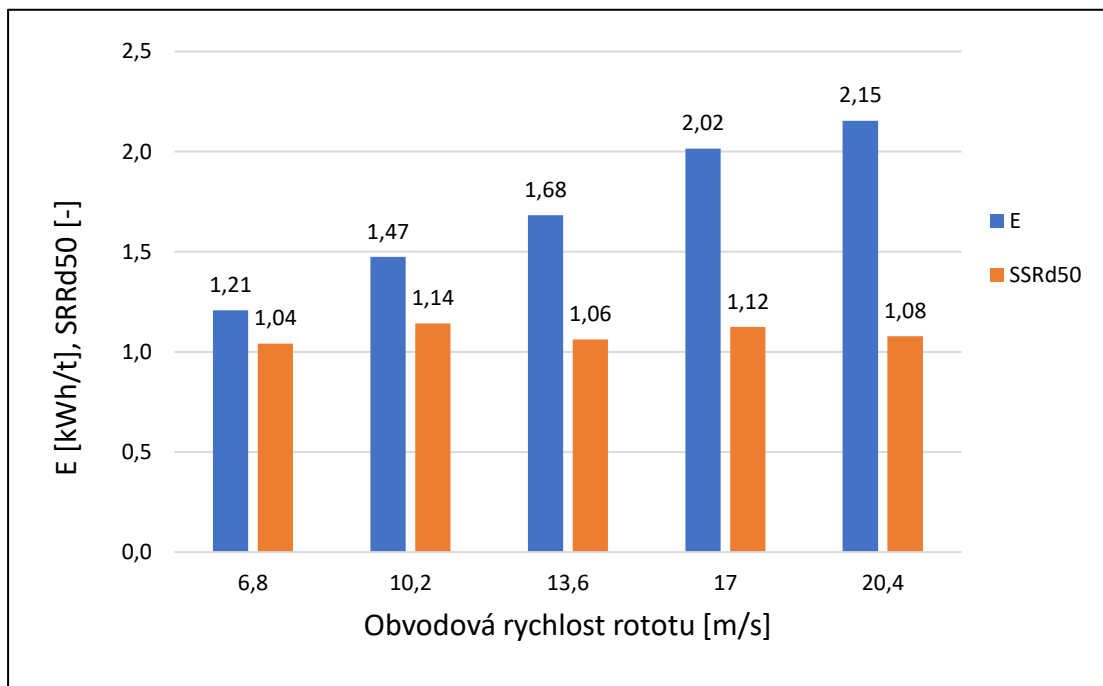
Obr. 43 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS6



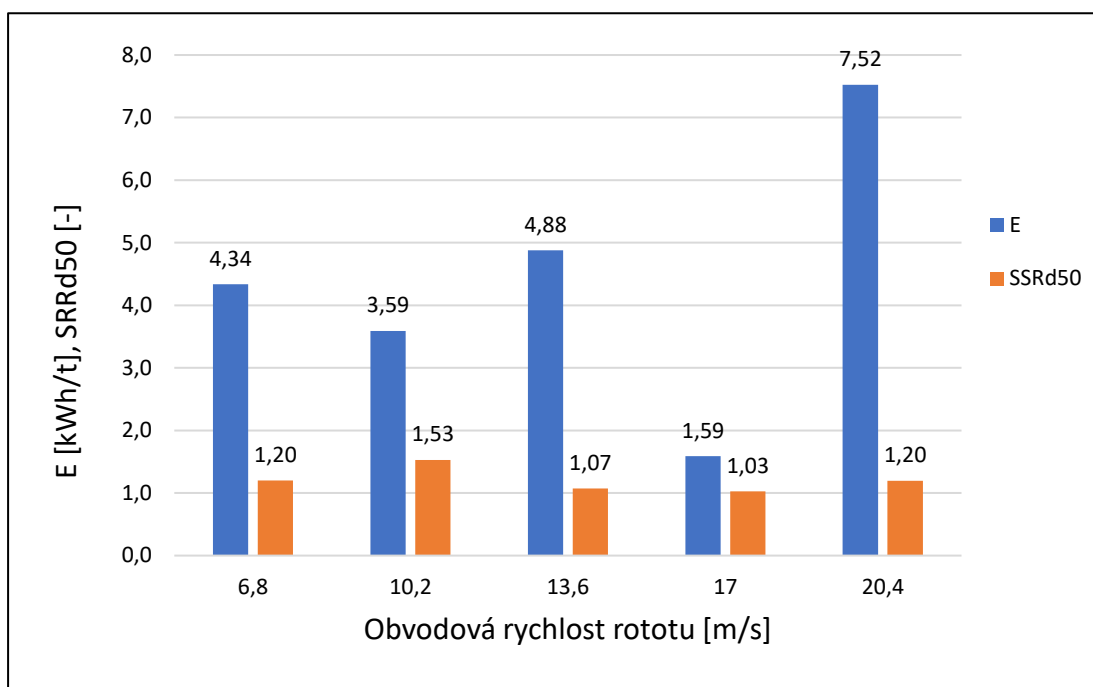
Obr. 44 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS4



Obr. 45 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS2



Obr. 46 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS1,5



Obr. 47 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS1

Jedním z kladených cílů této experimentální práce bylo popsat chování dezintegrace bukové štěpky vhodným modelem. Takový, který by predikoval velikost výstupních částic na základě obvodové rychlosti rotoru a použitého propadového síta, se podařilo vytvořit při pozorování dílčích mocninových modelů popisující charakteristickou velikost částic v závislosti na použitém sítu. Po vykreslení dílčích závislostí bylo zjištěno, že hodnoty exponentů jednotlivých modelů se od sebe příliš neliší. Při zprůměrování jejich hodnot dosahovala jejich odchylka maximálně 6 %. Z této úvahy vychází rovnice (6.5), kde D_X je charakteristická velikost částic, a je konstanta, PS proměnná veličina znázorňující propadové síto a exponent b představuje zprůměrovanou hodnotu dílčích exponentů.

$$D_X = a \cdot PS^b \quad (6.5)$$

Na základě zjištění vzájemné podobnosti exponentu byla dále pro nalezení konstanty a vykreslena mocninná závislost dílčích konstant na obvodové rychlosti rotoru, viz rovnice (6.6) kde k je konstanta a v je obvodová rychlost rotoru umocněná na konstantu c . Po dosazení této mocninné funkce do rovnice (6.7) tak získáme finální vztah vyjadřující charakteristickou velikost částic na výstupu.

Tento empirický model je platný pro dané materiálové charakteristiky pro propadová síta v rozsahu velikosti děr 1 až 6 mm.

$$a = k \cdot v^c \quad (6.6)$$

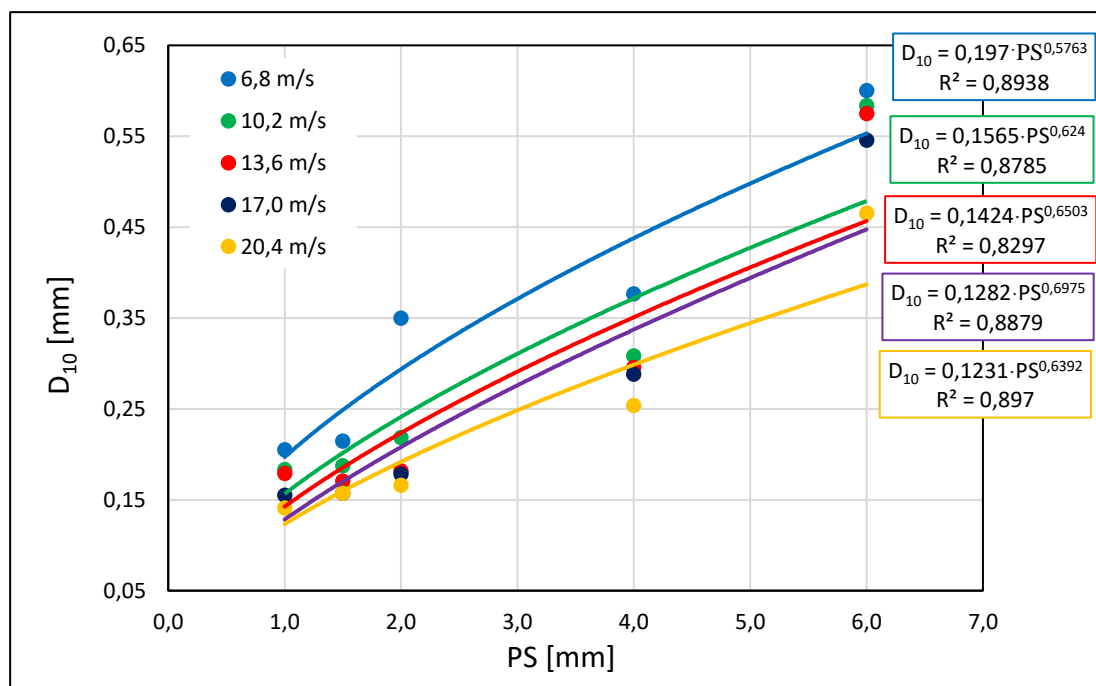
$$\Rightarrow D_x = k \cdot v^c \cdot PS^b \quad (6.7)$$

Při dodržování tohoto postupu vznikli 3 predikující modely, a to pro rozměr částic D_{10} , D_{50} a D_{90} .

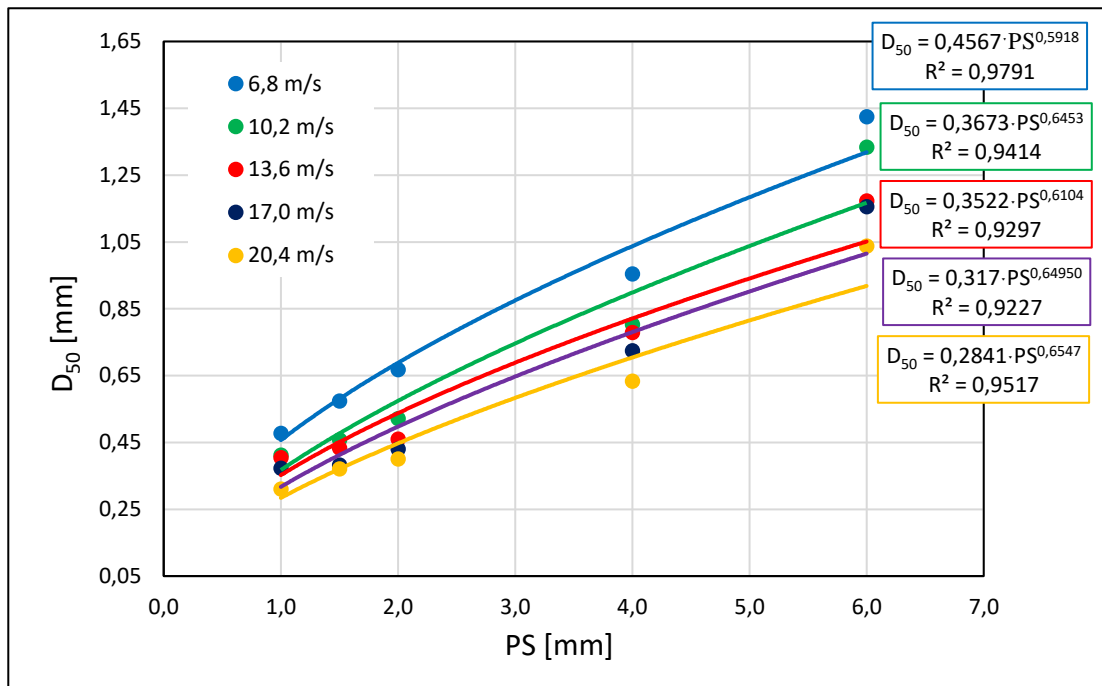
Pro částice D_{10} je závislost jejich velikosti na propadovém sítu znázorněna na obr. 50, pro D_{50} na obr. 51 a pro D_{90} na obr. 52.

Výsledný empirický model pro D_{10} vystihuje rovnice (6.8), pro částice D_{50} rovnice (6.9) a pro částice D_{90} rovnice (6.10).

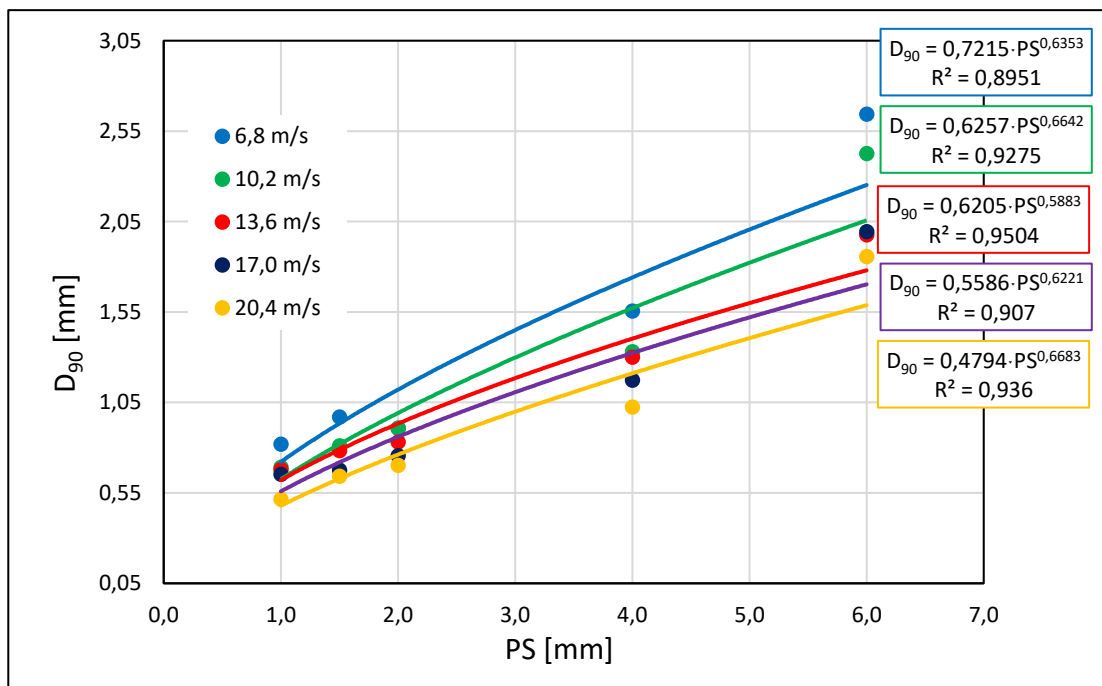
Maximální chyba modelu je z těchto tří modelů nejvyšší pro částice D_{10} , která činí rozdíl od skutečnosti až 27 %. U částic D_{50} je maximální chyba vůči výsledkům z experimentu 16 % a pro částice D_{90} 26 %.



Obr. 48 Závislost charakteristické velikosti částic D_{10} na propadovém sítu



Obr. 49 Závislost charakteristické velikosti částic D_{50} na propadovém sítu



Obr. 50 Závislost charakteristické velikosti částic D_{90} na propadovém sítu

Výsledné empirické modely:

$$D_{10} = 0,44 \cdot v^{-0,43} \cdot PS^{0,64} \quad (6.8)$$

$$D_{50} = 0,98 \cdot v^{-0,40} \cdot PS^{0,63} \quad (6.9)$$

$$D_{90} = 1,38 \cdot v^{-0,33} \cdot PS^{0,64} \quad (6.10)$$

6.3.3 Analýza energetické náročnosti

Stěžejním úkolem této diplomové práce bylo především nalezení vhodného modelu popisující energetickou náročnost rozpojení v závislosti na charakteristice biomasy.

Krátký a Jirout (2020) ve své práci pro jednodušší hodnocení a prezentaci při modelování energetické náročnosti rozmělnění pšeničné slámy vyšli ze základního Charlesova vztahu (5.6), který následně zjednodušili pouze na empirickou konstantu materiálu C a charakteristický parametr rozpojení X , viz rovnice (6.121). Aproximací experimentálních hodnot přímkou, metodou nejmenších čtverců, pak byla zjištěna konstanta materiálu C a parametr r , který pro dosažení dobré kvality modelu byl roven 2, čímž byla ověřena platnost Rittingerovy teorie i pro tento druh biomasy.

$$E = C \cdot X \quad (6.11)$$

kde parametr X je definován vztahem:

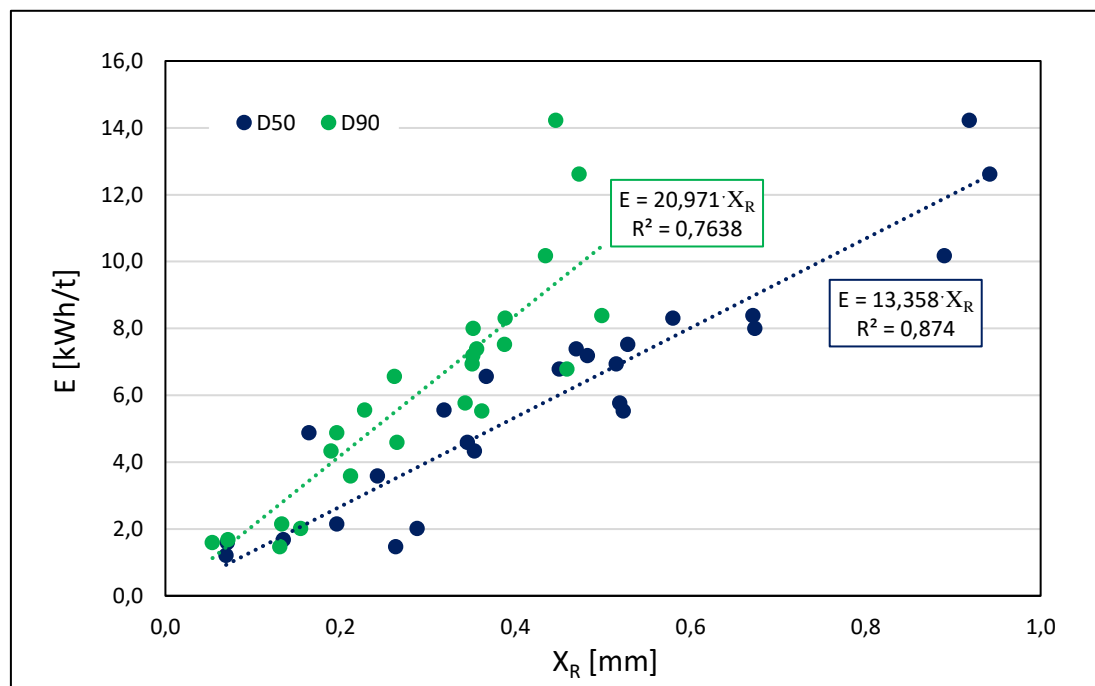
$$X = \frac{1}{r-1} \cdot \left(\frac{1}{D_{OUT}^{r-1}} - \frac{1}{D_{IN}^{r-1}} \right) \quad (6.12)$$

Vzhledem ke stejné povaze této diplomové práce a práce Krátkého a Jirouta (2020) byl využit stejný přístup k problematice modelování energetické náročnosti.

Nejprve byla brána v platnost Rittingerova teorie, kdy parametr $r = 2$. Po dosazení do rovnice (6.12) pak vychází vztah (6.13), kde D_{OUT} značí výstupní velikost částic a D_{IN} vstupní.

$$X_R = \left(\frac{1}{D_{OUT}} - \frac{1}{D_{IN}} \right) \quad (6.13)$$

Energetickou náročnost rozmělnění E v závislosti na parametru rozpojení dle Rittingera X_R s vykreslenou lineární regresí lze pak vidět na obr. 53. Při uvažování částic rozměru D_{50} pak vychází konstanta bukové štěpky $13,36 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$ a pro částice D_{90} $20,97 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$. Tyto materiálové konstanty jsou však platné pouze pro charakteristiky dané bukové štěpky za použití obvodové rychlosti rotoru $6,8$ až $20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a propadového síta s rozměry děr 1 až 6 mm .



Obr. 51 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na parametru rozpojení X_R

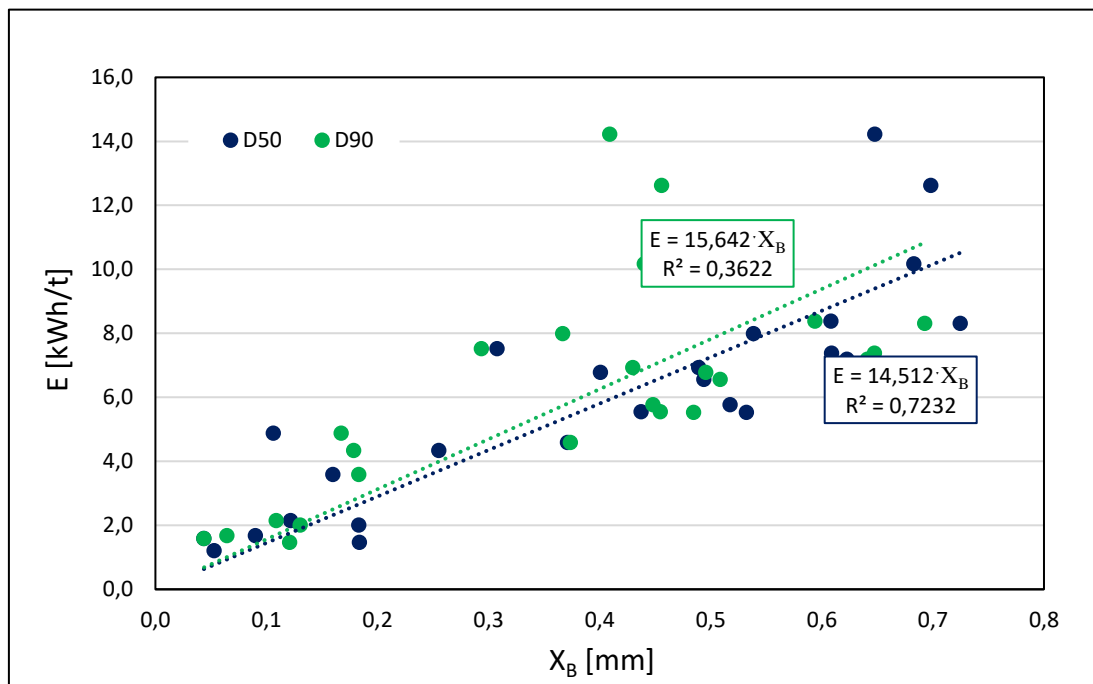
Pro potvrzení Rittingerovy teorie, jako nejlépe odpovídajícího modelu pro rozpojování bukové štěpky, byla vypočítána i verze vycházející z Bondovy teorie. Při úvaze parametru $r = 1,5$ pak dostáváme rovnici (6.14).

$$X_B = 2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{D_{OUT}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{IN}}} \right) \quad (6.14)$$

Závislost energetické náročnosti rozmělnění E na parametru rozpojení dle Bondy X_B s vykreslenou lineární regresí lze vidět na obr. 54.

Koeficient determinace u modelu dle Bondovy teorie dosahuje u částic D_{50} hodnoty $0,72$ a u částic D_{90} pak dokonce pouhých $0,36$. V porovnání s modelem dle teorie Rittingera, kde koeficient determinace nabývá pro částice D_{50} hodnoty $0,84$ a pro D_{90} $0,76$, lze pak jednoznačně dojít k závěru, že Rittingerova teorie je mnohem vhodnější k predikci energetické náročnosti. Toto stanovisko souhlasí s mnoha studiemi obsažených v teoretické

rešerši této práce, viz například Naimi et al (2013), Temmerman et al. (2013) či Krátký a Jirout (2020).



Obr. 52 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na parametru rozpojení X_B

6.3.4 Shrnutí výsledků

Pro lepší přehled jsou stěžejní výsledky shrnuty v tab. 11, v tab. 12 a v tab. 13.

Tab. 11 Shrnutí výsledků 1

v ($m \cdot s^{-1}$)	PS_{IN}/PS_{OUT} (mm)	\dot{m} ($kg \cdot h^{-1}$)	$D_{50 \text{ IN}}$ (mm)	$D_{50 \text{ OUT}}$ (mm)	E ($kWh \cdot t^{-1}$)	SRR_{D50} ($-$)
6,8	10,0/6,0	68,33	2,61	1,46	5,56	1,83
	6,0/4,0	88,44	1,46	0,96	4,59	1,66
	4,0/2,0	71,19	0,96	0,67	6,77	1,43
	2,0/1,5	98,00	0,60	0,58	1,21	1,04
	1,5/1,0	94,08	0,58	0,48	4,34	1,20
10,2	10,0/6,0	57,09	2,61	1,33	6,56	2,00
	6,0/4,0	59,46	1,39	0,80	5,53	1,91
	4,0/2,0	57,48	0,80	0,52	8,00	1,54
	2,0/1,5	128,15	0,52	0,46	1,47	1,14
	1,5/1,0	90,74	0,46	0,41	3,59	1,53
13,6	10,0/6,0	63,27	2,61	1,17	7,38	2,23
	6,0/4,0	77,05	1,31	0,78	5,77	1,87
	4,0/2,0	58,23	0,78	0,46	10,17	1,69
	2,0/1,5	130,94	0,46	0,43	1,68	1,06
	1,5/1,0	94,08	0,43	0,40	4,88	1,07
17	10,0/6,0	56,38	2,61	1,16	7,19	2,26
	6,0/4,0	59,49	1,16	0,72	6,94	1,77
	4,0/2,0	47,73	0,72	0,43	12,62	1,68
	2,0/1,5	132,11	0,43	0,38	2,02	1,12
	1,5/1,0	159,47	0,38	0,37	1,59	1,03
20,4	10,0/6,0	52,12	2,61	1,04	8,31	2,55
	6,0/4,0	59,14	1,10	0,63	8,39	1,93
	4,0/2,0	40,60	0,63	0,40	14,23	1,58
	2,0/1,5	113,36	0,40	0,37	2,15	1,08
	1,5/1,0	62,69	0,37	0,31	7,52	1,20

Tab. 12 Shrnutí výsledků 2

Parametr	Vzorec	$R^2(-)$	
RRSB model:	$D_{P_{6,8}} = 0,53 \cdot PS^{0,65}$	0,95	
	$D_{P_{10,2}} = 0,42 \cdot PS^{0,71}$	0,93	
	$D_{P_{13,6}} = 0,41 \cdot PS^{0,66}$	0,93	
	$D_{P_{17}} = 0,37 \cdot PS^{0,70}$	0,91	
	$D_{P_{20,4}} = 0,33 \cdot PS^{0,71}$	0,94	
	$n_{10,2} = 2,25 \cdot PS^{-0,07}$	0,68	
	$n_{20,4} = 2,31 \cdot PS^{-0,08}$	0,82	
Charakteristická velikost částic:	$D_{10_{6,8}} = 0,20 \cdot PS^{0,58}$	0,89	
	$D_{10_{10,2}} = 0,16 \cdot PS^{0,62}$	0,88	
	$D_{10_{13,6}} = 0,14 \cdot PS^{0,65}$	0,83	
	$D_{10_{17}} = 0,13 \cdot PS^{0,70}$	0,89	
	$D_{10_{20,4}} = 0,12 \cdot PS^{0,64}$	0,90	
	$D_{50_{6,8}} = 0,46 \cdot PS^{0,64}$	0,98	
	$D_{50_{10,2}} = 0,37 \cdot PS^{0,65}$	0,94	
	$D_{50_{13,6}} = 0,35 \cdot PS^{0,61}$	0,93	
	$D_{50_{17}} = 0,32 \cdot PS^{0,65}$	0,92	
	$D_{50_{20,4}} = 0,28 \cdot PS^{0,65}$	0,95	
	$D_{90_{6,8}} = 0,72 \cdot PS^{0,64}$	0,90	
	$D_{90_{10,2}} = 0,63 \cdot PS^{0,66}$	0,93	
	$D_{90_{13,6}} = 0,62 \cdot PS^{0,59}$	0,95	
	$D_{90_{17}} = 0,56 \cdot PS^{0,62}$	0,91	
	$D_{90_{20,4}} = 0,48 \cdot PS^{0,67}$	0,94	
	Výsledné empirické modely:	$D_{10} = 0,44 \cdot v^{-0,43} \cdot PS^{0,64}$	0,73
		$D_{50} = 0,98 \cdot v^{-0,40} \cdot PS^{0,63}$	0,84
		$D_{90} = 1,38 \cdot v^{-0,33} \cdot PS^{0,64}$	0,74

Tab. 13 Shrnutí výsledků 3

Parametr	Vzorec	$R^2(-)$
Energetická náročnost rozmělnění		
dle Rittingera:	$E = C_R \cdot \left(\frac{1}{D_{OUT}} - \frac{1}{D_{IN}} \right)$	-
	$C_{R_D50} = 13,36 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$	0,87
	$C_{R_D90} = 20,97 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$	0,76
dle Bonda:	$E = 2C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{D_{OUT}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{IN}}} \right)$	-
	$C_{B_D50} = 14,51 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$	0,72
	$C_{B_D90} = 15,64 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$	0,36

Rozsah platnosti modelů:

- Charakteristika bukové štěpky
 - obsah sušiny $92,23 \pm 0,03$ % hm.
 - obsah organických látek $99,37 \pm 0,05$ % hm.
- Nožový mlýn
 - tříbřitý rotor
 - obvodová rychlost rotoru $6,8 - 20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
 - Rozměr děr propadového síta $1,0 - 6,0 \text{ mm}$
- Velikost charakteristických částic v rozsahu:
 - $0,14 - 0,60 \text{ mm}$ pro D_{10}
 - $0,31 - 1,43 \text{ mm}$ pro D_{50}
 - $0,51 - 2,64 \text{ mm}$ pro D_{90}

7 Závěr

V rámci této diplomové práce byl zpracován přehled dostupnosti odpadů s lignocelulózovým základem spolu s jeho charakteristikami. Součástí rešerše byly i používané způsoby analýzy jednotlivých částic, kdy bylo zjištěno, že jako nejvhodnější model k popisu distribuce velikosti částic je model RRSB, který byl později v praktické části také použit.

V následujících kapitolách byly popsány nejužívanější dezintegrační jednotky pro rozpojování suché dřevnaté biomasy a jednotlivé faktory ovlivňující energetickou náročnost rozmělnění. Práce se rovněž zaměřuje na modelování energetické náročnosti rozpojování v závislosti na charakteristikách biomasy s lignocelulózovým základem, kdy se jako nejvhodnější model pro popis energetické náročnosti jeví model Rittingera, ač byl původně navrhnout pro křehké částice nerostných surovin.

V praktické části diplomové práce byly provedeny systematické experimenty zabývající se stanovením rozpojovací energie v závislosti na charakteristice bukové štěpky jako vybrané biomasy s lignocelulózovým základem. Ta vykazovala vlhkost $7,77 \pm 0,03$ % hm. a obsah organických látek $99,37 \pm 0,05$ % hm. Pro dezintegraci bukové štěpky byl použit nožový mlýn s rotorem se třemi břity. Z hlediska prezentace výsledků pak byla práce rozdělena na tři části.

V té první byla analyzována chyba měření, kdy bylo zjištěno, že s růstem velikosti částic současně roste i samotná chyba měření, jež dosahovala u propadového síta s rozměry děr 6 mm chybu 18 %. V rámci této kapitoly byla porovnána chyba i z hlediska počtu otáček, kdy vyšlo najevo, že větší chyba se vyskytuje u otáček nižších. Na konci této kapitoly se nalézá vzájemné porovnání energetické náročnosti rozmělnění s chybovými úsečkami a stupně rozmělnění při otáčkách 1500 ot min^{-1} a 3000 ot min^{-1} . Z tohoto porovnání pak vyplývá, že se zmenšováním děr propadového síta klesá efektivita vysokých otáček, při kterých roste energetická náročnost rozpojení a současně klesá stupeň rozpojení.

Druhá kapitola pojednává o vlivu otáček na jednotlivé charakteristiky rozmělněvané bukové štěpky. Byly vykresleny grafy znázorňující distribuci částic pro jednotlivá propadová síta při změně obvodové rychlosti otáčení rotoru. Z vynesných dat do grafické podoby je pak jasně patrné, že vyšší obvodová rychlost rotoru má za následek vznik menších částic na výstupu, což je způsobeno zvýšenou četností průchodu částic mlecí komorou. Dále byla vykreslena závislost střední výstupní velikosti částic na zvoleném propadovém sítu. K popisu závislosti byl použit mocninný regresní model metodou nejmenších čtverců, který tuto

závislost popisoval oproti ostatním regresním modelům nejlépe. Dále byly vyneseny grafy znázorňující potřebné množství energie k rozpojení bukové štěpky v závislosti na obvodové rychlosti rotoru pro jednotlivá propadová síta, na kterých lze dobře vidět zvyšující se energetickou náročnost rozmělnění nehledě na použité síto. Samotná energetická náročnost se pohybovala v rozmezí od $1,59 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ do $14,23 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ při stupni rozpojení částic D_{50} od 1,03 do 2,55. Důležitým bodem této kapitoly je empirický model predikující velikost výstupních částic na základě obvodové rychlosti rotoru a použitého propadového síta. Maximální chyba tohoto modelu se liší na základě typu sledovaných částic, ale lze konstatovat, že jeho rozdíl od skutečnosti je cca 20 %. Platnost tohoto modelu je však pouze v mezích testované obvodové rychlosti rotoru, bukové štěpky coby vstupního materiálu a použitých propadových sít.

Ve třetí kapitole byla zkoumána energetická náročnost rozmělnění a její vhodný empirický model, který by ji predikoval. Na základě teoretické rešerše byla vyzkoušena Rittingerova i Bondova teorie. Z výsledků poté vyplynulo, že pro predikci energetické náročnosti rozmělnění bukové štěpky je vhodnější model Rittingera, čímž byly potvrzeny domněnky plynoucí z teoretické části, kde autoři došli s podobnou vstupní surovinou ke stejným závěrům. Ukazuje se tedy, že i buková štěpka s vlhkostí 7,8 % hm. vykazuje křehké chování a může být pro její predikci využit Rittingerův model. Samotná Rittingerova konstanta materiálu potřebná k modelování energetické náročnosti bukové štěpky vyšla pro částice D_{50} $13,36 \text{ kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$ a pro částice D_{90} $20,97 \text{ kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$.

Seznam použitých symbolů

a	Konstanta	(-)
\bar{a}	Aritmetická střední velikost částic	(mm)
A_{ε}	Skutečný povrch částice	(mm ²)
A_k	Povrch koule mající stejný objem jako měřená částice	(mm ²)
A_P	Plocha částice při jejím promítnutí do 2D	(mm ²)
b	Konstanta	(-)
c	Konstanta	(-)
C	Konstanta	(-)
C_R	Rittingerova konstanta	(kWh mm t ⁻¹)
C_B	Bondova konstanta	(kWh mm t ⁻¹)
C_K	Kickova konstanta	(kWh mm t ⁻¹)
$C_{R_{D50}}$	Rittingerova konstanta pro částice D ₅₀	(kWh mm t ⁻¹)
$C_{R_{D90}}$	Rittingerova konstanta pro částice D ₉₀	(kWh mm t ⁻¹)
$C_{B_{D50}}$	Bondova konstanta pro částice D ₅₀	(kWh mm t ⁻¹)
$C_{B_{D90}}$	Bondova konstanta pro částice D ₉₀	(kWh mm t ⁻¹)
\bar{d}_i	Geometrická střední velikost částic na sítu i	(mm)
D_{10}	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 10 hm. %	(mm)
D_{50}	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 50 hm. %	(mm)
D_{90}	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 90 hm. %	(mm)
D	Velikost částic	(mm)
$D_{F_{min}}$	Minimální Feretův průměr	(mm)
$D_{F_{max}}$	Maximální Feretův průměr	(mm)
D_{gm}	Geometrická střední velikost částic	(mm)
D_k	Průměr koule mající stejný objem jako měřená částice	
D_{IN}	Velikost částic před mletím	(mm)
D_{OUT}	Velikost částic po mletí	(mm)

D_P	Velikost částic v kumulativním hmotnostním podílu 63,2 hm. %	(mm)
D_X	Charakteristická velikost částic	(mm)
E	Energetická náročnost rozmělnění	(W s kg ⁻¹)
E_A	Energetická náročnost mletí	(W s kg ⁻¹)
E_M	Rozdělení dle hmotnosti částic	(g)
E_N	Rozdělení dle počtu částic	(-)
F	Kumulativní hmotnostní podíl	(hm. %)
g	průměr otvorů propadového síta mlýnu	(mm)
H	Vlhkost materiálu	(hm. %)
i	Síto	(-)
k	Konstanta	(-)
k_1	Konstanta	(-)
k_2	Konstanta	(-)
m	Hmotnost vzorku	(kg)
M	Konstanta charakterizující druh dřeva	(-)
M_i	Hmotnost částic na sítu i	(kg)
n	Index polydispersity	(-)
N	Otáčky za minutu	(ot min ⁻¹)
O	Obvod částice při jejím promítnutí do 2D	(mm)
P_N	Křivka propadu	(-)
P_{NP}	Výkon mlýnu při běhu na prázdko	(W)
P_M	Výkon mlýnu při mletí suroviny	(W)
PS	Propadové síto	(-)
PSg	Propadové síto s rozměrem propadových otvorů g	(-)
PSg_{IN}	Propadové síto s rozměrem propadových otvorů g před mletím	(-)
PSg_{OUT}	Propadové síto s rozměrem propadových otvorů g po mletí	(-)
r	Konstanta	(-)
R^2	Koeficient determinace	(-)
$RRSB$	Rosin-Rammler-Sperling-Bennetova distribuce	(-)
t	Čas	(s)
SRR	Stupeň rozpojení	(-)

SRR_{D50}	Stupeň rozpojení částic D_{50}	(-)
v	Obvodová rychlost rotoru	($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
x_i	Velikost propadových otvorů síta i	(mm)
\bar{x}_i	Geometrická střední hodnota síta i	(mm)
X	Parametr definovaný rovnicí (6.12)	($\text{mm}^{\text{r}-1}$)
X_{gm}	Geometrický průměr částic	(mm)
X_R	Parametr definovaný rovnicí (6.13)	($\text{mm}^{\text{r}-1}$)
X_B	Parametr definovaný rovnicí (6.14)	($\text{mm}^{\text{r}-1}$)
Z_N	Křivka zbytku	(-)

Seznam použité literatury

- ADAPA P., L. TABIL, and G. SCHONEAU. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. *Biomass and Bioenergy*. 2011, 35(1): 549-561.
- ALSTON AND BIRD LLP. *Disc mill*. Vynálezce: Karlheinz Herbold, Holger Watzelt. Příhl. 13. 12. 2004. MPT: B 02 C 1/08, Čís. patentu US 2007 / 0181723 A1, 27. 03. 2007. Databáze patentů ESPACENET.
- ANSI/ASAE S424.1 MAR1992 (R2017). Method of Determining and Expressing Particle Size of Chopped Forage Materials by Screening. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2017. USA.
- ARMSTRONG P. R.; LINGENFELSER, J. E.; MCKINNEY, L. The effect of moisture content on determining corn hardness from grinding time, grinding energy, and near-infrared spectroscopy. *Appl. Eng. Agric.* 2007, 23, 793–799.
- BALK W. A. Energy requirements for dehydrating and pelleting coastal bermudagrass. *Trans. ASAE* 1964, 7, 349–351.
- BITRA V. S. P., A. R. WOMAC, N. CHEVANAN, P. I. MIU, C. IGATHINATHANE, S. SOKHANSANJ, and D. R. SMITH. 2009. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. *Powder Technology*. 193(1): 32-45.
- BITRA V. S. P.; A. R. WOMAC, C. IGATHINATHANE, and S. SOKHANSANJ. Knife mill comminution energy analysis of switchgrass, wheat straw, and corn stover and characterization of particle size distributions. *Trans. ASABE* 2010, 53, 1639–1651.
- DINTER OSKAR. *Drcení a mletí nerostných surovin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- EISENLAUER, MORITZ, and TEIPEL. Comminution of Wood – Influence of Process Parameters. *Chemical Engineering & Technology*. 2020, 43(5), 838-847. DOI: 10.1002/ceat.201900488. ISSN 0930-7516.
- HEMERKA JIŘÍ. *Odlučování tuhých částic*. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01088-0.
- HRNČÍŘOVÁ MICHAELA, LISÝ MARTIN. 2015. *Energie z biomasy XVI: sborník příspěvků z konference*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. ISBN 978-80-214-5286-2.

- HUKKI R. T. Minerals Beneficiation - Proposal for a Solomonian Settlement Between the Theories of von Rittinger, Kick, and Bond. 1961. *Trans. AIME*, 223, 403–408.
- INDIAMART. 2020. *Single Phase Sieve Shaker Machine*. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/sieve-shaker-machine-12947348948.html>.
- KRÁTKÝ, L. and T. JIROUT. Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. *Chemical Eng.* 2011, roč. 34, č. 3, s. 391–399. DOI: 10.1002/ceat.201000357.
- KRÁTKÝ LUKÁŠ, and TOMÁŠ JIROUT. *Modelling of particle size characteristics and specific energy demand for mechanical size reduction of wheat straw by knife mill*. 2020. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.06.005.
- KRÁTKÝ LUKÁŠ. *Technologie a zařízení pro intenzifikaci termo- a biochemické konverze odpadů na ušlechtilé chemické látky a biopaliva*. 2015. Praha. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- KUMARI D., R. SINGH. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. 2018. *Renew Sustain Energy Rev*, 90, pp. 877-891.
- KSP.TUL. *Drcení a mletí*. 2020 [cit. 2020-07-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/03.htm.
- LOKAJ A., a K. VAVRUŠOVÁ. *Laboratorní testování rázové houževnatosti dřeva*. 2010 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/83653/FAST-2010-10-1-27-lokaj.pdf?sequence=2>.
- LUO, S., B. XIAO, Z. HU and S. LIU. Effect of particle size on pyrolysis of single-component municipal solid waste in fixed bed reactor. 2010. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(1), 93-97. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.048.
- MACKO MAREK. 2012. Size Reduction by Grinding as an Important Stage in Recycling, Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production, Prof. Enri Damanhuri. *IntechOpen*. DOI: 10.5772/33969.
- MANI, S., L. G. TABIL, and S. SOKHANSANJ. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 27(4): 339-352.
- MENDELU. *Mechanické vlastnosti dřeva*. 2020 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?fit_w=1;cast=9190.

- MIAO Z., T. E. GRIFF, A. C. HANSEN, and K. C. TING. 2011. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Ind. Crops and Products* 33(2): 504-513.
- MICROTRAC MRB. 2020. *Dynamická analýza obrazu*. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.microtrac.cz/cz/produkty/analýza-velikosti-a-tvaru-castic/dynamicka-analyza-obrazu/camsizer-p4/funkce-a-charakteristiky/>.
- NAIMI LADAN JAFRI. *A study of cellulosic biomass size reduction*. 2016. Vancouver. Dizertační práce. University of British Columbia Library. DOI: 10.14288/1.0224813.
- NAIMI L.J., S.SOKHANSANJ, X. BI, C. J. LIM, A. R. WOMAC, A. K. LAU, S. MELIN. Development of size reduction equations for calculating energy input for grinding lignocellulosic particles. *Applied Engineering in Agriculture*. 2013. Volume 29, Issue 1, s. 93-100. ISSN 0883-8542.
- OCHODEK, T., J. KOLINIČNÝ a P. JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy*. 2010 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>.
- OYEDEJI O., P. GITMAN, J. QU, E. WEBB. Understanding the Impact of lignocellulosic Biomass Variability on the Size Reduction Process: A Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020, roč. 8, 2327-2343. DOI: 10.1021/acssuchemeng.9b06698.
- PABST, W., E. GREGOROVÁ. 2007. *Charakterizace částic a částicových soustav*. VŠCHT Praha, 109 s.
- PATRIA, *Spotřeba ropy*. 2020. [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://www.patria.cz/zpravodajstvi/4413253/iea-globalni-spotreba-ropy-vrcholu-jeste-nedosahla.html>.
- PHANPHANICH M., and S. MANI. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresour. Technol.* 2011, 102, 1246–1253.
- REPPÉLIN V., A. GOVIN, M. ROLLAND, and R. GUYONNET. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass Bioenergy*. 2010, 34, 923–930.
- RIEGER F., V. NOVÁK a T. JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.

- SOUČEK J., I. HANZLÍKOVÁ, P. HUTLA. A fine desintegration of plants suitable for composite biofuels production. *Res. Agr. Eng.* 2003, 49: 7-11.
- SRINKANTH TANGIRALA, K. CHARITHKUMAR, and T.K. GOSWAMI. Modelling of size reduction, particle size analysis and flow characterisation of spice powders ground in hammer and pin mills. *International Journal of Research in Engineering and Technology.* 2014, 3, 296-309.
- SVOBODA K., M. POHOŘELÝ, M. HARTMAN, and J. MARTINEC. Pretreatment and Feeding of Biomass for Pressurized Entrained Flow Gasification. *Fuel Process. Technol.* 2009, 90(5), 629-635.
- TEMMERMAN M., P.D. JENSEN, J. HÉBERT. Von Rittinger theory adapted to wood chip and pellet milling, in a laboratory scale hammermill. *Biomass Bioenergy.* 2013, roč. 56, s. 70-81. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.04.020.
- UJEP. *Rozpojování*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2015a. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/5%20Rozpojovani.pdf.
- UJEP. *Třídění*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 2015b. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/7%20Trideni.pdf.
- VŠB. *Základní mechanické vlastnosti dřeva*. 2020 [cit. 2020-08-05]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zkouseni.
- VŠCHT. *Analýza částic Velikost částic*. 2012 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: http://fchi-oppa.VSCHT.cz/uploads/AK07-Spec%20metody/10_Analyza_castic.pdf.
- WILLIAMS O., E. LESTER, S. KINGMAN, D. GIDDINGS, S. LORMOR, and C. EASTWICK. Benefits of dry comminution of biomass pellets in a knife mill. *Biosystems Engineering.* 2017, 160, 42-54.
- ZHANG M. 2014. *Size Reduction of Cellulosic Biomass for Biofuel Manufacturing*. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas.

Seznam obrázků

Obr. 1 Struktura lignocelulózové biomasy (Straka, 2006)	9
Obr. 2 Dynamický analyzátor obrazu CAMSIZER P4 od firmy Microtrac MRB	13
Obr. 3 Zařízení pro síťovou analýzu (Indiamart, 2020).....	14
Obr. 4 Martinův průměr	15
Obr. 5 Feretův průměr.....	15
Obr. 7 Příklad distribuce znázorněné kumulativní křivkou zrnitosti (Hemerka, 1994)	17
Obr. 6 Příklad distribuce znázorněné křivkou relativní četnosti (Hemerka, 1994)	17
Obr. 8 Principy rozpojování pevných částic (Rieger et al., 2015) a – drcení, b – trhání, c – smýkání, d – lámání, e – otírání, f – rozbíjení, g - rozlupování	20
Obr. 9 Přehled používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkosti suroviny (Krátký, 2015).....	21
Obr. 10 Vpravo: nožový mlýn, vlevo: typy rotorů. (Hrnčířová a Lisý, 2015)	22
Obr. 11 Schéma úderového mlýnu (Macko, 2012)	23
Obr. 12 Diskový mlýn (Alston a Bird, 2007; Krátký, 2015).....	23
Obr. 13 Vpravo: Hardingův kulový mlýn, vlevo: princip funkce kulového mlýnu (Rieger et al., 2005)	24
Obr. 14 Vibrační kulový mlýn (Rieger et al., 2005) 1 – žlab, 2 – hřídel, 3 – excentrická závaží, 4 – válcové pružiny, 5 – plochý pružinový rám.....	24
Obr. 15 Přehled závislosti energetické náročnosti rozmělnění na proměnných veličinách (Oyededeji et al., 2020)	26
Obr. 16 Závislost energetické náročnosti rozpojení na rychlosti plnění (Naimi, 2013).....	27
Obr. 17 Změna energetické náročnosti na výstupní velikosti (Zhang, 2014).....	28
Obr. 18 Základní anatomické směry ve dřevě (VŠB, 2020)	29
Obr. 19 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na obsahu vlhkosti v experimentu Zhanga (2014).....	33
Obr. 20 Porovnání závislosti spotřeby energie u mletí na žádanou střední velikost částic u torefikovaného, suchého a předsušeného dřeva (Svoboda, 2009)	34
Obr. 21 Měrná spotřeba energie v závislosti na stupni rozpojení dle Rittingera, Bonda a Kicka (Naimi, 2013)	38
Obr. 22 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu při vlhkosti 8 % hm. (Mani et al, 2004)	41
Obr. 23 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu při vlhkosti 12 % hm. (Mani et al, 2004)	41
Obr. 24 Závislost energ. náročnosti rozmělnění na průměru děr síta v mlýnu (překlad: Wheat – Pšenice, Oat – Oves, Canola – Řepka, Barley – Ječmen) (Adapa et al, 2011).....	42
Obr. 25 Velikost štěpky před rozmělněním	44
Obr. 27 Distribuce vstupního vzorku znázorněné křivkou relativní četnosti	45
Obr. 26 Buková štěpka po mletí se sítem o velikosti děr 10 mm.....	45
Obr. 28 Distribuce vstupního vzorku znázorněné kumulativní křivkou zrnitosti body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot.....	46
Obr. 29 Nožový mlýn SM300.....	47
Obr. 30 vlevo : otevřená mlecí komora, vpravo: detail rotoru se zbytkem vstupní štěpky	47

Obr. 31 Propadová síta, zleva PS10, PS6, PS4, PS2, PS1,5, PS1	47
Obr. 32 A Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model	47
Obr. 32 B. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro propadová síta $0,5 - 3 \text{ mm}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model	51
Obr. 33 A. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model	52
br. 33 B. Distribuce velikosti částic při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro propadová síta $0,5 - 3$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – RRSB model.....	52
Obr. 34 Charakteristická velikost částic v závislosti na propadovém sítu při rychlosti rotoru $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot.....	52
Obr. 35 Charakteristická velikost částic v závislosti na propadovém sítu při rychlosti rotoru $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot.....	53
Obr. 36 Průměrná velikost částic v závislosti na propadovém sítu pro $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot	54
Obr. 37 Index polydisperzity v závislosti na propadovém sítu s chybovými úsečkami, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot.....	54
Obr. 38 Porovnání energetické náročnosti rozmělnění, poměru energetické náročnosti rozmělnění a poměru střední velikosti částic s chybovými úsečkami.....	55
Obr. 39 Distribuce částic pro propadové síto PS6	56
Obr. 40 Distribuce částic pro propadové síto PS4	57
Obr. 41 Distribuce částic pro propadové síto PS2	57
Obr. 42 Distribuce částic pro propadové síto PS1,5	58
Obr. 43 Distribuce částic pro propadové síto PS1	58
Obr. 44 Průměrná velikost částic v závislosti na propadovém sítu, body – experimentální hodnoty, křivky – mocinná spojnice experimentálních hodnot	59
Obr. 45 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS6	60
Obr. 46 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS4	60
Obr. 47 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS2	61
Obr. 48 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS1,5	61
Obr. 49 Energetická náročnost rozmělnění a stupeň rozpojení částic D_{50} v závislosti na obvodové rychlosti rotoru na propadovém sítu PS1	62
Obr. 50 Závislost charakteristické velikosti částic D_{10} na propadovém sítu	63
Obr. 51 Závislost charakteristické velikosti částic D_{50} na propadovém sítu	64
Obr. 52 Závislost charakteristické velikosti částic D_{90} na propadovém sítu	64

Obr. 53 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na parametru rozpojení X_R	66
Obr. 54 Energetická náročnost rozmělnění v závislosti na parametru rozpojení X_B	67

Seznam tabulek

Tab. 1 Světová produkce biomasy a její charakteristiky (Krátký, 2015)	10
Tab. 2 Odhad odpadní biomasy pro ČR v roce 2010 (Ochodek at al., 2010).....	11
Tab. 3 Požadavky na velikost částic dle způsobu zpracování biomasy (Oyedjeji et al., 2020).....	11
Tab. 4 Energetická náročnost mletí vybraných druhů rostlinné biomasy (Krátký, 2015)	25
Tab. 5 Mez pevnosti v tlaku pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 hm. % a 30 hm. % a více (Mendelu, 2020)	30
Tab. 6 Mez pevnosti v tahu pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 % hm. a 30 % hm. a více (Mendelu, 2020)	30
Tab. 7 Mez pevnosti ve střihu pro vybrané druhy dřeva při vlhkosti 12 % hm. (Mendelu, 2020).....	31
Tab. 8 Rázová houževnatost v ohybu pro vybrané druhy dřeva	31
Tab. 9 Mez pevnosti dřeva dubu v tlaku ve směru vláken vyjádřená v % meze pevnosti při 0 °C a 0 % vlhkosti (Mendelu, 2020)	32
Tab. 10 Plán experimentu	48
Tab. 11 Shrnutí výsledků 1	68
Tab. 12 Shrnutí výsledků 2	69
Tab. 13 Shrnutí výsledků 3	70