

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**



**Diplomová práce**

Experimentální analýza a modelování energetické náročnosti rozpojování  
pšeničné slámy

2021

Kryštof Ženkl

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ženkl** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **467287**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Procesní inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Experimentální analýza a modelování energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy**

Název diplomové práce anglicky:

**Experimental determination and modelling of energy demand for mechanical size reduction of wheat straw**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte teoretickou rešerši zaměřenou na možnosti stanovení energetické náročnosti rozpojování odpadů. Provedte experimentální práce s cílem vyhodnotit energetickou náročnost rozpojení pšeničné slámy v závislosti na její vlhkosti, typu mlýnu a jeho provozních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

Dle 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: **21.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



# Anotační list

**Jméno autora:** Kryštof

**Příjmení autora:** Ženkla

**Název práce česky:** Experimentální analýza a modelování energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy

**Název práce anglicky:** Experimental determination and modelling of energy demand for mechanical size reduction of wheat straw

**Rozsah práce:** počet stran: 61  
počet obrázků: 35  
počet tabulek: 6  
počet příloh: 0

**Akademický rok:** 2020/2021

**Jazyk práce:** český

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** N071TPRI – Procesní inženýrství

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

**Anotace česky:** Práce se nejdříve věnuje rešerši důležitosti rozpojování lignocelulózoové biomasy před jejím dalším zpracováním. Dále rozebírá principy rozpojování a jednotlivá dezintegrační zařízení. Pak už se věnuje matematickým modelům, které popisují energetickou náročnost mletí. Na základě rešeršních dat byl zpracován a vyhodnocen experiment mletí pšeničné slámy. Nakonec byly popsány dva modely pro energetickou náročnost a pro distribuci velikosti částic.

**Klíčová slova:** lignocelulózoová biomasa, dezintegrace, energetická náročnost mletí, distribuce velikosti částic

**Abstract:** The thesis first investigates the importance of disintegration of lignocellulosic biomass before its further processing. Then it discusses the principles of disintegration and individual disintegration devices. Then it discusses mathematical models that describe the energy consumption of milling. On the basis of research data, a wheat straw milling experiment was developed and evaluated. Finally, two models for the energy consumption and for the particle size distribution were described.

**Keywords:** lignocellulosic biomass, disintegration, energy consumption of milling, particle size distribution

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne .....

Kryštof Ženk

# Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D. za vstřícné vedení, za jeho ochotu a za jeho odborné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu a zpříjemnění mého studia na ČVUT.

# Obsah

1. Úvod.....	9
2. Drcení a mletí lignocelulózových odpadů .....	10
2.1. Odpady s lignocelulózovým základem .....	10
2.1.1. Roční produkce .....	11
2.1.2. Složení odpadních biomas .....	11
2.1.3. Mechanické vlastnosti.....	12
2.2. Principy rozpojování a zařízení.....	15
2.3. Drtiče a mlýny pro dezintegraci pšeničné slámy .....	17
2.3.1. Nožový mlýn.....	17
2.3.2. Úderový mlýn .....	18
2.3.3. Diskový mlýn.....	18
2.3.4. Porovnání mlýnů na základě energetické náročnosti.....	19
3. Přístupy modelování energetické náročnosti .....	23
3.1. Konvenční teorie .....	24
3.1.1. Rittingerova teorie .....	24
3.1.2. Kickova teorie .....	25
3.1.3. Bondova teorie .....	25
3.1.4. Experimenty s lignocelulózovou biomasou pro Rittingerův, Kickův a Bondův model.....	26
3.2. Experimentální metody modelování .....	30
4. Experimentální analýza energetické náročnosti rozpojení pšeničné slámy .....	33
4.1. Materiál a postup měření.....	33
4.2. Výsledky energetické náročnosti a diskuse.....	37
4.2.1. Distribuce velikosti částic .....	37
4.2.2. Modelování energetické náročnosti rozpojování .....	42

4.2.3. Další závislosti z naměřených dat.....	47
5. Závěr .....	52
Seznam použité literatury .....	54
Seznam symbolů.....	58
Seznam obrázků.....	59
Seznam tabulek.....	61



# 1. Úvod

V dnešním světě neustále slýcháváme z informačních kanálů o globálním oteplování, o uhlíkové neutralitě, o ekologičtějším získávání energie atd. Společným problémem těchto výzev je většinou označováno spalování fosilních paliv, jako je především uhlí, ropa a zemní plyn. Vzhledem k různým dohodám států a hrozícím porušením jejich za nedodržení se přirozeně začaly hledat alternativní zdroje energie. Jedním takovým řešením je použití odpadní biomasy pro výrobu biopaliv a dalších bioproduktů.

Jak se následně ukáže, tak před jakýmkoliv postupem výroby biopaliv je nejdůležitějším prvotním krokem samotná mechanická dezintegrace vstupní biomasy. Ta nám umožní intenzifikaci výroby výsledného produktu nebo zkrácení celého procesu. Má ale jednu zásadní nevýhodu – mechanická dezintegrace je velmi energeticky náročná operace. Proto se vědci a inženýři snaží nalézt co možná energeticky nejúspornější způsob rozpojení biomasy tak, aby byl poměr vstupní/výstupní energie celé technologie výroby biopaliv co možná nejvyšší.

Zásadním problémem je, že výzkum se této problematice příliš nevěnuje nebo jsou data příliš konkrétní a nedají se použít na různé typy biomasy. Lignocelulózová biomasa je organický produkt, je to „živý“ materiál. Proto je velmi obtížné jednotlivé druhy nějak unifikovat. U rozpojování jsou důležité mechanické vlastnosti materiálu. Ty se ovšem u biomasy mohou značně měnit v závislosti na druhu, složení, stáří nebo třeba vlhkosti materiálu. Také kvůli tomu neexistují konkrétnější modely, podle kterých by se dala predikovat energetická náročnost rozpojování a čerpá se výhradně z experimentálních dat.

Tato práce si dává za cíl shrnout dosavadní výzkumné články a experimenty a na jejich základě sestavit model predikce energetické náročnosti rozpojování v závislosti na různé vlhkosti biomasy, konkrétně pšeničné slámy pro konkrétní provozní podmínky.

## 2. Drcení a mletí lignocelulózových odpadů

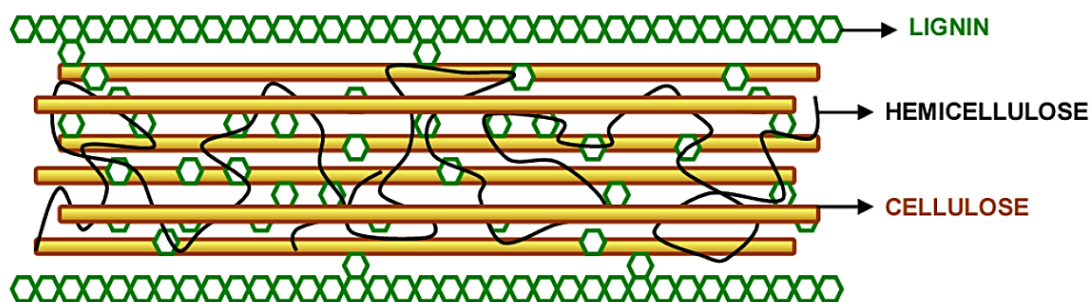
Pro využití lignocelulózové biomasy na výrobu biopaliva a bioproduktů máme několik postupů. Nehledě na konkrétní postup, vždy je nutné biomasu nejdříve zmenšit, protože velikost lignocelulózové biomasy je o několik řádů větší než optimální vstupní velikost pro zařízení na biologické zpracování. V Tab. 1 jsou uvedeny optimální velikosti biomasy použité na některé technologie zpracování. Z výzkumu vyplynulo, že pro technologie zpracování biomasy je výhodná mechanická dezintegrace, a té se dále bude tato práce především věnovat (Oyedeeji, 2020).

Způsob zpracování	Peletizace	Zplyňování	Pyrolýza	Hydrolyza a fermentace	Briketování
Velikost částic [mm]	0,6-0,9	0,2-1,5	0,3-2	0,03-10	1,6-5,6

Tab. 1; Optimální vstupní velikosti biomasy do některých technologií zpracování (Oyedeeji, 2020)

### 2.1. Odpady s lignocelulózovým základem

Lignocelulózová biomasa je tvořena kompozitní strukturou, tato struktura by se dala přirovnat k železobetonové konstrukci (viz Obr. 1). Je tvořena třemi základními látkami – celulózou, hemicelulózou a ligninem. Celulóza je zde ve formě vláken, která jsou obtáčena rozvětvenými řetězci hemicelulózy. Daný celek je pak vyplněn zesíťovaným ligninem, který také obklopuje celou tuto strukturu z vnějšku (Krátký, 2015).



Obr. 1; Struktura lignocelulózové biomasy (Mussatto, 2010)

### 2.1.1. Roční produkce

Typickými zástupci odpadní biomasy s lignocelulózovým základem, které se používají na další zpracování a výrobu biopaliv a bioproduktů, jsou různé druhy slám, především pšeničná, kukuřičná a rýžová, dále pak odpad z cukrové třtiny a odpad z dřevozpracovatelského průmyslu (Krátký, 2015).

Důvodem použití zmíněných odpadních biomas, je jejich množství, které se ročně vyprodukuje při jejich primárním zpracování nebo případně jejich nevyužití pro primární účely. V Tab. 2 je vidět, že se roční produkce těchto odpadních biomas pohybují v jednotkách miliard tun za rok, které je možné využít v biorafineriích na výrobu biopaliv a bioproduktů (Kurian, 2013).

Druh biomasy	Pšeničná sláma	Kukuřičná sláma	Cukrová třtina	Rýžová sláma	Tvrdé dřevo
Světová produkce 2011 [10 <sup>6</sup> t <sub>TS</sub> za rok]	1056	1413	502	1084	274
Předpokládaná světová produkce 2025 [10 <sup>6</sup> t <sub>TS</sub> za rok]	1111	1639	666	1267	6000

Tab. 2; Odhadovaná roční světová produkce vybraných druhů odpadní biomasy (Kurian, 2013)

### 2.1.2. Složení odpadních biomas

Jednotlivé typy odpadní biomasy se od sebe liší v poměru zastoupení celulózy, hemicelulózy a ligninu. Z Tab. 3 je patrné, že procentuálně nejvíce je v používaných typech odpadní biomasy zastoupena celulóza, následně hemicelulóza a nejméně lignin.

Druh biomasy	Celulóza [%]	Hemicelulóza [%]	Lignin [%]
Pšeničná sláma	33-38	26-32	17-19
Ječmenná sláma	31-45	27-38	14-19
Řepková sláma	36,5	24,5	18,2
Ovesná sláma	35	28,2	4,1

<b>Kukuřičný klas</b>	38-40	28	7-21
<b>Cukrová třtina</b>	32-48	19-24	23-32
<b>Rýžová sláma</b>	28-36	23-28	12-14
<b>Tvrdé dřevo</b>	43-47	25-35	16-24

Tab. 3; Procentuální zastoupení celulózy, hemicelulózy a ligninu u používaných lignocelulóзовých biomas (Saini et al., 2015, IDI et al., 2011, Gomez-Tovar et al., 2012, Huerta et al., 2019)

### 2.1.3. Mechanické vlastnosti

U lignocelulóзовých biomas je poněkud obtížné stanovit konkrétní mechanické vlastnosti, protože zde hraje velký vliv velikost částic a také složení a vlhkost jednotlivých vzorků (Yu et al., 2006). Nicméně existují studie, které se věnují stanovení pevnosti v tahu a pevnosti ve smyku u některých druhů slam a travin. Jejich hodnoty v závislosti na vlhkosti nám mohou posloužit alespoň řádově pro další modelování energetických náročností při rozpojování, viz Tab. 4.

**Yu** (2006) se ve své práci věnoval stanovení pevnosti v tahu a pevnosti ve smyku pro dva druhy prosa prutnatého a pšeničné slámy. Na výzkumu pšeničné slámy spolupracoval s Limpitim a Kushwahou, kdy pro stanovení pevnosti v tahu měla sláma vlhkost 10-65 % hm. a pro pevnost ve smyku byla hodnota vlhkosti 5-30 % hm. a 8-10 % hm. Pro pevnost v tahu pšeničné slámy vyšly výsledky 32,5-37,8 MPa a pro pevnost ve smyku byly hodnoty 7-22 MPa, resp. 7-8 MPa. Nutno podotknout, že u pšeničné slámy se jednalo o jeden druh neupravené slámy.

Jiná situace byla u dvou druhů prosa prutnatého, kde **Yu** (2006) zvolil přístup pěti vzorků druhu Alamo a Kanlow a pro každý šest různých vlhkostí v rozsahu 10-60 % hm. Zde se ukázal znatelný rozsah, kdy sice průměrná velikost pevnosti v tahu byla kolem 100 MPa a průměrná velikost pevnosti ve smyku byla kolem 20 MPa, nicméně když se podíváme právě na rozsahy, tak ty se u tahu pohybovaly 27,7-205 MPa (Alamo), resp. 9,3-213 MPa (Kanlow), a u smyku 7-39,9 MPa (Alamo), resp. 6,9-38 MPa (Kanlow). Tyto opravdu velké odlišnosti u jednotlivých měření potvrzují, že je skutečně velmi složité přiřadit mechanické vlastnosti biomas na základě předešlých experimentů.

Další, kteří se věnovali výzkumu mechanických vlastností u pšeničné slámy, byly **O'Dogherty** (1995), **Tavakoli** (2009) a **Chandio** (2013). Rýžovou slámu zkoumali **Yu**

spolu s **Userym** (2006), **Chandio** (2013) a **Khaeso** (2019). Cizrnový klas poté **Amirian** (2019).

**Womac** (2015) se zaměřil na proso prutnaté a kukuřičný klas. Zde je zase naopak zajímavé, že hodnoty pevnosti ve smyku pro vlhkost 9 % hm. a 75 % hm. vycházely prakticky stejně 2 MPa.

Jak je vidět v Tab. 4, tak výsledky hodnot pevností v tahu a smyku jednotlivých biomas mají v některých studiích velký rozsah, a v některých zase poměrně malý. Z toho plyne závěr, že hodnoty těchto mechanických vlastností mohou sloužit pouze pro odhad řádu velikostí, ale pro nějaké přesnější použití v modelování energetické náročnosti bude nutné si pro každý konkrétní druh biomasy a konkrétní vlhkost udělat vlastní měření mechanických vlastností.

<b>Druh biomasy</b>	<b>Přirozená vlhkost M [% hm.]</b>	<b>Pevnost v tahu <math>\sigma</math> [MPa]</b>	<b>Pevnost ve smyku <math>\tau</math> [MPa]</b>	<b>Zdroj</b>
<b>Pšeničná sláma</b>	10-65	32,5-37,8	-	(Yu et al., 2006)
	5-30	-	7-20	
	8-10	-	7-8	
	8-22	22,7-31,2	5,14-6,55	(O'Dogherty et al., 1995)
	10,2-22,6	-	6,81-11,78	(Tavakoli et al., 2009)
	18,1	-	8,12-22,94	(Chandio et al., 2013)
<b>Rýžová sláma</b>	58-79	14,8-17,8	-	(Yu et al., 2006)
	18,1	-	6,06-14,33	(Chandio et al., 2013)
	20-50,3	-	5,6-14,22	(Khaeso et al., 2019)
<b>Proso prutnaté</b>	9	-	12,04-12,45	(Womac et al., 2005)
<b>Proso prutnaté (Alamo)</b>	10-60	27,7-205	7-39,9	(Yu et al., 2006)
<b>Proso prutnaté (Kanlow)</b>	10-60	9,3-213	6,9-38	(Yu et al., 2006)
<b>Kukuřičný klas</b>	9	-	1,85-2,08	(Womac et al., 2005)
	75	-	2,01-2,11	(Womac et al., 2005)
<b>Cizrnový klas</b>	10-25	-	3,18-13,29	(Amirian et al., 2017)

Tab. 4; Souhrn mechanických vlastností jednotlivých druhů lignocelulózy biomasy (autoři uvedeni ve sloupci Zdroje)

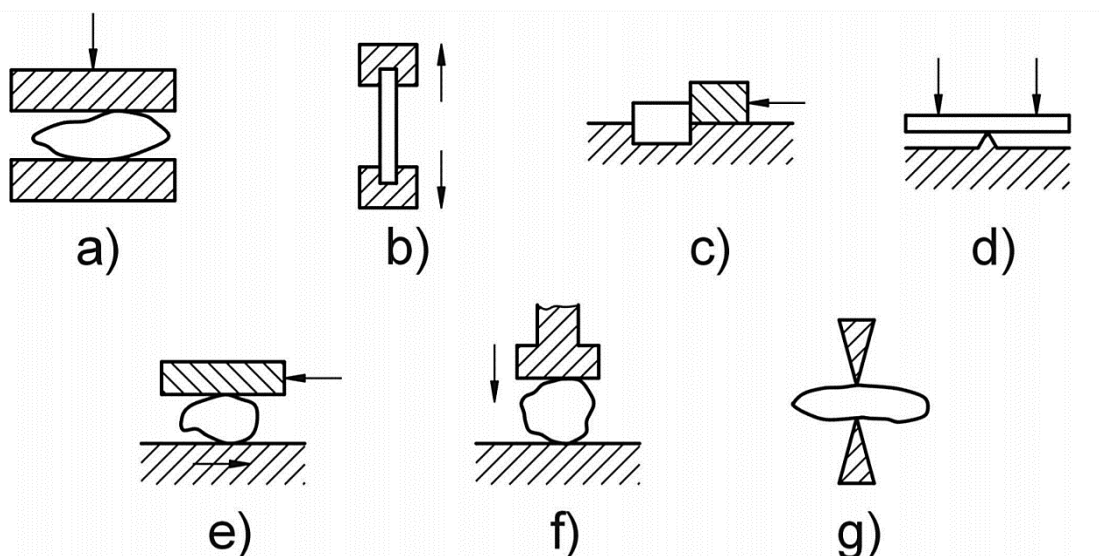
## 2.2. Principy rozpojování a zařízení

Pokud chceme jakékoliv odpady nějak dále zpracovávat, je velmi výhodné zařadit jako první operaci mechanickou dezintegraci neboli rozpojování. Během rozpojení odpadu dochází ke dvěma zásadním věcem. Zaprvé dojde ke zmenšení velikosti částic, čímž se zvětší specifický povrch celku, a zadruhé se sníží stupeň krystalinity celulózy. Tím dojde ke zvýšení přenosu hybnosti, tepla a hmoty, což má za následek vyšší účinnost přeměny odpadu na finální biopalivo či produkt (Krátký, 2015).

Samotná operace rozpojování je však velmi energeticky náročná. Podle Schella, Hardwooda (1994) a Peréze (2007) mechanická dezintegrace spotřebuje až třetinu celkové dodávané elektrické energie v celé technologii výroby biopaliv (Krátký, 2015).

Pokud se podíváme obecně na samotné mechanismy rozpojování, tak rozlišujeme sedm principů (viz Obr. 2). Jedná se o drcení, trhání, smýkání, lámání, otírání, rozbíjení a rozlupování. Je potřeba si uvědomit, že v žádném rozpojovacím zařízení nikdy nefunguje pouze jeden z těchto mechanismů, ale vždy se jedná o kombinaci několika z nich.

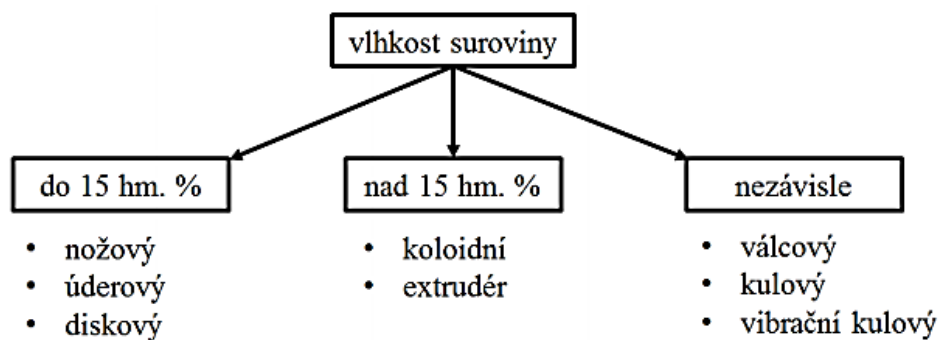
Jak se ukáže v kapitole o konkrétních rozpojovacích zařízeních, tak dominantními mechanismy pro dezintegraci odpadní biomasy jsou smýkání, drcení a ořez (Rieger et al., 2007, Krátký, 2015).



Obr. 2; Mechanismy rozpojování materiálů. a) drcení, b) trhání, c) smýkání, d) lámání, e) otírání, f) rozbíjení, g) rozlupování (Rieger et al., 2007)

Co se týče jednotlivých zařízení pro dezintegraci, tak ty se dají rozdělit do dvou skupin – drtiče a mlýny. Hranice mezi drtičem a mlýnem se zakládá na finální velikosti produktu, nicméně není tak úplně přesně definována a každá literatura si ji posouvá trochu jinak. Pro naše účely postačí, že drtiče mají výstupní velikost produktu v jednotkách až spíše desítkách milimetrů a mlýny mají výstupní velikost produktu nižší jednotky milimetrů a méně (Rieger et al., 2007, Krátký, 2015).

Další parametr, podle kterého vybíráme správné zařízení na rozpojování, je vlhkost suroviny, Hranice je stanovena na 15 % hm. Pro sušší biomasu se používají nožové, úderové nebo diskové drtiče a mlýny. Pro ty s větší vlhkostí volíme koloidní mlýny a drtiče nebo extrudéry. Potom máme na výběr zařízení, která jsou vhodná jak pro suchou, tak pro vlhkou odpadní biomasu. Mezi ně se řadí válcové, kulové a vibrační kulové mlýny a drtiče (viz Obr. 3) (Krátký, 2015).



Obr. 3; Schéma používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkosti (Krátký, 2015)



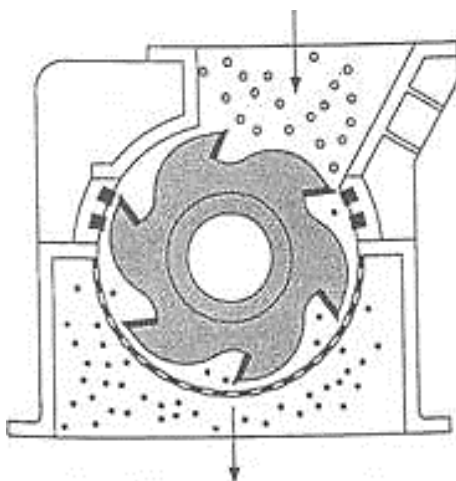
## 2.3. Drtiče a mlýny pro dezintegraci pšeničné slámy

Následující část bude zaměřena na konkrétní zařízení pro dezintegraci odpadů s lignocelulózovým základem, jejich základní konstrukční uspořádání, typické parametry a příklady konkrétních experimentů s těmito stroji.

Konkrétněji se zaměřím spíše na mletí různých druhů slámy, protože v experimentální části se budu zabývat mletím slámy pšeničné. Usušená sláma má vlhkost pod 15 % hm., čili pro její rozpojení se používají hlavně nožové, úderové a popřípadě diskové mlýny.

### 2.3.1. Nožový mlýn

Nožový mlýn se skládá z rotoru, statoru a vstupní a výstupní komory (viz Obr. 4). Surovina se nasypává seshora do komory. Na rotoru i statoru jsou umístěny nože a při rotaci se uplatňuje princip prostého stříhu materiálu mezi těmito mlecími segmenty. Dále je vespod umístěno propadové síto, které určuje finální velikost produktu. Na sítu se také uplatňuje sekundární mechanismus dělení, a to ořez materiálu mezi sítem a rotorovými noži. (Krátký a Jirout, 2011, Himmel et al., 1985).

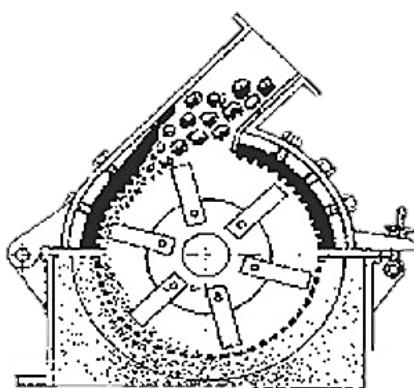


Obr. 4; Schéma nožového mlýnu (Lenfeld, 2016)

Typické rychlosti nožového mlýnu jsou kolem  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a výstupní velikost se pohybuje v desetinách milimetru, ale jak již bylo řečeno, tak výstupní velikost závisí na velikosti ok síta. Na velikosti otvorů také závisí velikost energetické náročnosti rozpojování, kterou dále ovlivňuje rychlost plnění, frekvence otáčení a typ geometrie nože. Co se týče materiálu, tak nožový mlýn je vhodný pro houževnaté a vláknité suroviny (Krátký, 2015; Krátký a Jirout, 2011, Cadoche a Lopéz 1989).

### 2.3.2. Úderový mlýn

Úderový mlýn je konstrukčně velice podobný mlýnu nožovému. Také je složen z rotoru, statoru a vstupní a výstupní komory (viz Obr. 5). Hlavním rozdílem je, že úderový mlýn má na rotoru navěšena kladívka. Tudíž i primární mechanismus rozpojování je dynamický účinek tlakových sil. K rozpojení dojde nárazem kladívek do materiálu, dále pak nárazem materiálu do nárazové desky v horní části statoru a nakonec i nárazem mezi samotnými částicemi navzájem. Vespod je také umístěno propadové síto, a tak zde dochází k sekundárnímu principu dělení ořeru materiálu mezi kladívky a sítím. (Krátký a Jirout, 2011, Cadoche a Lopéz 1989).

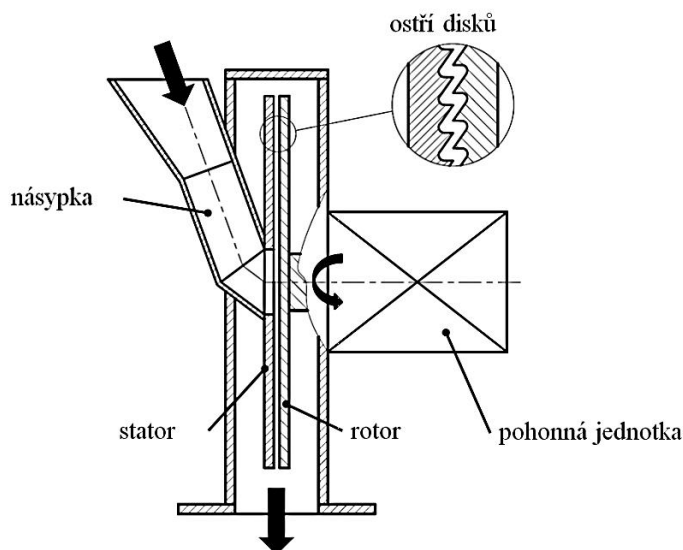


Obr. 5; Schéma úderového mlýnu (Pulman, 2021)

Rychlosti rotoru dosahují opět okolo  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Stejně jsou i výstupní velikosti materiálu, a to desetiny milimetru, kdy zase záleží na velikosti ok propadového síta. Operačními parametry jsou obvodová rychlost rotoru, geometrie kladívek, rychlost plnění a rozměry ok propadového síta. Tyto parametry pak ovlivňují energetickou náročnost rozpojování. Kladivový mlýn je vhodnější na dělení suchého a křehkého materiálu. (Krátký, 2015; Krátký a Jirout, 2011, Himmel et al., 1985).

### 2.3.3. Diskový mlýn

Dalším používaným typem mlýnu na mletí odpadní biomasy je mlýn diskový. Tento typ dezintegrační jednotky se skládá z násypky a dvou disků, které mají různě tvarované ostří (viz Obr. 6). Buď mohou rotovat oba dva disky, nebo pouze jeden z nich. Materiál je přiváděn osově do středu disku a odstředivou silou je kontinuálně odváděn. Mechanismus rozpojování je zde smýkání (Krátký, 2015).



Obr. 6; Schéma diskového mlýnu (Krátký, 2015)

V diskovém mlýnu lze dosáhnout výstupní velikosti částic nižších jednotek milimetru. Tento typ mlýnu je vhodnější pro tvrdší typy materiálů. Jeho nevýhodou je pak vysoká energetická náročnost a velké množství odpadního tepla, které může znehodnotit vstupní materiál (Krátký, 2015).

#### 2.3.4. Porovnání mlýnů na základě energetické náročnosti

V průběhu let se některé studie zaměřily na zkoumání energetické náročnosti potřebné pro mletí různých druhů biomasy s lignocelulózovým základem. Důležitými parametry pro porovnání jsou typ biomasy, typ dezintegrátoru, poměr původní a finální velikosti biomasy a obsah vlhkosti. Jak již bylo řečeno, tak nejvhodnějšími typy dezintegrátorů pro mletí zejména slamnatých biomas jsou nožové a úderové mlýny. Proto se také některé z těchto studií zaměřily přímo na porovnání energetické náročnosti mletí odpadní biomasy právě těchto dvou mlýnů. Výsledky měření jednotlivých studií jsou shrnuty v Tab. 5 (Himmel et al., 1985; Krátký a Jirout, 2011, Cadoche a Lopéz 1989).

**Adapa** (2011) se ve své práci zaměřil na mletí pšeničné, ječmenné, řepkové a ovesné slámy pomocí úderového mlýnu. Vstupní velikost byla vždy 30 mm a výstupní velikosti zvolil 6,4 mm, 3,2 mm a 1,6 mm. Vlhkosti jednotlivých slam byly podobné a pohybovaly se v rozmezí 10,3-15,6 % hm. Vzhledem k podobnosti jednotlivých druhů slam vycházely energetické náročnosti velmi podobně, s výjimkou ječmenné slámy, kde byla energetická náročnost nižší.

**Tumuluru** (2014) volně navázal na Adapu (2011), kdy použil stejné druhy biomasy a úderový mlýn, ale měl jiné vstupní a výstupní velikosti. Ve své práci neuvádí přesnou vstupní velikost, zmiňuje pouze, že byla předem „hrubě nařezána“ na nožovém drtiči. Co se týče zvolených propadových sít, tak ta měla velikosti 31,75 mm, 25,4 mm a 19,05 mm. Vlhkosti se pohybovaly od 13,1 % hm. do 15,6 % hm. Jak lze vidět v Tab. 5, tak velikosti energetické náročnosti jsou o řád menší než v případě Adapy (2011). To je ovšem způsobeno mnohem většími otvory propadových sít. Jinak jsou energetické náročnosti mezi sebou srovnatelné, kdy pouze ovesná sláma je větší.

V další práci se **Cadoche a Lopéz** (1989) věnovali mletí pšeničné slámy, kukuřičné slámy a tvrdého dřeva. Energetickou náročnost porovnávali mezi nožovým a úderovým mlýnem. Vlhkost jejich vstupních biomas byla v tomto případě 4-7 % hm. Vstupní velikost byla 22,4 mm a výstupní velikosti byly pro každé mletí a typ mlýnu různé.

Porovnání nožového a úderového mlýnu se také věnoval **Himmel** (1985). Na základě jeho práce byly vybrány velikosti energetických náročností pšeničné slámy, kukuřičné slámy a tvrdého dřeva, kdy pro tvrdé dřevo proběhlo porovnání úderového a nožového mlýna. Vlhkosti se opět pohybovaly 4-7 % hm.

Poslední studie **Hidena** (2009) se mimo jiné zaměřila na pšeničnou slámu mletou úderovým mlýnem při vlhkosti 4 % hm.

Jak lze vidět z porovnání výsledných velikostí energetických náročností, tak při srovnatelné vlhkosti a poměru vstupní/výstupní velikost můžeme říci, že nožové mlýny vychází oproti úderovým mlýnům jako energeticky výhodnější stroje pro rozpojování biomasy s lignocelulózovým základem. Toto zjištění potvrzuje teorii vhodnosti nožového mlýnu pro vláknité a houževnaté materiály (Krátký, 2015; Krátký a Jirout, 2011).

<b>Druh biomasy</b>	<b>Dezintegrátor</b>	<b>Původní/finální velikost [mm]</b>	<b>Obsah vlhkosti M [% hm.]</b>	<b>Energetická náročnost [kWh·t<sup>-1</sup>]</b>	<b>Zdroje</b>
<b>Pšeničná sláma</b>	Úderový mlýn	30/6,4	13,3-15,6	12,26	(Adapa et al., 2011)
		30/3,2		28,02	
		30/1,6		42,57	
		-/31,75	15,6	2,05	(Tumuluru et al., 2014)
	-/25,4	3,10			
	-/19,05	3,52			
	Úderový mlýn	19,5/3	4	20	(Hideno et al., 2009)
		19,5/2,4		30	
		19,5/1,6		42	
	Úderový mlýn	22,4/3,2	4-7	21	(Cadoche a Lopéz, 1989)
22,4/2,5		29			
22,4/1,6		42			
Nožový mlýn	22,4/6,4	4-7	5,5	(Cadoche a Lopéz, 1989)	
	22,4/2,5		6,4		
	22,4/1,6		7,5		
	19,5/12,5	4	2,8	(Himmel et al., 1985)	
	19,5/9,5		4,5		
19,5/6,4	5				
19,5/2,4	6				
19,5/1,6	7,55				
<b>Ječmenná sláma</b>	Úderový mlýn	30/6,4	12,4-13,5	8,26	(Adapa et al., 2011)
		30/3,2		18,59	
		30/1,6		25,10	
	-/31,75	13,5	1,70	(Tumuluru et al., 2014)	
-/25,4	2,99				
-/19,05	3,23				
<b>Řepková sláma</b>	Úderový mlýn	30/6,4	13,4-15,1	12,38	(Adapa et al., 2011)
		30/3,2		25,73	
		30/1,6		35,7	
	-/31,75	15,1	1,46	(Tumuluru et al., 2014)	
	-/25,4		1,47		
-/19,05	2,91				

<b>Druh biomasy</b>	<b>Dezintegrátor</b>	<b>Původní/finální velikost [mm]</b>	<b>Obsah vlhkosti M [% hm.]</b>	<b>Energetická náročnost [kWh·t<sup>-1</sup>]</b>	<b>Zdroje</b>	
<b>Ovesná sláma</b>	Úderový mlýn	30/6,4	10,3-13,1	16,23	(Adapa et al., 2011)	
		30/3,2		29,63		
		30/1,6		41,52		
			-/31,75	13,1	5,68	(Tumuluru et al., 2014)
			-/25,4		7,51	
			-/19,05		8,05	
<b>Kukuřičná sláma</b>	Úderový mlýn	22,4/3,2	4-7	9,6	(Cadoche a Lopéz, 1989)	
		22,4/1,6		14		
	Nožový mlýn	22,4/9,5	4-7	3,2	(Cadoche a Lopéz, 1989)	
		22,4/6,3		12		
		22,4/3,2		20		
		19,05/12,5	7	1	(Himmel et al., 1985)	
		19,05/9,5		3,4		
		19,05/6,4		12		
	19,05/3	20				
	<b>Tvrdé dřevo</b>	Úderový mlýn	22,4/6,4	4-7	95	(Cadoche a Lopéz, 1989)
22,4/3,2			115			
22,4/2,5			120			
22,4/1,6			130			
19,05/6,4			6	100	(Himmel et al., 1985)	
19,05/3				120		
19,05/2,4				125		
19,05/1,6				130		
Nožový mlýn		22,4/6,4	4-7	25	(Cadoche a Lopéz, 1989)	
		22,4/3,2		50		
		22,4/2,5		80		
		22,4/1,6		130		
		19,05/6,4	6	27	(Himmel et al., 1985)	
		19,05/3		48		
19,05/2,4	80					
19,05/1,6	130					

Tab. 5; Energetické náročnosti při dezintegraci různých druhů odpadní biomasy v závislosti na typu mlýnu, velikosti a vlhkosti (Krátký a Jirout, 2011; autoři uvedeni ve sloupci Zdroje).

### 3. Přístupy modelování energetické náročnosti

Jestliže budeme projektovat technologii výroby bioproduktů, tak potřebujeme vyhodnotit hmotové a energetické bilance. K tomu musíme znát potřebný výkon elektromotoru a provozní nastavení mlýnu. Pro určení velikosti energetické náročnosti se používají různé matematické modely a teorie, které nám pomohou určit velikost energie rozpojování, a tím pádem optimalizovat rozpojovací proces a samotná rozpojovací zařízení (Oyedeggi et al., 2020).

Zatím se však nepodařilo přijít s univerzální teorií, která by byla platná pro všechny typy materiálů. Zejména je problém v rozličné chemické struktuře a odlišných mechanických vlastnostech jednotlivých materiálů. Proto se pro modelování využívají různé modely, kdy je potřeba vybrat ten správný na základě vhodnosti použití (Oyedeggi et al., 2020, Naimi 2013).

Existují tři, řekněme, konvenční teorie, Rittingerova, Kickova a Bondova, které byly představeny již v 19. a 20. století pro uhlí a další nerostné suroviny, nicméně jak se ukáže, dají se použít i pro jiné materiály, včetně lignocelulóзовé biomasy. Tyto tři teorie jsou postaveny na předpokladu, že změna měrné energie potřebné k rozpojení je nepřímo úměrná  $D^{-r}$ , vztah tedy vypadá

$$-\frac{de}{dD} = C \cdot D^{-r}, \quad (3.1)$$

kde  $e$  je měrná energie v  $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ ,  $D$  je velikost v mm,  $C$  je materiálová konstanta a  $r$  představuje mechanismus při rozpojení. Materiálová konstanta  $C$  zohledňuje strukturu materiálu, jeho pevnost, tvar, vlhkost atd. Exponent  $r$  znázorňuje, jaký mechanismus se nejvíce uplatňuje při rozpojování (Rieger et al., 2007, Oyedeggi et al., 2020, Naimi, 2013).

Rittingerova, Kickova a Bondova teorie se mezi sebou liší právě zohledněním mechanismu při rozpojování, a tedy indexem  $r$ , který nabývá hodnot 2, 1, resp. 1,5.

Mimo tyto konvenční teorie se v literatuře začínají objevovat vlastní modely, které jsou přímo určené pro rozpojování lignocelulóзовé biomasy. Tyto teorie budou představeny blíže v další podkapitole.

## 3.1. Konvenční teorie

### 3.1.1. Rittingerova teorie

Jako první svou teorii rozpojování vyslovil Rittinger roku 1867. Opírá se v ní o to, že spotřebovaná energie při rozpojování je úměrná nově vytvořenému povrchu. Byl to vůbec první model, který dával do souvislosti spotřebovanou práci a velikost materiálu na vstupu a výstupu. Jeho úvahou byl zvětšující se povrch krychle po zdrobnění na menší krychli (Dinter, 1984, Oyedeji et al., 2020).

Co se týče velikosti samotné energie, tak pro Rittingerův model je index mechanismu při rozpojování  $r$  roven 2 a po integraci vztahu (3.1) dostaneme

$$E = C_R \cdot \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right), \quad (3.2)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ,  $D_2$  je výstupní velikost materiálu a  $D_1$  je vstupní velikost materiálu v mm.  $C_R$  je již zmíněná materiálová konstanta.

Předpoklad u této teorie je ten, že porušení se děje rovnoměrně po povrchu celého zrna částice při samotném rozpojování. Jde tedy o povrchové síly, a tím pádem je vhodné tento model aplikovat pro jemné částice, protože jemnozrné směsi mají velký jednotkový povrch. Literatura uvádí vhodnost pro  $D < 0,5$  mm (Rieger et al., 2007).

Limitací tohoto modelu je, že ignoruje, že se částice před rozpojením deformuje a předpokládá, že se po mechanickém zatlačení částice rozpadne v celém průřezu na menší částice. To tedy limituje použití modelu spíše na křehké materiály.

Další limitací je, že model vychází z rozpojování jednotlivé částice a nezohledňuje rozpojování částic jako kolektivu. Při rozpojování částic jako souboru zrn totiž dochází ke tření částic mezi sebou a velká část energie se mění na teplo (Dinter, 1984, Naimi 2013).



### 3.1.2. Kickova teorie

Další model, který byl popsán roku 1885, je Kickův model. Kick na rozdíl od Rittingera vycházel z předpokladu, že se v materiálu vytváří elastické deformace a těm odpovídá množství vynaložené energie (Dinter, 1984, Naimi 2013).

Pro Kickův model je index mechanismu při rozpojování  $r$  roven 1 a po dosazení a integraci vztahu (3.1) dostaneme rovnici pro měrnou energii

$$E = C_K \cdot \ln \frac{D_1}{D_2}, \quad (3.3)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ,  $D_2$  je výstupní velikost materiálu,  $D_1$  je vstupní velikost materiálu v mm a  $C_K$  je materiálová konstanta.

Z výsledného vztahu vyplývá, že energie rozpojování konkrétního materiálu závisí pouze na poměru výstupní a vstupní velikosti částic  $D_1/D_2$ . Tato myšlenka je poněkud mylná, protože pevnost různě velkých hmot není konstantní. Z ověřených experimentů vyplývá, že při menší velikosti zrn se zmenšuje i počet slabých míst a vad materiálu, takže vzrůstá odolnost materiálu proti rozpojování (Dinter, 1984, Rieger et al., 2007).

Literatura uvádí, že Kickův model lze dobře použít pro hrubší drcení, kdy jsou velikosti zrn  $D > 50$  mm (Rieger et al., 2007).

### 3.1.3. Bondova teorie

Poslední konvenční teorie, i když trochu novější a sofistikovanější, je Bondova teorie z roku 1952. Tento model je jakýmsi spojením Rittingerova a Kickova modelu ve smyslu jejich podstaty. Bond vycházel z toho, že množství energie potřebné k rozpojení závisí jak na povrchu částice, tak na jejím objemu (Dinter, 1984, Oyedeji et al., 2020, Naimi, 2013).

U Bondova modelu je index mechanismu při rozpojování  $r$  roven 1,5 a při dosazení a integraci vztahu (3.1) dostaneme rovnici pro měrnou energii

$$E = 2 \cdot C_B \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right), \quad (3.4)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ,  $D_2$  je výstupní velikost materiálu,  $D_1$  je vstupní velikost materiálu a  $C_B$  je materiálová konstanta (Rieger et al., 2007).

Bondova teorie vychází z představy, že po působení síly na částici se vytvoří mikrotrhlina, která se při dalším zatěžování šíří, než přeroste v trhlinu, která poruší celý materiál. Uvažuje tedy rychlost šíření iniciační trhliny, která v tom materiálu vznikla. Proto je vhodné tento model použít, když nevyhovuje ani jeden z limitních případů Rittingera nebo Kicka. Co se týče velikosti částic, tak je vhodnost v rozmezí  $0,5 \text{ mm} > 50 \text{ mm}$ . Vzhledem k uvažovanému mechanismu se také používá pro částice se složitějším chováním, jako jsou elastické nebo vlhké materiály (Rieger et al., 2007).

Nicméně jsou zde i limitace této teorie. Bondova teorie zahrnuje ve výsledné potřebné energii nejen energii k samotnému rozpojení částice, ale také ztráty v samotném rozpojovacím zařízení. To může být na jednu stranu výhodou při navrhování konkrétních zařízení v technologii, na druhou stranu, pokud chceme určit pouze velikost energie pro rozpojení, tak musíme odečíst veškeré ztráty (Dinter, 1984).

### *3.1.4. Experimenty s lignocelulózovou biomasou pro Rittingerův, Kickův a Bondův model*

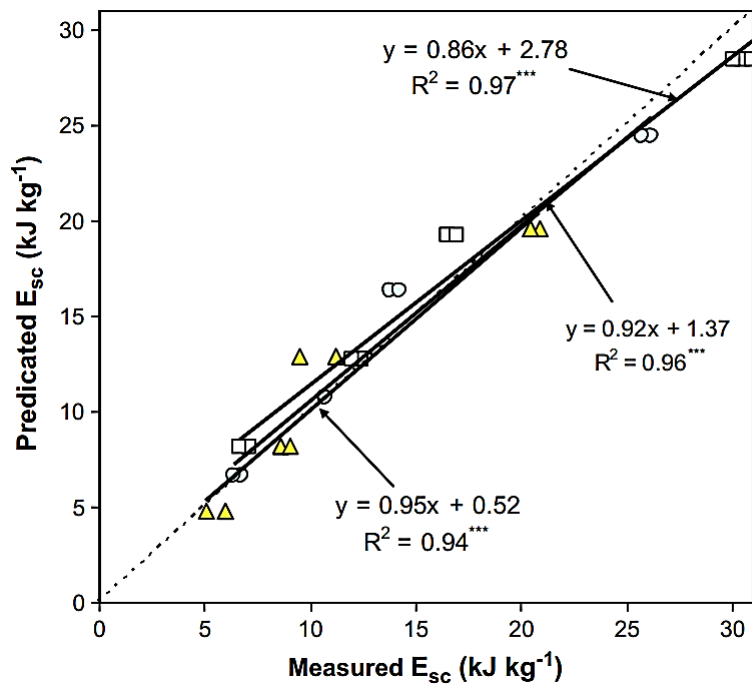
Existuje několik studií, kde se autoři zaměřili přímo na modelování energetické náročnosti lignocelulózové biomasy za použití některého z konvenčních modelů.

**Ghorbani** (2010) se ve své práci zaměřil na mletí tolíce vojtěšky pomocí úderového mlýnu. Vzorky vojtěšky měly vlhkost 13,3 % hm. Nejprve se nařezaly na nožovém drtiči, který byl vybaven propadovým sítem o velikosti 18 mm a pracoval při  $540 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  s podávaným množstvím vojtěšky o velikosti  $1,5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . Rozemleté vzorky byly dále rozděleny na tři části. První zůstala tak, jak propadla sítem 18 mm, druhá byla proseta sítem 15 mm a třetí byla proseta sítem 12 mm. Tyto tři části tak představovali nízkou, střední a vysokou kvalitu vzorků. Poté byly sušeny v sušárně na vlhkost 8 % hm.

Nyní už přišlo na řadu samotné mletí na úderovém mlýnu, kde byla použita čtyři propadová síta velikostí 1,68 mm, 2,38 mm, 3,36 mm a 4,76 mm. Znamé množství se dávkovalo do mlýnu rychlostí  $0,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Po rozemletí a zjištění rozložení velikosti částic po jednotlivých mletích přistoupili k modelování ze získaných dat. Když se poté zkoušely zjištěné velikosti energetické náročnosti napasovat na Rittingerův, Kickův a Bondův model, tak vyšlo

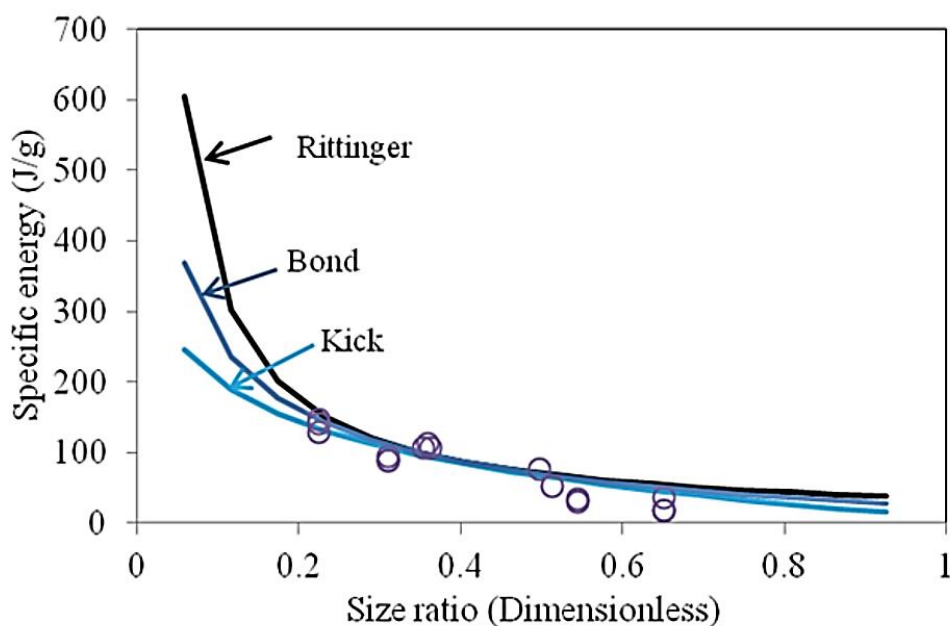
najevo, že nejpřesněji vychází model Rittingerův (nejnižší  $R^2$  bylo 0,94), kdy změřené a vymodelované hodnoty téměř shodovaly, což je vidět i na Obr. 7.



Obr. 7; Rittingerův model pro predikovanou a změřenou specifickou energetickou náročnost pro síta vstupní velikosti 18 mm, 15 mm, 12 mm (Ghorbani et al., 2010)

Další, kdo modeloval energetickou náročnost při mletí biomasy, byl **Naimi** (2013). Ten se zaměřil na mletí douglasky tisolisté (jehličnan) a vrby drsnovětvé pomocí nožového mlýnu. Vzorky měly velikost 30-90 mm a vlhkost obou druhů dřev byla stejná 11,5 % hm., kdy se jehličnan sušil a vrba se vlhčila. Propadová síta měla velikost 6, 4, 2 a 1 mm.

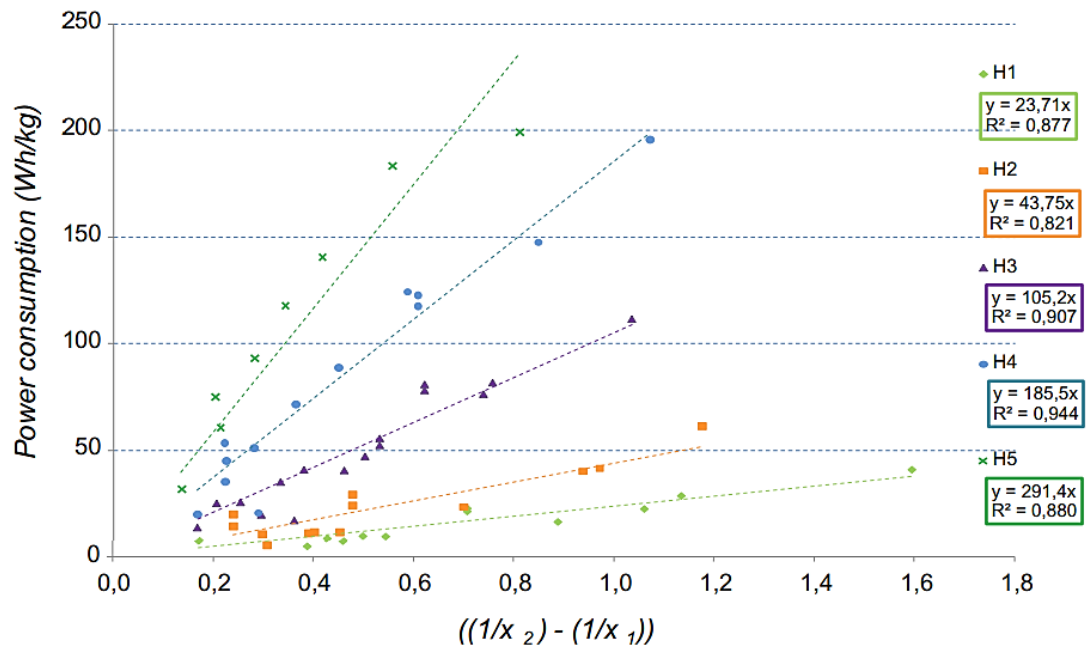
Naimi také porovnával vhodnost Rittingerova, Kickova a Bondova modelu pro změřená data a stejně jako u Ghorbaniho vyšlo najevo, že Rittingerův model nejlépe odpovídá realitě při mletí zmíněných lignocelulóзовých biomas. Na Obr. 8 je vidět rozložení těchto tří modelů a je zde vidět vhodnost použití Rittingerova modelu, kdy právě tento model ukazuje největší specifickou energetickou náročnost při snižujícím se poměru vstupní/výstupní velikost.



Obr. 8; Porovnání Rittingerova, Bondova a Kickova modelu pro závislost specifické energetické náročnosti a poměru vstupní/výstupní velikosti biomasy při rozpojování (Naimi, 2013)

Dalším, kdo se ve své práci modelováním energetické náročnosti podle Rittingera, Kicka a Bonda zabýval, byl **Temmerman** (2013). Jeho experiment spočíval v mletí čtyř různých druhů dřeva – dub, buk lesní, smrk ztepilý a borovice. Pro všechny čtyři druhy dřevních štěpků udělal pět vzorků s různou vlhkostí pohybující se v rozmezí 1,1 % hm. – 22,4 % hm. Vstupní velikost byla pro všechny 16 mm a velikosti propadových sít byly 8, 6, 5, 4 a 2 mm. V rámci získaných dat po rozemletí vyšlo Temmermanovi, že index mechanismu při rozpojování  $r$  z rovnice (3.1) se pro jednotlivá mletí příliš nemění a má hodnotu kolem 2,1. Z toho usoudil, že se nejvíce blíží hodnotě u Rittingerova modelu a následné modelování postavil na této teorii.

Vzhledem k tomu, že zkoumal pro každý druh štěpků pět různých vlhkostí, mohl také ukázat závislost energetické náročnosti rozpojování právě na vlhkosti. Pokud se podíváme na Obr. 9, tak můžeme vidět závislost energetické náročnosti rozpojování na vlhkosti pro smrk. Je zde názorně vidět, že s narůstající vlhkostí materiálu se zvyšuje energetická náročnost rozpojování. To potvrzuje, že lignocelulózová biomasa se se zvyšující vlhkostí stává méně křehkou, a tudíž je potřeba větší energie na její rozemletí. Pro ostatní druhy štěpků byl zřetelný stejný trend závislosti energetické náročnosti na rozpojení.



Obr. 9; Závislost energetické náročnosti rozpojování na vlhkosti pro smrč. H1 je nejnižší vlhkost, H5 je nejvyšší vlhkost (Pořadí vlhkostí je opačné v legendě a v samotných grafech). (Temmerman, 2013)

## 3.2. Experimentální metody modelování

Mimo tři výše zmíněné používané konzervativní modely se v posledních letech snažili někteří vědci přijít s modely přímo pro lignocelulózovou biomasu, které by lépe predikovaly a vykreslovaly energetickou náročnost při mletí.

V této části bude vždy stručně popsán jejich experiment, následně bude ukázán matematický model a grafické vyjádření jejich dat.

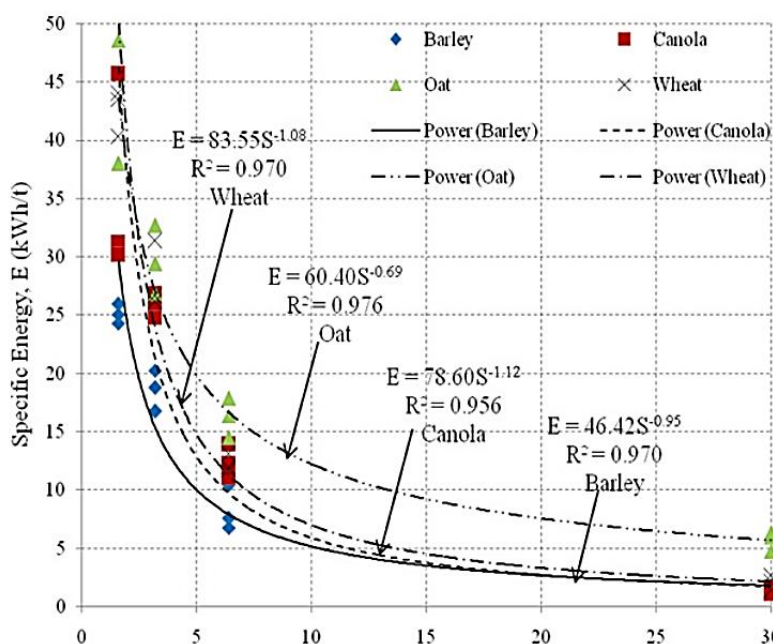
Jedním z nich byl již zmíněný **Adapa** (2011), který mlel pšeničné, ječmenné, řepkové a ovesné slámy pomocí úderového mlýnu. Vstupní velikost byla vždy 30 mm a výstupní velikosti zvolil 6,4 mm, 3,2 mm a 1,6 mm. Vlhkosti jednotlivých slam byly podobné a pohybovaly se v rozmezí 10,3-15,6 % hm.

Adapa ukázal, že existuje mocninná závislost energetické náročnosti rozpojování na velikosti výstupního síta bez ohledu na druh vstupní lignocelulózové biomasy. Jeho model měl tvar

$$E = k_1 \cdot S^{-k_2}, \quad (3.5)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ ,  $S$  je velikost propadového síta v mm a  $k_1$  a  $k_2$  jsou materiálové konstanty (Naimi, 2013, Oyedeji 2020).

Grafické znázornění jeho modelu a dat je vidět na Obr. 10.



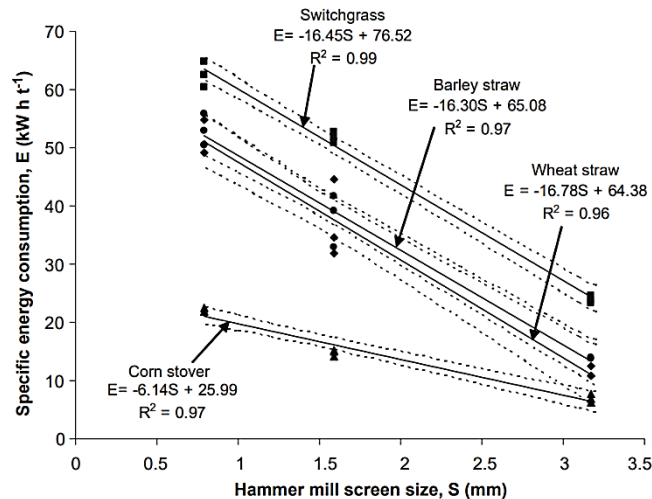
Obr. 10; Závislost energetické náročnosti rozpojování pšeničné, ječmenné, řepkové a ovesné slámy na výstupní velikosti síta úderového mlýnu (Adapa, 2011)

S dalším modelem přišel **Mani** (2004), který mlel kukuřičnou slámu, pšeničnou slámu a proso prutnaté. Mlecím zařízením byl úderový mlýn, vstupní velikosti byly 25 mm až 50 mm a výstupní velikosti sít byly 3,2 mm, 1,6 mm a 0,8 mm. Vlhkosti byly dvě a to 8 % hm. a 12 % hm. Jeho matematické modely měly tvar

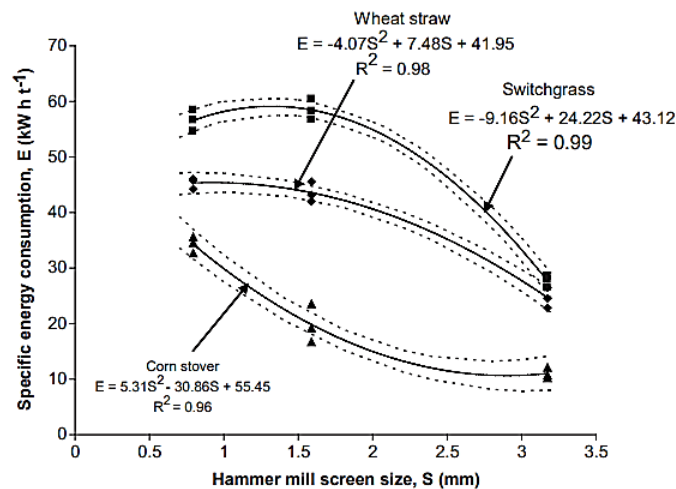
$$E = k_1 + k_2 \cdot d, \quad (3.6)$$

$$E = k_1 + k_2 \cdot d + k_3 \cdot d^2, \quad (3.7)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ,  $d$  byla velikost propadového síta v mm a  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  byly konstanty. Jak se ukázalo, tak biomasa s 8 % hm. vlhkostí lépe vystihovala lineární závislost (3.6) viz Obr. 12. Zatímco vlhkost 12 % hm. lépe kopírovala polynomická závislost druhého stupně (3.7) viz Obr. 11 (Naimi, 2013, Oyedeji 2020).



Obr. 12; Závislost energetické náročnosti rozpojování pro kukuřičnou slámu, pšeničnou slámu a proso prutnaté na výstupní velikosti síta úderového mlýnu pro 8 % hm. vlhkost (Mani, 2004)



Obr. 11; Závislost energetické náročnosti rozpojování pro kukuřičnou slámu, pšeničnou slámu a proso prutnaté na výstupní velikosti síta úderového mlýnu pro 12 % hm. vlhkost (Mani, 2004)

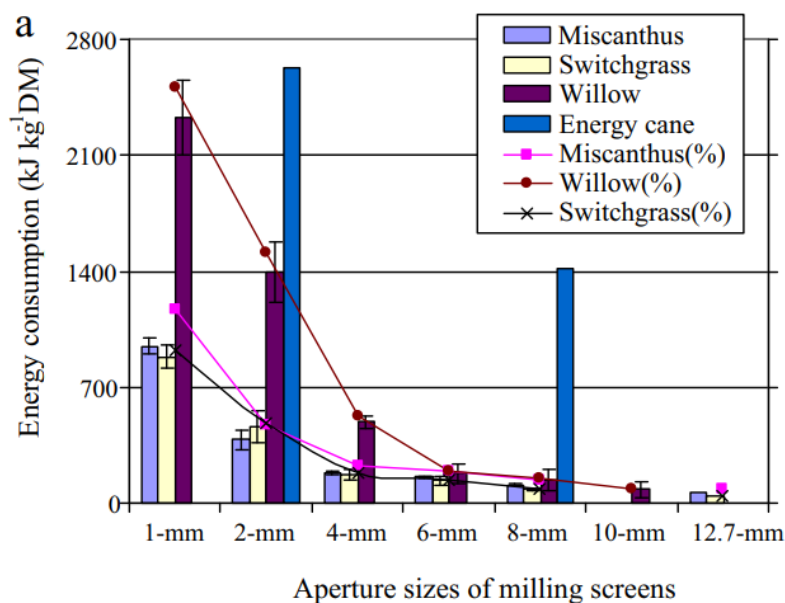
Další, kdo přišel s matematickým modelem pro modelování energetické náročnosti mletí biomasy, byl **Miao** (2011). Ten mlel ozdobnici čínskou, proso prutnaté, cukrovou třtinu a kmen vrby při různých vlhkostech na nožovém mlýnu. Velikosti výstupních sít se pohybovaly od 10 mm do 1 mm.

Z naměřených dat vyplynulo, že je dobře vykresluje mocninná závislost, která má tvar

$$E = a \cdot x^b, \quad (3.8)$$

kde E je energetická náročnost v  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , x je stupeň rozpojení, vstupní velikost ok síta nebo geometrický průměr částic (mm) a konstanty a, b jsou regresní konstanty (Naimi, 2013).

Na Obr. 13 je pak vidět grafické znázornění změřených dat závislosti energetické náročnosti rozpojování na velikosti otvorů propadových sít.



Obr. 13; Závislost energetické náročnosti rozpojování na velikosti otvorů propadových sít pro ozdobnici čínskou, proso prutnaté, cukrovou třtinu a kmen vrby (Miao, 2011)



## 4. Experimentální analýza energetické náročnosti rozpojení pšeničné slámy

Experimentální část diplomové práce bude zaměřena především na stanovení energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy při různých vlhkostech materiálu.

Nejprve bude představen materiál a samotný postup experimentu a jeho měření. Následně dojde k vyhodnocení změřených dat, kdy dojde k využití poznatků získaných v rešeršní části práce a jejich případnému potvrzení, či vyvrácení.

### 4.1. Materiál a postup měření

Vstupním materiálem celého experimentu byla pšeničná sláma (viz Obr. 14) z oblasti Litoměřicka. Jak je vidět, tak velikosti jednotlivých stébel se značně lišily, a proto se nejdříve sláma namlela na nožovém mlýnu s propadovým sítem 10 mm, aby se dosáhlo jednotné vstupní velikosti pro další mletí. Pro veškeré mletí byl použit tříbřitý nožový mlýn Retsch SM300 (viz Obr. 15) s regulovatelnými otáčkami a vyměnitelnými propadovými síty. Pro toto prvotní unifikování byl mlýn nastaven na  $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , což odpovídalo rychlosti  $20,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 14; Ukázka vstupní pšeničné slámy před a po prvotním namletí s propadovým sítem 10 mm. (Vlastní, 2021)

Poté co byl namlet veškerý materiál, tak se rozdělil na tři části, ze kterých se následně vytvořily tři sady s různými vlhkostmi. Cíl byl takový, že jedna vlhkost reprezentovala přirozenou vlhkost, druhá vlhkost měla být menší a třetí větší.

Nižší vlhkosti se docílilo sušením slámy v sušárně Binder KBC-25W (viz Obr. 16) při teplotě  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 5 hodin. Pro vyšší vlhkost třetí části slámy se sláma vlhčila po dobu dvou týdnů v plynotěsném pytli v lednici. Na začátku se přidalo odpovídající množství vody pro vlhkost přibližně 22 % hm. Obsah byl dvakrát týdně manuálně promícháván kvůli dosažení homogenní vlhkosti.



Obr. 15; Nožový mlýn Retsch SM300 a detailem na mlecí komoru s třibřítým rotorem a výměnnými propadovými sítí. (Vlastní, 2021)



Obr. 16; Sušárna Binder KBC-25W (Vlastní, 2021)

Poté se stanovila vlhkost všech tří vzorků slámy. To probíhalo tak, že se z každého vzorku odebraly tři části, které se v zvažily v keramických miskách a následně se vložily do sušárny na přibližně 24 h při teplotě 105 °C do ustálení konstantní hmotnosti. Poté se misky se slámou opět zvažily. Po následném vyhodnocení vyplynulo, že původní sláma měla vlhkost 8,1 % ± 0,4 % hm. Pro sušší slámu byla vlhkost 3,1 % ± 0,1 % hm. Vlhkost vlhčí slámy poté vyšla 22,9 % ± 0,9 % hm. (viz Tab. 6).

Vzorek	Vlhkost M
1	8,1 % ± 0,4 % hm.
2	3,1 % ± 0,1 % hm.
3	22,9 % ± 0,9 % hm.

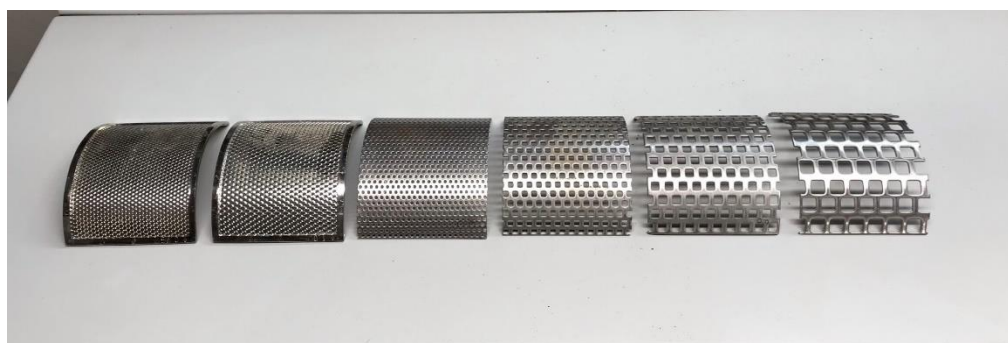
Tab. 6; Vlhkosti jednotlivých částí slámy

Z vyhodnocení vlhkostí je vidět, že máme dostatečný rozptyl na to, aby se dal následně posoudit vliv vlhkosti.

Nyní už se přistoupilo k samotnému mletí vzorků slámy. Pro všechny tři vzorky byl postup od této chvíle totožný, proto bude popsán jednotně.

Vstupní surovinou byla vždy unifikovaná velikost slámy z namletí 10 mm propadovým sítem. Tato sláma se rozdělila na dvě půle, protože se jedna vlhkost mlela vždy při 1500 ot·min<sup>-1</sup> a 3000 ot·min<sup>-1</sup>. Pro každé toto mletí byla použita propadová síta se sestupnou tendencí. Velikosti sít byly postupně 6 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm a 0,75 mm. První tři síta měla otvory čtvercového tvaru a poslední dvě měly tvar lichoběžníkový (viz Obr. 17).

Postup byl vždy takový, že se vložilo příslušné síto, namlel se celý obsah a poté se hrst namleté slámy odebrala pro síťovou analýzu. Následně se vyměnilo propadové síto o stupeň menší, a to se opakovalo až do síta 0,75 mm. Toto se opakovalo pro obě rychlosti mletí čili celkem bylo šest sad měření pro tři vlhkosti a dvě rychlosti otáček mlýnu.



Obr. 17; Jednotlivá propadová síta. Zleva od 0,75 mm do 10 mm. (Vlastní, 2021)

Po celou dobu mletí byl k mlýnu připojen třífázový analyzátor elektrických sítí a motorů Fluke 438-II, který mimo jiné měřil a ukládal data o průměrném činném výkonu mlýnu. Tento výkon byl pak použit k určení energetické náročnosti mletí a vypočítal se podle vztahu

$$E = \frac{\int_0^t P_{AM} dt - \int_0^t P_{AI} dt}{m}, \quad (4.1)$$

kde  $E$  je energetická náročnost v  $W \cdot s \cdot kg^{-1}$ ,  $P_{AM}$  je činný výkon při mletí ve  $W$ ,  $P_{AI}$  je činný výkon běhu mlýnu naprázdno ve  $W$ ,  $t$  je čas v  $s$  a  $m$  je hmotnost vzorku v  $kg$ .

Ze vztahu (4.1) je vidět, že energetická náročnost se vypočítala z rozdílu činného výkonu při mletí slámy a činného výkonu při běhu mlýnu naprázdno za čas mletí a následně byla podělena hmotností celého vzorku slámy.

Po každém ze šesti mletí se přistoupilo ke standardní sítové analýze. Data ze sítové analýzy byla dále použita k vyhodnocení distribuce velikosti částic podle RRSB rozložení, které doporučuje i Krátký et al., 2021, a platí pro něj vztah

$$D_F = D_P \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{n}}, \quad (4.2)$$

kde  $F$  je podíl částic v % hm., který je menší než daná charakteristická velikost částic  $D_F$  v  $mm$ ,  $D_P$  je charakteristická velikost částic pro kumulativní hmotnostní podíl 63,2 % hm. v  $mm$  a  $n$  je index polydisperzity (Krátký et al., 2021).

Distribuce velikosti částic se používá pro materiály, které mají nestejně velikosti částic, což rozemletá sláma je, a používá se jako jakýsi ekvivalent velikosti částic. Byly vypočítány hodnoty velikosti částic pro distribuci  $D_{50}$  a  $D_{90}$ . Hodnota parametrů  $D_{50}$  a  $D_{90}$  znázorňuje, že 50 %, resp. 90 % částic celku je menší než právě  $D_{50}$  a  $D_{90}$ . Protože sláma má jehlicovitý tvar, Krátký a Jirout (2020) doporučili pro všechny částice větší než 1  $mm$  použít korekční faktor velikosti částic 0,9.

## 4.2. Výsledky energetické náročnosti a diskuse

Po namletí a sítové analýze všech šesti sad (tři různé vlhkosti a pro každou dvě různé rychlosti mletí) se přistoupilo k analyzování a vyhodnocení naměřených hrubých dat, kdy hlavním výstupem této práce má být závislost energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy na vlhkosti.

Následně budou diskutovány různé viditelné trendy oblastí dat, které potřebují hlubší zkoumání.

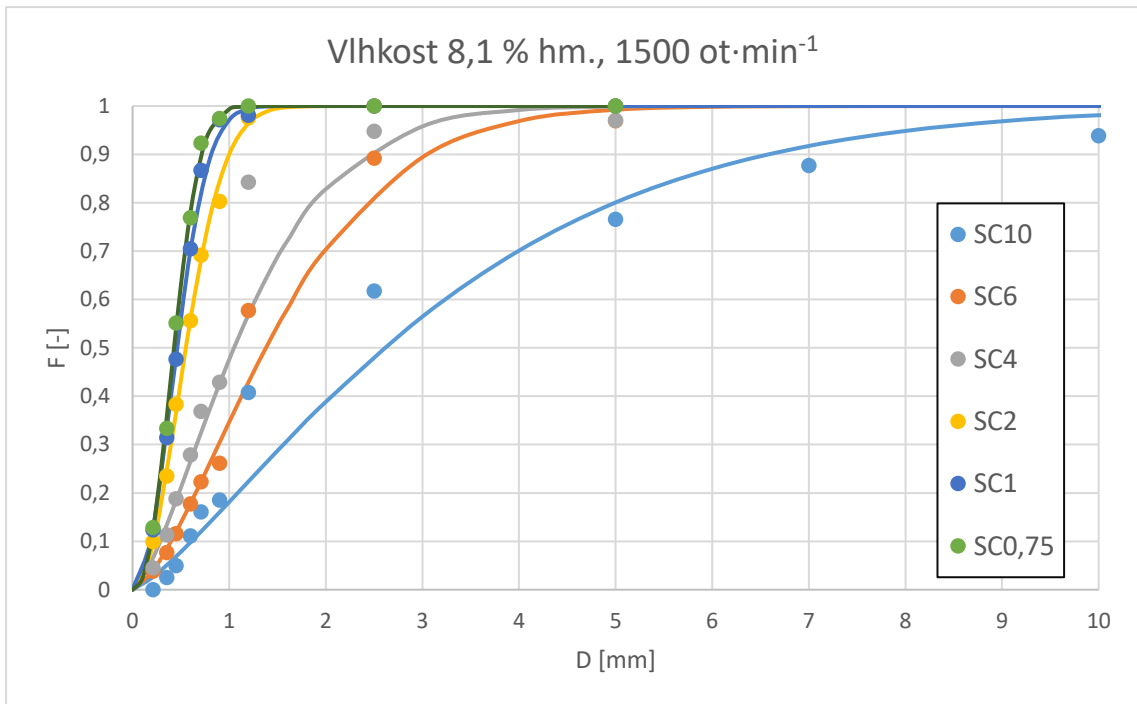
### 4.2.1. Distribuce velikosti částic

Jako první bylo nutné určit z naměřených dat při sítové analýze distribuce velikosti částí pro všech šest sad mletí. Křivky zrnitosti pro vlhkost 8,1 % hm. jsou na Obr. 18 a Obr. 19, pro vlhkost 3,1 % hm. jsou na Obr. 20 a Obr. 21 a pro vlhkost 22,9 % hm. jsou na Obr. 23 a Obr. 22. Jednotlivé body vždy reprezentují experimentálně změřené hodnoty ze sítové analýzy, křivky jsou pak vykresleny podle RRSB modelu.

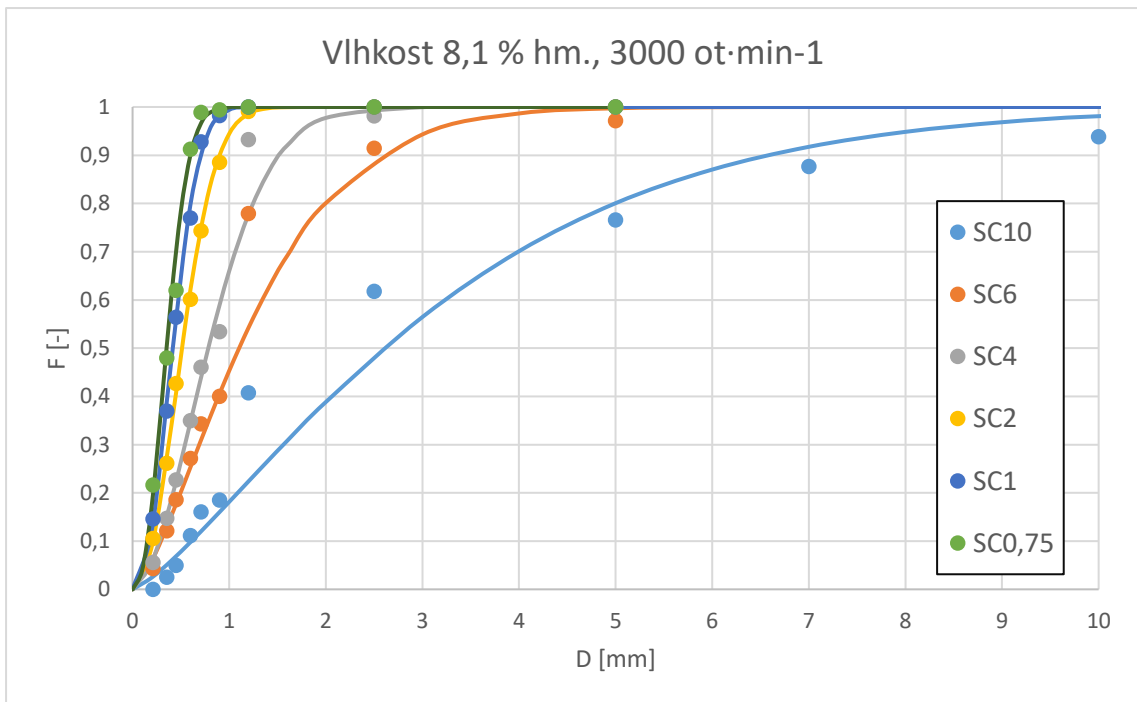
Z křivek je patrných několik věcí. Když pomineme distribuci vstupní velikosti (SC10), která je u každé jednotlivé vlhkosti vždy stejná, tak je vidět jasný trend, že rychlost rotoru  $3000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  produkovala vždy jemnější částice, než rychlost rotoru  $1500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Další informací je, že pro slámu s vlhkostí 3,1 % hm., kdy je částice křehká a mezi ostrými dochází k prostému stříhu, byla výsledná velikost částic nejjemnější při stejných otáčkách. Pro vlhkosti 8,1 % hm. a 22,9 % hm. už můžeme pozorovat vzájemný vliv stříhu a smyku. S rostoucí vlhkostí bude růst vliv smyku, tj. lignocelulózová matrice bude mít tendenci se rozpojovat po směru vláken. V aktivní části ostří dochází k ohybu částice a jejímu smyku mezi statickým a rotujícím nožem. Tyto tendence můžeme pozorovat na Obr. 24, na kterém je vidět distribuce velikosti částic pro rychlosti rotoru  $3000 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$  a výstupní síta SC4, SC1 a SC0,75. V každém grafu jsou naše tři různé vlhkosti. Je dobře vidět, že vlhkost 3,1 % hm. nám dává jemnější frakce, zatímco vlhkosti 8,1 % hm. a 22,9 % hm. vykazují velmi podobné až téměř totožné hodnoty hrubších frakcí. Tento trend byl vidět i u dalších výstupních sít a i pro rychlost rotoru  $1500 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ .

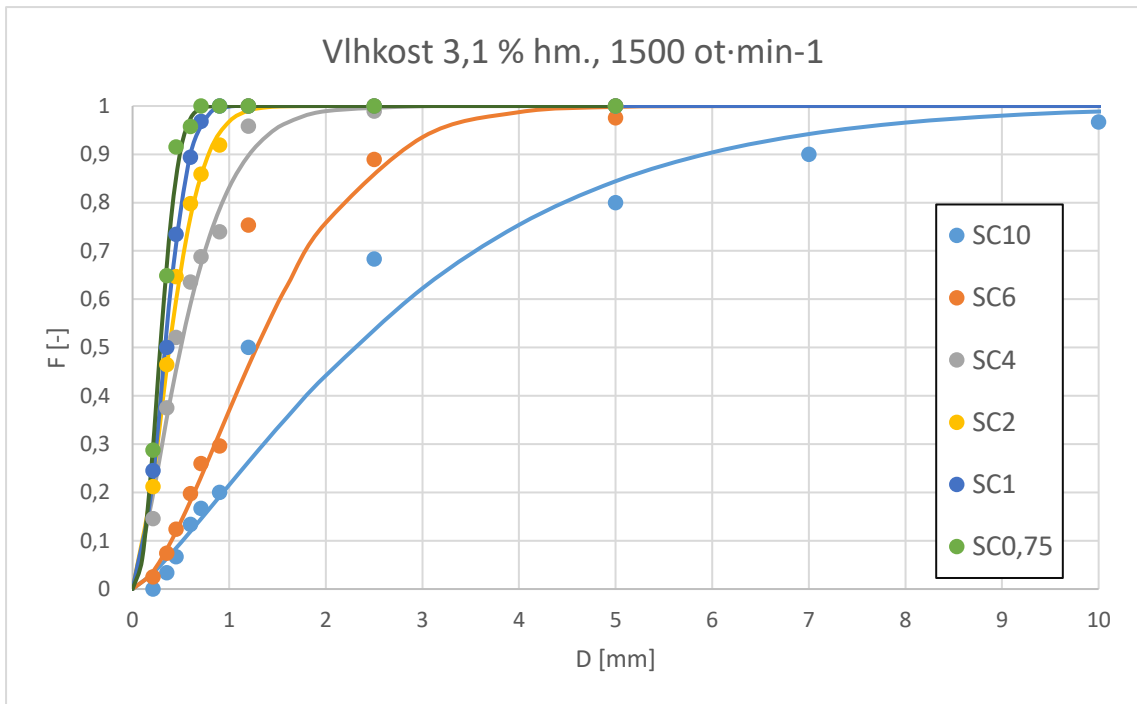
Pro modelování energetické náročnosti se z dat vzaly hodnoty  $D_{50}$  a  $D_{90}$ . Hodnoty  $D_{50}$  se pohybovaly v rozmezí 0,260-2,608 mm a hodnoty  $D_{90}$  se pohybovaly v rozmezí 0,442-8,054 mm. Jak již bylo zmíněno, tak pro všechny charakteristické velikosti částic větší než 1 mm byl použit korekční faktor 0,9 kvůli jehlicovému tvaru.



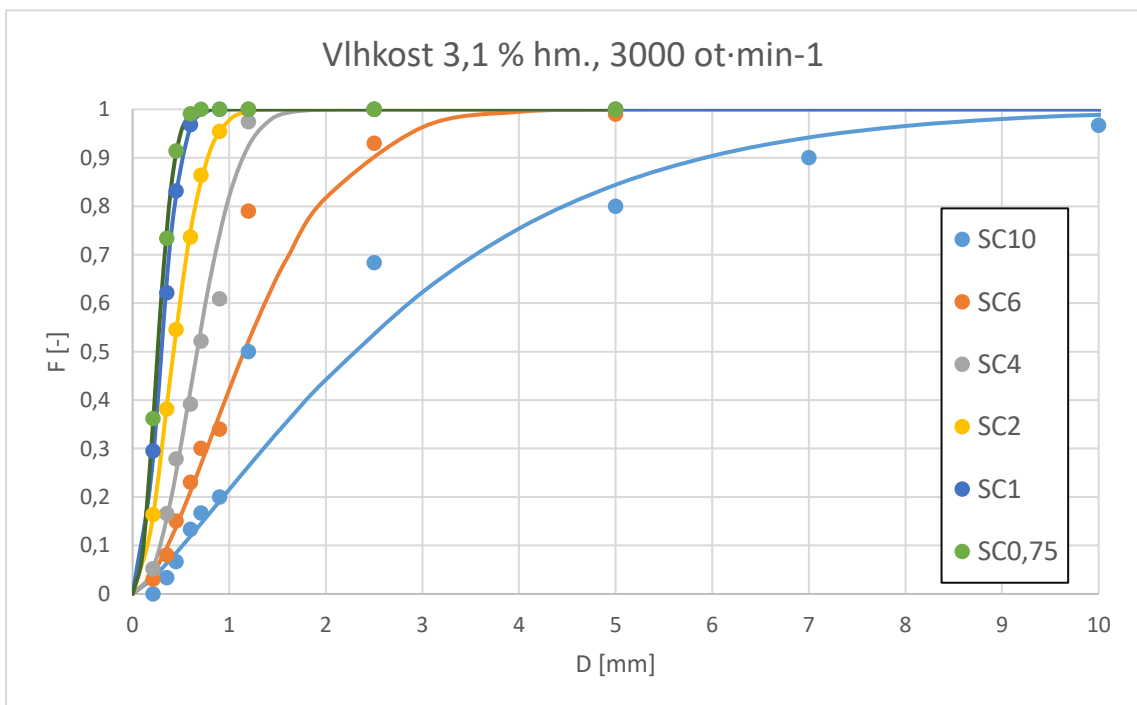
Obr. 18; Distribuce velikosti částic, vlhkost 8,1 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty



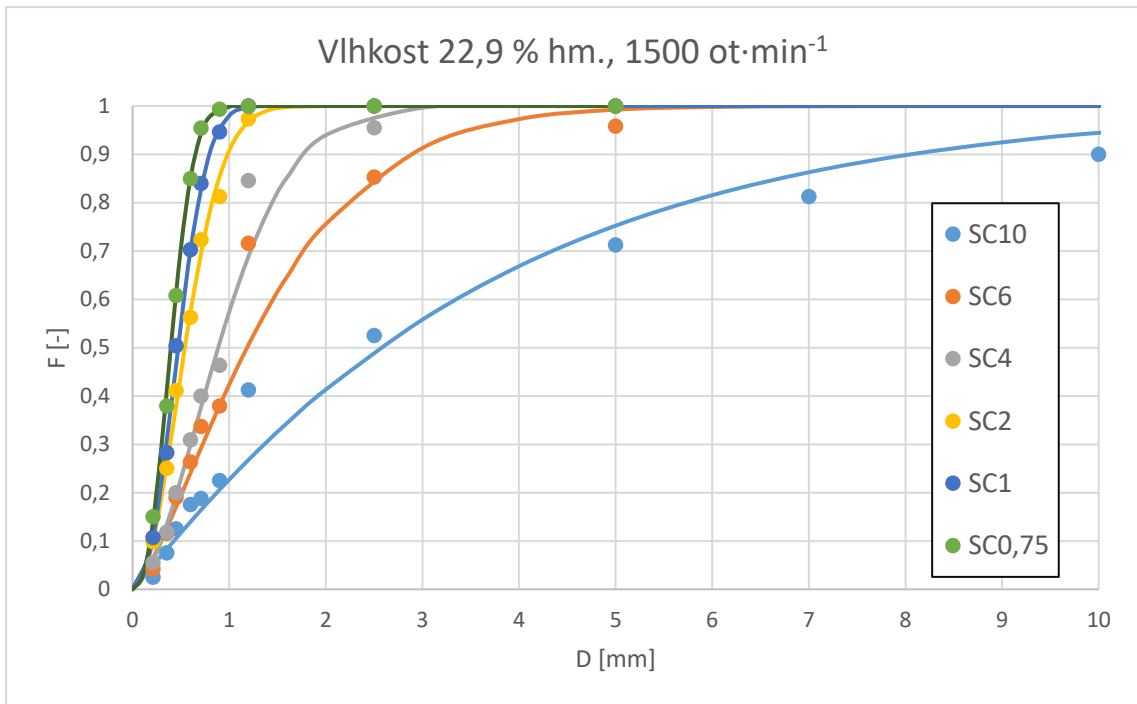
Obr. 19; Distribuce velikosti částic, vlhkost 8,1 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty



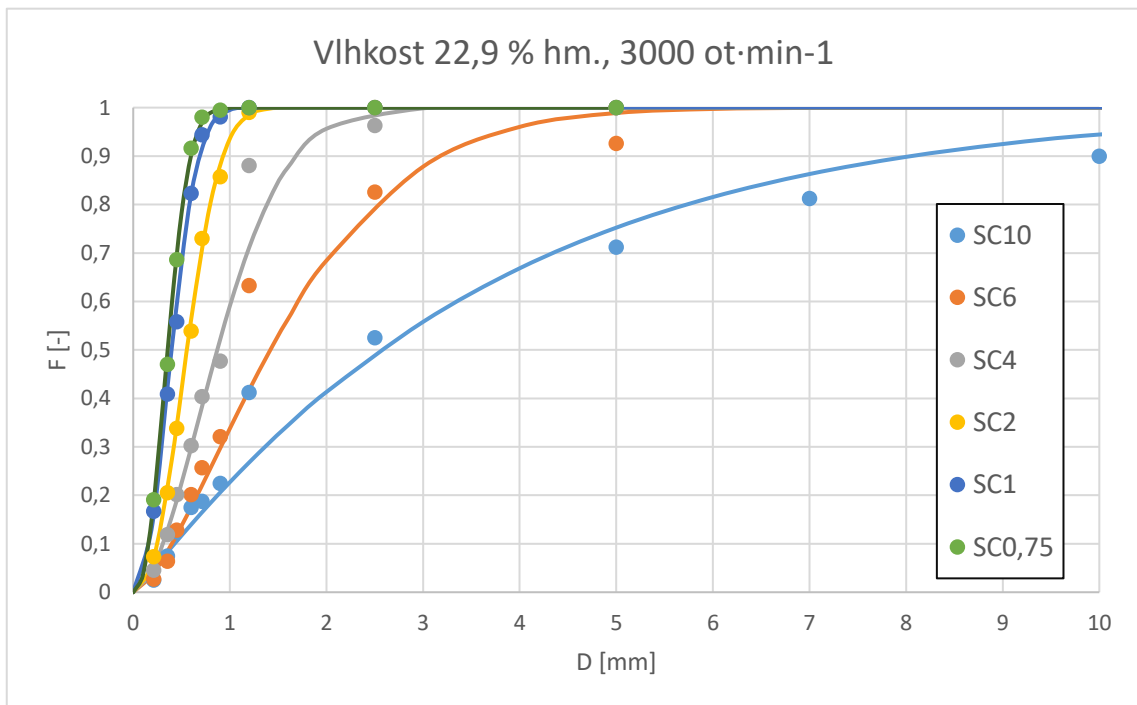
Obr. 20; Distribuce velikosti částic, vlhkost 3,1 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty



Obr. 21; Distribuce velikosti částic, vlhkost 3,1 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty

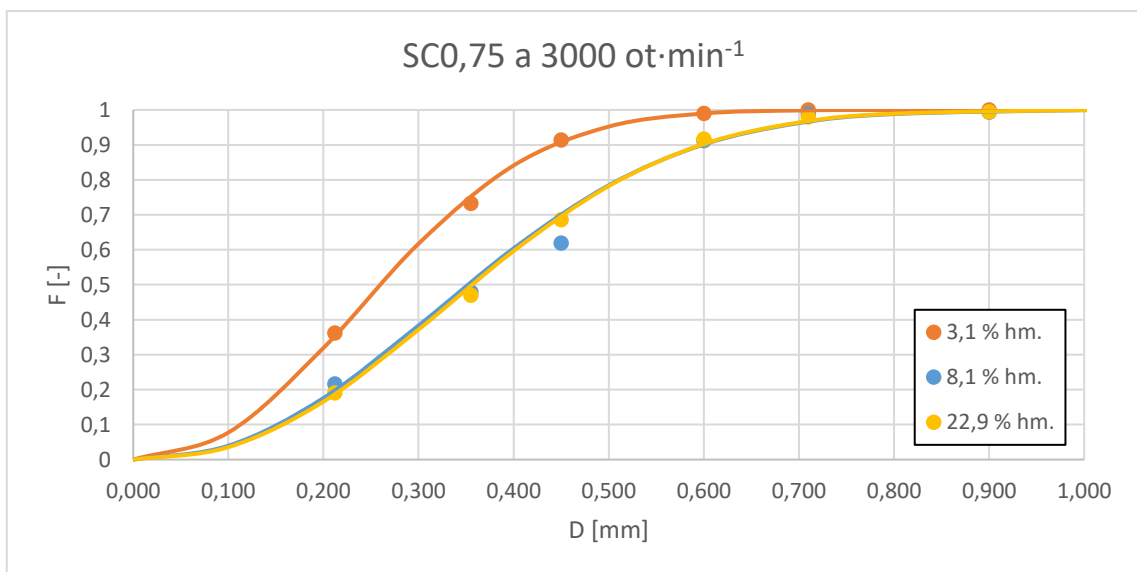
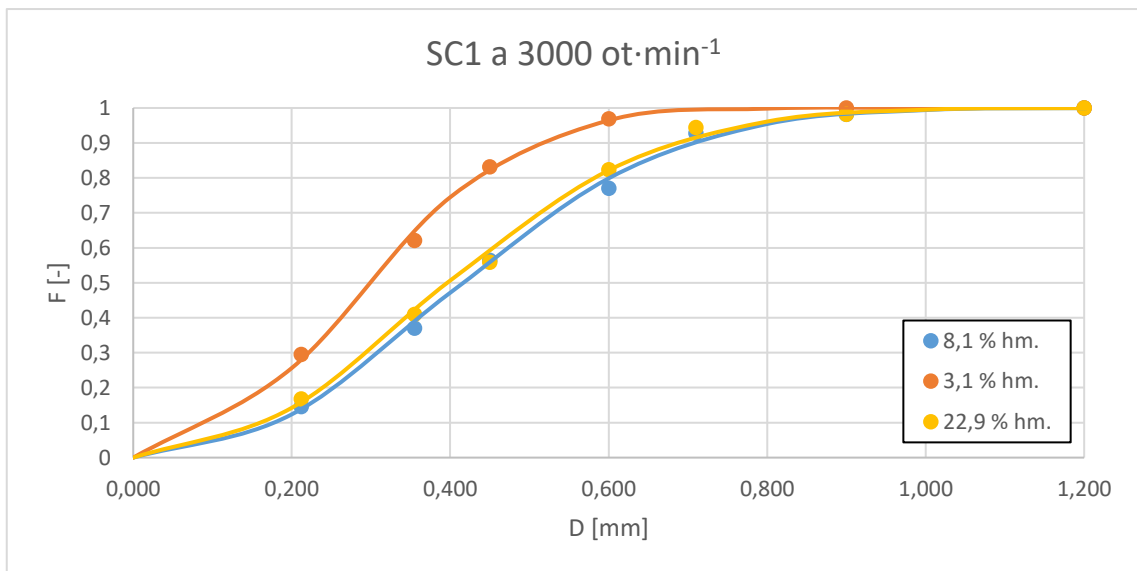
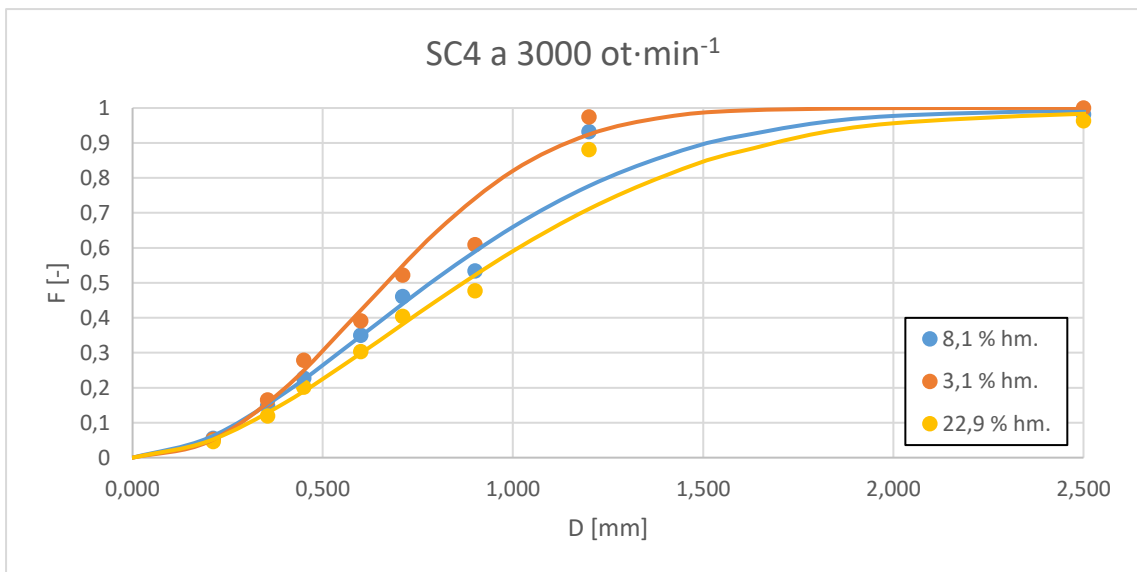


Obr. 23; Distribuce velikosti částic, vlhkost 22,9 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty



Obr. 22; Distribuce velikosti částic, vlhkost 22,9 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min<sup>-1</sup>, křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty





Obr. 24; Distribuce velikosti částic vždy pro otáčky rotoru 3000 ot·min<sup>-1</sup> a pro konkrétní jedno síto a různé vlhkosti

#### 4.2.2. Modelování energetické náročnosti rozpojování

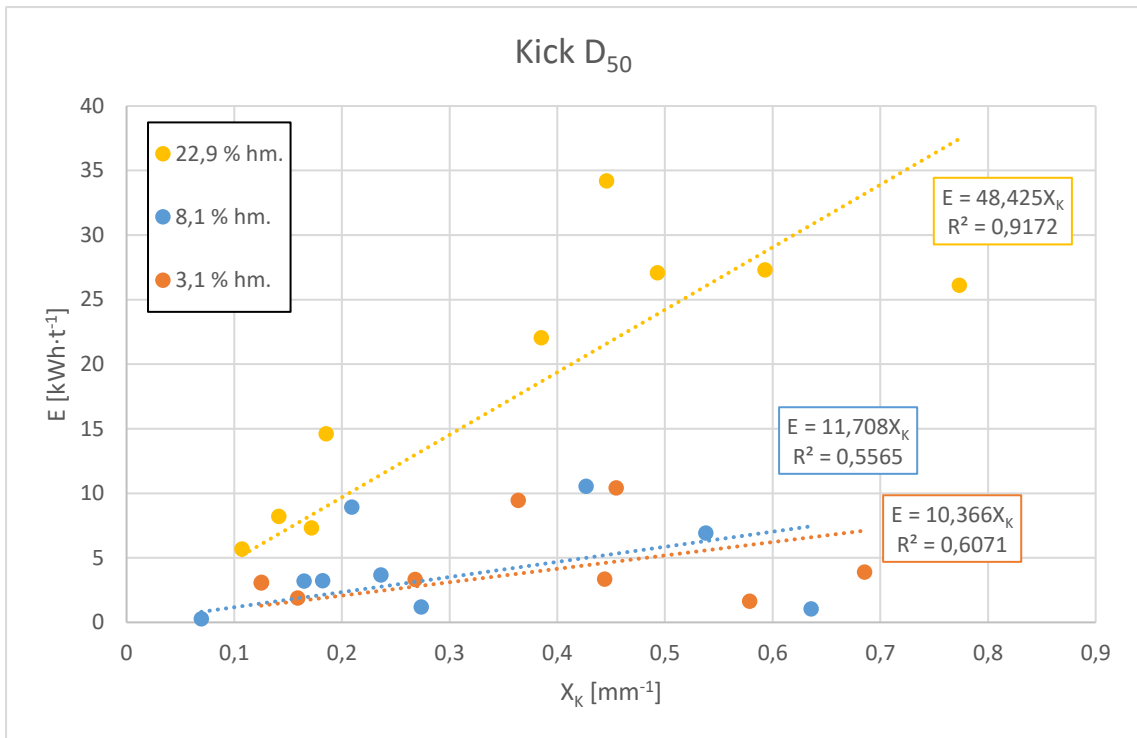
Nyní už můžeme přistoupit k hlavnímu cíli této práce, a tím je stanovení energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy v závislosti na vlhkosti. Podíváme-li se na energetické náročnosti vypočítané podle vztahu (4.1), zjistíme, že ty se pro vlhkost slámy 3,1 % hm. pohybovaly v rozmezí 1,638-10,417 kWh·t<sup>-1</sup>, pro vlhkost slámy 8,1 % hm. se pohybovaly v rozmezí 0,280-10,531 kWh·t<sup>-1</sup> a pro vlhkost slámy 22,9 % hm. se pohybovaly v rozmezí 5,673-34,183 kWh·t<sup>-1</sup>. Nicméně, samotné hodnoty nám toho příliš neřeknou a mnohem větší vypovídající hodnotu pro nás budou mít po vymodelování podle tří konvenčních teorií.

Pro modelování byly použity teorie Kickova (Obr. 25 a Obr. 26), Bondova (Obr. 27 a Obr. 28) a Rittingerova (Obr. 29 a Obr. 30), které byly blíže popsány v rešeršní části, a pro každou byly použity hodnoty D<sub>50</sub> i D<sub>90</sub>. Jak již bylo zmíněno v rešeršní části práce, tak rozpojování lignocelulózové biomasy by měla nejvíce sedět teorie Rittingerova. To, která teorie nejlépe modeluje náš případ, se dá posoudit podle koeficientu determinance R<sup>2</sup>. Ten nám říká, jak moc naše data odpovídají danému modelu.

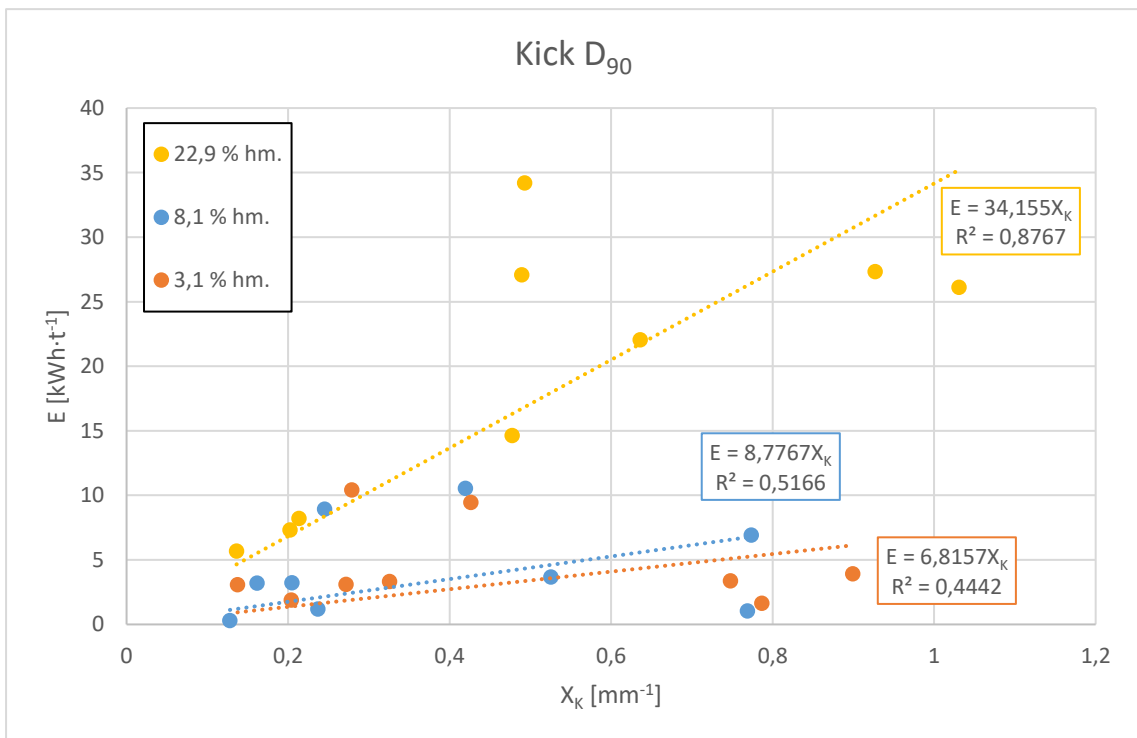
Pokud se nejdříve podíváme na vlhkosti 3,1 % hm. a 8,1 % hm., tak u nich můžeme vidět, že nejlepších hodnot koeficientu determinance R<sup>2</sup> dosahuje opravdu Rittingerova teorie, zatímco nejhorší R<sup>2</sup> je u Kickova modelu. To nám potvrzuje závěr, ke kterému došli Ghorbani (2010), Naimi (2013), Temmerman (2013) a Krátký (2020). Zároveň to také potvrzuje vhodnost Rittingerova modelu pro malé částice v řádu desetin mm, a které jsou křehké.

Trochu méně jednoznačná situace je u slámy s vlhkostí 22,9 % hm. Zde jsou hodnoty R<sup>2</sup> velmi podobné a liší se pouze v rozmezí deseti procentních bodů. Nejlépe nám vychází model Bondův, nicméně rozdíly v přesnosti modelů jsou opravdu malé. Zároveň nám to ale potvrzuje teorii, že Kickova a Bondova teorie zohledňuje i elasticitu materiálu, kterou má vlhká sláma rozhodně větší než dvě sušší slámy.

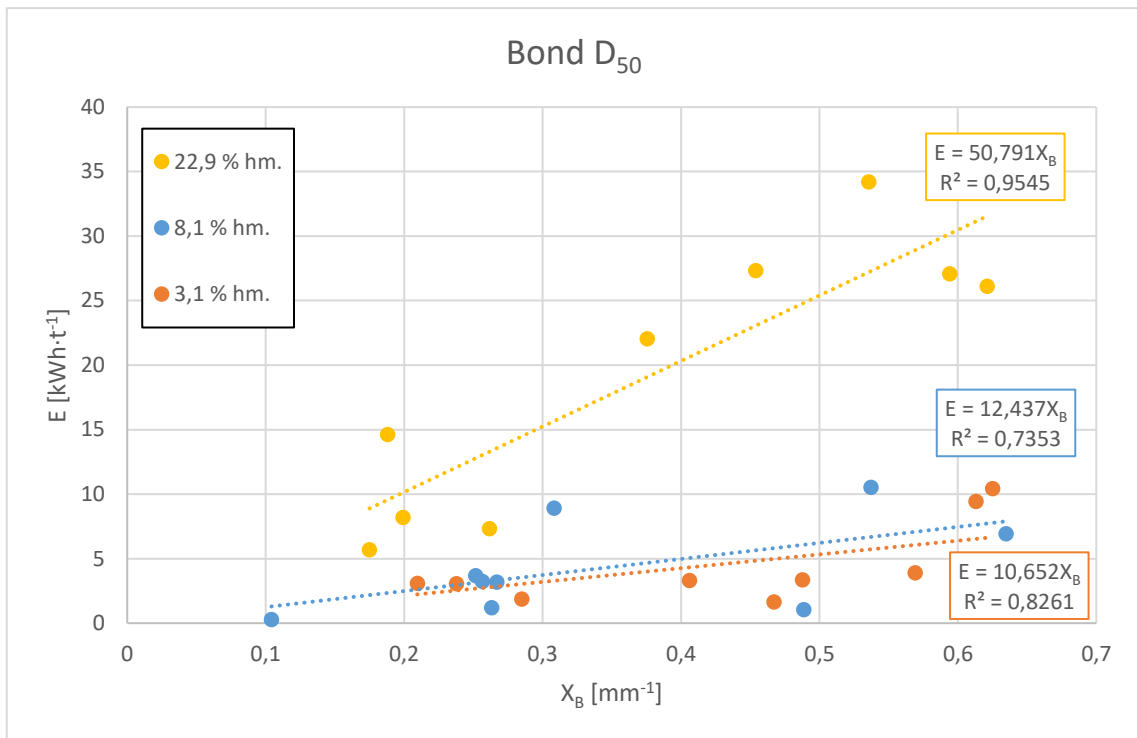
Nicméně pokud se podíváme na grafy jako celek pro všechny tři vlhkosti, tak můžeme konstatovat, že opravdu pro modelování energetické náročnosti rozpojování lignocelulózové biomasy nejlépe odpovídá model Rittingerův. Pro další závěry tedy bude použit právě tento model.



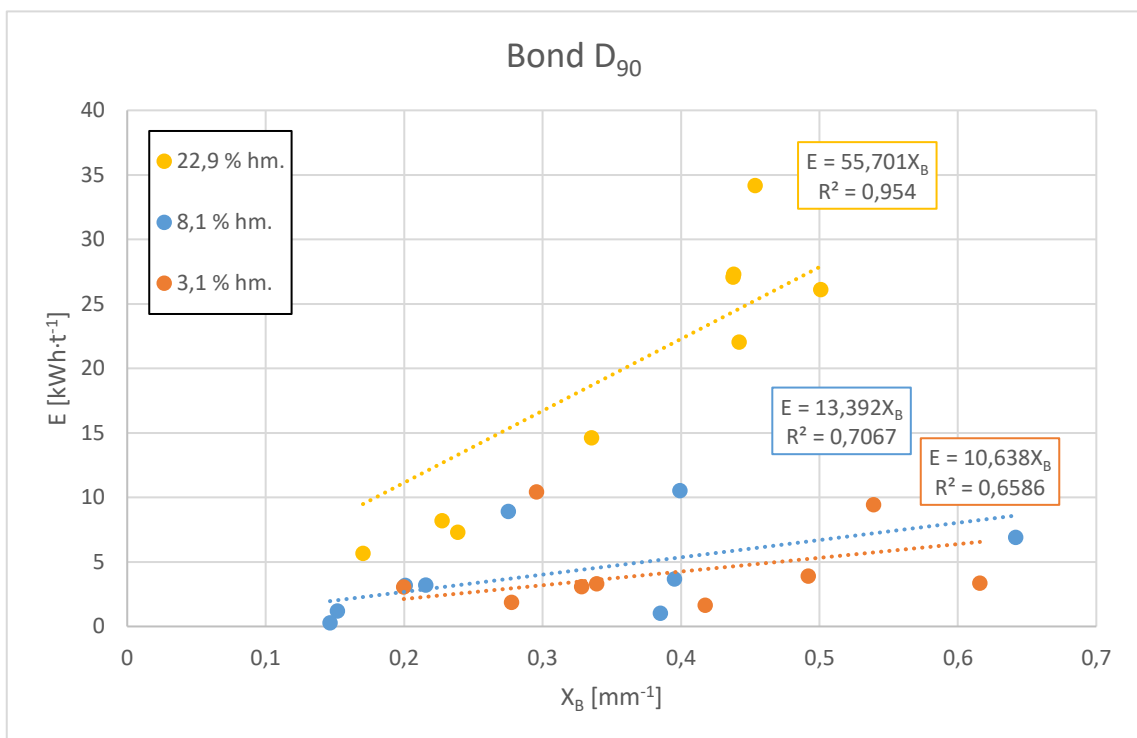
Obr. 25; Kick – závislost energetické náročnosti mletí na parametru X<sub>R</sub> pro D50 pro tři různé vlhkosti



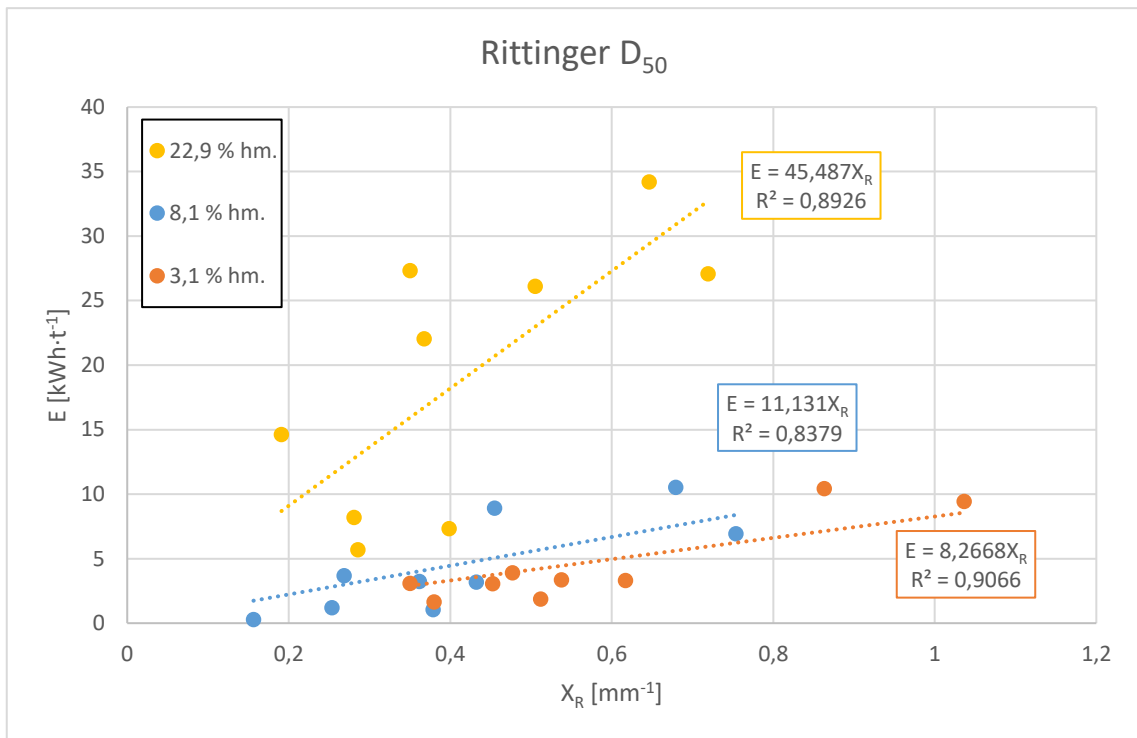
Obr. 26; Kick – závislost energetické náročnosti mletí na parametru X<sub>R</sub> pro D90 pro tři různé vlhkosti



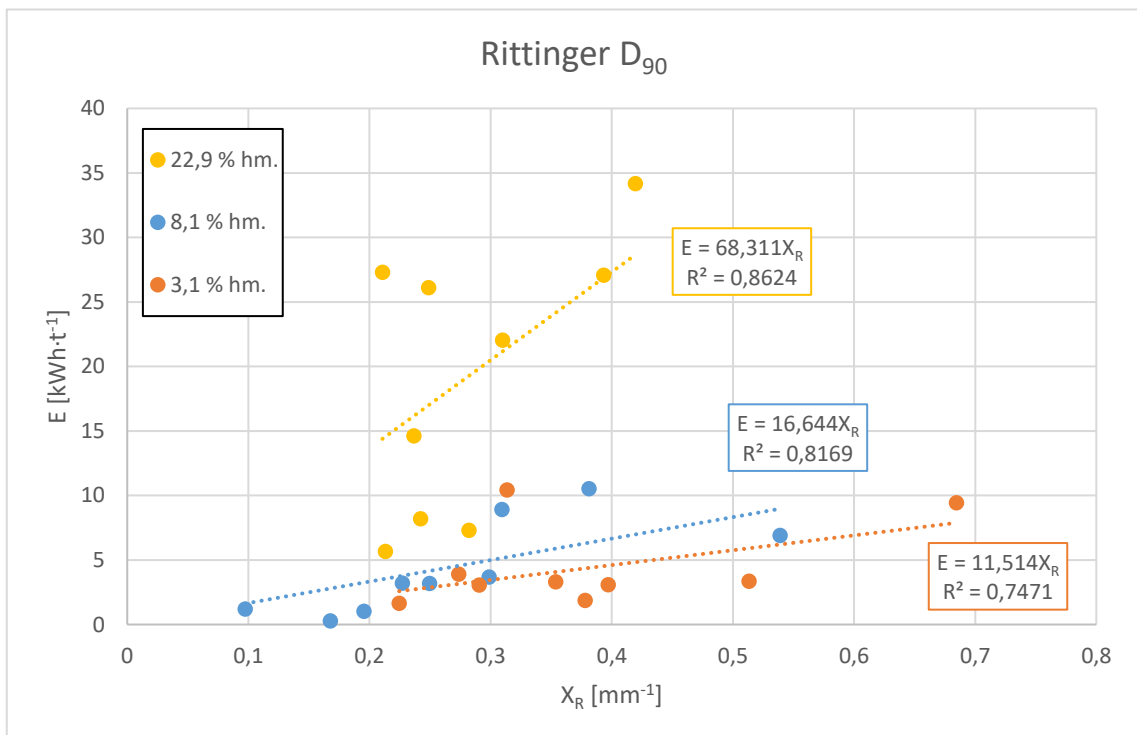
Obr. 27; Bond – závislost energetické náročnosti mletí na parametru  $X_B$  pro D50 pro tři různé vlhkosti



Obr. 28; Bond – závislost energetické náročnosti mletí na parametru  $X_B$  pro D90 pro tři různé vlhkosti



Obr. 29; Rittinger – závislost energetické náročnosti mletí na parametru  $X_R$  pro D50 pro tři různé vlhkosti



Obr. 30; Rittinger – závislost energetické náročnosti mletí na parametru  $X_R$  pro D90 pro tři různé vlhkosti

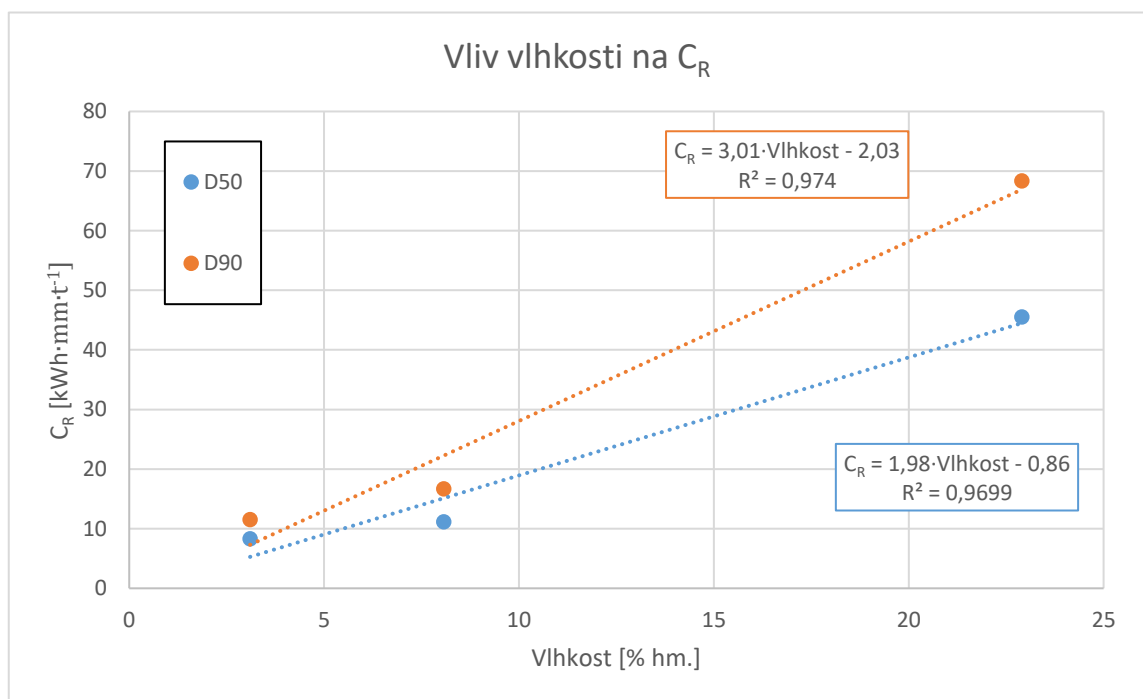
Po nalezení nejlepšího modelu pro náš případ mletí pšeničné slámy můžeme přistoupit k dalšímu kroku, a to je posouzení vlivu vlhkosti na materiálové konstantě  $C_R$ .

Z Obr. 29 pro Rittingera  $D_{50}$  jsou hodnoty  $C_R = 45,487 \text{ kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 22,9 % hm., 11,131  $\text{kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 8,1 % hm. a 8,267  $\text{kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 3,1 % hm. Z Obr. 30 pro Rittingera  $D_{90}$  jsou hodnoty  $C_R = 68,311 \text{ kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 22,9 % hm., 16,644  $\text{kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 8,1 % hm. a 11,514  $\text{kWh}\cdot\text{mm}\cdot\text{t}^{-1}$  pro vlhkost 3,1 % hm.

Už z těchto hodnot je patrné, že hodnoty  $C_R$  jsou vyšší pro větší vlhkosti. Pokud si tyto hodnoty vyneseme do grafu závislosti  $C_R$  na vlhkosti (Obr. 31), je patrná exponenciální závislost, kterou však lze v daném rozmezí linearizovat. Pro jistější konstatování by bylo zapotřebí získat data alespoň pro další dvě vlhkosti mezi 8,1 % hm. a 22,9 % hm. Nicméně lineární trend je i tak zřejmý a potvrzuje to i podobné závěry z prací Liu (2019) a Krátkého (2021). Z grafu lze vyčíst následující rovnice energetické náročnosti pro Rittingerův model, kde konstanta  $C_R$  je ve formě lineární závislosti na vlhkosti  $M$

$$E_{D50} = (1,98 \cdot M - 0,86) \cdot \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right), \quad (4.3)$$

$$E_{D90} = (3,01 \cdot M - 2,03) \cdot \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right). \quad (4.4)$$



Obr. 31; Závislost Rittingerovy konstanty  $C_R$  na vlhkosti pšeničné slámy

Na základě získaných dat jsme dospěli k závěru, že je možné použít Rittingerovu teorii pro modelování energetické náročnosti rozpojování pšeničné slámy v nožovém mlýnu a že Rittingerova materiálová konstanta  $C_R$  je přímo úměrná vlhkosti slámy.

Pro úplnost by bylo dobré shrnout platnost našich zjištěných modelů (4.3) a (4.4). Modely platí pro mletí pšeničné slámy s vlhkostí  $M$  od 3,1 % hm. do 22,9 % hm, pro mletí v nožovém mlýnu s rychlostí otáčení od  $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , průtok materiálu od  $12,62 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  do  $39,33 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , pro charakteristický rozměr  $D_{50}$  0,260-2,608 mm a  $D_{90}$  0,442-8,054 mm.

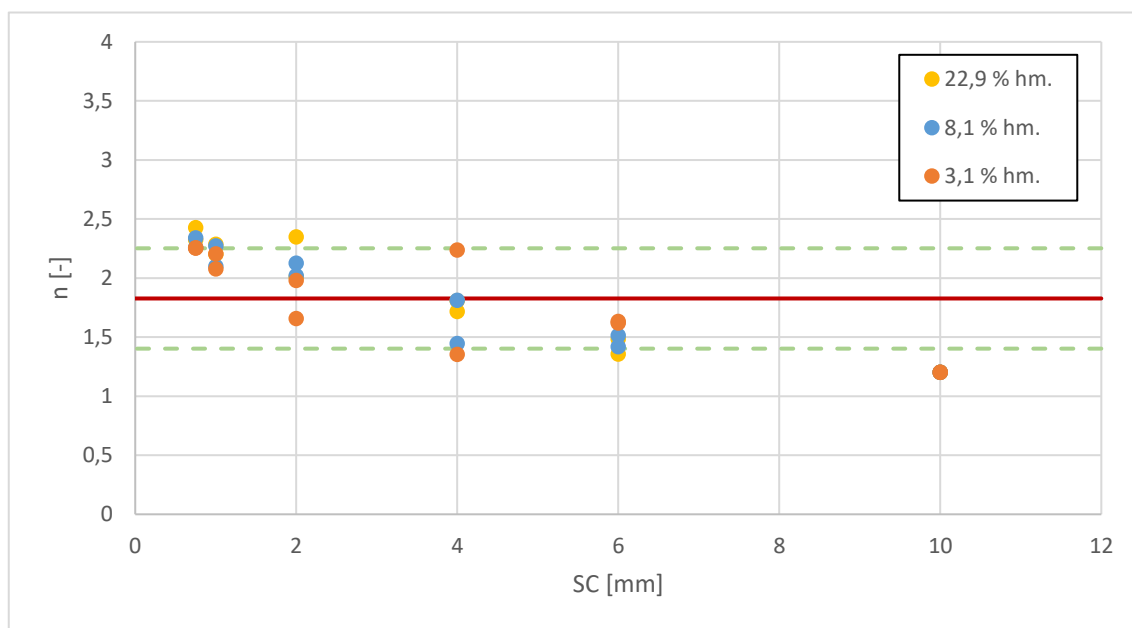
#### 4.2.3. Další závislosti z naměřených dat

Následující podkapitola bude zaměřena na další závislosti a trendy ze získaných a vypočítaných dat při mletí slámy, nicméně závislosti už nebudou tak přesně vypovídající, většinou z důvodu nedostatku dat. Bude se jednat spíše o jakési náznaky, protože konkrétní modely by nebyly dostatečně přesné. Přesto bude dobré je zde uvést už jen z důvodu toho, že bude ukázáno, kam by mohly směřovat další experimenty.

Základní rovnicí této podkapitoly bude rovnice (4.2) RRSB rozložení

$$D_F = D_P \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{n}},$$

u níž se budeme snažit zjistit, jestli její základní charakteristiky – index polydisperzity  $n$  a charakteristická velikost částic  $D_P$  – nějak závisí na velikosti propadového síta, na vlhkosti slámy nebo na rychlosti otáček rotoru.



Obr. 32; Závislost indexu polydisperzity  $n$  na velikosti propadových sít  $SC$  pro tři různé vlhkosti

První závislost, na kterou se podíváme, bude závislost indexu polydisperzity  $n$  na velikosti propadových sít  $SC$  pro naše tři vlhkosti (Obr. 32). Čím blíže je index polydisperzity nule, tím je velikost částic v celku heterogenní. Pokud se podíváme na naši hodnotu indexu  $n$ , tak ta je  $1,827 \pm 0,425$ . Tato hodnota byla zjištěna na základě lineární regrese našich hodnot. Testování hypotézy s přesností 95 % potvrdilo, že hodnotu indexu polydisperzity  $n$  lze považovat za konstantní, a tím pádem nezávislou na velikosti propadového síta  $SC$  a na vlhkosti pšeničné slámy.

Další závislostí, na kterou bychom se mohli zaměřit, je závislost charakteristického rozměru částic  $D_p$  na velikosti propadových sít  $SC$ . Idea byla taková, že pokud si vezmeme jedno stéblo slámy, tak po jednom střihu mlýnu v mlecí komoře z něj dostaneme dvě stébla, z těchto dvou stébel po dalším střihu budou čtyři, pak osm a tak dále. Z toho plyne, že počet výsledných částic je exponenciálně závislý na počtu horizontálních, vertikálních a diagonálních řezů částic. Čím je menší velikost síta, tím je větší množství částic a čím je jemnější distribuce velikosti částic, tím menší je velikost částic  $D_p$ . Tyto závěry byly prokázány v pracích Bitry (2009) nebo Maniho et al. (2004). Na základě toho vznikl vztah pro závislost charakteristické velikosti částic  $D_p$  z RRSB modelu a velikost propadového síta  $SC$

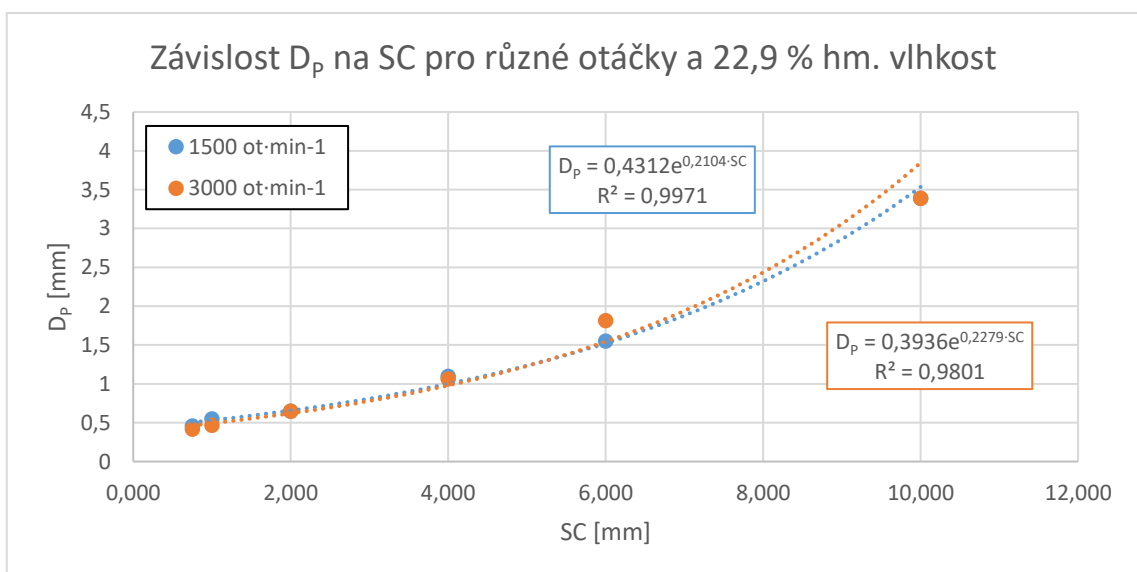
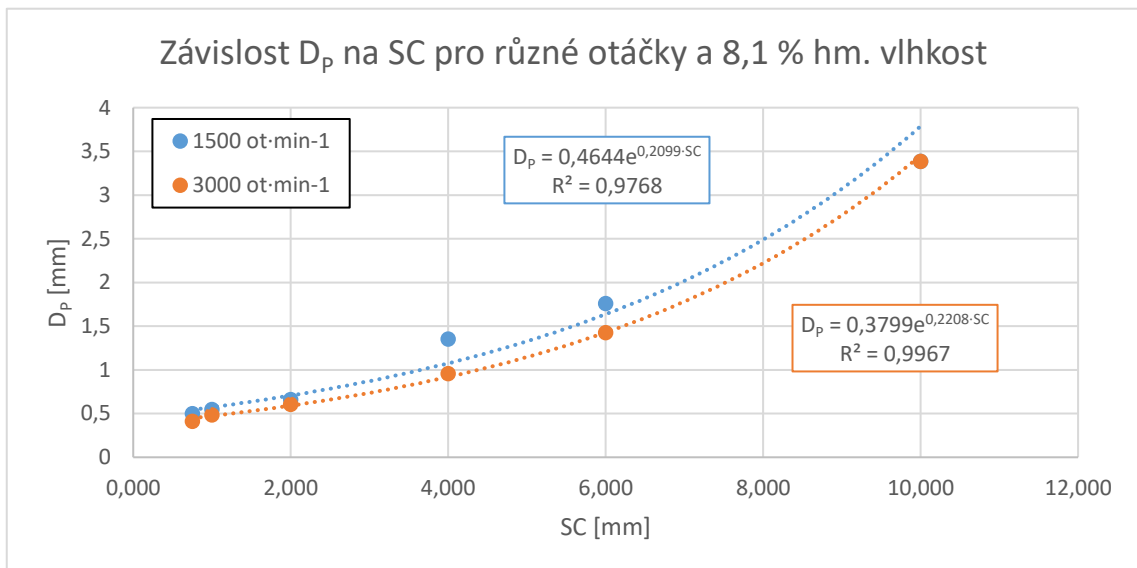
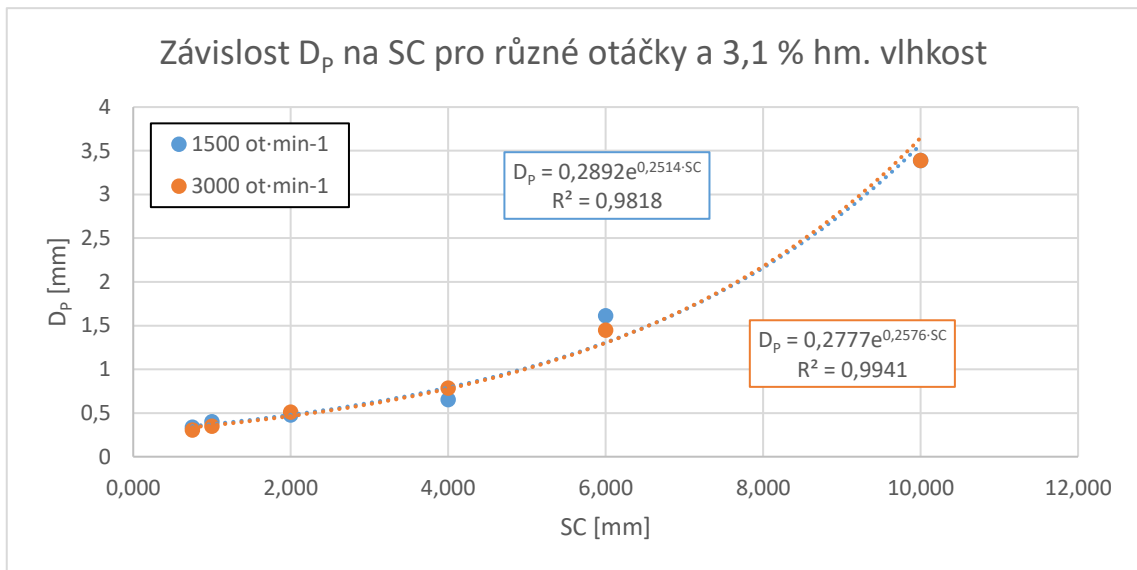
$$D_p = A \cdot e^{B \cdot SC}, \quad (4.5)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou bezrozměrné charakteristiky daného modelu (Krátký, 2021).

Pokud si tedy vyneseme jednotlivá data do grafů (Obr. 33) pro tři různé vlhkosti a pro každou dvojice otáčky, můžeme vidět, že i tato data odpovídají modelu (4.5) s koeficienty determinance blížící se hodnotě 1.

Když se podíváme na vliv otáček, tak pro graf slámy s 3,1 % hm. se oba grafy téměř překrývají a vliv otáček zde tedy nepozorujeme. U vlhkosti 8,1 % hm. však již vidíme, že vyšší otáčky  $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  nám dávají jemnější frakci výsledné namleté slámy. Tyto dva grafy by nám potvrdily fakt, že sušší sláma je křehčí a velikost otáček na výslednou jemnost vliv nemá, a u vlhčí slámy, kdy získává na elasticitě, už bychom rozdílne jemnosti pro různé otáčky mohli pozorovat. Nicméně toto tvrzení nám vyvrací graf pro vlhkost 22,9 % hm. U něj již vliv otáček opět skoro nepozorujeme. Vzhledem k charakteru těchto tří grafů nelze úplně potvrdit hypotézu vlivu otáček na jemnost výsledných částic pro různá propadová síta, ale určité trendy jsou zde vidět.

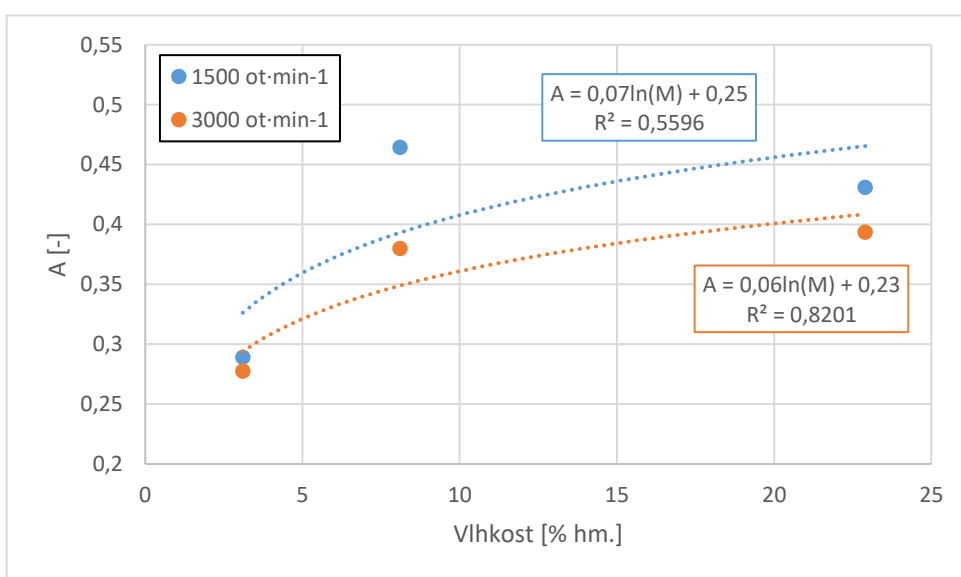




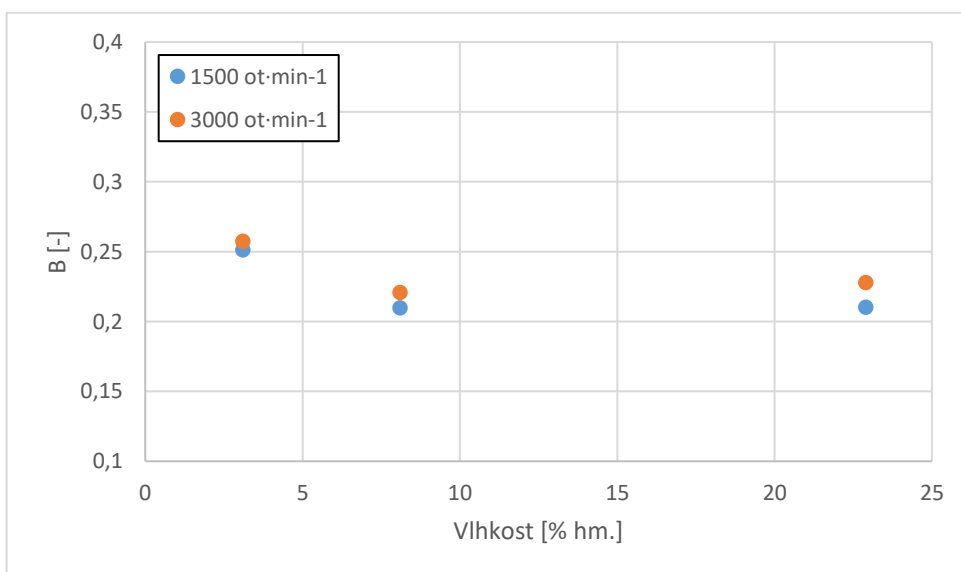
Obr. 33; Závislosti parametru  $D_p$  na velikosti propadových sít pro různé vlhkosti a rychlosti otáčení rotoru, body jsou experimentální data, křivky jsou exponenciální regresní křivky

Další věc, kterou si můžeme naznačit, je vliv parametrů A a B na vlhkosti ze vztahu (4.5). K tomu nám poslouží šest hodnot pro každý parametr z Obr. 33.

U závislosti parametru A na vlhkosti (Obr. 34) můžeme pozorovat určitý logaritmický trend růstu, který má strmý směr do přibližně 8 % hm. vlhkosti a poté jsou hodnoty spíše konstantní. U grafu závislosti parametru B na vlhkosti (Obr. 35) se zdá být hodnota B konstantní čili nezávislá na vlhkosti. Dalo by se tedy říct, že závislost  $D_p$  na vlhkosti ve vztahu (4.5) ovlivňuje především parametr A. Je však potřeba zdůraznit, že zde pracujeme vždy se třemi body, takže se žádné závěry moc dělat nedají. Grafy postačí opravdu jen pro jakési náznaky a pro potvrzení, nebo vyvrácení těchto náznaků by bylo zapotřebí více dat z měření rozpojování pšeničné slámy.



Obr. 34; Závislost parametru A na vlhkosti



Obr. 35; Závislost parametru B na vlhkosti

Pokud sesbíráme data z této podkapitoly, můžeme stanovit dva modely distribuce velikosti částic RRSB rozložení (4.2) pro naše dvojce různé otáčky rotoru mlýnu. Předtím musíme zjistit hodnotu parametru B, který pro otáčky 1500 ot·min<sup>-1</sup> je 0,224 ± 0,024 a pro otáčky 3000 ot·min<sup>-1</sup> má hodnotu 0,235 ± 0,020.

Nyní již můžeme sestavit dva predikční modely distribuce velikosti částic RRSB rozložení, které mají tvar

$$D_{F1500} = 0,07 \cdot (\ln(M) + 0,25) \cdot e^{0,224 \cdot SC} \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{1,827}}, \quad (4.6)$$

$$D_{F3000} = 0,06 \cdot (\ln(M) + 0,23) \cdot e^{0,235 \cdot SC} \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{1,827}}, \quad (4.7)$$

kde M je vlhkost v % hm., SC je velikost propadového síta a F je podíl částic v % hm., který je menší než daná charakteristická velikost částic D<sub>F</sub>.

Nicméně tyto dva modely stojí na opravdu křehkých základech a je nutné je brát s určitou rezervou a pohlížet na ně spíše jako na náznak toho, jak by mohly vypadat a pro jejich potvrzení bude dále nutné zkoumat danou problematiku hlouběji.

## 5. Závěr

Práce byla rozdělena na část rešeršní a část experimentální. V rešeršní části jsem se nejdříve zaměřil na důležitost rozpojení biomasy před další technologií zpracování, dále na roční produkci odpadní biomasy a na složení jednotlivých typů lignocelulózové biomasy. Dále jsou v práci shrnuty mechanické vlastnosti různých biomas z některých experimentálních prací, konkrétně pevnosti v tahu a ve smyku při určité vlhkosti materiálu.

Navazuje kapitola o způsobech rozpojování a používaných zařízeních pro mechanickou dezintegraci biomasy, ze kterých se nejlépe osvědčily nožový, úderový a případně diskový mlýn. V této kapitole jsou také konkrétní experimentální práce, ve kterých se autoři věnovali dezintegraci různých druhů biomasy. Jejich výsledky jsou shrnuty v závislosti na typu dezintegrátoru, poměru původní/finální velikosti, obsahu vlhkosti a energetické náročnosti při rozpojení.

Poslední část rešeršní části se věnuje přístupům modelování energetické náročnosti. Nejprve je zaměřena na konvenční – Rittingerův, Bondův a Kickův model. Z výsledků konkrétních prací vyplynulo, že pro rozpojování biomasy, především pro nižší vlhkosti (zhruba 15-20 % hm.), je nejvhodnější model Rittingerův. Dále jsou zde nastíněny některé další experimentální přístupy modelování rozpojování biomasy a jejich modely.

Poté už jsem se v práci věnoval svojí experimentální části. Konkrétně se jednalo o mletí pšeničné slámy se třemi různými vlhkostmi (3,1 % hm., 8,1 % hm. a 22,9 % hm.) a dvěma různými otáčkami nožového mlýnu ( $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Nejprve je zde představeno, jak samotný experiment probíhal, a následně postup vyhodnocení získaných dat.

Poté už následuje část výsledků z měření a jejich diskuse. Nejdříve jsou zde ukázány grafy distribuce velikosti částic pro všech šest měření.

Na základě těchto distribucí bylo možné přistoupit k hlavnímu cíli práce, a to k modelování energetické náročnosti mletí pšeničné slámy v závislosti na vlhkosti a provozních podmínkách mlýnu. Pro modelování se použily tři konvenční modelovací teorie rozpojování – Kickova, Bondova a Rittingerova. Jak se ukázalo, tak především pro dvě nižší vlhkosti vycházel nejlépe model Rittingerův, což také potvrdilo závěry různých prací zmíněných v rešeršní části. Rittingerův model se dále použil ke stanovení dvou modelů závislosti energetické náročnosti rozpojování na vlhkosti a konkrétní vstupní

a výstupní velikosti pšeničné slámy pro charakteristické rozměry  $D_{50}$  a  $D_{90}$ . Výsledné modely jsou následující

$$E_{D_{50}} = (1,98 \cdot M - 0,86) \cdot \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right),$$

$$E_{D_{90}} = (3,01 \cdot M - 2,03) \cdot \left( \frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right),$$

a platí pro mletí pšeničné slámy s vlhkostí  $M$  od 3,1 % hm. do 22,9 % hm, pro mletí v nožovém mlýnu s rychlostí otáčení od  $10,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $20,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , průtok materiálu od  $12,62 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  do  $39,33 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , pro charakteristický rozměr  $D_{50}$  0,260-2,608 mm a  $D_{90}$  0,442-8,054 mm. Z toho plyne, že z mé strany byl hlavní cíl práce splněn.

Dále jsou diskutovány další vedlejší závislosti ze změřených a získaných dat. Nicméně všechny následující závislosti a závěry z nich nemohou být úplně potvrzeny, především kvůli nedostatku dat, a jsou tedy pouze jakýmsi náznaky nebo trendy pro jejichž potvrzení, či vyvrácení by bylo potřeba více dat z měření.

Nejdříve jsem se podíval na závislost indexu polydisperzity  $n$  na velikosti propadového síta  $SC$  pro různé vlhkosti. Zde se ukázalo, že index polydisperzity nezávisí na velikosti propadového síta ani na vlhkosti.

Další je závislost charakteristického rozměru částic  $D_P$  na velikosti propadových sít  $SC$  pro různé otáčky rotoru a vlhkosti pšeničné slámy. Zde se potvrdila exponenciální závislost  $D_P$  na  $SC$ . U 8,1 % hm. vlhkosti se ukázala určitá závislost jemnosti frakce na otáčkách, nicméně u dvou ostatních vlhkostí se toto nepotvrdilo.

Poslední věcí, na kterou jsem se zaměřil, byla závislost parametrů  $A$  a  $B$  na vlhkosti z exponenciálního modelu z předchozí kapitoly. Tady se ukázalo, že závislost na vlhkosti ovlivňuje především parametr  $A$ .

Z těchto vedlejších závislostí vykryštovaly dva modely distribuce velikosti částic RRSB rozložení pro naše dvojice otáčky rotoru

$$D_{F_{1500}} = 0,07 \cdot (\ln(M) + 0,25) \cdot e^{0,224 \cdot SC} \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{1,827}},$$

$$D_{F_{3000}} = 0,06 \cdot (\ln(M) + 0,23) \cdot e^{0,235 \cdot SC} \cdot [-\ln(1 - F)]^{\frac{1}{1,827}}.$$

Nicméně, ještě jednou je potřeba zdůraznit, že tyto vedlejší závislosti nelze brát jako fakt kvůli nedostatku dat a pro jejich potvrzení je potřeba směřovat další výzkum právě sem.

## Seznam použité literatury

- ADAPA, P., L. TABIL and G. SCHOENAU. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barely, canola, oat and wheat straw. *Biomass and Bioenergy*. 2011, roč. 1, s. 549–561. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.10.004
- AMIRIAN, F. & Shahbazi, Feizollah & Taheri-Garavand, Amin. (2017). Effects of moisture content and level in the crop on the shearing properties of chickpea stem. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 19. 187-192.
- BÍMON, Václav. Mletí odpadů s lignocelulózovým základem. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- BITRA V.S.P., Womac A.R., Yang Y.T., Miu P.I., Igathinatane C., Sokhansanj S., 2009, Mathematical model parameters for describing particle size of knife milled corn stover, *Biosystems Engineering*, 104, 369-383.
- CADOCHE, L. and G.D. LÓPEZ. Assessment of size reduction as a preliminary step in the production of ethanol from lignocellulosic wastes. *Biological Wastes*. 1989, roč. 30/2, s. 153–157. DOI: 10.1016/0269-7483(89)90069-4.
- DINTER, Oskar. *Drcení a mletí nerostných surovin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- GHORBANI, Z. & Masoumi, A.A. & Hemmat, Abbas. (2010). Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill. *Biosystems Engineering*. 105. 34-40. 10.1016/j.biosystemseng.2009.09.006.
- GOMEZ-TOVAR F, Celis LB, Razo-Flores E, Alatríste-Mondragón F. Chemical and enzymatic sequential pretreatment of oat straw for methane production. *Bioresource Technology*. 2012 Jul;116:372-378. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.03.109.
- HAMMER CRUSHER. *Premium Pulman* [online]. [cit. 2021-7-3]. Dostupné z: <https://premiumpulman.com/industrial-pulverisers/hammer-mill/>
- HIDENO, A., H. INOUE, K. TSUKAHARA, S. FUJIMOTO, T. MINOWA, S. INOUE, T.ENDO and S. SAWAYAMA. Wet disk milling pretreatment without sulfuric acid for enzymatic hydrolysis of rice straw. *Bioresource Technology*. 2009, roč. 100/10, s. 2706–2711. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.12.057.

HIMMEL, M., M. TUCKER, K. RIVARD a K. GROHMANN. Comminution of biomass: Hammer and knife mills. *Biotech. and Bioeng.* 1985, č. 15, s. 39–58., ISSN 1097-0290.

HUERTA, R. Razzera, & Saldaña, M. D.A. (2019). Sequential treatment with pressurized fluid processing and ultrasonication for biorefinery of canola straw towards lignocellulosic nanofiber production. *Industrial crops and products*, 139, . doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111521

CHANDIO, Farman Ali, Ji CHANGYING, Ahmed Ali TAGAR, Irshad Ali MARI, T GUANGZHAO a Do Minh CUONG. *Comparison of mechanical properties of wheat and rice straw influenced by loading rates* [online]. 1Department of Agricultural Mechanization, College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Post Code 210031, Nanjing, Peoples Republic of China., 2013, , 1068-1077 [cit. 2021-7-11].

IDI, Ahmad a Mohamad SHAZA EVA. *BIOETHANOL FROM SECOND GENERATION FEEDSTOCK (LIGNOCELLULOSE BIOMASS)* [online]. 2011, (8) [cit. 2021-7-10]. Dostupné z: <https://journal-archieves13.webs.com/919-935.pdf>

KHAESO, Kantapong, Kantapong LALOON a LALOON. *Effect of moisture to shear strength trend of Khao Dok Mali 105 stems* [online]. Agricultural Engineering Department, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand., 2019 [cit. 2021-7-11].

KRÁTKÝ, L. and Jirout, T. (2011), Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. *Chem. Eng. Technol.*, 34: 391-399. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000357>

KRÁTKÝ, L., & Jirout, T. (2020). Modelling of particle size characteristics and specific energy demand for mechanical size reduction of wheat straw by knife mill. *Biosystems engineering*, 197, 32-44. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.06.005

KRÁTKÝ, Lukáš, Tomáš JIROUT a Martin DOSTÁL. THE EFFECT OF MOISTURE ON SPECIFIC ENERGY REQUIREMENT FOR KNIFE MILLED BEECH CHIPS. 2021.

KRÁTKÝ, Lukáš, Tomáš JIROUT, Martin DOSTÁL a Mehmet AYAS. The Effect of Moisture on the Particle Size Characteristics of Knife-milled Beech Chips. *Czech*

Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Process Engineering, : ISBN 978-88-95608-86-0. 2021.

KRÁTKÝ, Lukáš. TECHNOLOGIE A ZAŘÍZENÍ PRO INTENZIFIKACI TERMO- A BIOCHEMICKÉ KONVERZE ODPADŮ NA UŠLECHTILÉ CHEMICKÉ LÁTKY A BIOPALIVA. Praha, 2015. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze.

KURIAN, J.K., G.R. NAIR, A. HUSSAIN a G.S.V. RAGHAVAN. Feedstocks, logistics and pretreatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, roč. 25, s. 205–219. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.019

LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 9788074943058.

LIU, Yalan & Wang, Jinwu & Barth, John & Welsch, Kelly & McIntyre, Vincent & Wolcott, Michael. (2019). Effects of multi-stage milling method on the energy consumption of comminuting forest residuals. *Industrial Crops and Products*. 145. 111955. 10.1016/j.indcrop.2019.111955.

MANI, S., L. Tabil and S. Sokhansanj. “Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass.” *Biomass & Bioenergy* 27 (2004): 339-352.

MIAO, Zewei & Grift, Tony & Hansen, Alan & Ting, K.C. (2011). Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Industrial Crops and Products*. 33. 504-513. 10.1016/j.indcrop.2010.12.016.

MUSSATTO, Solange & Teixeira, José. (2010). Lignocellulose as raw material in fermentation processes.

NAIMI, Ladan & Sokhansanj, Shahab & Bi, Xiaoning & Lim, Jim & Womac, Alvin & Lau, Anthony & Melin, Staffan. (2013). Development of Size Reduction Equations for Calculating Energy Input for Grinding Lignocellulosic Particles. *Applied Engineering in Agriculture*. 29. 93-100. 10.13031/2013.42523.

O'DOGHERTY M.J., J.A. Huber, J. Dyson, C.J. Marshall, A Study of the Physical and Mechanical Properties of Wheat Straw, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 62, Issue 2, 1995, Pages 133-142, ISSN 0021-8634, <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1072>.



OYEDEJI, O., Gitman, P., Qu, J., & Webb, E. (2020). Understanding the Impact of Lignocellulosic Biomass Variability on the Size Reduction Process: A Review. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 8, 2327-2343. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b06698

RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy I. V* Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007 dotisk. ISBN 978-80-01-03286-2.

SAINI, J.K., Saini, R. & Tewari, L. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. *3 Biotech* 5, 337–353 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>

TAVAKOLI, H., S.S. MOHTASEBI a A. JAFARI. *Physical and mechanical properties of wheat straw as influenced by moisture content* [online]. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Biosystems Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran, 2009, , 175-181 [cit. 2021-7-11].

TEMMERMEN, Mike & Jensen, Peter Daugbjerg & Hébert, Jacques. (2013). Von Rittinger theory adapted to wood chip and pellet milling, in a laboratory scale hammermill. *Biomass and Bioenergy*. 56. 70–81. 10.1016/j.biombioe.2013.04.020.

TUMULURU, J.S., L.G. TABIL, Y. SONG, K.L. IROBA and V. MEDA. Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat and canola straws. *Biomass and Bioenergy*. 2014, roč. 60, s. 58–67, DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.10.011

WOMAC, A.R., M. YU, C. IGATHINATHANE, P. YE, D. HAYES, S. NARAYAN, S. SOKHANSANJ a L. WRIGHT. *Comparison of mechanical properties of wheat and rice straw influenced by loading rates* [online]. University of Tennessee, Biosystems Engineering and Environmental Science, Knoxville, Tennessee, 2005 [cit. 2021-7-11].

YU M., A.R. Womac, C. Igathinathane, P.D. Ayers, M.J. Buschermohle, Switchgrass ultimate stresses at typical biomass conditions available for processing, *Biomass and Bioenergy*, Volume 30, Issue 3, 2006, Pages 214-219, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.10.005>.

## Seznam symbolů

A	Bezrozměrný parametr modelu závislosti $D_P$ na SC	[-]
B	Bezrozměrný parametr modelu závislosti $D_P$ na SC	[-]
$C_B$	Bondova materiálová konstanta	[kWh·mm·t <sup>-1</sup> ]
$C_K$	Kickova materiálová konstanta	[kWh·mm·t <sup>-1</sup> ]
$C_R$	Rittingerova materiálová konstanta	[kWh·mm·t <sup>-1</sup> ]
D	Velikost materiálu, síta	[mm]
$D_1$	Vstupní velikost materiálu	[mm]
$D_2$	Výstupní velikost materiálu	[mm]
$D_{50}$	Charakteristická velikost částic pro kumulativní hmotnostní podíl 50 % hm.	[mm]
$D_{90}$	Charakteristická velikost částic pro kumulativní hmotnostní podíl 90 % hm.	[mm]
$D_F$	Charakteristická velikost částic	[mm]
$D_P$	Charakteristická velikost částic pro kumulativní hmotnostní podíl 63,2 % hm.	[mm]
E	Energetická náročnost	[kWh·t <sup>-1</sup> ]
F	podíl částic v % hm.	[%]
$\dot{m}$	Hmotnostní průtok	[kg·s <sup>-1</sup> ]
n	Index polydisperzity	[-]
n	Otáčky rotoru	[ot·min <sup>-1</sup> ]
$P_{AI}$	Činný výkon při běhu na prázdno	[W]
$P_{AM}$	Činný výkon při mletí	[W]
SC	Velikost ok propadového síta	[mm]
t	Čas	[s]
u	Rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
M	Vlhkost	[% hm.]
$X_B$	Bondův rozměrový parametr	[mm <sup>-1</sup> ]
$X_K$	Kickovův rozměrový parametr	[mm <sup>-1</sup> ]
$X_R$	Rittingerův rozměrový parametr	[mm <sup>-1</sup> ]
$\sigma$	Pevnost v tahu	[MPa]
$\tau$	Pevnost ve smyku	[MPa]

## Seznam obrázků

Obr. 1; Struktura lignocelulózové biomasy (Mussatto, 2010).....	10
Obr. 2; Mechanismy rozpojování materiálů. a) drcení, b) trhání, c) smýkání, d) lámání, e) otírání, f) rozbíjení, g) rozlupování (Rieger et al., 2007).....	15
Obr. 3; Schéma používaných drtičů a mlýnů v závislosti na vlhkosti (Krátký, 2015) ...	16
Obr. 4; Schéma nožového mlýnu (Lenfeld, 2016).....	17
Obr. 5; Schéma úderového mlýnu (Pulman, 2021) .....	18
Obr. 6; Schéma diskového mlýnu (Krátký, 2015) .....	19
Obr. 7; Rittingerův model pro predikovanou a změřenou specifickou energetickou náročnost pro síta vstupní velikosti 18 mm, 15 mm, 12 mm (Ghorbani et al., 2010) ....	27
Obr. 8; Porovnání Rittingerova, Bondova a Kickova modelu pro závislost specifické energetické náročnosti a poměru vstupní/výstupní velikosti biomasy při rozpojování (Naimi, 2013).....	28
Obr. 9; Závislost energetické náročnosti rozpojování na vlhkosti pro smrk. H1 je nejnižší vlhkost, H5 je nejvyšší vlhkost (Pořadí vlhkostí je opačné v legendě a v samotných grafech). (Temmerman, 2013) .....	29
Obr. 10; Závislost energetické náročnosti rozpojování pšeničné, ječmenné, řepkové a ovesné slámy na výstupní velikosti síta úderového mlýnu (Adapa, 2011).....	30
Obr. 11; Závislost energetické náročnosti rozpojování pro kukuřičnou slámu, pšeničnou slámu a proso prutnaté na výstupní velikosti síta úderového mlýnu pro 12 % hm. vlhkost (Mani, 2004) .....	31
Obr. 12; Závislost energetické náročnosti rozpojování pro kukuřičnou slámu, pšeničnou slámu a proso prutnaté na výstupní velikosti síta úderového mlýnu pro 8 % hm. vlhkost (Mani, 2004) .....	31
Obr. 13; Závislost energetické náročnosti rozpojování na velikosti otvorů propadových sít pro ozdobnici čínskou, proso prutnaté, cukrovou třtinu a kmen vrby (Miao, 2011) .	32
Obr. 14; Ukázka vstupní pšeničné slámy před a po prvotním namletí s propadovým sítem 10 mm. (Vlastní, 2021).....	33
Obr. 15; Nožový mlýn Retsch SM300 a detailem na mlecí komoru s třífřitým rotorem a výměnnými propadovými síty. (Vlastní, 2021) .....	34
Obr. 16; Sušárna Binder KBC-25W (Vlastní, 2021).....	34
Obr. 17; Jednotlivá propadová síta. Zleva od 0,75 mm do 10 mm. (Vlastní, 2021) .....	35

Obr. 18; Distribuce velikosti částic, vlhkost 8,1 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	38
Obr. 19; Distribuce velikosti částic, vlhkost 8,1 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	38
Obr. 20; Distribuce velikosti částic, vlhkost 3,1 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	39
Obr. 21; Distribuce velikosti částic, vlhkost 3,1 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	39
Obr. 23; Distribuce velikosti částic, vlhkost 22,9 % hm., rychlost rotoru 3000 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	40
Obr. 22; Distribuce velikosti částic, vlhkost 22,9 % hm., rychlost rotoru 1500 ot·min <sup>-1</sup> , křivka je RRSB model, body jsou experimentální hodnoty .....	40
Obr. 24; Distribuce velikosti částic vždy pro otáčky rotoru 3000 ot·min <sup>-1</sup> a pro konkrétní jedno síto a různé vlhkosti .....	41
Obr. 25; Kick – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_R$ pro D50 pro tři různé vlhkosti.....	43
Obr. 26; Kick – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_R$ pro D90 pro tři různé vlhkosti.....	43
Obr. 27; Bond – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_B$ pro D50 pro tři různé vlhkosti.....	44
Obr. 28; Bond – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_B$ pro D90 pro tři různé vlhkosti.....	44
Obr. 29; Rittinger – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_R$ pro D50 pro tři různé vlhkosti .....	45
Obr. 30; Rittinger – závislost energetické náročnosti mletí na parametru $X_R$ pro D90 pro tři různé vlhkosti .....	45
Obr. 31; Závislost Rittingerovy konstanty $C_R$ na vlhkosti pšeničné slámy .....	46
Obr. 32; Závislost indexu polydisperzity $n$ na velikosti propadových sít SC pro tři různé vlhkosti.....	47
Obr. 33; Závislosti parametru $D_P$ na velikosti propadových sít pro různé vlhkosti a rychlosti otáčení rotoru, body jsou experimentální data, křivky jsou exponenciální regresní křivky .....	49
Obr. 34; Závislost parametru $A$ na vlhkosti.....	50
Obr. 35; Závislost parametru $B$ na vlhkosti.....	50

## Seznam tabulek

Tab. 1; Optimální vstupní velikosti biomasy do některých technologií zpracování (Oyedeji, 2020) .....	10
Tab. 2; Odhadovaná roční světová produkce vybraných druhů odpadní biomasy (Kurian, 2013) .....	11
Tab. 3; Procentuální zastoupení celulózy, hemicelulózy a ligninu u používaných lignocelulózových biomas (Saini et al., 2015, IDI et al., 2011, Gomez-Tovar et al., 2012, Huerta et al., 2019) .....	12
Tab. 4; Souhrn mechanických vlastností jednotlivých druhů lignocelulózové biomasy (autoři uvedeni ve sloupci Zdroje).....	14
Tab. 5; Energetické náročnosti při dezintegraci různých druhů odpadní biomasy v závislosti na typu mlýnu, velikosti a vlhkosti (Krátký a Jirout, 2011; autoři uvedeni ve sloupci Zdroje).....	22
Tab. 6; Vlhkosti jednotlivých částí slámy .....	35