

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ
TECHNIKY**



**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA VLIVU
GEOMETRIE OSTŘÍ STŘIŽNÉHO MLÝNU NA
VELIKOST ČÁSTIC A ENERGETICKOU
NÁROČNOST ROZPOJENÍ DŘEVNÍ ŠTĚPKY**

2024

MICHAL VTÍPIL

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

V Praze dne

..... Jméno a Příjmení

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vtípil** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **492470**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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 vlivu geometrie ostří střížného mlýnu na velikost částic a energetickou náročnost rozpojení dřevní štěpky

Název diplomové práce anglicky:

Blade geometry's influence on particle size and specific energy demand of wood chips in knife mills: experimental analysis and mathematical modelling.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši, která shrne informace o požadované velikosti částic biomasy vstupující do typových reaktorů zpracovávajících lignocelulóзовou biomasu.
- 2) Proveďte systematické experimenty a matematické modelování vlivu provozní konfigurace střížného mlýnu na charakteristiky velikosti částic a energetickou náročnost rozpojení dřevní štěpky.
- 3) Diskutujte získané výsledky s dostupnou literaturou.
- 4) Formulujte klíčové postřehy práce.

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: **09.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis oříkava(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

Poděkování

Za vstřícnost, odborné vedení a směřování, pomoc při vymýšlení pokusů a mnohé cenné rady děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D.

Za vstřícnost a pomoc při vymýšlení pokusů děkuji Dr. Carlosovi Arce.

Za přečtení a cenné připomínky k textu této práce děkuji všem kamarádům, kteří si alespoň část textu přečetli a zhodnotili.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Michal

Příjmení autora: Vtípil

Název práce česky: Experimentální analýza vlivu geometrie ostří střížného mlýnu na velikost částic a energetickou náročnost rozpojení dřevní štěpky

Název práce anglicky: Blade geometry's influence on particle size and specific energy demand of wood chips in knife mills: experimental analysis and mathematical modelling

Rozsah práce: počet stran: 74
počet obrázků: 80
počet tabulek: 42
počet příloh: tištěných: 0
elektronických: 0

Akademický rok: 2023/2024

Jazyk práce: Český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Energetika a procesní inženýrství

Studijní obor: Procesní inženýrství

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

Anotace česky:

Diplomová práce se zabývá procesem mletí bukové štěpky na střížném mlýnu Retsch SM 300. Představuje vliv geometrie ostří, vliv velikosti ok síta a vliv otáček (rychlosti) na distribuci částic i na energetickou náročnost mletí, naznačuje i vliv vyschlých vzorků na výsledek mletí oproti vzorkům s přirozenou vlhkostí. Výsledkem práce je experimentální analýza a matematické modely, které umožní predikovat velikost částic v závislosti na rychlosti a velikosti ok síta.

Anotace anglicky:

The thesis deals with the process of grinding beech chips on a Retsch SM 300 cutting mill. It presents the effect of blade geometry, the effect of screen mesh size and the effect of speed on particle distribution and energy consumption of grinding, and indicates the effect of dried samples on the grinding result compared to samples with natural moisture. As a result of the work, experimental analysis and mathematical models are presented to predict particle size as a function of speed and sieve mesh size.

Klíčová slova: biomasa, štěpka, střížný mlýn, mletí, distribuce částic, rozpojovací energie,

Klíčová slova anglicky: biomass, wood chips, shear mill, grinding, particle distribution, specific energy demand for biomass size reduction

Obsah

1. Úvod	8
1.1 Proč se zabývat mletím biomasy?	8
1.2 Požadavky nad předúpravu biomasy.....	9
2. Mletí biomasy s lignocelulózovým základem	11
2.1 Struktura biomasy	11
2.2 Mechanismy rozpojování biomasy.....	11
2.3 Typy mlýnů	12
2.3.1 Kulové mlýny	12
2.3.2 Diskové mlýny.....	12
2.3.3 Válcové stolice.....	12
2.3.4 Úderové mlýny	12
2.3.5 Nožové (střížné) mlýny.....	13
2.4 Konfigurace střížných mlýnů	13
2.5 Energetická náročnost mletí.....	15
2.6 Distribuce částic	16
3. Dosavadní výzkumy v oblasti a cíle této práce	17
3.1 Dosavadní výzkumy	17
3.2 Cíle této práce	21
4. Praktická část – experimentální měření a vyhodnocování.....	21
4.1 Návrh experimentů	21
4.1.1 Obecný návrh	21
4.1.2 Určování složení štěpky	21
4.2 Stroje a zařízení pro experimenty	22
4.3 Postup při pokusech	23
4.4.1 Určování energetické náročnosti mletí	25
4.4.2 Určování distribuce velikosti částic	26
4.4.3 Určování složení štěpky	27
5. Vyhodnocení experimentů	31
5.1 Obecný postup vyhodnocování	31
5.2 Vyhodnocení distribuce částic při jednotlivých experimentech	32
5.2.1 Vstupní vzorek.....	32
5.2.2 Rozbor vzorků.....	33
5.2.3 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 500 rpm.....	34
5.2.4 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 1500 rpm.....	35
5.2.5 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 3000 rpm.....	37
5.2.6 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 500 rpm	38

5.2.7 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 1500 rpm	39
5.2.8 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 3000 rpm	41
5.2.9 Mletí lineární rotor suchý vzorek 500 rpm.....	42
5.2.10 Mletí lineární rotor suchý vzorek 1500 rpm.....	44
5.2.11 Mletí lineární rotor suchý vzorek 3000 rpm.....	45
5.2.12 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 500 rpm.....	46
5.2.13 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 1500 rpm.....	47
5.2.14 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 3000 rpm.....	49
5.3 Porovnání velikosti částic mezi jednotlivými experimenty	50
5.3.1 Porovnání D90, D50, D10 pro jeden rotor a různé otáčky	50
5.3.2 Porovnání D50 pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek.....	53
5.3.3 Porovnání ξ pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek.....	54
5.3.4 Porovnání n pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek	55
5.3.5 Porovnání D pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek.....	55
5.4 Matematický model velikosti částic v závislosti na parametrech mletí	56
5.4.1 Odvození.....	56
5.4.2 Výsledky matematického modelu	59
5.5 Vyhodnocení rozpojovací energie	64
5.5.1 Rozpojovací energie přirozený vzorek.....	64
5.5.2 Rozpojovací energie suchý vzorek.....	64
5.6 Rozpojovací energie podle Rittingerova modelu	65
5.6.1 Obecné vyhodnocení.....	65
5.6.2 Lineární rotor přirozený vzorek.....	65
5.6.3 Lineární rotor suchý vzorek	66
5.6.4 Šroubovicový rotor přirozený vzorek	66
5.6.5 Šroubovicový rotor suchý vzorek	66
5.6.6 Shrnutí a diskuze	67
6. Závěr.....	68
Seznam symbolů.....	69
Seznam zdrojů a použité literatury	70

1. Úvod

1.1 Proč se zabývat mletím biomasy?

Na světě stále roste spotřeba energie a klesají zásoby fosilních paliv, pro budoucnost lidstva je tedy nutné snižovat energetickou závislost na fosilních palivech. Cestou k tomuto snižování energetické závislosti je používání obnovitelných zdrojů energie. V našich českých podmínkách máme jako zdroje vodu, vítr, slunce a biomasu. Vodní elektrárny jsou už postavené na všech důležitých místech, kde to má ekonomický smysl a nelze je už výrazně rozšiřovat. Pro větrné elektrárny jsou u nás nevhodné podmínky, a tak se používají pouze ve velmi omezené míře a na místech, kde ještě nejsou, se je vůbec nevyplatí budovat. Pro sluneční elektrárny u nás také nejsou zrovna nejvhodnější podmínky, přesto by se je na některých vhodnějších místech vyplatilo rozšiřovat zejména využitím jinak nepoužitelných ploch na zastavění solárními kolektory nebo fotovoltaickými články. Velký potenciál má v našich podmínkách biomasa, používáme ji stále málo a mohli bychom ji používat mnohem více. [1]

Biomasu lze používat buď přímo ke spalování k produkci tepla nebo elektřiny, a to spalováním štěpky nebo pelet a briket. Při výrobě pelet a briket je třeba biomasu rozmělnit, takže v tomto procesu je nutnou součástí mechanické rozpojování materiálu. Dále lze biomasu zpracovávat na další paliva, například bioplyn, bioetanol nebo biodiesel. Při těchto procesech je často nedílnou součástí mletí. V současné době se často používají biopaliva první generace, tedy biomasa, která by se jinak mohla konkurenčně využít jako potravina nebo krmivo. Sem patří bioetanol vyrobený z obilí, cukrové řepy, cukrové třtiny, kukuřice, škrobu, metylester řepkového oleje, vyrobený z vylisované řepky olejné esterifikací, metylester mastných kyselin, vyrobený z vylisovaných olejnatých rostlin. Tato paliva už nemají velký potenciál na rozšiřování, protože jejich pěstováním se zabírá orná půda použitelná na pěstování potravin, což vede k tomu, že bude málo surovin pro potraviny a málo krmiv, takže by se potraviny neúnosně zdražovaly. Mnohem větší potenciál pro další rozšiřování mají biopaliva druhé generace, která se budou vyrábět z jinak nepoužitelných odpadů. Největší význam bude mít pravděpodobně rozšiřování výroby bioplynu z odpadů, případně pyrolýza odpadů nebo jejich hydrolýza a fermentace na bioethanol. Na skládky se dostává stále velké množství bioodpadu, který by se dal zpracovat a využít, ale protože nejsou dostatečně rozvinuté technologie jeho zpracování, tak na skládkách zbytečně překáží. Velkou část dostupných surovin pro výrobu biopaliv druhé generace tvoří lignocelulóznové odpady. Jejich výhodou je velké množství suroviny, snadná dostupnost a nízká cena. Nevýhodou však je, že konverze těchto surovin při výrobě biopaliv je velice neefektivní a celý proces fermentace je velice zdoluhavý. Vhodným rozrušením struktury této suroviny by se tyto procesy mohly výrazně zkrátit a zefektivnit. [2] [1]

Právě zde nachází největší uplatnění mletí, a proto je důležité se zabývat jeho optimalizací, abychom do budoucna zvládali efektivně zpracovávat lignocelulóznovou biomasu na biopaliva druhé generace a snížili tak energetickou závislost na ostatních zdrojích. Další důležitou oblastí, kde se uplatní mletí a předúprava lignocelulóznové biomasy je chemický a farmaceutický průmysl. Rozemletá biomasa je důležitou vstupní surovinou při získávání různých cenných látek (oligosacharidů, furanů, vícesytných alkoholů, organických kyselin, přírodních oxidantů, esenciálních látek a olejů). Zároveň má uplatnění i při výrobě ekoinovativních materiálů (bioplastů, kompozitů s biosložkou). [2] V následující kapitole se pokusím shrnout požadavky na výstupní velikost částic po předúpravě.

1.2 Požadavky nad předúpravu biomasy

V této kapitole jsou shromážděny požadavky na velikost částic pro zpracování různými technologiemi. Konkrétně jde o pyrolýzu, zplyňování, oxyfuel spalování, fermentaci na bioplyn a hydrolýzu spojenou s fermentací pro výrobu bioethanolu.

První tabulka obsahuje přehled vhodných velikostí částic pro pyrolýzu, který vychází z vědeckých článků z výzkumů efektivního provádění pyrolýzy biomasy. Druhá tabulka obsahuje přehled vhodných velikostí částic pro zplyňování. Třetí tabulka obsahuje přehled vhodných velikostí částic pro anaerobní fermentaci při výrobě bioplynu. Čtvrtá tabulka obsahuje přehled vhodných velikostí částic při moderních metodách spalování. Pátá tabulka shrnuje vhodné velikosti částic pro hydrolýzu a následnou fermentaci na bioethanol.

surovina	Velikost částic	Typ rektoru	Reference
Dřevo buk	0,18-5,6 mm	Fluidní lože	[3]
Dřevo borovice	<1 mm, 10, 15, 20 mm	Pevné lože	[4]
Cukrová třtina	0,18-0,71 mm	Pevné lože, trubkový	[5]
Dřevěné částice	0,35-0,8 mm	Trubkový (rychlá pyrolýza)	[6]
Zeleninový odpad ze skleníku	1,5 mm	Trubkový (rychlá pyrolýza)	[7]
Dřevo	0,5-5 mm	Pevné lože	[8]
Ječná sláma	0,05-0,5 mm	Pevné lože	[9]
Topolové piliny	0,44-0,74 mm	Fluidní lože	[10]

Tabulka 1 Velikosti částic pro pyrolýzu

surovina	Velikost částic	Typ reaktoru	Reference
Vinné výlisky	0,5-8 mm	Zplyňování v proudu	[11]
Bukové dřevo	0,3-4 mm	Solární ablační zplyňování	[12]

Tabulka 2 Velikosti částic pro zplyňování

surovina	Velikost částic	Typ reaktoru	Reference
Lískové a olivové větve	<0,3 mm	Anaerobní fermentor	[13]
Rýžová sláma	0,25-0,6 mm	Anaerobní fermentor	[14]
Odpad z ovoce a zeleniny	<2 mm	Anaerobní fermentor	[15]
Opuncie mexická	0,1-0,8 mm	Anaerobní fermentor	[16]
Sláma	<2 mm	Anaerobní fermentor	[17]
Koňský hnůj	<2 mm	Anaerobní fermentor	[18]
Kukuřičná sláma	<2 mm	Anaerobní fermentor	[19]
Pšeničná a ječná sláma	2-5 mm	Anaerobní fermentor	[20]
Sloní tráva	0,6-2 mm	Anaerobní fermentor	[21]

Tabulka 3 Velikosti částic pro fermentaci při výrobě bioplynu

surovina	Velikost částic	Typ reaktoru	Reference
Pšeničná sláma Rýžové plevy	19 μ m 24 μ m	Fluidní zplyňování a následné spalování plynu	[22]
Dřevo	4-8 mm	Trubková pec	[23]
Pšeničná sláma	0,12-0,27 mm	Trubková pec	[24]
Dub	0,177-0,841 mm	Spalování na pevném loži	[25]
Pšeničná sláma	0,3-0,8 mm	Spalování na pevném loži	[26]
Dřevní štěpka	3-60 mm	Spalování na pevném loži	[27]

Tabulka 4 Velikosti částic pro moderní metody spalování

surovina	Velikost částic	proces	Reference
Kukuřičná řezanka Pšeničná sláma	<0,25 mm <0,25 mm	Enzymatická hydrolýza	[28]
Kukuřičná řezanka	4 mm	Kyselá předúprava -> Enzymatická hydrolýza	[29]
Pšeničná sláma	0,25-0,5 mm	Kyselá předúprava -> Enzymatická hydrolýza	[30]
Pšeničná sláma	<2,5 mm	Parní exploze -> Enzymatická hydrolýza	[31]
Kukuřičná řezanka Bříza Smrk Vojtěška	0,15-1 mm	Parní předúprava-> Enzymatická hydrolýza	[32]
Banánovníkové vlákno	0,05-0,5 mm	Enzymatická hydrolýza	[33]
Pšeničná sláma	0,02-0,1 mm	Enzymatická hydrolýza	[34]
Cizrnová sláma	<1 mm	Zásaditá předúprava -> Enzymatická hydrolýza	[35]
Topolový prach	<0,5 mm	Hydrotermická předúprava -> Enzymatická hydrolýza	[36]

Tabulka 5 Velikosti částic pro hydrolýzu a následnou fermentaci na bioethanol

Při mletí na jemné částice výrazně zlepšujeme přenos tepla a hmoty během procesů, výrazně zvyšujeme konverzi suroviny na palivo a zrychlujeme celý proces. Abychom zvýšili biologickou rozložitelnost biomasy a skutečně výrazně konverzi suroviny v požadovaný produkt, potřebujeme dosahovat většinou velikosti částic v řádu desetin až jednotek mm. Biomasu můžeme zpracovávat buď vlhkou, nebo vysušenou. Vlhká biomasa se využije pro hydrolýzu a fermentaci na bioethanol a pro fermentaci na bioplyn. Vyschlá biomasa je výhodnější pro spalování, zplyňování a pyrolýzu. Pro mletí biomasy lze použít mnoho různých technologií, jejich energetická náročnost a celková výhodnost se velmi liší. Mletí je mnohem snadnější u suché biomasy s vlhkostí do 15 %, protože je křehká a zároveň nemá sklon zalepovat mlýn. [2] Tato práce se proto bude zabývat mletím biomasy do 15 % vlhkosti.

2. Mletí biomasy s lignocelulózovým základem

2.1 Struktura biomasy

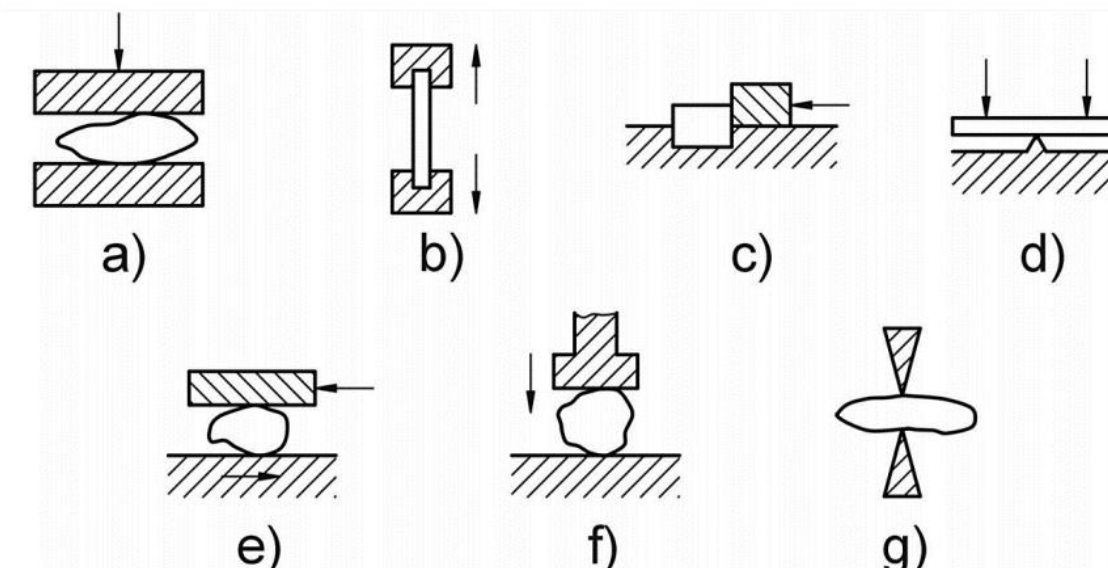
Pro výzkumy v oblasti mletí je třeba znát strukturu lignocelulózové biomasy, důležitá je zejména struktura slámy a dřeva (dřevěné štěpky), protože pro ně se nejčastěji na fakultě zkouší energetická náročnost mletí a řeší rozložení velikosti částic při různých parametrech mletí. Biomasa rostlin je tvořena zesílenými stěnami buněk s kompozitní strukturou, dlouhé řetězce celulózy vytvářejí nosnou konstrukci lignocelulózové matrice. Celulózová vlákna jsou obtočená rozvětvenými řetězci hemicelulóz a celá struktura je zpevněná zesíťovanou výplní ligninu. Dlouhá vlákna celulózy způsobují, že lignocelulózová biomasa má sklon při rozpojování tvořit jehlicovité částice podlouhlé ve směru vláken. Dalšími složkami jsou škroby, tuky, bílkoviny, popeloviny, organické kyseliny a další organické i anorganické látky. Celulóza vytváří v rostlinách lineární vlákna složená z makromolekul tvořených řetězci D-glukózy. Molekula celulózy je tvořena zhruba 1000 za sebou vázanými molekulami D-glukózy. Řetězce se navzájem propojují v počtu 20-300 van der Walsovými silami, vodíkovými a kovalentními vazbami. Vlákna mají pravidelnou krystalickou i nepravidelnou amorfní část. Pravidelná krystalová mřížka celulózy se rozkládá mnohem hůře než amorfně uspořádané molekuly. Mletím se narušuje krystalická mřížka, dá se snížit krystalinita celulózy. Hemicelulózy mají amorfní strukturu a rozkládají se poměrně snadno. Jsou tvořené složitými heteropolysacharidy. Lignin je nejhůře rozložitelnou složkou biomasy, je to aromatický heteropolymer fenolického typu. Je hydrofobní, takže kvůli němu je biomasa odolná vodě. V rostlinách působí jako pojivo a zajišťuje jejich pružnost a pevnost. [2]

Společnou vlastností rostlinné biomasy je hygroskopičnost pro vnější vlhkost. Obsah vody v biomase je silně ovlivněn vlhkostí okolního prostředí a mechanické vlastnosti biomasy, které je třeba znát, pro návrh technologie mletí silně závisí na obsahu vody v biomase. Suchá biomasa je mnohem křehčí, a tím je výhodná pro mletí, protože se snadno rozpadá. Složení slámy je 29-35 % celulózy, 26-32 % hemicelulózy a 16-21 % ligninu. Tvrdé dřevo obsahuje 40-55 % celulózy, 24-40 % hemicelulózy a 18-25 % ligninu, měkké dřevo obsahuje 45-50 % celulózy, 25-35 % hemicelulózy a 25-35 % ligninu. Procenta jsou myšlena hmotnostně. Zbytek složení tvoří hlavně bílkoviny a popeloviny. [1]

Sláma je tvořena dutými stébly tvořenými internodii a uzlinkami. Sláma je výrazně měkčí, pružnější a ohebnější než dřevěná štěpka, při mletí je pro ni obzvlášť výhodný lineární rotor, díky tomu, že je měkká, nevytváří při mletí příliš velké rázy. Struktura dřeva (štěpky) je podstatně hutnější, pevnější a tvrdší, částice štěpky při použití lineárního rotoru vytváří rázy a při mletí celý mlýn mnohem více vibruje a nemá tak rovnoměrný chod. Použití rotoru se šroubovicovou geometrií ostří výrazně snižuje vibrace a zrovnoměrňuje chod nožového mlýna.

2.2 Mechanismy rozpojování biomasy

Obecně lze biomasu rozpojovat smýkáním, stříhem, drcením nebo otěrem. Smýkání se využívá u diskových a válcových mlýnů. V nožových a úderových mlýnech dochází k rozmělnění suroviny drcením. Způsob rozmělnění otěrem se používá v koloidních mlýnech a extrudérech. Kombinace otírání a drcení se využívá v kulových a vibračních kulových mlýnech. K hrubému rozmělnění suroviny se používají drtiče. Jsou schopny zpracovat biomasu o velkých vstupních rozměrech a výstupní velikost částic může být okolo 10 mm. Mlýny by k jemnému zpracování vstupní suroviny o velkých rozměrech potřebovaly velkou dobu zdržení, proto je výhodnější, aby do mlýnů vstupovala částečně rozmělněná surovina s velikostí částic okolo 10 mm. V této práci bude popsáno mletí suroviny předupravené drtičem. Drtiče mohou být čelistové, šnekové, úderové, nožové nebo válcové. Pro zpracování lignocelulózových odpadů se používají drtiče úderové, šnekové a nožové nebo se vzájemně kombinují. [2]



Obrázek 1 Mechanismy rozpojování biomasy a) drcení, b) trhání, c) smýkání, d) lámání, e) otírání, f) rozbíjení, g) rozlupování [37]

2.3 Typy mlýnů

2.3.1 Kulové mlýny

Obsahují volně uložená mlecí tělesa nejčastěji nerezové koule. Ve válcové části mlýnu vyložené otěruvzdorným materiálem se při otáčení pohybují mlecí tělesa, která při pádu drtí a rozpojují materiál. Materiál je zároveň rozpojován i při vzájemném otírání mlecích částic a při otírání o vyložení pláště. Nejmenší účinnost mají pro tvrdé odpady, například pro štěpku z tvrdého dřeva. Dokáží pracovat i s vlhkým materiálem, ale přesto je výhodnější mlít biomasu s vlhkostí do 15%. [2]

2.3.2 Diskové mlýny

Skládají se z jednoho nebo dvou rotujících kotoučů s různě profilovaným ostřím nože. Materiál je osově přiváděn ke středu disku, tam je usmýkáván ostřím nože a vlivem působících odstředivých sil je odváděn z pracovního prostoru. Nevýhodou je, že se velká část energie spotřebuje na teplo a dochází k přehřívání mleté biomasy a jejímu znehodnocení. Hodí se pro mletí tvrdé biomasy o vlhkosti méně než 15%. Tyto mlýny mají poměrně velkou energetickou náročnost. [2]

2.3.3 Válcové stolice

Dají se používat i pro vlhké materiály. Mlecí komora je tvořena dvěma válci s nastavitelnou mezerou. Válce se otáčejí s různou frekvencí a mezi ně je přiváděn ze zásobníku materiál, který je rozpojován smykem. Při velké vlhkosti může docházet k nalepování materiálu na válce. Výhodou je krátká doba zdržení suroviny a zároveň nízká energetická náročnost. Nevýhodou může být, že někdy dochází ke zmenšení specifického povrchu částic kvůli zborcení struktury. Mezi válci také nedochází k dostatečnému rozvláknění rostlinné struktury. [2]

2.3.4 Úderové mlýny

Hodí se pro mletí biomasy do 15% vlhkosti, jsou velmi univerzální, lze v nich mlít téměř cokoliv. Lze v nich mlít téměř jakoukoliv dostatečně vyschlou biomasu, dále cihly, beton, keramiku, křehké kovy a křehké plasty. Tyto další materiály se mohou vyskytnout jako příměs v odpadní biomase a použití těchto mlýnů má výhodu, že mlýny se těmito příměsemi určitě nepoškodí. Fungují na principu mletí stříhem, který je vyvoláván dynamickým účinkem tlakových sil na částici mezi mlecími segmenty. Nejčastěji jsou tvořené rotorem, který má uvnitř kladívka, ta se musí otáčet obvodovou rychlostí 76-117 m/s. Částice se postupně rozpadají na menší kousky a dostatečně malé vyletují otvory v sítu statoru. Tyto mlýny mají nízké

provozní a pořizovací náklady a velmi nízkou energetickou náročnost, patří tedy mezi nejslibnější technologie pro mletí biomasy do budoucna. [2]



Obrázek 2 Úderový mlýn Retsch [38]

2.3.5 Nožové (střížné) mlýny

Jsou velmi výhodné pro mletí vysušené biomasy do 15 % vlhkosti, na rozdíl od úderových mlýnů lze mlít i pružnější a houževnatější materiály a lze mlít i mírně vlhčí surovinu, ale potom není mletí úplně optimální. Hodí se pro mletí jakékoliv biomasy, konkrétně se dají použít pro: dřevo, slámu, traviny, pícniny, papír, kosti, textil krmivo pro zvířata, krmné pelety. Dále lze mlít: PET výlisky, hliníkovou strusku, lepenku, kabely, elektronické komponenty z měkkých kovů, fólie, kůže, polymery, barevné kovy, farmaceutické výrobky. Princip mletí materiálu je založen na stříhu, který je vyvolán statickým účinkem tlakových sil na částici mezi mlecími segmenty. Jsou tvořené rotorem s noži na hřídeli, které mají svoje protikusy na statoru okolo, stator je tvořený z velké části sít, které je vyměnitelné a má velikost ok odpovídající tomu, jak velké výstupní částice potřebujeme. [2]



Obrázek 3 Nožový (střížný) mlýn Retsch [39]

Dále existují ještě vibrační kulové mlýny, extrudéry a koloidní mlýny, pro biomasu se však téměř nepoužívají.

2.4 Konfigurace střížných mlýnů

Jednotliví výrobci nabízejí různé velikosti střížných mlýnů s různými velikostmi sít a různými tvary rotorů. Rotory existují nejčastěji jako paralelní s lineární geometrií se 3-16 noži, dále vícediskové se šroubovicovou nebo V geometrií a 5-7 disky, dále V-rotory se 3-6 noži tvaru V, někteří výrobci vyrábí i speciální tvary pro

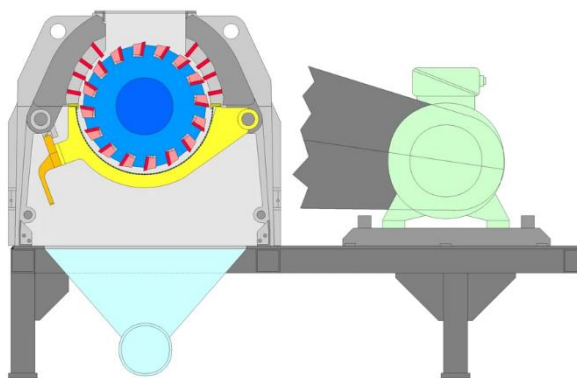
vlhkou biomasu. Geometrie statoru je obvykle tvořena paralelními noži s lineární geometrií v počtu 3-9. Síta se vyrábí se čtvercovými oky ve velikostech 2-10 mm, případně s lichoběžníkovými oky pro velikosti 0,25-1,5 mm. Obvodové rychlosti rotorů se liší, u menších laboratorních mlýnů dosahují jednotek až nižších desítek m/s, u velkých průmyslových mlýnů se obvodové rychlosti pohybují okolo 100 m/s.

Výrobce Fritsch vyrábí pro laboratorní mlýny následující rotory.



Obrázek 4 Zleva doprava rotor na vlhkou biomasu, paralelní rotor, diskový rotor, V-rotor [40]

Výrobce Netzsch vyrábí velké průmyslové mlýny s paralelními rotory s lineární geometrií.



Obrázek 5 Mlýn Netzsch [41]

Výrobce Laarmann vyrábí laboratorní a polopřemyslové mlýny s paralelními rotory s lineární geometrií a šroubovicovou geometrií rotoru.



Obrázek 6 Rotory a síta Laarmann [42]

Výrobce Retsch vyrábí laboratorní mlýny s paralelními rotory s lineární geometrií, diskové rotory se šroubovicovou geometrií a V-rotory.



Obrázek 7 Rotory Retsch

2.5 Energetická náročnost mletí

Pro návrhy technologií zpracování odpadní biomasy je třeba znát energetickou náročnost procesů předúpravy, a proto je nutné se zabývat energetickou náročností mletí. Čím menší částice požadujeme pro další zpracování, tím se musí vložit více energie do mletí při použití stejné mlecí technologie. Vždy je nutné zkoumat, kolik energie vkládáme do předúpravy suroviny, abychom věděli, zda se nám daná technologie vyplatí. Může se totiž stát, že energie vložená do mletí bude výrazně vyšší než zisk z následně vyrobeného produktu. Proto je potřeba optimalizovat předúpravu surovin mletím a hledat, jaké rozmělnění biomasy nám přinese největší užitek při nejmenší vložené energii do mletí, navrhnout vhodnou technologii mletí a určit, jak velké výstupní částice se nejvíce vyplatí, kdy nám energie vložená do mletí přinese největší zisk v podobě snadnějšího a efektivnějšího dalšího zpracování rozemleté suroviny. Daná technologie se musí vždy vyzkoušet v laboratorním měřítku, než dojde k jejímu rozšíření do velkovýrobního průmyslu.

Pro popis energetické náročnosti mletí a rozpojovací energie lze využít různých empiricky založených modelů.

Energetickou náročnost mletí lze také matematicky modelovat na základě empiricky založených modelů. Mezi ně patří například modely Kickův, Bondův a Rittingerův. Tyto modely vychází z předpokladu, že změna měrné energie potřebná pro rozpojení je nepřímo úměrná D^r , tedy průměru částice umocněnému na exponent r . To lze popsat rovnicí. [37]

$$-\frac{de}{dD} = CD^{-r} \quad (1)$$

Kickův model se doporučuje pro $D > 50$ mm, Bondův pro $0,5 \text{ mm} < D < 50$ mm a Rittingerův pro $D < 0,5$ mm. Jednotlivé modely se liší právě exponentem r , pro Kickův model $r = 1$, pro Bondův model $r = 1,5$ a pro Rittingerův model $r = 2$. Kickův model je vhodný pro materiály, kde dochází k výrazné elastické a poté plastické deformaci před rozlomením částice, což by mohlo odpovídat chování výrazně zvlhlé biomasy. Bondův model předpokládá, že energie potřebná pro šíření trhliny je přímo úměrná její délce, hodí se i pro mírně křehké materiály. Rittingerův model předpokládá, že rozpojovací energie je přímo úměrná

vzniklému novému povrchu částic, hodí se pro výrazně křehké materiály, což může být biomasa o nízké vlhkosti. [37]

Integrací Rittingerova modelu dostáváme:

$$e = - \int_{D_{in}}^{D_{out}} C_R D^{-2} dD = C_R \left[\frac{1}{D_{out}} - \frac{1}{D_{in}} \right] \quad (2)$$

Integrací Bondova modelu dostáváme:

$$e = - \int_{D_{in}}^{D_{out}} C_B D^{-1,5} dD = 2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{D_{out}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{in}}} \right] \quad (3)$$

Integrací Kickova modelu dostáváme:

$$e = - \int_{D_{in}}^{D_{out}} C_K D^{-1} dD = C_K \ln \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (4)$$

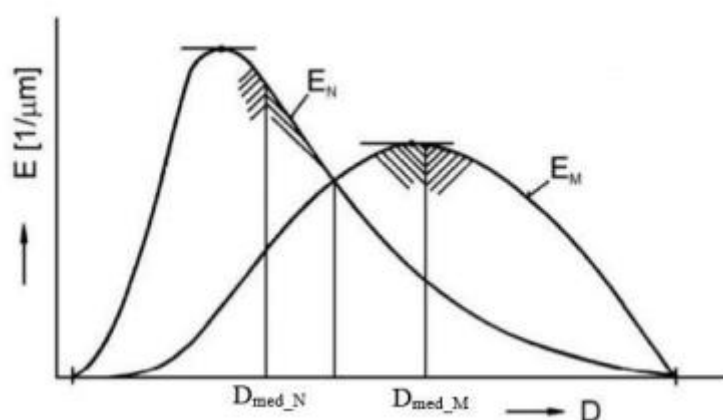
2.6 Distribuce částic

Částice biomasy při mletí lze zařadit mezi polydisperzní partikulární materiály, protože obsahují různě velké částice. K popisu velikosti částic se používají distribuční funkce reprezentované distribučními křivkami. Máme 2 typy distribučních funkcí, diferenciální a integrální. Distribuční funkce lze vztahovat buď ke hmotnosti částic nebo k jejich počtu. Diferenciální distribuční funkce $E(D)$ vyjadřuje četnost s jakou se vyskytuje daná frakce částic. Integrální distribuční funkce udává podíl částic o menším průměru než D . Vztahy mezi distribučními funkcemi lze vyjádřit následujícími rovnicemi. [43]

$$E = \frac{dF}{dD} \quad (5)$$

$$F = \int_0^D E dD = \int_{D_{min}}^D E dD \quad (6)$$

Na následujícím obrázku jsou příklady diferenciálních a integrálních distribučních funkcí.



Obrázek 8 Příklad distribučních křivek [43]

K popisu distribuce částic se používají různé matematické modely, například logaritmicke-normální rozložení, Gaudin-Schummanovo rozložení a Rosin, Rammler, Sperling, Bennetovo (RRSB) rozložení.

Logaritmicke normální rozložení je definováno následujícím vztahem.

$$E(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(\ln D - \ln D_{50})^2}{2\sigma^2} \right) \quad (7)$$

$$\sigma = \ln \frac{D_{84}}{D_{50}} \quad (8)$$

Ve vztahu jsou tedy 2 parametry pro popis D_{50} a D_{84} , což jsou průměry odpovídající hodnotě $F=0,5$ případně $F=0,84$.

Gaudin-Schummanovo rozložení je definováno následujícím vztahem.

$$F = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^m \quad (9)$$

V logaritmických souřadnicích se stane přímkou.

$$\ln F = m \ln D - m \ln D_{max} \quad (10)$$

Potom je m směrnicí a D_{max} je maximální průměr částice.

RRSB rozdělení je definováno následujícím vztahem.

$$1 - F = \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right] \quad (11)$$

Vztah obsahuje parametry střední rozměr \bar{D} a index polydisperzity n . Vztah lze zlinearizovat. [37]

$$\ln (-\ln(1 - F)) = n \ln D - n \ln \bar{D} \quad (12)$$

$$\text{Odtud vyplývá, že: } \quad \bar{D} = 1 - F = e^{-1} = 0,368 \quad F = 0,632 \quad [43] \quad (13)$$

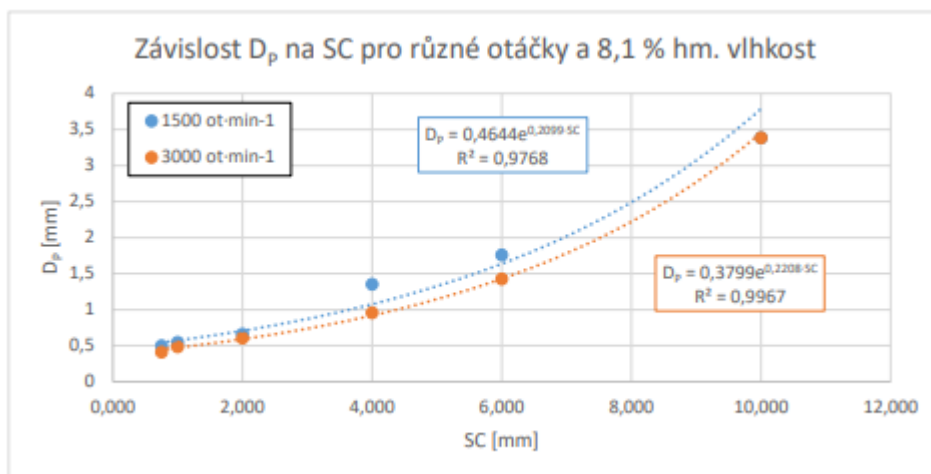
Dle literatury RRSB rozdělení bývá vhodné pro popis distribuce částic lignocelulóзовé biomasy při mletí, využil jsem jej při vyhodnocování experimentální části této práce. [44]

3 Dosavadní výzkumy v oblasti a cíle této práce

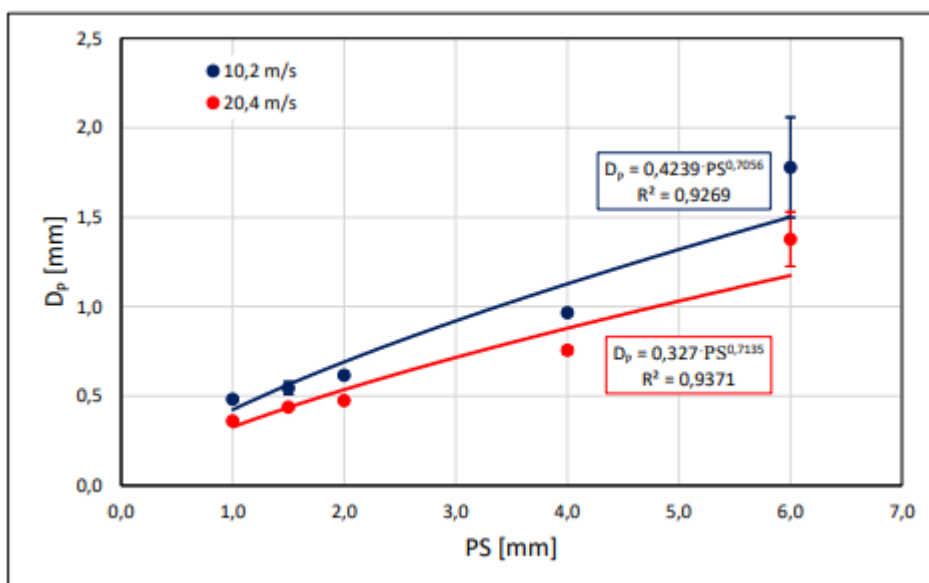
3.1 Dosavadní výzkumy

Mletí odpadní lignocelulóзовé biomasy je zatím na okraji vědeckého zájmu, tomuto tématu se zatím věnovalo jen malé množství vědců a vznikalo malé množství publikací. Výzkumy zaměřené na mletí lignocelulóзовé biomasy na střížném nožovém mlýnu jsou velmi ojedinělé a velká část prací pochází z naší fakulty z výzkumů Dr. Arce a doc. Krátkého a jeho diplomantů a spolupracovníků. [45] V těchto výzkumech byla mleta zejména pšeničná sláma a buková štěpka. [46] Velikost částic byla měřena síťovou analýzou a rozpojovací energie pomocí měření příkonu při měření s nerovnoměrným ručním dávkováním. [47] Byly měněny otáčky, velikosti oka mlecího síta a někdy také vlhkost. Vliv geometrie rotoru byl zkoumán pouze málo a vznikly o tom 2 články během roku 2023, jeden se týkal štěpky a druhý slámy. [48] [44] Ve výzkumech pro velikost částic se podařilo ověřit, že při vyšších obvodových rychlostech rotoru vzniká větší množství menších částic při jinak stejných parametrech, dále se podařilo zjistit, že závislost mezi velikostí částic a velikostí oka mlecího síta má jednoznačný trend, který se pro rozsah sít od 0 do 10 mm popíše nejlépe exponenciální funkcí. [49] Integrální distribuční křivku lze dobře aproximovat RRSB rozložením velikosti částic. To je platné jak pro slámu, tak pro štěpku. [14] U slámy lze ovlivnit index polydisperzity n i šíři distribuční křivky ξ pomocí změny velikosti síta. [47] S větším sítem klesá index polydisperzity a roste šíře distribuční křivky. [50] Čím je materiál tvrdší a křehčí, tím je tento trend méně výrazný, proto při mletí tvrdé bukové štěpky téměř nelze ovlivnit šíři distribuční křivky ani index polydisperzity. [51] Z porovnání lineárního a šroubovicového rotoru plynulo, že většího rozdílu ve velikosti částic mezi oběma rotory se dosáhne nejlépe při nízkých otáčkách rotoru a při mletí vyschlých vzorků. U slámy dává menší částice lineární rotor, zatímco u štěpky šroubovicový rotor. Měření energetické náročnosti v těchto pokusech nebylo příliš přesné z důvodu nekvalitního dávkování, přesto se ale došlo ke smysluplným výsledkům. [49] Rozpojování suché a biomasy je mnohem snadnější než u vlhké biomasy a při větším stupni rozpojení byla potřeba větší rozpojovací energie. V jednotlivých pokusech se podařilo ukázat, že Rittingerův model je vhodný pro dobře vyschlou biomasu, zatímco u vlhkých vzorků s vlhkostí nad 10 % může být výhodnější

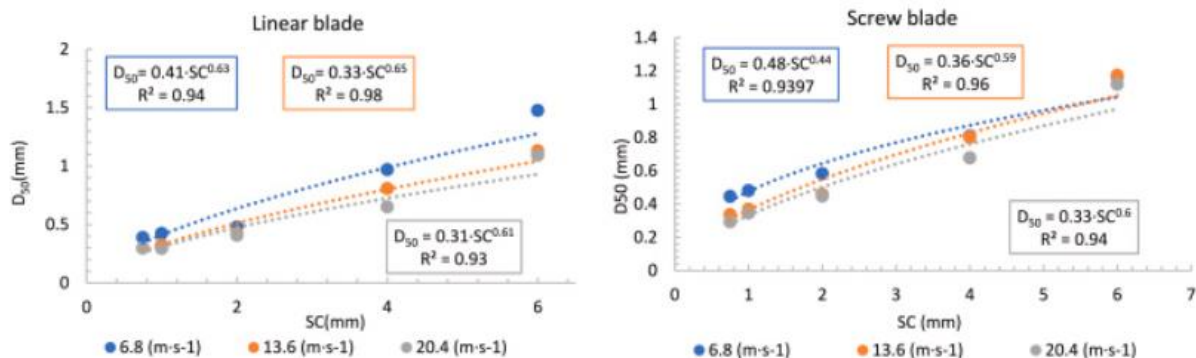
Kickův nebo Bondův model, protože popisují i elastické chování. [46] Zároveň se zjistilo, že zvyšování vlhkosti nad 15 % hmotnosti může vést k ucpávání mlýna, střížný mlýn se tedy hodí zejména pro biomasu s vlhkostí do 15 %. [48]



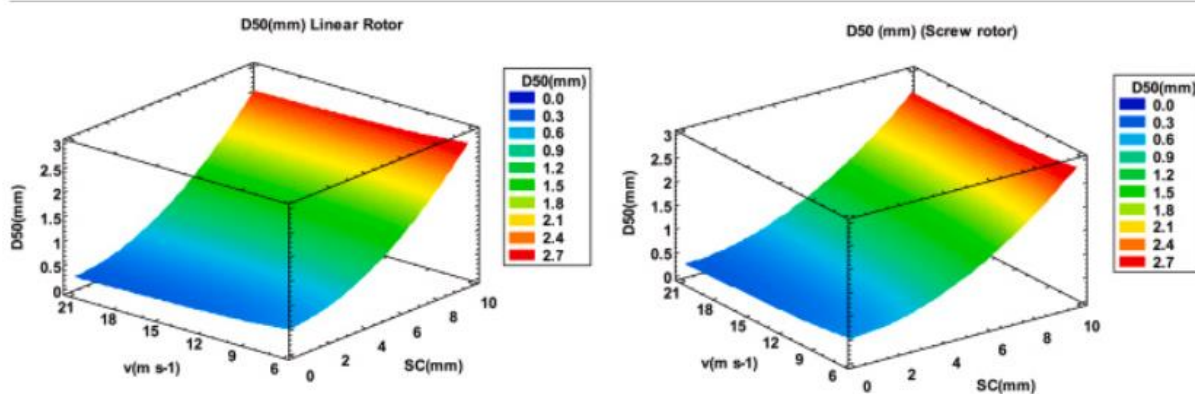
Obrázek 9 Závislost \bar{D} na velikosti síta pro slámu podle Ženkla [46]



Obrázek 10 Závislost \bar{D} na velikosti síta pro štěpku podle Bímona [45]

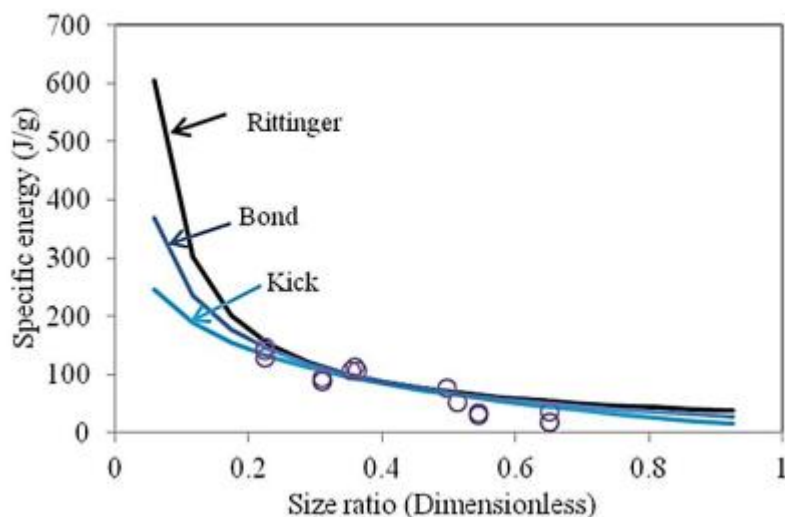


Obrázek 11 Závislost D_{50} na sítu pro lineární a šroubovicový rotor pro štěpku podle Krátkého a Arce [48]



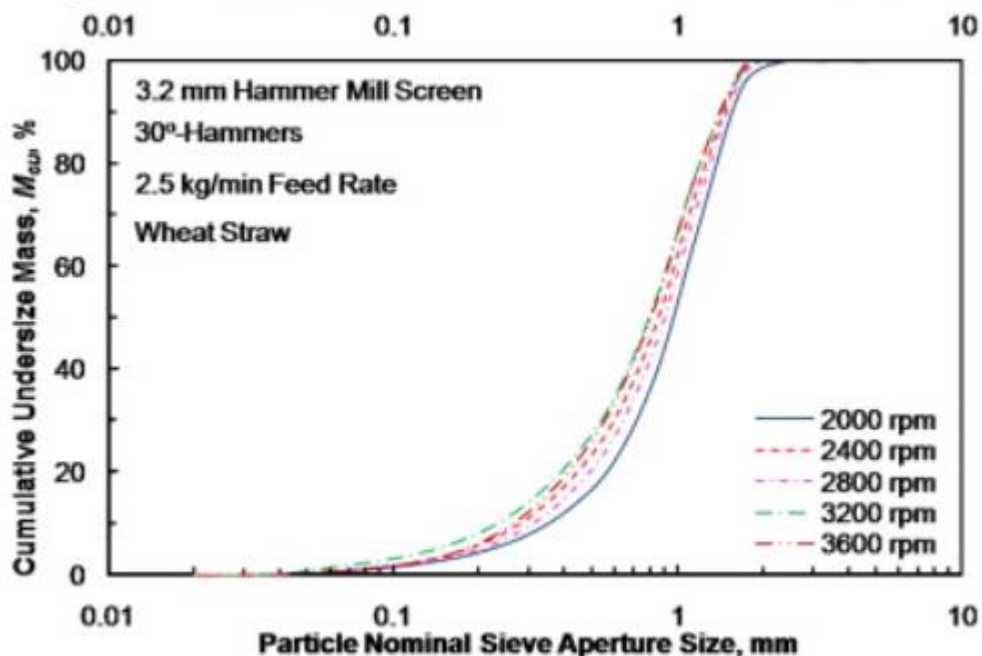
Obrázek 12 Model pro predikci D_{50} pro štěpku v závislosti na rychlosti a sítu podle Krátkého a Arce [48]

Publikací o mletí lignocelulózové biomasy na střížném mlýnu vzniklých mimo naši fakultu je velmi málo. Nepodařilo se dohledat žádný takový článek o vlivu šroubovicové geometrie ostří. Ojedinele existují články o mletí s lineárním ostřím. V roce 2021 Eisenlauer et al [52] v Německu prováděl výzkumy, které srovnávaly mletí na střížném mlýnu Retsch SM 2000 s úderovým mlýnem Siebtechnik HM1. Ve výzkumu byla mleta štěpka smrková, buková a dubová při 2 různých vlhkostech. Dávkování probíhalo kontinuálně pomocí vibračního dávkovače a velikost částic byla měřena pomocí analýzy mikroskopických snímků pomocí přístroje Retsch Camsizer P4. Rozpojovací energie byla určována měřením příkonu. Pro nožový mlýn vyšlo, že suchá biomasa vyžaduje výrazně menší rozpojovací energii a umožňuje tvorbu jemnějších částic při jinak stejných parametrech. Z porovnání úderového a střížného mlýna vyšlo, že střížný mlýn dával menší částice při jinak stejném mlecím sítu, u střížného mlýna se používala obvodová rychlost 5 m/s a u úderového 26 m/s. Energetická náročnost mletí vyšla velmi podobná. [52] Naimi et al [53] v roce 2013 mlel na střížném mlýnu v rámci své práce štěpku z vrby a z douglasky tisolisté. Štěpka měla vlhkost 11,5 % hmotnosti. Byla měřena energetická náročnost mletí a naměřená data byla srovnávána s jednotlivými modely pro rozpojovací energii. Z porovnání dat s Kickovým, Bondovým a Rittingerovým modelem vyšlo, že Rittingerův model nejlépe popisuje skutečná naměřená data. [53]



Obrázek 13 Porovnání modelů pro rozpojovací energii Naimi [53]

Dále jsou dostupné zejména články o mletí lignocelulózové biomasy na úderovém mlýnu. Bitra et al [54] v USA takto mlel pšeničnou slámu, kukuřičnou siláž a proso prutnaté. [54] Byl použit úderový mlýn Schuttle Buffalo s výkonem 18 kW, šlo tedy o velký laboratorní až poloprovozní mlýn. Dávkovalo se pomocí pásového dopravníku a mlelo se přes síto 3,2 mm. Rozložení částic odpovídalo RRSB rozložení, bylo měřeno síťovou analýzou. Závislost D50 na otáčkách rotoru byla vyhodnocena jako polynomická. V této práci byl také detailně zkoumán vliv plnění na energetickou náročnost mletí. Zjistilo se, že rozpojovací energie se snižovala s rostoucím průtokem suroviny, bylo to zkoumáno při průtocích 60 až 660 kg/h. Zároveň celková energie výrazně rostla se zvyšujícími se otáčkami rotoru.



Obrázek 14 Závislost distribuce částic na otáčkách úderového mlýna podle Bitry pro pšeničnou slámu [54]

Gil et al [55] ve Španělsku prováděl výzkumy na mletí kukuřice a topolové štěpky na velkém laboratorním úderovém mlýnu. [55] Mletí probíhalo přes síta 5, 3,5 a 2 mm. Rozložení částic odpovídalo RRSB rozložení, bylo měřeno síťovou analýzou. Naměřená data byla vyhodnocována pomocí neuronové sítě a takto byla

určena závislost výsledku mletí na parametrech. Vznikl prediktivní model jako funkce dvou proměnných – vlhkosti vzorku a velikosti mlecího síta. Mani et al [56] v Kanadě mlel pšeničnou a ječnou slámu, kukuřičnou siláž a proso trsnaté na malém laboratorním úderovém mlýnu. [56] Při mletí byla použita síta 3,2; 1,6 a 0,8 mm, velikost částic byla měřena síťovou analýzou.

Z této rešerše plyne, že problematika mletí lignocelulózy biomasy není příliš prozkoumána, existují sice systematické výzkumy pro mletí na úderových mlýnech, ale je jich stále poměrně málo. S výzkumy na mletí lignocelulózy biomasy na střížném mlýnu se téměř nesetkáme s výjimkou výzkumů na naší fakultě, které vedli doc. Krátký a Dr. Arce nebo případně jejich diplomanti. S výjimkou jednoho výzkumu zatím nebyl prozkoumán vliv geometrie ostří rotoru střížného mlýna na distribuci částic a rozpojovací energii. Ani vliv ostatních parametrů zatím není detailně prozkoumán.

3.2 Cíle této práce

Cílem této práce je prozkoumat vliv parametrů střížného mlýna na distribuci částic a rozpojovací energii. Při mletí lze zkoumat vliv geometrie ostří a zjistit rozdíl mezi lineárním a šroubovicovým rotorem, dále vliv otáček a obvodové rychlosti rotoru a také vliv mlecího síta. Dále je třeba zjistit, zda má smysl zkoumat vliv vlhkosti v dalších výzkumech, které by navázaly na tuto práci. Naměřené údaje z jednotlivých pokusů je třeba systematicky vyhodnotit a data vložit do tabulek a vykreslit do grafů. Distribuci částic bude třeba srovnat s RRSB rozložením a rozpojovací energii srovnat s Rittingerovým modelem, tak jak se to doporučuje u tvrdé a křehké lignocelulózy biomasy. Na základě vyhodnocení bude cílem vytvořit matematický model, který bude predikovat velikost částic v závislosti na parametrech.

4 Praktická část – experimentální měření a vyhodnocování

4.1 Návrh experimentů

4.1.1 Obecný návrh

Pro splnění cíle práce byly navrženy experimenty při mletí bukové uzennářské štěpky pomocí paralelního třínožového rotoru s lineární geometrií a pomocí 6diskového rotoru se šroubovicovou geometrií. Při samotném mletí byl měřen příkon pro určení energetické náročnosti a rozpojovací energie a byla měřena velikost částic pro určení distribuce částic jak na vstupu, tak na výstupu. Kromě typu rotoru byly měněny i další parametry a byl zkoumán vliv změny parametrů na výsledek. Byly měněny velikosti sít při mletí, byla používána síta se čtvercovými oky o velikosti 6, 4 a 2 mm a síta s lichoběžníkovými oky o velikosti 1,5;1 a 0,75 mm. T vliv velikosti ok síta na výsledek mletí. Dále byly měněny otáčky rotoru, byly používány hodnoty 500, 1500 a 3000 otáček za minutu. Tím byl určován vliv otáček rotoru na výsledek mletí. Dále bylo třeba ověřit, zda má vlhkost štěpky vliv na výsledek mletí a na energetickou náročnost. Mlela se jak štěpka o přirozené vlhkosti uvnitř laboratoře, tak štěpka usušená v sušárně s výrazně nižší vlhkostí. Nejde ale o přesný popis závislosti mezi vlhkostí štěpky, výsledkem mletí a energetickou náročností, na to by byly nutné další výzkumy s měřením při mnoha různých vlhkostech štěpky. Jde jen o to, aby se ukázalo, zda má smysl vliv vlhkosti podrobně zkoumat.

4.1.2 Určování složení štěpky

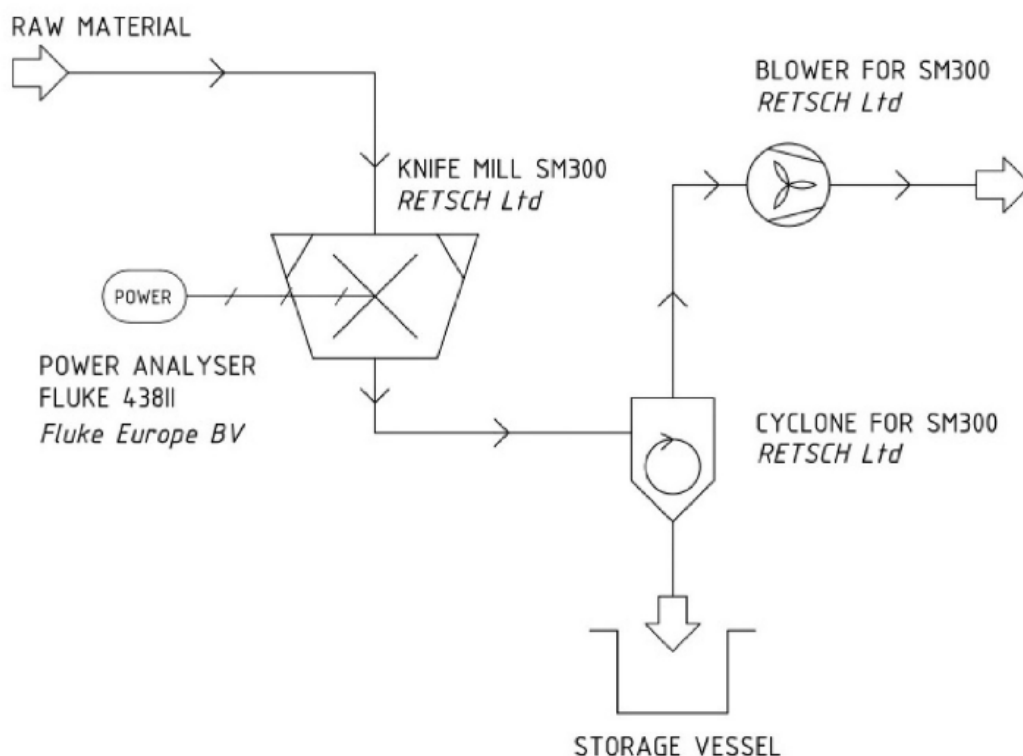
Přibližné složení štěpky lze stanovit hrubým rozbořením. Zváží se vzorek a dá se schnout do sušárny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti a po usušení se zváží vzorek znovu. Z úbytku hmotnosti lze určit, jakou část původního vzorku tvořila voda. Podíl anorganických látek (zejména popelovin) se určí tak, že zvážený suchý vzorek se dá do pece a žihá se při teplotě 550 °C až do konstantní hmotnosti, úbytek hmotnosti při žihání vztažený ke hmotnosti vlhkého vzorku udává podíl hořlavé organické hmoty v původním vlhkém vzorku a konečná hmotnost po žihání vztažená ke hmotnosti vlhkého vzorku udává podíl anorganických popelovin v původním vzorku.

4.2 Stroje a zařízení pro experimenty

Naše fakulta používá při pokusech experimentálního určování energetické náročnosti mletí a při měření rozložení velikosti částic nožový střížný mlýn Retsch SM 300. Mlýn je schopen pracovat s materiálem o velikosti částic až 60x80 mm, při pokusech na fakultě se běžně používá pro mletí slámy, vojtěškové senáže a štěpky o vstupní velikosti částic do 20 mm, konečná výstupní velikost částic závisí na namontovaném sítu a jeho otvorech. Používají se lichoběžníkové otvory o velikostech 0,50/0,75/1,00/1,50 mm a čtvercové otvory 2,00/4,00/6,00/8,00/10,00 mm. Velikost ok ovlivňuje výstupní velikosti částic. Pro sběr namleté hmoty se používá 5 l nádoba, nebo cyklono-sací kombinace (0,25 l až 30 l). Mlýn je poháněn trojfázovým asynchronním motorem s frekvenčním měničem, který může dosahovat otáček 500-3000/min a výkonu 3 kW. Průměr rotoru je 129,5 mm a na obvodu dosahuje rychlosti 3,4-20,4 m/s. Vyrábí se 3 typy rotorů, a to paralelní, 6-diskový a V-rotor. Na fakultě se používá 6-diskový rotor (šroubovicová geometrie) a paralelní rotor (lineární geometrie se třemi břity). Stator obsahuje 3 lineární nože. Materiál mlecích nástrojů může být nerezová ocel, ocel pro mletí bez kontaminace těžkými kovy, karbid wolframu. K mlýnu existují 2 násypky, a to univerzální a násypka pro dlouhé materiály. Na fakultě se používá pro předemletí volné sypání namletého materiálu do 5 l nádoby bez podtlaku, při konečném mletí se používá cyklono-sací kombinace, kde lze využít podtlak pro usnadnění průchodu částic jemným sítem a snížení rizika ucpávání. [39]



Obrázek 15 Paralelní rotor (lineární 3 břity) a 6-diskový (šroubovicový) rotor



Obrázek 16 Schéma mlecí aparatury [48]



Obrázek 17 Mlýn Retsch SM 300 v konfiguraci pro mletí s podtlakem (vlevo) a bez podtlaku (vpravo)

Seznam strojů a zařízení: mlýn Retsch SM 300 včetně odsávání s cyklonem a nádobami, elektrický analyzátor FLUKE 438II, stopky Kalenji, vibrátor Vipo VP 200, sada analytických sít, váha digitální Kern 573-46, váha digitální Mettler Toledo SDC 31, sušárna Binder KBC-25W, pec LAC LE09/11

4.3 Postup při pokusech

Štěpku byla nejprve předemleta pro zrovnoměrnění velikosti částic a možnost snadné analýzy vstupní velikosti pro mlecí pokusy. Předemílala se s lineárním rotorem při otáčkách 3000 rpm a bez podtlaku vyvolaného vysavačem s cyklonovým odlučovačem. Tím se získaly vstupní vzorky. Udělal se hrubý rozbor štěpky pro určení přibližného složení. Štěpka byla zvážena na váze Mettler Toledo a poté sušena v sušárně Binder KBC-25W při teplotě 105 °C do ustálení hmotnosti přibližně 18 hodin. Po vyjmutí ze sušárny byla opět zvážena. Z úbytku hmotnosti se vypočetl obsah vody. Dále byla štěpka žíhána v peci při teplotě 550

°C do ustálení hmotnosti přibližně 6 hodin a poté znovu zvážena. Zbytek po žihání odpovídal obsahu anorganických látek (popelovin) a úbytek hmotnosti odpovídal obsahu organických hořlavin.

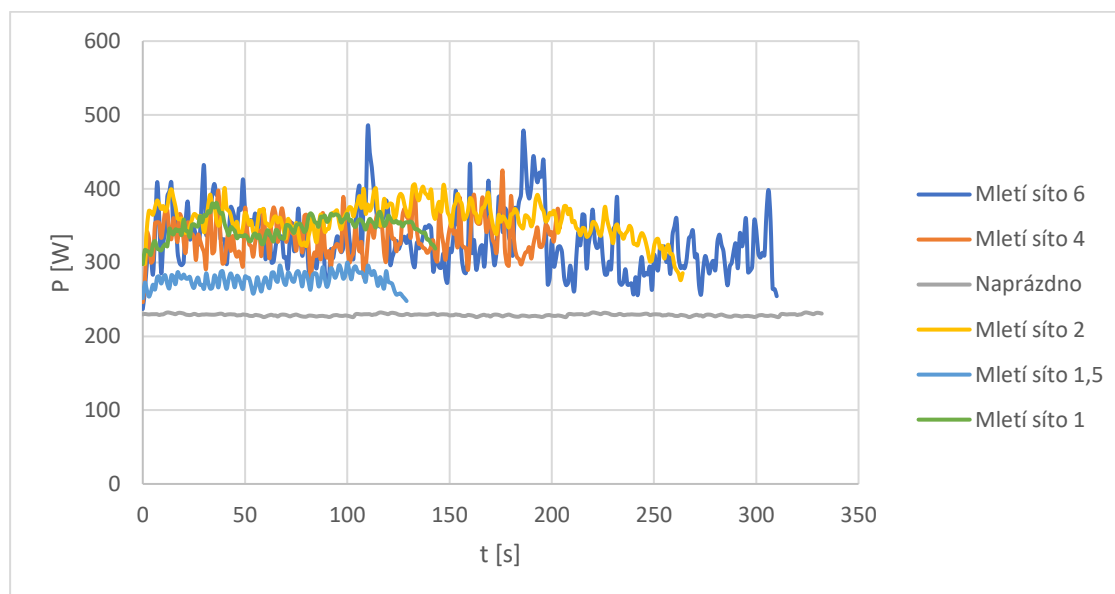
Postup mlecích pokusů byl následující. Odebral se malý vzorek předemleté štěpky pro síťovou analýzu vstupní suroviny. Odvážilo se na váze Kern 1200 g předemletého vzorku, který se stal vstupní surovinou pro pokus, poté se nasadilo síto do mlýna, nastavily otáčky, spustil mlýn, spustilo se odsávání a začalo se mlít. Čas mletí se měřil stopkami Kalenji a příkon při mletí se měřil pomocí analyzátoru Fluke 438-II, který mimo jiné měřil a ukládal data o průměrném činném výkonu mlýnu za každou sekundu, data byla uložena na SD kartu a poté exportována do počítače. Po namletí celého vzorku se zastavily stopky, vypnul mlýn, vypnulo se odsávání, promíchal se namletý vzorek, aby došlo k homogenizaci a poté se odebral malý vzorek na síťovou analýzu. Zbýlý namletý vzorek se zvážil a použil jako vstupní surovina pro další mletí, namontovalo se menší síto a mletí se znovu opakovalo stejným způsobem. Začínalo se sítem 6 mm a postupně se vyměňovala síta v tomto pořadí: 4 mm; 2 mm; 1,5 mm; 1 mm; 0,75 mm. První pokusy se dělaly pro lineární rotor při 500 rpm, po namletí se ještě změřil příkon mlýna při chodu naprázdno, aby se dala vyhodnocovat rozpojovací energie. Poté se odvážilo nových 1200 g předemleté štěpky a dělalo to samé i pro 1500 rpm a 3000 rpm. Poté se vyměnil rotor za 6diskový se šroubovicovou geometrií a udělaly se ty samé pokusy pro 500, 1500 a 3000 rpm vždy s počátečním vzorkem 1200 g štěpky předemleté se sítem 10 mm při 3000 rpm s lineárním rotorem. Po namletí sady vzorků při jedné otáčce se měřila distribuce částic všech 5-6 vzniklých vzorků pomocí síťové analýzy. Pro 500 rpm se nedařilo mletí s nejjemnějším sítem 0,75 mm, mlýn se neustále ucpával, proto nevznikl reprezentativní vzorek pro síťovou analýzu a měření energetické náročnosti nemělo v tomto stavu smysl. Pro síťovou analýzu se použila sada analytických sít, pro všechny pokusy byla stejná sada. Nahoře bylo 10 mm, síta dále pokračovala v tomto pořadí: 7; 5; 3; 2,5; 1,2; 0,85; 0,71; 0,6; 0,45; 0,355; 0,2; 0,106 mm, pod spodním sítem byla miska pro zachycení propadu, ta se také vyhodnocovala. Všechna síta najednou se nedají upevnit na vibrátor, takže se analýza prováděla rozděleně na 2 části. Všechna síta se zvážila prázdná a poté se nasypal daný vzorek na síto 10 mm, pod ním byla jemnější síta až po 2,5 mm, pod toto síto se dala miska. Síta se umístila na vibrátor Vipo VP 200 a vzorek se nechal pomocí vibrátoru prosévat, dokud se neustálilo množství vzorku na jednotlivých patrech. Pro síťovou analýzu byla po celou dobu používána váha Kern. Vzorek z misky se použil pro další analýzu, která začínala sítem 1,2 mm pod kterým byla všechna ostatní síta až po nejjemnější, pod které se dala miska. Sada jemnějších sít se opět umístila na vibrátor a nechala prosévat, dokud se množství vzorku na jednotlivých patrech neustálilo. Mezitím se zvážila hrubá síta i se zachyceným vzorkem a po odečtení hmotnosti prázdného síta šlo určit hmotnost záchytu na jednotlivých sítích. Síta se očistila a mohla se použít pro analýzu dalšího vzorku. Poté se zvážila i jemná síta se zachyceným vzorkem, odečetla hmotnost prázdného síta a šlo určit hmotnost záchytu na každém jemném síti i na spodní misce. Jemná síta se očistila a celá analýza se opakovala pro další vzorek. Takto byla provedena síťová analýza všech vzorků. Díky tomu bylo určeno zastoupení částic v jednotlivých velikostních frakcích a z toho šlo vykreslit distribuční křivky pro jednotlivé vzorky. Dále se stejná měření prováděla pro vysušenou štěpku. Stejným způsobem se předemlela štěpka se sítem 10 mm při otáčkách 3000 rpm a s lineárním rotorem. Předemletá štěpka se postupně sušila při 105 °C v sušárně Binder KBC-25W, do sušárny se vešlo vždy 1200 g štěpky rozprostřené na plechy. Po ustálení hmotnosti přibližně po 18 h se štěpka přemístila v sáčku do exsikátoru, kde se vychladila a udržovala při nulové vlhkosti. Obsah každého sáčku se těsně před mletím zvážil a stejným způsobem jako pro nevysušenou štěpku se provedly pokusy a měření. Vzorky před sušením měly zhruba 1200 g, po sušení byly lehčí, takže suchého vzorku se mlelo hmotnostně mírně méně než vlhkého, hmotnosti za vlhka by přibližně odpovídaly. Na výsledky to nemá vliv, rozpojovací energie je stejně vždy vztažena ke hmotnostnímu průtoku. Po namletí na nejjemnějším síti se odebral malý vzorek do misky pro určení toho, jak štěpka navlhla při mletí. Vzorek se zvážil, vložil do sušárny na cca 18 h do ustálení hmotnosti a poté se znovu zvážil a z úbytku hmotnosti se dopočetl obsah vody ve štěpce. Lignocelulózová biomasa do sebe snadno pohlcuje vlhkost okolního vzduchu, takže i během krátké doby mletí může obsah vody vyrůst až o několik %.

4.4.1 Určování energetické náročnosti mletí

Experimentálně měřením lze zjišťovat měrnou rozpojovací energii při mletí suroviny z jedné velikosti částic na jinou a vztahovat ji na určitou hmotnost suroviny. Většinou se měří příkon elektromotoru daného mlýna při mletí suroviny a při chodu naprázdno. Když se potom určí rozdíl prvního a druhého zmíněného měření, vyjde, s jakým příkonem se mele daná surovina. Když se tento výkon integruje podle času měření, tak vychází rozpojovací energie pro určitou surovinu, když se podělí hmotností, tak je určena měrná rozpojovací energie (viz následující vztah).

$$e = \frac{\int_0^t P_{AM} dt - \int_0^t P_{AI} dt}{m} \quad (14)$$

V tomto vztahu je m hmotnost vzorku, P_{AM} je činný příkon při mletí, P_{AI} je činný příkon naprázdno a t je doba mletí. Pokud surovina přichází do mlýna náhodně, tak je křivka příkonu velmi proměnlivá s prudkými nepravidelnými změnami. Mlýn chvíli běží téměř naprázdno a chvíli je ucpaný a bržděný přebytkem suroviny. Pokud máme matematicky s takovouto křivkou příkonu dále pracovat, tak je to velice obtížné a určení rozpojovací energie může být velmi nepřesné. [49] [47]



Obrázek 18 Příkon našeho mlýna (přirozený vzorek, lineární rotor 500 rpm)

Mnohem výhodnější by bylo mít hladkou pravidelnou křivku, která se co nejvíce blíží lineárnímu průběhu, potom se dá snadno a přesně určovat rozpojovací energie. Navíc, pokud bude mít mlýn vždy optimální množství suroviny, tak bude mlít s nejmenší vynaloženou energií. Pro rozšíření dané technologie mletí do velkovýrobního průmyslu se budou navrhovat také metody plnění pro dosažení optimálních podmínek pro mletí. Chod naprázdno vždy znamená zbytečnou ztrátu energie a při přebytku suroviny je také mnohem vyšší energetická náročnost mletí. Pokud by byl přívod suroviny do mlýna spojitý a plynulý v optimálním množství, tak lze zajistit mletí v optimálních podmínkách a zamezit nepravidelným výkyvům příkonu. Tím se přiblížíme k hladké pravidelné křivce, kterou dále potřebujeme pro zpracování naměřených údajů, takto můžeme poměrně přesně určovat rozpojovací energii měřením a následným zpracováním údajů.

Zatím ale není na fakultě zprovozněný dávkovač pro kontinuální plnění mlýna v optimálním množství. Prototyp z mojí bakalářské práce nemá zprovozněný pohon, který byl v původním návrhu a zatím se neplánuje pořízení pohonu k tomuto prototypu. Do budoucna se sice plánuje na fakultu pořídit

laboratorní dávkovač, nestihne se ale využít pro potřeby této práce. Aby nebyla chyba měření nepřijatelně velká z důvodu nerovnoměrného dávkování, bylo nutné alespoň rukou maximálně napodobit kontinuální dávkování. Křivky sice nejsou ideálně pravidelné, ale měření má přesto výrazně menší chybu než při náhodném vhažování. Přesto ale měření bez kvalitního dávkování slouží zejména jako hrubý odhad a nelze očekávat vysokou přesnost naměřených údajů.

Matematické modelování energetické náročnosti mletí na základě teoretického odvození je velice obtížné. Vyžaduje dobrou znalost chování částic uvnitř mlýna a se současnými poznatky nelze toto chování dostatečně přesně popsat. Při tvorbě nějakého modelu, je nutné konkrétní model vždy ověřit experimentem a pokud se bude výrazně odchylovat od experimentu, tak se musí model upravit, aby byl přesnější. Například pro nožový mlýn by modelování rozpojovací energie vyžadovalo znalost meze pevnosti ve stříhu dané mleté biomasy (ta už byla měřena a dá se dohledat v různých tabulkách) a znalost střížné plochy pro danou průměrnou částici biomasy, dále je třeba znát průměrný počet částic vstupní velikosti v dané hmotnosti biomasy a k tomu je potřeba popsat, kolikrát se průměrná částice dostane mezi střížné nože, než je dostatečně malá na to, aby se dostala z rotoru ven. [47]

4.4.2 Určování distribuce velikosti částic

Pro partikulární materiály existuje mnoho metod měření velikosti částic, z nichž jsou ale jen některé vhodné pro měření velikosti částic mleté lignocelulózové biomasy. Při měření je třeba si uvědomit, že částice mají výrazně jehlicovitý tvar a výrazně se odlišují od ideálních kulových částic, s nimiž uvažují různé modely a pro které je vyvinuté spolehlivé měření velikosti. Vlivem struktury tvořené dlouhými a pevnými celulóзовými vlákny zůstávají po mletí částice podlouhlé ve směru vláken a tento rozměr je výrazně delší než ostatní rozměry.

Mezi běžné metody měření velikosti částic partikulárních materiálů patří: měření usazovací rychlosti, počítačová analýza mikroskopických snímků, laserová difrakční analýza a síťová analýza.

Měření usazovací rychlosti spočívá v tom, že se pouští do kapaliny částice, které se usazují ke dnu a měří se čas, za jaký částice urazí danou vzdálenost. Z toho se dopočte rychlost, při známé hustotě částice a známé hustotě a viskozitě kapaliny se snadno určí průměr částice pro kulovou částici. Při měření musí být splněno, že kapalina bude mít menší hustotu než částice a částice budou ke kapalině dokonale inertní, nesmí se v kapalině rozpouštět ani ji do sebe nasáknout. Nekulovitost částic může způsobit značné odchylky. Problémem je, že lignocelulózová biomasa do sebe snadno nasákne většinu běžných kapalin, takže tento způsob měření je pro můj případ nepoužitelný.

Další možností je počítačová obrazová analýza mikroskopických snímků pomocí speciálního softwaru. Tato metoda je univerzálnější, pokud je známé zvětšení snímku, tak je poměrně přesná a díky využití počítače může být i docela rychlá, měření včetně analýzy je výrazně kratší než měření usazovací rychlosti. Metoda by se dala skvěle využít při měření velikosti částic biomasy, jenže na fakultě není k dispozici vhodný software, který by snímky vyhodnotil, v mých podmínkách je to tedy nepoužitelné.

Dále lze měřit pomocí laserového difrakčního analyzátoru, který využívá ohybu laserových paprsků o velmi malé částice. Je to velmi rychlá, přesná a univerzální metoda pro částice, jejichž největší rozměr není větší než 1 mm. U větších částic se přesnost výrazně zhoršuje, proto se pro částice s nejdelším rozměrem nad 1 mm nedoporučuje. Částice lignocelulózové biomasy jsou dlouhé jehlice a naprostá většina jich má nejdelší rozměr nad 1 mm, a to i při použití jemných sít statoru při mletí. Kdybych mlel materiál, kde vznikají kulovitější částice (např. zrní), tak by to byla velmi výhodná metoda, u lignocelulózové biomasy je použití problematické, nakonec jsem tedy tuto metodu nevyužil.

Poslední možností, o které se zmíním, je síťová analýza. Její výhoda spočívá v jednoduchosti, univerzálnosti a nenáročnosti na vyhodnocovací software. Nevýhodou je, že je velmi pracná a zdoluhavá, pro jehlicovité částice také nemá zdaleka ideální přesnost. Přesto však výsledky dávají smysl i u podlouhlých jehlicovitých částic lignocelulózové biomasy. Měření spočívá v tom, že jsou nad sebou

analytická síta s přesně definovanou velikostí oka, na horním sítě jsou oka největší a s dalšími síty se postupně zmenšují až ke spodnímu sítu, které má nejmenší oka, dole je miska pro zachycení propadu nejjemnějším sítem. U každého síta je známá jeho hmotnost v prázdném stavu. Do horního síta se nasype vzorek a síta se protřepávají (je možné využít vibrátor), až se rozložení částic na jednotlivých sítech ustálí. Poté se zváží jednotlivá síta naplněná částicemi, odečtou se hmotnosti prázdných sít a vzniká diferenciální distribuce částic. Jednotlivé body je možné vztahovat, buď k velikosti oka síta nad daným sítem, nebo lze vypočítat frakční rozměr z velikosti oka daného síta ($D_{s,i}$) a velikosti oka síta nad ním ($D_{s,i-1}$). Pro výpočet frakčního rozměru lze použít aritmetický průměr: $D_i = \frac{D_{s,i-1} + D_{s,i}}{2}$ (15)

Nebo lze použít geometrický průměr: $D_i = \sqrt{D_{s,i-1} D_{s,i}}$ (16)

Integrální distribuční křivka v tomto případě vyjadřuje, jak velký podíl částic propadl daným sítem na patra pod ním. Z integrální distribuční funkce se potom určují i různé charakteristické rozměry, například D_{90} vyjadřuje velikost oka síta, kterým by propadlo 90 % částic ze vzorku, tedy hodnota F by v tom bodě byla 0,9. Tato metoda byla nakonec zvolena jako nejvhodnější pro měření distribuce částic v této práci. Doporučuje se i pro měření velikosti částic lignocelulózové biomasy mleté v průmyslu. [43] [52]

4.4.3 Určování složení štěpky

Přibližné složení štěpky lze stanovit hrubým rozbořem. Zváží se vzorek a dá se schnout do sušárny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti a po usušení se zváží vzorek znovu. Z úbytku hmotnosti lze určit, jakou část původního vzorku tvořila voda. Podíl anorganických látek (zejména popelovin) se určí tak, že zvážený suchý vzorek se dá do pece a žihá se při teplotě 550 °C až do konstantní hmotnosti, úbytek hmotnosti při žihání vztahovaný ke hmotnosti vlhkého vzorku udává podíl hořlavé organické hmoty v původním vlhkém vzorku a konečná hmotnost po žihání vztahovaná ke hmotnosti vlhkého vzorku udává podíl anorganických popelovin v původním vzorku.



Obrázek 19 Štěpka původní (vlevo) a předemletý (vpravo) vzorek



Obrázek 20 Měření příkonu mlýna



Obrázek 21 Sítová analýza



Obrázek 22 Ucpaný rotor při 500 rpm a 0,75 mm sítu, nevznikl žádný reprezentativní vzorek



Obrázek 23 Namletá štěpka (vlevo) a rozbor štěpky-vážení (vpravo)



Obrázek 24 Exsikátor a sušárna Binder



Obrázek 25 Pec a vzorek po žhání v peci



Obrázek 26 Sada sít používaná při mletí

5. Vyhodnocení experimentů

5.1 Obecný postup vyhodnocování

Výstupem z měření pro každý byly parametry distribuce částic, tedy hmotnost částic v každé velikostní frakci a k tomu hmotnost materiálu při mletí, doba mletí a zprůměrovaný činný příkon motoru při mletí a při chodu naprázdno pro každou sekundu chodu. Dále byly výstupem hmotnosti štěpky při jejím hrubém rozboru. Pro vyhodnocování dat byl použit Microsoft Excel.

Vyhodnocení hrubého rozboru se dělalo takto:

$$\text{Obsah vody v \% hmotnosti: } c_W = \frac{m - m_D}{m} \cdot 100 \quad (17)$$

$$\text{Obsah popelovin v \% hmotnosti: } c_A = \frac{m_A}{m} \cdot 100 \quad (18)$$

$$\text{Obsah organických hořlavin v \% hmotnosti: } c_H = 1 - c_W - c_A \quad (19)$$

V těchto rovnicích je m_A hmotnost vzorku po vyžihání, m_D je hmotnost vzorku po vysušení a m je hmotnost původního vzorku.

Distribuce částic byla vyhodnocována takto. Nejprve se vypočetla hodnota diferenciální distribuční funkce pro každou frakci v % ze vztahu: $E = 100 \cdot \frac{m_S}{m_{\text{celk}}}$ (20)

V tomto vztahu je m_S hmotnost částic v dané frakci a m_{celk} je celková hmotnost vzorku odebraného pro síťovou analýzu. Hodnota integrální distribuční funkce F má odpovídat zastoupení všech částic menších než daný rozměr oka síta, to znamená, že musí odpovídat podílu všech částic, které daným sítem propadly, tedy součtu hodnot diferenciální distribuční funkce všech částic zachycených na sítích pod daným sítem. Takto se vypočetly hodnoty integrální distribuční funkce pro všechny frakce částic. Vynesly se do grafu v závislosti na velikosti oka síta.

Poté se vypočetly hodnoty stejné integrální distribuční funkce pro RRSB model distribuce částic pro stejný případ. Vycházelo se ze zlinearování vztahu pro RRSB rozložení.

$$\ln(-\ln(1 - F)) = n \ln D - n \ln \bar{D} \quad (12)$$

Vypočetly se hodnoty $1 - F$ pro každé síto, kterým propadly částice, pro další výpočet se použila pouze síta, která nepropustila všechny částice, abych byla hodnota $1 - F$ větší než 0 a logaritmus dával smysl, dále se vypočetly hodnoty $\ln(-\ln(1 - F))$ pro zmíněná síta. Pro tato síta se vypočetla hodnota $\ln D$, přičemž D byla velikost oka síta. V Excelu se vykreslily grafy pro závislost $\ln(-\ln(1 - F))$ na $\ln D$, zjistilo se, že body skutečně leží přibližně v přímce, proložily se tedy přímkou, jejíž rovnici Excel vypočetl ve tvaru:

$$y = ax + b \quad (21)$$

Z rovnice šlo snadno odečíst parametry $n \ln D$ a $n \ln \bar{D}$.

Ze znalosti vztahu (14) $\bar{D} = 1 - F = e^{-1} = 0,368$ šlo vypočítat střední průměr \bar{D} . \bar{D} se potom vypočítá jako:

$$\bar{D} = e^{\left(\frac{\ln(\ln(\frac{100}{36,8})) + n \ln D}{n \ln D} \right)} \quad (22)$$

Ted' už šlo snadno vypočítat index polydisperzity n ze vztahu:

$$n = \frac{n \ln \bar{D}}{\ln \bar{D}} \quad (23)$$

Tím se určily všechny parametry modelu vycházející z měření a bylo možné napočítat hodnotu distribuční funkce pro jednotlivé průměry D podle RRSB rozdělení ze vztahu:

$$F = 1 - e \left[- \left(\frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right] \quad (24)$$

Jednotlivé průměry se dosazovaly v intervalu 0÷10 mm. Měřené body z distribuční funkce a body vypočtené z modelu byly společně vyneseny do grafů.

Energetická náročnost se vyhodnocovala následujícím způsobem. Ze známé hmotnosti mletých vzorků a doby mletí se vypočetl hmotnostní průtok dle vztahu: $\dot{m} = \frac{m}{t}$ (25)

Dále byly k dispozici textové soubory dat exportovaných z analyzátoru Fluke, v těchto souborech se našla data o činném příkonu měřená v době mletí a měřená při chodu naprázdno, tato data se vybrala a zkopíroval do Excelu. Data o příkonu jsem integroval lichoběžníkovou numerickou metodou. Nejprve se vypočetl střední příkon jako aritmetický průměr z průměrných sekundových příkonů ve dvou po sobě jdoucích měřeních: $E_R = \frac{P(t_i) + P(t_{i-1})}{2} \cdot \Delta t$ (26)

Součtem hodnot tohoto středního příkonu po celou dobu mletí vycházela celková energie při mletí.

Stejným způsobem se vypočítala energie pro chod naprázdno, součet byl pro dobu stejnou jako je doba mletí. Když se od sebe odečetla energie při mletí a energie pro chod naprázdno, vyšla čistá rozpojovací energie. Čistá rozpojovací energie po vydělení hmotností dala měrnou rozpojovací energii.

Dále byla rozpojovací energie srovnána s Rittingerovým modelem a určena konstanta C_R pro lineární a pro šroubovicový rotor zvlášť pro přirozený a pro suchý vzorek. Jako průměrná vstupní a průměrná výstupní byla použita hodnota D_{50} dopočtená ze síťové analýzy vzorku na vstupu a vzorku na výstupu.

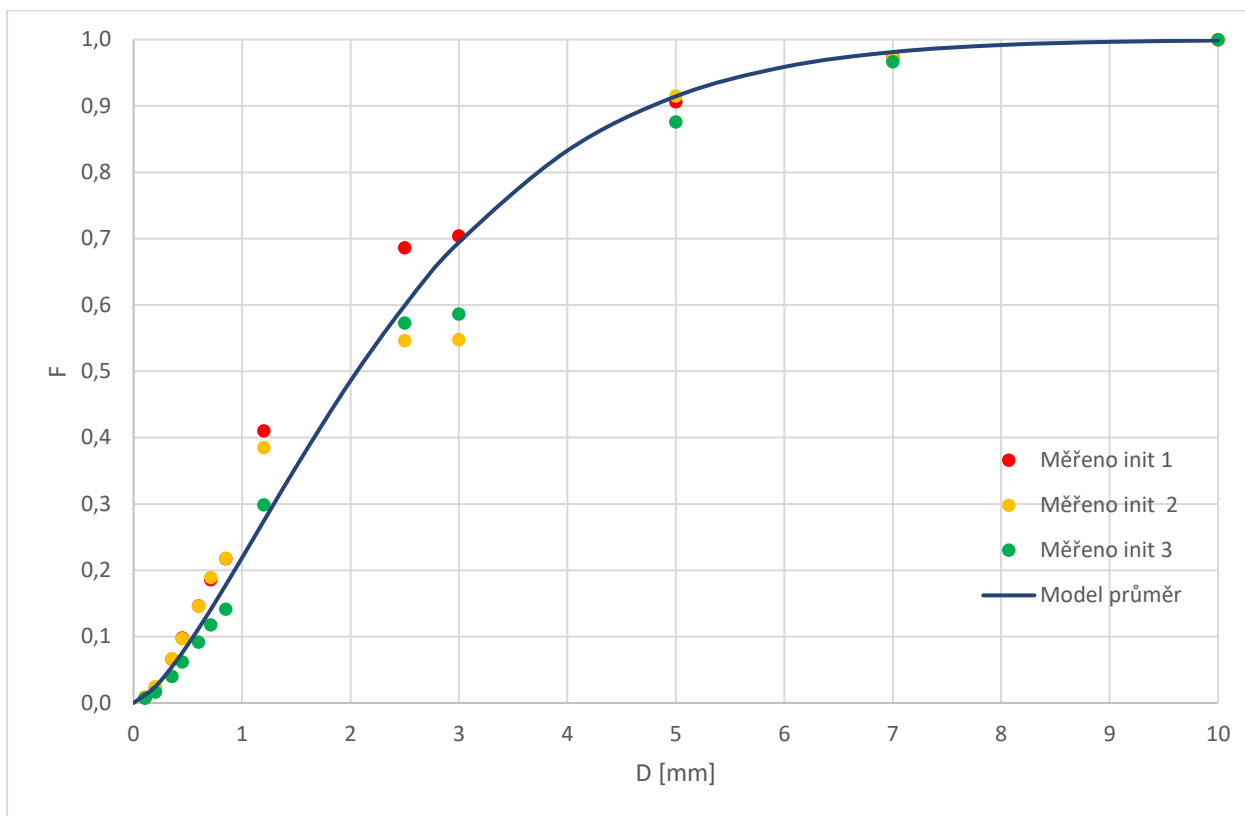
$$e = C_R \left[\frac{1}{D_{out}} - \frac{1}{D_{in}} \right] \quad (2)$$

Pro určení konstanty C_R byla pro každý pokus vypočtena hodnota $\left[\frac{1}{D_{out}} - \frac{1}{D_{in}} \right]$ a byl vytvořen graf ze všech mlecích pokusů pro lineární rotor a přirozený vzorek, kde byla vynášena závislost měrné rozpojovací energie na hodnotě $\left[\frac{1}{D_{out}} - \frac{1}{D_{in}} \right]$ a tato závislost byla v Excelu proložena přímkou a z rovnice přímky odečtena hodnota C_R . Tím se získala konstanta C_R . To samé se opakovalo s využitím údajů pro lineární rotor a suchý vzorek, dále pro šroubovicový rotor a přirozený vzorek, a nakonec pro šroubovicový rotor a suchý vzorek.

5.2 Vyhodnocení distribuce částic při jednotlivých experimentech

5.2.1 Vstupní vzorek

Vstupní vzorek byl všude stejný, tedy předemletý lineárním rotorem se sítím 10 mm při 3000 rpm. Pro zpřesnění výsledků síťové analýzy bylo provedeno měření 3 vzorků a výsledky byly potom zprůměrovány. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu, vykreslený RRSB model vychází z průměrné hodnoty n a \bar{D} .



Obrázek 27 Graf distribuce velikosti částic vstupního předemletého vzork

Parametry RRSB modelu jsou zde:

měření	1	2	3	průměr
n	1,440	1,365	1,479	1,428
\bar{D} [mm]	2,407	2,632	2,949	2,663

Tabulka 6 Parametry RRSB modelu vstupní vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Před mletím 1		Před mletím 2		Před mletím 3		průměr před mletím	
D10init	0,504 mm	D10init	0,506 mm	D10init	0,644 mm	0,552 mm	
D16init	0,715 mm	D16init	0,732 mm	D16init	0,906 mm	0,784 mm	
D50init	1,866 mm	D50init	2,012 mm	D50init	2,302 mm	2,060 mm	
D84init	3,666 mm	D84init	4,102 mm	D84init	4,441 mm	4,070 mm	
D90init	4,297 mm	D90init	4,848 mm	D90init	5,183 mm	4,776 mm	
D90-D10	3,792 mm	D90-D10	4,342 mm	D90-D10	4,538 mm	4,224 mm	

Tabulka 7 Parametry velikosti částic vstupní

5.2.2 Rozbor vzorků

V této kapitole budou ukázány výsledky rozboru štěpky, na kterých bude patrné, jaký je rozdíl mezi přirozenou vlhkostí štěpky a suchým vzorkem ze sušárny. Zároveň bude vidět i obsah anorganické složky (popela) a organické složky (hořlaviny) ve štěpce. Obsah anorganické a organické složky není ve všech vzorcích úplně stejný, protože část štěpky obsahuje více bukové kůry a část je téměř bez kůry. Výsledky vyhodnocení přirozeného vzorku ukazuje následující tabulka. Procentuální podíl je vztažen ke hmotnosti přirozeného vzorku.

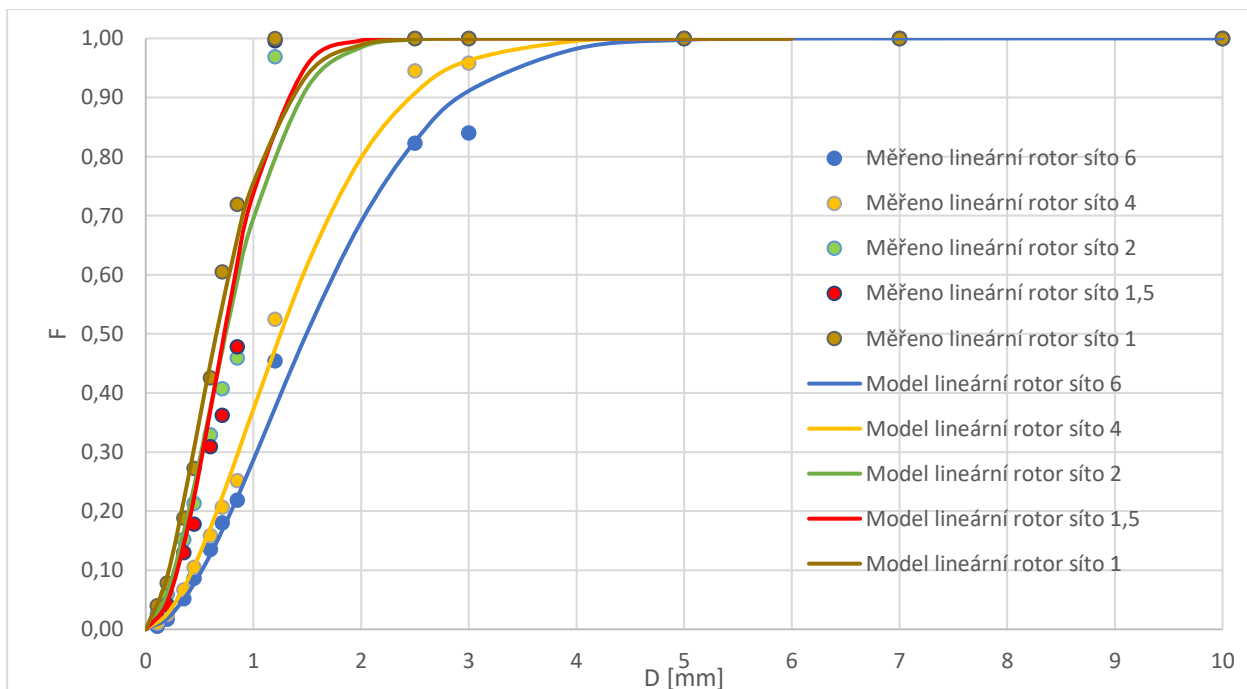
prázdné misky hmotnost [g]	miska+vzorek hmotnost [g]	hmotnost po sušení [g]	hmotnost po vyžhání [g]	vlhkost [%]	organická sušina [%]	popeloviny [%]
51,335	74,793	72,953	51,928	7,844	89,628	2,528
57,12	77,993	76,358	58,053	7,833	87,697	4,470
59,52	77,128	75,774	60,064	7,690	89,221	3,090

Tabulka 8 Rozbor vzorků štěpky

Po vysušení se podařilo dosáhnout vlhkosti vzorku 0 %. To bylo ověřeno tak, že se dala malá miska se vzorkem z exsikátoru do sušárny, předtím se zvážila a po 18 h v sušárně bylo sledováno, zda se mění hmotnost. Na počátku mletí byla tedy vlhkost vzorku 0 %. Během mletí však vzorek silně navlhal, snažil se do sebe adsorbovat vzdušnou vlhkost na rovnováhu s okolním vzduchem. Tím, že je struktura štěpky silně mechanicky narušená a částice po mletí mají velkou plochu, může docházet k velmi rychlému navlhání. Zhruba po 30 min práce se vzorkem, což bylo během mletí běžné, štěpka navlhne na 2,7 % vlhkosti. To bylo zjištěno odběrem vzorku, jeho zvážením a následným vysušením po dobu 18 h a opětovným zvážením. Označení suchý vzorek znamená tedy v této práci vzorek, který byl na počátku vysušený na 0 % vlhkost a během mletí postupně jeho vlhkost rostla až na 2,7 %. Přirozený vzorek měl vlhkost po celou dobu přibližně 7,8 %.

5.2.3 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 5 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5 a 1 mm, mletí se sítím 0,75 se nedařilo, vlivem nízké odstředivé síly a nižší intenzity a rychlosti rozpojení se mlýn neustále ucpával. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 28 Graf distribuce velikosti částic mletí lineární rotor 500 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1
n	1,793	1,778	1,816	2,082	1,679
\bar{D}	1,832	1,536	0,909	0,869	0,815

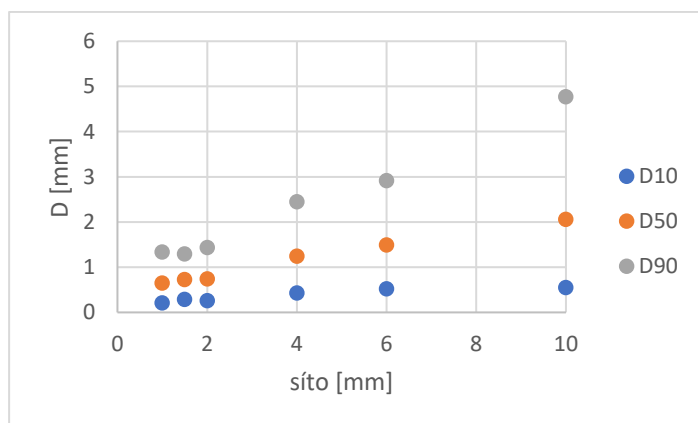
Tabulka 9 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 500 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Lineární rotor síto 6 mm			Lineární rotor síto 4 mm			Lineární rotor síto 2 mm			Lineární rotor síto 1,5 mm			Lineární rotor síto 1 mm		
D10fin6	0,522	mm	D10fin4	0,433	mm	D10fin2	0,263	mm	D10fin1,5	0,295	mm	D10fin1	0,213	mm
D16fin6	0,691	mm	D16fin4	0,575	mm	D16fin2	0,347	mm	D16fin1,5	0,375	mm	D16fin1	0,288	mm
D50fin6	1,493	mm	D50fin4	1,250	mm	D50fin2	0,743	mm	D50fin1,5	0,728	mm	D50fin1	0,655	mm
D84fin6	2,568	mm	D84fin4	2,159	mm	D84fin2	1,269	mm	D84fin1,5	1,162	mm	D84fin1	1,169	mm
D90fin6	2,917	mm	D90fin4	2,455	mm	D90fin2	1,439	mm	D90fin1,5	1,297	mm	D90fin1	1,339	mm
D90-D10	2,395	mm	D90-D10	2,022	mm	D90-D10	1,175	mm	D90-D10	1,002	mm	D90-D10	1,126	mm

Tabulka 10 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 500 rpm

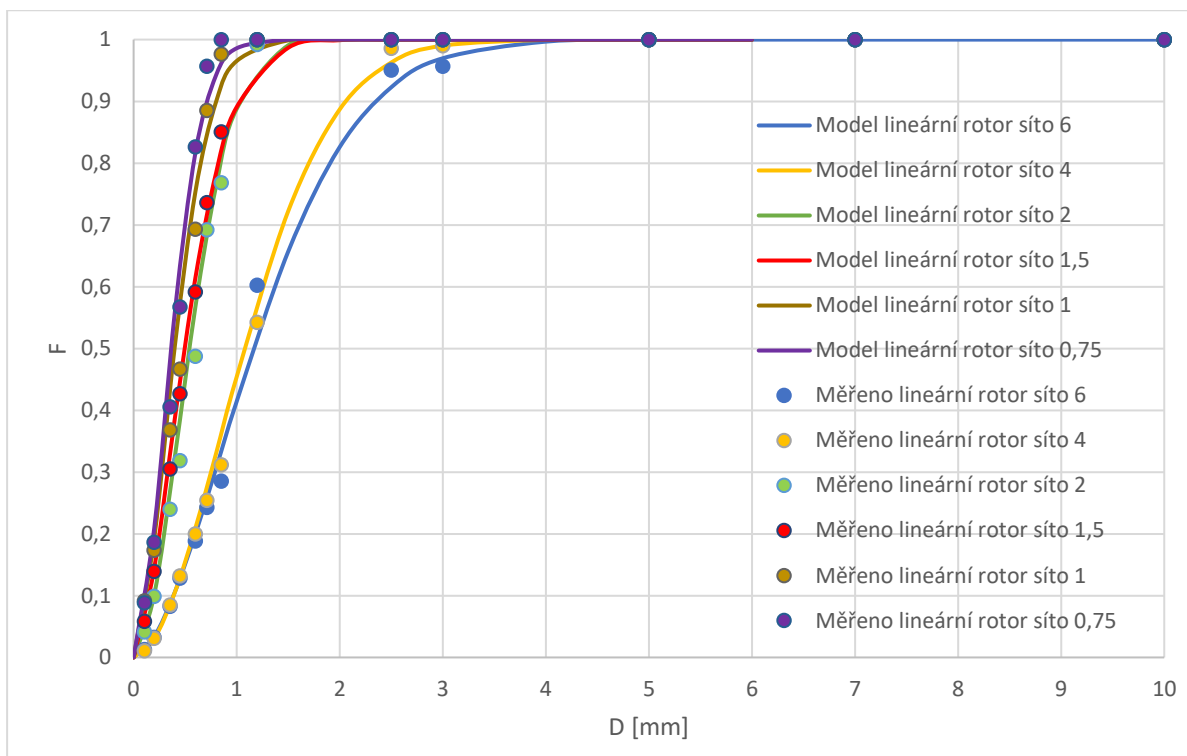
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 29 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 500 rpm

5.2.4 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 1500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 30 Graf distribuce částic mletí lineární rotor 1500 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1	0,75
n	1,710	1,849	1,876	1,649	1,711	1,802
\bar{D}	1,442	1,312	0,659	0,617	0,492	0,447

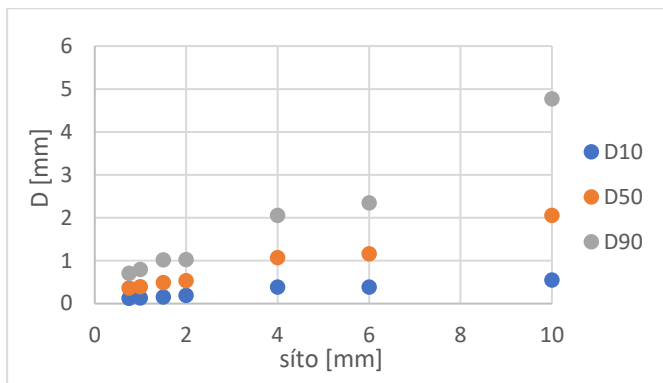
Tabulka 11 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 1500 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Lineární rotor síto 6 mm			Lineární rotor síto 4 mm			Lineární rotor síto 2 mm			Lineární rotor síto 1,5 mm			Lineární rotor síto 1 mm			Lineární rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,387	mm	D10fin4	0,389	mm	D10fin2	0,198	mm	D10fin1,5	0,158	mm	D10fin1	0,132	mm	D10fin0,75	0,128	mm
D16fin6	0,519	mm	D16fin4	0,510	mm	D16fin2	0,260	mm	D16fin1,5	0,214	mm	D16fin1	0,177	mm	D16fin0,75	0,170	mm
D50fin6	1,164	mm	D50fin4	1,076	mm	D50fin2	0,542	mm	D50fin1,5	0,494	mm	D50fin1	0,397	mm	D50fin0,75	0,365	mm
D84fin6	2,055	mm	D84fin4	1,820	mm	D84fin2	0,910	mm	D84fin1,5	0,892	mm	D84fin1	0,701	mm	D84fin0,75	0,626	mm
D90fin6	2,349	mm	D90fin4	2,060	mm	D90fin2	1,028	mm	D90fin1,5	1,024	mm	D90fin1	0,802	mm	D90fin0,75	0,710	mm
D90-D10	1,962	mm	D90-D10	1,671	mm	D90-D10	0,829	mm	D90-D10	0,866	mm	D90-D10	0,669	mm	D90-D10	0,582	mm

Tabulka 12 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 1500 rpm

Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.

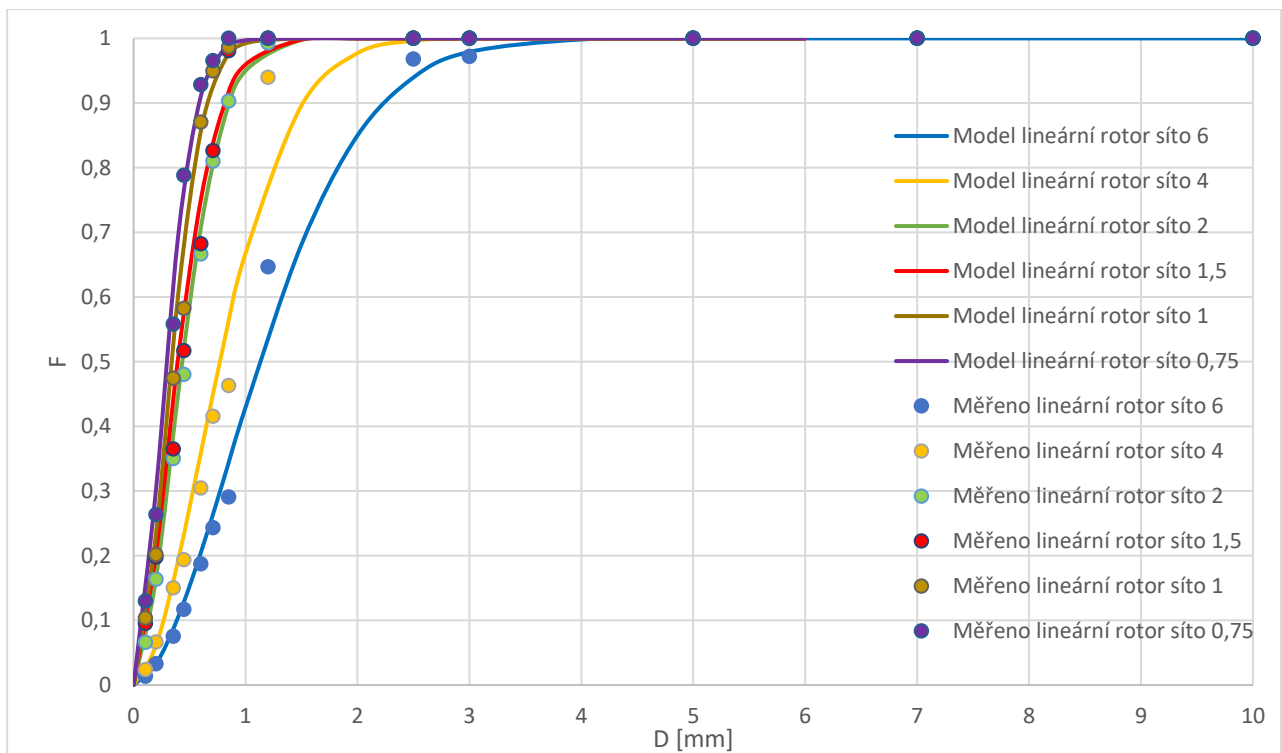


Obrázek 31 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 1500 rpm

Distribuci částic pro měření i pro RRSB model jsem vykreslil do grafu.

5.2.5 Mletí lineární rotor přirozená vlhkost 3000 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 32 Graf distribuce částic mletí lineární rotor 3000 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1	0,75
n	1,757	1,778	1,748	1,643	1,804	1,732
\bar{D}	1,390	0,947	0,534	0,492	0,416	0,361

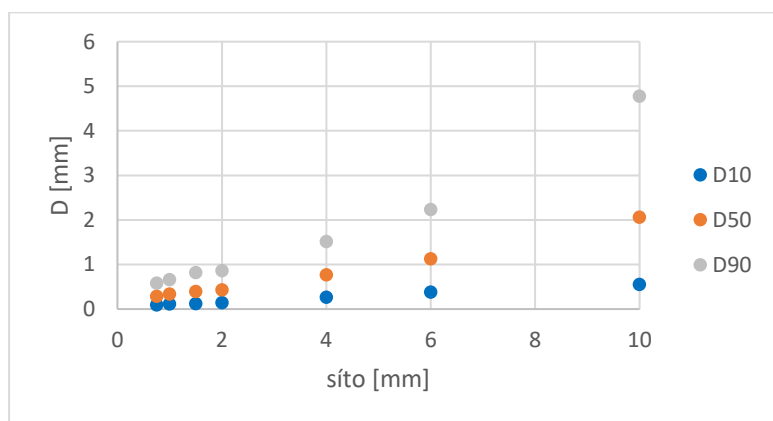
Tabulka 13 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 3000 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Lineární rotor síto 6 mm			Lineární rotor síto 4 mm			Lineární rotor síto 2 mm			Lineární rotor síto 1,5 mm			Lineární rotor síto 1 mm			Lineární rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,38	6 mm	D10fin4	0,26	7 m	D10fin2	0,14	7 mm	D10fin1,5	0,12	5 m	D10fin1	0,11	9 m	D10fin0,75	0,09	8 m
D16fin6	0,51	4 mm	D16fin4	0,35	5 m	D16fin2	0,19	7 mm	D16fin1,5	0,17	0 m	D16fin1	0,15	8 m	D16fin0,75	0,13	2 m
D50fin6	1,12	8 mm	D50fin4	0,77	1 m	D50fin2	0,43	3 mm	D50fin1,5	0,39	4 m	D50fin1	0,33	9 m	D50fin0,75	0,29	2 m
D84fin6	1,96	2 mm	D84fin4	1,33	2 m	D84fin2	0,75	5 mm	D84fin1,5	0,71	1 m	D84fin1	0,58	2 m	D84fin0,75	0,51	2 m
D90fin6	2,23	4 mm	D90fin4	1,51	4 m	D90fin2	0,86	1 mm	D90fin1,5	0,81	7 m	D90fin1	0,66	0 m	D90fin0,75	0,58	4 m
D90-D10	1,84	8 mm	D90-D10	1,24	7 m	D90-D10	0,71	3 mm	D90-D10	0,69	2 m	D90-D10	0,54	1 m	D90-D10	0,48	6 m

Tabulka 14 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 3000 rpm

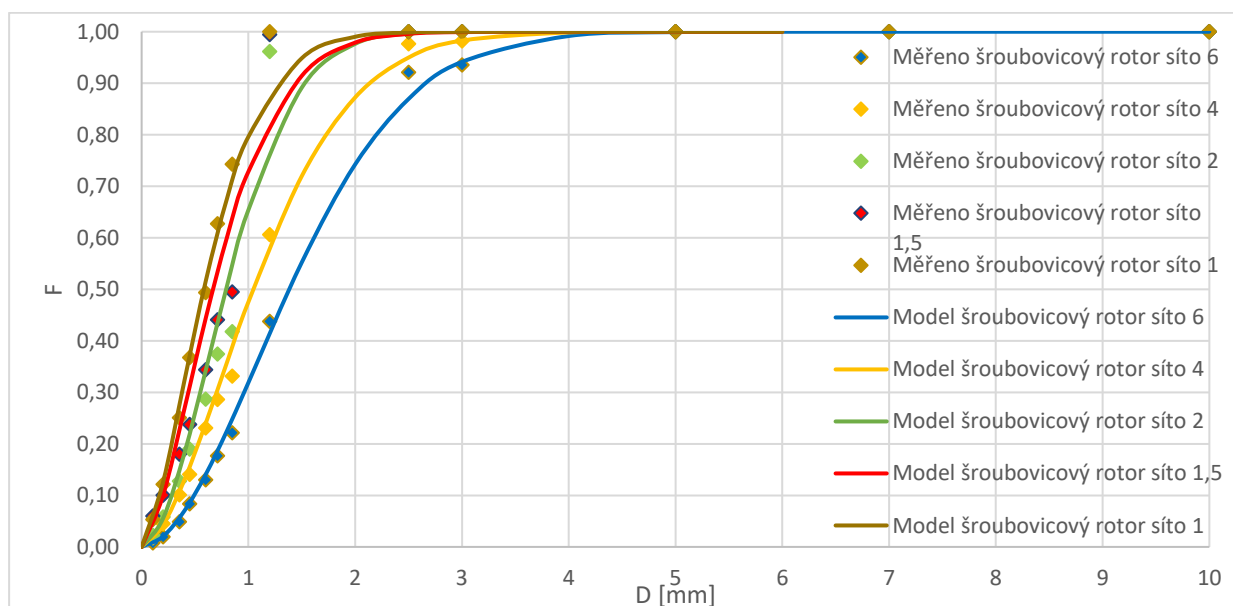
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 33 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 3000 rpm

5.2.6 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 5 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5 a 1 mm, mletí se sítem 0,75 se nedařilo, vlivem nízké odstředivé síly a nižší intenzity a rychlosti rozpojení se mlýn neustále ucpával. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 34 Graf distribuce částic mletí šroubovicový rotor 500 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1
n	1,820	1,675	1,820	1,564	1,538
\bar{D}	1,691	1,299	0,968	0,844	0,740

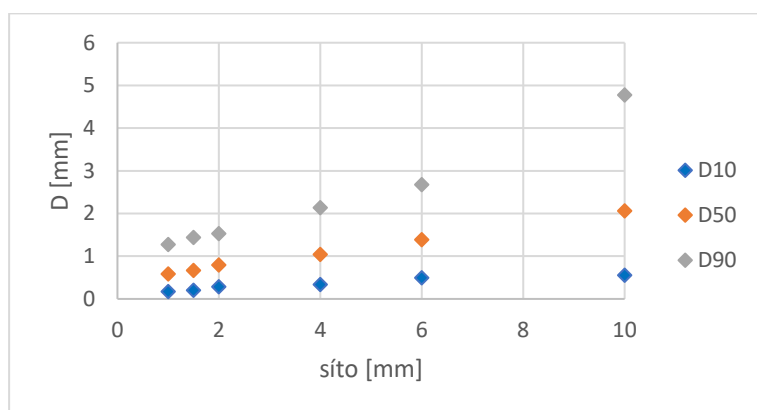
Tabulka 15 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 500 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm		
D10fin6	0,491	mm	D10fin4	0,339	mm	D10fin2	0,281	mm	D10fin1,5	0,200	mm	D10fin1	0,171	mm
D16fin6	0,648	mm	D16fin4	0,458	mm	D16fin2	0,371	mm	D16fin1,5	0,276	mm	D16fin1	0,238	mm
D50fin6	1,383	mm	D50fin4	1,044	mm	D50fin2	0,791	mm	D50fin1,5	0,668	mm	D50fin1	0,583	mm
D84fin6	2,359	mm	D84fin4	1,865	mm	D84fin2	1,350	mm	D84fin1,5	1,243	mm	D84fin1	1,096	mm
D90fin6	2,674	mm	D90fin4	2,138	mm	D90fin2	1,530	mm	D90fin1,5	1,439	mm	D90fin1	1,272	mm
D90-D10	2,183	mm	D90-D10	1,799	mm	D90-D10	1,249	mm	D90-D10	1,239	mm	D90-D10	1,101	mm

Tabulka 16 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 500 rpm

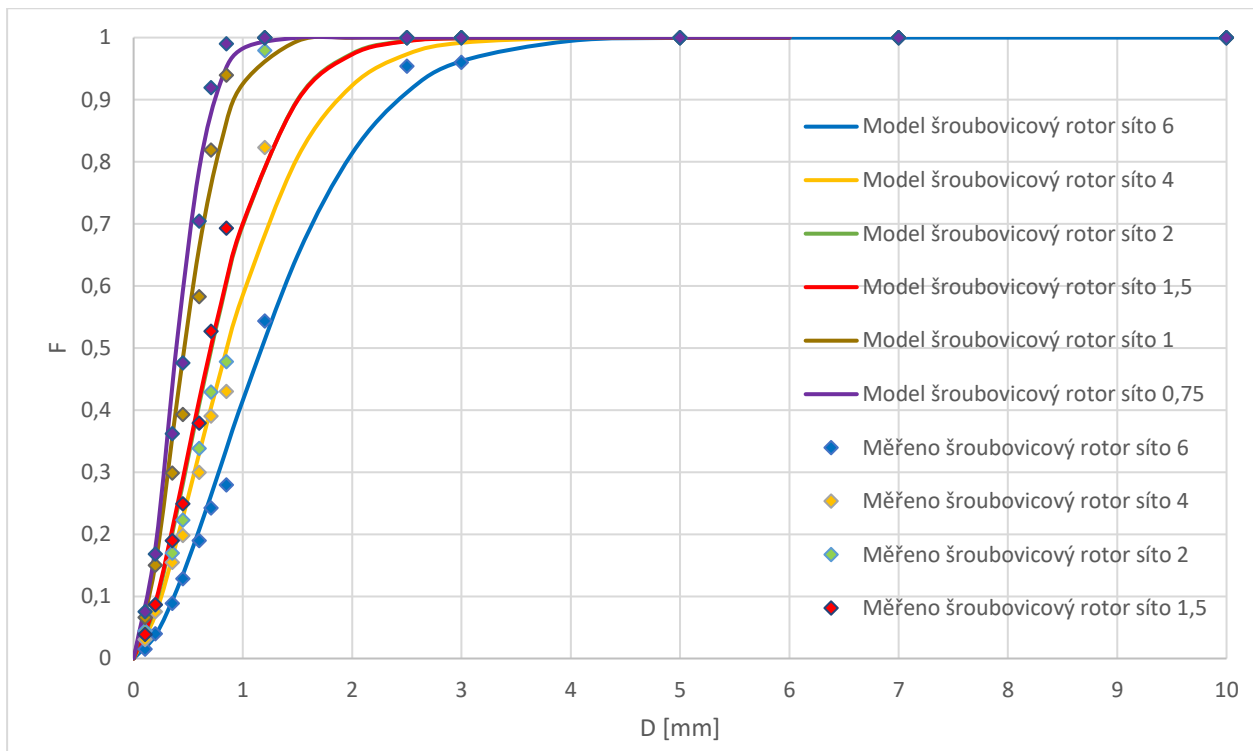
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 35 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí šroubovicový rotor 500 rpm

5.2.7 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 1500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 36 Graf distribuce velikosti částic mletí šroubovicový rotor 1500 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1	0,75
n	1,643	1,541	1,612	1,580	1,712	1,879
\bar{D}	1,458	1,086	0,894	0,888	0,572	0,475

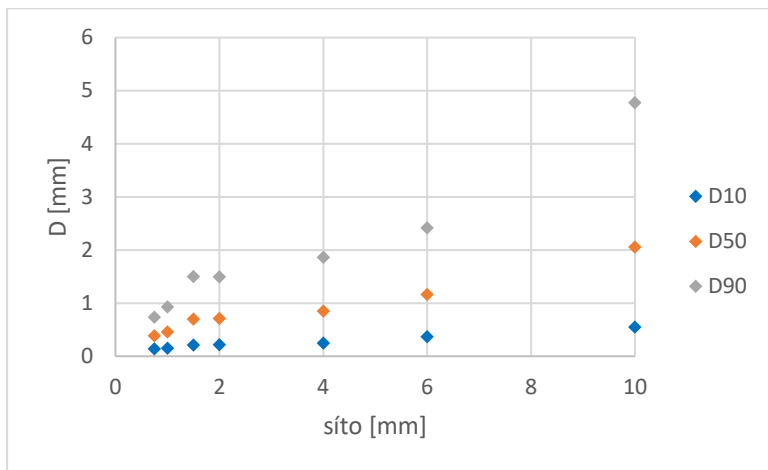
Tabulka 17 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 1500 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm			Šroubovicový rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,371	mm	D10fin4	0,252	mm	D10fin2	0,221	mm	D10fin1,5	0,214	mm	D10fin1	0,154	mm	D10fin0,75	0,143	mm
D16fin6	0,504	mm	D16fin4	0,350	mm	D16fin2	0,303	mm	D16fin1,5	0,294	mm	D16fin1	0,206	mm	D16fin0,75	0,188	mm
D50fin6	1,167	mm	D50fin4	0,856	mm	D50fin2	0,712	mm	D50fin1,5	0,704	mm	D50fin1	0,462	mm	D50fin0,75	0,391	mm
D84fin6	2,108	mm	D84fin4	1,609	mm	D84fin2	1,302	mm	D84fin1,5	1,303	mm	D84fin1	0,815	mm	D84fin0,75	0,656	mm
D90fin6	2,423	mm	D90fin4	1,865	mm	D90fin2	1,500	mm	D90fin1,5	1,505	mm	D90fin1	0,932	mm	D90fin0,75	0,740	mm
D90-D10	2,052	mm	D90-D10	1,613	mm	D90-D10	1,278	mm	D90-D10	1,291	mm	D90-D10	0,778	mm	D90-D10	0,597	mm

Tabulka 18 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 1500 rpm

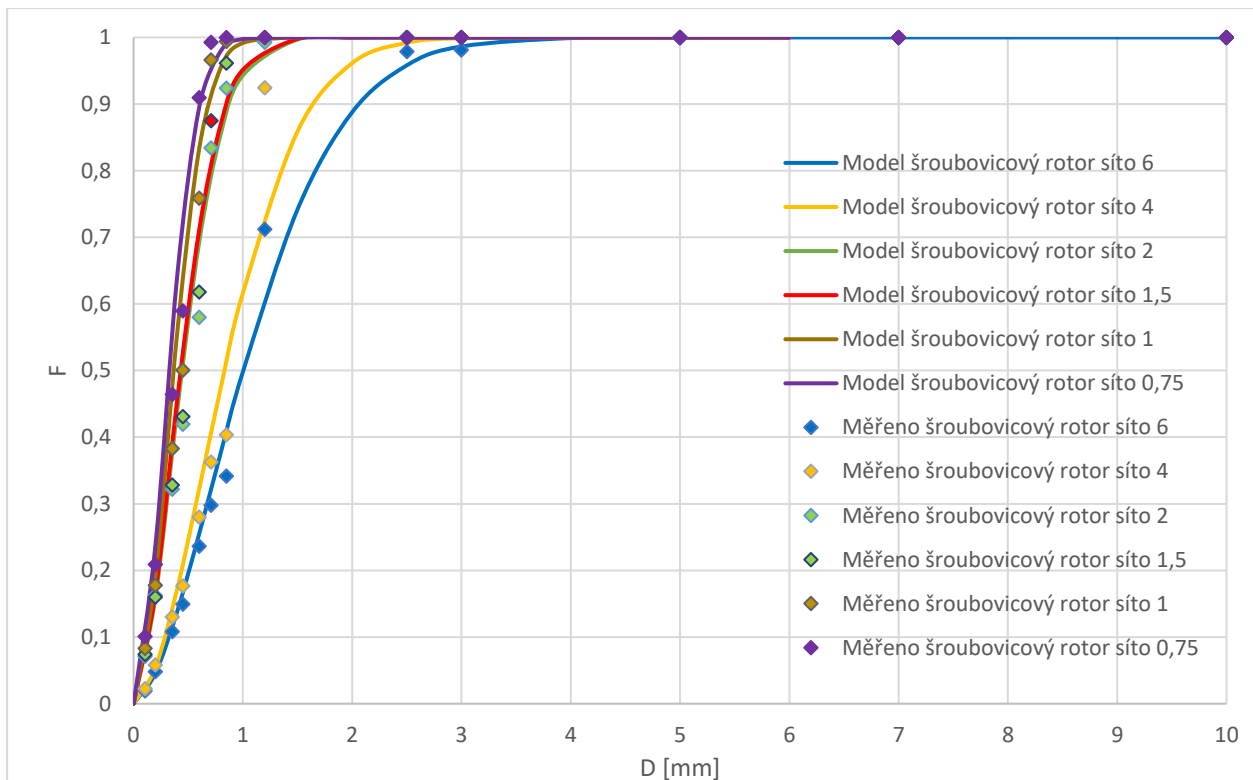
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 37 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí šroubovicový rotor 1500 rpm

5.2.8 Mletí šroubovicový rotor přirozená vlhkost 3000 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 38 Graf distribuce velikosti částic mletí šroubovicový rotor 3000 rpm

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1	0,75
n	1,666	1,765	1,738	1,742	1,930	1,925
\bar{D}	1,250	1,024	0,546	0,530	0,444	0,393

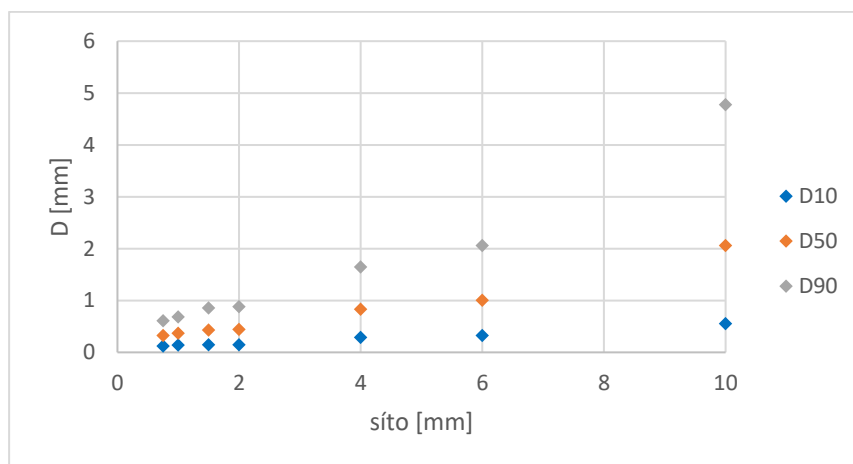
Tabulka 19 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 3000 rpm

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm			Šroubovicový rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,324	mm	D10fin4	0,286	mm	D10fin2	0,149	mm	D10fin1,5	0,146	mm	D10fin1	0,138	mm	D10fin0,75	0,122	mm
D16fin6	0,438	mm	D16fin4	0,381	mm	D16fin2	0,200	mm	D16fin1,5	0,194	mm	D16fin1	0,180	mm	D16fin0,75	0,159	mm
D50fin6	1,003	mm	D50fin4	0,832	mm	D50fin2	0,442	mm	D50fin1,5	0,429	mm	D50fin1	0,367	mm	D50fin0,75	0,325	mm
D84fin6	1,798	mm	D84fin4	1,444	mm	D84fin2	0,773	mm	D84fin1,5	0,750	mm	D84fin1	0,608	mm	D84fin0,75	0,539	mm
D90fin6	2,063	mm	D90fin4	1,644	mm	D90fin2	0,882	mm	D90fin1,5	0,855	mm	D90fin1	0,684	mm	D90fin0,75	0,607	mm
D90-D10	1,739	mm	D90-D10	1,357	mm	D90-D10	0,732	mm	D90-D10	0,710	mm	D90-D10	0,546	mm	D90-D10	0,484	mm

Tabulka 20 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 3000 rpm

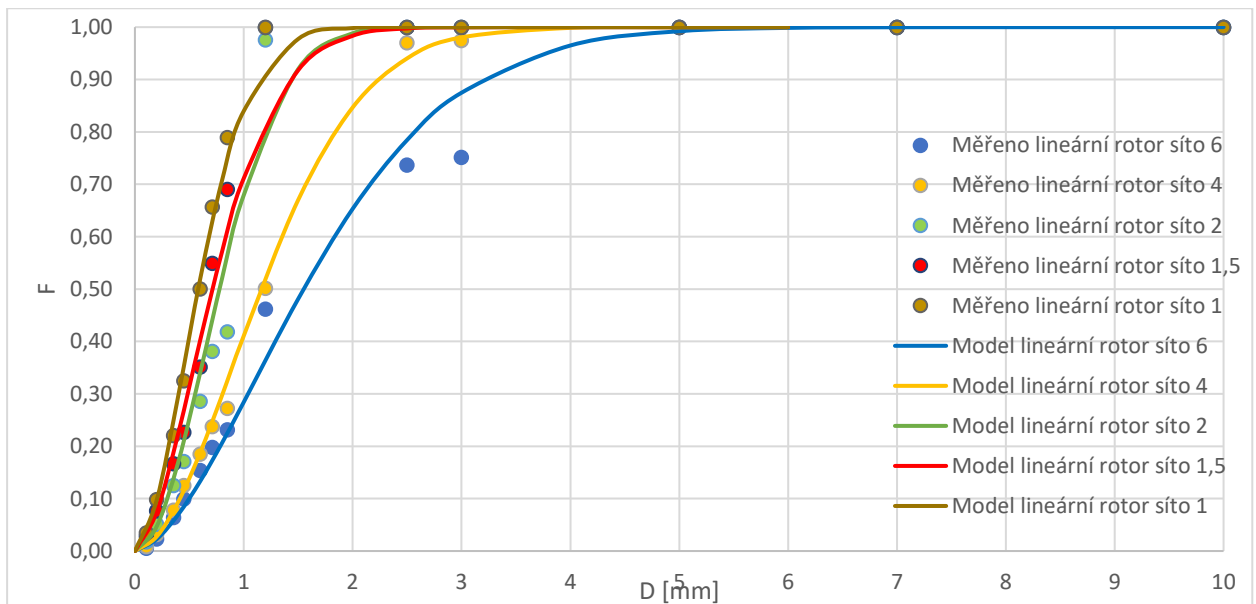
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 39 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí šroubovicový rotor 3000 rpm

5.2.9 Mletí lineární rotor suchý vzorek 500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 5 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5 a 1 mm, mletí se sítem 0,75 se nedařilo, vlivem nízké odstředivé síly a nižší intenzity a rychlosti rozpojení se mlýn neustále ucpával. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 40 Graf distribuce velikosti částic mletí lineární rotor 500 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

síto	6	4	2	1,5	1
N	1,662	1,825	1,966	1,722	1,793
\bar{D}	1,932	1,417	0,936	0,881	0,713

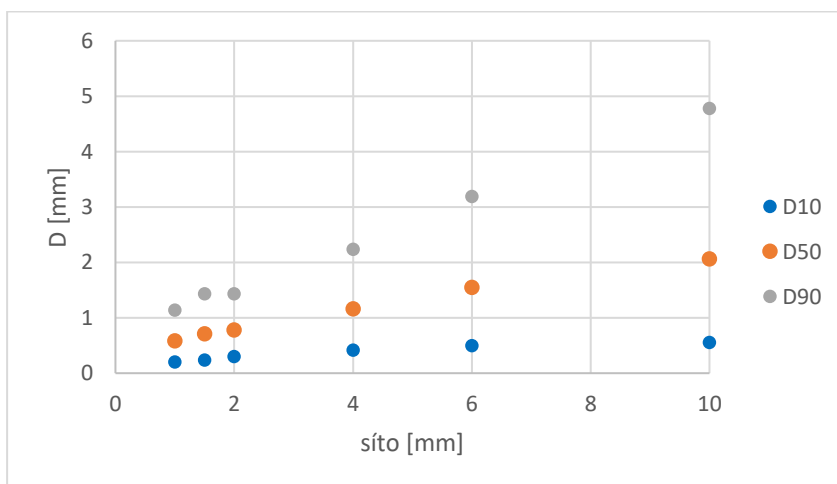
Tabulka 21 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 500 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

	Lineární rotor síto 6 mm		Lineární rotor síto 4 mm		Lineární rotor síto 2 mm		Lineární rotor síto 1,5 mm		Lineární rotor síto 1 mm					
D10fin6	0,499	mm	D10fin4	0,413	mm	D10fin2	0,298	mm	D10fin1,5	0,239	mm	D10fin1	0,203	mm
D16fin6	0,676	mm	D16fin4	0,544	mm	D16fin2	0,385	mm	D16fin1,5	0,320	mm	D16fin1	0,269	mm
D50fin6	1,550	mm	D50fin4	1,159	mm	D50fin2	0,777	mm	D50fin1,5	0,712	mm	D50fin1	0,581	mm
D84fin6	2,782	mm	D84fin4	1,975	mm	D84fin2	1,274	mm	D84fin1,5	1,253	mm	D84fin1	1,000	mm
D90fin6	3,191	mm	D90fin4	2,238	mm	D90fin2	1,431	mm	D90fin1,5	1,430	mm	D90fin1	1,136	mm
D90-D10	2,692	mm	D90-D10	1,825	mm	D90-D10	1,133	mm	D90-D10	1,192	mm	D90-D10	0,933	mm

Tabulka 22 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 500 rpm suchý vzorek

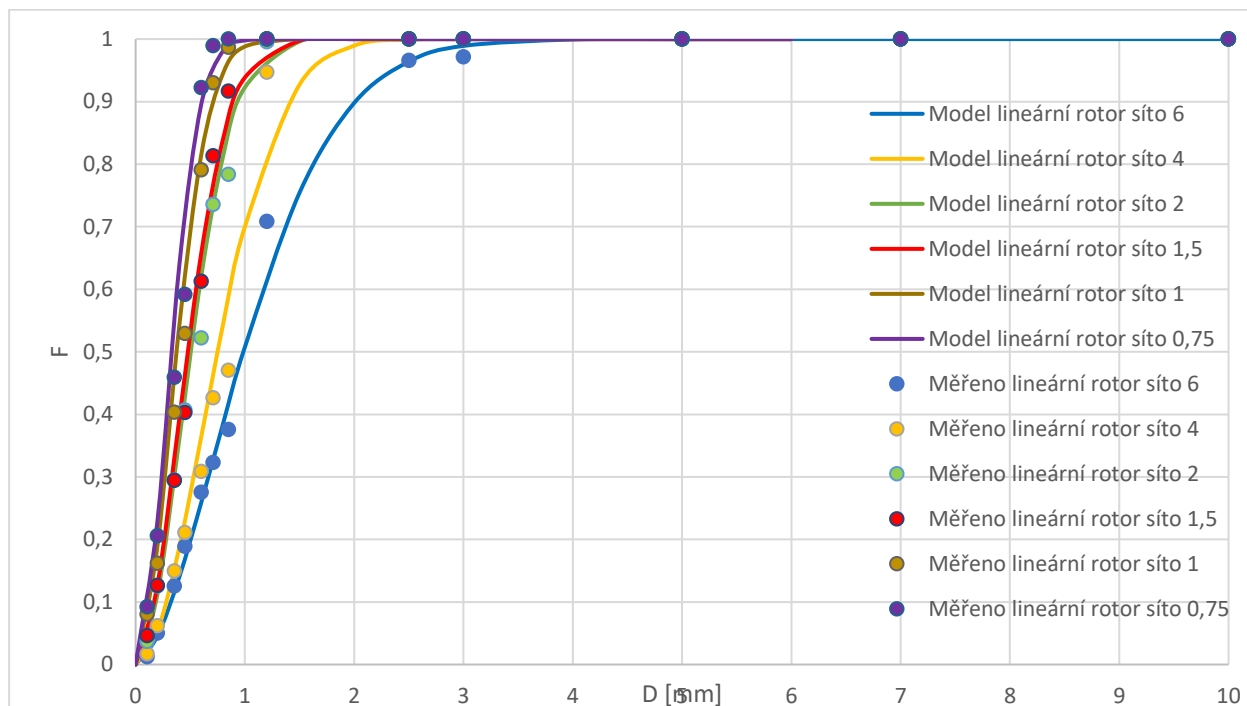
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 41 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 500 rpm suchý vzorek

5.2.10 Mletí lineární rotor suchý vzorek 1500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 42 Graf distribuce velikosti částic mletí lineární rotor 1500 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

Síto	6	4	2	1,5	1	0,75
n	1,687	1,918	1,905	1,875	1,893	1,964
\bar{D}	1,227	0,908	0,610	0,579	0,456	0,397

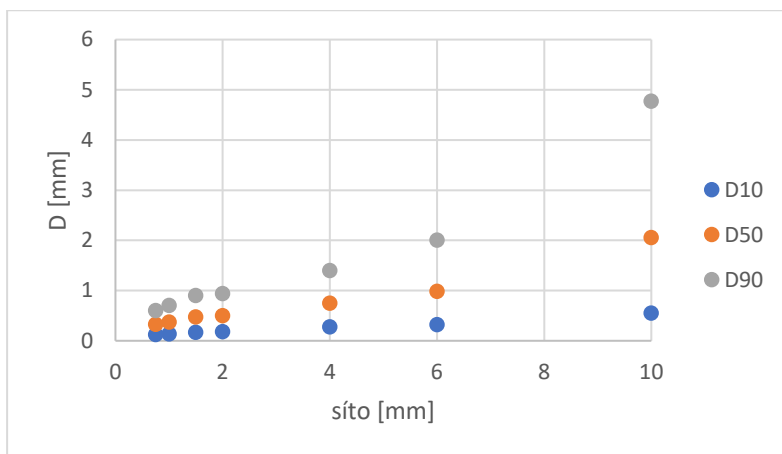
Tabulka 23 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 1500 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Lineární rotor síto 6 mm			Lineární rotor síto 4 mm			Lineární rotor síto 2 mm			Lineární rotor síto 1,5 mm			Lineární rotor síto 1 mm			Lineární rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,323	mm	D10fin4	0,281	mm	D10fin2	0,187	mm	D10fin1,5	0,174	mm	D10fin1	0,139	mm	D10fin0,75	0,126	mm
D16fin6	0,436	mm	D16fin4	0,365	mm	D16fin2	0,244	mm	D16fin1,5	0,228	mm	D16fin1	0,181	mm	D16fin0,75	0,163	mm
D50fin6	0,987	mm	D50fin4	0,750	mm	D50fin2	0,504	mm	D50fin1,5	0,476	mm	D50fin1	0,375	mm	D50fin0,75	0,329	mm
D84fin6	1,757	mm	D84fin4	1,245	mm	D84fin2	0,839	mm	D84fin1,5	0,799	mm	D84fin1	0,627	mm	D84fin0,75	0,540	mm
D90fin6	2,011	mm	D90fin4	1,402	mm	D90fin2	0,946	mm	D90fin1,5	0,903	mm	D90fin1	0,708	mm	D90fin0,75	0,606	mm
D90-D10	1,688	mm	D90-D10	1,121	mm	D90-D10	0,759	mm	D90-D10	0,729	mm	D90-D10	0,569	mm	D90-D10	0,480	mm

Tabulka 24 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 1500 rpm suchý vzorek

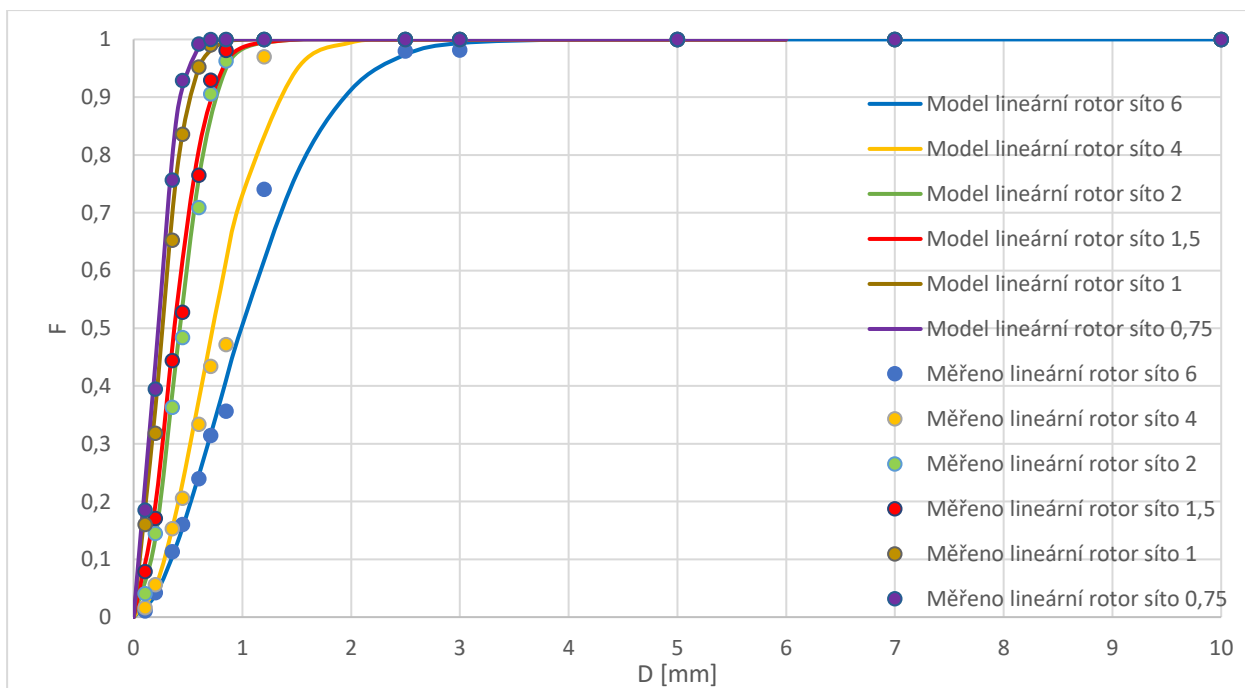
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 43 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 1500 rpm suchý vzorek

5.2.11 Mletí lineární rotor suchý vzorek 3000 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 44 Graf distribuce velikosti částic mletí lineární rotor 3000 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

Síto	6	4	2	1,5	1	0,75
N	1,793	2,001	2,069	1,857	1,732	1,830
\bar{D}	1,216	0,873	0,506	0,457	0,318	0,270

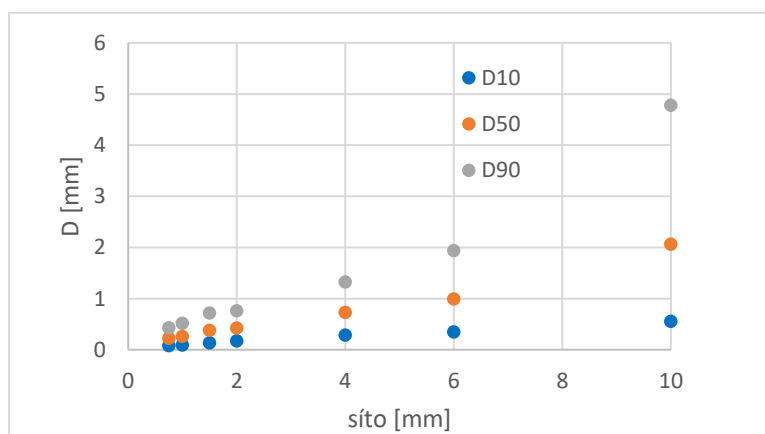
Tabulka 25 Parametry RRSB modelu mletí lineární rotor 3000 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Lineární rotor síto 6 mm			Lineární rotor síto 4 mm			Lineární rotor síto 2 mm			Lineární rotor síto 1,5 mm			Lineární rotor síto 1 mm			Lineární rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,347	mm	D10fin4	0,284	mm	D10fin2	0,170	mm	D10fin1,5	0,136	mm	D10fin1	0,087	mm	D10fin0,75	0,079	mm
D16fin6	0,459	mm	D16fin4	0,365	mm	D16fin2	0,217	mm	D16fin1,5	0,178	mm	D16fin1	0,116	mm	D16fin0,75	0,104	mm
D50fin6	0,991	mm	D50fin4	0,727	mm	D50fin2	0,423	mm	D50fin1,5	0,375	mm	D50fin1	0,257	mm	D50fin0,75	0,221	mm
D84fin6	1,705	mm	D84fin4	1,182	mm	D84fin2	0,678	mm	D84fin1,5	0,633	mm	D84fin1	0,451	mm	D84fin0,75	0,376	mm
D90fin6	1,936	mm	D90fin4	1,324	mm	D90fin2	0,757	mm	D90fin1,5	0,716	mm	D90fin1	0,514	mm	D90fin0,75	0,426	mm
D90-D10	1,589	mm	D90-D10	1,041	mm	D90-D10	0,586	mm	D90-D10	0,580	mm	D90-D10	0,428	mm	D90-D10	0,347	mm

Tabulka 26 Parametry velikosti částic mletí lineární rotor 3000 rpm suchý vzorek

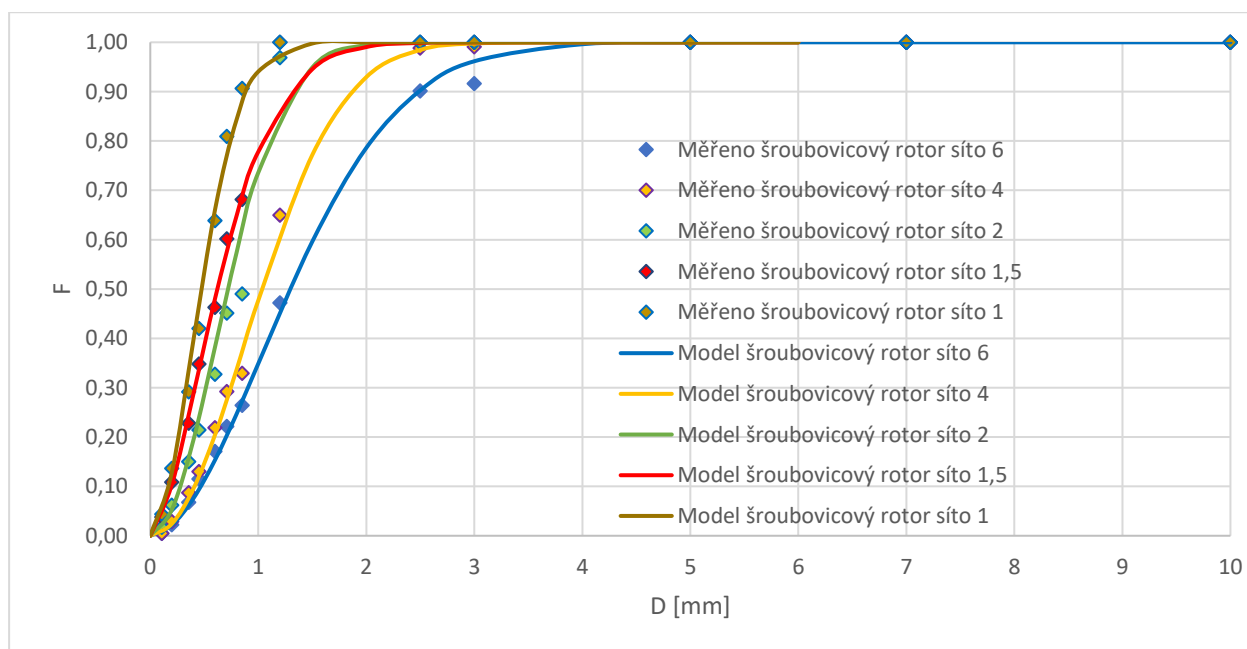
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 45 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí lineární rotor 3000 rpm suchý vzorek

5.2.12 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 5 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5 a 1 mm, mletí se sítem 0,75 se nedařilo, vlivem nízké odstředivé síly a nižší intenzity a rychlosti rozpojení se mlýn neustále ucpával. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 46 Graf distribuce velikosti částic mletí šroubovicový rotor 500 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

Síto	6	4	2	1,5	1
N	1,846	2,033	1,984	1,626	1,876
\bar{D}	1,582	1,238	0,866	0,777	0,575

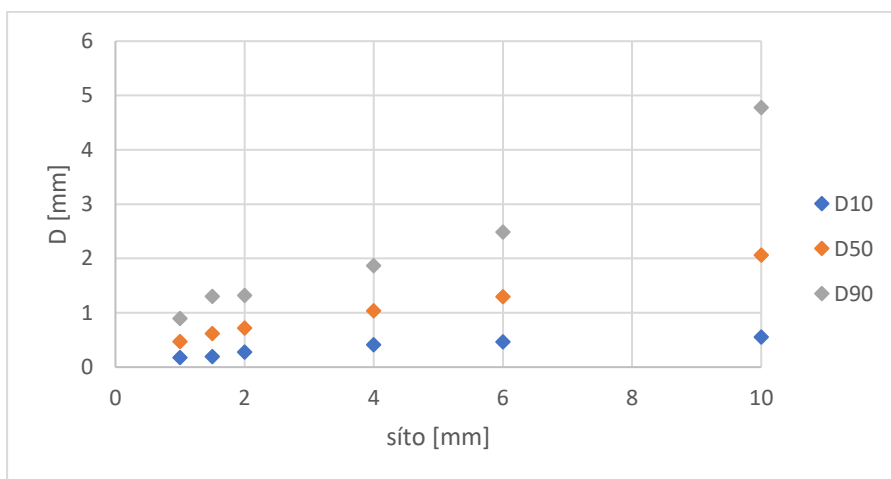
Tabulka 27 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 500 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm		
D10fin6	0,468	mm	D10fin4	0,409	mm	D10fin2	0,278	mm	D10fin1,5	0,195	mm	D10fin1	0,173	mm
D16fin6	0,614	mm	D16fin4	0,524	mm	D16fin2	0,359	mm	D16fin1,5	0,266	mm	D16fin1	0,227	mm
D50fin6	1,297	mm	D50fin4	1,034	mm	D50fin2	0,720	mm	D50fin1,5	0,621	mm	D50fin1	0,473	mm
D84fin6	2,196	mm	D84fin4	1,668	mm	D84fin2	1,175	mm	D84fin1,5	1,128	mm	D84fin1	0,794	mm
D90fin6	2,485	mm	D90fin4	1,866	mm	D90fin2	1,318	mm	D90fin1,5	1,299	mm	D90fin1	0,897	mm
D90-D10	2,017	mm	D90-D10	1,456	mm	D90-D10	1,039	mm	D90-D10	1,104	mm	D90-D10	0,723	mm

Tabulka 28 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 500 rpm suchý vzorek

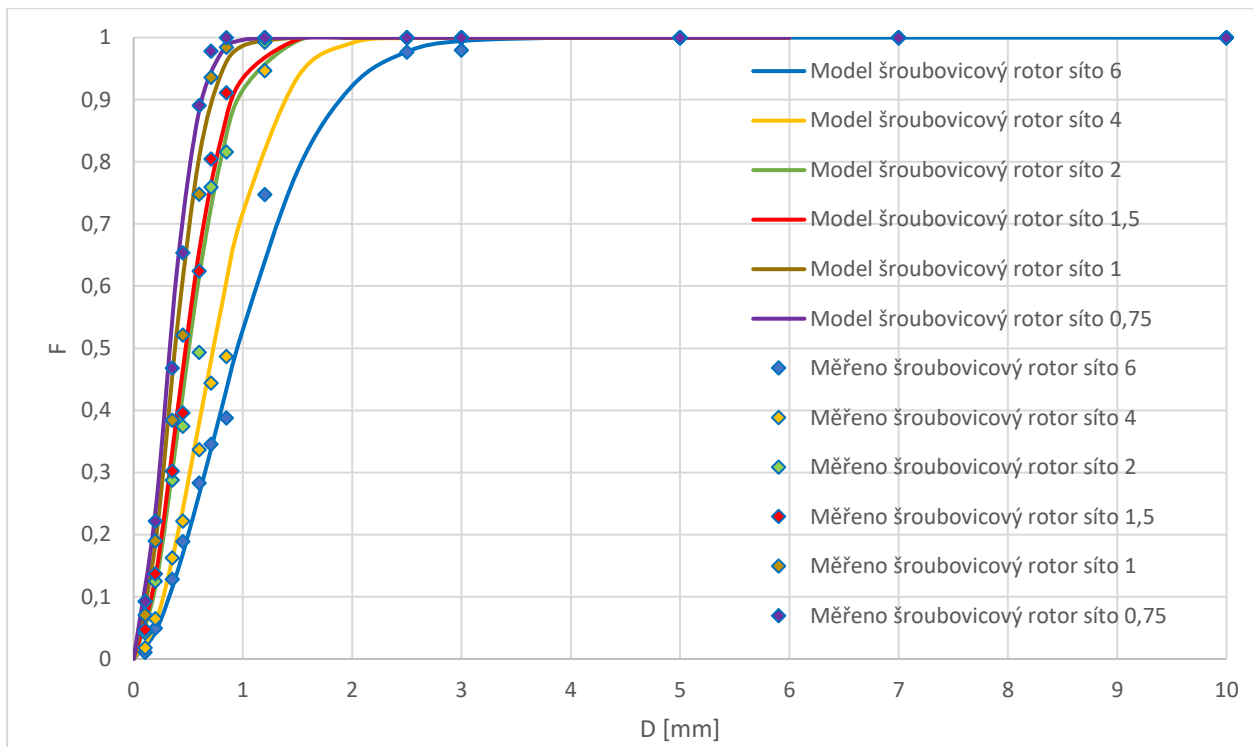
Rozměry D10, D50 a D90 jsem vykreslil do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 47 Graf D90, D50, D10 v závislosti na sítu mletí šroubovicový rotor 500 rpm suchý vzorek

5.2.13 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 1500 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 48 Graf distribuce velikosti částic mletí šroubovicový rotor 1500 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

Síto	6	4	2	1,5	1	0,75
N	1,758	1,910	1,861	1,837	1,891	1,882
\bar{D}	1,173	0,883	0,615	0,579	0,461	0,400

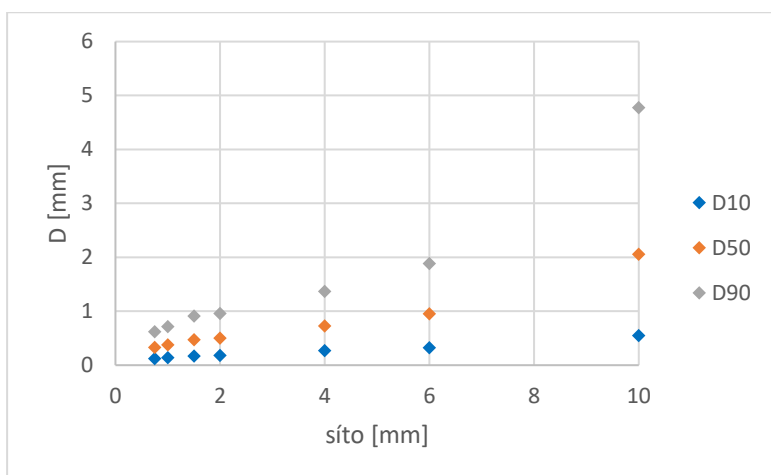
Tabulka 29 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 1500 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm			Šroubovicový rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,326	mm	D10fin4	0,272	mm	D10fin2	0,183	mm	D10fin1,5	0,170	mm	D10fin1	0,140	mm	D10fin0,75	0,121	mm
D16fin6	0,434	mm	D16fin4	0,354	mm	D16fin2	0,240	mm	D16fin1,5	0,224	mm	D16fin1	0,183	mm	D16fin0,75	0,158	mm
D50fin6	0,953	mm	D50fin4	0,729	mm	D50fin2	0,505	mm	D50fin1,5	0,474	mm	D50fin1	0,380	mm	D50fin0,75	0,330	mm
D84fin6	1,656	mm	D84fin4	1,213	mm	D84fin2	0,851	mm	D84fin1,5	0,805	mm	D84fin1	0,635	mm	D84fin0,75	0,552	mm
D90fin6	1,886	mm	D90fin4	1,367	mm	D90fin2	0,962	mm	D90fin1,5	0,911	mm	D90fin1	0,716	mm	D90fin0,75	0,624	mm
D90-D10	1,559	mm	D90-D10	1,095	mm	D90-D10	0,779	mm	D90-D10	0,741	mm	D90-D10	0,576	mm	D90-D10	0,503	mm

Tabulka 30 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 1500 rpm suchý vzorek

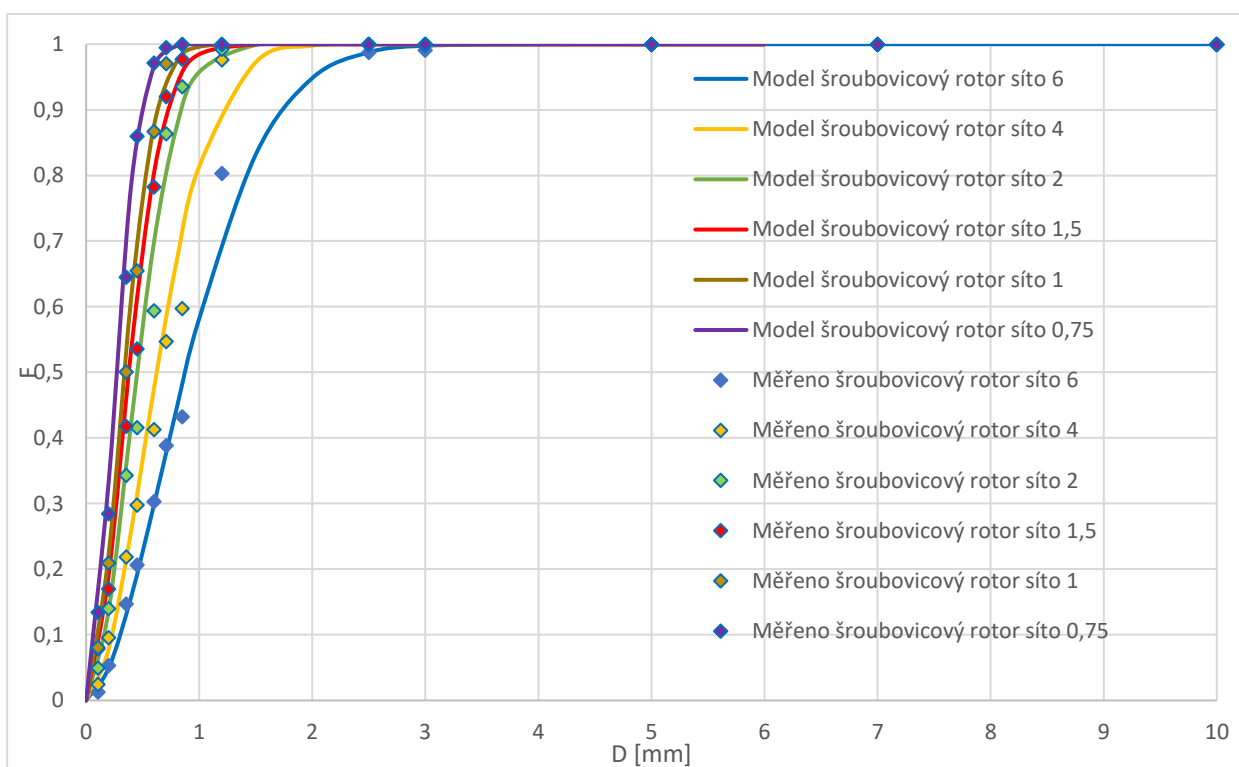
Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



Obrázek 49 Graf D90, D50, D10 mletí šroubovicový rotor 1500 rpm suchý vzorek

5.2.14 Mletí šroubovicový rotor suchý vzorek 3000 rpm

Při tomto mletí vzniklo celkem 6 vzorků pro které byla určována distribuce částic a rozpojovací energie, jsou to vzorky pro síta 6; 4; 2; 1,5; 1 a 0,75 mm. Distribuce částic pro měření i pro RRSB model byla vykreslena do grafu.



Obrázek 50 Graf distribuce velikosti částic mletí šroubovicový rotor 3000 rpm suchý vzorek

Parametry RRSB modelu jsou zde:

Síta	6	4	2	1,5	1	0,75
N	1,765	1,874	1,901	1,847	1,916	1,930
\bar{D}	1,081	0,758	0,546	0,461	0,409	0,319

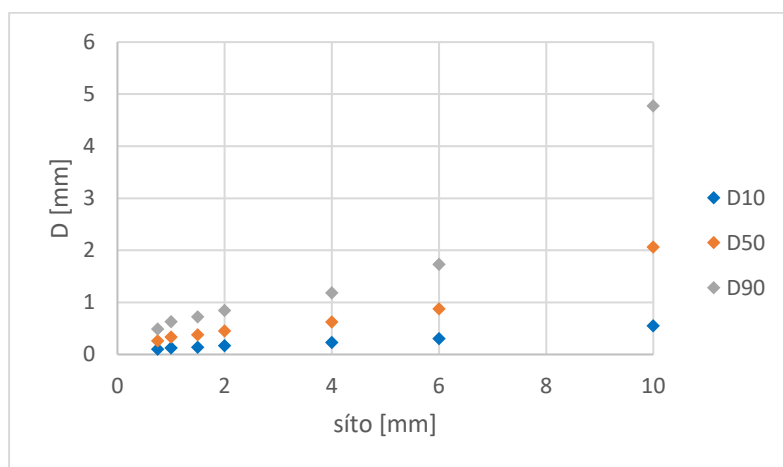
Tabulka 31 Parametry RRSB modelu mletí šroubovicový rotor 3000 rpm suchý vzorek

Parametry velikosti částic jsou v následující tabulce:

Šroubovicový rotor síto 6 mm			Šroubovicový rotor síto 4 mm			Šroubovicový rotor síto 2 mm			Šroubovicový rotor síto 1,5 mm			Šroubovicový rotor síto 1 mm			Šroubovicový rotor síto 0,75 mm		
D10fin6	0,302	mm	D10fin4	0,228	mm	D10fin2	0,167	mm	D10fin1,5	0,136	mm	D10fin1	0,126	mm	D10fin0,75	0,099	mm
D16fin6	0,402	mm	D16fin4	0,299	mm	D16fin2	0,218	mm	D16fin1,5	0,179	mm	D16fin1	0,164	mm	D16fin0,75	0,129	mm
D50fin6	0,878	mm	D50fin4	0,624	mm	D50fin2	0,450	mm	D50fin1,5	0,378	mm	D50fin1	0,338	mm	D50fin0,75	0,264	mm
D84fin6	1,523	mm	D84fin4	1,048	mm	D84fin2	0,751	mm	D84fin1,5	0,640	mm	D84fin1	0,561	mm	D84fin0,75	0,436	mm
D90fin6	1,734	mm	D90fin4	1,183	mm	D90fin2	0,846	mm	D90fin1,5	0,724	mm	D90fin1	0,632	mm	D90fin0,75	0,491	mm
D90-D10	1,432	mm	D90-D10	0,955	mm	D90-D10	0,679	mm	D90-D10	0,588	mm	D90-D10	0,506	mm	D90-D10	0,392	mm

Tabulka 32 Parametry velikosti částic mletí šroubovicový rotor 3000 rpm suchý vzorek

Rozměry D10, D50 a D90 byly vykresleny do grafu v závislosti na sítu.



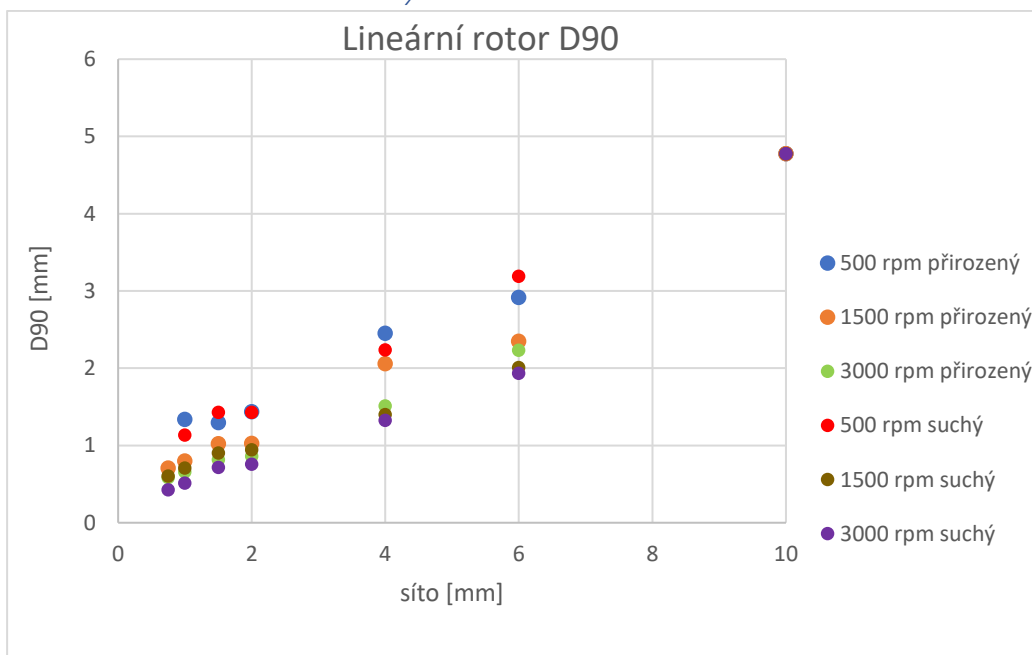
Obrázek 51 Graf D90, D50, D10 mletí šroubovicový rotor 3000 rpm suchý vzorek

5.3 Porovnání velikosti částic mezi jednotlivými experimenty

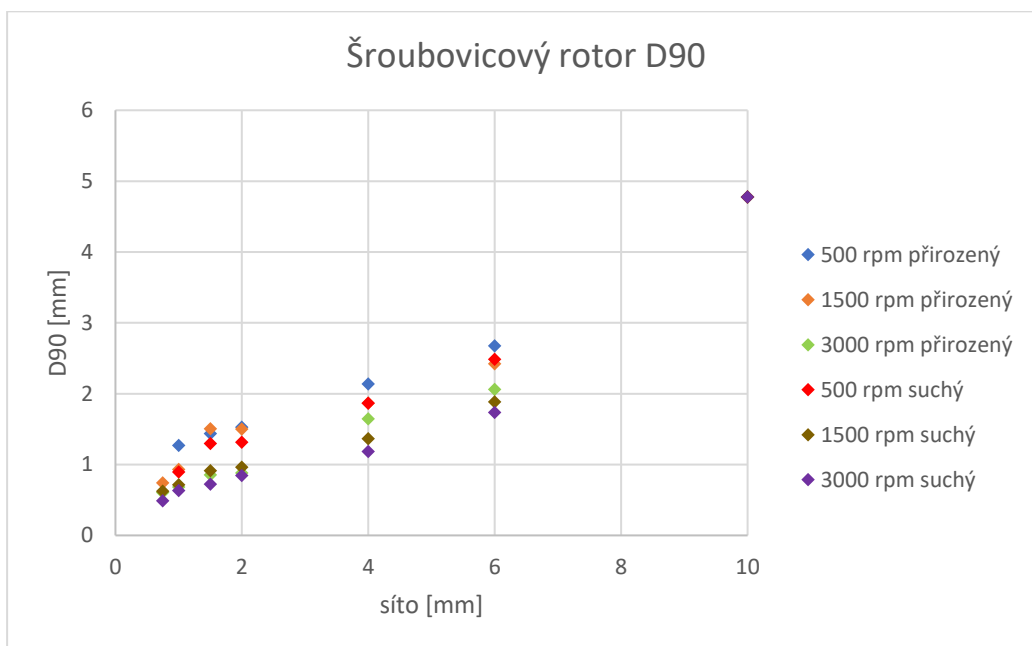
5.3.1 Porovnání D90, D50, D10 pro jeden rotor a různé otáčky

Pro porovnání byly vyneseny do grafu průměry D10, D50 a D90 pro různé otáčky a to jak pro suchý, tak pro přirozený vzorek. Byly vytvořeny grafy jak pro lineární, tak pro šroubovicový rotor.

5.3.1.2 D90 lineární a šroubovicový rotor

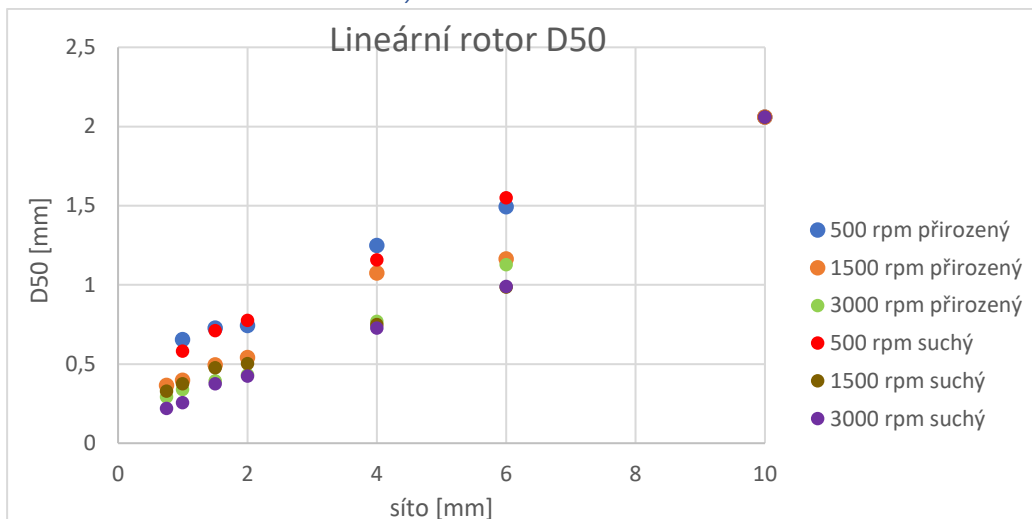


Obrázek 52 Graf porovnání D90 lineární rotor

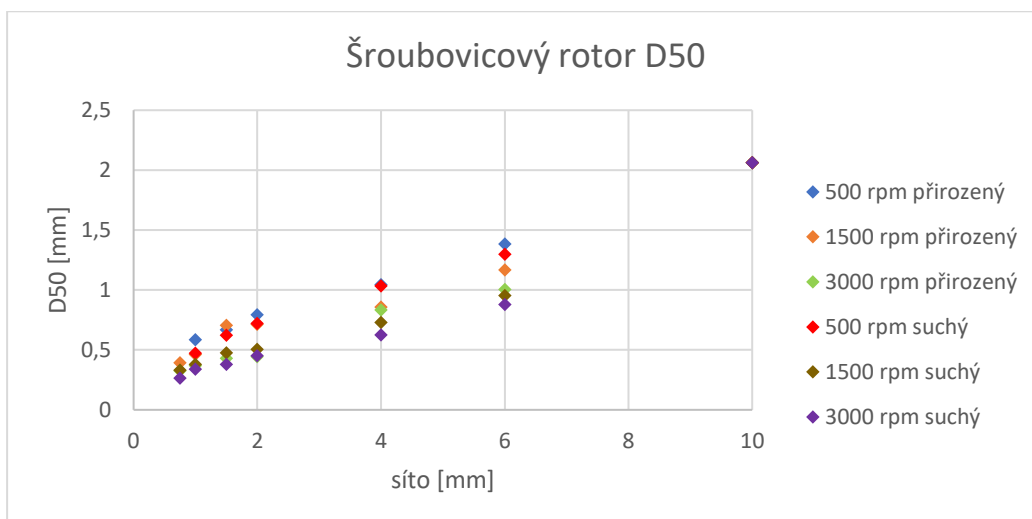


Obrázek 53 Graf porovnání D90 šroubovicový rotor

5.3.1.3 D50 lineární a šroubovicový rotor

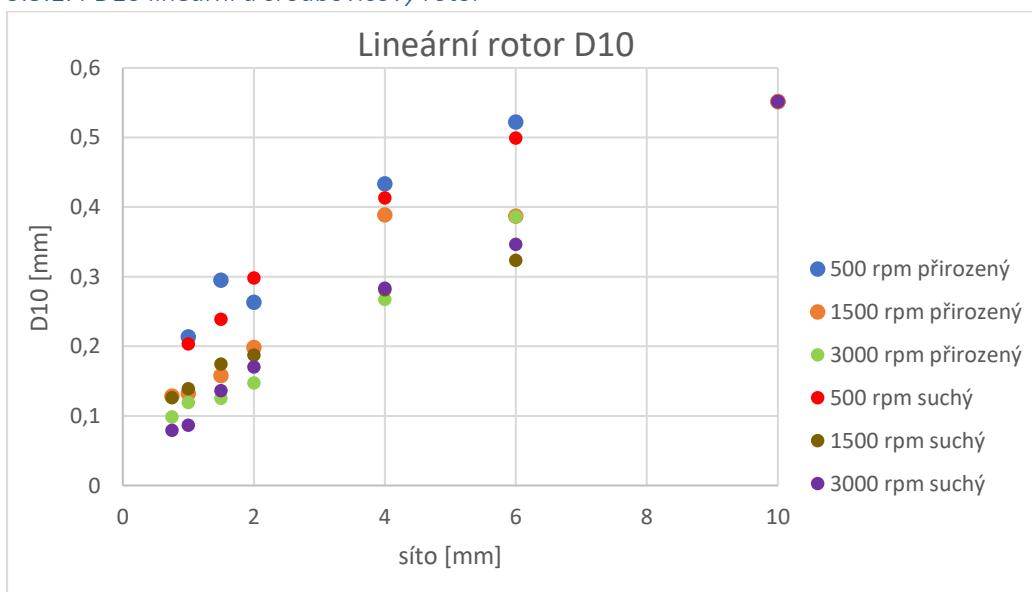


Obrázek 54 Graf porovnání D50 lineární rotor

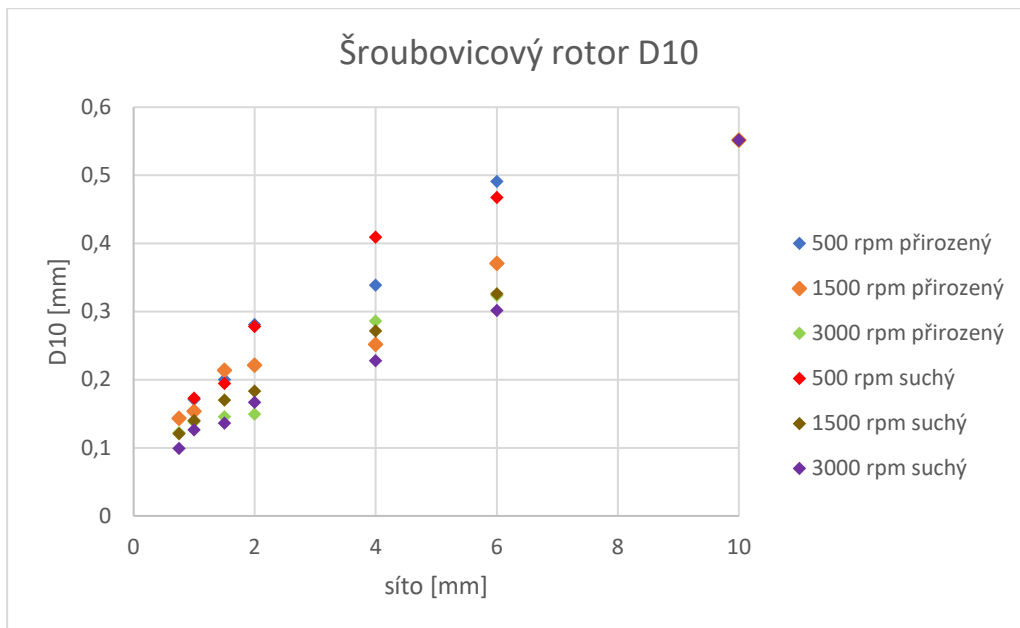


Obrázek 55 Graf porovnání D50 šroubovicový rotor

5.3.1.4 D10 lineární a šroubovicový rotor



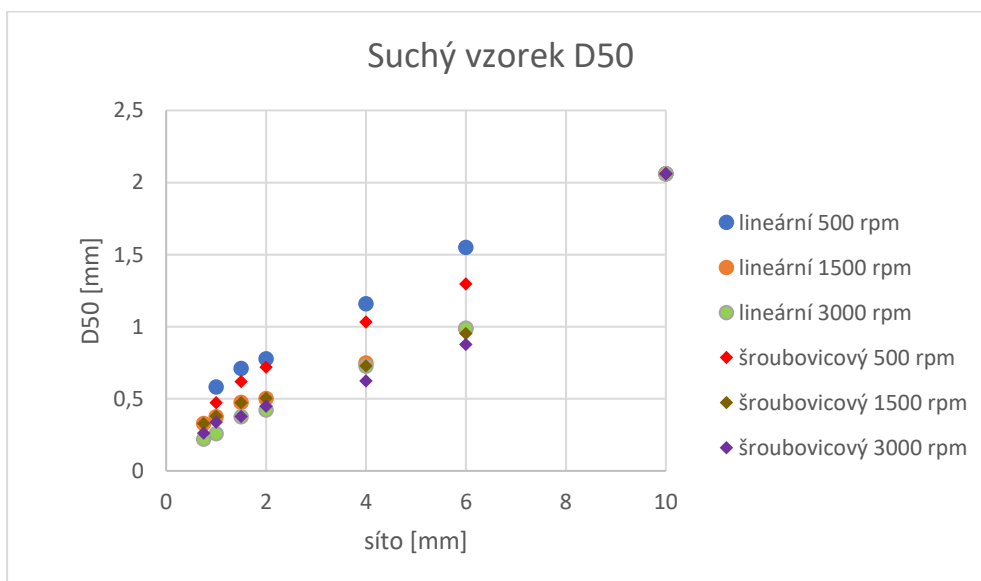
Obrázek 56 Graf porovnání D10 lineární rotor



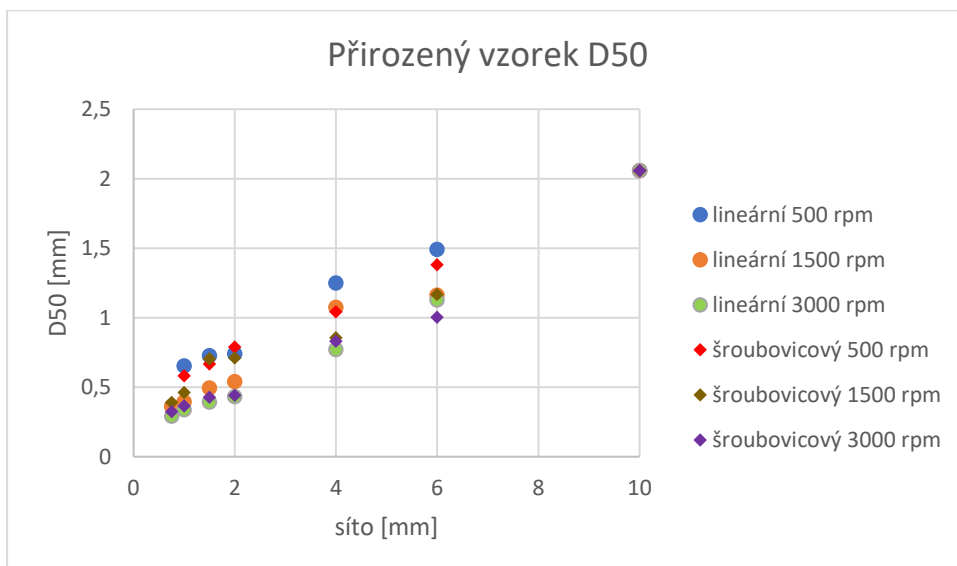
Obrázek 57 Graf porovnání D10 šroubovicový rotor

5.3.2 Porovnání D50 pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek

V této kapitole byly vykresleny zvlášť grafy pro suchý a pro přirozený vzorek ve kterých je vidět vliv geometrie rotoru a vliv otáček na D50 pro stejnou vlhkost vzorku.



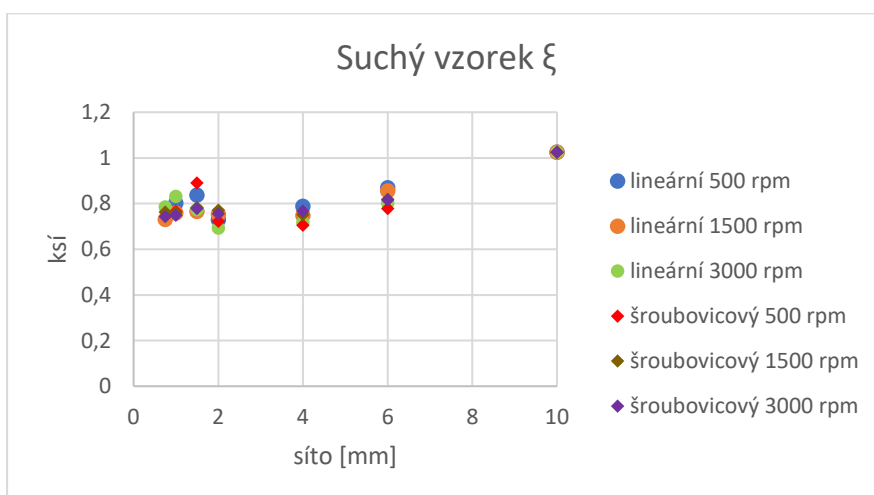
Obrázek 58 Graf porovnání D50 suchý vzorek



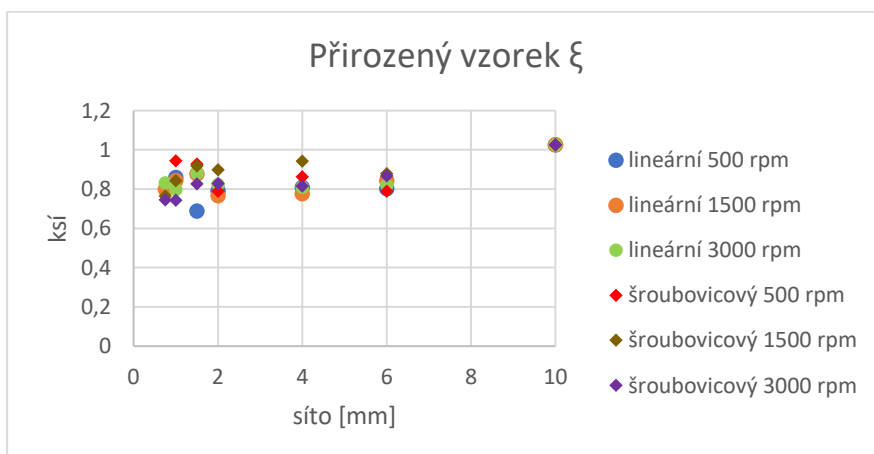
Obrázek 59 Graf porovnání D50 přirozený vzorek

5.3.3 Porovnání ξ pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek

V této kapitole byly vykresleny zvlášť grafy pro suchý a pro přirozený vzorek ve kterých je vidět vliv geometrie rotoru a vliv otáček na ξ pro stejnou vlhkost vzorku. Šíři distribuční křivky lze vyjádřit pomocí parametru ξ , který je definovaný pomocí následujícího vztahu: $\xi = \frac{D_{90}-D_{10}}{2 \cdot D_{50}}$ (27)



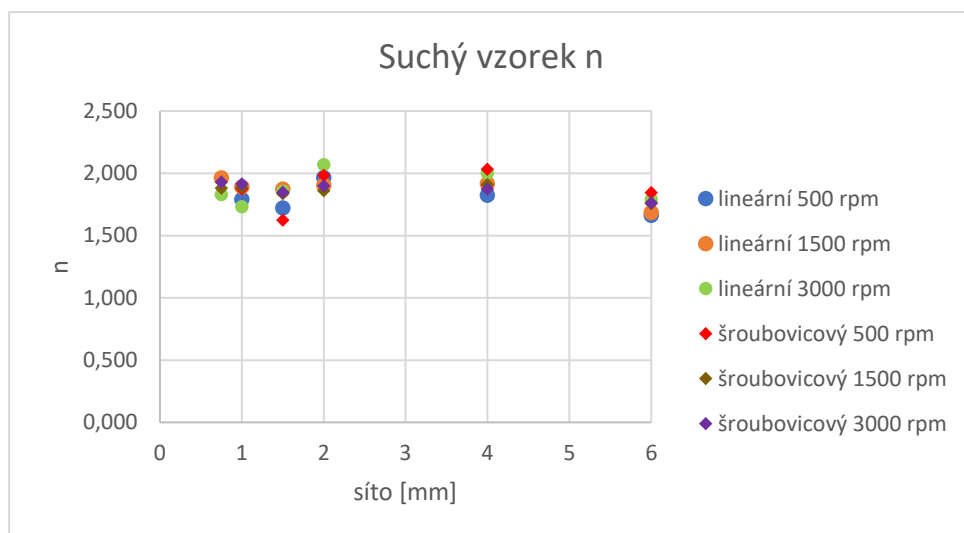
Obrázek 60 Graf porovnání ξ suchý vzorek



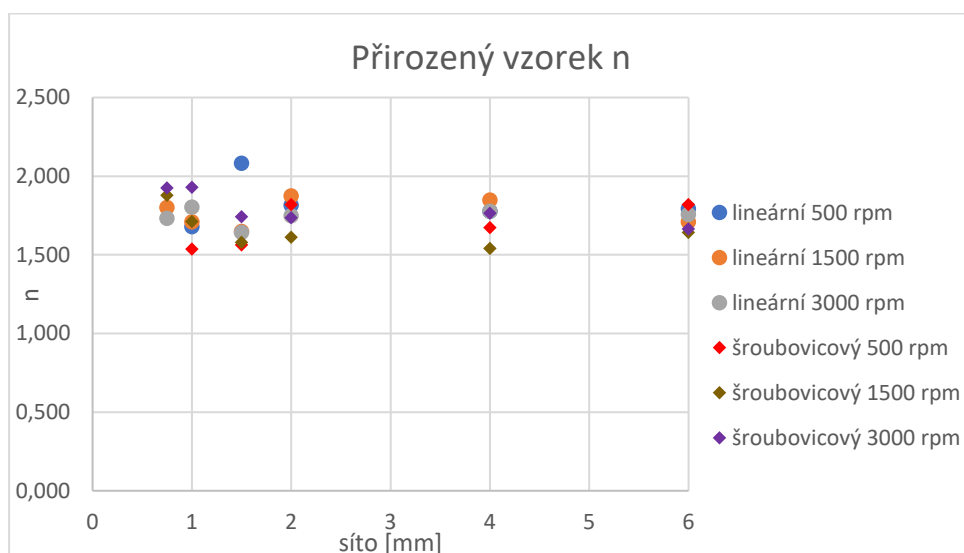
Obrázek 61 Graf porovnání ξ přirozený vzorek

5.3.4 Porovnání n pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek

V této kapitole byly vykresleny zvlášť grafy pro suchý a pro přirozený vzorek ve kterých je vidět vliv geometrie rotoru a vliv otáček na index polydispersity n pro stejnou vlhkost vzorku.



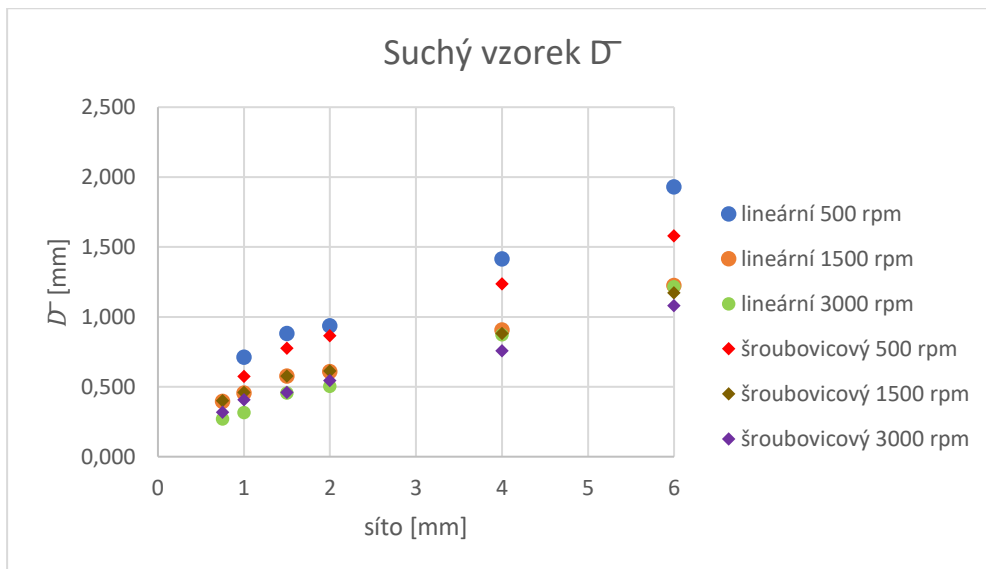
Obrázek 62 Graf porovnání n suchý vzorek



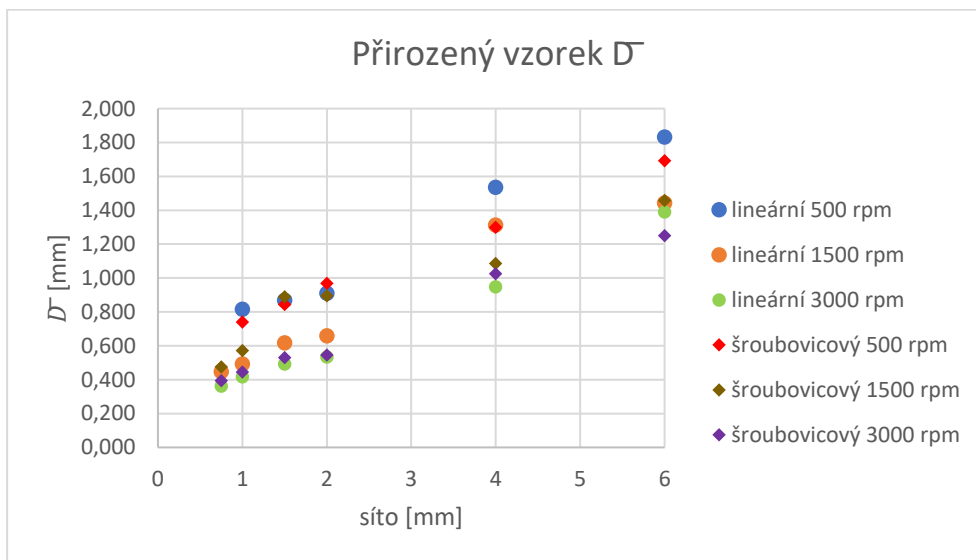
Obrázek 63 Graf porovnání n přirozený vzorek

5.3.5 Porovnání \bar{D} pro oba dva rotory a různé otáčky, suchý a přirozený vzorek

V této kapitole byly vykresleny zvlášť grafy pro suchý a pro přirozený vzorek ve kterých je vidět vliv geometrie rotoru a vliv otáček na střední průměr \bar{D} pro stejnou vlhkost vzorku.



Obrázek 64 Graf porovnání \bar{D} suchý vzorek



Obrázek 65 Graf porovnání \bar{D} přirozený vzorek

5.4 Matematický model velikosti částic v závislosti na parametrech mletí

5.4.1 Odvození

V této kapitole byl odvozen matematický model, který by dokázal predikovat parametry velikosti částic na výstupu v závislosti na parametrech mletí na základě vyhodnocení funkčních závislostí velikosti částic v závislosti na geometrii rotoru, velikosti oka síta a otáčkách při mletí. K tomu byly využity hodnoty z grafů v předchozí kapitole. Nejprve bylo prozkoumáno, zda jsou na první pohled viditelné trendy, jak se mění velikost částic v závislosti na parametrech mletí. Byly sledovány hodnoty indexu polydisperzity n , parametru šíře distribuční křivky ξ a středního rozměru \bar{D} . Šíře distribuční křivky ξ nemá výrazný trend mezi síty 0,75 a 6 mm, hodnota se pohybuje stále okolo 0,8. Nemá tedy smysl zkoumat vliv parametrů mletí na šíři distribuční křivky, když se šíře téměř nedá ovlivnit změnou parametrů mletí. Na první pohled lze z grafů v předchozí kapitole vidět výraznou závislost \bar{D} na velikosti oka mlecího síta i a na otáčkách. Zároveň byla nalezena souvislost D_{50} a středního rozměru modelu \bar{D} . Z rovnice pro RRSB rozložení vyplývá následující vztah.

$$D_F = \bar{D} \cdot [-\ln(1 - F)]^{1/n} \quad (28)$$

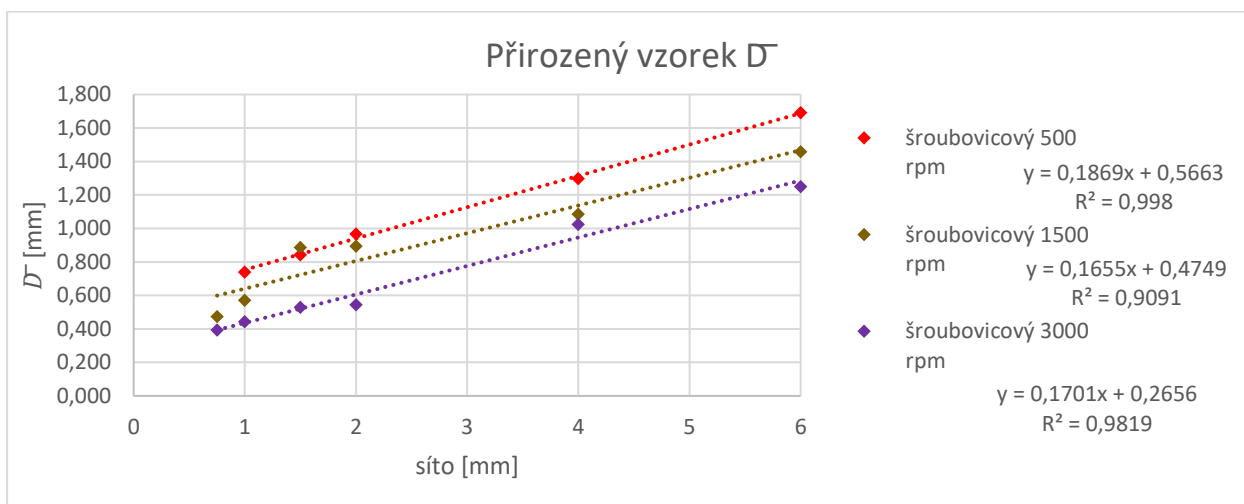
Tím je vidět, že ze středního rozměru modelu \bar{D} je možné snadno dopočítat rozměr D pro libovolnou hodnotu distribuční funkce F. Půjde vždy jen o přenásobení \bar{D} odpovídající číselnou konstantou a umocnění na $1/n$. Pokud by velikost n byla konstantní, šlo by pouze o přenásobení \bar{D} číselnou konstantou. Hodnota n na první pohled nemá výrazný trend v závislosti na parametrech mletí mezi síty 0,75 a 6 mm. Hodnota je stále podobná, s určitou mírou nepřesnosti by bylo možné ji považovat za konstantu. Bylo vyšetřeno, jak velké chyby je možné se dopustit, pokud by byla považována za konstantu. Pro přirozený vzorek byly dány hodnoty n do tabulky a vypočetl se aritmetický průměr a směrodatná odchylka.

velikost oka síta [mm]	6	4	2	1,5	1	0,75
500 rpm lineární	1,793	1,778	1,816	2,082	1,679	
1500 rpm lineární	1,710	1,849	1,876	1,649	1,711	1,802
3000 rpm lineární	1,757	1,778	1,748	1,643	1,804	1,732
500 rpm šroubovicový	1,820	1,675	1,820	1,564	1,538	
1500 rpm šroubovicový	1,643	1,541	1,612	1,580	1,712	1,879
3000 rpm šroubovicový	1,666	1,765	1,738	1,742	1,930	1,925
Průměr	1,746					
směrodatná odchylka	0,117					

Tabulka 33 Hodnoty n v různých pokusech

Z toho vyplývá, že se nelze dopustit chyby větší než 10 %, pokud se bude uvažovat konstantní hodnota n, což by pro modelování mohlo vyhovovat, je možné tvrdit, že D50 se vypočte jako přenásobení \bar{D} číselnou konstantou a bude to platné pro libovolný pokus s libovolným sítem, geometrií rotoru a rychlostí. D50 bude tedy funkcí pouze velikosti ok síta (SC) a otáček, respektive obvodové rychlosti. Pokud má být model univerzálně platný i pro jiné nožové mlýny s jiným průměrem rotoru, tak je lepší uvažovat obvodovou rychlost, jako parametr modelu. Obvodová rychlost bude u všech průměrů rotoru jednoznačně definovat rychlost při mletí. V případě fakultního mlýna to znamená, že 500 rpm odpovídá 3,4 m/s, 1500 rpm odpovídá 10,2 m/s a 3000 rpm odpovídá 20,4 m/s.

Pro odvození modelu byl hledán tvar závislosti \bar{D} na velikosti oka síta, zdánlivě by to mohla být lineární závislost, naměřené body proto byly v Excelu proloženy přímkou.



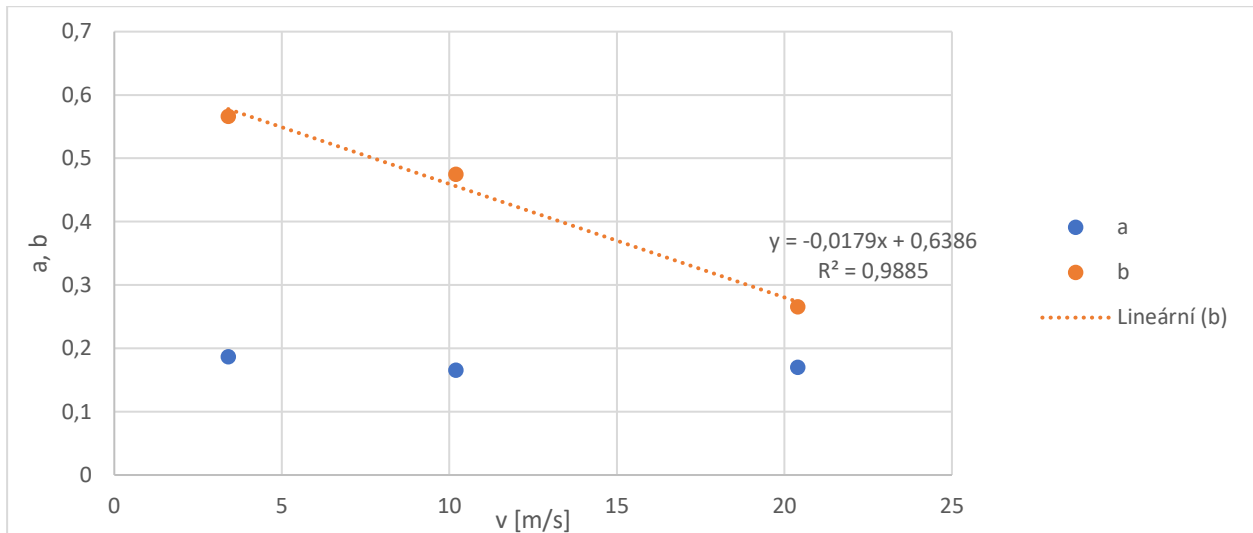
Obrázek 66 Závislost \bar{D} na velikosti oka síta

Z grafu je vidět, že závislost lze považovat za lineární při zachování rozumné přesnosti. Koeficienty rovnic přímek byly zapsány do tabulky a byl hledán tvar závislosti koeficientů na rychlosti.

A	b	v [m/s]	tvar rotoru
0,1869	0,5663	3,4	šroubovicový
0,1655	0,4749	10,2	šroubovicový
0,1701	0,2656	20,4	šroubovicový

Tabulka 34 Koeficienty lineární závislosti \bar{D} na velikosti oka síta

Z tabulky je vidět, že koeficient b výrazně závisí na rychlosti, zatímco koeficient a se příliš nemění. Hodnoty koeficientů byly vyneseny do grafu.



Obrázek 67 Graf koeficienty lineární závislosti \bar{D} na velikosti oka síta

Z grafu plyne, že koeficient b závisí na rychlosti lineárně, zatímco koeficient a se zdá jako téměř konstantní. Bylo ověřeno, zda je možné koeficient a považovat za konstantu.

průměr	0,174
směrodatná odchylka	0,009
odchylka/průměr [%]	5,281

Tabulka 35 Koeficient a lineární závislosti \bar{D} na velikosti oka síta

Z toho plyne, že koeficient a lze považovat za konstantu. Celou lineární funkci pro \bar{D} lze v obecném případě popsát vztahem: $\bar{D} = A \cdot SC + B$ (29)

V tomto vztahu lze uvažovat lineární závislost koeficientů A i B na rychlosti, potom lze vztah rozepsat takto: $\bar{D} = a_1 \cdot v + a_2 \cdot SC + b_1 \cdot v + b_2$

Ve chvíli, kdy se podařilo ukázat, že koeficient a nezávisí na rychlosti, tak nemá smysl v rovnici uvažovat koeficient a_1 . Výsledná rovnice potom vypadá takto: $\bar{D} = a \cdot SC + b_1 \cdot v + b_2$ (30)

Bylo rozhodnuto modelovat závislost D50 na rychlosti a velikosti oka síta. Lze napsat:

$$D50 = \bar{D} \cdot [-\ln(1 - 0,5)]^{1/1,746} = \bar{D} \cdot 0,811 \quad (28)$$

Z toho plyne, že D50 je opět lineární funkcí SC a v. Pro vyhodnocení byl využit Matlab, kde byla do skriptu zadefinována funkce pro D50 a byl využit příkaz nlinfit, který umožňuje dopočítat numericky koeficienty libovolné funkce tak, aby odpovídala naměřeným datům. Datový soubor pro Matlab se skládal z rychlosti (v), velikosti oka síta (SC) a experimentálně zjištěné hodnoty D50. Funkce, pro kterou se vyhodnocovaly koeficienty vypadala takto:

$$D50 = \text{beta1} + \text{beta2} \cdot SC + \text{beta3} \cdot v \quad (31)$$

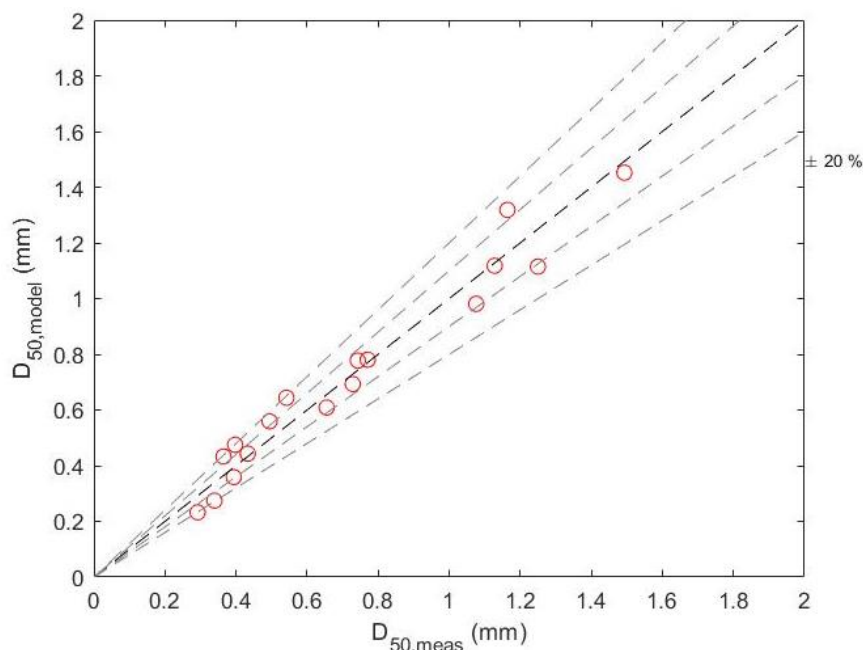
Vycházela z rovnice pro \bar{D} , koeficienty sice vyjdou pro D50 číselně jiné než pro \bar{D} , ale \bar{D} lze snadno dopočítat, pokud je namodelované D50. Stejná funkce byla použita pro 4 sady dat, které odpovídaly suchému a přirozenému vzorku vždy zvlášť pro lineární a šroubovicovou geometrii. Pokud by pro nějakou sadu dat funkce nevyhovovala, bylo by potřeba pro ten daný případ udělat jiné odvození. Pokud by ale aproximovala dobře všechna naměřená data, tak by byla univerzálně použitelná s tím, že pro každou sadu dat vyjdou mírně jiné koeficienty.

5.4.2 Výsledky matematického modelu

5.4.2.1 Obecné zpracování dat

Byla vyzkoušena použitelnost funkce pro všechny 4 sady dat a zjistilo se, že je funkce může dobře aproximovat. V Matlabu byly určeny koeficienty beta1, beta2 a beta3 a vykresleny do grafů závislosti vypočteného $D_{50,model}$ na měřeném $D_{50,meas}$ pro každou sadu dat. Dále byly vykresleny 3D grafy, které pomocí plochy v prostoru vyjadřují lineární funkci dvou proměnných s dopočtenými koeficienty pro každý jednotlivý případ.

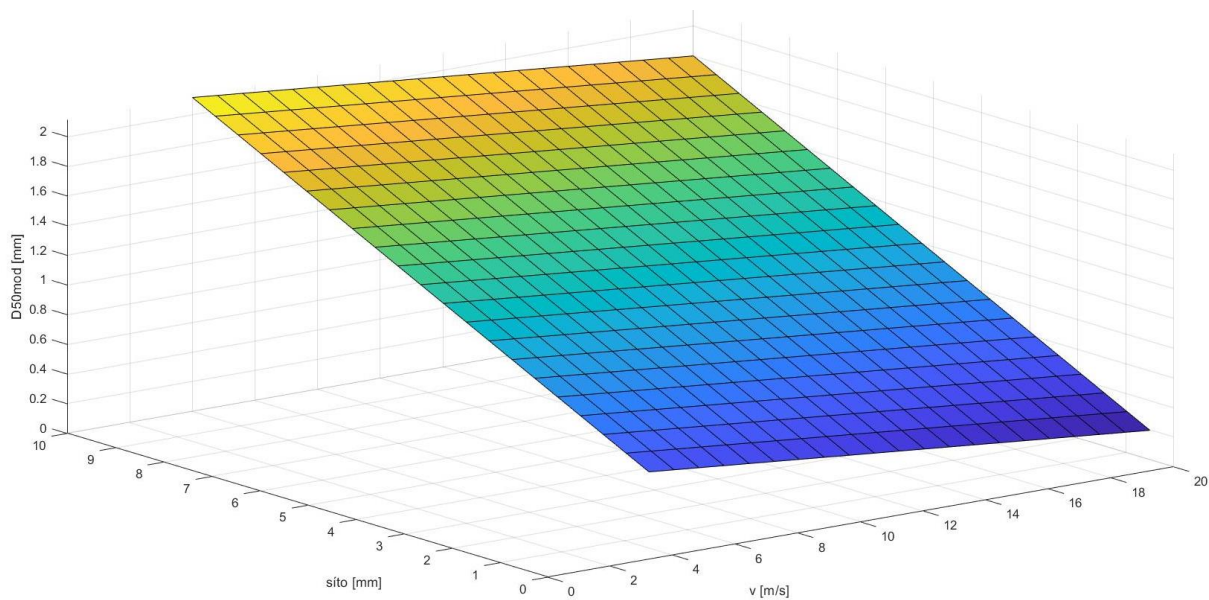
5.4.2.2 Model pro lineární rotor a přirozený vzorek



Obrázek 68 Graf porovnání hodnot modelu a měřených hodnot lineární rotor přirozený vzorek

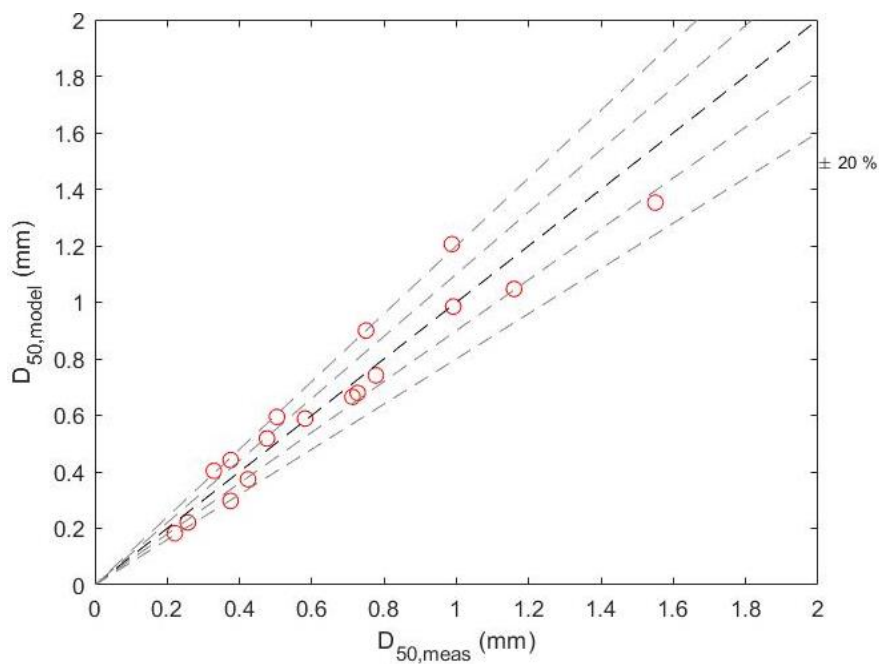
beta1	0,507 +- 0,106
beta2	0,169 +- 0,023
beta3	-0,020 +- 0,006
R ²	0,958

Tabulka 36 Koeficienty modelu lineární rotor přirozený vzorek



Obrázek 69 Graf D50 v závislosti na sítu a rychlosti model lineární rotor přirozený vzorek

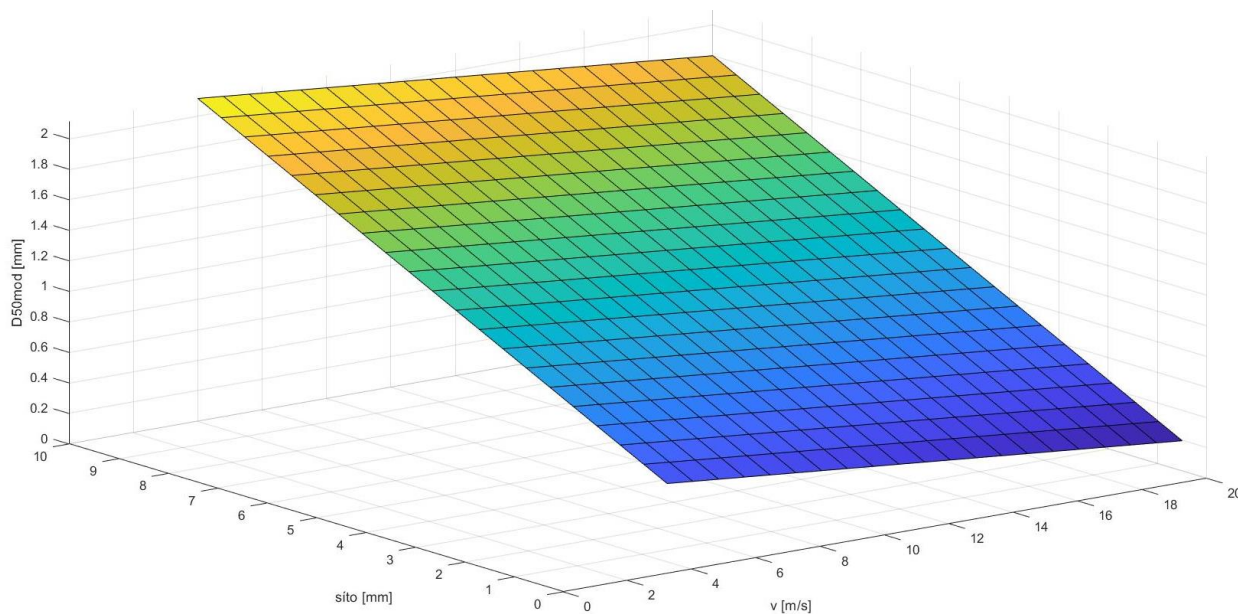
5.4.2.2 Model pro lineární rotor a suchý vzorek



Obrázek 70 Graf porovnání hodnot modelu a měřených hodnot lineární rotor suchý vzorek

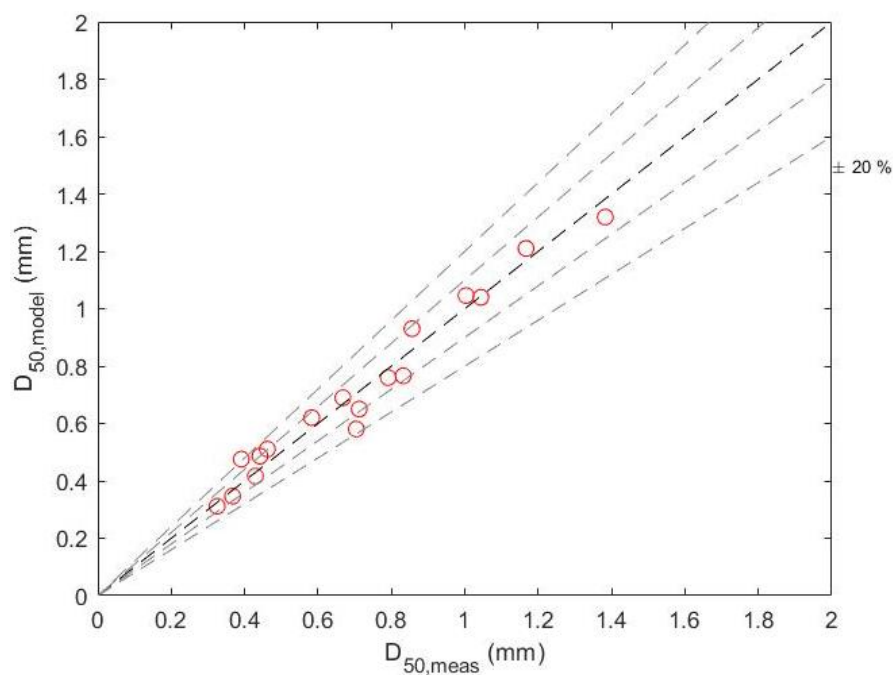
beta1	0,509 +- 0,139
beta2	0,153 +- 0,030
beta3	-0,022 +- 0,008
R ²	0,922

Tabulka 37 Koeficienty modelu lineární rotor suchý vzorek



Obrázek 71 Graf D50 v závislosti na sítu a rychlosti model lineární rotor suchý vzorek

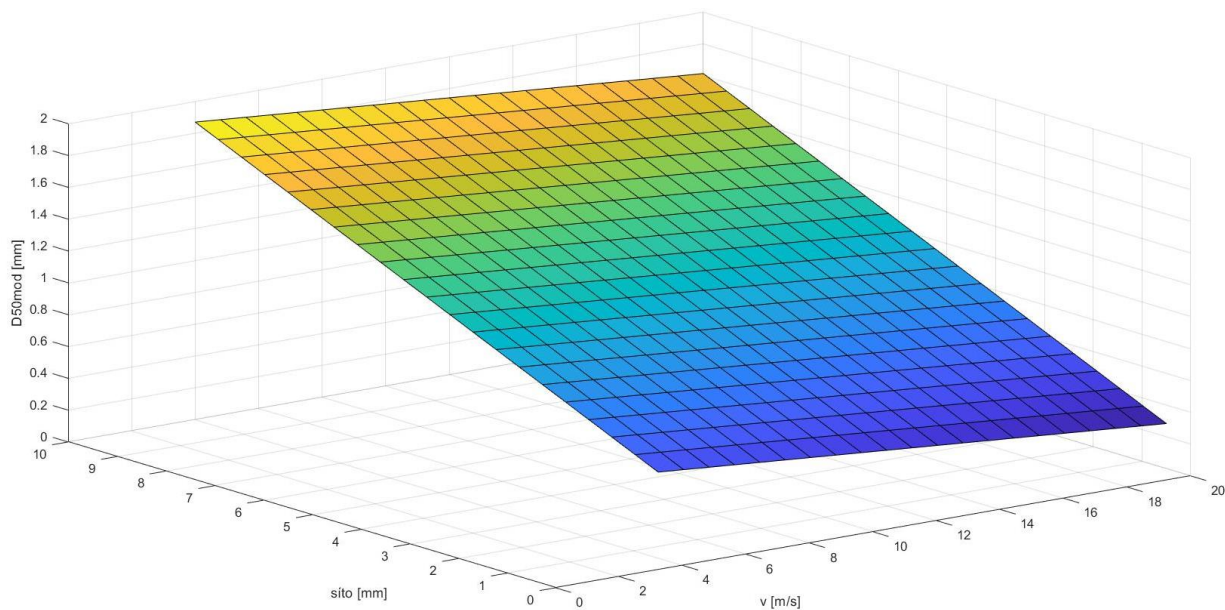
5.4.2.3 Model pro šroubovicový rotor a přirozený vzorek



Obrázek 72 Graf porovnání hodnot modelu a měřených hodnot šroubovicový rotor přirozený vzorek

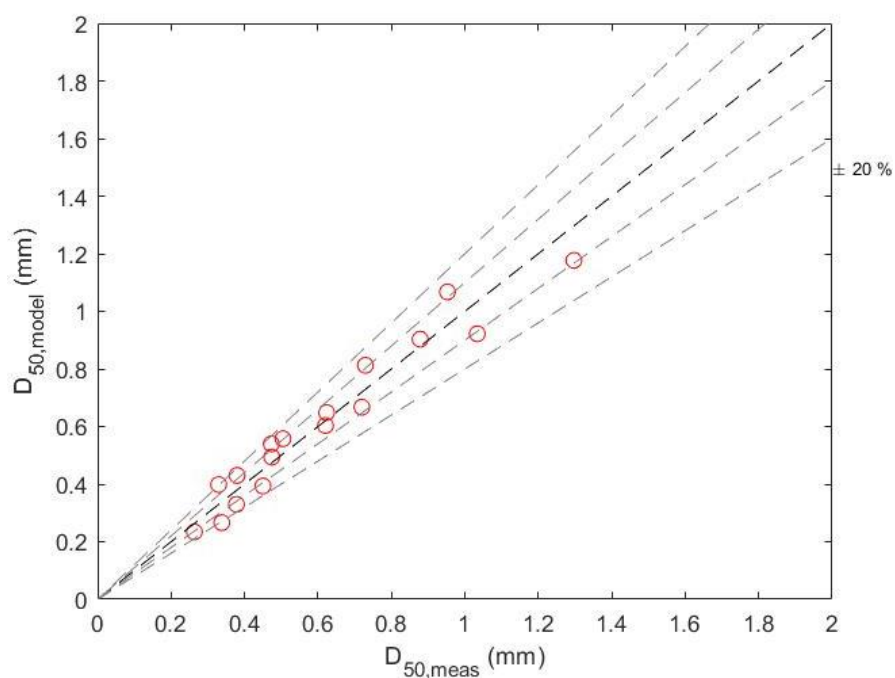
beta1	0,535 +- 0,079
beta2	0,140 +- 0,017
beta3	-0,016 +- 0,005
R ²	0,965

Tabulka 38 Koeficienty modelu šroubovicový rotor přirozený vzorek



Obrázek 73 Graf D50 v závislosti na sítu a rychlosti model šroubovicový rotor přirozený vzorek

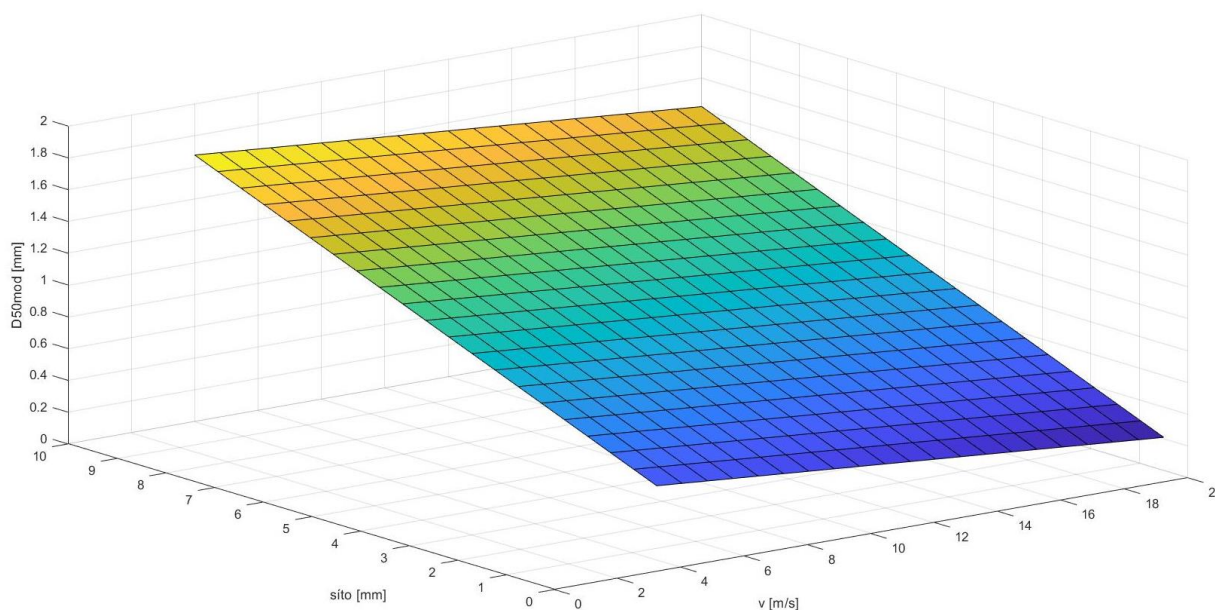
5.4.2.4 Model pro šroubovicový rotor a suchý vzorek



Obrázek 74 Graf porovnání hodnot modelu a měřených hodnot šroubovicový rotor suchý vzorek

beta1	0,467 +- 0,097
beta2	0,127 +- 0,021
beta3	-0,016 +- 0,006
R ²	0,941

Tabulka 39 Koeficienty modelu šroubovicový rotor suchý vzorek



Obrázek 75 Graf D50 v závislosti na sítu a rychlosti model šroubovicový rotor suchý vzorek

5.4.2.5 Shrnutí a diskuze

Na modelech je obecně vidět, že velikost oka síta má na rozložení velikosti částic výrazně větší vliv než rychlost rotoru. Zároveň vysušený vzorek umožňuje mletí menších částic při jinak stejných parametrech, nejvíce se to projevuje zejména u jemných mlecích sít. Šroubovicový rotor umožňuje mletí mírně jemnějších částic při jinak stejných parametrech, rozdíl mezi velikostí částic u lineárního a šroubovicového rotoru se zvětšuje u vysušených vzorků, které vykazují křehčí chování. Srovnání naměřených výsledků a výsledků matematického modelu s dostupnou literaturou je téměř nemožné. Obecně se podobnými výzkumy na mletí biomasy zabývá jen velmi málo lidí na světě, z těchto výzkumů vzniká pouze malé množství vědeckých článků. Konfigurace při mletí se v ostatních výzkumech výrazně odlišují od té mojí a těžko lze nalézt nějakou podobnost. Moje pokusy jsou příliš jedinečné na to, aby se daly dobře porovnat s jinými podobnými pokusy. Na fakultě byly prováděny podobné výzkumy na mletí slámy, sláma se ale výrazně liší mechanickými vlastnostmi. Je pružná, měkká a ohebná a má zcela jinou pevnost než štěpka. Z pohledu velikosti částic vycházelo ve výzkumech, že šíře distribuční křivky se dá jednoznačně ovlivnit sítím i geometrií. Při mletí štěpky bylo zjištěno v mých pokusech, že mezi sítí 6 a 0,75 mm je prakticky neovlivnitelná a vychází téměř konstantní. Lineární rotor dává menší částice při stejné konfiguraci u slámy a rozdíl se nejvíce projeví na větších sítích. Závislosti velikosti částic na velikosti síta při mletí se u slámy odchyľují od lineárního průběhu výrazně více než stejné závislosti pro štěpku. Rozdíl bude daný právě mechanickými vlastnostmi. U slámy bude výrazný vliv tvárné deformace, zatímco štěpka má již při malé deformaci výrazný sklon ke křehkému lomu, což vede k lineárnějšímu chování jak z pohledu velikosti částic, tak z pohledu energetické náročnosti. [44] U štěpky při přirozené vlhkosti tak výrazný rozdíl ve velikosti částic mezi lineárním a šroubovicovým rotorem nebyl, a naopak šroubovicový rotor dával mírně menší částice, u suchého vzorku už byl rozdíl výraznější, ale opět šroubovicový rotor dával menší částice. Při výzkumech pro bukovou štěpku prováděných na fakultě (kde se ale neřešila geometrie rotoru) vycházel index polydisperzity n jako nezávislý na parametrech mletí, to se potvrdilo i při mém měření. [51] Výsledky byly porovnány také s nejnovějšími výzkumy prováděnými na fakultě v roce 2023 [48], které se týkaly i vlivu geometrie při mletí bukové štěpky. Pokusy byly prováděny při 1000, 2000 a 3000 rpm. Při menších rychlostech generoval šroubovicový rotor částice s menším D50 a při větších rychlostech se rozdíl snižoval, což souhlasí s mými pokusy. Mně vycházelo, že částice budou dle D50 mírně menší pro šroubovicový rotor i při 3000 rpm, v pokusech doc. Krátkého a Dr. Arce však vyšlo, že v tuto chvíli bude mírně menší částice generovat lineární rotor, rozdíl ve velikosti je ale malý, takže to může být dáno nedostatečnou homogenizací odebíraného vzorku pro síťovou analýzu a také se mohl projevovat vliv špatného dávkování,

který snižuje přesnost výsledků. Matematický model pro velikost částic byl exponenciální, zatímco u mě je lineární. Rozdíl může být dán rozsahem, v jakém se naměřená data vyhodnocují. Pokud by měl být model pro mletí se síty mezi 0,75 a 6 mm, tak je lineární model naprosto vyhovující jak pro data z mého výzkumu, tak z výzkumu Dr. Arce a doc. Krátkého, v tomto rozsahu dokonce popisuje data lépe než exponenciální model. Pokud by byl uvažován limitní stav teoreticky nekonečně malých sít pro mletí, tak by to mělo znamenat nekonečně malé částice. Tedy pro síto limitně jdoucí k nule, musí jít velikost částic také k 0. Toto lineární model nezachytí, a naopak exponenciální to zachytí poměrně přesně. Otázkou zůstává, zda takto malá síta uvažovat, když limitní stav dosažitelného mletí se pohybuje okolo velikosti síta 0,75 mm, mletí na sítích pod 0,5 mm stejně není v našich podmínkách reálné. Při sítích větších než 6 mm není dostatečně prozkoumáno, jak by se velikost částic chovala. Naměřen byl pouze 1 bod při předemletí s lineárním rotorem a sítím 10 mm při 3000 rpm. Sice by se na grafech mohlo zdát, že tento bod neodpovídá lineární závislosti, ale ve chvíli, kdy se nezkusila žádná další konfigurace se sítím 10 mm, tak nelze uvažovat o platnosti nebo neplatnosti lineárního modelu pro síta rovná nebo větší 10 mm.

Při porovnání s výzkumy prováděnými Eisenlauerem v Německu [52] souhlasí, že vyschlý vzorek bukové štěpky umožňuje jemnější mletí při jinak stejné konfiguraci nožového mlýna, a to i ve výzkumech s kvalitním a rovnoměrným dávkováním pomocí vibračního dávkovače a s měřením velikosti částic obrazovou analýzou mikroskopických snímků pomocí speciálního softwaru.

5.5 Vyhodnocení rozpojovací energie

5.5.1 Rozpojovací energie přirozený vzorek

Do tabulky byla pro porovnání vypsána naměřená rozpojovací energie a stupeň rozpojení pro jednotlivá síta. Tabulka obsahuje data pro lineární i šroubovicový rotor a otáčky 500, 1500 a 3000 rpm.

síto [mm]	6	4	2	1,5	1	0,75
lineární rotor 500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	26233	19336	33080	6541	20249	
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,184	0,130	0,546	0,026	0,154	
lineární rotor 1500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	43176	17157	73444	12097	26319	17897
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,374	0,070	0,916	0,177	0,493	0,225
lineární rotor 3000 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	49922	46029	97185	20749	73859	43620
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,401	0,411	1,012	0,232	0,406	0,476
šroubovicový rotor 500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	14573	17714	28700	12329	26369	
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,238	0,235	0,306	0,234	0,218	
šroubovicový rotor 1500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	18064	17892	7786	24725	36660	16275
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,372	0,311	0,236	0,016	0,745	0,394
šroubovicový rotor 3000 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	24562	23137	68231	12045	52310	31553
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,511	0,205	1,062	0,065	0,394	0,351

Tabulka 40 Rozpojovací energie mletí pro přirozený vzorek

5.5.2 Rozpojovací energie suchý vzorek

Do tabulky byla pro porovnání vypsána naměřená rozpojovací energie a stupeň rozpojení pro jednotlivá síta. Tabulka obsahuje data pro lineární i šroubovicový rotor a otáčky 500, 1500 a 3000 rpm.

síto [mm]	6	4	2	1,5	1	0,75
lineární rotor 500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	28772	25709	28016	6328	12185	
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,160	0,217	0,424	0,117	0,316	
lineární rotor 1500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	33882	28672	42167	8061	19157	11408
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,528	0,321	0,652	0,115	0,563	0,375
lineární rotor 3000 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	46370	45906	80613	16294	57386	32018
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,524	0,367	0,986	0,304	1,223	0,633
šroubovicový rotor 500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	13692	17494	25162	9795	15871	
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,286	0,196	0,422	0,222	0,503	
šroubovicový rotor 1500 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	17204	17440	33571	6180	18338	9098
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,564	0,322	0,610	0,127	0,525	0,401
šroubovicový rotor 3000 rpm						
rozpojovací energie [J/kg]	21004	22348	52738	9955	48156	24591
(1/D50fin-1/D50init) [1/mm]	0,653	0,465	0,618	0,422	0,314	0,836

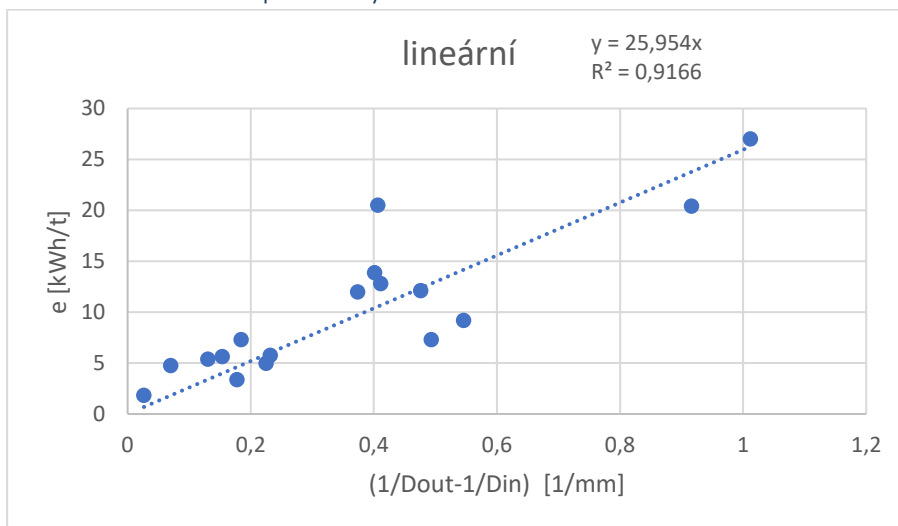
Tabulka 41 Rozpojovací energie mletí pro suchý vzorek

5.6 Rozpojovací energie podle Rittingerova modelu

5.6.1 Obecné vyhodnocení

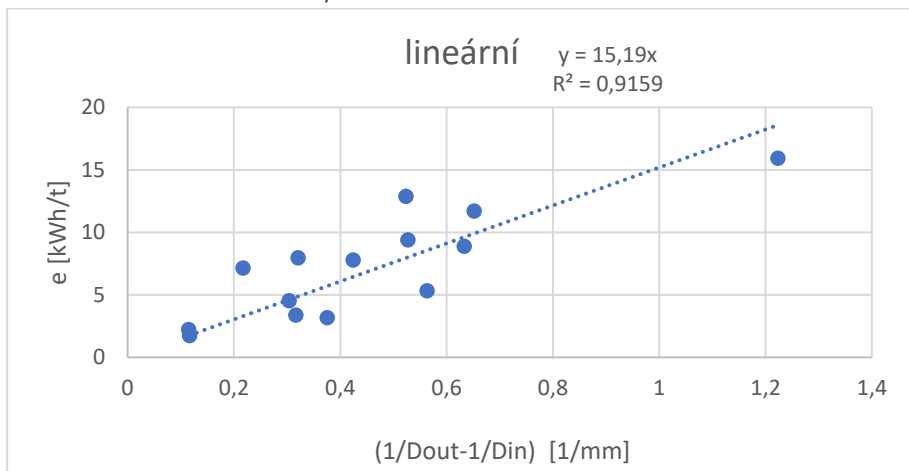
Byla vyhodnocována měrná rozpojovací energie pro 4 případy, konkrétně lineární rotor se suchým i přirozeným vzorkem a šroubovicový rotor se suchým i přirozeným vzorkem, díky proložení dat přímkou byly získány hodnoty C_R . Jako změna velikosti částic byla uvažována změna D50.

5.6.2 Lineární rotor přirozený vzorek



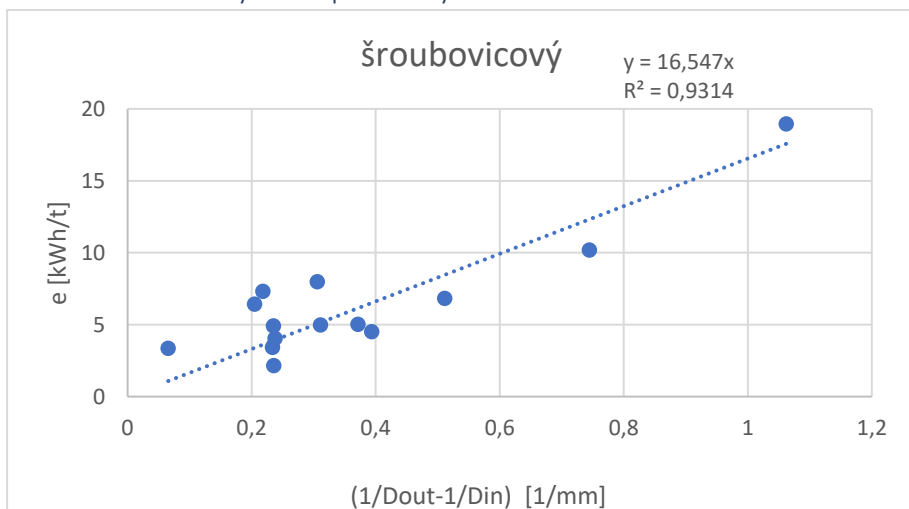
Obrázek 76 Graf rozpojovací energie lineární rotor přirozený vzorek

5.6.3 Lineární rotor suchý vzorek



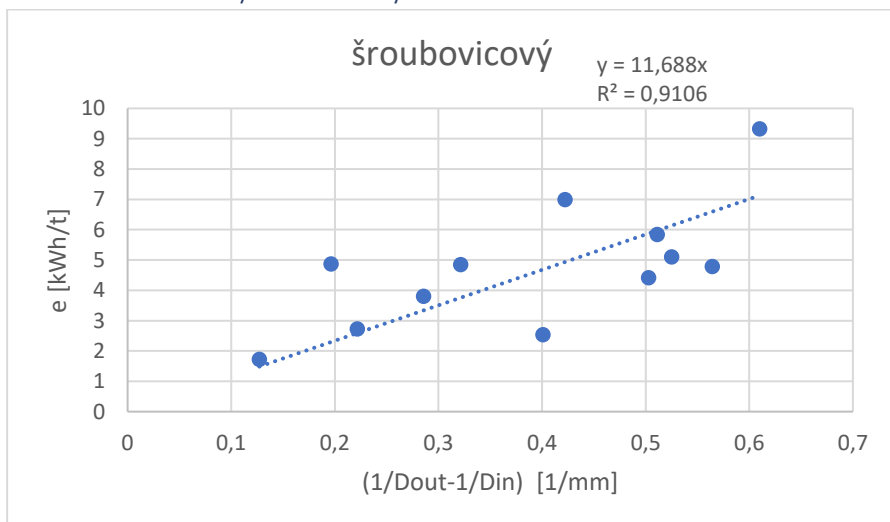
Obrázek 77 Graf rozpojovací energie lineární rotor suchý vzorek

5.6.4 Šroubovicový rotor přirozený vzorek



Obrázek 78 Graf rozpojovací energie šroubovicový rotor přirozený vzorek

5.6.5 Šroubovicový rotor suchý vzorek



Obrázek 79 Graf rozpojovací energie šroubovicový rotor suchý vzorek

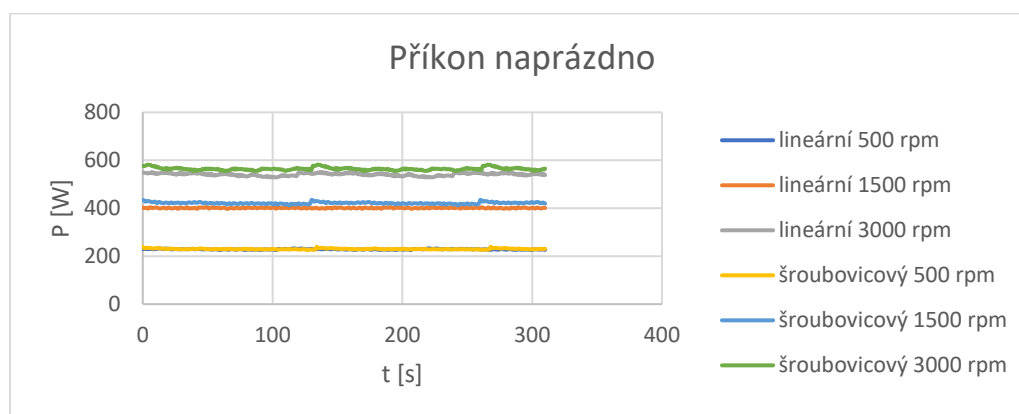
5.6.6 Shrnutí a diskuze

Z naměřených údajů je vidět, že rozpojovací energii štěpky o vlhkosti pod 8 % hmotnosti lze dobře modelovat Rittingerovým modelem, který se hodí zejména pro tvrdé a křehké materiály. Závislosti rozpojovací energie na $(1/D50_{fin}-1/D50_{init})$ se skutečně blíží lineárnímu průběhu. Z měření jednoznačně vyplývá, že vlhkost má výrazný vliv na rozpojovací energii biomasy, suchý vzorek lze mlít podstatně snadněji. Vliv geometrie ostří je také výrazný, šroubovicový rotor má díky rovnoměrnějšímu záběru výrazně nižší nároky na příkon mlýna. V následující tabulce jsou pro porovnání hodnoty Rittingerovy konstanty C_R pro jednotlivé případy mletí, rozpojovací energie je jim přímo úměrná.

Případ mletí	Konstanta C_R
Lineární rotor přirozený vzorek	25,954
Lineární rotor suchý vzorek	15,190
Šroubovicový rotor přirozený vzorek	16,547
Šroubovicový rotor suchý vzorek	11,688

Tabulka 42 Konstanta C_R

Příkon při mletí naprázdno pro lineární i šroubovicový rotor byl porovnán při různých otáčkách. Příkon závisí na otáčkách (úhlové rychlosti) a dále na momentu setrvačnosti. Moment setrvačnosti je mírně větší u šroubovicového rotoru z důvodu jeho větší hmotnosti. Rozdíl v příkonu naprázdno mezi lineárním a šroubovicovým rotorem při stejných otáčkách je velmi malý oproti rozdílu v rozpojovací energii mezi těmito 2 rotory.



Obrázek 80 Graf příkon naprázdno

Porovnání výsledků s dostupnou literaturou je opět velmi obtížné. Články o vlivu geometrie ostří na rozpojovací energii štěpky prakticky neexistují. Lze se setkat alespoň s malým množstvím článků, kde se řeší rozpojovací energie při mletí štěpky na nožovém mlýnu. Některé články vychází z měření na naší fakultě, při těchto měřeních docházelo ke stejným chybám, jako při mém měření a nerovnoměrné dávkování činí z naměřených údajů spíše odhad, než relativně přesné naměřené hodnoty. Z dostupných článků z jiných zdrojů se těžko pozná, zda probíhaly v lepších podmínkách umožňujících přesnější měření. Při měřeních s bukovou štěpkou o přirozené vlhkosti na fakultě v roce 2022 [45] vycházela Rittingerova konstanta pro změnu $D50$ a lineární rotor okolo $13 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$, což je zhruba poloviční hodnota oproti mému měření. Vzhledem k tomu, že to není řádová chyba, může jít o nepřesnost měření, která je při nevhodném dávkování značná. Ve výzkumu pro porovnání vlivu geometrie na naší fakultě [48] vycházela Rittingerova konstanta pro lineární rotor $27,94 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$, což je velmi podobné mému měření $25,954 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$ u šroubovicového rotoru je odchylka výraznější, tam vycházela $22,52 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$ místo mých $16,547 \text{ kWh} \cdot \text{mm} \cdot \text{t}^{-1}$. Hodnoty opět sedí alespoň řádově a odchylky budou způsobené zejména nevhodným dávkováním. Při porovnání s výsledky výzkumů Eisenlauera v Německu [52], kde se mlela buková štěpka s lineárním rotorem při vlhkostech 34 % a 1,5 % je vidět, že suchý vzorek vyžaduje výrazně menší energii

na rozpojení, což souhlasí s mými výsledky, tento výzkum byl dokonce prováděn s vibračním dávkovačem, který zaručoval větší přesnost naměřených údajů.

6. Závěr

Cílem této práce bylo zjistit vliv změny parametrů mletí na výsledek v podobě distribuce částic a měrné rozpojovací energie při mletí štěpky na střížném mlýnu. Na střížném mlýnu Retsch SM 300 se povedlo provést pokusy pro různé otáčky, konkrétně 500, 1500 a 3000 rpm. Při 500 rpm se podařilo mlít přes tyto velikosti ok síta: 6; 4; 2; 1,5; 1 mm. Při 1500 a při 1500 rpm se dařilo mlít přes tyto velikosti ok síta: 6; 4; 2; 1,5; 1; 0,75 mm. Všechny pokusy byly provedeny jak pro lineární, tak pro šroubovicový rotor. Mletí bylo zkoušeno jak vzorek s přirozenou vlhkostí, tak vzorek vysušený na nulovou vlhkost na počátku mletí. Pomocí sítové analýzy byla měřena distribuce velikosti částic. Zjistilo se, že RRSB model pro rozložení velikosti částic přibližně odpovídá naměřeným bodům. Měření distribuce částic má však nejvýraznější chyby. Tou nejvýraznější je vliv nekulovitosti částic. Částice lignocelulózové biomasy jsou při mletí výrazně protáhlé a nejmenší rozměr se výrazně liší od největšího. Většina částic zvládne sítem propadnout přes nejmenší průřezovou plochu, co mají. Velikost oka síta úplně nebude odpovídat střednímu rozměru částice. Vhodnější by mohlo být měření pomocí počítačové analýzy mikroskopického snímku, k tomu ale nemáme vhodný software. Další větší chyba pramení z nerovnoměrného dávkování, pokud se rotor mírně přicpe, částice se zdrží uvnitř déle a budou menší, než by byly při kontinuálním dávkování štěpky v optimálním množství. Zatím ale není zprovozněn dávkovací systém. I přes všechny chyby měření výsledky dávají smysl. Zvládlo se na základě měření vytvořit matematický model pro predikci velikosti částic v závislosti na parametrech mletí, jde o lineární funkci 2 proměnných, tedy velikosti oka síta a obvodové rychlosti rotoru, dominantní vliv má velikost oka síta. Model je poměrně přesný, jeho vypočtené hodnoty se blíží naměřeným údajům. Určení měrné rozpojovací je zatíženo mnohem větší chybou. Tady je zásadní vliv nerovnoměrného dávkování, rotor je chvíli přicpaný a chvíli běží téměř naprázdno a to způsobuje značné výkyvy příkonu. Navíc měření při dávkování v optimálním množství by dávalo výrazně jiné výsledky. Měření měrné rozpojovací energie lze považovat pouze za orientační, výsledky nejsou příliš přesné. Celému měření by výrazně pomohlo, kdyby byl k dispozici přesný kontinuální dávkovací systém.

Z porovnání lineárního a šroubovicového rotoru lze usoudit, že pro mletí tvrdé a křehké biomasy je výrazně vhodnější šroubovicový rotor, umožňuje větší průtoky při výrazně menší spotřebované energii a mírně větším stupni rozpojení. U suchého vzorku je vliv mnohem výraznější, proto má smysl ve výzkumech zkoumat vliv vlhkosti na mletí. Vliv parametrů mletí na šíři distribuční křivky ξ a na index polydisperzity n není nijak výrazný.

Do budoucna by mělo smysl dále intenzivně měřit rozpojovací energii, avšak pouze za předpokladu, že bude k dispozici kontinuální dávkovací systém. Díky tomu by bylo možné při měření dosáhnout poměrně přesných výsledků, podle kterých půjde uvažovat, jak optimálně nastavit parametry při průmyslovém mletí ve velkém měřítku. Dále by mělo smysl zkoumat podrobně vliv vlhkosti a proměřit zejména vzorky štěpky s vlhkostí mezi 8 a 15 %, které budou v praxi mnohem častější než vzorky použité v této práci a mohly by být ještě použitelné pro střížný mlýn. Dosavadní modely pro distribuci částic i pro měrnou rozpojovací energii vychází ze statistického zpracování empiricky zjištěných údajů z laboratorních mlecích pokusů. V modelech se neuvažuje s fyzikální podstatou mletí a s mechanickými vlastnostmi. V dalších výzkumech by bylo dobré změřit a popsat důležité mechanické vlastnosti lignocelulózové biomasy při různých vlhkostech. Z toho vypočítat střížnou sílu pro rozlomení částice a vytvoření nového povrchu. Na základě toho by se daly tvořit fyzikálně teoreticky založené modely, které by se daly porovnávat s empiricky založenými modely. Z porovnání by se dalo stanovit, jak se skutečnost liší od teoreticky odvozených fyzikálních vzorců, na základě vlastností materiálu a parametrů mletí by se dala najít bezrozměrná podobnostní čísla. Z podobnostních čísel by se poté daly sestavovat modely pro výpočet distribuce částic i rozpojovací energie, které by byly popsány kritériálními rovnicemi. Tyto modely by

mohly být univerzálně použitelné pro různé střížné mlýny a různé parametry a mohly dávat poměrně přesné výsledky.

Seznam symbolů

e	měrná rozpojovací energie	[J/kg] [kWh/t]
E_R	rozpojovací energie	[J] [kWh]
t	doba mletí	[s]
m	hmotnost	[kg]
P_{AM}	činný příkon při mletí	[W]
P_{AI}	činný příkon naprázdno	[W]
P	činný příkon	[W]
C	konstanta obecného modelu energetické náročnosti	
r	exponent obecného modelu energetické náročnosti	
D	velikost částice	[mm]
D_{in}	vstupní velikost částic	[mm]
D_{out}	výstupní velikost částic	[mm]
C_R	Rittingerova konstanta energetické náročnosti	[J.mm.kg ⁻¹] [kWh.mm.t ⁻¹]
C_B	Bondova konstanta energetické náročnosti	[J.mm ^{0.5} .kg ⁻¹] [kWh.mm ^{0.5} .t ⁻¹]
C_K	Kickova konstanta energetické náročnosti	[J.kg ⁻¹] [kWh.t ⁻¹]
E	hodnota diferenciální distribuční funkce	[-]
F	hodnota integrální distribuční funkce	[-]
D_{min}	minimální velikost částic	[mm]
D_{max}	maximální velikost částic	[mm]
σ	směrodatná odchylka logaritmicko normálního rozložení	[-]
m	exponent Gaudin-Schumanova rozložení	[-]
n	index polydisperzity RRSB rozložení	[-]
R^2	parametr spolehlivosti na druhou	[-]
c_w	obsah vody	[% hm.]

C_A	obsah popelovin	[% hm.]
C_H	obsah organických hořlavin	[% hm.]
m_s	hmotnost štěpky na sítu	[g]
m_{celk}	hmotnost celého vzorku štěpky	[g]
D_{fin}	konečná velikost částic po mletí	[mm]
ξ	šíře distribuční křivky	[-]
SC	velikost oka síta při mletí	[mm]
v	obvodová rychlost rotoru	[m/s]
a	směrnice přímky závislosti \bar{D} na SC	[-]
b	posunutí přímky závislosti \bar{D} na SC	[-]
A	směrnice přímky modelu pro \bar{D}	[-]
B	posunutí přímky modelu pro \bar{D}	[-]
a_1	parametr pro velikost A v modelu pro \bar{D}	[-]
a_2	parametr pro velikost A v modelu pro \bar{D}	[-]
b_1	parametr pro velikost B v modelu pro \bar{D}	[-]
b_2	parametr pro velikost B v modelu pro \bar{D}	[-]
beta1	parametr modelu pro D50 v Matlabu	[-]
beta2	parametr modelu pro D50 v Matlabu	[-]
beta3	parametr modelu pro D50 v Matlabu	

Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] K. Murtinger a J. Beranovský, *Energie z biomasy*, Brno: Computer Press: EkoWATT, 2011, 2011.
- [2] T. Jirout a L. Krátký, *Moderní trendy předúprav biomasy*, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2015.
- [3] X.-S. W. M. G.-P. D. M. M. J. R. C.-Z. L. Jun Shen, „Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass,“ *Fuel*, pp. 1810-1817, Říjen 2009.
- [4] N. L. Y. L. R. Z. Z. S. S. N. Y. L. Linzheng Wang, „Product distribution from pyrolysis of large biomass particle: Effects of intraparticle secondary reactions,“ *Fuel*, Říjen 2022.
- [5] S. N. U. a. P. K. M. Mohit Kumar, „Pyrolysis of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Leaves and Characterization of Products,“ *ACS Omega*, pp. 28052-28064, Červenec 2022.

- [6] H. S. A. M. A. E. M. a. M. B. Dina Aboelela, „Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions,“ *Sustainability*, Červenec 2023.
- [7] C. Ç. & H. M. Zakari Boubacar Laougé, „Fast pyrolysis of greenhouse waste into bio-oil and optimization of process conditions using response surface methodology,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 9807-9819, 14 Srpen 2021.
- [8] X. L. M. M. Jie Yu a, „A study on pyrolysis of wood of different sizes at various temperatures and pressures,“ *Fuel*, Červenec 2023.
- [9] J. P. I. A. C. C. Antonia Gil, „Pyrolysis and CO₂ gasification of barley straw: Effect of particle size distribution and chemical composition,“ *Powder Technology*, Červenec 2023.
- [10] Y. Z. G. L. Y. L. W. W. J. D. Chaojie Li, „Hydrodynamic characteristics of pyrolyzing biomass particles in a multi-chamber fluidized bed,“ *Powder Technology*, Květen 2023.
- [11] G. A.-A. A. B. Juan J. Hernández, „Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time,“ *Fuel Processing Technology*, pp. 681-692, Červen 2010.
- [12] S. A. S. R. Srirat Chuayboon, „Insights into the influence of biomass feedstock type, particle size and feeding rate on thermochemical performances of a continuous solar gasification reactor,“ *Renewable Energy*, pp. 360-370, Leden 2019.
- [13] P. C. P. D. A. C. C. a. D. M. Leonardo Bianchini, „An Industrial Scale, Mechanical Process for Improving Pellet Quality and Biogas Production from Hazelnut and Olive Pruning,“ *Energies*, Březen 2021.
- [14] L. K. Carlos Arce, „Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass toward enzymatic/fermentative valorization,“ *iScience*, Červen 2022.
- [15] R. O. R. W. S. L. M. C. U. d. A. V. E. d. A. N. M. d. S. O. & C. L. V. Valderi D. Leite, „Kinetic Modeling of Anaerobic Co-Digestion Of Plant Solid Waste with Sewage Sludge: Synergistic Influences of Total Solids and Substrate Particle Size in Biogas Generation,“ *BioEnergy Research*, pp. 744-755, Říjen 2023.
- [16] J. A. C. & M. d. C. C. P. Iris Sandoval Rojas, „Influence of Combined Mechanical, Chemical, and Thermal Pretreatment Methods and Concentration Control on Biomethane Production from Opuntia ficus-indica Waste,“ *BioEnergy Research*, pp. 638-650, Duben 2022.
- [17] V. C. C. C. A. F. E. L. V. H. J.-M. K. M. X. L. J. a. A. P. Shruthi Meenakshisundaram, „Chemically and Physically Pretreated Straw in Moderate Conditions: Poor Correlation between Biogas Production and Commonly Used Biomass Characterization,“ *Energies*, Leden 2023.
- [18] P. R. B. H. S. B. A. L. & H. O. René Heller, „Effects of Pretreatment with a Ball Mill on Methane Yield of Horse Manure,“ *Waste and Biomass Valorization*, pp. 3723-3737, Únor 2023.
- [19] H. H. A. M. I. I. H. L. C. B. Siswo Sumardiono, „Biogas production from corn stalk as agricultural waste containing high cellulose material by anaerobic process,“ *materialstoday: Proceedings*, pp. 477-483, 2022.

- [20] M. Kaur, „Effect of particle size on enhancement of biogas production from crop residue,“ *materialstoday: Proceedings*, pp. 1950-1954, 2022.
- [21] S. S. A. R. Umarin Jomnonkhaow, „Influences of size reduction, hydration, and thermal-assisted hydration pretreatment to increase the biogas production from Napier grass and Napier silage,“ *Biosource Technology*, Červen 2021.
- [22] C. C. B. P. C. M.-L. X. R. G. V. Luke Stover, „A phenomenological description of biomass powder combustion in internal combustion engines,“ *Energy*, Červen 2023.
- [23] J. M. G. S. A. Mack, „Experimental investigation of single wood particle combustion in air and different O₂/CO₂/H₂O atmospheres,“ *Fuel*, Květen 2023.
- [24] Q. L. W. Z. & T. W. Xuecheng Tang, „Ash deposition characteristics during oxy-fuel combustion of biomass in a drop tube furnace,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, Březen 2023.
- [25] B. E. F. L. & H. P. Ali Umut Şen, „Insights into the combustion behavior of cork and phloem: effect of chemical components and biomass morphology,“ *European Journal of Wood and Wood Products*, Březen 2023.
- [26] M. E. M. T. M. K. E. H. N. & M. A. I. Saad A. El-Sayed, „Combustion and mass loss behavior and characteristics of a single biomass pellet positioning at different orientations in a fixed bed reactor,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, Únor 2023.
- [27] F. B. C. G. M. A. L. T. U. D. Gianluca Caposciutti.
- [28] R. A. J. B. Hanqi Gu, „Pretreatment refining leads to constant particle size distribution of lignocellulose biomass in enzymatic hydrolysis,“ *Chemical Engineering Journal*, pp. 198-205, Listopad 2018.
- [29] R. Z. H. L. C. L. Q. D. M. J. Xiaoxiao Jiang, „Understanding acid hydrolysis of corn stover during densification pretreatment for quantitative predictions of enzymatic hydrolysis efficiency using modified pretreatment severity factor,“ *Bioresource Technology*, Říjen 2023.
- [30] M. Z. J. Z. & D. W. Yang Yang, „Effects of particle size on biomass pretreatment and hydrolysis performances in bioethanol conversion,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 13023-13036, Leden 2022.
- [31] L. H. & D. Einfalt, „Impact of particle size reduction on high gravity enzymatic hydrolysis of steam-exploded wheat straw,“ *SN Applied Sciences*, Listopad 2021.
- [32] K. A. T. T. L. S. B. M. P. & J. P. Ju Chen, „Effect of Mechanical Pretreatment for Enzymatic Hydrolysis of Woody Residues, Corn Stover and Alfalfa,“ *Waste and Biomass Valorization*, pp. 5847-5856, Říjen 2019.
- [33] N. G. H. & T. V. G. Yalew Woldeamanuel Sitotaw, „Intensification of low concentration alkaline pretreatment with planetary ball milling for efficient enzymatic saccharification of enset fiber (*Ensete ventricosum*),“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 14097-14112, Leden 2022.
- [34] Z. F. a. X.-f. T. b. Z.-d. M. Xiao-le Liu a, „Effect of alkali salt-coupled ball milling pretreatment of wheat straw on improving enzymatic hydrolysis and energy efficiency,“ *Fuel*, Květen 2023.

- [35] D. E. A. H. S. I. K. L. R. A. B. Mouna Aouine, „Dry chemo-mechanical pretreatment of chickpea straw: Effect and optimization of experimental parameters to improve hydrolysis yields,“ *Bioresource Technology Reports*, Červen 2022.
- [36] L. W. & H. C. Minglu Li, „Evaluation of initial material particle size on the hydrothermal pretreatment of poplar powder,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, Srpen 2022.
- [37] F. Rieger, V. Novák a T. Jirout, *Hydromechanické procesy II*, Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005.
- [38] „Kladivový mlýn SK 300,“ Retsch, [Online]. Available: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/rotorove-mlyny/sk-300/>. [Přístup získán 20 Duben 2024].
- [39] „Retsch SM 300,“ [Online]. Available: <https://www.retsch.cz/cz/produkty/mleti/strizne-mlyny/sm-300/funkce-a-charakteristiky/>. [Přístup získán 25 4 2022].
- [40] „Universal Cutting Mill - variable speed 300-3000 rpm,“ Fritsch, [Online]. Available: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/cutting-mills/details/product/pulverisette-19l-300-3000-rpm/>. [Přístup získán 28 Leden 2024].
- [41] „NETZSCH Proven Excellence,“ Netzsch, [Online]. Available: <https://grinding.netzsch.com/en/products-and-solutions/dry-grinding/cs-z-fine-cutting-mill>. [Přístup získán 28 Leden 2024].
- [42] „Laarmann inovators in solids,“ Laarmann, [Online]. Available: <https://www.laarmann.eu/Products/cm1000/>. [Přístup získán 28 Leden 2024].
- [43] F. Rieger, V. Novák a T. Jirout, *Hydromechanické procesy I*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.
- [44] C. A. T. L. M. D. T. J. Lukáš Krátký, „The Effect of Rotor Geometry on Particle Size Characteristics for Knife-milled Wheat Straw,“ *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 2023.
- [45] V. B. T. J. & M. D. Lukáš Krátký, „Mathematical modelling of particle size characteristics and energy demand for mechanical size reduction of beech chips under different knife mill variables,“ *Biomass Conversion and Biorefinery*, Listopad 2022.
- [46] L. Kratky, K. Zenkl a T. Jirout, „The Effect of Moisture on Specific Energy Demand for Knife-milled Wheat Straw,“ *Chemical Engineering Transactions*, pp. 7-12, 2022.
- [47] L. Krátký a T. Jirout, „Modelling of particle size characteristics and specific energy demand for mechanical size reduction of wheat straw by knife mill,“ *Biosystems engineering*, č. 197, pp. 32-44, 2020.
- [48] L. K. Carlos Arce, „Effect of the rotor blade geometry on particle size and energy demand for knife-milled beech chips: Experimental identification and mathematical modelling,“ *Biosystems Engineering*, pp. 120-130, Říjen 2023.
- [49] T. Jirout a L. Krátký, „Experimental Identification of Specific Energy Demand for Knife Milling of Beech Chips at Different Moistures,“ *Chemical engineering transactions*, č. 87, pp. 529-533, 2021.

- [50] L. Krátký, „Mechanical Size Reduction Of Lignocellulosic Biomass:“, *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, pp. 229-234, Březen 2022.
- [51] T. J. M. D. M. A. Lukas Kratky, „The Effect of Moisture on the Particle Size Characteristics of Knife-milled Beech Chips“, *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, Říjen 2021.
- [52] U. T. Moritz Eisenlauer, „Comminution of Wood – Influence of Process Parameters“, *Chemical Engineering and Technology*, 14 Únor 2020.
- [53] N. L.J., S. S., B. X., L. C.J., W. A.R., L. A.K. a M. S., „Development of size reduction equations for calculating energy input for grinding lignocellulosic particles“, *Applied Engineering in Agriculture*, pp. 93-100, 2013.
- [54] V. S. Bitra, A. R. Womac, N. Chevanan, P. I. Miu, C. Igathinathane, S. Sokhansanj a D. R. Smith, „Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass“, pp. 32-45, Únor 2009.
- [55] M. Gil a I. Arauzo, „Hammer mill operating and biomass physical conditions effects on particle size distribution of solid pulverized biofuels“, *Fuel Processing Technology*, Listopad 2014.
- [56] L. G. T. S. S. Sudhagar Mani, „Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass“, *Biomass and Bioenergy*, pp. 339-352, Duben 2004.
- [57] A. C. O. O. I. A. C. M. O. D. D. C. C. I. U. C. O. Christian Emeka Okafor, „Mathematical study of bio-fibre comminution process as first step towards valorization of post-harvest waste materials“, *Cleaner Materials*, 2022.