



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ VELIKOSTI ČÁSTIC LIGNOCELULÓZOVÉBIOMASY PŘI MLETÍ

FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV PROCESNÍ A
ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

Ing. Michal Vtípil; doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.

Duben 2026



- Mechanická předúprava = **NEDÍLNÁ SOUČÁST** každé technologie zpracování odpadní biomasy.

PROČMLET BIOMASU [1,2]?

- + Nárůst měrného povrchu a sytné hustoty.
- + Zvýšení efektivity následného zpracování.
- + Přestřižení nebo rozvláknění částic biomasy.
- + Snížení stupně krystalinity.
- + Usnadnění manipulace a dopravy.

Omezení [1,2]?

- Velmi náročné na energii.
- *Vlhkost biomasy* problematické chování biomasy.
- Technické limity průmyslových mlýnů.

TECHNOLOGE	POTŘEBNÁ VELIKOST ČÁSTIC ^[1-4]
Peletizace a briketizace	< 6 mm
Práškové spalování	< 1 mm
Pyrolýza	0.25-2.00 mm
Zplyňování	0.12-10.00 mm
Fermentace	0.03-10 mm
Výroba bioethanolu	0.5-3.0 mm

- Jak řídit mlýn pro dosažení vhodné velikosti částic?

[1] Hendriks A.T.W.M., Zeeman G., 2009, Pretreatment to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass, *Bioresource Technology*, 100, 10-18.

[2] Hoque M., Sokhansanj S., Naimi L., Bi X., Lim J., 2007, Review and analysis of performance and productivity of size reduction equipment for fibrous materials. ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota.

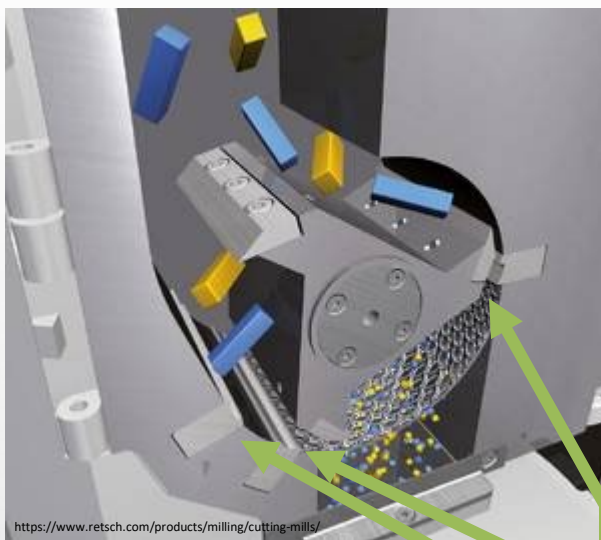
[3] Oyedeji O., Gitman P., Qu J., Webb E., 2020, Understanding the impact of lignocellulosic biomass variability on the size reduction process: A review, *Webb, ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8, 2327-2343.

[4] Miao Z., Grift T.E., Hansen A.C., Ting K.C., 2011, Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties, *Industrial Crops and Products*, 33, 504-513.



DEFINICE CÍLŮ A NOVOSTI

Nožový (střížný) mlýn dosahuje nejnižší energetické náročnosti [5].



<https://www.retsch.com/products/milling/cutting-mills/>

- Optimalizace mletí – predikce velikosti částic
- Cíl - přesné modely s širokým rozsahem použitelnosti
- Dnes empirické modely – velmi úzký rozsah
- Fyzikálně založené modely – výrazně širší rozsah použitelnosti - téměř nevyvinuté

Částice stříhány mezi dvojicemi nožů rotoru a statoru.

CÍLE:

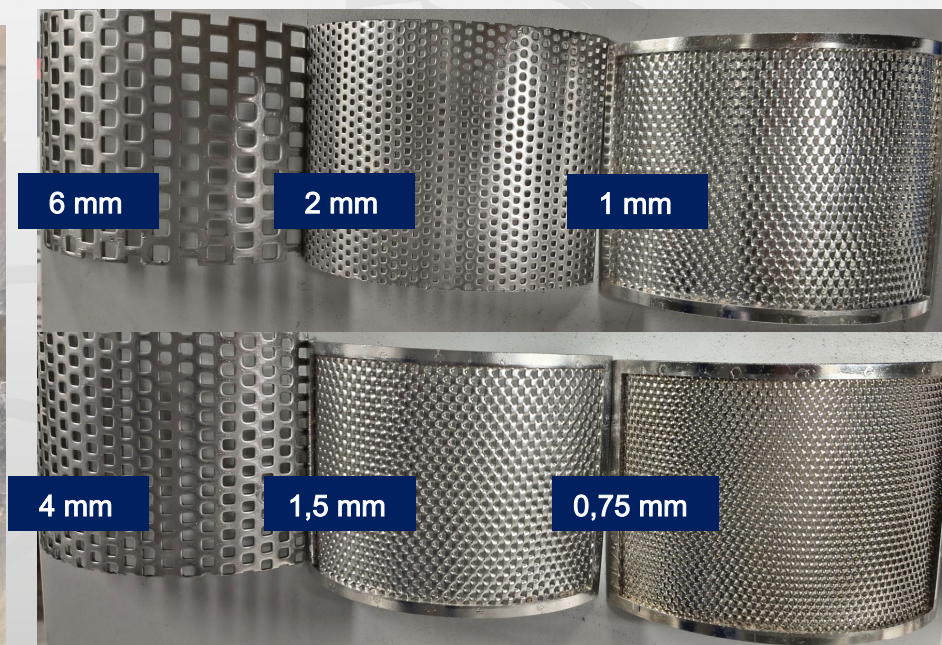
1. Vyvinout základ fyzikálně založeného modelu, který by predikoval výstupní velikost částic v závislosti na parametrech mlýna a biomasy.
2. Experimentálně ověřit, zda teoreticky odvozená závislost bude odpovídat realitě a zda má smysl model dále zpřesňovat.



Buková štěpka – vlhkost 7,3 % hm., unifikována

Mletí – nožový mlýn Retsch SM 300

- Lineární rotor 3 břity délky 96 mm
- Obvodová rychlost: 13,6 m/s (2000 rpm) a 20,4 m/s (3000 rpm) se 3 břity
- Hmotnostní průtok 10 kg/h a 15 kg/h
- 2 sady mlecích sít (4; 1,5; 0,75 mm) a (6; 2; 1 mm)





ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ



RAW MATERIAL



KNIFE MILL SM300
RETSCH Ltd

POWER

POWER ANALYSER
FLUKE 438II
Fluke Europe BV

BLOWER FOR SM300
RETSCH Ltd



CYCLONE FOR SM300
RETSCH Ltd

STORAGE VESSEL





- Před a po každém mletí měřena velikost částic pomocí síťové analýzy.

Charakteristika velikosti částic:

- Síťová analýza dle doporučení normy ASABE S424.1.
- Naměřené body integrální distribuce proloženy RRSB modelem.

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D_P}\right)^n}$$

- Vyhodnocení:

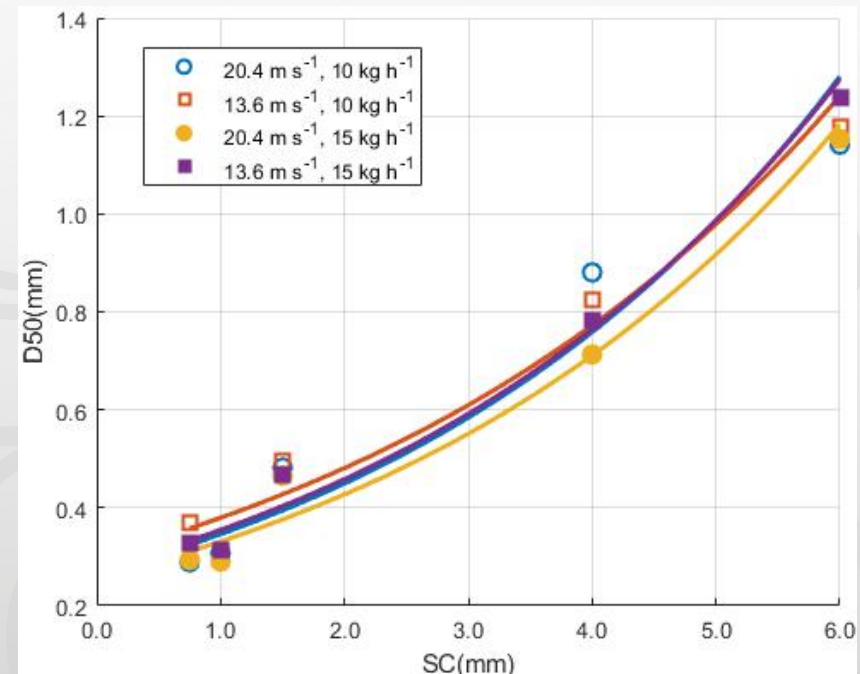
- D_P a n

- *Velikosti* D_{10} , D_{50} , D_{90}

Body, kde integrální distribuční funkce nabývá hodnoty 10, 50 a 90 %

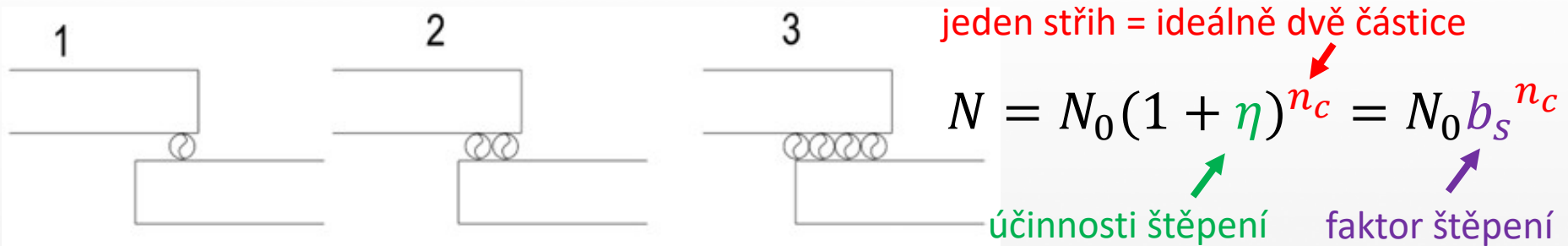
- R^2 pro proložení RRSB modelem

Koeficient determinace





CHARAKTERISTICKÁ VELIKOST = f (PARAMETRŮ BIOMASY A MLÝNA)



zachování objemu částic

$$N_0 d_0^3 = N_n d_n^3$$



evoluce částic

$$d_n = b_s^{-\frac{n_c}{3}} d_0$$



exponenciální štěpení

$$d_n = d_0 e^{-\lambda n_c}$$

$\lambda = f(\text{velikost oka síta, otáčky a geometrie rotoru, hmotnostní průtok, vlhkost a mez pevnosti ve stříhu biomasy})$

$$\lambda = \frac{\ln b_s}{3}$$

VÝZKUMNÁ HYPOTÉZA

Konstantní otáčky rotoru, konstantní průtok biomasy → velikost částic funkcí velikosti ok sít.

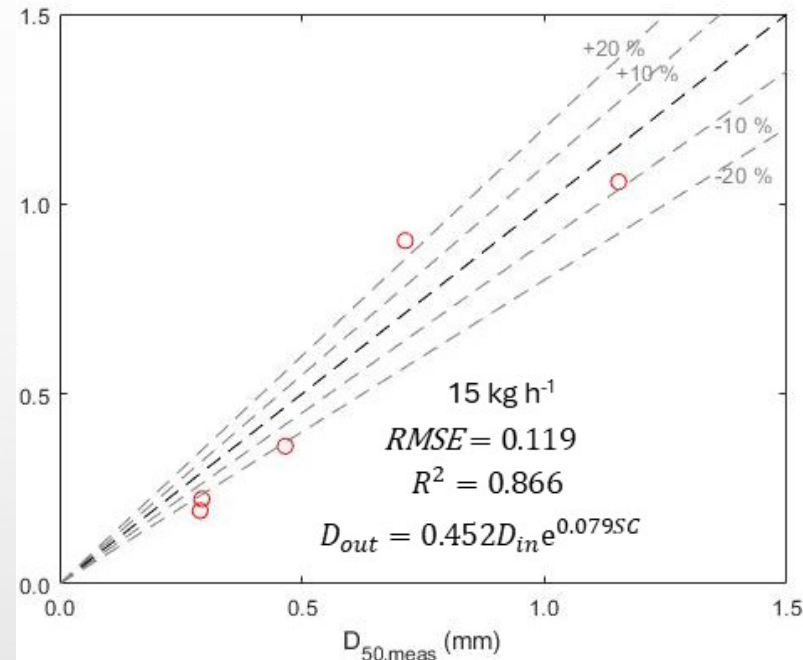
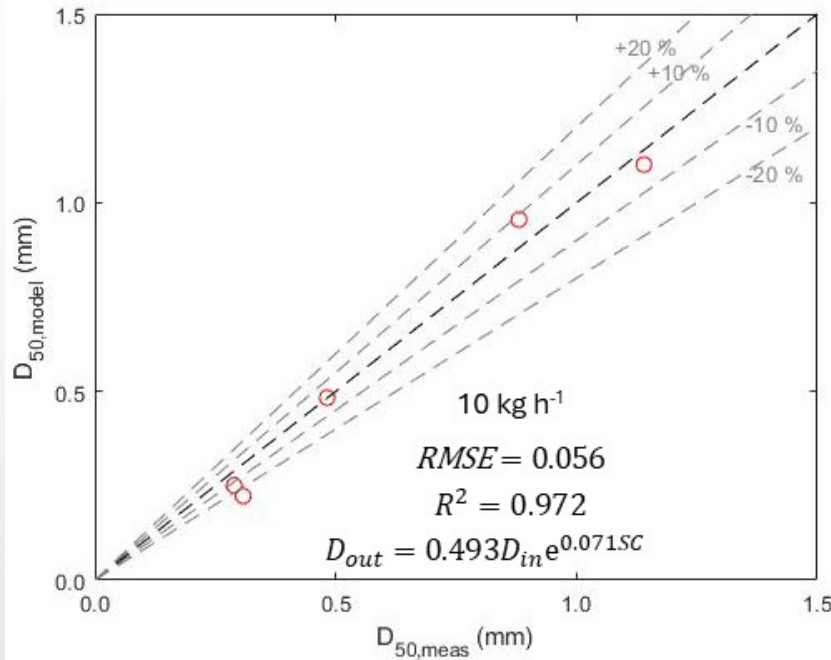
TESTOVÁNÍ

$$D_{out} = A \cdot D_{in} e^{B \cdot SC}$$



CHARAKTERISTICKÁ VELIKOST = f(SC)

$$D_{out} = A \cdot D_{in} e^{B \cdot SC}$$



20.4 ms⁻¹ (3000 rpm)

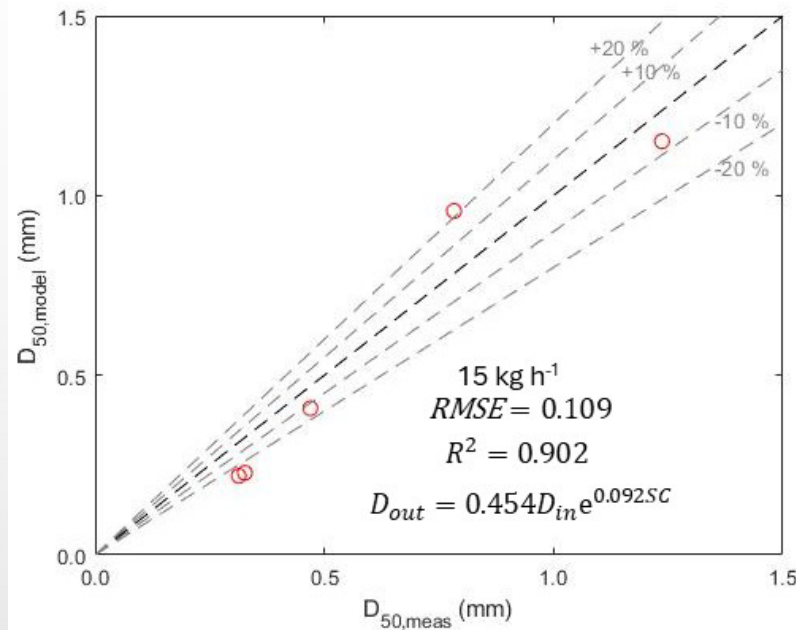
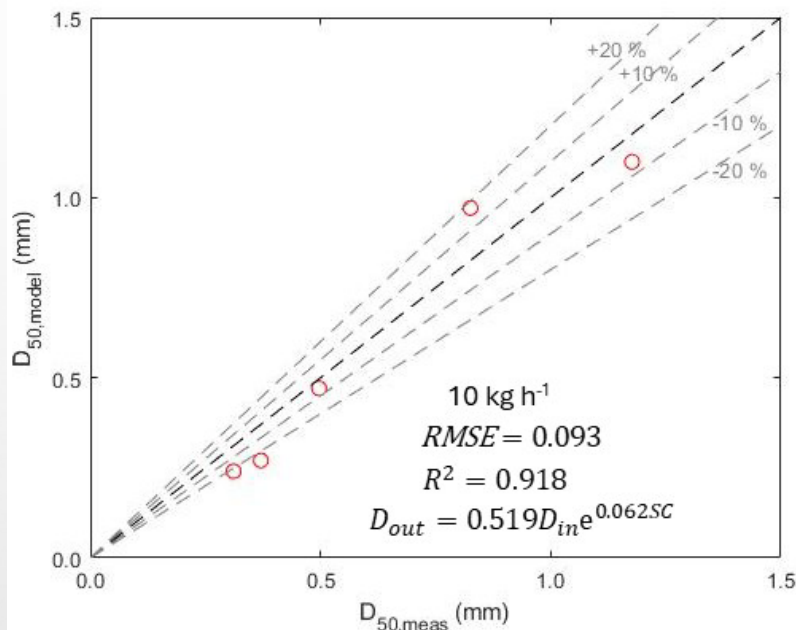
Porovnání modelovaných a měřených dat

Parametr n nevykazoval výrazný trend v závislosti na velikosti oka síta, obvodové rychlosti, hmotnostním průtoku



CHARAKTERISTICKÁ VELIKOST = f (SC)

$$D_{out} = A \cdot D_{in} e^{B \cdot SC}$$



13.6 ms⁻¹ (2000 rpm)

Porovnání modelovaných a měřených dat



CO SI ODNĚST:

- Distribuce velikosti částic při mletí štěpky odpovídá RRSB modelu.
- Dominantní vliv na velikost částic má velikost oka propadového síta mlýnu.
- Exponenciální základ fyzikálně založeného modelu odpovídá realitě. Má tedy velký smysl pokračovat ve výzkumu.
- Je třeba hledat a validovat závislosti součinitele λ na obvodové rychlosti, hmotnostním průtoku a vlastnostech biomasy.
- Model může být do budoucna kalibrován pro mlýny v průmyslové velikosti.