

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2018

**JAN
CHVÁTAL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chvátal** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **419798**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Drcení odpadů

Název diplomové práce anglicky:

Mechanical size reduction of wastes

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši shrnující informace o drtičkách a mlýnech pro rozpojování vybraného typu odpadu. Diskutujte vlastnosti vybraného odpadu, typické konstrukční uspořádání drtiček, tvary rotorů a statorů, typické provozní parametry.
- 2) Analyzujte současný stav drtičky, experimentálně stanovte hodnoty rozpojovací energie v závislosti na výstupní velikosti částic pro vybraný typ odpadu v závislosti na nastavení provozních parametrů drtičky.
- 3) Doporučte konstrukční optimalizaci stroje s cílem dosáhnout požadované kvality produktu.

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

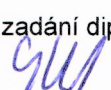
doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**


Platnost zadání diplomové práce: _____



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



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



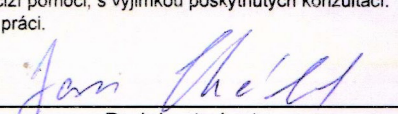
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.04.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

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

V Praze dne

.....
Bc. Jan Chvátal

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Lukášovi Krátkému, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a odborné vedení.

Také děkuji firmě Lavaris s.r.o. za pomoc s praktickou částí a za trpělivost při měřeních.

Anotační list

Jméno autora: Jan

Příjmení autora: Chvátal

Název práce česky: Drcení odpadů

Název práce anglicky: Mechanical size reduction of wastes

Rozsah práce:
počet stran: 125
počet obrázků: 88
počet tabulek: 12
počet příloh: 10

Akademický rok: 2017/2018

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky (U12118)

Studijní program: Procesní technika (3909T012)

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

Oponent:

Konzultant práce:

Zadavatel: Ústav procesní a zpracovatelské techniky (U12118)

Anotace česky: Tato práce se zabývá technologiemi pro zpracování odpadů, a především pak zpracování pneumatik. Obsahuje přehled jednotlivých technologií, které popisují drcení a mletí pneumatik. Poté se věnuje vyhodnocení měření získaných ve firmě Lavaris s.r.o., která se věnuje návrhu a výstavbě linek na aktivní gumový prach. Poslední část pak obsahuje optimalizaci mlecího procesu.

Klíčová slova: technologie zpracování pneumatik, drcení, mletí

Anotace anglicky: This thesis is focused on waste and especially tyre processing technologies. It consists of summary of processing technologies for shredding and milling tyres. Thesis also contains an evaluation of the measurements obtained at Lavaris s.r.o., which focuses on the design and construction of active rubber powder lines. The last part contains the optimization of the milling proces.

Klíčová slova: tyre recycling processes, shredding, milling

Využití: Optimalizace mlýna pro získání aktivního gumového prášku

OBSAH

| | |
|--|----|
| Poděkování | 4 |
| Anotační list..... | 5 |
| OBSAH | 6 |
| ÚVOD..... | 8 |
| 1 METODY ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ | 9 |
| 2 ZPRACOVÁNÍ PNEUMATIK..... | 12 |
| 2.1 PNEUMATIKA..... | 13 |
| 2.2 SLOŽENÍ A VLASTNOSTI PNEUMATIK | 15 |
| 2.3 ZPRACOVÁNÍ OPOTŘEBENÝCH PNEUMATIK..... | 16 |
| 2.3.1 PROTEKTOROVÁNÍ..... | 16 |
| 2.3.2 ODSTRAŇOVÁNÍ OCELOVÝCH VLÁKEN | 17 |
| 2.3.3 PRIMÁRNÍ DRCENÍ | 18 |
| 2.3.4 MAGNETICKÁ SEPARACE | 20 |
| 2.3.5 ZPRACOVÁNÍ GUMOVÉ DRTI..... | 21 |
| 2.4 SEKUNDÁRNÍ MLETÍ..... | 23 |
| 2.4.1 DVOUVÁLCOVÉ MLÝNY | 23 |
| 2.4.2 NOŽOVÉ MLÝNY | 24 |
| 2.4.3 KRYOGENNÍ MLÝNY..... | 25 |
| 2.4.4 ŠNEKOVÉ MLÝNY..... | 25 |
| 2.5 TERCIÁRNÍ MLETÍ | 26 |
| 2.5.1 KRYOGENNÍ MLÝN | 26 |
| 3 MĚŘENÍ NA VYSOKORYCHLOSTNÍM MLÝNU | 27 |
| 3.1 O FIRMĚ LAVARIS s.r.o. | 27 |
| 3.2 LINKA NA VÝROBU AKTIVNÍHO GUMOVÉHO PRACHU | 28 |
| 3.3 VSTUPNÍ MATERIÁL..... | 31 |
| 3.3.1 SLOŽENÍ VSTUPNÍHO GRANULÁTU | 31 |
| 3.3.2 VLASTNOSTI VSTUPNÍHO GRANULÁTU | 33 |
| 3.4 PROCES MLETÍ | 34 |
| 3.4.1 ŠNEKOVÝ DOPRAVNÍK..... | 34 |
| 3.4.2 VYSOKORYCHLOSTNÍ MLÝN | 35 |
| 3.4.3 VENTILÁTOR..... | 37 |
| 3.4.4 CYKLÓN..... | 38 |
| 3.4.5 VIBRAČNÍ TŘÍDIČE | 39 |
| 3.5 MĚŘICÍ TECHNIKA | 40 |
| 3.5.1 FREKVENČNÍ MĚNIČ SIEMENS MICROMASTER 440 | 40 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.5.2 | MĚŘENÍ TEPLoty | 40 |
| 3.5.3 | FREKVENČNÍ MĚNIČ VENTILÁTORU | 42 |
| 3.5.4 | SÍTA | 43 |
| 3.5.5 | MĚŘENÍ HMOTNOSTI | 43 |
| 3.6 | NASTAVENÍ MĚŘENÍ | 44 |
| 3.6.1 | ROVNÉ ZUBY SE TŘEMI ŘADAMI | 44 |
| 3.6.2 | ROVNÉ ZUBY SE ČTYŘMI ŘADAMI | 45 |
| 3.6.3 | ŠIKMÉ ZUBY | 47 |
| 3.7 | PRŮBĚH MĚŘENÍ | 48 |
| 3.8 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 49 |
| 3.8.1 | MLETÍ NA ROVNÝCH TŘÍŘADÝCH ZUBECH (A) | 50 |
| 3.8.2 | MLETÍ NA ROVNÝCH ČTYŘŘADÝCH ZUBECH (B) | 59 |
| 3.8.3 | MLETÍ NA ŠIKMÝCH ZUBECH (C) | 68 |
| 3.9 | VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ | 79 |
| 3.9.1 | HODNOTA D_{50} | 79 |
| 3.9.2 | MĚRNÁ ROZPOJOVACÍ ENERGIE | 82 |
| 3.9.3 | BONDOVA KONSTANTA C_B | 88 |
| 3.10 | NÁVRH OPTIMALIZACE MLETÍ | 91 |
| | ZÁVĚR | 94 |
| | SEZNAM NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ | 95 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 96 |
| | SEZNAM TABULEK | 98 |
| | POUŽITÁ LITERATURA | 99 |
| | PŘÍLOHY | 105 |

ÚVOD

Každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v zákoně o odpadech č. 185/2001 Sb., a č. 31/2011 Sb., a jeho poslední novelizace č. 169/2013 Sb. [1]

Přesně touto definicí je popsáno slovo odpad. Odpady jsou důsledkem téměř jakékoliv lidské činnosti a blízce souvisejí také s rozvojem a ekonomickou silou státu. V České republice jsou odpady z velké části skládkovány namísto jejich recyklace a dalšího využití. Pro zlepšení situace se nabízí hned několik řešení. [2]

1) Předcházení vzniku odpadů

Nejoptimálnější varianta – není třeba odpady likvidovat, protože nedochází k jejich tvorbě. Nerealné, nicméně snaha je alespoň vznik odpadů minimalizovat a případně generovat odpady biologicky rozložitelné. [2]

2) Recyklace odpadů

Recyklace odpadů, u kterých se nepodařilo předejít jejich vzniku. Opětovné využití odpadních látek především materiálové nebo energetické. [2]

3) Bezpečné nakládání s odpady

Bezpečným nakládáním s odpady rozumíme oddělené a utříděné shromažďování a skladování odpadů dle druhu. Je však nejméně ekologickou variantou, protože nepředchází vzniku odpadů a nesnaží se je přeměňovat na druhotné suroviny. [2]

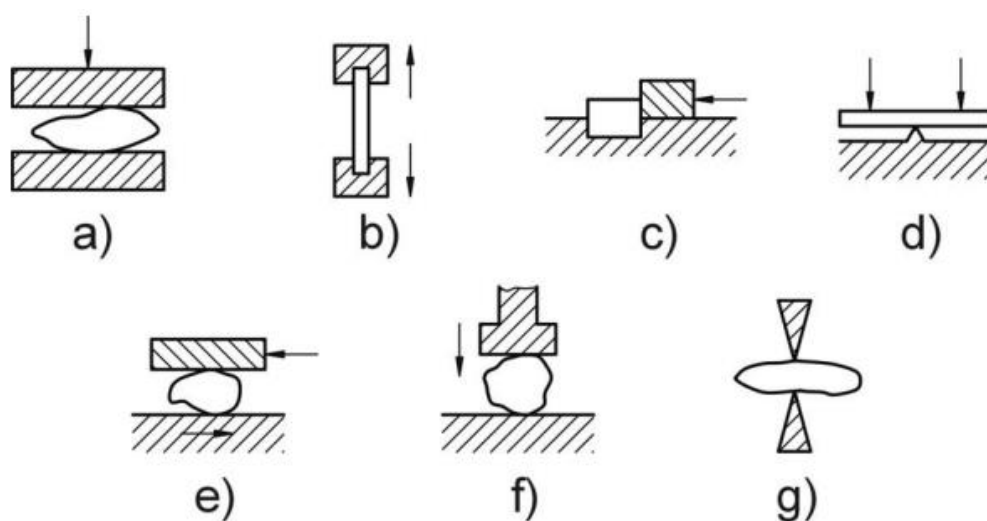
Tato práce se tématem odpadů bude zabývat z hlediska recyklace a s tím související výrobou druhotných surovin. Pro recyklaci bohužel neexistuje nic, jako univerzální technologie. Každá surovina se vyznačuje jinými vlastnostmi, a proto také potřebuje vlastní recyklační linku. První část mé práce bude zaměřena na možnosti zpracování odpadů, a především pak na zpracování pneumatik.

Ve druhé části již práce přejde v praktickou část, která vyhodnocuje naměřené hodnoty při mletí gumového granulátu a poté se snaží tuto linku optimalizovat a predikovat další vývoj.

1 METODY ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, každý typ odpadu vyžaduje svou vlastní technologii na jeho zpracování. V této práci tak vyberu pouze skupinu pevných odpadů, u kterých se k recyklaci používají mlýny nebo drtiče a tyto stroje detailněji rozeberu. Hlavní důraz pak bude brán na technologie určené k rozpojování gumy. [3]

Rozpojovací technologie obecně jsou určeny ke zmenšení velikosti částic. Díky tomu jsou pak částice vhodnější k jejich dalšímu zpracování. Zmenšení částic má obvykle za následek nárůst specifického povrchu, což má pozitivní účinky pro řadu dalších následných procesů. Větší specifický povrch částice totiž zaručuje lepší přenos hmoty, větší prostor pro chemické reakce a tak dále. Možností rozpojení je několik, všechny mají ale společné vyvinutí síly na částici. Jednotlivé způsoby jsou zobrazeny na Obr. 1. [3]



Obrázek 1: Varianty rozpojování pevných částic [3]

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

Rozpojování může obecně probíhat dynamickým účinkem vyvolaným vlivem nárazů do pevných částí zařízení nebo vzájemnými nárazy částic. Druhou variantou vyvolávající rozpojovací účinky je namáhání mezi tvarově různě uspořádanými pracovními členy. [3]

Technologie, které se rozpojováním pevných částic zabývají se nazývají drcení a mletí. Rozdělení těchto dvou kategorií není plně patrné, obvykle se však vychází z dat v Tabulce 1. [4]

| Stupeň rozpojování | | Zrnitost produktu | Optimální typ drtiče nebo mlýna |
|--------------------|-------------|-------------------|-------------------------------------|
| [-] | | [mm] | [-] |
| Drcení | hrubé | nad 125 | čelistový, kuželový ostroúhlý drtič |
| | střední | nad 25 | kuželový tupoúhlý drtič |
| | jemné | do 25 | kladivový, odrazový, válcový drtič |
| Mletí | hrubé | do 3 (do 6) | tyčový, autogenní mlýn |
| | střední | 0,08 – 0,8 | kulový, bubnový, autogenní mlýn |
| | jemné | 0,03 – 0,08 | kulový – troubový mlýn |
| | velmi jemné | 0,01 – 0,03 | kulový – troubový, vibrační mlýn |
| | | 0,003 – 0,01 | tryskový, koloidní mlýn |

Tabulka 1: Rozdělení rozpojovacích technologií dle velikosti zrna [4]

Pro volbu drtiče či mlýna jsou nejdůležitějšími faktory fyzikální vlastnosti zdrobňovaného materiálu, velikost zrn před zdrobňováním, požadovaná velikost zrn po zdrobňování a požadovaný výkon. [4]

Drcení i mletí patří k velice drahým technologiím. U recyklačních linek je téměř 50 procent veškerých nákladů spojeno právě s mletím a drcením. Energetická náročnost rozpojování se dá vyjádřit za předpokladu, že změna měrné energie potřebné pro rozpojení je nepřímo úměrná D^r , takže lze napsat

$$-\frac{de}{dD} = CD^{-r} \quad (1.1-1)$$

Hodnota exponentu r se mění dle jednotlivých autorů:

- a) Rittinger $r = 2$, platí zhruba pro $D < 0,5$ mm,
- b) Bond $r = 1,5$, platí přibližně pro rozmezí $0,5$ mm $< D < 50$ mm,
- c) Kick $r = 1$, platí zhruba pro $D > 50$ mm.

Po integraci rovnice (1.1-1) pak získáme tři rovnice, přičemž každá odpovídá jednomu autorovi.

$$a) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_R D^{-2} dD = C_R \left[\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right] \quad (1.1-2)$$

$$b) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_B D^{-1,5} dD = 2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right] \quad (1.1-3)$$

$$c) \quad e = - \int_{D_1}^{D_2} C_K D^{-1} dD = C_K \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (1.1-4)$$

Pro příklad uvedu hodnoty Bondovy konstanty pro několik materiálů v Tabulce 2.

| Materiál | ρ [kg·m⁻³] | C_B [kWh·$\mu\text{m}^{0,5}$·t⁻¹] | C_B [Ws·m^{0,5}·kg⁻¹] |
|----------------------|--|---|--|
| čedič | 2890 | 112,5 | 405,0 |
| bauxit | 2380 | 52,1 | 187,6 |
| cementový slínek | 3090 | 74,4 | 267,7 |
| cementářská surovina | 2670 | 58,3 | 209,7 |
| ruda chromová | 4060 | 52,9 | 190,4 |
| uhlí | 1630 | 62,7 | 225,5 |
| koks | 1510 | 114,1 | 410,8 |
| práškový korund | 3480 | 320,7 | 1154,3 |
| živec | 2590 | 64,3 | 231,5 |
| žula | 2680 | 79,3 | 285,5 |
| ruda železná | 3960 | 85,5 | 307,8 |
| sádrovec | 2690 | 45,0 | 161,8 |
| ruda olovnatá | 3440 | 62,9 | 226,3 |
| vápenec | 2690 | 64,0 | 230,4 |
| fosfátové hnojivo | 2650 | 71,8 | 258,5 |
| křemen | 2640 | 70,4 | 253,4 |
| struska | 2930 | 86,8 | 312,3 |
| antuka | 2590 | 85,6 | 308,2 |

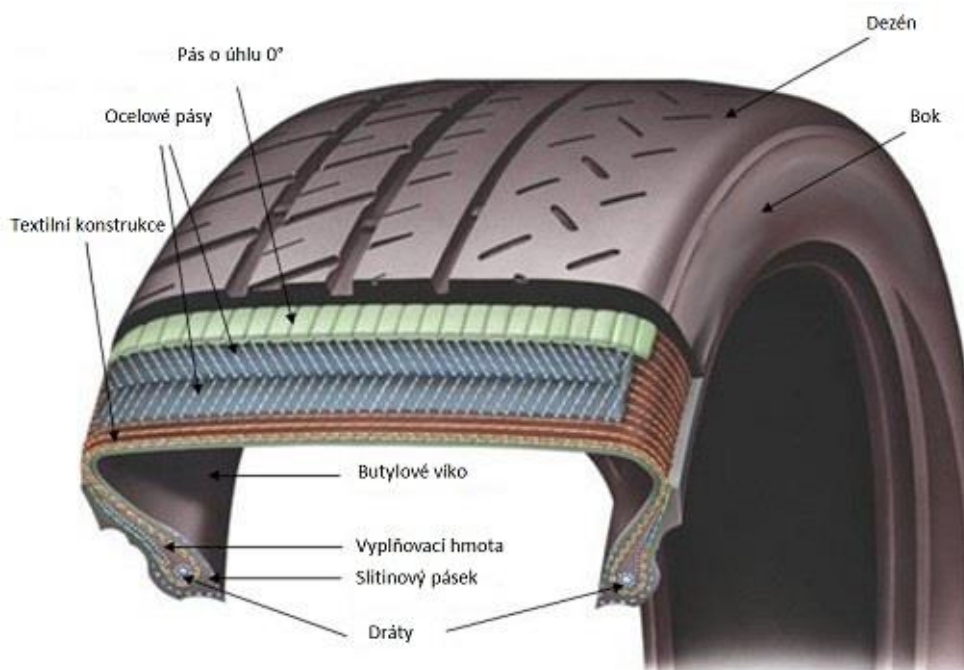
Tabulka 2: Hodnoty konstant C_B pro rovnici (1.1-3) [3]

2 ZPRACOVÁNÍ PNEUMATIK

Aby práce nabrala poněkud konkrétnějšího charakteru, vybral jsem si z nepřehledného množství typů odpadů pneumatiky. Recyklace pneumatik je zatím poměrně neprobádanou oblastí, ve které se uplatňuje velké množství různých procesů.

Zpracovatelský průmysl v odvětví recyklace pneumatik má své hlavní milníky v dobách válek dvacátého století. K největšímu rozvoji došlo v Americe za první, a především pak za druhé světové války. Tou dobou byly Spojené státy americké závislé na importu přírodní gumy do svých gumáren. Kvůli snaze tento dovoz, z důvodu rostoucích cen, omezit, začaly takřka ve všech gumárenských podnicích vznikat linky na mletí použitých pneumatik. Rozemleté gumy měly pak ve výrobních technologiích doplnit gumu přírodní. [5]

Dnes je klasická pneumatika (na Obr. 2) jakýmsi mixem široké škály polymerů, textilií a ocelových dílů. [5]



Obrázek 2: Složení pneumatiky [8]

2.1 PNEUMATIKA

Pneumatika má své dávné předchůdce už v době před 5 000 lety, kdy bylo Sumery sestrojeno první kolo. Hlavními historickými milníky jsou rok 1839 – rok, kdy pan Goodyear vynalezl metodu tepelné vulkanizace kaučuku sírou, a pak rok 1888, kdy veterinář J. B. Dunlop obdržel britský patent na pneumatiku plněnou vzduchem. [19]

Definice pneumatiky podle ČSN 640001 – Plastikářské a gumárenské názvosloví zní následovně:

Pneumatika – plášť, popřípadě s duší a vložkou, namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem

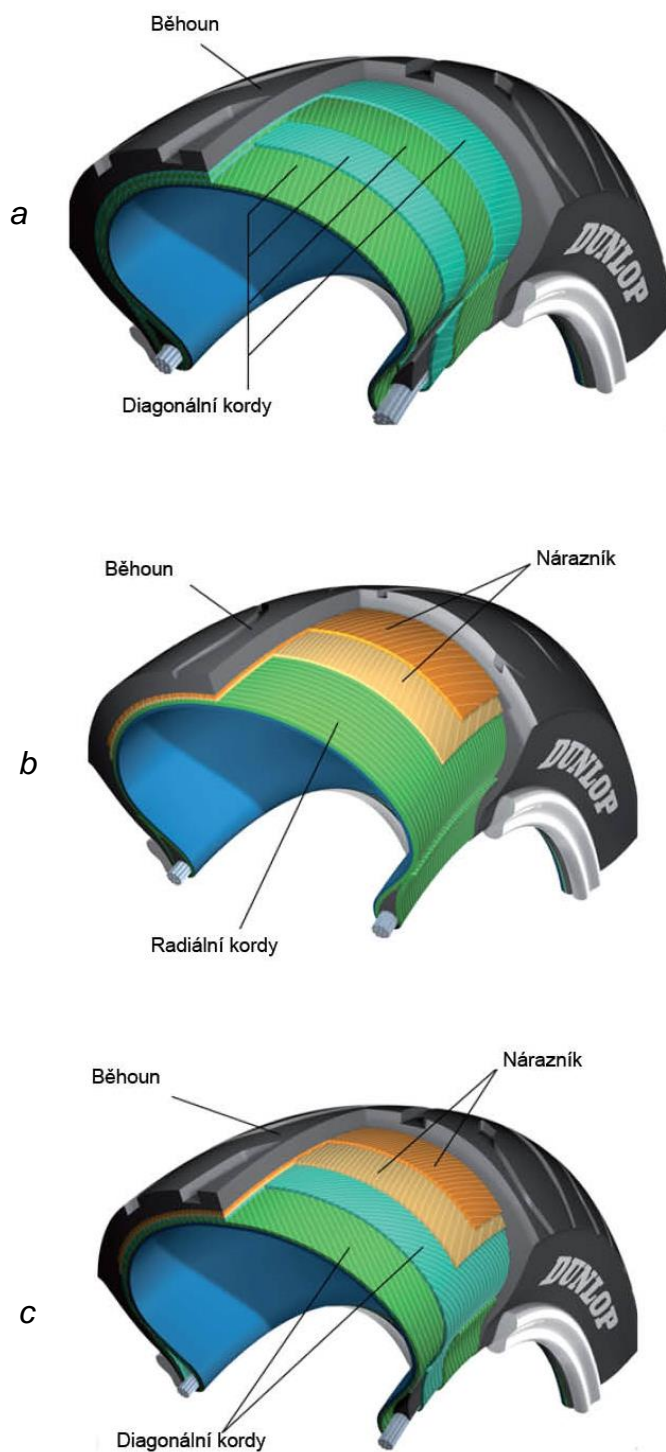
Plášť pneumatiky – pružná vnější část pneumatiky, která zajišťuje styk s vozovkou a která svou patní částí dosedá na ráfek [19]

Vývoj pneumatiky byl přímo úměrný požadavkům na ni kladených. Jsou jimi především nesení tíhy vozidla, přenos sil, snadná obsluha a montáž a také vysoká spolehlivost. V dnešní době rozlišujeme tři základní typy pneumatik. Jedná se o pneumatiky diagonální, radiální a smíšené.

Diagonální pneumatiky – mají kostru tvořenou páry kordových vložek s orientací vláken pod úhlem menším než devadesát stupňů (obvykle 30° až 40°) vzhledem k podélné rovině symetrie. Kordová vlákna sousedních vložek se překřížují a zasahují pod patkovou lanku, okolo kterých jsou přehnuta. Při zatížení pneumatiky a její deformaci se vlákna neprodlužují, ale posunují a namáhají tak pryž mezi nimi na stříh. Tím vzniká teplo a s ním související ztráty.

Radiální pneumatiky – nemají vlákna kordových vložek překřížena. Jsou uložena pod úhlem okolo 90° vzhledem k podélné rovině symetrie. Tato vlákna jsou navíc stabilizována obvodově neroztažitelným pásem – tzv. nárazníkem. U radiálních pneumatik je menší podélný ohyb kordových vláken, nedochází k ohřevu v takovém měřítku, jako u diagonálních pneumatik. Radiální pneumatiky jsou náročnější na výrobu, a i z tohoto důvodu jsou dražší než pneumatiky diagonální.

Smíšené pneumatiky – pojem smíšená pneumatika je kompromisem mezi vlastnostmi typů předchozích. Kostra pneumatiky je podobná kostře diagonálního pláště s vlákny zkříženými pod úhlem standardně vyšším než 60° a navíc je zpevněna pásem ze dvou nebo více vrstev nárazníkového kordu. [19]



Obrázek 3: Typy pneumatik [20]
a – diagonální, b – radiální, c – smíšené

2.2 SLOŽENÍ A VLASTNOSTI PNEUMATIK

Oba pojmy uvedené v nadpise spolu velmi úzce souvisí. S měnícím se složením pryže se totiž mohou poměrně zásadně měnit i její vlastnosti. Samozřejmě největší zastoupení vždy zaujímá uhlík, jeho množství se ale mění dle zvolených aditiv. Reprezentativní příklad složení dezénu, porovnávané dle hmotnostních procent jednotlivých složek, je zobrazeno v tabulce 3.

| Prvková analýza | |
|-----------------|---------|
| Uhlík | 83,27 % |
| Vodík | 7,09 % |
| Dusík | 0,24 % |
| Síra | 1,83 % |
| Saze | 4,78 % |
| Vlhkost | 0,62 % |
| Kyslík | 2,17 % |
| Celkem | 100 % |

Tabulka 3: Rozbor dezénu pneumatiky dle hmotnostních procent [5]

Pryž jako taková je černá matná látka, která může být vyráběna buď z přírodního kaučuku nebo z kaučuku syntetického. Jedná se o látku, která nevede ani teplo ani elektrický proud. Právě kvůli ochraně před elektřinou nebo teplem bývá mnoho materiálů pogumováno. Jedná se o elastickou, houževnatou a poddajnou látku, jejíž hustota se pohybuje standardně okolo 1 150 kg/m³. Velkou nevýhodou pryže je ovšem absence biodegradability. To znamená, že veškeré gumové produkty přežijí mnoho lidských generací a postupně víc a víc zaplavují planetu. Z tohoto důvodu je nutné věnovat se problematice zpracování pneumatik a možnostem jejich dalšího průmyslového využití. [5]

2.3 ZPRACOVÁNÍ OPOTŘEBENÝCH PNEUMATIK

Primární metody zpracování pneumatik používají jako vstupní surovinu sjetou nebo jinak poničenou pneumatiku. Nerozlišujeme, zda se jedná o pneumatiku osobních automobilů, nákladních automobilů či dokonce letadel. Pro všechny platí až na malé odchylky totožné alternativy zpracování. [5]

2.3.1 PROTEKTOROVÁNÍ

První varianta zpracování sjetých nebo jinak z provozu vyřazených pneumatik je odlišná od ostatních. Jedná se totiž o protektorování, které samo o sobě pneumatiku nerecykluje, ale pouze prodlužuje její životnost. Protektorování bylo vynalezeno již roku 1891 firmou Michelin. Je vhodné pouze pro pneumatiky s nepoškozenou ocelovou kostrou. Protektorovat pneumatiky lze u osobních automobilů pouze jednou. U autobusových pneumatik lze proces však opakovat třikrát, u pneumatik nákladních automobilů čtyřikrát a u letadlových kol dokonce až osmkrát. Existují dvě možnosti, jak pneumatiky protektorovat. První z nich je protektorování za tepla. To se podobá samotné výrobě nových pneumatik. Nový běhoun, který je standardně vyroben na vytlačovacím stroji, je pokládán přímo na ocelovou kostru. Ta je pak i s čerstvým běhounem vložena do vulkanizační tvárnice s požadovaným dezénem. Protektorování za studena se pak liší pouze tím, že vyrobený běhoun se nejprve předvulkanizuje a teprve poté je vložen na ocelovou kostru. [6]



Obrázek 4: Protektorování za tepla [9]

2.3.2 ODSTRAŇOVÁNÍ OCELOVÝCH VLÁKEN

U všech ostatních způsobů recyklace je nutné pneumatiku nejprve zbavit ocelových zpevňovacích vláken. Vlákna jsou součástí téměř všech pneumatik od malých osobních aut až po velké průmyslové stroje a tvoří takzvanou kostru, která pomáhá udržet tlak vzduchu a tlumí vertikální nárazy. Na tuto činnost byl vynalezen speciální stroj, který pneumatiku nejdříve pevně ukotví. Poté se skrze středový otvor zahákne do pneumatiky a pomalu z ní vytahuje provazce ocelových drátů. Ovládání těchto strojů bývá obvykle dálkově řízeno z důvodu hrozícího nebezpečí při deformaci pneumatiky. Příklad takového stroje od společnosti Eagle International je vidět na obrázku 5. [10]



a)



b)

Obrázek 5: Odstraňování ocelových částí z pneumatik [7]

a – stroj společnosti Eagle International; b – detail háku při navíjení ocelových vláken

2.3.3 PRIMÁRNÍ DRCENÍ

Pro lepší možnosti využití potenciálu odpadní pryže je nutné pneumatiky nasekat a nadrtit na menší díly. Díky tomu se zaprvé usnadní jejich přeprava a zadruhé zařízení pro jejich další zpracování nemusí dosahovat tak robustních rozměrů, jako dále uvedené primární zpracovatelské stroje. Pro primární zpracování se používají tři nejčastější varianty, kterými jsou gilotina, válcový drtič a úderový drtič. [5]

2.3.3.1 GILOTINA

Gilotina se svou stavbou příliš neliší od středověkých strojů, užívaných popravčími. Její využití při zpracování pneumatik je však o něco umírněnější. Ze všech tří variant má ovšem nejmenší využití, protože pneumatiku naseká pouze na části, které jsou ale moc velké na další zpracování. Musí tak být ještě zpracovávány na některém z dále uvedených zařízení. Využití gilotiny jako takové se tak omezuje pouze na nasekání celých pneumatik na menší kusy pro lepší přepravování mezi fabrikami.

Gilotina užívaná pro sekání velkých pneumatik je zobrazená na obrázku 6. [5]



Obrázek 6: Gilotina užívaná pro sekání pneumatik [11]

2.3.3.2 VÁLCOVÝ DRTIČ

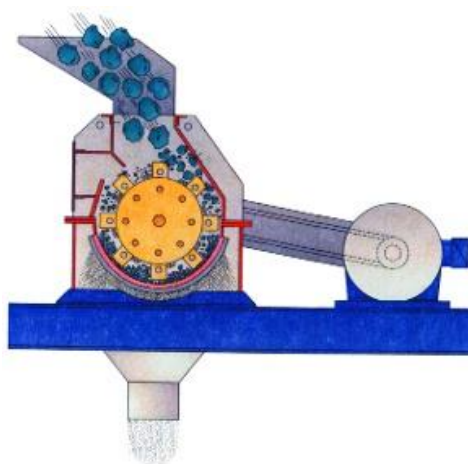
Jinou variantou pro sekání pneumatik je válcový drtič. Ten může být s jedním nebo také se dvěma válci. Jednoválcové drtiče mají pevnou protidesku. K drcení tak dochází právě vtažením gumy do neměnné mezery mezi rotujícím válcem a touto deskou. Dvouválcové drtiče se pak otáčejí obvykle proti sobě s rozdílnou rychlostí. Povrch válců pro drcení pneumatik navíc bývá vybaven různě tvarovanými noži, které, spolu s třecí silou, unášejí pneumatiku do drticí zóny mezi válce. V této zóně nože zaseklé do pneumatiky gumu trhají a dochází ke stříhu a tím k „porcování“ pneumatiky. [3] [5]



Obrázek 7: Válcový drtič s upravenými válci pro drcení pneumatik [12]

2.3.3.3 ÚDEROVÝ DRTIČ

Třetí variantou, která je v hojně míře užívána pro prvotní drcení pneumatik, jsou úderové drtiče. Tyto drtiče se užívají jak v horizontální, tak i ve vertikální podobě. Zařízení obvykle k drcení potřebuje velké množství energie. Drtič má na rotoru několik pevně nebo otočně připojených kladiv. Tato soustava je umístěna v rozpojovací komoře, která má ve spodní části síto pro propad namletých kusů gumy. Výstup z úderového drtiče je nehomogenní a obsahuje širokou škálu více či méně jemných frakcí. [3] [5]

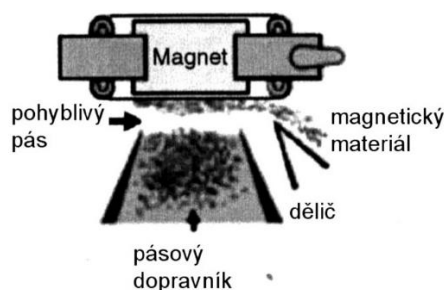


Obrázek 8: Schéma úderového drtiče [13]

Účinnost úderového drtiče se dá zvýšit, pokud se rozhodneme přistoupit ke kryogenní variantě drcení. Tím se rozumí použití kapalného dusíku nebo jiného chladícího média. Pokud volba padne na kapalný dusík, používá se pro tuto techniku o teplotě -196°C . Původně elastický materiál pneumatiky díky výraznému ochlazení ztuhne a na úderovém drtiči bývá dosaženo dvoj až trojnásobného výkonu při nezměněném elektrickém příkonu. Nevýhodou této varianty je však poměrně vysoká cena chladícího média a s ní související velké náklady na provoz linky. [5] [6] [14]

2.3.4 MAGNETICKÁ SEPARACE

Po rozemletí celých pneumatik tak získáváme gumovou drť, zvanou „chipsy“. Tyto „chipsy“ mají obvykle rozměr cca 20x20 cm a obsahují v sobě ještě zbytkové kousky kovu a textilu. Textil pro další zpracování zpravidla nevádí. Jinak je tomu ovšem s kovovými částmi. Ty se musí po nařezání odstranit. Nejsnazším řešením je vysypat gumovou drť na pásový dopravník a nad něj umístit magnet s pohyblivým pásem, jak je vidět na obrázku 9. [5] [15]



Obrázek 9: Magnetický odlučovač kovových částí [5]

2.3.5 ZPRACOVÁNÍ GUMOVÉ DRTI

2.3.5.1 SPALOVÁNÍ

První a v současnosti nejrozšířenější variantou je energetické využití. Pneumatiky totiž mohou posloužit jako palivo, a to především v cementárnách, spalovnách a teplárnách. Právě v cementárnách se navíc využívá i síra, která je v dezénu pneumatiky obsažena. Při spalování pneumatik se uvolňuje značné teplo. Pro porovnání jedna tuna pneumatik dokáže nahradit až 750 m³ zemního plynu nebo 1,25 tuny uhlí. Výhodou pak může být i možnost spalovat pneumatiky v celku. V tomto případě tedy i s ocelovými částmi. Ty jsou mechanicky odstraňovány až z popelu, ale opět mohou najít uplatnění v cementárnách jako příměs do cementu. Aby ovšem pálení pneumatik neznělo příliš idylicky, je nutné vzít v potaz širokou škálu zplodin, které při tomto ději vznikají. Největší část z nich je tvořena oxidem uhelnatým a sazemí, najdeme zde však i benzen, styren, oxid siřičitý, sirné deriváty a mnoho dalších chemických sloučenin. Tyto zplodiny musejí být zachytávány a redukovány na méně škodlivé látky. V EU se takto zpracovává až 50 % ze všech sebraných ojetých gum. [6] [16]

Jak bylo uvedeno v minulém odstavci, spalováním pneumatik vzniká spousta nebezpečných škodlivin. Kvůli tomu by si každý měl rozmyslet jejich spalování v domácím kotli. Zaprvé dojde totiž k jeho zanesení a za druhé se při hoření pneumatiky uvolňuje hustý černý kouř. Při inhalaci tohoto kouře může dojít k podráždění očí, dráždivému kašli a celkové únavě organismu. Při pálení gumy pouze v přírodním ohništi navíc hrozí průnik látek jako je pyrolitický olej do půdy a kontaminace daného místa. Pokud se jedná o požáry velkých odkladišť pneumatik, jsou všechny tyto důsledky mnohonásobně vyšší. Hasiči při hašení takovýchto požárů užívají sice CO₂, písek nebo pěnu, ale při deštích dochází ke spláchnutí těchto pyrolytických olejů do kanalizací, čímž se rozsah kontaminace ještě zvyšuje. [16]

2.3.5.2 PYROLÝZA

Další možností, jak využít gumové „chipsy“ je využití pyrolýzy. Jde o termický rozklad za nepřístupu kyslíku uvnitř reaktoru při teplotách 600-850°C. Výsledkem pyrolýzy je pak plynná a pevná složka. Pevnou složkou jsou v tomto případě saze a případně zbytky kovů. Se zvyšující se teplotou stoupá tvorba sazí a tím roste obsah uhlíku v tuhém zbytku. Získaný plyn se dále odvádí do chladiče. Ta část, která nezkondenzuje se využívá jako zdroj energie pro reaktor nebo pro sušení gumové drtě. Zkondenzovaná část se skládá z olejů s obsahem vyšších aromátů. Ty se dají poté skladovat a využít jako plnohodnotné palivo. [6] [16] [17]

2.3.5.3 ALTERNATIVNÍ VYUŽITÍ

Po primárním mletí jsme z celých pneumatik získali kousky gumy o velikost zhruba 20x20 centimetrů. Ty se dají využít například jako povrchový materiál pro dětská hřiště, pro koňské výběhy nebo jako alternativa za mulčovací kůru.



Obrázek 10: Povrch dětského hřiště tvořený drcenými pneumatikami [25]

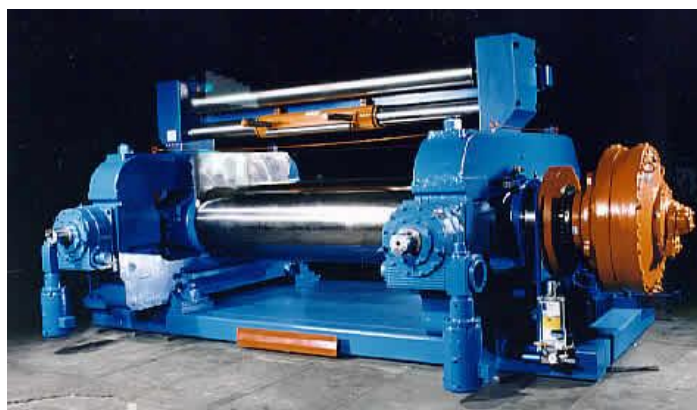
Pokud se ale s tímto využitím nespokojíme, budeme nuceni tyto kusy „roztrhat“ na mnohem menší částičky. Tento proces nazýváme sekundárním mletím. [5]

2.4 SEKUNDÁRNÍ MLETÍ

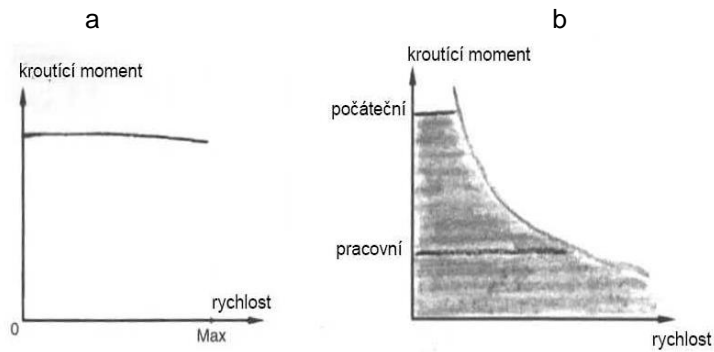
Pod tímto pojmem rozumíme zpracování pryže na jednom stroji nebo obsáhlejší proces, který postupně přechází z jednoho zařízení na druhé. Stejně jako u primárního drcení je možnost volit mezi normálním a kryogenním zpracováním. Výčet zařízení, která se pro tuto činnost používají je rozsáhlý, uvedu tedy pouze hlavní zástupce. [5]

2.4.1 DVOUVÁLCOVÉ MLÝNY

Dvouválcové mlýny užívané pro sekundární zpracování materiálu se svou stavbou příliš neliší od těch, které byly uvedené dříve u primárního drcení pneumatik. U sekundárního zpracování už však nejsou třeba tak veliké rozměry a mlýny nepotřebují tak veliký příkon. Donedávna měly ještě oba válce společnou převodovku a motor. V dnešní době se už jednotky zásadně posunuly vpřed. Namísto používání jedné převodovky je každý válec řízen svým hydraulickým motorem – viz obrázek 11. Díky tomu se značně omezila prostorová náročnost zařízení a zlepšila se účinnost i možnost proces ovládat. Operátor výroby má totiž možnost hydraulicky měnit rychlost jednotlivých válců za účelem zvýšení produktivity. Na obrázku 12, na další straně, je vidět rozdíl mezi provozními parametry hydraulicky řízených válců a provozními parametry převodovkou řízených válců. Ze zkušeností s měřeními vyplývá, že pro dosažení dobrých výsledků je nejlepší ponechat jeden válec s konstantními otáčkami, zatímco otáčky druhého se pozvolna zvedají. Dvouválcové mlýny se vyrábějí velmi robustní a jejich příkon se dle jejich velikosti pohybuje mezi 100-750 kW. [5]



Obrázek 11: Hydraulicky poháněný dvouválcový mlýn značky RCM [18]

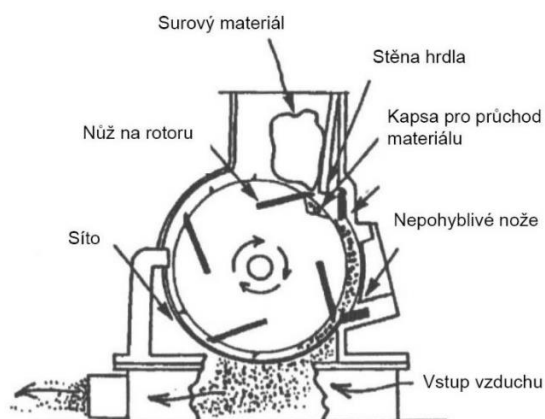


Obrázek 12: Závislost kroutícího momentu na rychlosti [5]

a – Hydraulicky řízený mlýn; b – Převodovkou řízený mlýn

2.4.2 NOŽOVÉ MLÝNY

Nožové mlýny jsou vysokorychlostní zařízení, která jsou složena z nožů rozložených po celé délce rotoru. Gumové „chipsy“ jsou vedeny do mlýna a jsou drceny, a hlavně stříhány mezi noži na rotoru a stěnou mlýna, která je vybavena nepohyblivými noži. Výstupní velikost částic je regulována velikostí síta ve spodní části mlýna. Mlýny jsou obvykle robustní zařízení, rotory mohou být otevřené nebo uzavřené v komoře. Vyšší účinnosti bývá dosaženo u první varianty, tedy u rotorů otevřených. Zde se dostáváme na 6 až 2 milimetry velký výstupní granulát. Tyto jednotky mají příkon obvykle 35-350 kW. Jejich nevýhodou je ovšem velký hluk, kvůli kterému je nutné uzpůsobit bezpečnost práce na pracovišti. Ve srovnání otevřených a uzavřených rotorů hraje ve prospěch otevřených i vyšší průchodnost materiálu, menší náročnost na chlazení a snadnější čištění. Výhodou rotorů uzavřených v komoře je naopak menší riziko úrazu. Princip nožového mlýna je vyobrazen na obrázku 13. [5]



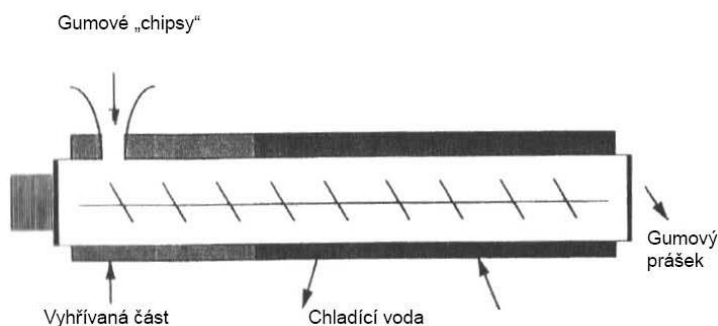
Obrázek 13: Řez nožovým mlýnem [5]

2.4.3 KRYOGENNÍ MLÝNY

Kryogenní technologie jsou velmi populární při zpracování pneumatik. Platí u nich samozřejmě, že čím lepších chceme dosáhnout výsledků, tím náročnější po ekonomické stránce toto mletí bude. Nicméně kryogenní mletí nabízí celou řadu důvodů, proč do této technologie zainvestovat. Prvním důvodem je snadná separace vláken a ocelových částí z gumového šrotu. Vstupní surovinou do tzv. kryo-mlýna je sedmi až deseti centimetrový granulát. Ten je vháněn do komory s tekutým dusíkem o teplotě $-230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jak se kapalný dusík vypařuje, mění se elastická guma na křehkou a sklovitou. Takto zmražené částice jsou poté vháněny do úderového mlýna, kde jsou rozbíjeny. Dále jsou pak odstraňována textilní vlákna a ocelové prvky. Na konci mlýna je síto, které určuje velikost výstupní suroviny. Částice, které sítem nepropadnou jsou znovu vedeny na vstup a proces se u nich opakuje. Výsledná velikost granulátu se poté pohybuje okolo částic o velikost 1 mm. Jelikož se jedná o vysokorychlostní jednotky, je i u těchto mlýnů třeba používat ochranné pomůcky proti hluku. [5]

2.4.4 ŠNEKOVÉ MLÝNY

Šnekové mlýny neboli extrudery našly své uplatnění i v oblasti drcení pneumatik. Jejich velké využití je především v procesu opačném, tedy při vytlačování polymerů. Kousky pneumatik jsou přiváděny do násypky, odkud jsou šnekem vedeny do válcovité části extruderu. Dále už záleží na konkrétním designu šneku, ale v každém případě v extruderu dochází ke stříhu. Částice se navíc otírají o stěny stejně jako o sebe vzájemně. Při tomto procesu vzniká velké množství tepla, které musí být odváděno. V opačném případě by docházelo k vulkanizaci a následnému poškození gumy. [5]



Obrázek 14: Schéma šnekového mlýna [5]

2.5 TERCIÁRNÍ MLETÍ

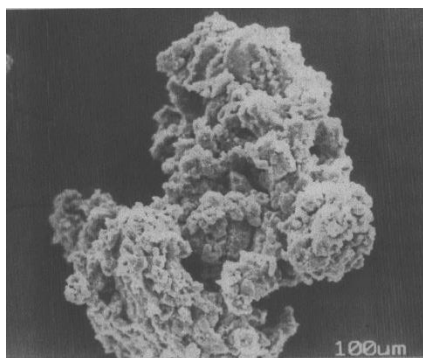
Gumový granulát vzniklý sekundárním mletím má obvykle velikost částic okolo 1 až 4 milimetrů. Právě takto veliký materiál je vstupem pro další mletí na vysokorychlostních mlýnech. V praktické části práce, která bude nyní navazovat, bude rozebráno mletí na dvourotorovém mlýnu s různými variantami zubů. Není to ovšem jediný způsob dalšího zpracování. Jinými alternativami jsou opět kryogenní mletí, méně rozšířené je pak mokré mletí. [5]

2.5.1 KRYOGENNÍ MLÝN

O kryogenním mletí již bylo v práci napsáno mnoho. Nespornou výhodou jsou nižší teploty při mletí, které téměř vylučují riziko výbuchu. Při terciárním mletí se téměř vždy jedná o nárazové mlýny, které mohou být s jedním nebo i dvěma rotory. Rotor samotný je nejčastěji osazen piny, které rozbíjí zkřehlý granulát na částice o velikosti desetin až setin milimetru. Příklad mikroskopicky zvětšeného výstupu z kryogenního mlýnu je na obrázku 16. [21] [22]



Obrázek 15: Kolíkový nárazový mlýn [23]



Obrázek 16: Mikroskopicky zvětšené částice rozemleté gummy [5]

3 MĚŘENÍ NA VYSOKORYCHLOSTNÍM MLÝNU

3.1 O FIRMĚ LAVARIS s.r.o.

Měření praktické části diplomové práce se odehrávalo v prostorách firmy Lavaris. Slušelo by se tedy tuto firmu představit. Společnost sídlí v obci Libčice nad Vltavou, která je nedaleko Prahy. Zabývá se výzkumem v oblasti využití druhotných surovin v podobě aktivního gumového, kamenného či betonového prachu. Spolu s výzkumnou činností provádí i vývoj a produkci recyklačních linek s vysokorychlostními mlýny. Ty umožňují odpadní látky přeměnit na druhotné suroviny. [24]

Aktivní kamenný prach

- Vzniká mletím kamenných odprašků (z lomu nebo zpracoven kamene)
- Základ pro výrobu stavebního materiálu (cihly, malta, ...)

Aktivní betonový prach

- Vzniká mletím betonových odprašků (rozemletá betonová suť)
- Pojivo pro cementové směsi
- Pojivo a plnivo pro zděné stavební systémy (bloky, cihly)

Aktivní gumový prach

- Vzniká z rozemletých pneumatik
- Náhrada nové pryže v kompozitech
- Přídavky do asfaltu

Mimo výše uvedených linek se firma zabývá i sušením a mletím biomasy, která je dále vhodná jako palivo nebo krmivo. Lavaris vyrábí i linky mobilní, které našly uplatnění i v Saudské Arábii. Z aktuálně chystaných projektů je možné vyzdvihnout například spolupráci na obnově zdemolovaných měst ve válkou sužovaných oblastech Sýrie. [24]

Firma také aktivně spolupracuje s vysokými školami, především pak s VŠCHT, ČVUT a ČZU. V letošním roce projekt výroby aktivního gumového prachu obsadil 3. místo v Celostátní soutěži Ministerstva průmyslu a obchodu. [24]

3.2 LINKA NA VÝROBU AKTIVNÍHO GUMOVÉHO PRACHU

Veškeré v práci dosud uvedené metody zpracování pneumatik se od sebe vlastně příliš neliší. Jejich cílem je přeměnit velkou a nevzhlednou pneumatiku v menší a skladnější odpad. Pokud tento menší odpad nevysypeme rovnou na dětská hřiště, tak co potom s ním? Psal jsem sice o možnostech spalování nebo pyrolýzy, nicméně nejlepší variantou by samozřejmě bylo pneumatiku recyklovat takovým způsobem, abychom z ní mohli vyrábět jiné gumové předměty nebo třeba i nové pneumatiky. Samozřejmě za předpokladu, že se vlastnosti našich výrobků nebudou lišit od pryže „čerstvě“ vyrobené.

Přesně tímto směrem se ubírá technologie výroby gumového prachu ve firmě Lavaris. Při mletí na vysokorychlostních mlýnech totiž dochází ke změně mechanicko-chemických vlastností a dochází též částečně k devulkanizaci produktu. Navíc se dá obecně shrnout, že čím jemněji pryž rozemeleme, tím bude její specifický povrch větší a tím lépe se s ní dá dále pracovat. Mletí na těchto vysokorychlostních mlýnech navíc deformuje povrch zrna, který se stává velmi pórovitým. Díky tomu se poté částice lépe spojují a získávají velmi dobré mechanické vlastnosti. [26]

Vulkanizovaný kaučuk obsahuje sítě uhlovodíkových řetězců, spojených dohromady vazbami mezi molekulami síry. V důsledku toho vulkanizované pryžové sítě obsahují chemické vazby uhlík-uhlík, uhlík-síra a síra-síra. Při mletí na vysokorychlostním mlýnu dochází k rozpojení těchto částic vlivem teploty a tření. Možností, jak technologii ještě vylepšit je hned několik. První variantou je ultrazvuk, a to o frekvenci 915 až 2450 MHz. Druhá varianta je poté přidat modifikační směs. Ta je tvořena protonovým donorem, který činí síru pasivní, oxidem kovu, který vytváří nové vazby mezi molekulami pro pozdější revulkanizaci, a organickou kyselinou, která reaguje s oxidem kovu. Dále směs obsahuje inhibitor, jehož posláním je zabránění spojení radikálů síry dříve, než se k síře připojí donor. Ve směsi může být obsaženo také třecí činidlo, které brání prokluzu odpadní pryže mezi rotory. [27] [28]

V našem případě ale zůstaneme u mletí gumového granulátu bez těchto přídavných technologií. Schéma linky je na obrázku 17.

Vstupní materiál je dovážen ve vacích Big Bag. Tento vak je zavěšen na rámové konstrukci, odkud materiál vlivem gravitace samovolně padá do násypky. Násypka je ve své vrchní části čtvercového půdorysu, postupně se ale zužuje a ústí do šnekového dopravníku. V tomto případě jsme ale z postupu násypku vynechali a gumový granulát jsme ručně sypali do jiného, menšího, šnekového dopravníku.

Z dopravníku již granulát padal do násypky mlýnu, odkud byl distribuován mezi rotory. Zařízení zvolené pro experimenty byl dvourotorový zubový vysokorychlostní mlýn. Více informací o něm bude zmíněno v další kapitole.

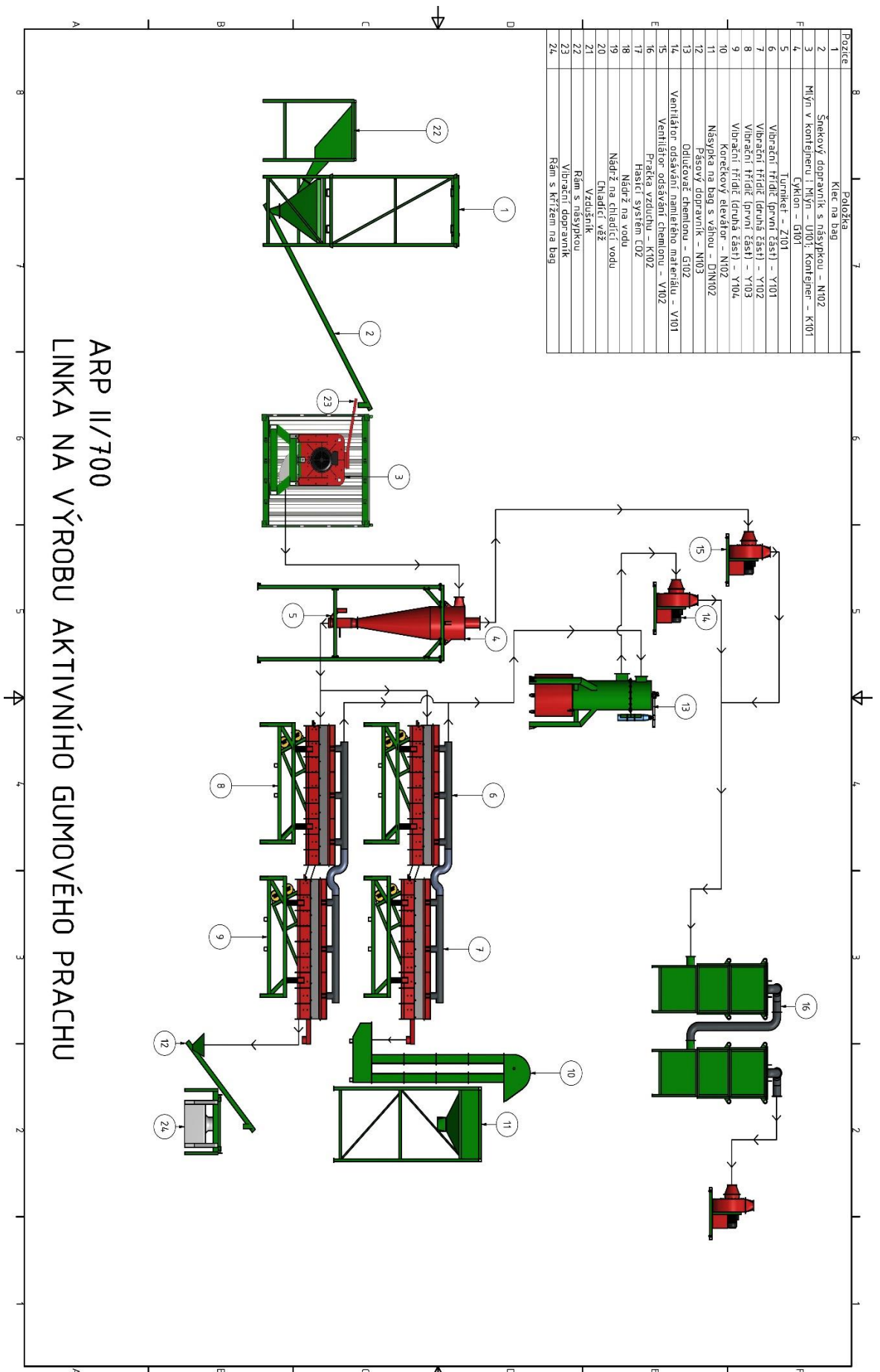
Z tohoto mlýnu již tedy vystupuje gumový prach, který je trubkami odváděn do cyklonu. Zde vlivem tangenciálního proudění dochází k radiálnímu usazování částic u stěny. Díky vhodné geometrii cyklonu se poté částice šroubovým pohybem dostávají až k turniketu, který gumový prach vypouští na vibrační třídič.

Na třídičích částice poskakují po síti o velikosti 0,8 mm. Částice, které jsou menší tedy propadají sítím do spodní části, a naopak větší částice zůstávají na síti. Na konci tohoto třídiče je pak každý segment veden zvlášť.

Nad třídiči jsou navíc instalovány „lapače“ textilních vláken. Tato vlákna jsou vedena vlivem podtlaku v systému, který je způsobován ventilátorem, do odlučovače. Textilní vlákna jsou v tomto odlučovači odfiltrována do speciální nádoby. Vzduch vedoucí z odlučovače se poté spojí s vzduchem odváděným z cyklonu a je veden do pračky vzduchu, která zamezuje výstupu škodlivin vzniklých mletím do ovzduší.

V běžném provozu je namletý granulát, který nepropadl sítí, veden dopravníkem zpět ke vstupnímu materiálu. Tam se s ním promíchá a dochází k jeho opětovnému mletí.

Materiál, který sítí propadl, je odváděn korečkovým dopravníkem do násypky. Odtud výstupní prášek padá do vaku a je expedován na zpracování.



ARP II/700
LINKA NA VÝROBU AKTIVNÍHO GUMOVÉHO PRACHU

Obrázek 17: Linka na výrobu aktivního gumového prachu

3.3 VSTUPNÍ MATERIÁL

Gumový granulát, který vstupuje do procesu mletí na vybraném vysokorychlostním mlýnu, je homogenní směs, získaná drcením různých typů pneumatik osobních i nákladních automobilů. Přídavkem k takto rozdrčené pryži navíc bývá malé množství SiO₂, které absorbuje vlhkost a granulát se díky tomu nelepí a neucpává se tak sypaný otvor ve vaku. Zastoupení SiO₂ ve vstupní směsi bývá nejčastěji v poměru 1 % SiO₂ : 99 % gumového granulátu. Uvedená procenta jsou vztažena na hmotnost směsi. Hustota rozdrčených částic pryže se pohybuje mezi 0,4 ÷ 0,45 g/cm³. [29]

3.3.1 SLOŽENÍ VSTUPNÍHO GRANULÁTU

Dle průvodního listu, který je součástí objednávky materiálu, je udávaná velikost částic 0,01 – 0,25 milimetru. Dle zkoušek ASTM D5644 by více minimálně 90 % částic, obsažených ve vaku, mělo být menší než 0,25 mm. Tato metoda vyjadřuje hmotnostní procenta jednotlivých frakcí granulátu. Zkouška dle normy ASTM D5644 stanovuje průměrnou distribuci velikosti částic recyklovaného vulkanizovaného kaučuku metodou rotačního síta. [29] [30]

Materiálové složení, které je uvedeno v průvodním listu je zobrazeno v tabulce níže.

| Materiál | Jednotka | Hodnota |
|-----------------------------|-----------------|----------------|
| Celkové množství polymeru | % hm. | 50 ÷ 58 |
| Množství přírodního kaučuku | % hm. | 22 ÷ 39 |
| Množství popelu | % hm. | 7 ÷ 8 |
| Množství sazí | % hm. | 26 ÷ 30 |
| Acetonový extrakt | % hm. | < 12 max. |
| Vlhkost | % hm. | < 1 max. |
| Množství kovu | % hm. | < 0,1 max. |
| Množství vláken | % hm. | < 0,5 max. |

Tabulka 4: Složení vstupního granulátu [29]

Pro detailnější znalost vstupního materiálu jsem provedl síťovou analýzu. Pro tuto analýzu byla použita síta, která byla cejchována dle německých norem TGL 7354 a TGL 39404. Velikost děr v sítích byla řazena logicky od největších po nejmenší. Pro měření byl nabrán vzorek o hmotnosti 100 gramů, který jsem poté vložil na první síto o velikosti děr 4 mm. Jemnější frakce propadly skrz toto a případně i skrze další síta. Nejjemnější měřitelná frakce byla v tomto případě na síti 0,63 mm. Bohužel kvůli nedostatku sítí, určených pro hrubější materiál, není měření zastoupení velikosti částic příliš precizní. Naměřená data jsou vidět v tabulce 5.

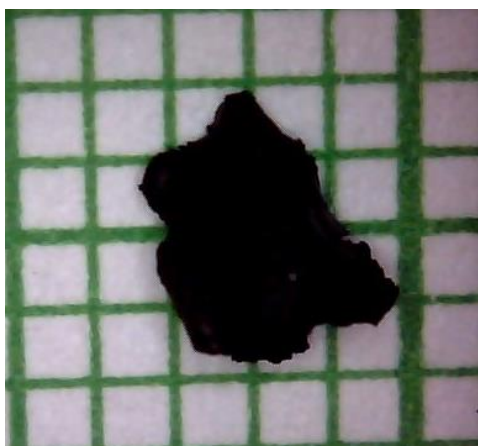
| Velikost částic | % hm. |
|-----------------|-------|
| >4 | 0 |
| >2 | 69 |
| >1,25 | 27 |
| >1 | 2 |
| >0,8 | 1 |
| >0,63 | 1 |

Tabulka 5: Velikosti částic vstupního materiálu

Z tabulky je patrné, že granulát se rozdělil na dvě hlavní části. Větší propadla sítím s oky o velikosti 4 mm, na 2 mm už se ale zastavila. Menší část propadla i tímto sítím a zůstala na síti 1,25 mm. Pouhá 3 hmotnostní procenta poté propadla i tímto sítím a usadila se níže.

Pro bližší představu o velikosti částic jsem umístil část vzorku na milimetrový papír a přiblížil. Vzdálenost mezi svislými i vodorovnými čarami je 1 milimetr.

Z obrázku 18 je tedy patrné, že tato konkrétní částice má rozměry přibližně 3,5x4 milimetry. Zůstala tedy jistě na druhém síti o velikosti 2 mm.



Obrázek 18: Zvětšená částice vstupní suroviny

Z pořízené fotografie je navíc vidět i tvar částic. Částice mají ve všech třech směrech podobné rozměry s odlišnostmi v podobě výběžků nebo prohlubní. Pro sítování je ale podstatné, že jeden z rozměrů není patrně menší než zbylé (jehlicovitý tvar) a tak není možné částici „správným“ natočením přes síto dostat.

3.3.2 VLASTNOSTI VSTUPNÍHO GRANULÁTU

Fyzikální vlastnosti:

Skupenství: pevné

Forma: granule

Barva: černá

Vůně: typická guma

Teplota samovolného vzplanutí: > 320 °C

Hustota: 0,4÷0,45 g/cm³

Bod tání: 110÷140 °C

Z jiných vlastností je třeba zmínit stálost granulátu za běžných podmínek. Při práci během mletí je dobré používat ochranné pomůcky, jako brýle, rukavice a respirátor. Prach, který vzniká při mletí může být totiž nepříjemný pro dýchací cesty. V případě požáru je pro hašení určen CO₂, písek nebo pěna. [29]

Granulát je uložen ve vacích Big Bag. Tyto vaky mohou pojmout až 0,5 m³ materiálu. Výhodou je snadná manipulace za pomoci ještěrky. Vak má ve spodní části zavázaný otvor, kterým po rozvázání plynule padá uložený granulát. Mírným deficitem uchovávání gumy v těchto vacích je slepení materiálu při dlouhodobém skladování. [31]



Obrázek 19: Big Bag [31]

3.4 PROCES MLETÍ

3.4.1 ŠNEKOVÝ DOPRAVNÍK

Celý proces, jak již bylo zmíněno dříve, začíná u šnekového dopravníku. Tím je vstupní granulát dopravován do násypky mlýnu. Na začátku tohoto dopravníku je malá násypka. Protože však nebyl zajištěn kontinuální přívod vstupní suroviny do této násypky, rozhodli jsme se násypku nastavit o další nádobu. Tím jsme zajistili dostatek materiálu pro vstup do šneku na delší čas. Šnek je poháněn elektromotorem od firmy MEZ Náchod. Typ elektromotoru je 2AP63 – 4s.



Obrázek 20: Šnekový dopravník

Hmotnostní tok šnekovým dopravníkem byl změřen experimentálně. Granulát vystupující z dopravníku padal po dobu šesti minut do nádoby. Prázdna nádoba vážila 0,285 kg, po určené době její hmotnost vzrostla na 4,195 kg. Pokud od sebe tyto údaje odečteme, zjistíme, že během šesti minut prošlo skrze šnekový dopravník 3,91 kg. Poté již snadným přepočtem můžeme říci, že hmotnostní tok vstupního materiálu šnekovým dopravníkem je 39,1 kg/h.

3.4.2 VYSOKORYCHLOSTNÍ MLÝN

Druhou částí linky je její nejdůležitější člen, a to samotný mlýn. Ten se skládá z násypky a dvou komor. Násypka je obdélníkového průřezu a postupně se zužuje směrem k mlýnu. Materiál z ní vstupuje do komory mlýnu, odkud je rotačním pohybem rovnoměrně distribuován do zubového prostoru.



Obrázek 21: Násypka mlýnu

Komory mlýnu mají v tomto případě funkci statoru, který usměrňuje pohyb namletého materiálu. Otevření komor je u tohoto mlýnu zajištěno pojezdovými drahami s drážkou pro konstantní posuv pouze v požadovaném směru otevírání. Uvnitř komory je na hnanou hřídel pomocí drážky a pera usazen rotor, do kterého jsou vsazeny zuby. Právě díky možnosti vsazení zubů do rotoru je snadná jejich výměna. Samotné zuby jsou na každé straně mlýnu navrženy tak, aby přesně zapadaly do mezer mezi zuby na straně protější. Pro experimenty byly využity tři různé sady zubů, všechny budou detailněji popsány později u konkrétních měření.

Ve stejné komoře, do které je veden vstup, je ve spodní části otvor pro výstup namletého materiálu. Tento otvor je v komoře obdélníkový, postupně však přechází do kruhového průřezu a je na něj napojeno potrubí pro dopravu materiálu technologií dále. V komorách jsou dále i otvory pro přisávání vzduchu zvenčí, které napomáhají chladit mlýn a zajišťují konstantní tlak v systému.

Samotný pohon mlýnu je zajišťován dvěma elektromotory. Každý z nich pohání „svůj“ rotor. Oba motory tak rotují s opačným smyslem otáčení. Díky tomuto protichůdnému pohybu se tak mezi zuby navyšuje střížná síla a zlepšuje se proces mletí. Oba motory jsou zapojeny do trojúhelníku. Další specifikace se ale liší, proto uvedu každý motor zvlášť.

| Označení | Motor 1 | Motor 2 |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Motor | Asynchronní elektromotor | Asynchronní elektromotor |
| Výrobce | MEZ Frenštát | ZSE Praha |
| Typ | F160L02 | F160M02 |
| Napětí [V] | 400 | 380 |
| Proud [A] | 35 | 29,5 |
| Frekvence [Hz] | 50 | 50 |
| Výkon [kW] | 18,5 | 15 |
| Účinnost [-] | 0,85 | 0,8 |
| Otáčky [1/min] | 2905 | 2905 |
| Váha [kg] | 135 | 120 |

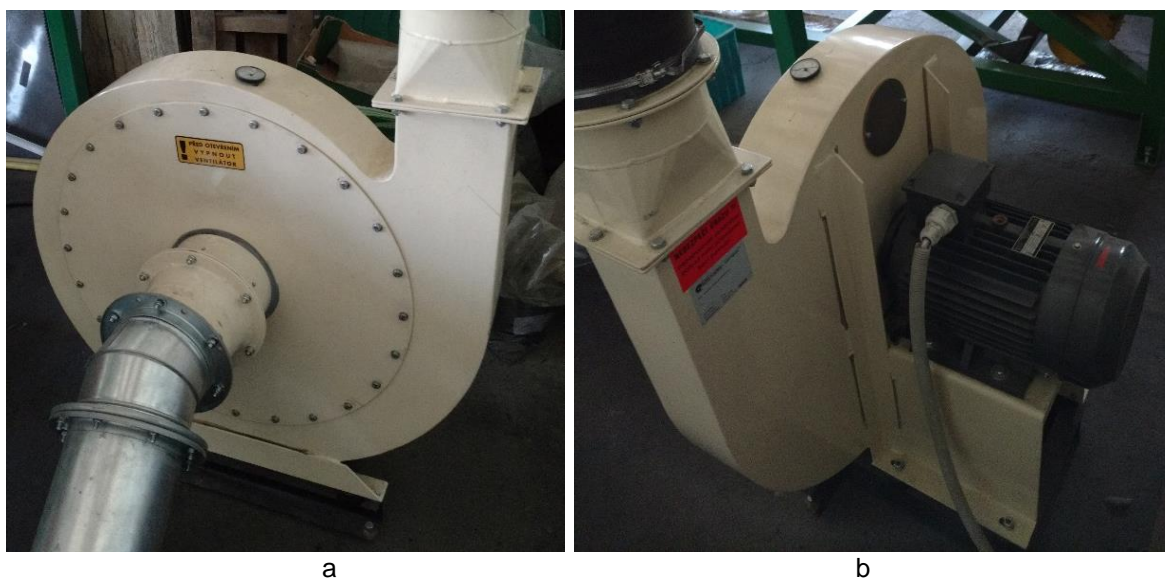
Tabulka 6: Štítkové údaje motorů

Na základě této tabulky můžeme vidět, že otáčky motorů jsou sice totožné, přenášený výkon se však liší. Oba motory jsou připojeny ke stejnému frekvenčnímu měniči Siemens Micromaster 440. Ten zobrazuje elektrický proud, který je spotřebováván oběma mlýny současně. Každý mlýn si pak z této sumy proudů odebírá příslušné množství potřebné pro chod. Pro přesnější měření spotřebovávaného elektrického proudu by musel být každý motor připojen na svůj měřič. Tato možnost však při experimentech nebyla k dispozici, a tak budu mlýn posuzovat jako celek a nebudu řešit rozdílné zatížení komor. Práce je totiž zaměřená především na srovnání naměřených hodnot, pro které je toto pojetí zcela dostačující. Pro další výpočty budu tedy pro mlýn používat napětí 400 voltů, které můžeme při zapojení do trojúhelníku naměřit mezi jednotlivými fázemi. Účinnost motoru jsem stanovil na 0,85. Hodnotu $\cos \varphi$ by bylo možné vypočítat přesněji dle štítkových hodnot, nicméně při použití hodnoty 0,85 se dostávám na stranu bezpečnosti. Navíc i v tomto případě platí, že naměřené hodnoty jsou důležité zejména pro srovnání.

3.4.3 VENTILÁTOR

Jeden z nejdůležitějších faktorů celého procesu je ventilátor. Jeho správné nastavení má za následek požadované proudění namletého materiálu. Hlavní součástí radiálního ventilátoru je oběžné kolo, jehož součástí jsou lopatky zajišťující nasávání vzduchu a jeho výtlak ve směru kolmém na směr rotace. V našem konkrétním případě se jedná o radiální transportní ventilátor typu F08T, který je poháněn asynchronním motorem značky KEM o výkonu 7,5 kW. [33]

Tento transportní ventilátor disponuje dopravním výkonem 3 900 m³/h. Udávaný celkový tlak, dle technického listu dodávaného firmou CIPRES, je roven 4 000 Pa. Pro omezení hlučnosti ventilátoru je přístroj instalován v tlumícím monobloku. Díky tomuto prvku je hlučnost motoru ve vzdálenosti 1 m od ventilátoru snížena z původních 90 dB na hodnotu 70 dB. Touto úpravou samozřejmě narůstá hmotnost, která je u tohoto konkrétního ventilátoru 177 kilogramů. Nicméně ventilátor je zařízení nehybné, takže hmotnost nehraje velkou roli. Skříň je pro tuto technologii zvolena v pozici GR, což znamená, že výstup z ventilátoru je při pohledu od motoru vlevo nahoře. [33] [34]

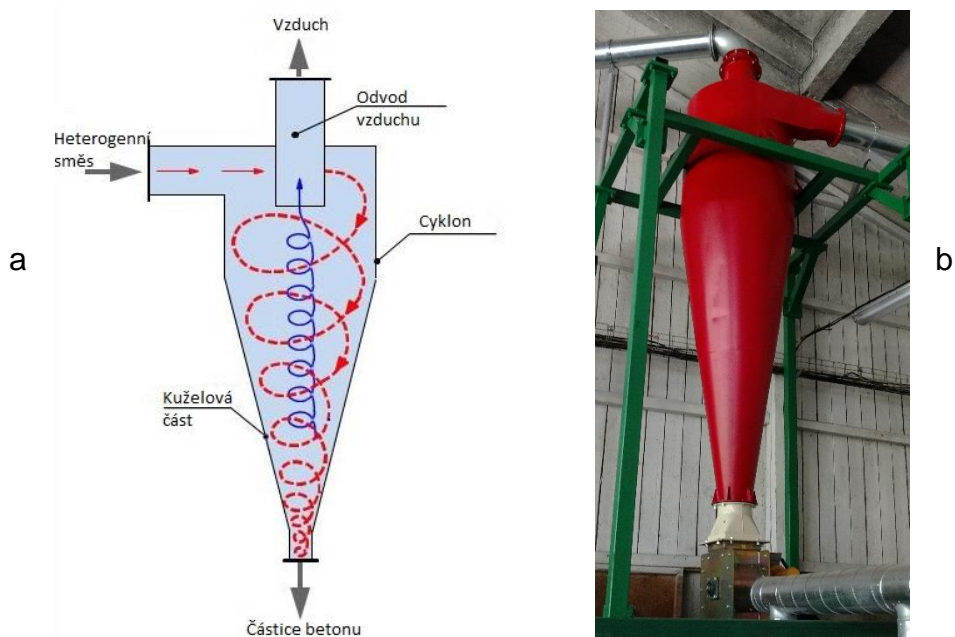


Obrázek 22: Transportní ventilátor CIPRES

a – Pohled po směru toku materiálu b – Pohled na motor

3.4.4 CYKLÓN

Dalším zařízením, do kterého se dostává namletý materiál je cyklón nebo jinak řečeno vírový odlučovač. Ten slouží k oddělení kouře od namletého materiálu vlivem gravitace. Lehčí částice obsažené v kouři jsou spolu s proudem vzduchu odsávány v horní části, zatímco namletý gumový prášek je vlivem větší gravitační síly a vlivem tvaru odlučovače radiálně unášen kuželovou částí dolů. Na konci této kuželové části je umístěn rotační podavač od firmy CIPRES FILTR BRNO (obrázek 24), který namletou pryž rovnoměrně uvolňuje do dalšího procesu.



Obrázek 23: Cyklón

a – Obecný princip vírového odlučovače [32]; b – Cyklón firmy Lavaris



Obrázek 24: Rotační podavač

3.4.5 VIBRAČNÍ TŘÍDIČE

Právě na vibrační třídíči je z cyklónu prostřednictvím rotačního podavače odváděn namletý materiál. Vibrační třídíč je rozkmitáván pomocí příložního vibrátoru od společnosti Vibros Příbram. Díky tomuto vibromotoru a systému pružin se celý třídíč rovnoměrně chvěje a materiál se prosívá skrze síto. V tomto případě se jednalo o síto s velikostí děr 0,8 mm. Pro vyhodnocování experimentů jsem ale technologii vibračních třídíčů nevyužil a namletý materiál jsem odebíral do nádob hned při výstupu z vírového odlučovače. Díky tomu vzorky obsahují všechny frakce namletého gumového prachu, a nikoliv jen tu část, která buď skrze síto propadla anebo naopak nepropadla.

Vibrační třídíč kromě primárního rozsítování materiálu plní i funkci dopravníku. Jemný gumový prášek, který je rozechvíván vibracemi, poskakuje po třídíči a je veden k okraji. Tam je třídíč zúžen a materiál propadává kruhovým otvorem do příslušných nádob. Při experimentálním mletí je s rozemletým granulátem manipulováno ručně. Pokud se ovšem jedná o průmyslovější variantu, je materiál, který síty nepropadl, odváděn systémem dopravníků zpět na začátek procesu a je přimícháván mezi vstupní granulát. Prášek, který sítem propadne je buďto ihned zpracován nebo se akumuluje ve vacích, ve kterých se následovně převáží nebo skladuje.



Obrázek 25: Vibrační třídíč

3.5 MĚŘICÍ TECHNIKA

3.5.1 FREKVENČNÍ MĚNIČ SIEMENS MICROMASTER 440

Prvním zařízením pro měření provozních hodnot při mletí je přístroj Siemens Micromaster 440 (obrázek 26). V našem případě tento přístroj neslouží ke změně parametrů, ale pouze jako měřicí prvek. Mlýn je totiž spouštěn a regulován pomocí otočného potenciometru. Přístroj samotný dokáže při správném nastavení zobrazovat a řídit otáčky, jmenovitý výkon, jmenovité napětí nebo třeba jmenovitou účinnost. Pro toto měření stačilo zobrazení aktuální hodnoty proudu, odebíraného mlýnem. Frekvenční měnič zobrazuje hodnoty s přesností na dvě desetinná místa, měření ale z důvodu častého kolísání bylo obvykle prováděno pouze s přesností na jedno desetinné místo.

3.5.2 MĚŘENÍ TEPLoty

Měření teploty je umístěno hned za mlýnem. Pro měření je využíván odporový teploměr Pt100, přičemž Pt značí platinu, která má ideální vlastnosti pro měření teploty. Teplotní součinitel elektrického odporu je u platiny roven $3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Při rostoucí teplotě roste i elektrický odpor platiny. Díky tomuto principu můžeme převádět velikost odporu na aktuální hodnotu teploty. Číslo 100 v názvu odporového teploměru označuje odpor snímače při $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě má tedy snímač odpor roven 100 ohm. Citlivost tohoto snímače je rovna $0,39 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$. [35]

Snímač je veden do rozbočovací krabice od společnosti GEWISS, typ GW 44 218. Tato krabice je vybavena displejem, zobrazujícím, na základě změny odporu platinového teploměru, aktuální teplotu za mlýnem. Měření teploty je v tomto případě hlavně orientačního charakteru. Prudké stoupání či klesání značí hrozící riziko či nedostatek materiálu na vstupu do mlýna. Pro lepší přehled o vývoji teplot by ale bylo třeba teplotní čidlo umístit přímo do komory mlýnu. Změna teploty uvnitř mlýnu se totiž na výstupním potrubí projeví až se značnou prodlevou, což může mít velmi nežádoucí důsledky.



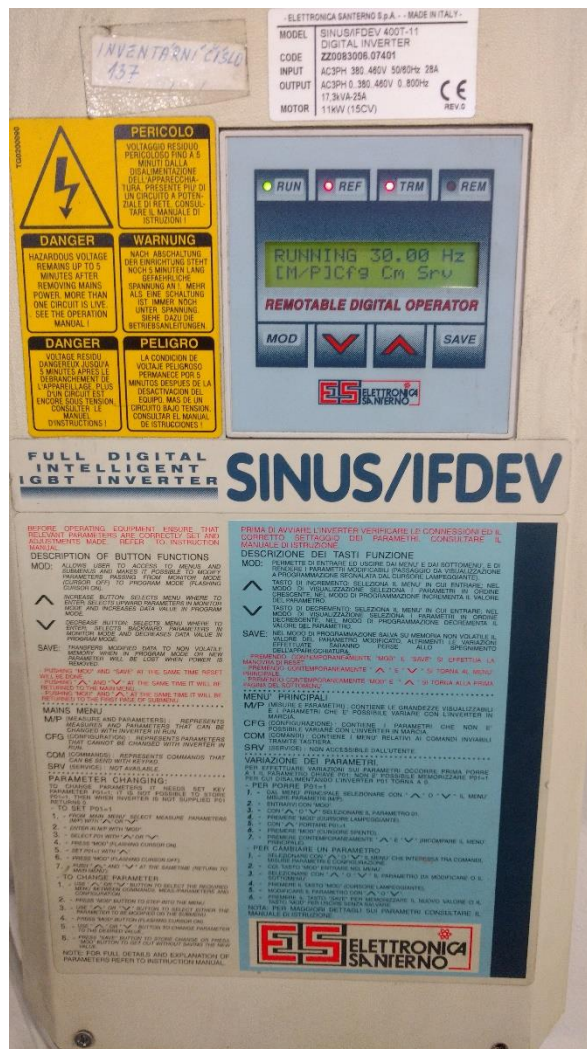
Obrázek 26: Siemens Micromaster 440



Obrázek 27: Zařízení pro měření teploty GEWISS

3.5.3 FREKVENČNÍ MĚNIČ VENTILÁTORU

Dalším měřicím a v tomto případě i regulačním přístrojem je zařízení SINUS/IFDEV 400T-11 od italské společnosti Elettronica Santerno. Jedná se o frekvenční měnič připojený k ventilátoru. Díky nastavení frekvence můžeme snadno regulovat výkon ventilátoru a tím i odtah materiálu z mlýna. Pro konstantní podmínky při měření byl tento frekvenční měnič nastaven stále na hodnotu 30 Hz. Jedná se o hodnotu, kdy se při nízkých i vyšších teplotách materiál příliš nelepí na potrubí, ale zároveň není proudění vzduchu tak silné, aby podpořilo vznik a šíření požáru.



Obrázek 28: Frekvenční měnič ventilátoru

3.5.4 SÍTA

Finálním krokem při procesu mletí je zhodnocení kvality výsledného gumového prachu. Pro tento účel je nejlepší možností síťová analýza. Jak již bylo zmíněno dříve, byla pro tuto analýzu zvolena síta, která jsou cejchována dle německých norem TGL 7354 a TGL 39404. Pro namletý materiál byla zvolena síta s velikostí mezer 1,25 mm; 1 mm; 0,8 mm; 0,63 mm; 0,4 mm a 0,25 mm. Síta jsou kruhového průřezu o průměru 20 cm.

Síta se naskládají dle velikosti od nejmenšího po největší na sebe a poté se umístí na vibrační desku. Tato deska je zavěšena pomocí pružin na pevném rámu. Zespodu desky je malý příložní vibrátor, který má za následek rozkmitání sít. Tímto rozkmitáním se materiál rovnoměrně rozptýlí po celé ploše síta a menší frakce propadávají skrze jednotlivá síta, zatímco hrubější materiál zůstává v mřížce síta.

3.5.5 MĚŘENÍ HMOTNOSTI

Sítování bylo vyhodnocováno měřením hmotnosti prášku na jednotlivých patrech. Zařízení určené pro tuto činnost je digitální kuchyňská váha značky SILVERCREST. Jedná se o přístroj určený pro vážení předmětů do hmotnosti 5 kg. Tato váha měří s přesností na gramy, chyba měření je tudíž půl gramu.



a

b

c

Obrázek 29: Sítování

a – Síto s velikostí mezer 0,63 mm; b – Vibrační deska pro sítování; c – Váha SILVERCREST

3.6 NASTAVENÍ MĚŘENÍ

Před měřením je nutné nastavit tři zásadní věci. Prvním parametrem, který se během všech měření neměnil, je frekvence ventilátoru. Ta byla, jak již bylo uvedeno dříve, stanovena na hodnotu 30 Hz. Po provedení měření byla frekvence vždy zvýšena až na hodnotu kolem 50 Hz. Tím se zvýšilo proudění v systému a mlýn i ostatní komponenty rychleji chladly. Po navrácení teploty do původních hodnot se frekvence opět snížila na 30 Hz.

Druhým parametrem jsou otáčky rotorů mlýna. Tato hodnota se měnila pomocí potenciometru. Otáčky byly rozděleny do deseti bodů, mezi kterými se přepínalo právě zmiňovaným potenciometrem. Protože se jedná o mletí na vysokorychlostním mlýnu, byly otáčky obvykle nastaveny minimálně na hodnotu 4, což značí 40 % z maxima.

Posledním parametrem je vzdálenost mezi zuby. Měření bylo prováděno na třech různých variantách zubů, u kterých se navíc prováděly měření pro tři různé vzdálenosti mezi zuby. Vzdálenost mezi zuby byla vždy nejprve nastavena na maximální. Tohoto nastavení bylo dosaženo usazením zubů přímo do rotoru. Pro změnu vzdálenosti mezi zuby byly používány podložky, které se vložily mezi těleso zubů a samotný rotor. Po každé sadě měření na jednom typu zubů bylo třeba mlýn „rozebrat“, vložit patřičnou podložku a mlýn opět dát dohromady. První sada měření byla tedy vždy bez podložek, druhá s podložkou o tloušťce 0,3 mm a třetí měření poté bylo s podložkou 0,8 mm.

3.6.1 ROVNÉ ZUBY SE TŘEMI ŘADAMI

První variantou zubů jsou zuby rovné, které mají na obou stranách tři řady mlecích segmentů. Tyto zuby byly zbrusu nové, takže ještě nebyly nijak opotřebený. Nicméně od začátku se u těchto zubů nepředpokládaly nikterak dobré výsledky. Důvodem pro tyto prognózy jsou velké mezery mezi zuby, s nimiž souvisí příliš snadná průchodnost materiálu. Mletí ve vysokorychlostním mlýně je založeno na stříhu granulátu při srážkách se zuby. Pokud jsou ale mezery moc velké, materiál se snadněji dostane z mlýna takřka nedotčen.

Fotografie této varianty, instalované ve mlýně, je zobrazena na obrázku 30.



Obrázek 30: Rovné zuby se třemi řadami

3.6.2 ROVNÉ ZUBY SE ČTYŘMI ŘADAMI

Tato varianta je ve své podstatě velmi podobná předchozímu uspořádání. Jen je na každé straně mlýnu o jednu řadu mlecích segmentů více. To způsobuje větší namáhání materiálu, ale také se zvyšuje tření a s ním i teplota. Aby mohla být přidána na každé straně ještě jedna řada zubů, musely být jednotlivé segmenty zeštíhleny. Tyto zuby byly používány již delší čas, a tak je na nich velmi dobře vidět, jakým způsobem jsou namáhány na otěr.



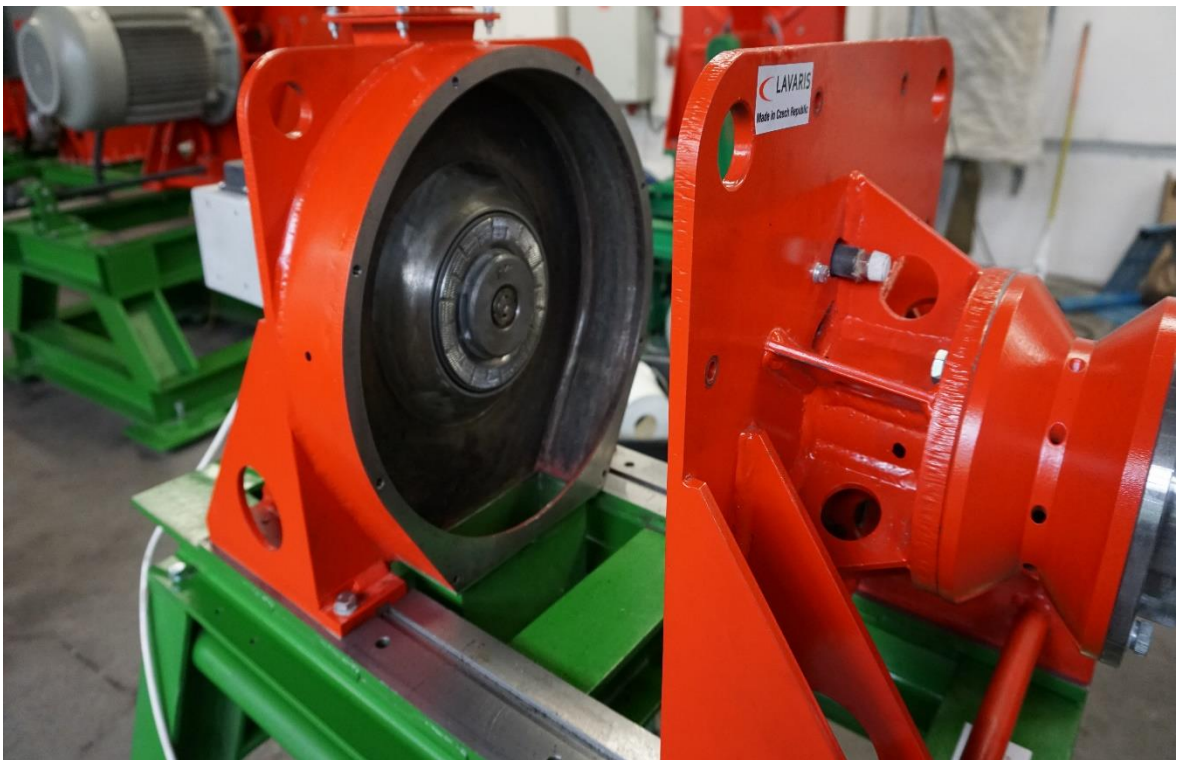
Obrázek 31: Čtyřřadé zuby s viditelným opotřebením

Z obrázku 31 je jasně patrné, v jakých částech dochází k největšímu opotřebení zubů. Jedná se zejména o první dvě řady zubů, které jsou vlivem nárazů vstupního granulátu otírány v místech přední hrany. Z tohoto obrázku je patrné, že tyto zuby se otáčely proti směru hodinových ručiček. Právě v tomto směru jsou totiž zuby zeslabené a v zadní části fotografie je vidět, že některé zuby chybí úplně. Třetí, a především pak čtvrtá řada od středu se jeví poškozeny pouze minimálně. U předešlé varianty zubů, tedy se třemi řadami, je oťer minimalizován větší tloušťkou zubů a s ní souvisejícím menším počtem řad. Nicméně tato změna je pouze za cenu horších výsledků při mletí.

3.6.3 ŠIKMÉ ZUBY

Obě předchozí varianty jsou si velmi podobné, tato třetí je však odlišné. Jednotlivé zuby totiž nevychází kolmo z desky. Toto opatření se zdá být na první pohled pouze nicotnou změnou. Opak je však v tomto případě pravdou a zuby ze zkušeností firmy dosahují o poznání lepších výsledků. Největší rozdíl je totiž v možnostech přiblížení zubů vůči sobě.

Na obrázku 32 je zobrazen otevřený mlýn, do kterého byly postupně tyto varianty zubů usazovány pro jednotlivá experimentální měření.



Obrázek 32: Otevřené komory mlýnu pro drcení gumového granulátu

3.7 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Před samotným měřením je třeba zapnout přívod elektřiny do jednotlivých zařízení hlavním vypínačem. Poté se zapnou frekvenční měniče a ventilátor, na kterém se nastaví požadovaná frekvence 30 Hz. Poté jsem zapnul měřič teploty a odečetl počáteční hodnotu.

Následně jsem si vzal sluchátka, chránící proti hluku, a zapnul mlýn. Nejprve jsem změřil napětí počáteční, bez roztočení rotorů. Poté jsem pomocí otočného potenciometru nastavil otáčky na hodnotu 1. Na této hodnotě zůstal mlýn třicet sekund, po kterých jsem odečetl aktuální hodnotu elektrického proudu a teploty. Následně jsem otáčky zvýšil na hodnotu 2 a stejným způsobem měřil. Takto měření pokračovala až do maximálních otáček na stupni 10. Po odečtení posledních hodnot jsem mlýn vypnul. Vzhledem k rostoucím teplotám během tohoto měření bylo třeba mlýn vychladit. Pro tento účel jsem zvýšil frekvenci ventilátoru.

Po dosažení teploty blízké počáteční hodnotě jsem spustil měření znovu, tentokrát na stupeň 4. Po dobu pěti minut běžel mlýn naprázdno tak, aby se ustálila teplota. Po této době jsem zapnul šnekový dopravník, dávkující gumový granulát. V průběhu tohoto mletí jsem pak několikrát odečetl teplotu a také proud. Ten se však na rozdíl od teploty ustálil téměř okamžitě.

Každé měření (kromě později uvedených výjimek) trvalo 15 minut, na jejichž konci jsem do předem připravené nádoby odebral vzorek padající z rotačního podavače pod cyklonem.

Stejným způsobem jsem pak měření prováděl i pro stupeň potenciometru 6, 8 a 10. Z každého měření tedy byl samostatný namletý materiál, ze kterého jsem odebral vzorek o hmotnosti 100 gramů a vysypal jsem ho na vrchní síto o hrubosti 1,25 mm. Poté jsem zapnul vibrační motor, díky čemuž se materiál začal sítovat. Každé takovéto sítování trvalo 5 minut. Nakonec jsem gumový prášek z každého síta zvlášť zvážil a tuto hmotnost jsem zanesl do předem připraveného protokolu o měření. Výsledky z něj jsem poté vyhodnocoval v programu MS Excel. Vzorový protokol o měření je v příloze 1 v závěru diplomové práce.

3.8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření rozdělím podle typu zubů. U každého typu zubů proběhly měření při třech různých vzdálenostech zubů od sebe. Pro každou vzdálenost byla navíc měřeno mletí na čtyřech různých stupních otáček. Z toho tedy dohromady vychází téměř 40 experimentálních měření.

Výstupní velikost namleté pryže můžeme zařadit do několika kategorií. Částice větší než 0,8 mm jsou neuspokojivé a v reálném procesu by byly navraceny k dalšímu mletí. Částice mezi velikostmi 0,8 až 0,4 milimetru už jsou o poznání vítanější. Pokud zůstanu u školní terminologie, ohodnotit je můžeme v tomto případě jako uspokojivé. Nicméně snahou při mletí je samozřejmě dostat se na co nejnižší hodnoty velikosti výstupního materiálu. Gumová zrnka s velikostí v rozmezí od 0,4 mm do 0,25 mm jsou brána jako velmi dobrá. Jako výborné výsledky pak můžeme označit částice menší než 0,25 milimetru.

Pro mletí na jednotlivých zubech budu pro zjednodušení používat označení A – rovné třířadé zuby, B – rovné čtyřřadé zuby a C – šikmé zuby. Jednotlivé varianty vzdálenosti zubů budou poté označeny římskými číslicemi, a to v pořadí, ve kterém budou výsledky měření prezentovány. Mletí bez podložek bude tedy označeno jako I, mletí s podložkou 0,3 mm jako II a mletí s podložkou 0,8 mm jako III. Pokud budu tedy například popisovat mletí na rovných čtyřřadých zubech s podložkou 0,3 milimetru, použiji označení B–II.

Ve výsledcích měření budou také zobrazovány hodnoty výkonu. K těmto hodnotám výkonu jsem se dostal použitím následujícího vzorce pro činný výkon.

$$P_{\xi} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

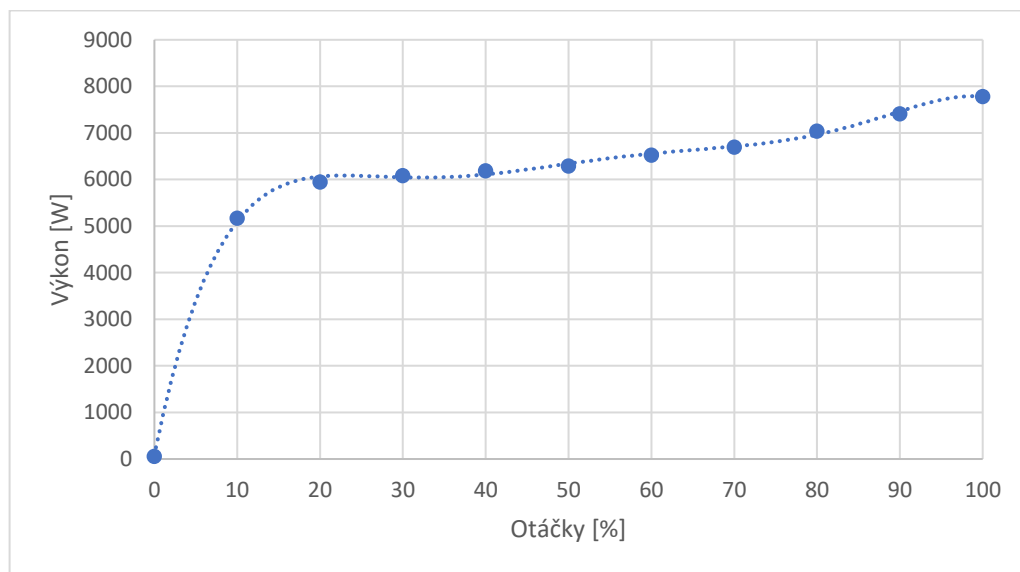
Do této rovnice budu dosazovat napětí 400 voltů a účinník rovný hodnotě 0,85. Jedinou proměnnou tak bude proud, který bude odečítán při jednotlivých měřeních.

Ze všech měření budou nyní prezentovány výsledky. Detailní záznamy o jednotlivých experimentech jsou v příloze 2 až 10 v závěru diplomové práce.

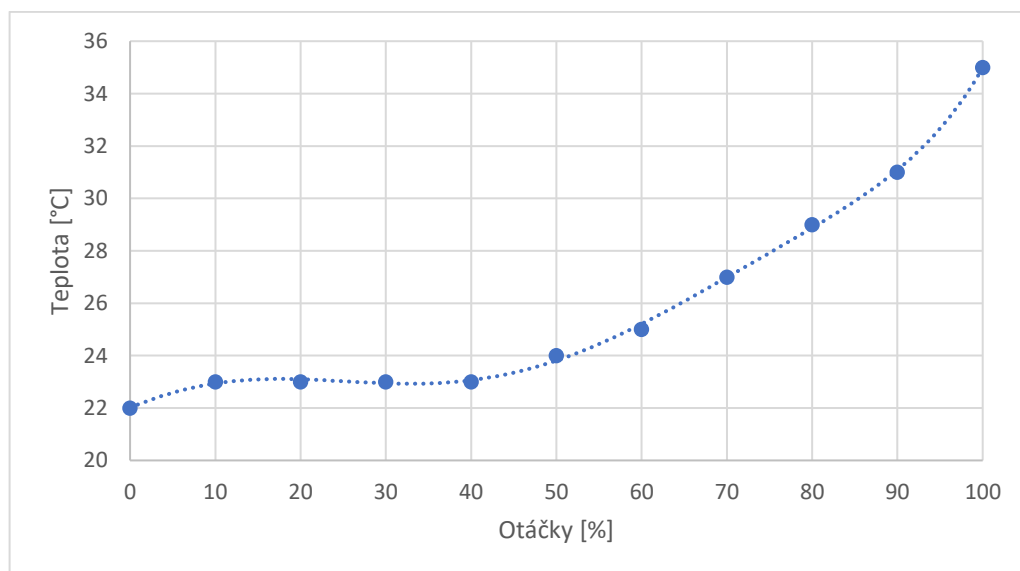
3.8.1 MLETÍ NA ROVNÝCH TŘÍŘADÝCH ZUBECH (A)

3.8.1.1 MLETÍ BEZ PODLOŽKY (A-I)

Jako první proběhlo tedy měření naprázdno, během kterého byly pro každý stupeň otáček snímány aktuální hodnoty teploty a proudu. Proud byl poté dle vzorce (3.1) přepočítán na výkon.

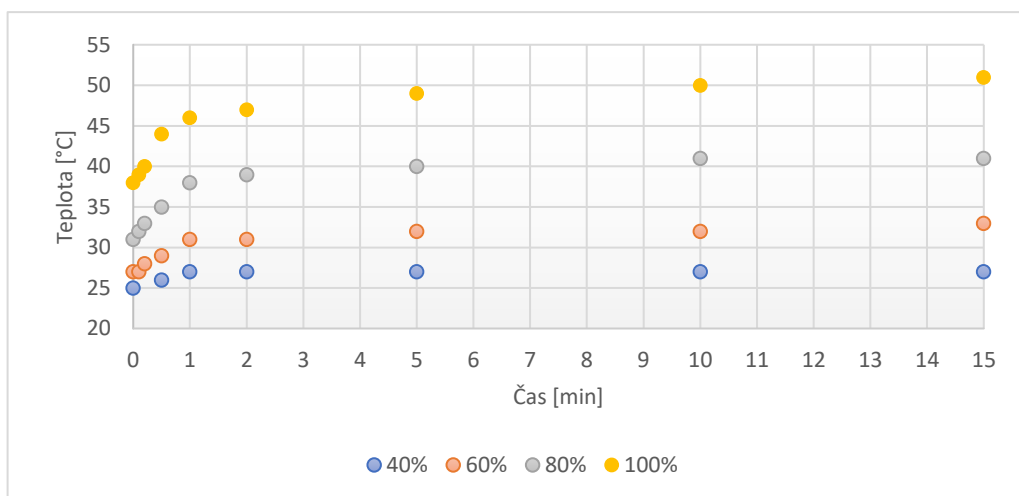


Obrázek 33: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-I



Obrázek 34: Graf závislost teploty na otáčkách pro variantu A-I

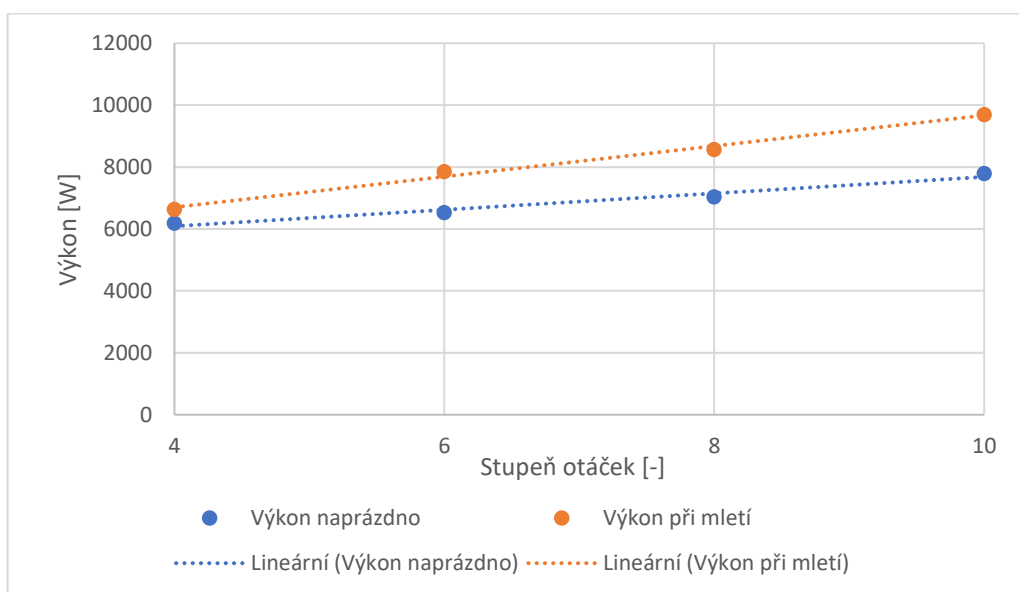
Při spuštění šnekového dopravníku, které znamená přívod granulátu do mlýna, jsem při mletí na všechny 4 zvolené stupně otáček (4, 6, 8 a 10) zaznamenal aktuální teplotu. Její vývoj je zobrazen na grafu níže.



Obrázek 35: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-I

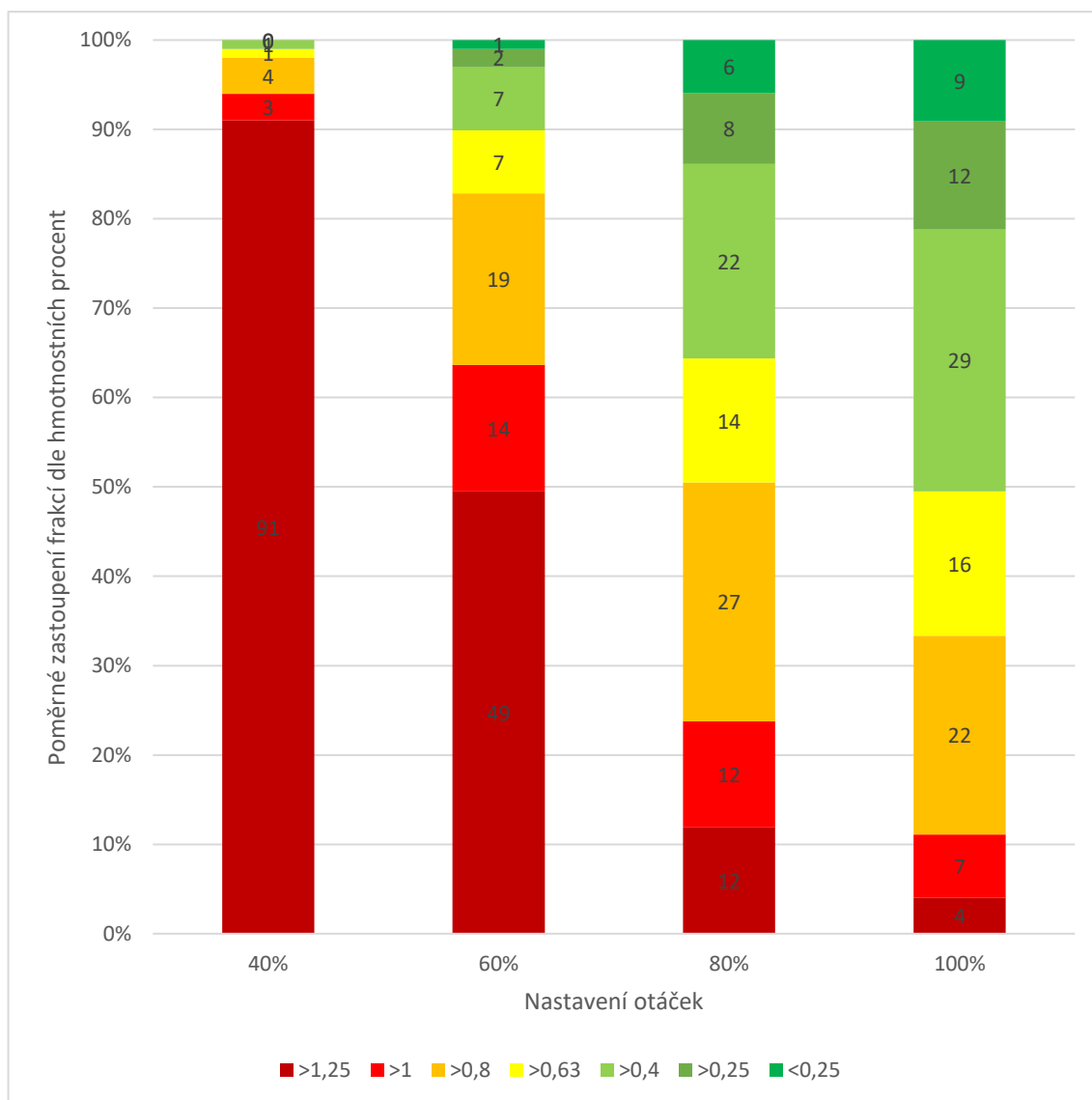
Z tohoto grafu můžeme vidět, že nárůst teploty byl obzvlášť u nižších otáček téměř zanedbatelný. Při stupni 8 a hlavně při stupni 10 je již vidět zřetelnější vývoj, nicméně rozdíl mezi teplotou na počátku měření a po 15 minutách provozu je maximálně 13 °C.

Dalším důležitým parametrem je rozdíl výkonů při měření bez zatížení granulátem a při mletí.



Obrázek 36: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu A-I

Asi nejdůležitějším údajem celého měření je velikost získaných částic. Zastoupení jednotlivých frakcí nejlépe vyjadřuje závislost hmotnostních procent prášku na stupni otáček.

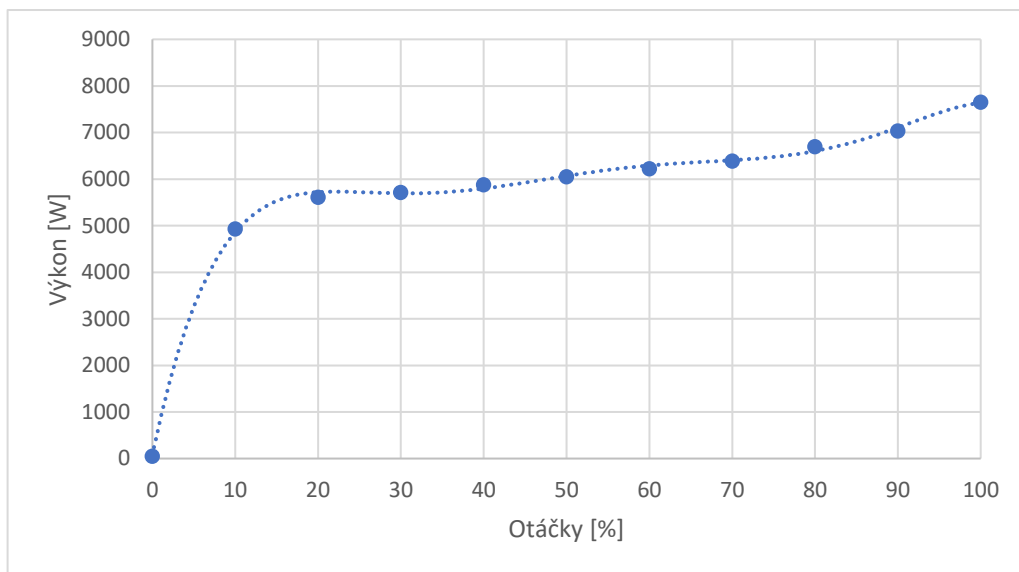


Obrázek 37: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu A-I

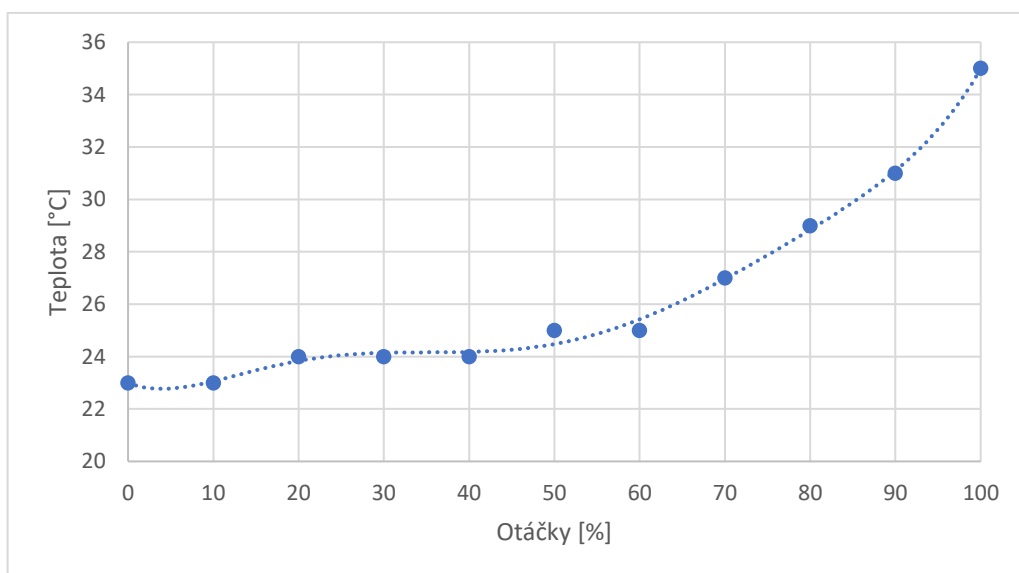
Dle tohoto grafu je jasně vidět, že přívlasek „vysokorychlostní“ je u tohoto mlýna právem. Právě při vysokých otáčkách totiž dochází k požadovanému účinku rozpojování pryže. Zatímco při mletí na stupeň 4 zůstává granulát téměř nedotčen, při stupni 10 se dostává rovných 50 hmotnostních procent ze vzorku o hmotnosti 100 gramů pod velikost 0,63 milimetru. Pokud budeme předpokládat vstupní granulát o velikosti 2 milimetry, zmenší se částice na méně než třetinu svých původních rozměrů.

3.8.1.2 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,3 MILIMETRU (A-II)

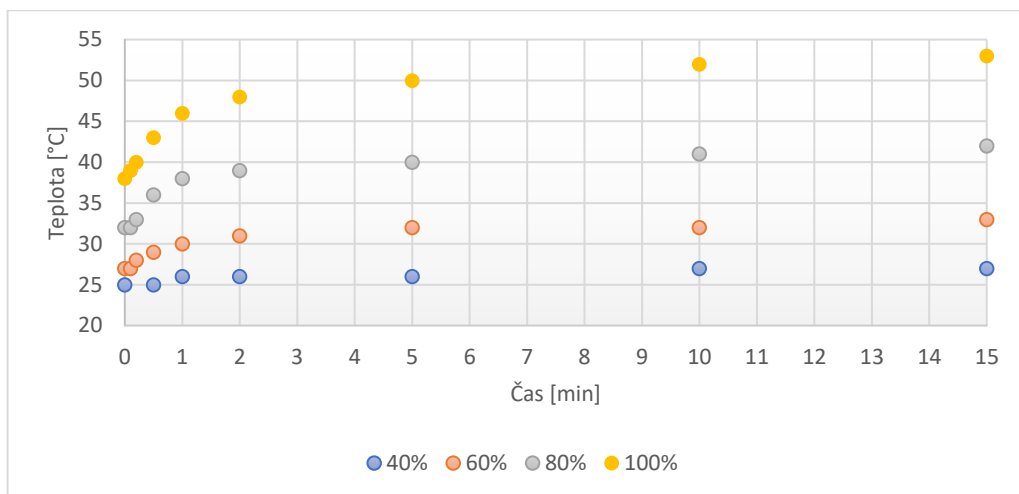
Před začátkem tohoto mletí bylo tedy třeba mlýn nejprve rozebrat, vyčistit, vložit příslušnou podložku a poté opět vrátit do původního stavu. Na začátku opět proběhlo spuštění mlýna naprázdno pro zjištění nárůstu proudu a teploty v závislosti na rostoucích otáčkách. Proud byl opět následně přepočítán na hodnoty výkonu.



Obrázek 38: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-II

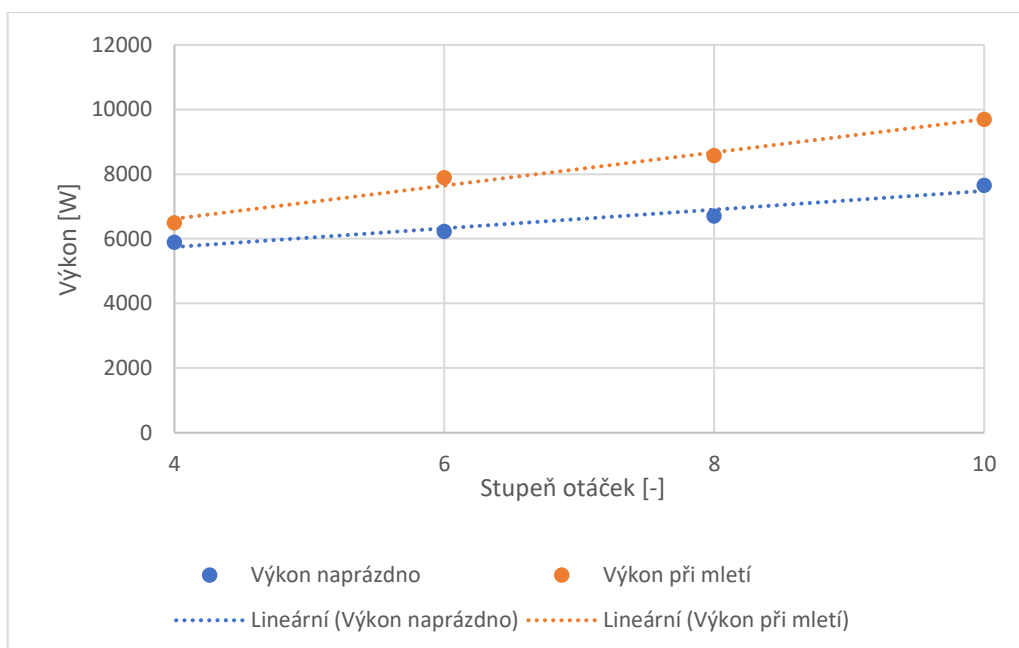


Obrázek 39: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu A-II



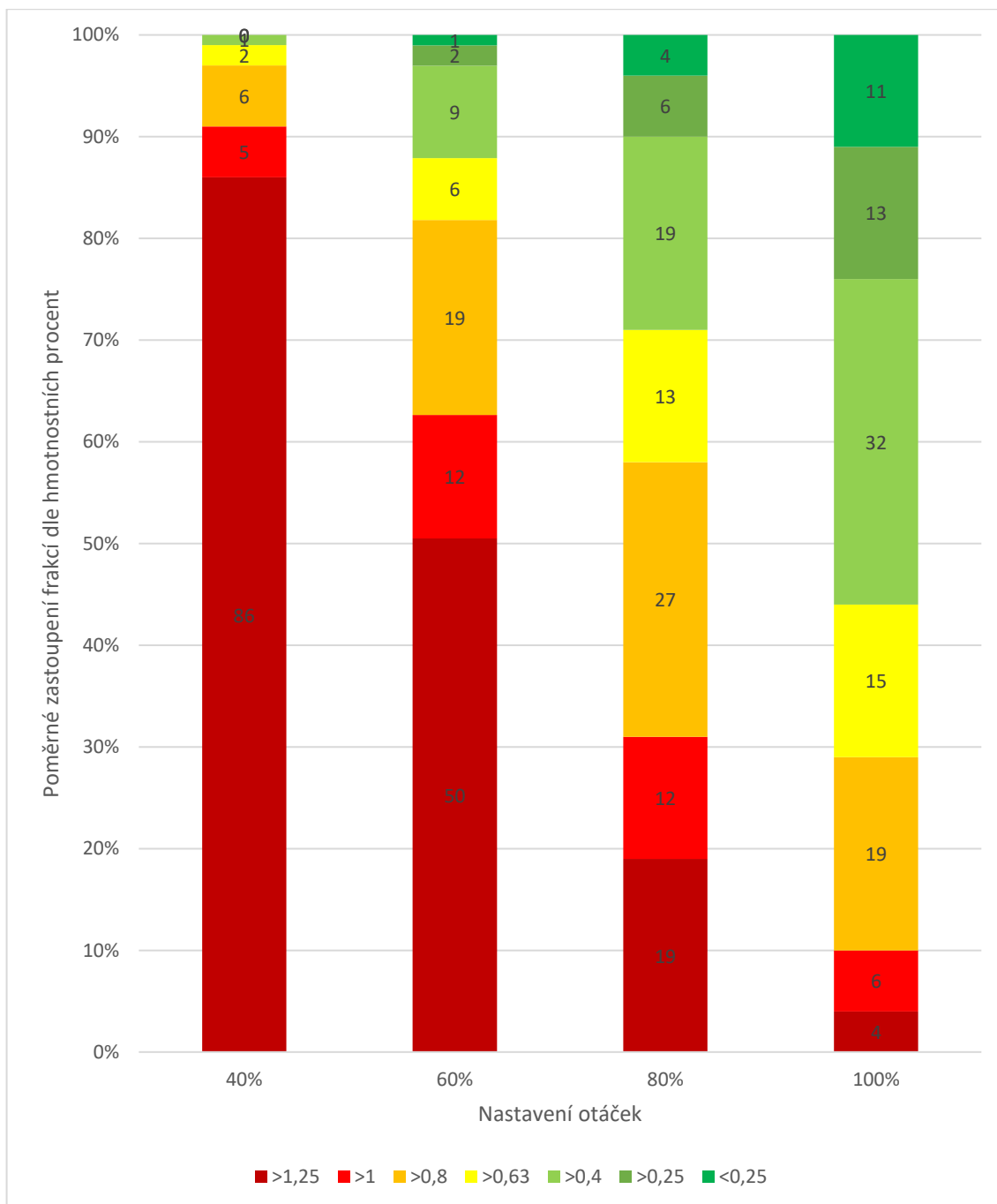
Obrázek 40: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-II

I v tomto případě je z grafu znatelný pouze nepatrný nárůst teploty. Nízká teplota ovšem signalizuje malé tření a s tím související zanedbatelné interakce mezi částicemi a hranami zubů.



Obrázek 41: Graf srovnání proudů před mletím a během mletí pro variantu A-II

Z obrázku 41 je patrný téměř lineární vývoj výkonů. Rozdíl mezi výkony se při zvyšování otáček zvětšuje. Maximální diference v tomto případě nastává při stupni 10, kdy rozdíl mezi výkonem naprázdno a výkonem při mletí dosahuje zhruba 2 000 wattů.

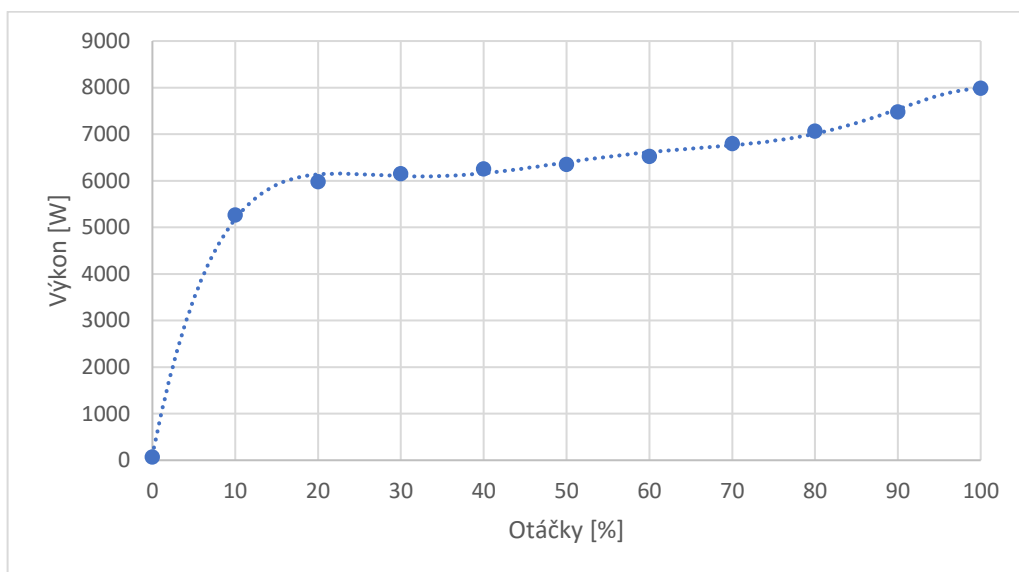


Obrázek 42: Graf rozložení frakcí namleté gummy pro variantu A-II

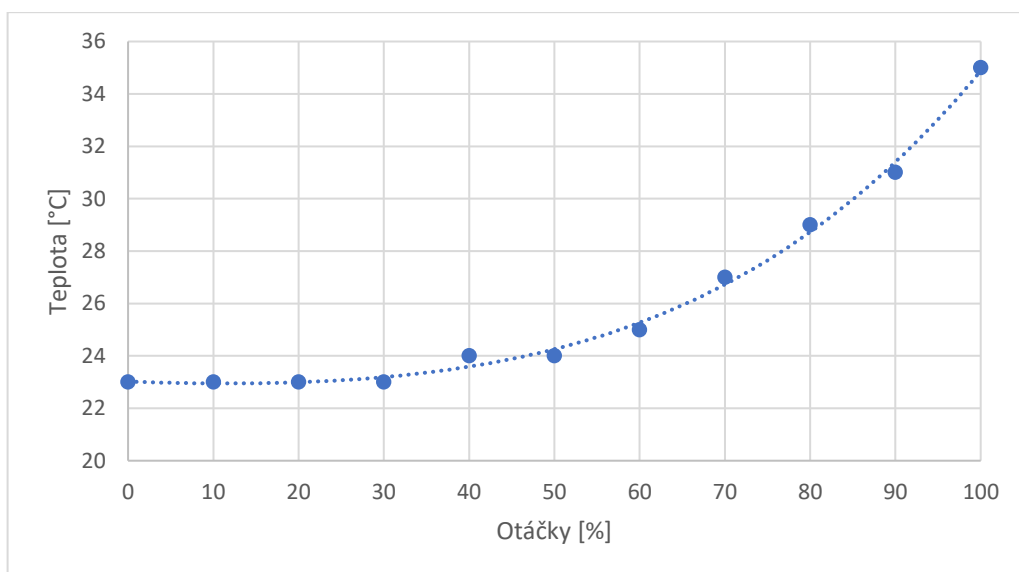
Na tomto grafu můžeme vidět, že oproti nastavení zubů bez podložky se hodnoty nijak výrazně nezměnily. Mírné zlepšení nastalo při mletí na 40 % otáček.

Nicméně i přes toto zlepšení je stále 86 hmotnostních procent vzorku větších než 1,25 milimetru a dokonce 97 % je větších než 0,8 milimetru. Při mletí na stupeň otáček 10 se hmotnostní procenta částic menších než 0,63 milimetru zvýšila na 56 %.

3.8.1.3 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,8 MILIMETRU (A-III)

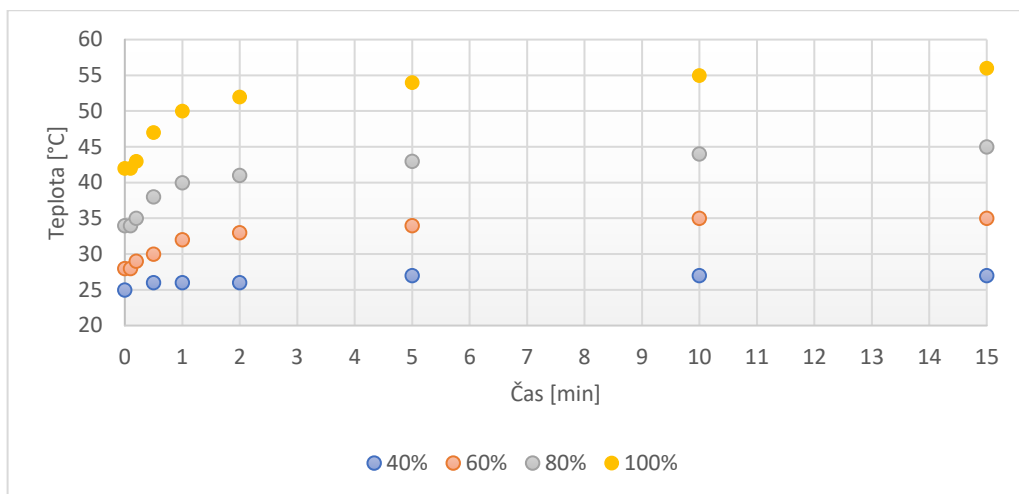


Obrázek 43: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-III



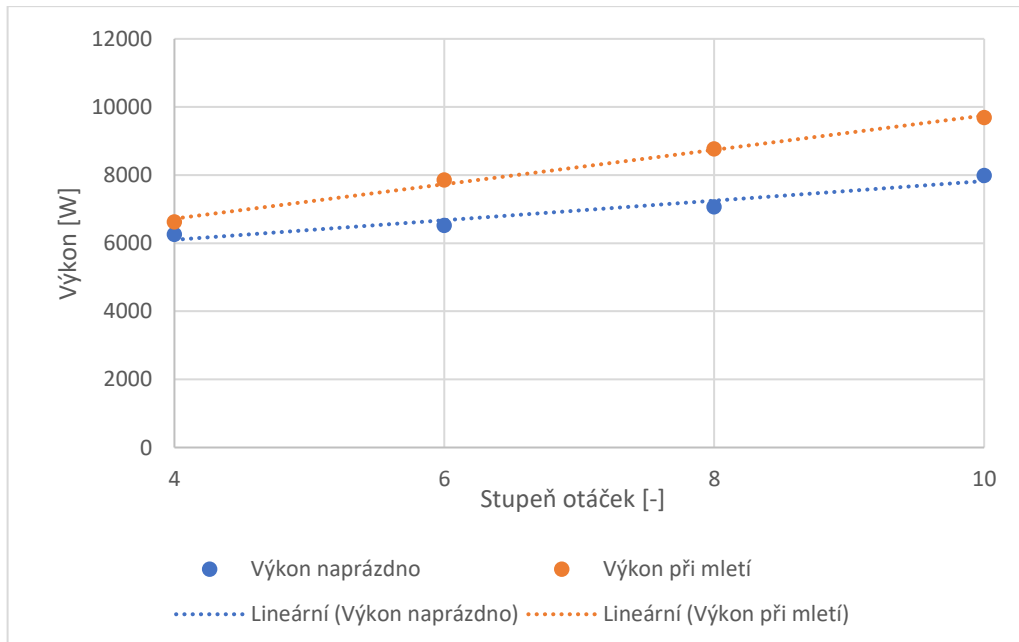
Obrázek 44: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu A-III

Z obou těchto grafů lze vyčíst pouze nepatrné zvýšení naměřených hodnot oproti předchozím variantám. Maximální hodnota výkonu naprázdno je v tomto případě rovna 7 990 wattů. Finální teplota je při stejném nastavení 35 °C.



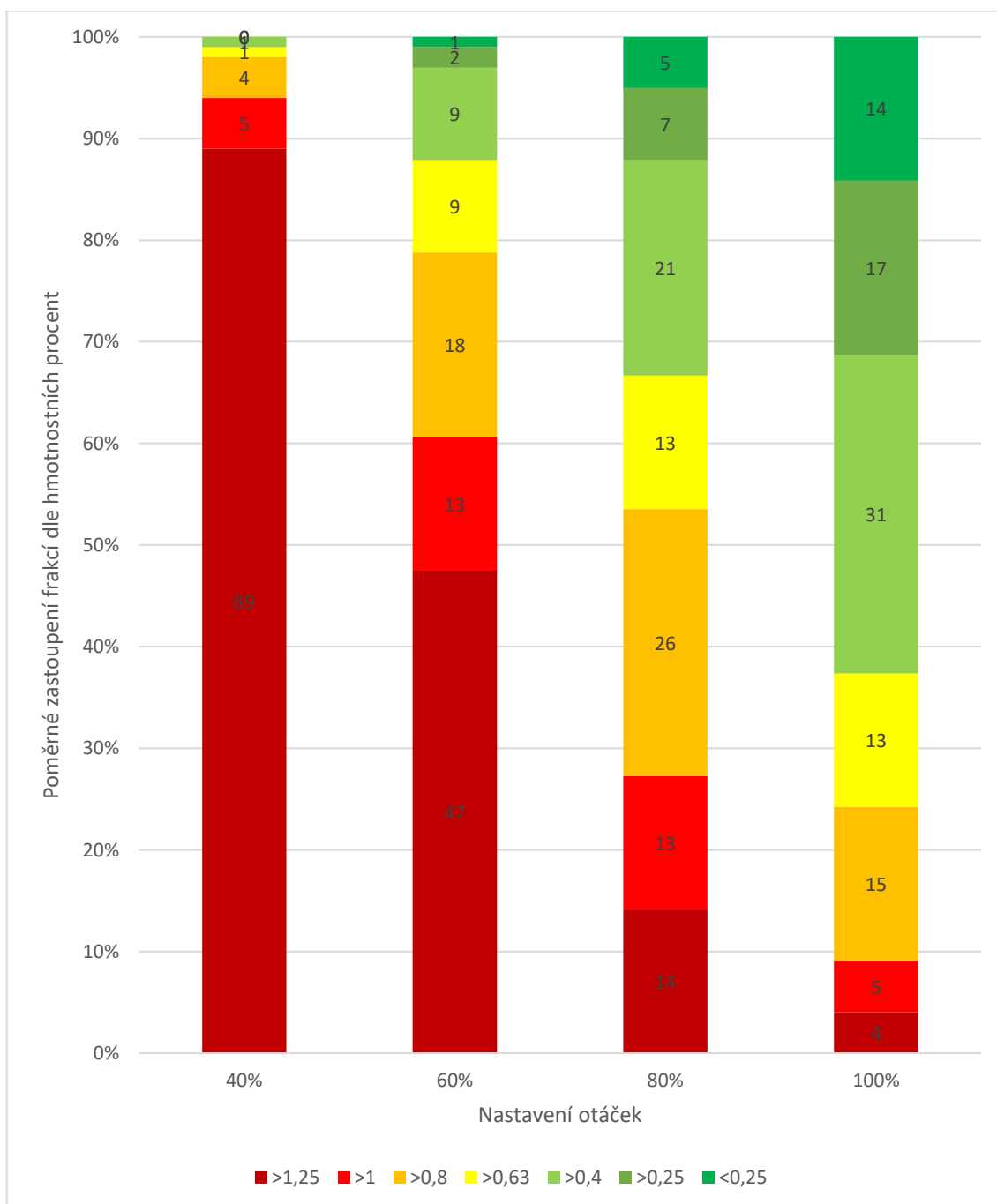
Obrázek 45: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-III

I v tomto případě platí, že vývoj teploty je zcela nepatrný. U 40 % otáček se teplota po patnácti minutách zvýšila pouze o dva stupně. Maximální navýšení nastalo opět u stupně 10, kdy došlo k navýšení o 14 °C. Nicméně i výsledná ustálená teplota 56 °C je pro mlýn velmi přijatelná.



Obrázek 46: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu A-III

Stejně tak se takřka shoduje vývoj rozdílu mezi výkonem naprázdno a při zatížení. Křivky opět nabývají téměř lineárního charakteru.



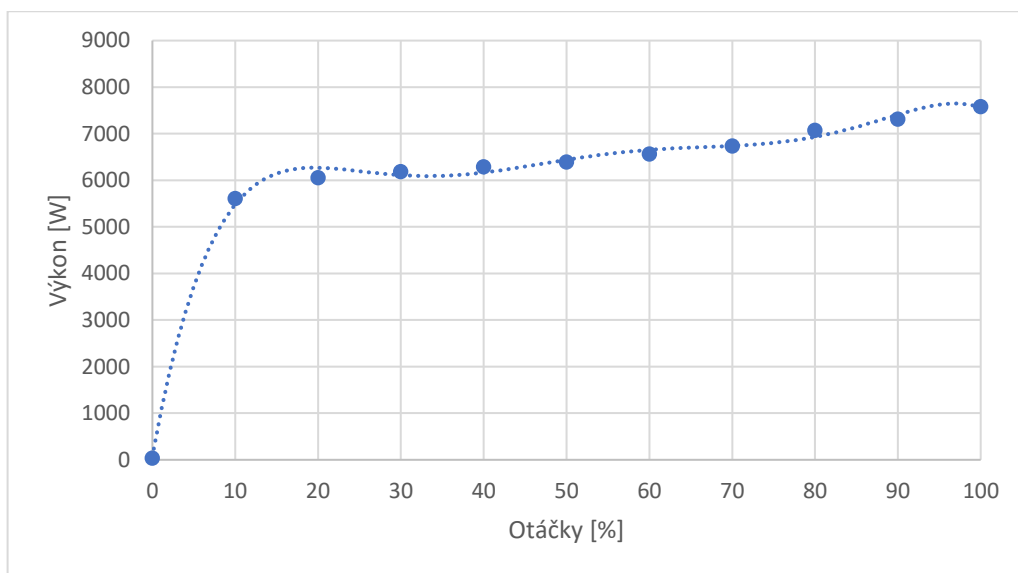
Obrázek 47: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu A-III

I tento graf prezentuje lehký posun blíže k požadovaným hodnotám. Pokud se opět zaměříme na nejlepší výsledky (nastavení otáček na 100%), můžeme si všimnout, že pouze 24 hmotnostních procent bychom měli vyhodnotit jako neuspokojivé. Zbýlých 76 % hmotnosti se již rozptýlilo mezi síta s mezerou menší než 0,8 mm. Jako velmi dobré výsledky bychom v tomto případě přijali hodnotu 31 % a jako výborné výsledky pak sytě zelených 14 %.

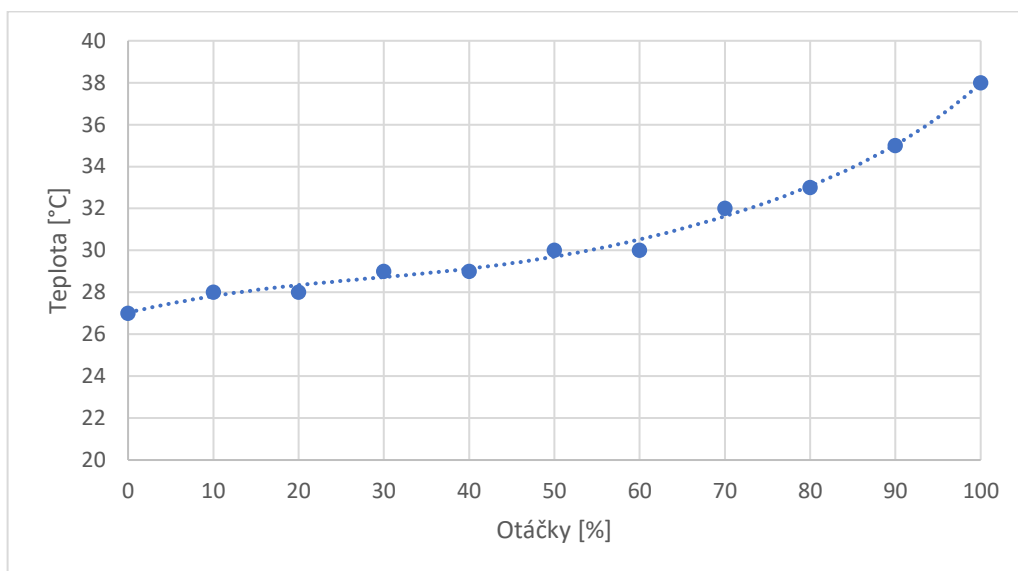
3.8.2 MLETÍ NA ROVNÝCH ČTYŘŘADÝCH ZUBECH (B)

3.8.2.1 MLETÍ BEZ PODLOŽKY (B-I)

Pro čtyřřadé zuby platí stejný harmonogram činností jako pro zuby třířadé. Prvním bodem je tedy opět „projetí“ jednotlivých otáčkových stupňů mlýna naprázdno.

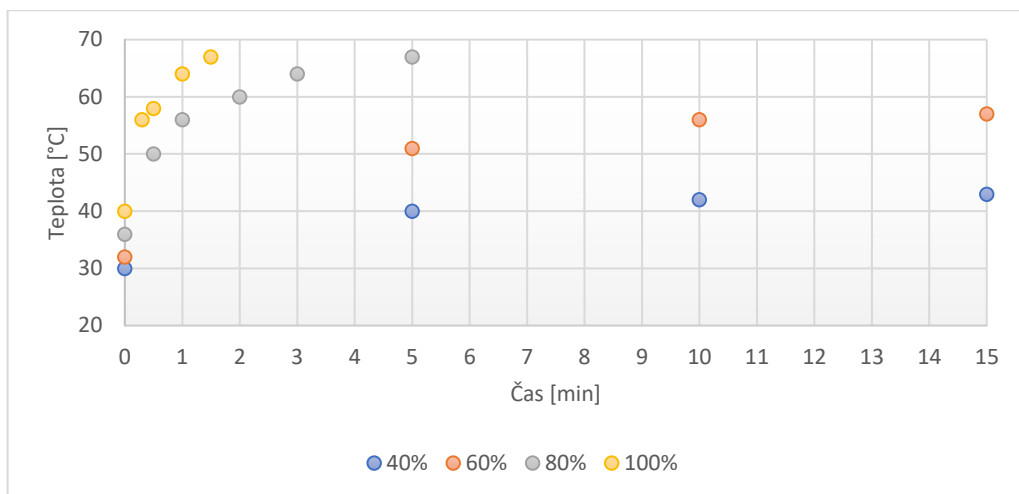


Obrázek 48: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-I



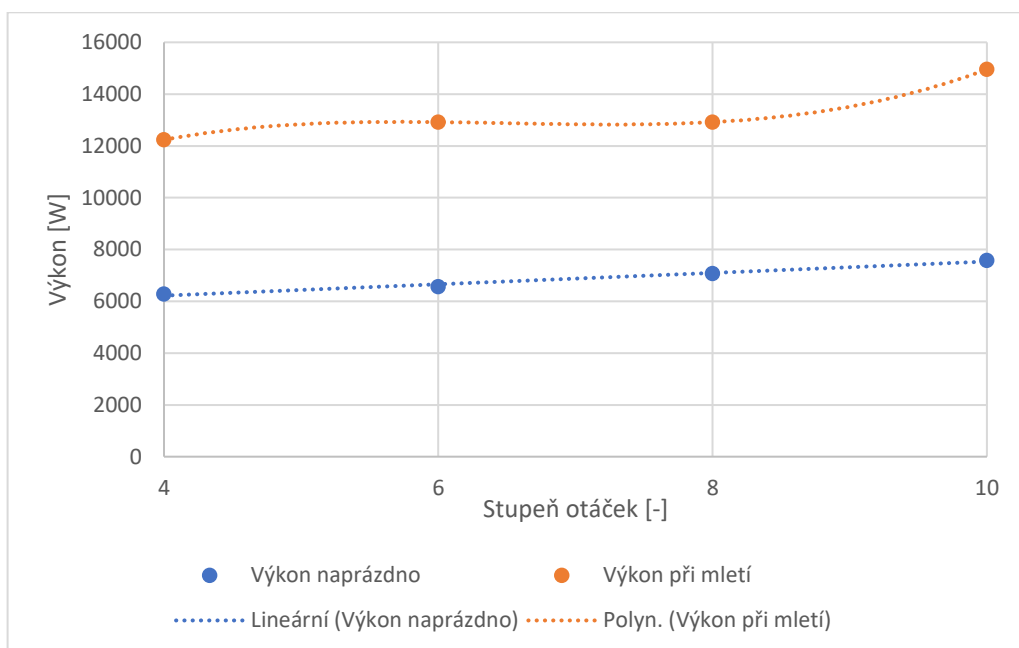
Obrázek 49: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-I

Z obrázku 49 je patrná vysoká teplota v hale během měření. Zatímco u varianty A se počáteční teplota pohybovala okolo 23 °C, při tomto měření je 27 °C.



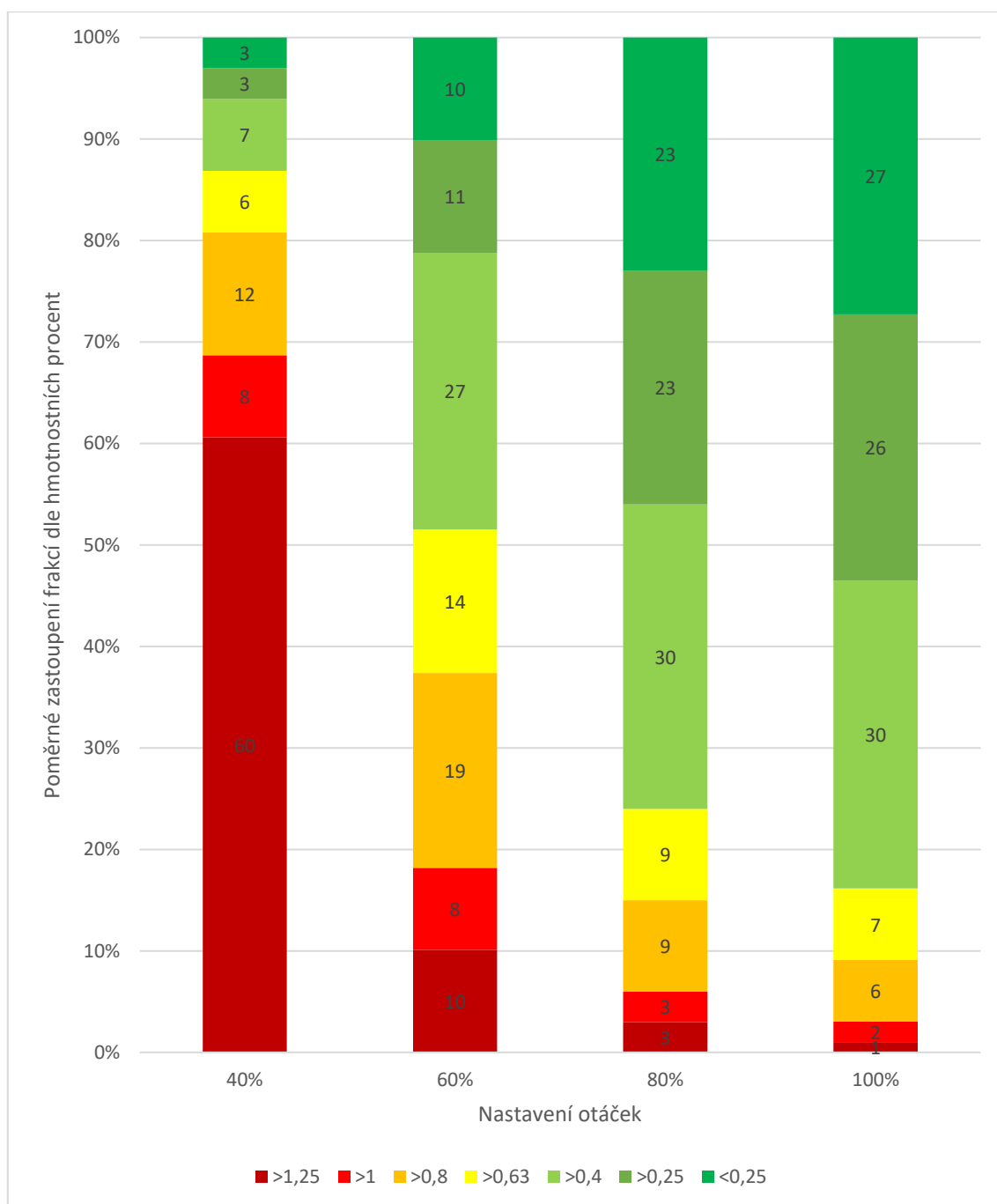
Obrázek 50: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-I

Z tohoto grafu je patrný strmý růst teploty pro stupeň otáček 8 a především pak 10. Pro toto nastavení mletí byl zkrácen čas experimentu z obav ze vznícení. Vzorky byly tedy odebrány po době 5 minut, respektive 90 sekund pro 100 % otáček. Lepší představu o vývoji mletí nastíní vývoj výkonu v čase na grafu níže.



Obrázek 51: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-I

Z tohoto grafu můžeme vidět, že maximální výkon během měření dosahoval téměř 15 kW. To je velký rozdíl oproti variantě A, kdy byl výkon obvykle kolem 10 kW. Uvnitř mlýnu také dochází k větší disipaci kinetické energie na teplo, což bylo patrné v obrázku 50.

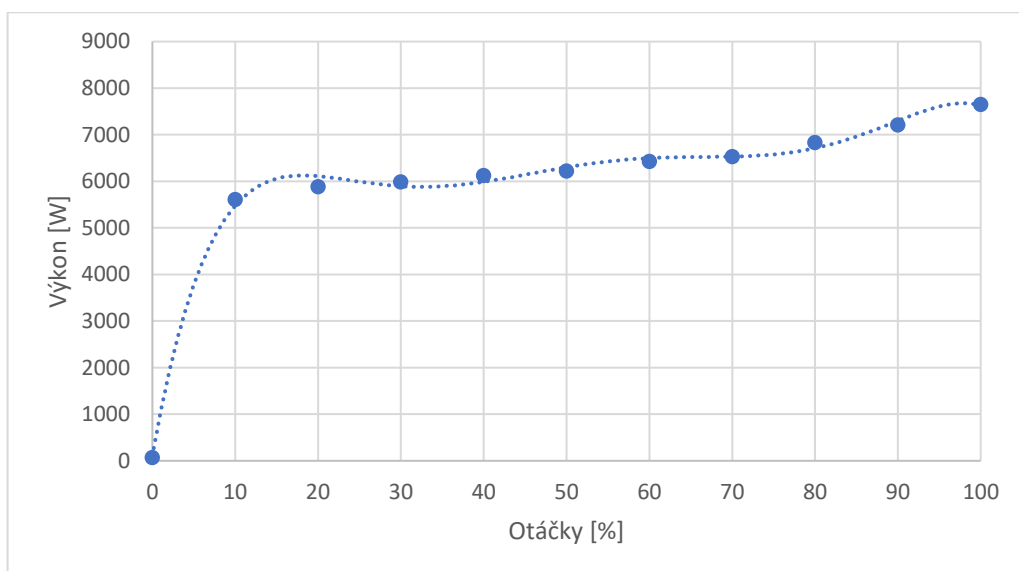


Obrázek 52: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-I

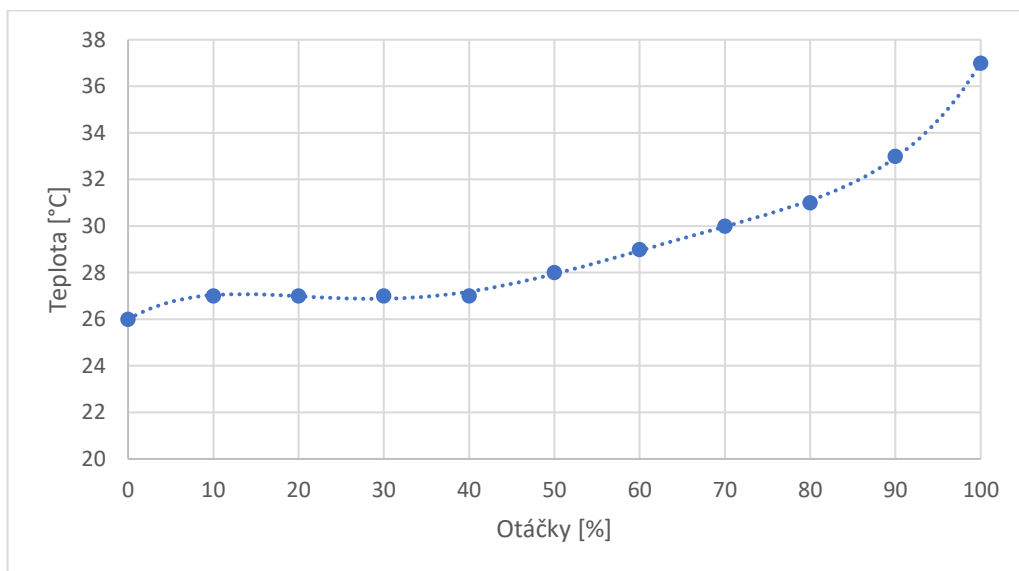
V tomto grafu je vidět již velice znatelný progres v kvalitě namletého materiálu. I přesto, že při mletí na 40 % z maximálních otáček mlýna dosahují výsledky stále nedostačujících parametrů, ostatní měření jsou o poznání lepší. Opět hlavně mletí při stupni otáček 10, kdy se již 83 hmotnostních procent dostalo pod velikost částic 0,63 milimetru. Navíc 53 procent ze sta gramů určených pro sítování je menších než 0,4 milimetru. Tato varianta se tedy prozatím jeví jako nejlepší, ovšem mletí může kvůli prudkému nárůstu teploty probíhat pouze krátkou chvíli.

3.8.2.2 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,3 MILIMETRU (B-II)

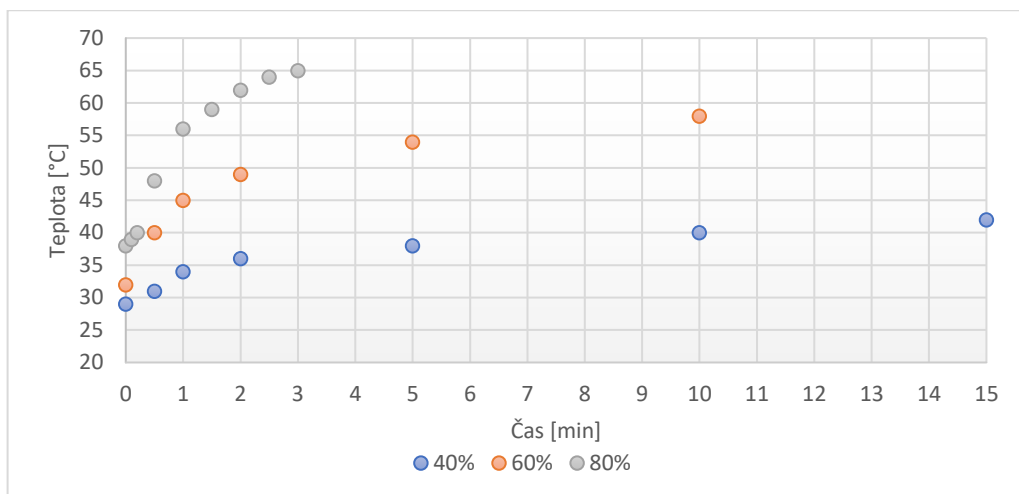
Změna vzdálenosti mezi zuby v tomto případě není tak snadná jako byla pro zuby třířadé. Respektive průběh je stejný, pouze je třeba déle čekat, než mlýn vychladne. Teplota ve mlýně totiž při měření B-I dosáhla více než 70 °C.



Obrázek 53: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-II

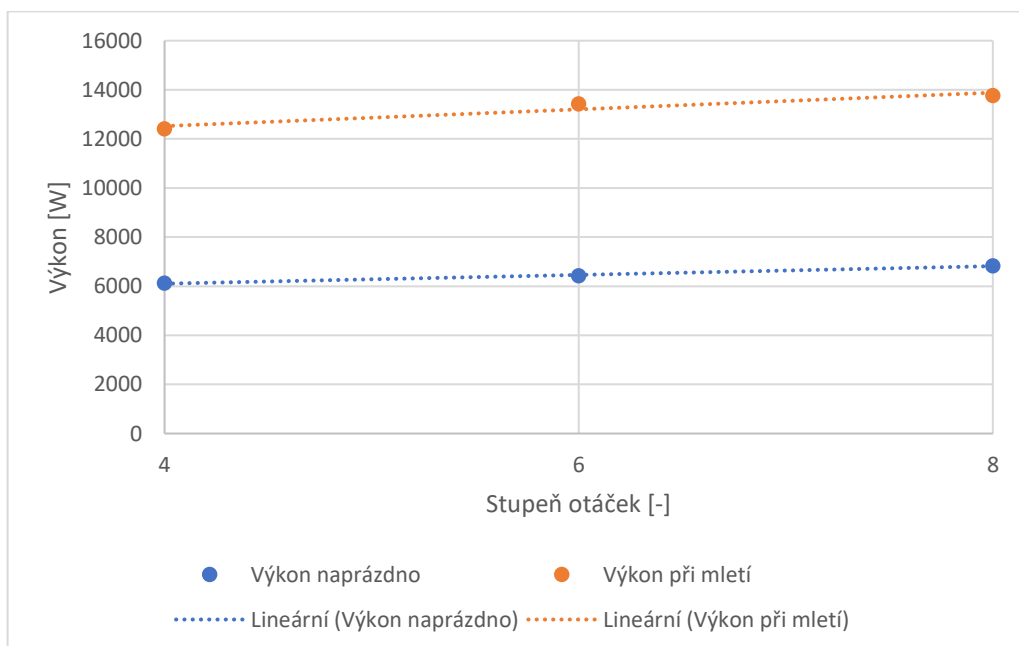


Obrázek 54: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-II



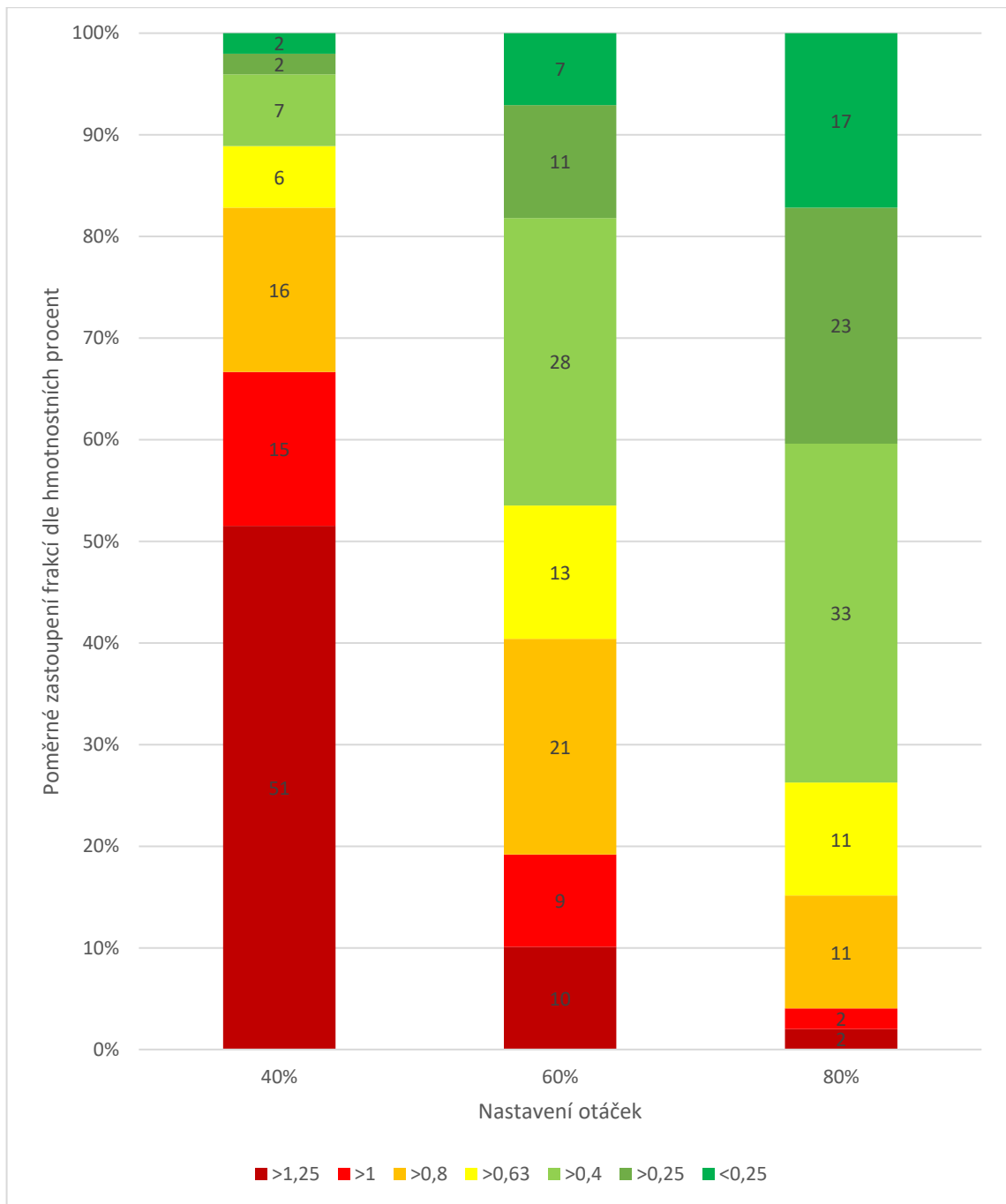
Obrázek 55: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-II

Z důvodu nepříznivých teplotních podmínek během měření jsem se rozhodl vynechat v tomto případě měření na stupni otáček 10. Maximální naměřené hodnoty v tomto případě tedy jsou pro otáčky nastavené na 80 % z maxima. Teplota se i tak šplhá k sedmdesáti stupňům Celsia.



Obrázek 56: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-II

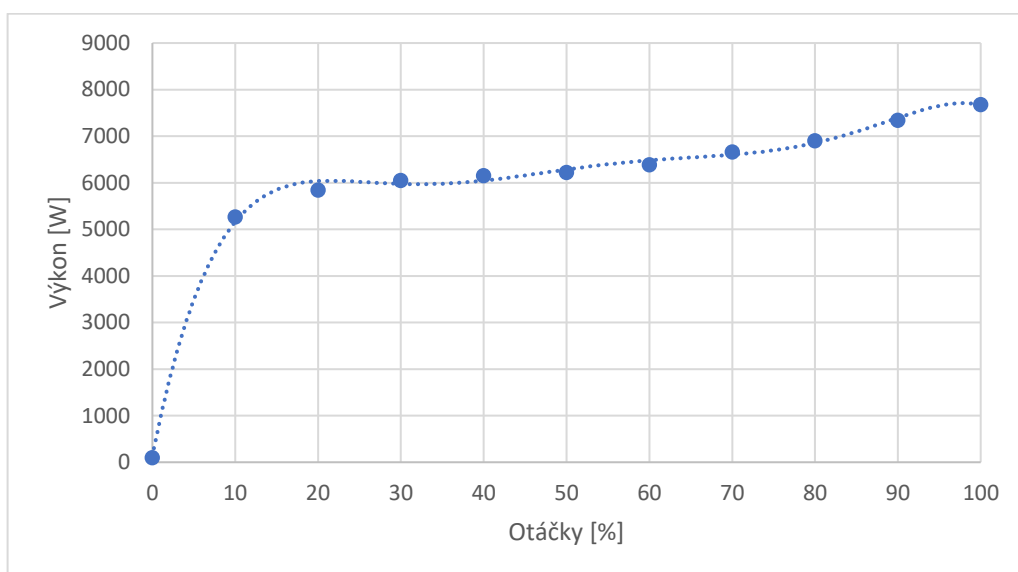
Graf nárůstu výkonů se tedy v tomto případě omezil pouze na tři body. Rozdíl mezi měřením naprázdno a měřením při mletí činí téměř 7 000 W.



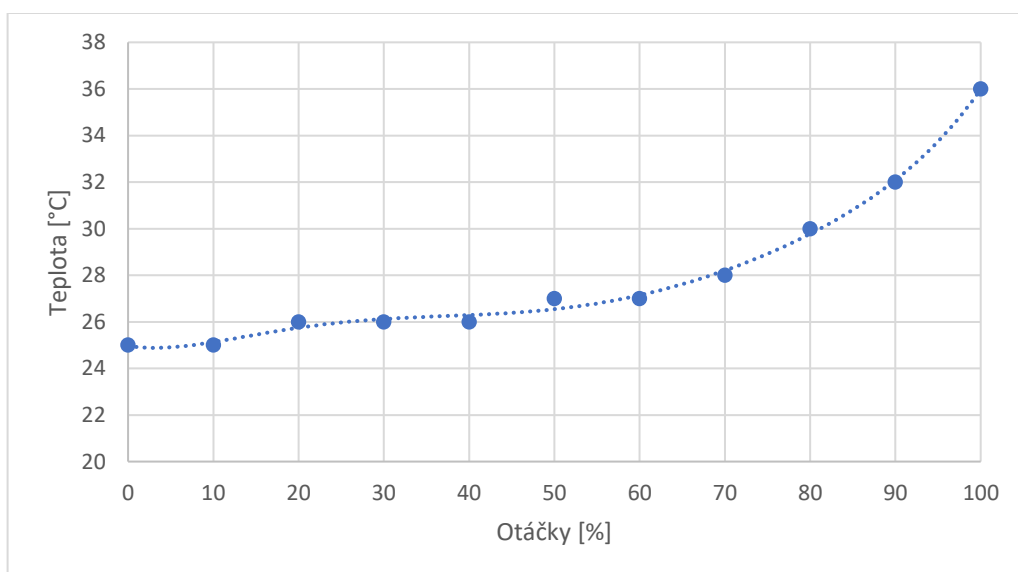
Obrázek 57: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-II

Při absenci čtvrtého sloupce s předpokládanými nejlepšími hodnotami mletí mohou porovnávat zbývající tři parametry otáček. Zatímco levý sloupec s nejnižšími otáčkami se proti měření B-I zlepšil, prostřední i pravý sloupec zůstal téměř totožný.

3.8.2.3 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,8 MILIMETRU (B-III)

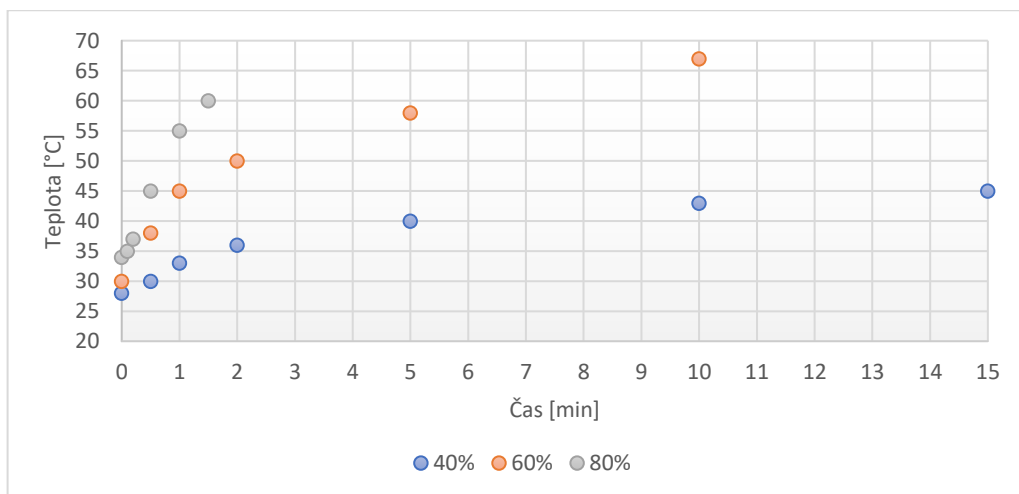


Obrázek 58: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-III



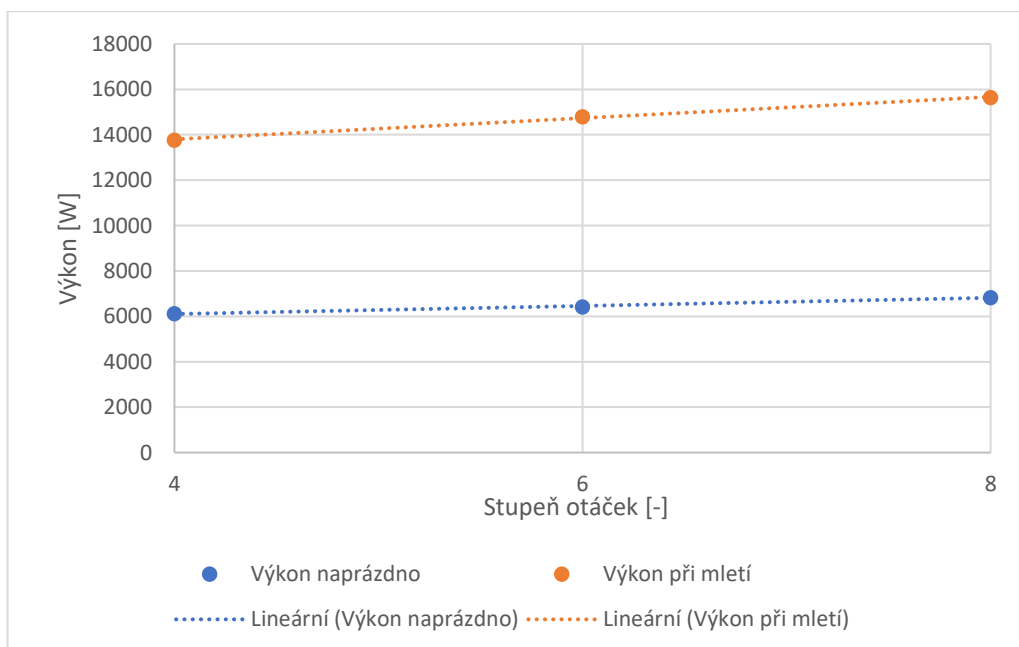
Obrázek 59: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-III

U obou grafů pro měření B-III můžeme vidět setrvalý stav nárůstu výkonu i teploty bez výraznějších odlišností. V tomto případě si již dovoluji prohlásit, že vliv podložky je pro toto nastavení, při spuštění mlýna naprázdno, naprosto zanedbatelné. Odchyly mezi měřeními B-I, B-II a B-III jsou totiž u těchto veličin pouze v řádech desetin wattů, respektive stupňů Celsia.

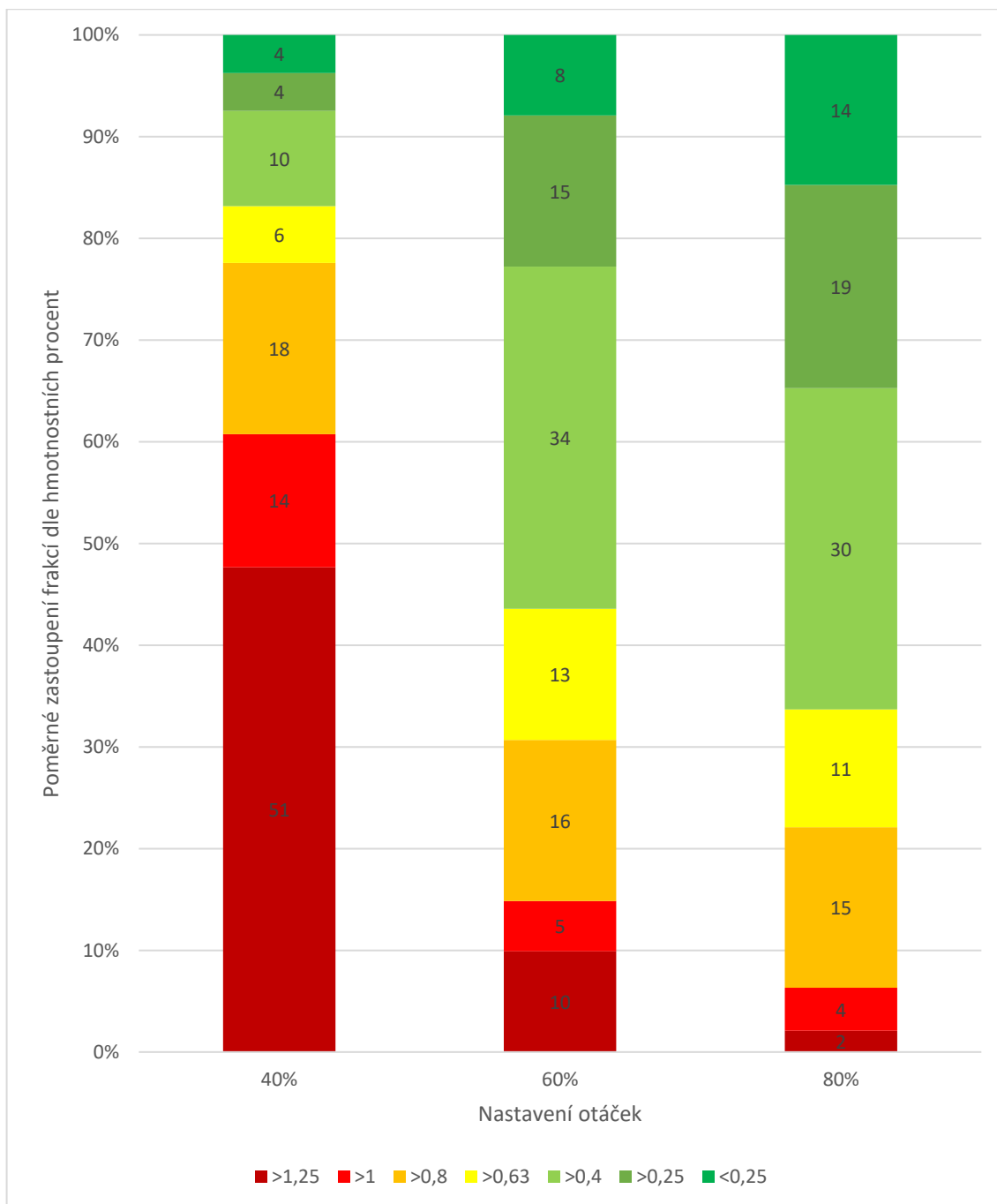


Obrázek 60: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-III

I při tomto měření bylo měření byl vynechán stupeň potenciometru 10. Pro 8. stupeň pak měření bylo z bezpečnostního hlediska ukončeno již po devadesáti sekundách. Teplota sice v tomto případě stihla vystoupat pouze k šedesáti stupňům Celsia, nicméně z grafu je patrné, jak strmý průběh nárůst měl. Při měření o minutu delším je již takřka jisté, že by došlo k překročení 70 °C, čehož jsem se snažil vyvarovat.



Obrázek 61: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-III

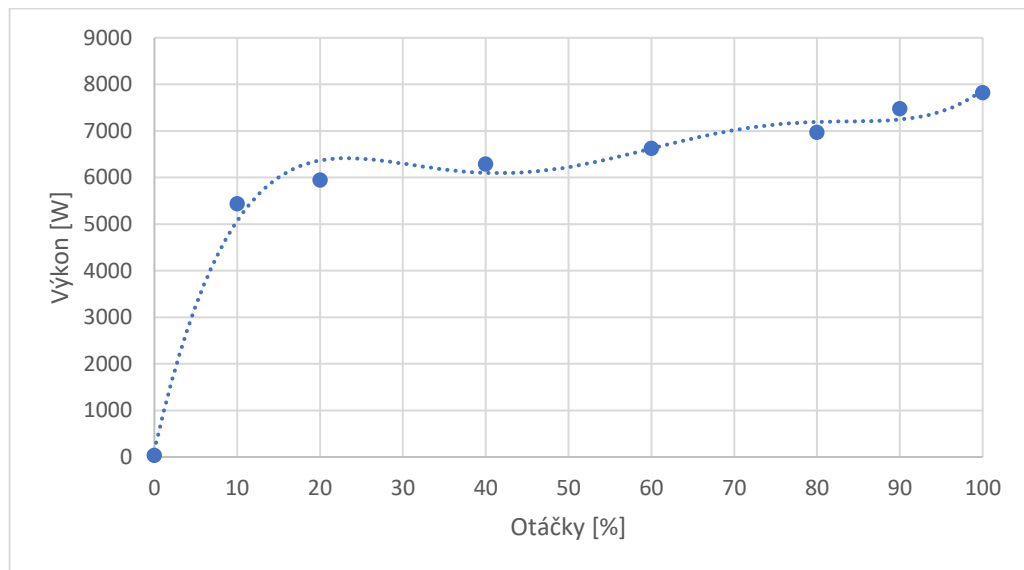


Obrázek 62: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-III

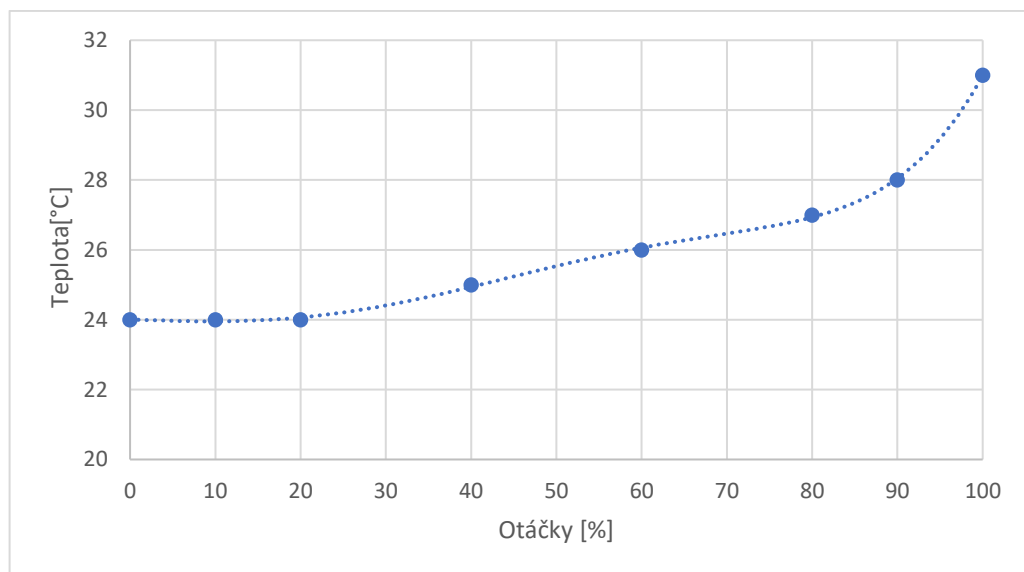
Při mletí B-III se již hmotnostní rozložení frakcí při 8. stupni otáček blíží výsledkům A-III na stupni deset. Z toho můžeme lehce odvodit, že čtyřřadé zuby dosahují lepších mlecích parametrů, ovšem na rozdíl od třířadých zubů musíme v tomto případě velice bedlivě hlídat rostoucí teplotu. Vzhledem k tomu, že již při tomto nastavení se v pravém sloupci dostalo 74 hmotnostních procent pod velikost částic 0,8 mm, dá se celkem s jistotou říci, že pro nastavení s maximálními otáčkami by se tato hodnota blížila hranici 100 hmotnostních %.

3.8.3 MLETÍ NA ŠIKMÝCH ZUBECH (C)

3.8.3.1 MLETÍ BEZ PODLOŽKY (C-I)

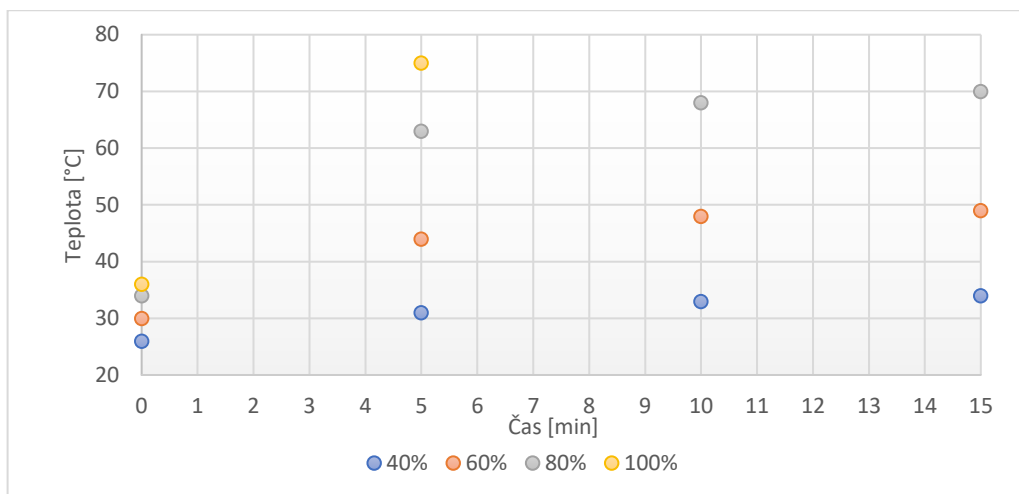


Obrázek 63: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-I



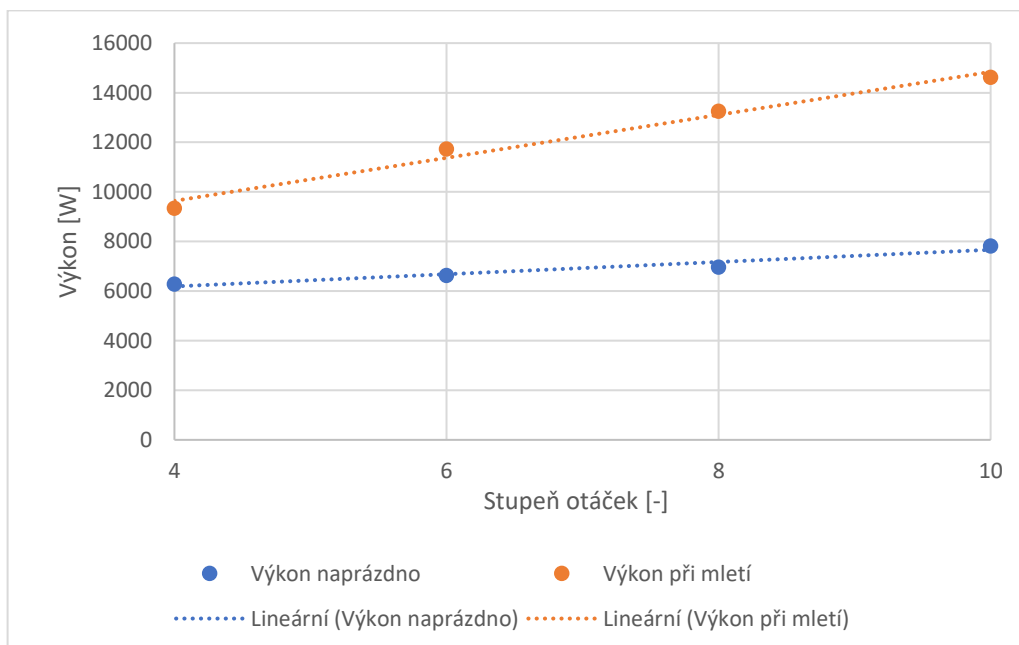
Obrázek 64: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-I

Z výše uvedených grafů můžeme vidět, že maximální výkon se pro aktuální nastavení parametrů pohybuje okolo 7,8 kW. Teplota při této konfiguraci dosahuje hodnoty 31°C.

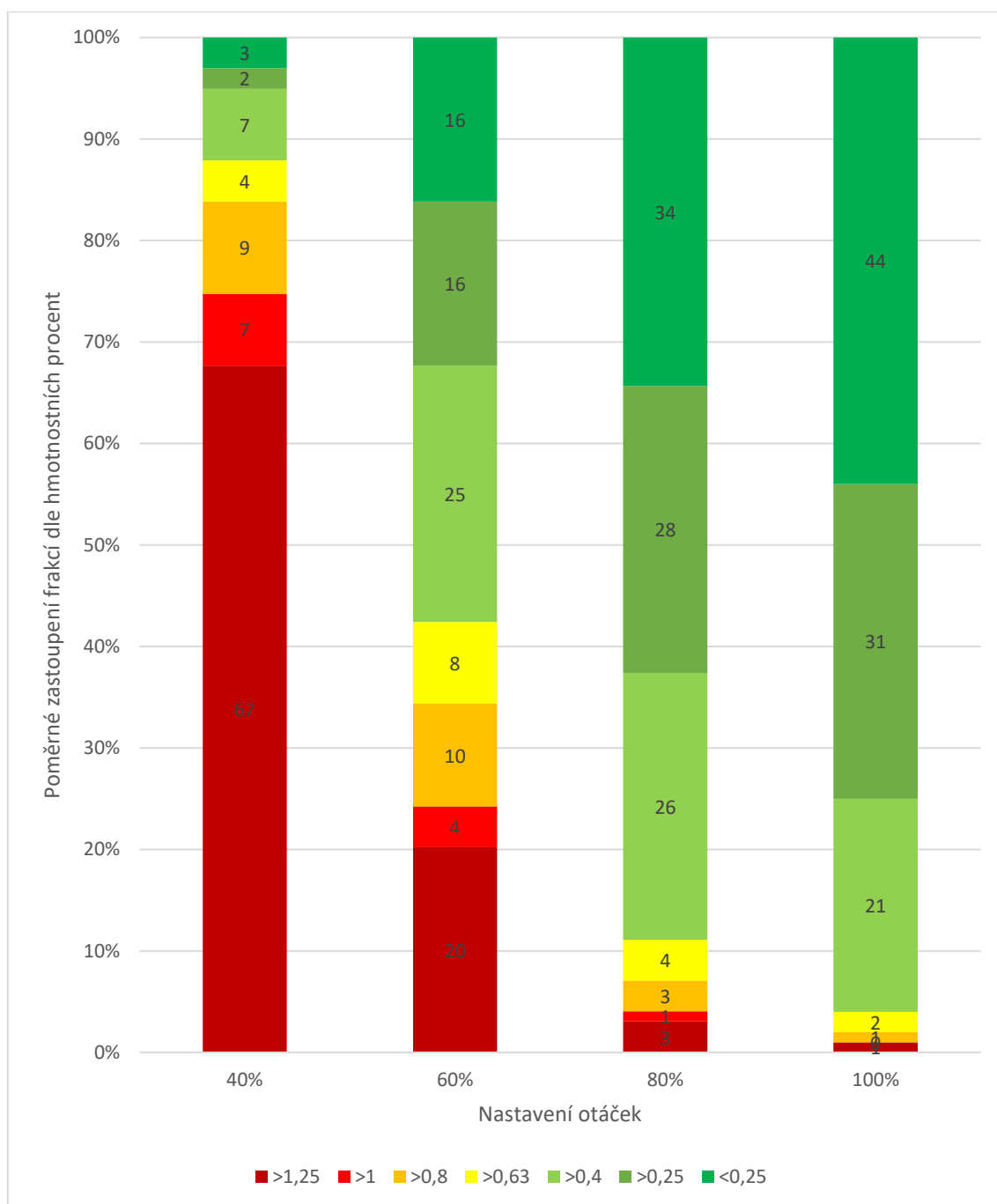


Obrázek 65: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-I

Výsledky z měření nejsou v této práci udávány chronologicky. Jako první byly v mlýnu instalovány zuby šikmé. Toto měření bylo tak vůbec prvním, které jsem na mlýnu prováděl. V tomto případě jsem podcenil nutný počet měření, hlavně pak při měření teploty mletí. Neočekával jsem totiž tak rychlý nárůst teplot, proto jsou v tomto případě zobrazeny v obrázku 65 žlutě pouze dva body. Nicméně i z nich lze vyčíst, že po pěti minutách mletí na maximální otáčky dosáhla teplota na hodnoty 75 °C.



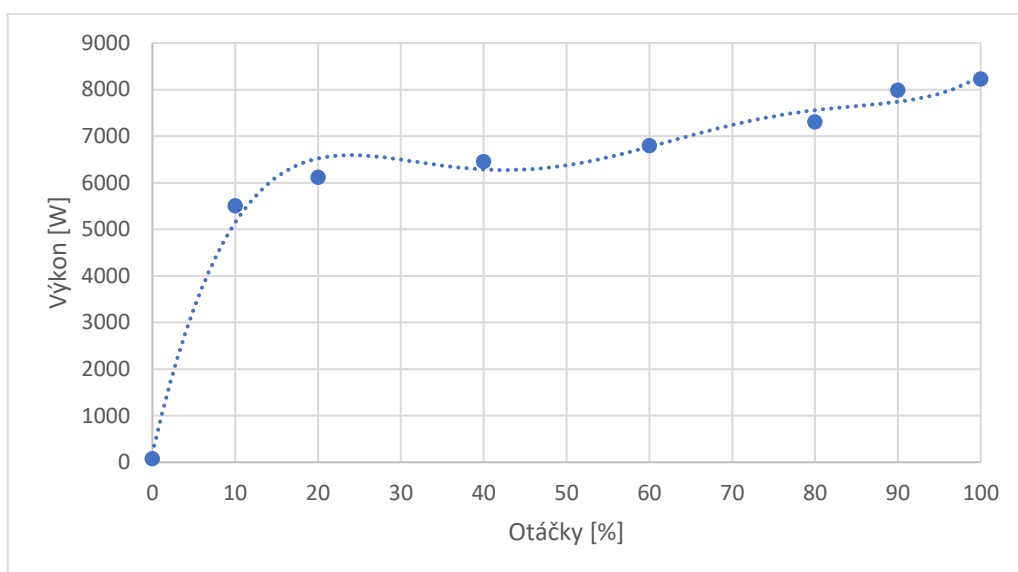
Obrázek 66: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-I



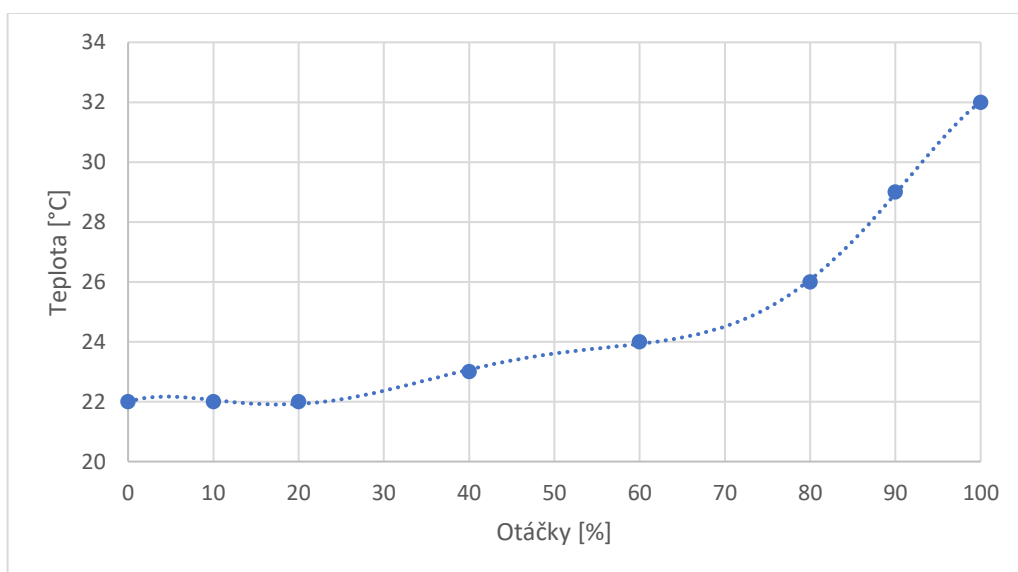
Obrázek 67: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-I

Z obrázku 67 jasně vyplývá, že výměna rovných zubů za zuby šikmé pozitivně ovlivnila výslednou velikost částic. Už při mletí s potenciometrem nastaveným na hodnotu 8, se dostáváme na dosud nejlepší výsledky. Ty ale ještě trumfuje nastavení potenciometru na maximum. V tomto případě je 98 hmotnostních procent z odebraného vzorku menších než 0,8 mm. Menších než 0,4 milimetru je pak 75 hm. %. Bohužel i u tohoto měření jsou tyto výsledky vykoupeny krátkou dobou, po kterou může mlýn s takto nastavenými parametry běžet.

3.8.3.2 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,3 MILIMETRU (C-II)

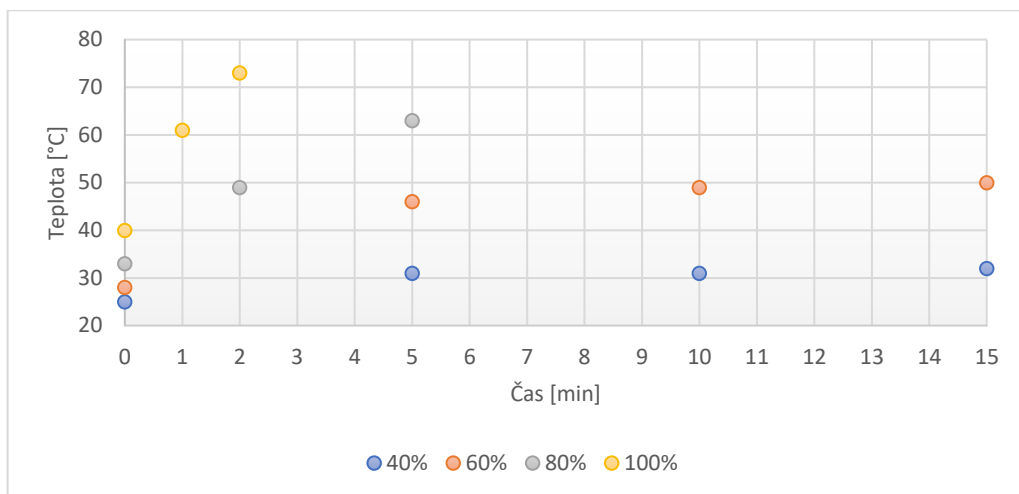


Obrázek 68: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-II



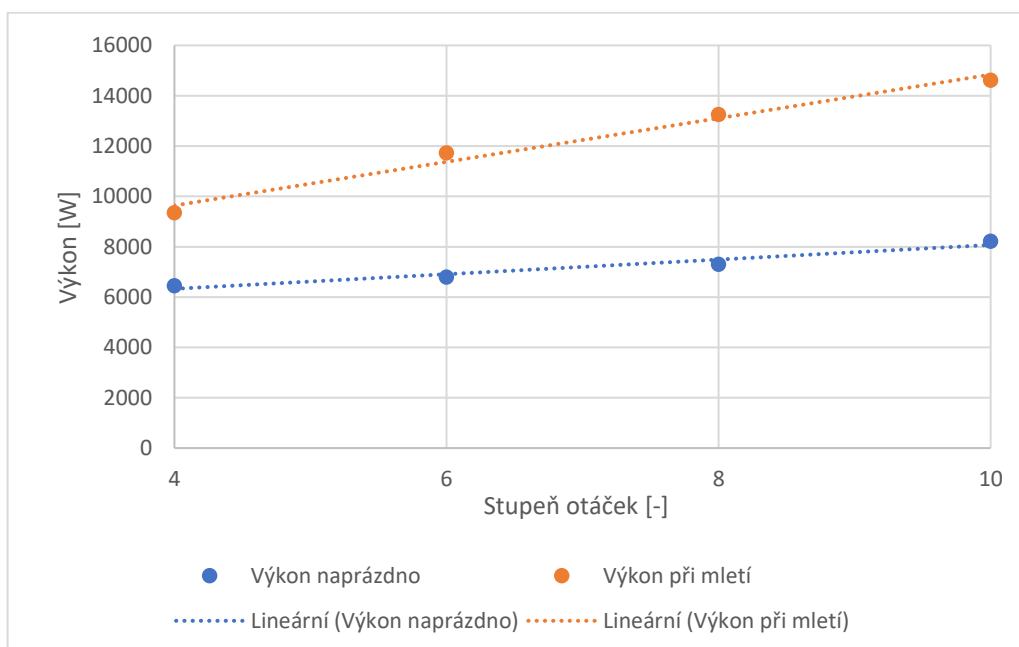
Obrázek 69: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-II

Při porovnání těchto grafů s předchozím měřením C-I můžeme vidět nepatrné zvýšení výkonu naprázdno. Přesněji o hodnotu 400 wattů. Teplota se při měření C-II zvýšila ještě zanedbatelněji, a to o pouhý jeden stupeň Celsia. Z hodnoty 31 °C na 32 °C.

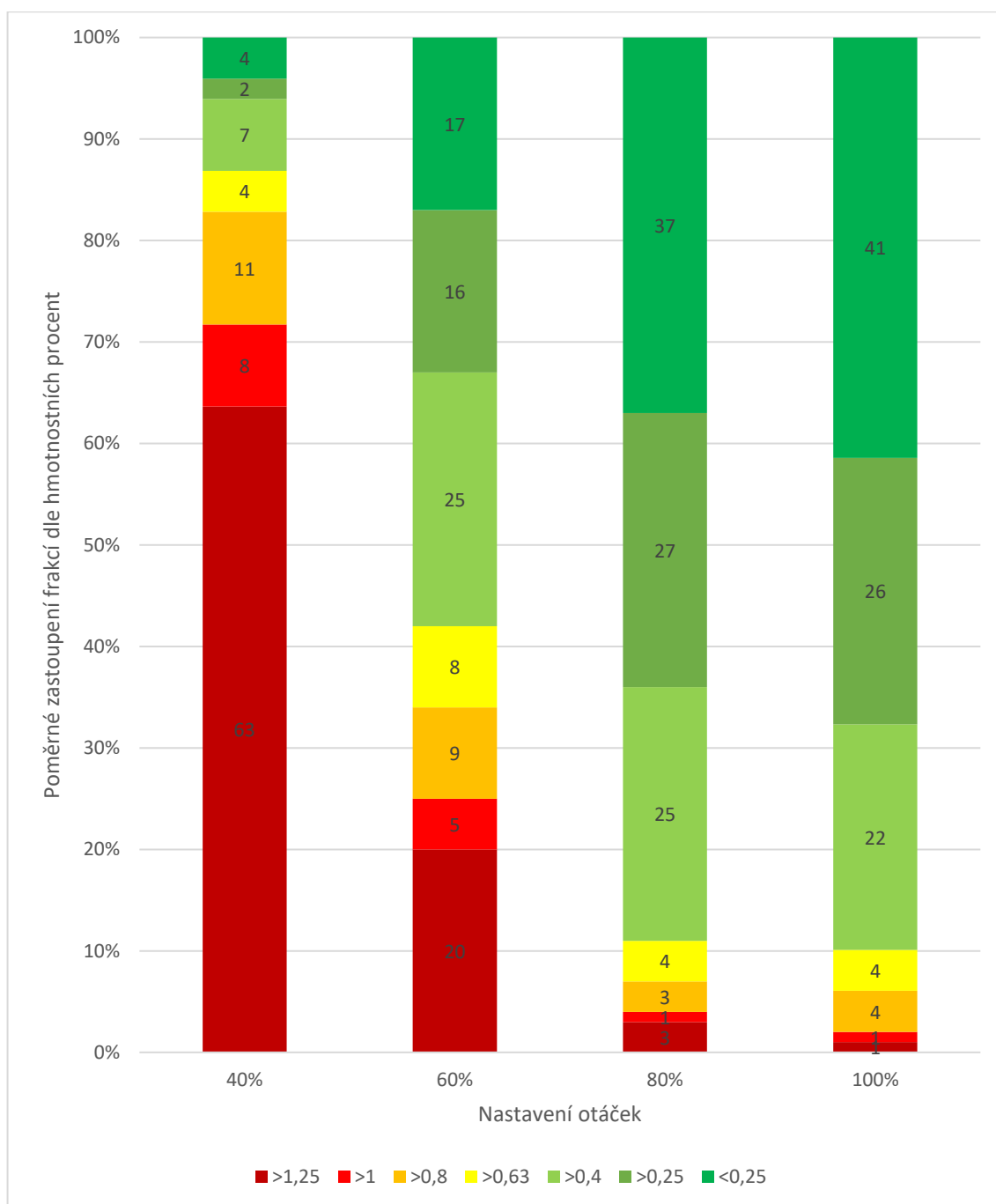


Obrázek 70: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-II

I pro tuto situaci bylo měření při stupních otáček 8 a 10 zkráceno. Pro stupeň 8 byl mlýn spuštěn po dobu pěti minut. U stupně 10 se trvání zkrátilo ještě více, a to na dvě minuty. Během těchto dvou minut se teplota z počáteční hodnoty 26 °C vyšplhala na 73 °C. To ale není teplota ustálená, dle mého odhadu by se teplota dostala při celém 15minutovém měření na hodnotu v rozmezí 90 °C ÷ 100 °C.



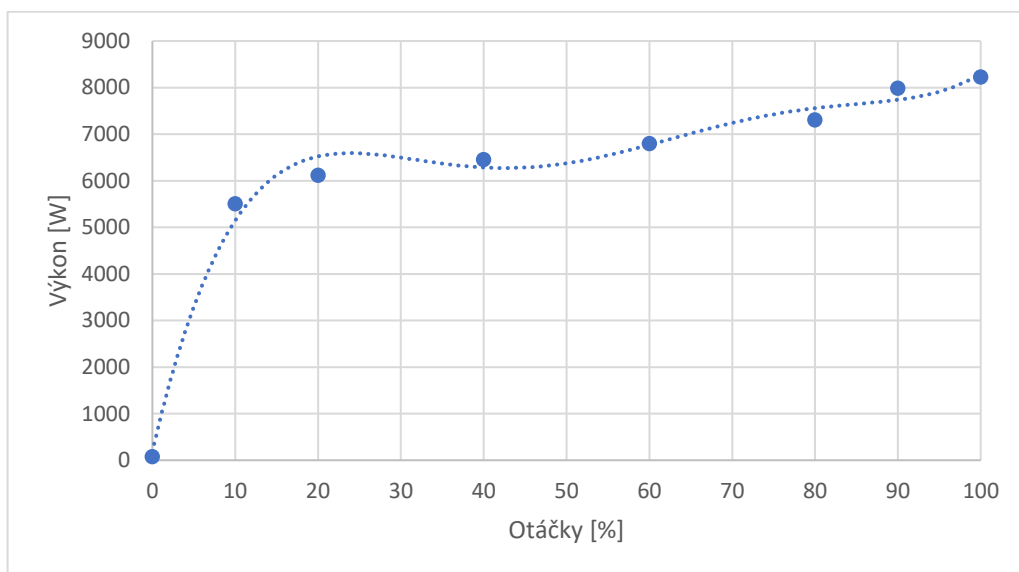
Obrázek 71: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-II



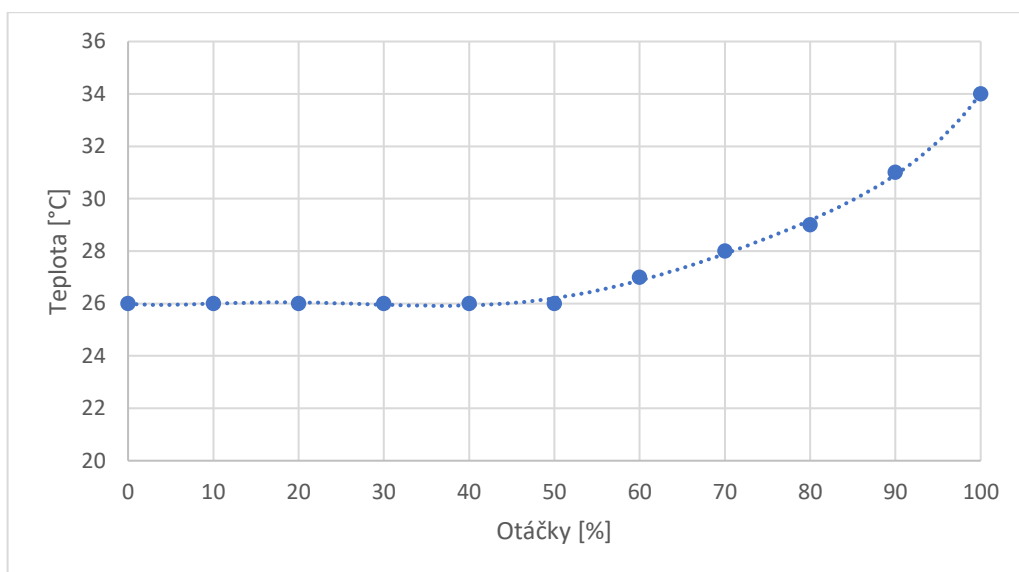
Obrázek 72: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-II

Výsledky v tomto případě dosahují ještě vyšší kvality, když 67 hmotnostních procent je menších než 0,4 milimetru. Ovšem objevily se už i první nedostatky v podobě spečeného výstupního materiálu. Toto spečení nastává vlivem vysokých teplot uvnitř mlýna. Aby tyto kousky znovu z vulkanizované gumy neovlivnily měření, rozhodl jsem se výstupní materiál nejdříve přesítovat přes síto s mezerou 2 milimetry. Díky tomu mi již zbyly pouze částice, u kterých k tomuto spečení nedošlo.

3.8.3.3 MLETÍ S PODLOŽKOU 0,8 MILIMETRU (C-III)

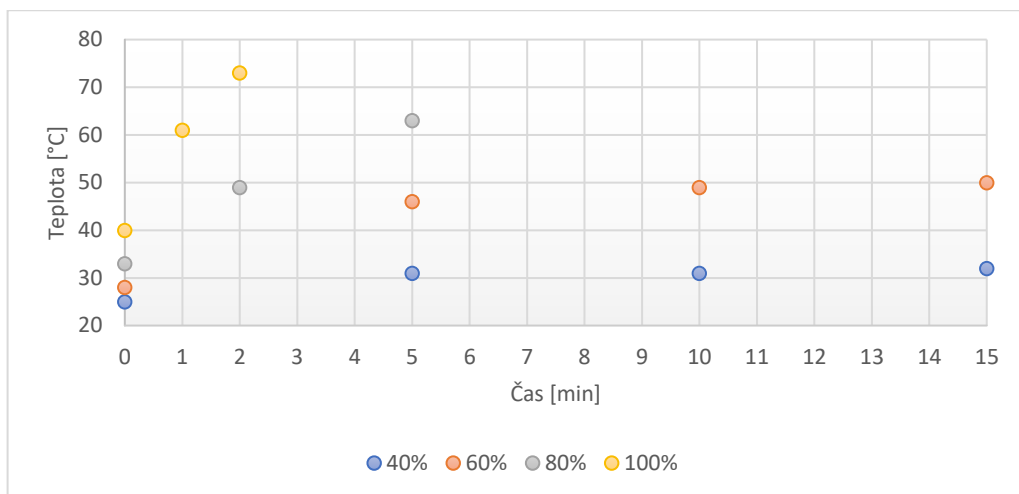


Obrázek 73: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-III



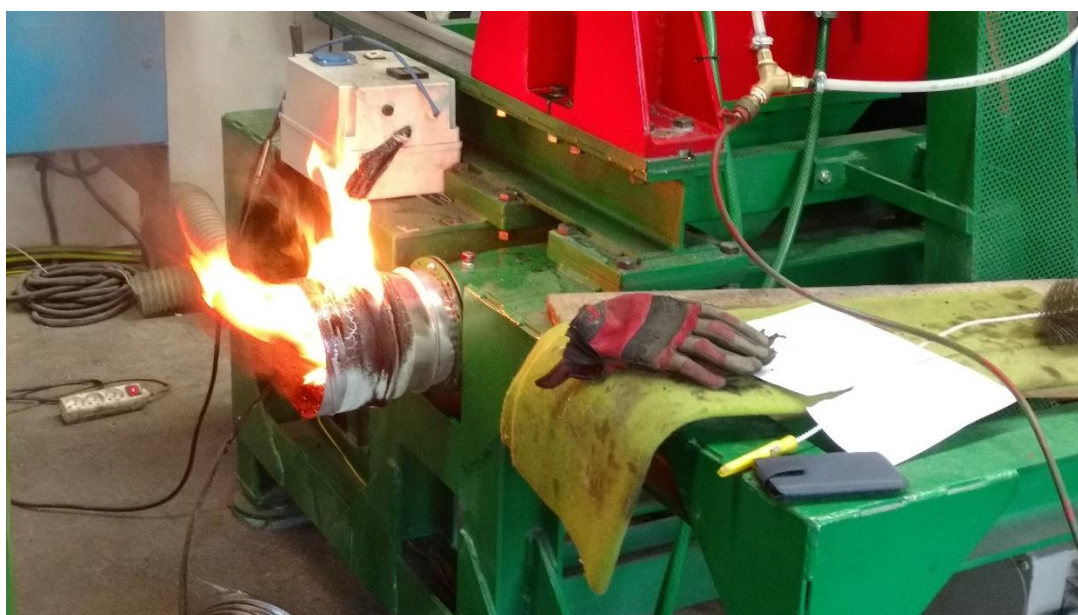
Obrázek 74: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-III

I v tomto posledním případě jsou pozorovatelné mírné změny při vyhodnocení provozu mlýnu naprázdno. Zatímco výkon zůstává na necelých osmi kilowatech, teplota se v tomto případě vyšplhala již na hodnotu 34 stupňů Celsia.



Obrázek 75: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-III

V tomto případě měření na stupeň 10 opět skončilo zhruba po dvou minutách. Tentokrát ovšem nikoliv schválně. Mezi komorami mlýna totiž došlo k tak velkému nárůstu teploty, až materiál začal hořet a gumovými hadicemi mezi mlýnem a ventilátorem začaly šlehat plameny. Právě stálý proud vzduchu způsobený ventilátorem oheň ještě více rozdmýchal, takže před samotným hašením bylo nutné ventilátor vypnout. Vzhledem k malému rozsahu požáru stačilo k jeho uhašení pouze malé hasicí zařízení naplněné vodou. Fotografie pořízená při požáru je k vidění na obrázku 76.



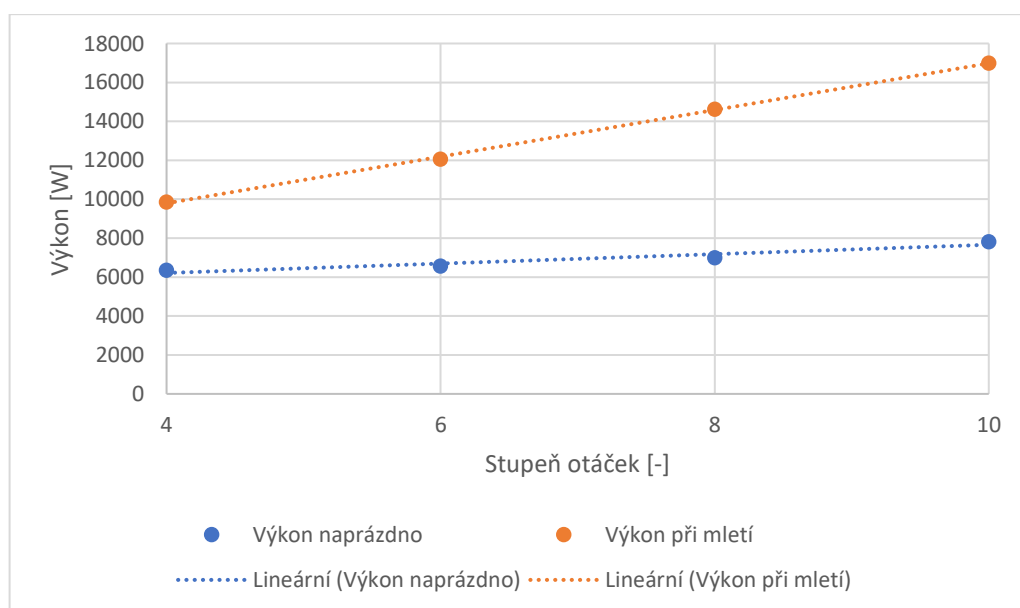
Obrázek 76: Požár při mletí

Jak jsem již avizoval dříve, měření nebyla prováděna chronologicky, jak jsou zde uváděna. Nejprve jsem měřil na šikmých zubech, poté na rovných čtyřřadých zubech, a nakonec na třířadých. Právě z důvodu tohoto požáru jsem se u měření B rozhodl neriskovat podobnou situaci a raději měření na stupni 10 vynechat.

Samotný požár byl způsoben více faktory. Hlavním je rozhodně prudce rostoucí teplota vlivem tření rotorů o mletý materiál. Druhým faktorem je ucpávání potrubí mezi mlýnem a ventilátorem jemně rozemletým gumovým prachem. Tento prach se snadno lepí na stěny a pojí k sobě další materiál. Takto v potrubí vznikne „špunt“, který brání odvodu rozemletého materiálu. Ten se v potrubí hromadí. Navíc se tím ucpává proudění vzduchu, které má hlavní vliv na chlazení motoru.

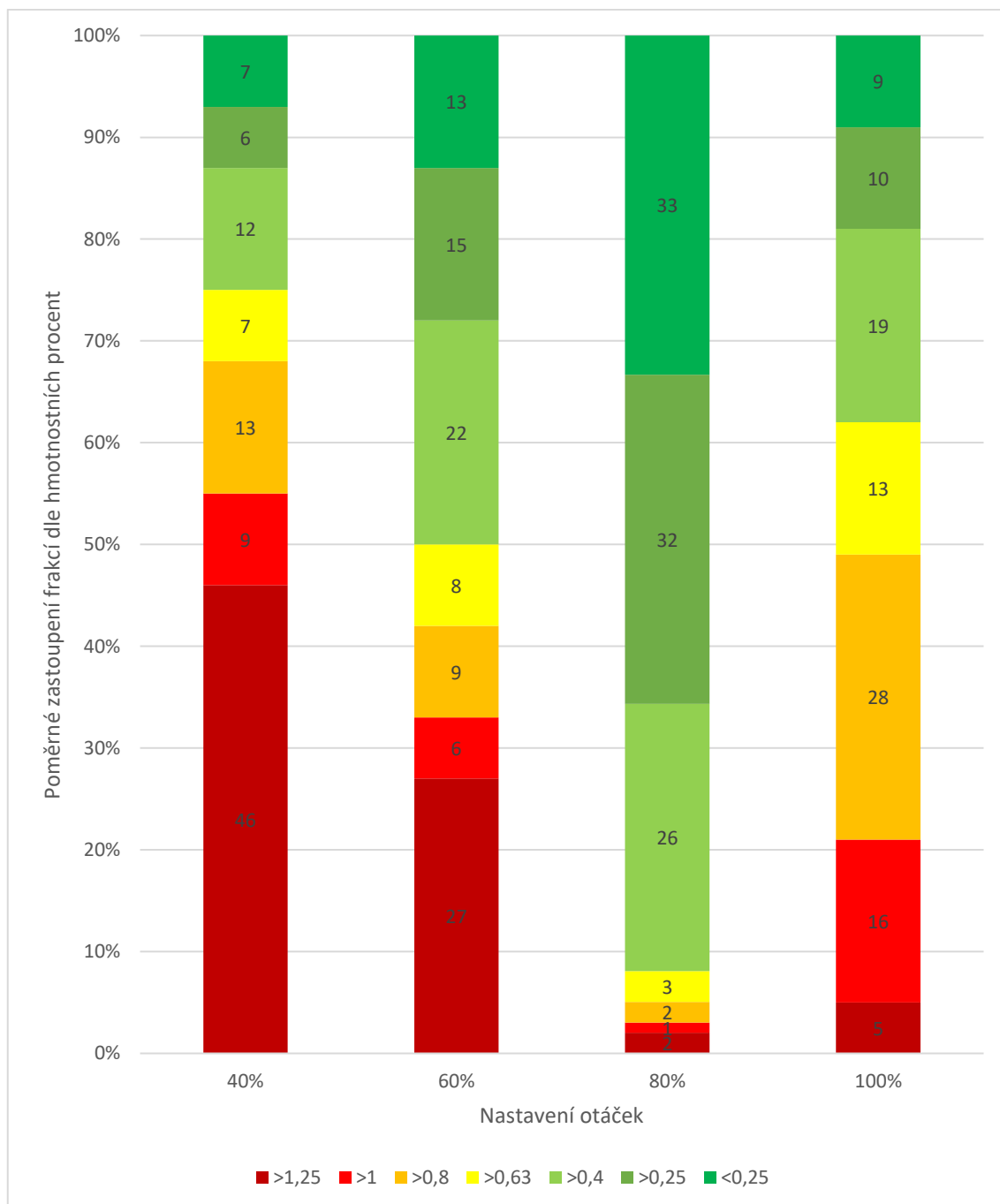
Tyto dvě situace ve vzájemné kombinaci stačí jako dostatečné zdůvodnění vzniklého požáru. Problémem je v tomto případě i umístění teploměru na výstupu z mlýnu. Teplota na něm zobrazovaná totiž absolutně neodpovídá reálné aktuální hodnotě teploty uvnitř mlýna. Z tohoto důvodu je velmi těžké odhadnout, při jaké teplotě, zobrazené na displeji teploměru, je ještě mletí bezpečně, a kdy už je naopak riziko požáru příliš vysoké. Více o této problematice v kapitole 3.10.

Abych se ale vrátil ještě zpět k výsledkům měření, zde je graf zobrazující srovnání výkonu naprázdno a výkonu při mletí.



Obrázek 77: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-III

I z grafu na předchozí straně je vidět, jak strmě při této konfiguraci výkon stoupal. Maximální hodnota činného výkonu mlýnu se vyšplhala až na rovných 17 kW.



Obrázek 78: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-III

Z grafu je vidět, že už při osmdesáti procentech otáček mletí dosahovalo skvělých výsledků. Pokud se spokojíme s jemnějšími částicemi než 0,8 milimetru, zjistíme, že tento požadavek splňuje hned 94 hmotnostních procent. Navíc 65 hm. procent bylo menších, než 0,4 milimetru.

Z obrázku 78 je ovšem patrné výrazné zhoršení výsledků odebraných těsně před požárem. Částice už se totiž spekly do velkých kusů, které nešly rozstítvat. Navíc nejjemnější částice zůstaly v potrubí a až po opětovném zapnutí ventilátoru a nastavení na maximální frekvenci se i tyto kusy z potrubí „odtrhly“.

Během požáru došlo také k napékání rozemletých částic pryže na vnitřní stěny komory mlýna, což je dobře vidět na následujícím obrázku.



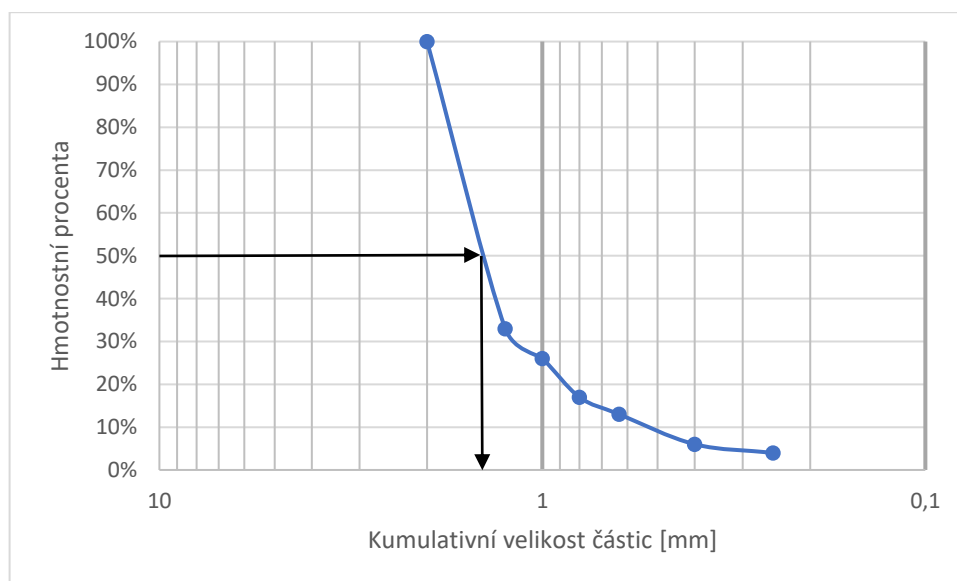
Obrázek 79: Napečené částice pryže na vnitřní stěně komory mlýna

3.9 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

3.9.1 HODNOTA D_{50}

Základní metodou vhodnou pro další práci s naměřenými výsledky je určení středního průměru rozemletých částic D_{50} . Tuto hodnotu je třeba určit pro všechna provedená měření.

Samotné zjištění tohoto parametru můžeme provést dvěma způsoby. Prvním z nich je grafické určení D_{50} . V tomto případě si na osu x vynesu v obráceném směru logaritmických souřadnic kumulativní velikost částic a na osu y hmotnostní procenta. Z grafu se poté budu snažit určit hodnotu velikosti částic pro 50 hm. procent.



Obrázek 80: Grafické určení hodnoty D_{50} pro variantu C-I při stupni otáček 4

Z obrázku můžeme vyčíst, že hodnota D_{50} se v tomto případě bude nacházet poblíž 1,4 milimetru. Pro upřesnění této hodnoty a také pro zjednodušení jsem však pro výpočet použil program MS Excel. V tomto programu jsem použil funkci LINTREND, která dokáže požadovanou hodnotu vypočítat. Jednotlivé hodnoty parametru D_{50} pro všechna měření jsou zobrazena v tabulce na další straně.

| | | | Poloha potenciometru | | | |
|-----------------|---|-----|----------------------|---------|---------|---------|
| | | | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Označení měření | A | I | 1,59 mm | 1,23 mm | 0,81 mm | 0,62 mm |
| | | II | 1,56 mm | 1,25 mm | 0,86 mm | 0,59 mm |
| | | III | 1,58 mm | 1,19 mm | 0,82 mm | 0,53 mm |
| | B | I | 1,38 mm | 0,64 mm | 0,43 mm | 0,38 mm |
| | | II | 1,26 mm | 0,67 mm | 0,46 mm | - |
| | | III | 1,26 mm | 0,67 mm | 0,46 mm | - |
| | C | I | 1,44 mm | 0,56 mm | 0,33 mm | 0,28 mm |
| | | II | 1,40 mm | 0,56 mm | 0,32 mm | 0,30 mm |
| | | III | 1,18 mm | 0,63 mm | 0,33 mm | 1,33 mm |

Tabulka 7: Kompletní hodnoty parametru D_{50} pro všechna měření

Z této tabulky již můžeme zhodnotit kvalitu mletého materiálu dle jednotlivých zubů. Při 40 % otáček zůstává hodnota D_{50} nad hranicí jednoho milimetru.

Nicméně je jasně patrný vzestupný charakter kvality materiálu ve směru od mletí A-I je mletí C-III. Nicméně tento stupeň otáček se ani zdaleka nepřibližuje kvalitám vysokorychlostního mletí.

Při potenciometru otočeném na pozici 6 se již daří velikost výrazně snížit.

Rozměry namletých částic se dostávají až na 0,56 mm, což je proti předchozímu stupni velký posun.

Dříve než se pustím do hodnocení mletí při vyšších rychlostech, by bylo dobré porovnat si namletý materiál se vstupním granulátem. Použiji tedy i tentokrát stejný postup na určení hodnoty D_{50} . Ta je v tomto případě rovna 2,55 milimetru. Poměr velikostí vstupního materiálu ku výstupnímu materiálu je zobrazen v tabulce 8.

| | | | Poloha potenciometru | | | |
|-----------------|---|-----|----------------------|------|------|------|
| | | | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Označení měření | A | I | 1,61 | 2,07 | 3,16 | 4,10 |
| | | II | 1,63 | 2,04 | 2,97 | 4,35 |
| | | III | 1,62 | 2,14 | 3,10 | 4,78 |
| | B | I | 1,86 | 3,97 | 5,92 | 6,77 |
| | | II | 2,02 | 3,81 | 5,51 | - |
| | | III | 2,02 | 3,81 | 5,51 | - |
| | C | I | 1,77 | 4,58 | 7,72 | 9,14 |
| | | II | 1,82 | 4,58 | 7,92 | 8,61 |
| | | III | 2,15 | 4,05 | 7,85 | 1,92 |

Tabulka 8: Poměr velikosti vstupního granulátu ku velikosti namletých částic

Při poloze potenciometru 8 můžeme vidět, že nejmenší částice dosahující velikosti 0,32 mm jsou téměř osmkrát menší než vstupní materiál. Při této konfiguraci už začínají být velmi patrné rozdíly mezi kvalitou mletí jednotlivých variant zubů. Zatímco třířadé zuby jsou při těchto parametrech schopny ze vstupního materiálu udělat částice třikrát menší, čtyřřadé zuby se dostávají až na poměr 5,5. Jasným vítězem je při tomto nastavení využití šikmých zubů, které, jak již bylo zmíněno, materiál zmenší osmkrát.

Velmi zajímavé je i srovnání velikostí částic dle zvoleného stupně otáček. Při přechodu ze stupně 4 na stupeň 6 se kvalita mletí téměř zdvojnásobí. Velmi podobné je to i při přechodu ze stupně 6 na stupeň 8. Tento progres se ale při změně na stupeň 10 prudce zbrzdí. Ačkoliv jsou hodnoty i v tomto případě kvalitou ještě výše, rozdíl již není tak razantní.

Při hodnocení stupně 10 bohužel schází dvě hodnoty u čtyřřadých rovných zubů. Nicméně z předchozích výsledků se dá odhadnout, že jejich výsledky by stále byly o něco horší než při mletí na zubech šikmých. Třířadé rovné zuby při tomto měření velmi viditelně zaostávají. Jedinou výhodou při mletí na těchto zubech je nízký nárůst teploty, díky čemuž mohlo mletí probíhat po celých patnáct minut.

3.9.2 MĚRNÁ ROZPOJOVACÍ ENERGIE

Nejzásadnějším faktorem celého mletí je určení rozpojovací energie spotřebované mlýnem. K jejímu určení vede poměrně složitá cesta. V této kapitole tak budou popsány všechny kroky, které jsou pro určení této veličiny třeba.

Nejdříve ze všeho je třeba dle vzorce (3.1), uvedeného v kapitole 3.8, vypočítat činný výkon během mletí.

Obdobným způsobem vypočítám i činný výkon mlýnu naprázdno čili bez granulátu.

$$P_{\check{c}N} = U \cdot I_N \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

Pro zjištění výkonu, který je tedy využíván pro samotné mletí, je nyní třeba od sebe činný výkon a činný výkon naprázdno.

$$P = P_{\check{c}} - P_{\check{c}N} \quad (3.3)$$

Celý výkon, vypočítaný ve vzorci (3.3) ale není použit pouze pro rozpojování částic pryže. Část tohoto výkonu se totiž vlivem tření disipuje na teplo. My dokážeme změřit pouze část tohoto výkonu z teploty změřené na výstupu. Reálná disipace je ale mnohem větší a velká část z celkového výkonu se přemění právě v teplo. Tepelný tok můžu spočítat na základě následující rovnice:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

, kde

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (3.5)$$

Uvažovaná počáteční teplota vstupního materiálu je uvažovaná jako konstantní. Pro další výpočty tedy tuto hodnotu beru jako $T_1 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hodnotu c_p vezmu pro pryž rovnu hodnotě $1,881 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$. Tuto hodnotu měrné tepelné kapacity budu brát jako konstantu a nebudu uvažovat její změnu s měnící se teplotou. [36]

Ve chvíli, kdy znám všechny tyto veličiny mi již nic nebrání vypočítat výkon potřebný na rozpojení částic.

$$E_R = P - \dot{Q} \quad (3.6)$$

Abychom ze vzorce (3.6) získali požadovanou měrnou rozpojovací energii, stačí hodnotu E_R podělit hmotnostním tokem.

$$e = \frac{E_R}{\dot{m}} \quad (3.7)$$

Tuto měrnou rozpojovací energii tedy můžeme vyjádřit samostatně pro každé jedno provedené měření. Tabulky všech vyhodnocených veličin jsou zobrazeny níže.

| | A-I | | | | A-II | | | | A-III | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 |
| P_c [kW] | 6,63 | 7,854 | 8,568 | 9,69 | 6,494 | 7,888 | 8,568 | 9,69 | 6,63 | 7,854 | 8,772 | 9,69 |
| P_{cN} [kW] | 6,188 | 6,528 | 7,038 | 7,786 | 5,882 | 6,222 | 6,698 | 7,65 | 6,256 | 6,528 | 7,072 | 7,99 |
| ΔT [°C] | 3 | 9 | 17 | 27 | 3 | 9 | 18 | 29 | 3 | 11 | 21 | 32 |
| P [kW] | 0,442 | 1,326 | 1,53 | 1,904 | 0,612 | 1,666 | 1,87 | 2,04 | 0,374 | 1,326 | 1,7 | 1,7 |
| Q [kW] | 0,061 | 0,184 | 0,347 | 0,552 | 0,061 | 0,184 | 0,368 | 0,592 | 0,061 | 0,225 | 0,429 | 0,654 |
| E_R [kW] | 0,381 | 1,142 | 1,183 | 1,352 | 0,551 | 1,482 | 1,502 | 1,448 | 0,313 | 1,101 | 1,271 | 1,046 |
| e [kW·h/t] | 9,74 | 29,21 | 30,25 | 34,59 | 14,08 | 37,91 | 38,42 | 37,02 | 8,00 | 28,17 | 32,51 | 26,76 |

Tabulka 9: Vyhodnocená data z měření A

| | B-I | | | | B-II | | | | B-III | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 |
| $P_{\dot{C}}$ [kW] | 12,24 | 12,92 | 13,6 | 14,96 | 12,41 | 13,43 | 13,77 | - | 13,77 | 14,79 | 15,64 | - |
| $P_{\dot{C}N}$ [kW] | 6,29 | 6,562 | 7,072 | 7,582 | 6,12 | 6,426 | 6,834 | - | 6,12 | 6,426 | 6,834 | - |
| ΔT [°C] | 19 | 33 | 43 | 43 | 18 | 34 | 41 | - | 21 | 43 | 36 | - |
| P [kW] | 5,95 | 6,358 | 6,528 | 7,378 | 6,29 | 7,004 | 6,936 | - | 7,65 | 8,364 | 8,806 | - |
| Q [kW] | 0,388 | 0,674 | 0,878 | 0,878 | 0,368 | 0,695 | 0,838 | - | 0,429 | 0,878 | 0,735 | - |
| E_R [kW] | 5,562 | 5,684 | 5,650 | 6,500 | 5,922 | 6,309 | 6,098 | - | 7,221 | 7,486 | 8,071 | - |
| e [kW·h/t] | 142,25 | 145,37 | 144,49 | 166,23 | 151,46 | 161,37 | 155,97 | 0,00 | 184,68 | 191,45 | 206,41 | - |

Tabulka 10: Vyhodnocená data z měření B

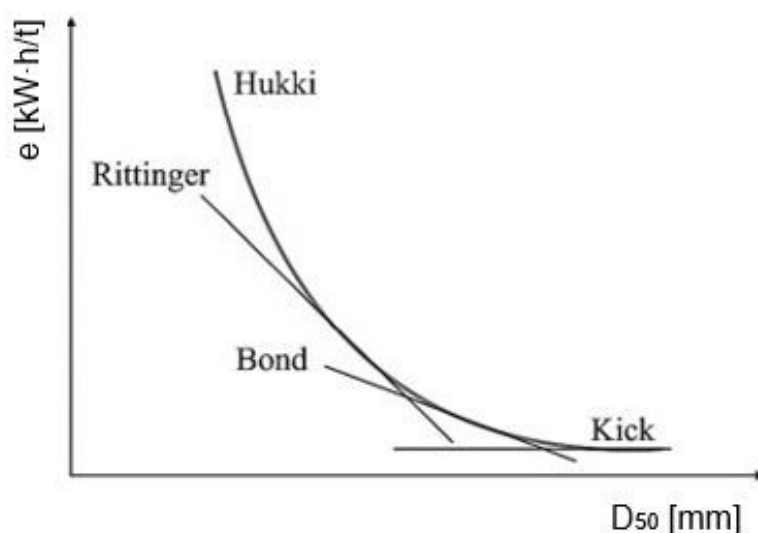
| | C-I | | | | C-II | | | | C-III | | | |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 | st. 4 | st. 6 | st. 8 | st. 10 |
| $P_{\dot{C}}$ [kW] | 9,35 | 11,73 | 13,26 | 14,62 | 9,35 | 11,73 | 13,26 | 14,62 | 9,86 | 12,07 | 14,62 | 17 |
| $P_{\dot{C}N}$ [kW] | 6,29 | 6,63 | 6,97 | 7,82 | 6,46 | 6,8 | 7,31 | 8,228 | 6,358 | 6,562 | 7,004 | 7,82 |
| ΔT [°C] | 10 | 25 | 46 | 51 | 8 | 26 | 39 | 49 | 12 | 31 | 33 | 38 |
| P [kW] | 3,06 | 5,1 | 6,29 | 6,8 | 2,89 | 4,93 | 5,95 | 6,392 | 3,502 | 5,508 | 7,616 | 9,18 |
| Q [kW] | 0,204 | 0,511 | 0,940 | 1,042 | 0,163 | 0,531 | 0,797 | 1,001 | 0,245 | 0,633 | 0,674 | 0,776 |
| E_R [kW] | 2,856 | 4,589 | 5,350 | 5,758 | 2,727 | 4,399 | 5,153 | 5,391 | 3,257 | 4,875 | 6,942 | 8,404 |
| e [kW·h/t] | 73,04 | 117,37 | 136,83 | 147,27 | 69,73 | 112,50 | 131,80 | 137,88 | 83,30 | 124,67 | 177,54 | 214,93 |

Tabulka 11: Vyhodnocená data z měření C

Z tabulek je patrné, že měrná rozpojovací energie se pohybuje v mezích od jednotek až po stovky kW·h/t. Jednoznačně nejnižší hodnoty jsou vidět při vybavení mlýnu rovnými třířadými zuby, což jen potvrzuje špatné výsledky patrné ze sítové analýzy.

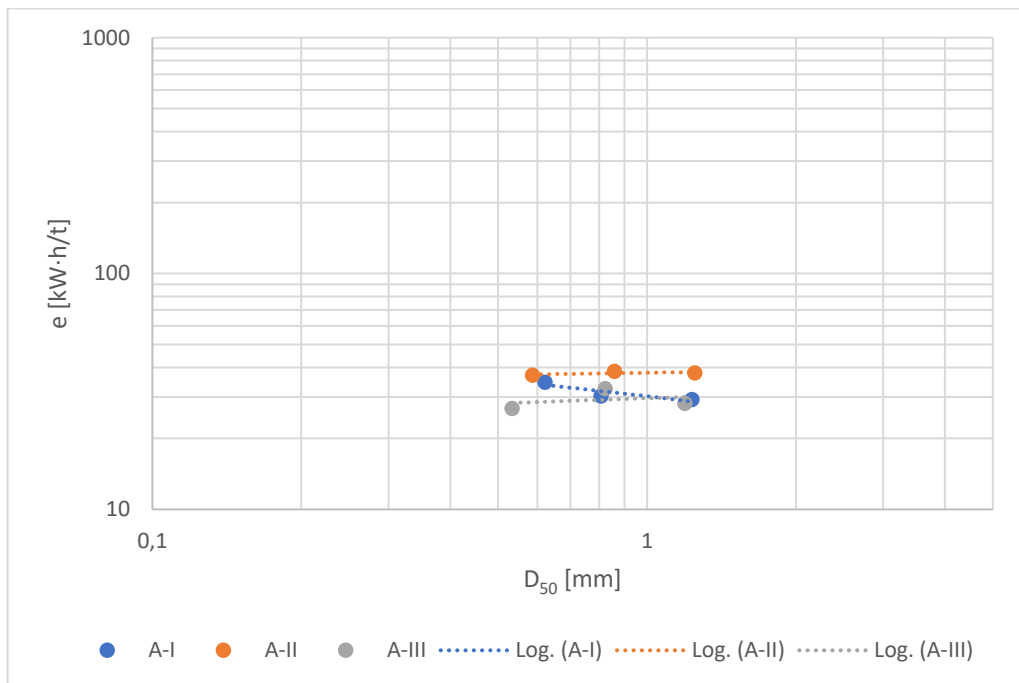
Velmi zajímavé je poté srovnání rovných čtyřřadých zubů se zuby šikmými. Z tabulek je totiž jasně vidět, že u zubů B je při většině experimentů pro mletí třeba vyšší výkon. Přesto ale kvalita výstupního materiálu zaostává za výsledky šikmých zubů. Zdůvodněním by mohl být právě zkosený tvar zubu. U zubů rovných totiž dochází při mletí k vyvolání velké radiální síly, vzniklé při stříhu pryže mezi jednotlivými mlecími segmenty. Tato radiální síla vyvolá působením na úzké zuby vibrace soustavy. Tyto vibrace nepříznivě ovlivňují mletí, a navíc rychleji ničí ložiska. Šikmé zuby naproti tomu tyto vibrace snadněji pohlcují, protože se síly vyvolané stříhem rozkládají do radiálního i axiálního směru. Jejich výslednice poté míří do rozšířené části zubu, kde se vibrace snadněji utlumí.

Velikost rozpojovací energie si můžeme zobrazit také v závislosti na průběhu D_{50} . V tomto případě se dostáváme zpět na začátek diplomové práce, kde byla v kapitole 1 uvedena rovnice energetické náročnosti (1.1-1). V našem případě by měla platit Bondova varianta této rovnice.

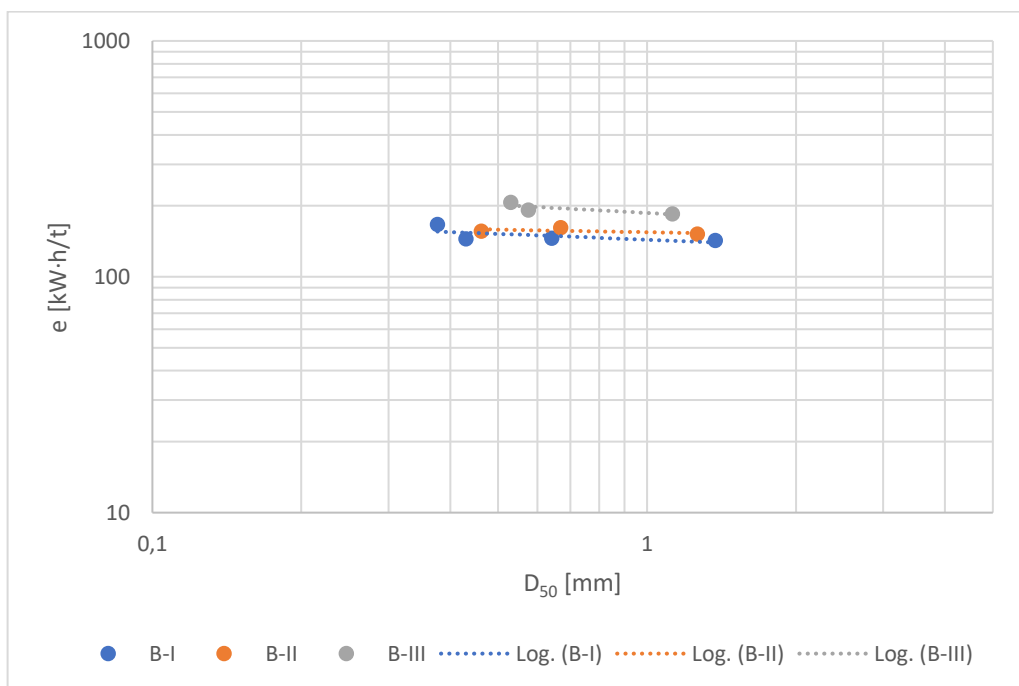


Obrázek. 81: Energetická náročnost rozpojování [37]

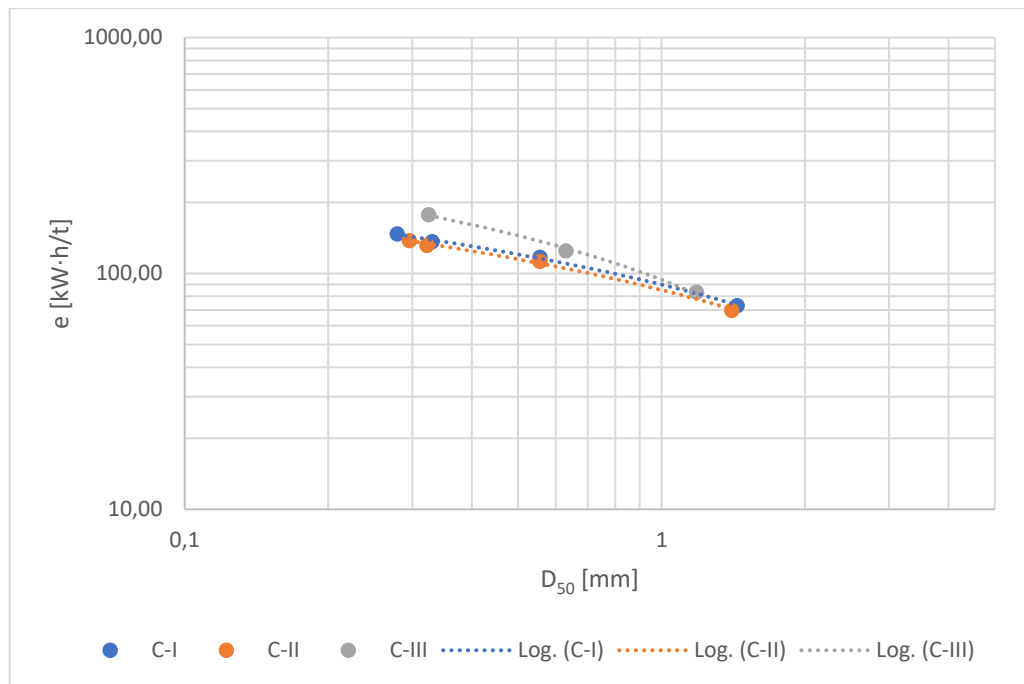
Na obrázku 81 jsou přímky vyneseny v logaritmickém měřítku. V našem případě kvůli malému rozptylu velikosti částic nemá tento graf požadovaný efekt. I tak z něj ale můžeme vidět téměř přímkový charakter u všech měření.



Obrázek 82: Graf energetické náročnosti pro variantu A



Obrázek 83: Graf energetické náročnosti pro variantu B



Obrázek 84: Graf energetické náročnosti pro variantu C

Obrázek 84 téměř kopíruje sklon Bondovy křivky z obrázku 81. Obrázky 82 a 83 mají sklon menší, což je ale částečně dáno malou škálou hodnot pro logaritmickou stupnici.

Tyto křivky by bylo samozřejmě nutné ověřit ještě dalšími sadami měření. Pokud by ale výsledky byly totožné nebo velmi blízké, dalo by se grafy řídit při výpočtech energetické náročnosti pro požadovanou výstupní velikost částic.

Z rovnice (1.1-1), popisující energetickou náročnost mletí, známe tedy již všechny veličiny kromě příslušné konstanty. Výše uvedenými grafy jsme si ověřili, že mletí spadá do přechodové Bondovy oblasti. Z toho vyplývá hodnota exponentu $r = 1,5$.

3.9.3 BONDOVA KONSTANTA C_B

Jak jsem již zmínil na předchozí straně, při dosazení hodnoty exponentu $r = 1,5$, získáme rovnici (1.1-3). Z této rovnice si vyjádřím Bondovu konstantu.

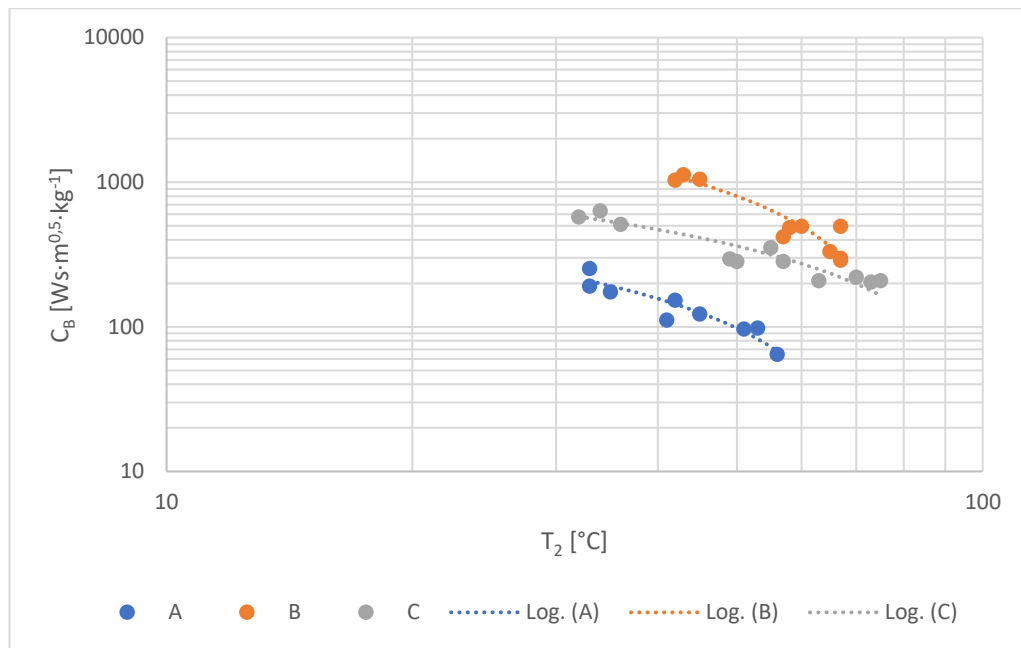
$$C_B = \frac{e}{2 \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right]} \quad (3.8)$$

Pokud rovnici (3.8) vypočítám pro každé měření zvlášť, získám následující tabulku.

| | | stupeň 4 | stupeň 6 | stupeň 8 | stupeň 10 |
|---|-----|----------|----------|----------|-----------|
| A | I | 104,6739 | 191,3703 | 111,8549 | 97,01357 |
| | II | 146,1295 | 254,3169 | 152,7822 | 98,11107 |
| | III | 84,80062 | 175,0164 | 122,8915 | 64,83401 |
| B | I | 1129,6 | 420,8246 | 289,7283 | 298,4089 |
| | II | 1036,338 | 487,1319 | 332,6614 | - |
| | III | 1049,735 | 498,257 | 497,3415 | - |
| C | I | 634,7522 | 295,6948 | 221,1567 | 209,2234 |
| | II | 576,875 | 283,4251 | 208,9196 | 204,8634 |
| | III | 512,4469 | 354,1003 | 283,3135 | 1598,937 |

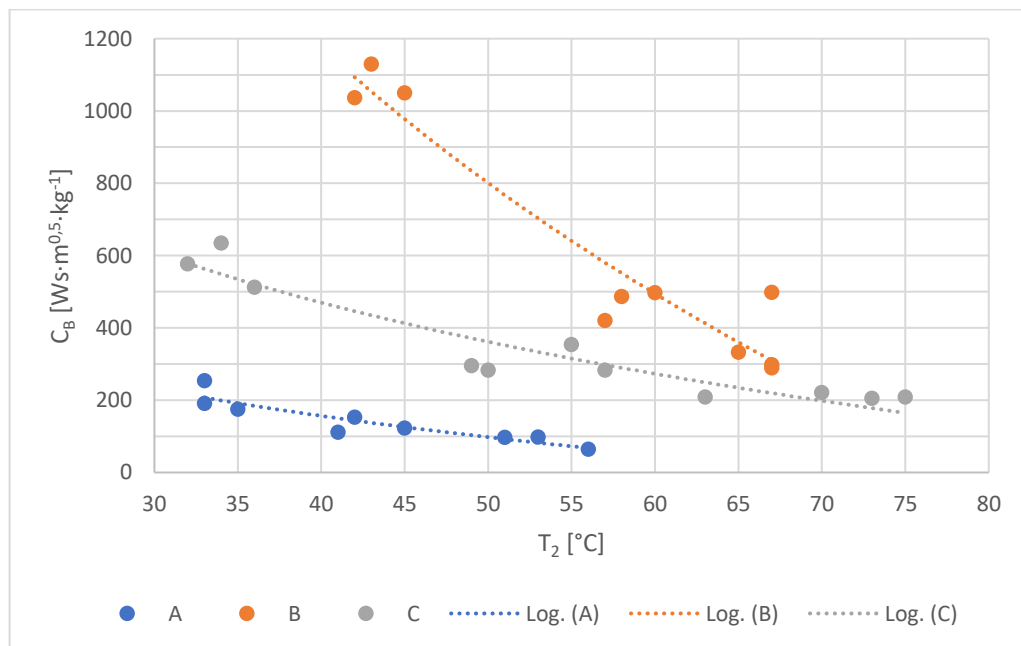
Tabulka 12: Bondovy konstanty C_B [$Ws \cdot m^{0,5} \cdot kg^{-1}$] pro pryž

Z tabulky 12 je vidět, že vypočítané hodnoty C_B řádově odpovídají hodnotám v tabulce 2 na začátku práce. Máme tedy pro každé nastavení vlastní hodnotu Bondovy konstanta. Tyto hodnoty samozřejmě nejsou úplně přesné z důvodu zanedbání vlivů jako jsou změna měrné tepelné kapacity s teplotou, přeměna výkonu na hluk a vibrace, nestejná délka jednotlivých měření a podobně. Nicméně minimálně jako orientační by hodnoty sloužit měly. Z tabulky můžeme vypočítat pokles konstanty s rostoucím stupněm otáček. Rostoucí stupeň otáček má za následek růst teploty a také zmenšování velikosti částic D_{50} . Grafy, vyjadřující tyto závislosti, jsou zobrazeny na následujících stranách.

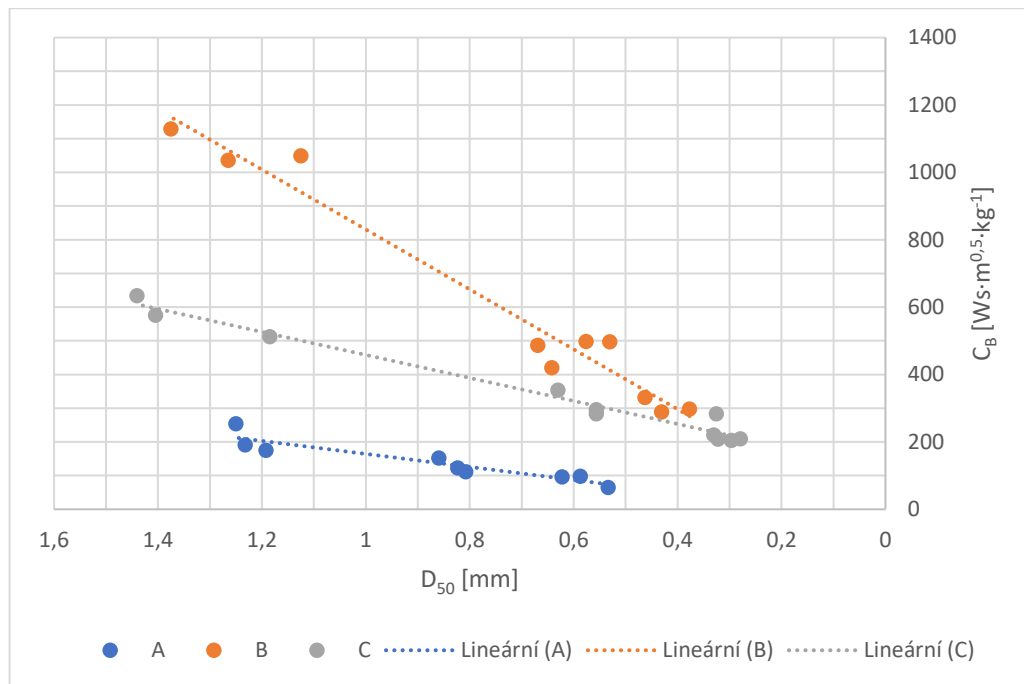


Obrázek 85: Graf závislosti Bondovy konstanty na koncové teplotě pro varianty A, B a C v logaritmických stupnicích

Z obrázku 85 můžeme vidět, že v logaritmické stupnici se jednotlivé hodnoty pro daná měření dají aproximovat křivkou blížící se přímce. Navíc je vidět, že hodnoty C_B pro vyšší teploty, hlavně u měření B a C, se k sobě začínají blížit. Tento souběh je ještě lépe vidět, pokud tentokrát logaritmickou stupnici nepoužijeme.



Obrázek 86: Graf závislosti Bondovy konstanty na koncové teplotě pro varianty A, B a C v klasických stupnicích



Obrázek 87: Graf závislosti Bondovy konstanty na výstupní velikosti částic D_{50} pro varianty A, B a C

Z obrázků 86 a 87 tedy můžeme jasně říci, jaké závislosti panují mezi hodnotami C_B a hodnotami koncové teploty, respektive výstupními velikostmi částic D_{50} .

Vývoj závislosti v obrázku 86 nejlépe aproximuje logaritmická rovnice. Můžeme konstatovat, že s rostoucí výstupní teplotou hodnota Bondovy konstanty klesá. Nejpatrnější je tento pokles pro rovné čtyřradé zuby, naopak nejméně prudký je pro zuby rovné tříradé. Nicméně klesající tendence je patrná u všech tří variant zubů.

Naproti tomu závislost Bondovy konstanty na hodnotě D_{50} v obrázku 87 vystihuje nejlépe lineární spojnice trendů. Zde je vidět jasný pokles hodnot C_B s menší velikostí výstupních částic. Dá se tedy říci, že čím jemněji je materiál rozemlet, tím menší je hodnota Bondovy konstanty. To jen potvrzuje vyjádření této konstanty v rovnici (3.8).

3.10 NÁVRH OPTIMALIZACE MLETÍ

Jak je vidět z naměřených hodnot, problémem není nedosažení požadovaných velikostí namletého materiálu. Hlavním nedostatkem je v tomto případě možnost pouze krátkého mletí z důvodu rizika výbuchu a následného požáru. Abychom toto riziko minimalizovali, bude nutné začít mlýn efektivněji chladit. Buď vzduchem nebo raději vodou.

Nespornou výhodou vody je mnohem vyšší hodnota měrné tepelné kapacity. Konkrétní hodnota je $c_{pv} = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Měrná tepelná kapacita vzduchu je přitom pouze $c_{pvz} = 1010 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Obě tyto hodnoty jsou vztaženy ke standardním podmínkám. Vyplývá z nich, že voda pojme čtyřikrát více tepla než vzduch, než se ohřeje o 1°C . [38] [39]

Abychom dokázali chlazení správně nadimenzovat, bylo by třeba znát skutečnou teplotu mezi rotory. Teplota udávaná na teploměru je totiž silně ovlivněna otvory, které jsou v komorách mlýna. Těmito otvory je přisáván venkovní vzduch s výrazně nižší teplotou, než která je reálně ve mlýně. Tyto dvě teploty se spolu namíchají a teprve tato namixovaná teplota je vidět na displeji měřiče teploty.

Velkým problémem mletí je vliv nečistot ve vstupním materiálu. Jedná se hlavně o kamínky, které zůstanou uvízlé v dezénu pneumatiky. Mimo kamínků se ve vstupním granulátu objevují i části mosazných ventilů. Tyto příměsi projdou skrze magnetický odlučovač a mohou se tak snadno dostat do mlýna. Právě to je nejčastější příčina vzniku požáru. Měrná tepelná kapacita mosazi za standardních podmínek je totiž pouze $c_{pm} = 384 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. To znamená, že se tyto částice zahřejí na velmi vysokou teplotu, kterou přenesou při kontaktu na pryž. Jak bylo uvedeno dříve, teplota samovznícení pro vstupní částice gumy je vyšší než 320°C . Pokud této teploty dosáhne jedna částice a vzplane, oheň se již rychle šíří. Hoření navíc podporuje stálé proudění vzduchu, které je vyvolané ventilátorem. [39]

Ideálním způsobem chlazení by bylo zavést chladící vodu přímo do jednotlivých zubů. Tato varianta je ale při stávající geometrii nereálná, protože zuby jsou příliš malé na to, aby v nich mohl být vytvořen chladicí oběh.

Druhou, přijatelnější možností je vyfrézovat chladicí drážky do disků pod zubovými tělísky. Těmito drážkami by stále protékala studená voda, která by přejímala teplo vznikající při mletí. Nicméně ani tato varianta by nebyla vůbec konstrukčně jednoduchá. Bylo by nutné pečlivě utěsnit drážky a vyřešit otázku vstupu této chladicí vody do rotoru.

Jinou možností by pak bylo chladit mlýn vzduchem. Muselo by se jednat o velký hmotnostní tok tohoto vzduchu, který by do mlýna přicházel. Velikost tohoto hmotnostního toku by se vyjádřila z tepelného toku z rovnice (3.4) následovně:

$$\dot{m}_{vz} = \frac{\dot{Q}}{c_{pvz} \cdot \Delta T_{vz}} \quad (3.9)$$

, přičemž ΔT_{vz} vyjadřuje rozdíl teplot na vstupu a výstupu vzduchu. Kvůli tak velkému průtoku vzduchu by ale bylo nejspíš nutné změnit konstrukci odlučovače částic.

Další možností pro zlepšení chlazení je varianta mokrého mletí. Tím se rozumí napuštění komor vodou, čímž dojde k vytvoření heterogenní směsi gumových částic rozptýlených ve vodě. Šlo by tedy v tomto případě o mletí pryžové suspenze. Při takové variantě by se ale musela upravit celá linka. Nicméně takováto možnost by dokázala s největší pravděpodobností mlýn bez problémů uchladiť. Tím by vznikla možnost mletí posunout do ještě vyšších otáček bez obav z požáru, a tím ještě zvýšit kvalitu výstupního materiálu. Množství potřebné vody pro chlazení bychom, podobně jako v případě chlazení vzduchem, opět vyjádřili z rovnice (3.4) takto:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}}{c_{pv} \cdot \Delta T_v} \quad (3.10)$$

, kde ΔT_v je rozdíl počáteční a koncové teploty chladicí vody.

Další komplikací v této technologii je lepení materiálu na stěny potrubí. Pro minimalizaci tohoto procesu by bylo dobré potrubní síť, vedoucí z mlýna do ventilátoru a poté do odlučovače, vytvořit co nejkratší.

Další možností je zvolit potrubí z jiného materiálu. Z tohoto hlediska by bylo zajímavým řešením zvolit jako potrubní materiál sklo. Díky jeho hladkému povrchu by k zanášení jemným prachem docházelo pouze minimálně. Navíc by bylo skrz stěnu vidět, zda vše funguje tak, jak má. Nicméně, jak již bylo zmíněno dříve, je mezi granulátem i několik kovových nemagnetických příměsí, které by hladký skleněný povrch poškrábaly a zanášení bychom se postupem času opět nevyhnuli. Navíc sklo je velmi křehké, a tak by bylo velké riziko poničení tohoto potrubí při neopatrném provozu.

Jinou možností je zařadit hadice s antiadhezivní úpravou vnitřní stěny. Touto antiadhezivní úpravou obvykle rozumíme například použití skelné tkaniny impregnované teflonem. Zvenčí je pak pro zpevnění vedena ocelová spirála. Alternativou k impregnaci teflonem může být i impregnace skelné tkaniny silikonem. Tato varianta se používá často v hutním, sklářském nebo chemickém průmyslu. [40]



Obrázek 88: Potrubí impregnované teflonem pro nižší adhezi [40]

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyhodnotit experimentální data, získaná při mletí gumového granulátu, a určit hodnoty rozpojovací energie pro jednotlivá provozní nastavení mlýna.

Na úvod práce byla vypracována rešerše, zabývající se technologiemi drcení a mletí odpadů, zejména pak pneumatik. V této rešerši bylo postupováno chronologicky od celé pneumatiky, přes prvotní možnosti zpracování až ke mletí na částice o velikosti v řádech desetin milimetru.

Pro mletí pryže právě na tuto velikost byl navržen i mlýn, zkoumaný v navazující části práce. Zde jsem nejprve provedl rozbor vstupujícího materiálu. Poté jsem popsal celou linku obecně, na což jsem navázal detailním popisem jednotlivých zařízení včetně přístrojů měřicích a regulačních.

V poslední pasáži následovala prezentace výsledků jednotlivých experimentů, na které navazovalo vyhodnocení těchto naměřených dat. Na závěr práce byly zhodnoceny aktuální nedostatky procesu, na jejichž základě jsem navrhl možnosti optimalizace procesu.

Výsledkem práce je vyhodnocení energetické náročnosti mletí v závislosti na požadované výstupní velikosti částic. Z této závislosti byla následně pro všechny varianty provozních parametrů určena Bondova konstanta. Téměř všechny vyhodnocené veličiny se opírají o naměřená data, která ale v některých případech nebyla zcela reálná. Jedná se zejména o měření teploty, které nepopisuje reálný stav uvnitř mlýna, ale pouze změnu teploty na jeho výstupu.

SEZNAM NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH SYMBOLŮ

| | | |
|------------------|--|--|
| e | rozpojovací energie | [kW·h/t] |
| D | rozměr částice | [mm] |
| r | rozpojovací exponent | [-] |
| C | rozpojovací konstanta | [Ws·m ^{0,5} ·kg ⁻¹] |
| C_R | rozpojovací konstanta dle Rittingera | [Ws·m ^{0,5} ·kg ⁻¹] |
| C_B | rozpojovací konstanta dle Bonda | [Ws·m ^{0,5} ·kg ⁻¹] |
| C_K | rozpojovací konstanta dle Kicka | [Ws·m ^{0,5} ·kg ⁻¹] |
| $\cos \varphi$ | účinník | [-] |
| $P_{\check{c}}$ | činný výkon při mletí | [kW] |
| U | napětí | [V] |
| I | proud | [A] |
| D_{50} | střední rozměr částic | [mm] |
| $P_{\check{c}N}$ | činný výkon naprázdno | [kW] |
| I_N | proud naprázdno | [A] |
| P | výkon pro mletí | [kW] |
| \dot{Q} | tepelný tok | [kW] |
| \dot{m} | hmotnostní tok | [kg·s ⁻¹] |
| c_p | měrná tepelná kapacita | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| ΔT | rozdíl vstupní a výstupní teploty | [°C] |
| T_1 | počáteční teplota | [°C] |
| T_2 | koncová teplota | [°C] |
| E_R | rozpojovací výkon | [kW] |
| c_{pv} | měrná tepelná kapacita vody | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| c_{pvz} | měrná tepelná kapacita vzduchu | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| c_{pm} | měrná tepelná kapacita mosazi | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| \dot{m}_v | hmotnostní tok vody | [kg·s ⁻¹] |
| \dot{m}_{vz} | hmotnostní tok vzduchu | [kg·s ⁻¹] |
| ΔT_v | rozdíl vstupní a výstupní teploty chladicí vody | [°C] |
| ΔT_{vz} | rozdíl vstupní a výstupní teploty chladicího vzduchu | [°C] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Varianty rozpojování pevných částic [3]..... | 9 |
| Obrázek 2: Složení pneumatiky [8] | 12 |
| Obrázek 3: Typy pneumatik [20] | 14 |
| Obrázek 4: Protektorování za tepla [9]..... | 16 |
| Obrázek 5: Odstraňování ocelových částí z pneumatik [7] | 17 |
| Obrázek 6: Gilotina užívaná pro sekání pneumatik [11]..... | 18 |
| Obrázek 7: Válcový drtič s upravenými válci pro drcení pneumatik [12] | 19 |
| Obrázek 8: Schéma úderového drtiče [13]..... | 20 |
| Obrázek 9: Magnetický odlučovač kovových částí [5] | 20 |
| Obrázek 10: Povrch dětského hřiště tvořený drcenými pneumatikami [25]..... | 22 |
| Obrázek 11: Hydraulicky poháněný dvouválcový mlýn značky RCM [18] | 23 |
| Obrázek 12: Závislost kroutícího momentu na rychlosti [5]..... | 24 |
| Obrázek 13: Řez nožovým mlýnem [5] | 24 |
| Obrázek 14: Schéma šnekového mlýnu [5]..... | 25 |
| Obrázek 15: Kolíkový nárazový mlýn [23] | 26 |
| Obrázek 16: Mikroskopicky zvětšené částice rozemleté gumy [5] | 26 |
| Obrázek 17: Linka na výrobu aktivního gumového prachu | 30 |
| Obrázek 18: Zvětšená částice vstupní suroviny | 32 |
| Obrázek 19: Big Bag [31] | 33 |
| Obrázek 20: Šnekový dopravník | 34 |
| Obrázek 21: Násypka mlýnu | 35 |
| Obrázek 22: Transportní ventilátor CIPRES | 37 |
| Obrázek 23: Cyklón..... | 38 |
| Obrázek 24: Rotační podavač..... | 38 |
| Obrázek 25: Vibrační třídič..... | 39 |
| Obrázek 26: Siemens Micromaster 440 | 41 |
| Obrázek 27: Zařízení pro měření teploty GEWISS | 41 |
| Obrázek 28: Frekvenční měnič ventilátoru | 42 |
| Obrázek 29: Sítování | 43 |
| Obrázek 30: Rovné zuby se třemi řadami | 45 |
| Obrázek 31: Čtyřřadé zuby s viditelným opotřebením..... | 46 |
| Obrázek 32: Otevřené komory mlýnu pro drcení gumového granulátu | 47 |
| Obrázek 33: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-I | 50 |
| Obrázek 34: Graf závislost teploty na otáčkách pro variantu A-I..... | 50 |
| Obrázek 35: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-I..... | 51 |
| Obrázek 36: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu A-I...51 | |
| Obrázek 37: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu A-I..... | 52 |
| Obrázek 38: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-II | 53 |
| Obrázek 39: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu A-II..... | 53 |
| Obrázek 40: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-II..... | 54 |
| Obrázek 41: Graf srovnání proudů před mletím a během mletí pro variantu A-II..54 | |
| Obrázek 42: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu A-II..... | 55 |
| Obrázek 43: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu A-III | 56 |
| Obrázek 44: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu A-III | 56 |
| Obrázek 45: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu A-III..... | 57 |
| Obrázek 46: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu A-III.57 | |
| Obrázek 47: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu A-III..... | 58 |
| Obrázek 48: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-I | 59 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 49: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-I..... | 59 |
| Obrázek 50: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-I..... | 60 |
| Obrázek 51: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-I... | 60 |
| Obrázek 52: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-I..... | 61 |
| Obrázek 53: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-II | 62 |
| Obrázek 54: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-II | 62 |
| Obrázek 55: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-II..... | 63 |
| Obrázek 56: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-II.. | 63 |
| Obrázek 57: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-II..... | 64 |
| Obrázek 58: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu B-III | 65 |
| Obrázek 59: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu B-III..... | 65 |
| Obrázek 60: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu B-III..... | 66 |
| Obrázek 61: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu B-III. | 66 |
| Obrázek 62: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu B-III..... | 67 |
| Obrázek 63: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-I | 68 |
| Obrázek 64: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-I..... | 68 |
| Obrázek 65: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-I | 69 |
| Obrázek 66: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-I .. | 69 |
| Obrázek 67: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-I | 70 |
| Obrázek 68: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-II | 71 |
| Obrázek 69: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-II..... | 71 |
| Obrázek 70: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-II | 72 |
| Obrázek 71: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-II . | 72 |
| Obrázek 72: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-II | 73 |
| Obrázek 73: Graf závislosti výkonu na otáčkách pro variantu C-III..... | 74 |
| Obrázek 74: Graf závislosti teploty na otáčkách pro variantu C-III..... | 74 |
| Obrázek 75: Graf nárůstu teploty dle zvolených otáček pro variantu C-III | 75 |
| Obrázek 76: Požár při mletí | 75 |
| Obrázek 77: Graf srovnání výkonů před mletím a během mletí pro variantu C-III. | 76 |
| Obrázek 78: Graf rozložení frakcí namleté gumy pro variantu C-III | 77 |
| Obrázek 79: Napečené částice pryže na vnitřní stěně komory mlýna | 78 |
| Obrázek 80: Grafické určení hodnoty D_{50} pro variantu C-I při stupni otáček 4 | 79 |
| Obrázek. 81: Energetická náročnost rozpojování [37]..... | 85 |
| Obrázek 82: Graf energetické náročnosti pro variantu A | 86 |
| Obrázek 83: Graf energetické náročnosti pro variantu B | 86 |
| Obrázek 84: Graf energetické náročnosti pro variantu C | 87 |
| Obrázek 85: Graf závislosti Bondovy konstanty na koncové teplotě pro varianty A, B a C v logaritmických stupnicích..... | 89 |
| Obrázek 86: Graf závislosti Bondovy konstanty na koncové teplotě pro varianty A, B a C v klasických stupnicích | 89 |
| Obrázek 87: Graf závislosti Bondovy konstanty na výstupní velikosti částic D_{50} pro varianty A, B a C | 90 |
| Obrázek 88: Potrubí impregnované teflonem pro nižší adhezi [40]..... | 93 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Rozdělení rozpojovacích technologií dle velikosti zrna [4]..... | 10 |
| Tabulka 2: Hodnoty konstant C_B pro rovnici (1.1-3) [3] | 11 |
| Tabulka 3: Rozbor dezénu pneumatiky dle hmotnostních procent [5]..... | 15 |
| Tabulka 4: Složení vstupního granulátu [29] | 31 |
| Tabulka 5: Velikosti částic vstupního materiálu..... | 32 |
| Tabulka 6: Štítkové údaje motorů..... | 36 |
| Tabulka 7: Kompletní hodnoty parametru D_{50} pro všechna měření | 80 |
| Tabulka 8: Poměr velikosti vstupního granulátu ku velikosti namletých částic | 81 |
| Tabulka 9: Vyhodnocená data z měření A | 83 |
| Tabulka 10: Vyhodnocená data z měření B | 84 |
| Tabulka 11: Vyhodnocená data z měření C | 84 |
| Tabulka 12: Bondovy konstanty C_B [$Ws \cdot m^{0.5} \cdot kg^{-1}$] pro pryž | 88 |

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KIZLINK, Juraj. *Odpady: sběr, zpracování, využití, zneškodnění, legislativa*. 3., upr. a rozš. vyd., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN isbn978-80-7204-884-7.
- [2] KRENÍKOVÁ, Věra. *Odpady a druhotné suroviny I*. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2014. ISBN isbn978-80-7414-869-9.
- [3] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.
- [4] FRIES, Jiří. *Stroje pro zpracování odpadu* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2018-08-13]. ISBN isbn978-80-248-1511-4.
- [5] DE, Sadhan K, Avraam I ISAYEV a Klementina KHAIT. *Rubber recycling*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis/CRC Press, 2005. ISBN isbn0-8493-1527-1.
- [6] Jak se recyklují pneumatiky. *TRÍDĚNÍ ODPADU.CZ* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluji-pneumatiky>
- [7] Eagle OTR Debeader. *EAGLE INTERNATIONAL* [online]. 2017 [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: http://www.eagle-equipment.com/product-features.php?product_type=otr2&product=otrdebeader
- [8] Stavba pneumatiky. In: *Oponeo* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.oponeo.cz/img/cz-clanky/fotografie/waga-opony.jpg>
- [9] Protektorování OTR pneumatik. In: *CEMAT* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.cemat.cz/userfiles/image/250x/Obr%C3%A1zek4.jpg>

- [10] Konstrukce. *HANKOOK* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <http://www.hankookcz.cz/technologie/konstrukce>
- [11] OTR and solid tyres shear. In: *SALVADORI* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.salvadori.com/upload/images/catalogo/cesoiaMT.jpg>
- [12] Tyre Waste Shredder. In: *HUANCHUANG (XIAMEN) TECHNOLOGY CO. LTD.* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://2.wlimg.com/product_images/bc-small/dir_113/3376485/watermark/tyre-waste-shredder-1915510.jpg
- [13] Hammer mill. In: *Schutte Buffalo* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://web.hammermills.com/hs-fs/hub/23878/file-607711023-jpg/industrial_hammer_mill.jpg?t=1533654527278&width=300&name=industrial_hammer_mill.jpg
- [14] *Odpadové fórum: Kryogenní mletí materiálů. 18(9)*. Dostupné také z: https://www.messergroup.com/documents/20591/1572774/Odpadove_forum.pdf/41546a1d-aca9-1220-e2e4-6f03a8c3397d
- [15] *Continental* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.continental-pneumatiky.cz>
- [16] NAKLÁDÁNÍ SE STARÝMI PNEUMATIKAMI. *ECOSERVIS* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <http://www.ecoservis.eu/nakladani-se-starymi-pneumatikami>
- [17] *STUDIE ZAŘÍZENÍ NA PYROLYTICKÝ ROZKLAD ODPADŮ* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf. VŠB.
- [18] New RCM 28" x 28" x 100" Mill. In: *RCM* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <http://www.rcmc.com/photos/13/productionmill.jpg>

- [19] DOČKAL, Vladimír, Jan KOVANDA a František HRUBEC. *Pneumatiky*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN isbn80-01-01882-2.
- [20] Reifenbauarten von l. n r. am Beispiel Motorrad-Reifen: Radial, Diagonal, Bias-Belted. In: *RUNDUM Wissen* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://gdtg-rundumwissen.de/img/user/downloads/produktwissen/Themen_A-Z/Reifenbauarten_Motorrad.png
- [21] HOSOKAWA ALPINE. *CONTRAPLEX PIN MILLS: TYPE 160 C TO 1120 CW*. Německo, 2009.
- [22] Fine Impact Mill 800 UPZ stainless steel design. In: *PROCESS WORLDWIDE* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.process-worldwide.com/index.cfm?pid=9890&pk=450163&fk=0&type=article#1>
- [23] Alpine expo 2015. In: *HOSOKAWA ALPINE* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://www.hosokawa-alpine.com/fileadmin/_processed_/1/8/csm_Mosaik_ff3349b96c.png
- [24] *Lavaris s.r.o.* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: www.lavaris.cz
- [25] Rubber mulch from the playground in Bandon City Park in Bandon, Oregon. In: *NBC news* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://media2.s-nbcnews.com/j/newscms/2014_49/787126/141130-rubber-playground-jms-1807_092ff059fb82cbd363437fffb3e90d31.fit-560w.jpg
- [26] ŠŤASTNÁ, Jarmila. Odpad je odpad, a nejde s ním jednat v rukavičkách. *ODPADY*. 2018, **2018**(5), 2.
- [27] GOLDSHTEIN, Vadim a Michael KOPYLOV. *Method and composition for devulcanization of waste rubber*. USA. Uděleno 21.5.2001.
- [28] NOVOTNY, Donald S., Richard L. MARSH, Frank C. MASTERS a David N. TALLY. *Microwave devulcanization of rubber*. USA. Uděleno 6.1.1976.

- [29] *Lavaris technical data sheet VARP Rubber 0,25: Technical data sheet*. 2016.
- [30] ASTM D5644-18, Standard Test Method for Rubber Compounding Materials—Determination of Particle Size Distribution of Recycled Vulcanizate Particulate Rubber, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [31] Velkoobjemový vak Big Bag 0,5 m³, bez obsahu. *HORNBAACH* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/shop/Velkoobjemovy-vak-Big-Bag-0-5-m-bez-obsahu/6236055/artikl.html>
- [32] Cyclone. In: <http://www.thecementgrindingoffice.com> [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.thecementgrindingoffice.com/images/cyclone.JPG>
- [33] Průmyslové ventilátory. *CIPRES FILTR* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: <https://www.cipres.cz/produkt/prumyslove-ventilatory/>
- [34] Technický list - ventilátory TRANSPORTNÍ. *CIPRES FILTR* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://www.cipres.cz/wp-content/uploads/2017/11/technicky_list_-_f08t.pdf
- [35] Doc. Ing. NOVÁK, Martin, Ph.D. *Kontaktní snímače teploty* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: href="https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/6266/mod_folder/content/0/Temperature%2001%20CZ%20-%20moodle.pptm?forcedownload=1". Přednáška. FS ČVUT PRAHA.
- [36] HEAT CAPACITY, ENTROPY, AND FREE ENERGY OF RUBBER HYDROCARBON. *National Institute of Standards and Technology* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/15/jresv15n5p503_A1b.pdf
- [37] *International journal of mineral processing*. Amsterdam: Elsevier. ISSN 0301-7516.

[38] Specific Heat and Individual Gas Constant of Gases. *The Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z:
https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html

[39] FYZIKÁLNÍ TABULKY. *KATEDRA FYZIKY ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z:
<http://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FP1/tabulky.pdf>

[40] CLIP. In: *Ventilatory.net* [online]. [cit. 2018-08-13]. Dostupné z:
<https://www.ventilatory.net/vzt-potrubi/flexibilni-potrubi/clip/>

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Šablona pro zapisování naměřených hodnot

SÍTOVÁNÍ

LAVARIS s.r.o.

datum:

ZUBY:

PODLOŽKA:

40 % otáček

počáteční teplota °C

bez granulátu proud naprázdno A
teplota naprázdno °C

s granulátem proud A
čas [min] 0 0,5 1 2 5 10 15
vývoj teploty [°C]

60 % otáček

počáteční teplota °C

bez granulátu proud naprázdno A
teplota naprázdno °C

s granulátem proud A
čas [min] 0 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 15
vývoj teploty [°C]

80 % otáček

počáteční teplota °C

bez granulátu proud naprázdno A
teplota naprázdno °C

s granulátem proud A
čas [min] 0 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 15
vývoj teploty [°C]

100 % otáček

počáteční teplota °C

bez granulátu proud naprázdno A
teplota naprázdno °C

s granulátem proud A
čas [min] 0 0,1 0,2 0,5 1 2 5 10 15
vývoj teploty [°C]

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|
| 40 % | | | | | | | |
| 60 % | | | | | | | |
| 80 % | | | | | | | |
| 100 % | | | | | | | |

Σ

Příloha 2 – Naměřená data pro A-I

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY TŘÍŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

13.06.2018
BEZ PODLOŽKY

40 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,8 A
teplota naprázdno 25 °C

s granulátem proud 19,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 25 | 26 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |

60 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 18,2 A
teplota naprázdno 27 °C

s granulátem proud 23,1 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 27 | 27 | 28 | 29 | 31 | 31 | 32 | 32 | 33 |

80 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 19,8 A
teplota naprázdno 31 °C

s granulátem proud 25,2 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 31 | 32 | 33 | 35 | 38 | 39 | 40 | 41 | 41 |

100 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 22,1 A
teplota naprázdno 38 °C

s granulátem proud 28,5 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 38 | 39 | 40 | 44 | 46 | 47 | 49 | 50 | 51 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 91 | 3 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 100 |
| 60 % | 49 | 14 | 19 | 7 | 7 | 2 | 1 | 99 |
| 80 % | 12 | 12 | 27 | 14 | 22 | 8 | 6 | 101 |
| 100 % | 4 | 7 | 22 | 16 | 29 | 12 | 9 | 99 |

Příloha 3 – Naměřená data pro A-II

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY TŘÍŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

13.06.2018
PODLOŽKA 0,3 mm

40 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,3 A
teplota naprázdno 25 °C

s granulátem proud 19,1 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 25 | 25 | 26 | 26 | 26 | 27 | 27 |

60 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 18,1 A
teplota naprázdno 27 °C

s granulátem proud 23,2 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 27 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 32 | 33 |

80 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 19,6 A
teplota naprázdno 32 °C

s granulátem proud 25,2 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 32 | 32 | 33 | 36 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |

100 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 22,2 A
teplota naprázdno 38 °C

s granulátem proud 28,5 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 38 | 39 | 40 | 43 | 46 | 48 | 50 | 52 | 53 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 86 | 5 | 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 100 |
| 60 % | 50 | 12 | 19 | 6 | 9 | 2 | 1 | 99 |
| 80 % | 19 | 12 | 27 | 13 | 19 | 6 | 4 | 100 |
| 100 % | 4 | 6 | 19 | 15 | 32 | 13 | 11 | 100 |

Příloha 4 – Naměřená data pro A-III

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY TŘÍŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

15.06.2018
PODLOŽKA 0,8 mm

40 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 18 A
teplota naprázdno 25 °C

s granulátem proud 19,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 25 | 26 | 26 | 26 | 27 | 27 | 27 |

60 % otáček

počáteční teplota 24 °C

bez granulátu proud naprázdno 18,8 A
teplota naprázdno 28 °C

s granulátem proud 23,1 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 28 | 28 | 29 | 30 | 32 | 33 | 34 | 35 | 35 |

80 % otáček

počáteční teplota 25 °C

bez granulátu proud naprázdno 20,1 A
teplota naprázdno 34 °C

s granulátem proud 25,8 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 34 | 34 | 35 | 38 | 40 | 41 | 43 | 44 | 45 |

100 % otáček

počáteční teplota 25 °C

bez granulátu proud naprázdno 23,2 A
teplota naprázdno 42 °C

s granulátem proud 28,5 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 42 | 42 | 43 | 47 | 50 | 52 | 54 | 55 | 56 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 89 | 5 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 100 |
| 60 % | 47 | 13 | 18 | 9 | 9 | 2 | 1 | 99 |
| 80 % | 14 | 13 | 26 | 13 | 21 | 7 | 5 | 99 |
| 100 % | 4 | 5 | 15 | 13 | 31 | 17 | 14 | 99 |

Příloha 5 – Naměřená data pro B-I

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY ČTYŘŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

31.05.2018
BEZ PODLOŽKY

40 % otáček

| | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------|----|----|----|--|
| | počáteční teplota | 27 °C | | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 17,7 A | | | | |
| | teplota naprázdno | 30 °C | | | | |
| s granulátem | proud | 36 A | | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 | |
| | vývoj teploty [°C] | 30 | 40 | 42 | 43 | |

60 % otáček

| | | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|----|----|----|--|
| | počáteční teplota | 30 °C | | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 18 A | | | | |
| | teplota naprázdno | 32 °C | | | | |
| s granulátem | proud | 40 A | | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 | |
| | vývoj teploty [°C] | 32 | 51 | 56 | 57 | |

80 % otáček

| | | | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|-----|----|----|----|----|
| | počáteční teplota | 30 °C | | | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 20 A | | | | | |
| | teplota naprázdno | 36 °C | | | | | |
| s granulátem | proud | 38 A | | | | | |
| | čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| | vývoj teploty [°C] | 36 | 50 | 56 | 60 | 64 | 67 |

100 % otáček

| | | | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|-----|-----|----|-----|--|
| | počáteční teplota | 33 °C | | | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 22 A | | | | | |
| | teplota naprázdno | 40 °C | | | | | |
| s granulátem | proud | 44 A | | | | | |
| | čas [min] | 0 | 0,3 | 0,5 | 1 | 1,5 | |
| | vývoj teploty [°C] | 40 | 56 | 58 | 64 | 67 | |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 60 | 8 | 12 | 6 | 7 | 3 | 3 | 99 |
| 60 % | 10 | 8 | 19 | 14 | 27 | 11 | 10 | 99 |
| 80 % | 3 | 3 | 9 | 9 | 30 | 23 | 23 | 100 |
| 100 % | 1 | 2 | 6 | 7 | 30 | 26 | 27 | 99 |

Příloha 6 – Naměřená data pro B-II

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY ČTYŘŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

07.06.2018
PODLOŽKA 0,3 mm

40 % otáček

počáteční teplota 28 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,5 A
teplota naprázdno 29 °C

s granulátem proud 36,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 29 | 31 | 34 | 36 | 38 | 40 | 42 |

60 % otáček

počáteční teplota 28 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,9 A
teplota naprázdno 32 °C

s granulátem proud 39,5 A

| | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| vývoj teploty [°C] | 32 | 40 | 45 | 49 | 54 | 58 |

Měření 10 minut

80 % otáček

počáteční teplota 29 °C

bez granulátu proud naprázdno 19,5 A
teplota naprázdno 38 °C

s granulátem proud 40,5 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| vývoj teploty [°C] | 38 | 39 | 40 | 48 | 56 | 59 | 62 | 64 | 65 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|----------|
| 40 % | 51 | 15 | 16 | 6 | 7 | 2 | 2 | 99 |
| 60 % | 10 | 9 | 21 | 13 | 28 | 11 | 7 | 99 |
| 80 % | 2 | 2 | 11 | 11 | 33 | 23 | 17 | 99 |

Příloha 7 – Naměřená data pro B-III

SÍTOVÁNÍ
ROVNÉ ZUBY ČTYŘŘADÉ

LAVARIS s.r.o.

12.06.2018
PODLOŽKA 0,8 mm

40 % otáček

počáteční teplota 27 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,6 A
teplota naprázdno 28 °C

s
granulátem proud 40,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 28 | 30 | 33 | 36 | 40 | 43 | 45 |

60 % otáček

počáteční teplota 27 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,9 A
teplota naprázdno 30 °C

s
granulátem proud 43,5 A

| | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| vývoj teploty [°C] | 30 | 38 | 45 | 50 | 58 | 67 |

Měření 10 minut

80 % otáček

počáteční teplota 28 °C

bez granulátu proud naprázdno 19,5 A
teplota naprázdno 34 °C

s
granulátem proud 46 A

| | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|-----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,5 |
| vývoj teploty [°C] | 34 | 35 | 37 | 45 | 55 | 60 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 43 | 14 | 18 | 8 | 10 | 4 | 4 | 101 |
| 60 % | 7 | 5 | 16 | 14 | 34 | 15 | 8 | 99 |
| 80 % | 4 | 4 | 15 | 14 | 30 | 19 | 14 | 100 |

Příloha 8 – Naměřená data pro C-I

SÍTOVÁNÍ
ŠIKMÉ ZUBY

LAVARIS s.r.o.

15.05.2018
BEZ PODLOŽKY

40 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|--------|----|----|----|
| | počáteční teplota | 24 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 17,8 A | | | |
| | teplota naprázdno | 26 °C | | | |
| s granulátem | proud | 27,5 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 |
| | vývoj teploty [°C] | 26 | 31 | 33 | 34 |

60 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|--------|----|----|----|
| | počáteční teplota | 30 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 18,2 A | | | |
| | teplota naprázdno | 30 °C | | | |
| s granulátem | proud | 34,5 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 |
| | vývoj teploty [°C] | 30 | 44 | 48 | 49 |

80 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|----|----|----|
| | počáteční teplota | 30 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 19 A | | | |
| | teplota naprázdno | 34 °C | | | |
| s granulátem | proud | 39 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 |
| | vývoj teploty [°C] | 34 | 63 | 68 | 70 |

100 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|----|--|--|
| | počáteční teplota | 24 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 22 A | | | |
| | teplota naprázdno | 36 °C | | | |
| s granulátem | proud | 43 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | | |
| | vývoj teploty [°C] | 36 | 75 | | |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 67 | 7 | 9 | 4 | 7 | 2 | 3 | 99 |
| 60 % | 20 | 4 | 10 | 8 | 25 | 16 | 16 | 99 |
| 80 % | 3 | 1 | 3 | 4 | 26 | 28 | 34 | 99 |
| 100 % | 1 | 0 | 1 | 2 | 21 | 31 | 44 | 100 |

Příloha 9 – Naměřená data pro C-II

SÍTOVÁNÍ
ŠIKMÉ ZUBY

LAVARIS s.r.o.

22.05.2018
PODLOŽKA 0,3 mm

40 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|--------|----|----|----|
| | počáteční teplota | 22 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 18,7 A | | | |
| | teplota naprázdno | 25 °C | | | |
| s granulátem | proud | 29 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 |
| | vývoj teploty [°C] | 25 | 31 | 31 | 32 |

60 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|--------|----|----|----|
| | počáteční teplota | 27 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 19 A | | | |
| | teplota naprázdno | 28 °C | | | |
| s granulátem | proud | 35,5 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 5 | 10 | 15 |
| | vývoj teploty [°C] | 28 | 46 | 49 | 50 |

80 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|----|----|--|
| | počáteční teplota | 31 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 20 A | | | |
| | teplota naprázdno | 33 °C | | | |
| s granulátem | proud | 43 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 2 | 5 | |
| | vývoj teploty [°C] | 33 | 49 | 63 | |

100 % otáček

| | | | | | |
|---------------|--------------------|-------|----|----|--|
| | počáteční teplota | 26 °C | | | |
| bez granulátu | proud naprázdno | 22 A | | | |
| | teplota naprázdno | 40 °C | | | |
| s granulátem | proud | 50 A | | | |
| | čas [min] | 0 | 1 | 2 | |
| | vývoj teploty [°C] | 40 | 61 | 73 | |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 63 | 8 | 11 | 4 | 7 | 2 | 4 | 99 |
| 60 % | 20 | 5 | 9 | 8 | 25 | 16 | 17 | 100 |
| 80 % | 3 | 1 | 3 | 4 | 25 | 27 | 37 | 100 |
| 100 % | 1 | 1 | 4 | 4 | 22 | 26 | 41 | 99 |

Příloha 10 – Naměřená data pro C-III

SÍTOVÁNÍ
ŠIKMÉ ZUBY

LAVARIS s.r.o.

18.06.2018
PODLOŽKA 0,8 mm

40 % otáček

počáteční teplota 26 °C

bez granulátu proud naprázdno 17,8 A
teplota naprázdno 27 °C

s granulátem proud 28,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 27 | 28 | 28 | 30 | 33 | 35 | 36 |

60 % otáček

počáteční teplota 26 °C

bez granulátu proud naprázdno 18,1 A
teplota naprázdno 30 °C

s granulátem proud 37,5 A

| | | | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 |
| vývoj teploty [°C] | 30 | 30 | 31 | 36 | 40 | 44 | 49 | 53 | 55 |

80 % otáček

počáteční teplota 27 °C

bez granulátu proud naprázdno 19,3 A
teplota naprázdno 36 °C

s granulátem proud 47,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |
| vývoj teploty [°C] | 36 | 36 | 37 | 44 | 51 | 54 | 57 |

100 % otáček

počáteční teplota 27 °C

bez granulátu proud naprázdno 22,2 A
teplota naprázdno 43 °C

s granulátem proud 49,5 A

| | | | | | | | |
|--------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| čas [min] | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 1 |
| vývoj teploty [°C] | 43 | 43 | 45 | 47 | 50 | 53 | 62 |

| | >1,25 | >1 | >0,8 | >0,63 | >0,4 | >0,25 | <0,25 | Σ |
|-------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 40 % | 46 | 9 | 13 | 7 | 12 | 6 | 7 | 100 |
| 60 % | 27 | 6 | 9 | 8 | 22 | 15 | 13 | 100 |
| 80 % | 2 | 1 | 2 | 3 | 26 | 32 | 33 | 99 |
| 100 % | 5 | 16 | 28 | 13 | 19 | 10 | 9 | 100 |