

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**ENERGETICKÁ NÁROČNOST ROZPOJENÍ
HORNIN A MINERÁLŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

JAN LEDVINKA

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ledvinka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **437101**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Energetická náročnost rozpojení hornin a minerálů

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši zaměřenou na principy, stroje a zařízení pro rozpojování hornin a minerálů.
- 2) Vypracujte přehled přístupů modelování energetické náročnosti rozpojování hornin a minerálů.
- 3) Proveďte experimentální evaluaci energetické náročnosti rozpojení vybraného materiálu. Experimentálně získanou hodnotu porovnejte s hodnotou predikovanou modelem.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


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


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

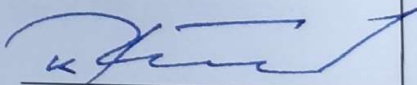
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2020**


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


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

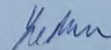

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

9.7.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

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

V Praze dne

.....

Jan Ledvinka

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph.D., vedoucímu této práce, za jeho odborné a pedagogické vedení, cenné rady a trpělivost. Potažmo pak celému Ústavu procesní a zpracovatelské techniky za možnost zde bakalářskou práci psát. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého mého studia.

Anotační list

Jméno autora: Jan

Příjmení autora: Ledvinka

Název práce česky: Energetická náročnost rozpojení hornin a minerálů

Název práce anglicky: Energy requirement for mechanical size reduction of minerals and ores

Rozsah práce: počet stran: 30

počet obrázků: 20

počet tabulek: 2

počet příloh: 0

Akademický rok: 2019/2020

Jazyk práce: čeština

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

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

Konzultant práce:

Zadavatel: České vysoké učení technické v Praze

Anotace česky: Tato bakalářská práce se zabývá rozpojením či také zdrobňováním hornin, tj. jejich drcením či mletím. Představí problematiku získání požadované jemnosti zrn, základní principy zdrobňování a energetickou náročností tohoto procesu. V první části představí běžně používané stroje, princip jejich fungování, jejich přednosti a úskalí. V druhé části se bude zabývat různými přístupy k modelování energetické náročnosti zdrobňování a konečně v poslední části představí experiment s mletím horniny v laboratorních podmínkách a srovná naměřenou hodnotu spotřebované energie s teoretickými modely spotřeby podobných hornin.

Anotace anglicky: This bachelor's thesis deals with the comminution of minerals, i.e., their crushing or grinding. It introduces the issue of obtaining the required grain fineness, the basic principles of size reduction and energy requirements of this process. The first part introduces commonly used machines, the principle of their operation, their advantages and disadvantages. In the second part it discusses different approaches to modeling the energy demands of comminution. And finally in the last part it presents an experiment with comminution of rock in a laboratory tumbling mill and compares the measured energy consumption with theoretical models of consumption of similar rocks.

Klíčová slova: zdrobňování, mletí, drtiče, mlýny, Bond work index, energetická náročnost

Klíčová slova anglicky: comminution, grinding, crushers, grinding mills, Bond work index, energy requirement

Využití: Základní informace o strojích pro drcení a mletí hornin, modelování energetické náročnosti rozpojování.

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Základní pojmy	8
2	Stroje používané v průmyslové praxi	9
2.1	Čelistové drtiče	9
2.2	Kuželové excentrické drtiče.....	10
2.3	Válcové drtiče	11
2.4	Kladivové, odrazové a metací drtiče/mlýny	12
2.4.1	Kladivové drtiče/mlýny.....	12
2.4.2	Odrazové drtiče/mlýny.....	13
2.4.3	Metací drtiče/mlýny	13
2.5	Úderové (rotorové) mlýny.....	14
2.6	Kulové mlýny	15
3	Modelování energetické spotřeby drcení a mletí	17
3.1	Rittingerova teorie	17
3.2	Kickova teorie	18
3.3	Bondova teorie	18
3.4	Bond work index.....	19
4	Experiment – praktická část	20
4.1	Cíl experimentu	20
4.2	Průběh experimentu	20
4.2.1	Požadavek mletí	20
4.2.2	Použitá zařízení.....	20
4.2.3	Postup.....	21
4.3	Zpracování naměřených dat.....	22
4.3.1	Zrnitostní složení	22
4.3.2	Naměřená spotřeba energie mlýna při mletí a naprázdno	24
4.4	Modelování energetické náročnosti a hodnocení výsledků.....	24
4.4.1	Bondova teorie	24
4.4.2	Bond work index.....	25
5	Závěr	26
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	27
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	28
	SEZNAM OBRÁZKŮ:	29
	SEZNAM TABULEK	30

1 Úvod

Drcení a mletí patří mezi základní technologické procesy v mnoha průmyslových odvětvích. Jedná se o zdrobňování či rozrušování materiálu na menší části – zrna. Jsou často prvním stupněm zpracování vytěžených nerostných surovin, ale uplatňovány jsou například i ve farmaceutickém, kosmetickém či obecně chemickém průmyslu.

Kromě získávání zrn požadovaných velikostí slouží drcení i k oddělování vzájemně prorostlých minerálů nebo k získávání většího povrchu daného materiálu, což je potřeba pro plné využití chemických vlastností materiálu.

Drcení a mletí se mezi sebou rozlišují ve velikosti získávaných částic, kdy o mletí většinou hovoříme, pokud jsou částice produktu menší než 1-3 mm. Konkrétní rozdělení pojmů lze sledovat v Tab. 1. Univerzální shoda v definicích ale nepanuje. Při našem experimentu jsme dosáhli konečné střední velikosti asi 2,5 μm . Budeme tak dále hovořit především o mletí. V rešerši zaměřené na v průmyslu používané stroje ale neopomenou ani zařízení používaná k drcení. [1]

Tab. 1: Velikost zrn v produktech [1]

Způsob zdrobňování	Velikost zrn v produktu [mm]	
Hrubé drcení	větší než	125,00
Střední drcení	větší než	25,00
Jemné drcení	menší než	25,00
Mletí	menší než	1,25
Jemné mletí	menší než	0,08

Cíle této práce jsou následující:

- Zpracovat přehled strojů používaných k rozpojování nebo také zdrobňování hornin
- Shrnout přístupy k modelování energetické náročnosti rozpojování hornin
- Provést experimentální analýzu energetické náročnosti rozpojení dané horniny na velikost prachu a srovnat získanou hodnotu s hodnotami podobných hornin predikovanými modely

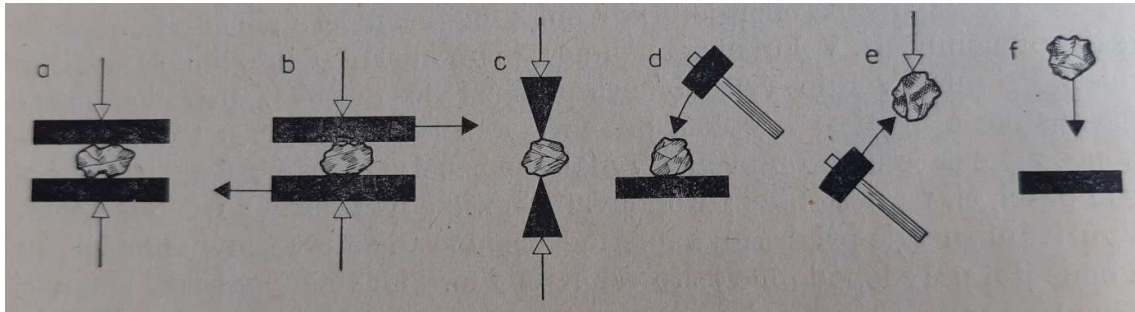
Předpokládám, že námi naměřené hodnoty energetické spotřeby se budou přibližovat hodnotám v praxi používaných modelů podobných hornin.

1.1 Základní pojmy

Držitelnost a melitelnost

Držitelnost a melitelnost jsou pojmy vyjadřující složitost zdrobňování daného materiálu. Tato složitost je vyjadřována spotřebou práce. „Závisí především na struktuře a textuře horniny, které určují její pevnost, tvrdost a křehkost.“ [1, str. 14-15] Nejvýznamnějším faktorem držitelnosti a melitelnosti je pevnost hornin v tlaku, ale není mezi nimi jednoznačná úměrnost. K hodnocení držitelnosti/melitelnosti jsou tak používány různé výpočtové metody založené na empirickém měření. Tyto vlastnosti jsou navíc výrazně závislé i na způsobu a podmínkách drcení či mletí. Velký vliv může mít například přítomnost vody/vlhkosti a teplota. [1]

Základní principy zdrobňování



Obr. 1: Způsoby zdrobňování [1]

Jak lze vidět na Obr. 1, materiál může být rozrušován různými způsoby. Obr. 1A představuje rozmačkávání tlakem mezi tzv. čelistmi. Od toho pak čelistové mlýny. Při pohybu desek kolmo k směru tlaku, jak naznačuje obr. 1B, působí na materiál nejen tlakové ale i smykové síly. Pokud jsou čelisti vybaveny různými hroty či jinými výstupky, pak je materiál i štěpen, jak naznačuje obr. 1C. Na obr. 1D je materiál drcen úderem pohybujícího se tělesa proti nepohyblivé podložce. Často se setkáme s mlýny, kde jsou volně padající zrna drcena rychle se pohybujícími drtícími tělesy (obr. 1E). Obr. 1F naznačuje princip vrhání zrn vysokou rychlostí proti stěně mlýnu, také častý princip používaných strojů. Námí použitý kulový mlýn kombinuje nárazy drtících těles a v menší míře působí i smykové síly. Významným rozdílem mezi zdrobňováním tlakem a úderem/nárazem je ten, že v prvním případě se částice rozpadá v místě působení síly. V tom druhém dochází k rozpadu v místech s menší pevností (pukliny, trhliny apod.) [1]

2 Stroje používané v průmyslové praxi

Následující kapitola bude vycházet z obecných údajů o strojích na základě této literatury: [1, 2, 3]. Zdrobňovacích strojů, tj. drtičů a mlýnu, existuje mnoho typů. Liší se využitými principy zdrobňování a konstrukčním uspořádáním při aplikaci těchto principů. Hranice mezi drtiči i mlýny není jasně stanovitelná. Některé stroje totiž mohou mít nastavitelnou velikost výpustní štěrbinu a u některých zase závisí velikost zrn vypadávajícího produktu na nastavení počtu otáček a době trvání drcení/mletí. Vzhledem k rozsahu práce představím jen ty základní a nejčastěji používané. Představím princip jejich fungování, dosahované parametry jejich produktů a přednosti a úskalí jejich použití.

Než přistoupím k jednotlivým typům, představím v krátkosti použitou terminologii:

Stupeň zdrobnění

Je vyjádřen poměrem mezi velikostí zrn na vstupu a na výstupu drcení/mletí.

$$s = \frac{D_1}{D_2} \quad (1)$$

, kde D_1 je průměr největších kusů původního materiálu,

D_2 je průměr největších kusů produktu.

V praxi se ale k určení velikosti zrn používají síta. Počítá se s velikostí ok, kterými propadne např. 90% (nejčastěji 80-95%) hmotnosti zrn. Potom platí:

$$s = \frac{D_{1(90)}}{D_{2(90)}} \quad (2)$$

, kde $D_{1(90)}$ je velikost ok síta, kterým propadne 90% hmotnosti vstupního vzorku,

$D_{2(90)}$ je velikost ok síta, kterým propadne 90% hmotnosti vystupujícího produktu.

Výkon

Objem materiálu zpracovaný na požadovanou velikost za hodinu.

2.1 Čelistové drtiče

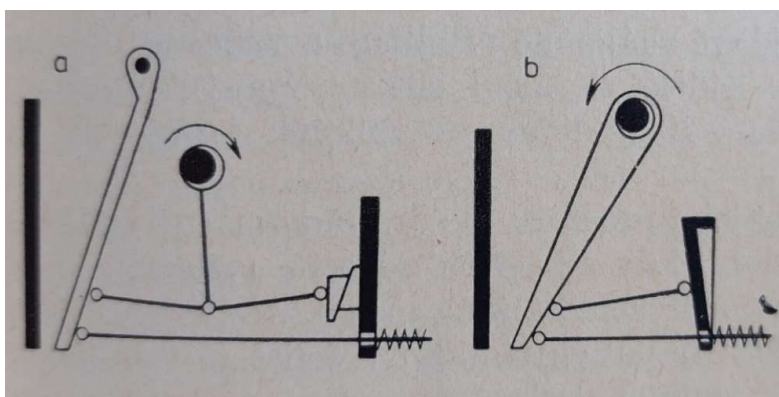
Fungují na principu drcení, tj. účinku tlakových sil na materiál mezi dvěma čelistmi. Jedna čelist bývá zpravidla pevná a druhá vykonává kývavý pohyb. Do drtícího prostoru, který je ohraničen ze stran taktéž pevnými klíny, je shora přiváděn materiál. Jelikož čelisti mezi sebou svírají určitý ostrý úhel – úhel záchytu, tak jsou v horní části drceny větší kusy a poté propadávají dolů, kde zdrobňovací proces pokračuje až k tzv. výpustní štěrbině, jejíž velikost určuje velikost výsledného produktu.



Obr. 2: Jednovzpěrný čelistový drtič firmy FLSmidth [4]

Čelistové drtiče jsou použitelné pro hrubé a střední drcení. Jsou vhodné k drcení i velmi pevných hornin. Výhodou je nízká cena, spolehlivost. Zřejmou nevýhodou jsou velké vibrace a tím potřeba masivních základů – až dvacetinásobku hmotnosti stroje. Také by neměly být používány ke zdrobňování mazlavých hornin, jelikož by mohlo dojít k zahlcení, tj. zastavení volného průchodu hornin drtičem.

Čelistové drtiče jsou především dvou typů: dvouvzpěrné a jednovzpěrné. Liší se konstrukcí kyvadla a vzpěrných desek, na kterých je umístěna pohyblivá čelist. Rozšířenější jsou dvouvzpěrné, které zpravidla dosahují vyšších výkonů. Výhodou jednovzpěrných jsou kompaktnější rozměry, nižší hmotnost a nižší cena. Také jsou díky většímu zdvihu čelistí méně náchylné k zahlcení vstupního otvoru. Zpravidla se používají k jemnému drcení. Srovnání konstrukce na Obr. 3.



Obr. 3: Schéma fungování dvouvzpěrného (a) a jednovzpěrného čelistového drtiče (b) [1]

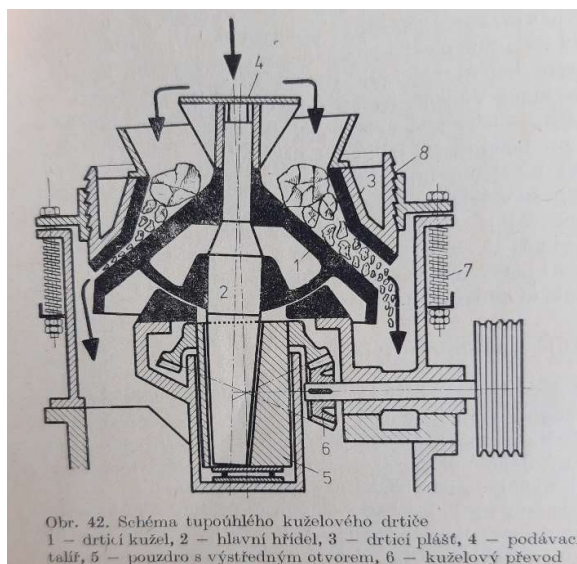
2.2 Kuželové excentrické drtiče

Kuželové drtiče fungují na podobném principu jako ty čelistové. Funkci pohyblivé čelisti zde nahrazuje kužel rotující kolem své osy. Zároveň se ale díky hřídeli, na kterém je drtící kužel umístěn a který má odklon od vertikální osy, pohybuje excentricky. Tento kývavý pohyb zajišťuje změnu velikosti drtícího prostoru po celém obvodu kuželu. Pevnou čelist zde nahrazuje tzv. drtící plášť tvořený také kuželem.

Podle vzájemného uspořádání drtícího kužele a pláště se pak kuželové drtiče dělí na ostroúhlé a tupoúhlé. Zatímco u ostroúhlých směřuje vrchol kužele pláště dolů (a je tak orientován opačně než drtící kužel), tak u tupoúhlých směřuje stejně jako drtící kužel nahoru. Zásadním rozdílem mezi nimi je ve výstřednosti excentrického pohybu hřídele drtícího kužele. U těch tupoúhlých dochází i k znásobení velikosti výpustní štěrbiny, což usnadňuje vypadávání již podrcených zrn. Navíc společně s vyššími otáčkami to má za následek působení navíc i úderů na rozrušení zrn.

Oproti čelistovým drtičům dosahují vyšších výkonů díky faktu, že k drcení materiálu dochází nepřetržitě po celou dobu otáčení. Navíc i při vyšších otáčkách nedochází k takovým vibracím a nejsou tudíž potřeba ani takové základy jako u drtičů čelistových. Dalšími výhodami jsou zaprvé jejich efektivita ve smyslu menšího podílu větších než požadovaných zrn, větší rozsah nastavitelných otáček a větší stupeň drcení. Nevýhodou je velký zastavěný prostor, především do výšky. Dále pak vyšší pořizovací cena a složitější údržba.

Stupeň zdrobnění se pohybuje v rozmezí 3 až 8 u ostroúhlých a 7 až 15 u tupoúhlých. Používají se především na hrubé a střední drcení, ale obzvláště tupoúhlé mohou dosahovat velikosti zrn i pod 5 mm (jemné drcení). Ty se ale nedají použít k hrubému drcení.



Obr. 4: Schéma tupoúhlého kuželového drtiče [1]

2.3 Válcové drtiče

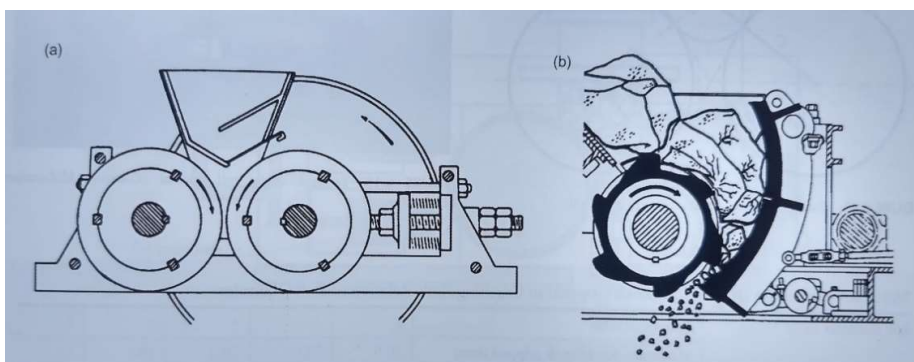
Ve válcových drtičích je materiál taktéž drcen tlakem, a to zpravidla mezi dvěma proti sobě se otáčejícími válci, mezi kterými je úzká štěrbina (tak jsou tvořené dvouválcové drtiče). To za předpokladu, že se válce otáčejí stejnou rychlostí. Pokud se otáčejí různou, tak je materiál namáhán i na skluz. Toho se využívá např. při rozmělnování jílovitých materiálů. Často se lze setkat se zavedeným pojmem válcový

mlýn. Ve skutečnosti je ale minimum těchto strojů schopno dosahovat velikosti zrn menších než 3 mm. Takové stroje jsou pak většinou tvořeny větším počtem válců a dosahují jen malých výkonů.

Drtecí kola mohou být buď hladká, nebo mohou být vybaveny výstupky v podobě zubů či hrotů. Hladká kola se využívají u středního a jemného drcení. Ozubená u hrubého a středního.

Nevýhodou válcových drtičů je nízký stupeň zdrobnění, v provozech nejčastěji kolem 4 (u ozubených válců je to o něco více). A zpravidla jich nelze použít na velmi pevné materiály. K výhodám patří jednoduchá konstrukce a spolehlivost. Broušení hladkých válců lze navíc zajistit zařízením, které je součástí stroje a není tak potřeba válce vyjímat, čímž se životnost výrazně prodlužuje.

Druhým rozšířeným konstrukčním řešením jsou tzv. jednoválcové drtiče, což je kombinace otáčejícího se válce a pevné prohnuté čelisti. Výhodou těchto strojů je ještě jednodušší konstrukce a také větší vstupní otvor. Dosahují většího stupně zdrobnění (15+), ale menších výkonů, a navíc nejsou zpravidla tak robustní jako drtiče dvouválcové a nelze jich tak použít na pevnější materiály.



Obr. 5: Schéma dvouválcového (a) a jednoválcového (b) drtiče [3]

2.4 Kládiové, odrazové a metací drtiče/mlýny

Na rozdíl od předchozích dvou typů není materiál drcen tlakem, nýbrž úderem kladiv či lišt, nárazem do pevného pláště nebo i nárazy částic mezi sebou. To má za následek rozpad částic v jejich nejslabších místech, nikoli v místě stlačení čelistmi nebo v tomto případě místě úderu kladiva. Díky tomu nezůstává v zrnech vnitřní napětí a nerozpadají se tak dále na menší než požadované velikosti. Navíc se takto získávají tvarově podobnější zrna.

K výhodám patří vysoký stupeň zdrobnění (až 80). Zpravidla se ale volí nižší (10 až 15), jinak totiž klesá výkon stroje. Rozlišení, zda se jedná o drtič či mlýn, závisí především na nastavení daného stroje. Tyto stroje nejsou vhodné k drcení velmi pevných materiálů.

2.4.1 Kládiové drtiče/mlýny

Jak napovídá název, materiál je zde drcen kladivy, která jsou umístěna na rotoru. V menší míře dochází k drcení i po odrazu kladiva nárazem do pancéřové nárazové desky. Jak lze vidět na Obr. 6, stroj

může, ale také nemusí, být vybaven ještě roštem, který funguje jako síto, které nepropustí nedostatečně nadrcený materiál a zachytí ho v drtícím prostoru.

Kladiva jsou umístěna zpravidla v alespoň třech řadách. Počet kladiv v jedné řadě zpravidla stoupá s požadovanou jemností drcení/mletí.

Úskalí kladivových drtičů je náchylnost drtících nástrojů na otěr. Je tak třeba dbát na jejich životnost a vyvarovat se drcení abrazivních materiálů. Jsou tak pro ně vhodné především snadno až středně drtitelné materiály. I tak je ale vhodná možnost reverzního chodu stroje, aby k otěru docházelo z obou stran nástrojů. Kladiva jsou zpravidla snadno vyměnitelná, při drcení příliš pevných materiálů by ale byla frekvence výměny neúnosná.

Výhodou je jednoduchá konstrukce, nízká hmotnost, malá poruchovost, nízká cena a již zmíněný vysoký stupeň zdrobnění.

2.4.2 Odrazové drtiče/mlýny

Odrazové drtiče a mlýny jsou v principu velmi podobné. Kladiva jsou ale nahrazena lištami, upevněnými pevně na rotoru (kladiva jsou uložena kloubovitě). Lišty materiál nejen drtí, ale také ho ve větší míře než kladiva odrážejí na pancéřové desky. Kvůli tomu také dosahují vyšších obvodových rychlostí. Primárním zdrobnovacím nástrojem jsou ale stále lišty. Schéma lze vidět na Obr. 6. Je ale třeba zdůraznit, že odrazové drtiče zpravidla nemívají spodní rošt. Především kvůli ochraně před nedrtitelnými předměty.

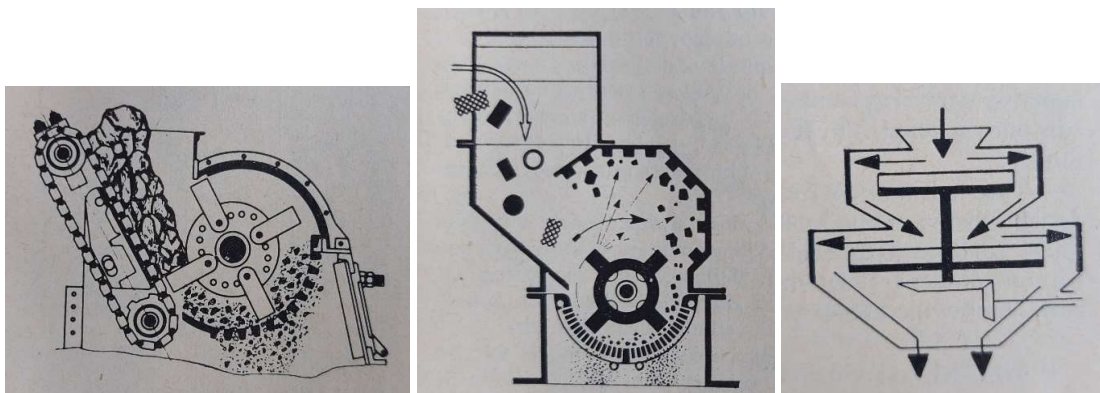
Vzhledem k menší pracovní ploše lišt a větším rychlostem dochází zde k otěru ještě snadněji než u kladivových drtičů. Lišty a pancéřové desky by měly být snadno vyměnitelné, a lišty pokud možno konstruované pro možnost pouze pootočit nástroj o 180 nebo i 90 stupňů. K dalším nevýhodám patří potřeba zajistit plynulý přívod materiálu podávačem a v případě větší vlhkosti i zajistit sušení. Navíc je nelze rychle zastavit.

Výhody jsou podobné jako u kladivových drtičů, tj. nízká hmotnost, kompaktní rozměry, vysoký stupeň zdrobnění a také schopnost drtit velké kusy materiálu. Získávané produkty zpravidla disponují nerozptýleným zrnitostním složením.

2.4.3 Metací drtiče/mlýny

Metací drtiče a mlýny se již od předchozích dvou liší více. A to tím, že k drcení dochází pouze nárazem o pancéřový plášť. Rozdělují se na dva základní typy. Prvními jsou tzv. mechanické (Obr. 6). Materiál je zde přiváděn na rychle se otáčející talíř, který vrhá materiál pomocí radiálních lišt na pancéřovou vnitřní stěnu stroje. Poté padá na další otáčející se kotouč a opět jsou vrhány na stěnu. Tohoto principu se

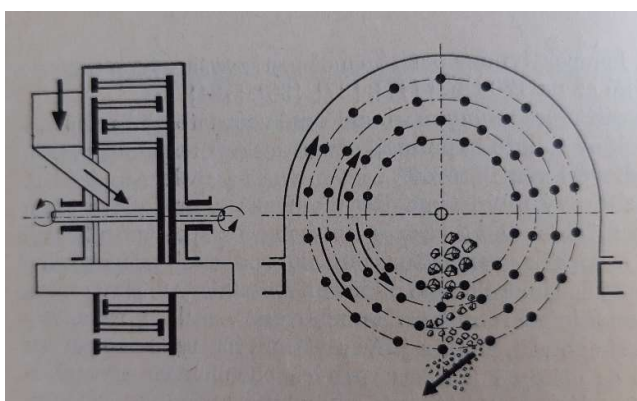
využívá především při drcení. K mletí se používají tzv. pneumatiké metací mlýny, ve kterých je materiál vrhán na desku proudem stlačeného vzduchu.



Obr. 6: Schémata kladivových (1. zleva), odrazových (2.) a metacích (3.) strojů [1]

2.5 Úderové (rotorové) mlýny

Opět jde o stroje, kde je materiál mlet nárazem. Dopadá na rychle se pohybující zdrobňovací tělesa umístěná na otáčejících se deskách. Tyto výstupky jsou uspořádány do několika řad, kdy každá druhá řada se otáčí opačným směrem než ta předchozí. Nebo může být i statická. Materiál je přiváděn do středu, postupuje směrem ven a je tak postupně zdrobňován několika nárazy. Stupeň zdrobňování závisí na rychlosti otáčení a počtu řad kolíků. Používá se především na snadno melitelné a křehké materiály jako koksovateľné uhlí, břidlice, asfalt, ale také barviva, cukr nebo kakao. Podle uspořádání a tvaru zdrobňovacích těles se dají úderové rotorové mlýny dělit na několik typů. Nejstarším je košový mlýn, tzv. dezintegrátor (Obr. 7). Dalšími jsou kolíkové, nosové nebo křížové.



Obr. 7: Schéma košového mlýnu [1]

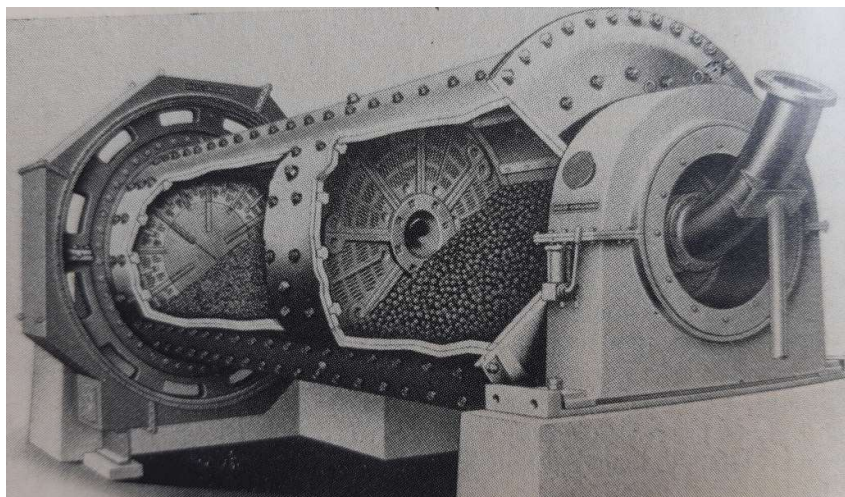
Výhodou úderových mlýnů je i dobré rozmíchání zrn a možnost použití i na vlhčí směsi. Nevýhodou je složitá výměna opotřebovaných zdrobňovacích těles. Používají se především v chemickém a potravinářském průmyslu.

2.6 Kulové mlýny

Kulové mlýny jsou zdaleka nejrozšířenějšími mlecími stroji. Jsou to rotující nádoby válcového tvaru naplněné volně se pohybujícími mlecími tělesy, zpravidla koulemi. Ty jsou unášeny odstředivou silou, kterou v horní pozici překonává vliv gravitační síly a tělesa padají dolů a drtí materiál. Takový to způsob mletí se označuje jako kataraktní. Druhým způsobem je kaskádní, kdy nejsou mlecí tělesa unášena dostatečnou odstředivou silou a pouze se přes sebe převalují. Tento způsob se někdy používá pro jemnější mletí. K oběma způsobům sice vzhledem k velkému počtu těles, která tvoří od pláště několik řad nad sebou, dochází současně, jelikož tělesa blíže k ose otáčení nedosahují takových obvodových rychlostí, ale míra převažujícího způsobu je dána nastavením otáček bubnu. Při příliš vysokých otáčkách by totiž zase tělesa pouze obíhala po povrchu pláště. Hranicí, kdy absolutně převládne odstředivá síla tu gravitační, jsou tzv. kritické otáčky. Podle zvoleného postupu mletí se pak otáčky volí zpravidla v rozmezí 60 až 88 %. Pro hrubší zrna a pro mokré mletí používáme vyšších otáček, zatímco pro jemnější částice a suché mletí volíme nižší.

Kromě rychlosti otáčení má zásadní vliv na mletí průměr a délka mlýnu, míra zaplnění mlecího prostoru, velikost, tvar a hmotnost mlecích těles (je dobré upozornit, že se často používá více různých velikostí zároveň), a také vyložení pancéřového pláště.

Kulových mlýnů existuje řada typů a jejich alternací. Základním dělením je na bubnové a troubové, což je dáno jejich protáhlostí, přesně tedy poměrem průměru a délky. Bubnové mají poměr mezi průměrem bubnu a jeho délkou větší než 1:2. Naopak troubové dosahují až poměru 1:8 a používají se především při úpravě cementu, dosahují i velice jemných zrn. Mohou na délku měřit i 20 metrů, a vzhledem k potřebě použití menších mlecích koulí na směrem ke koncovému čelu se zmenšující zrna, bývají někdy rozdělena na více komor s různými velikostmi mlecích těles. (Obr. 8)



Obr. 8: Dvoukomorový troubový kulový mlýn [1]

Dále se pak bubnové mlýny dělí podle způsobu vynášení produktu. Na rozdíl od laboratorních mlýnů, jako je i námi použitý, pracují totiž průmyslové mlýny kontinuálně. Nejčastěji se setkáme s vynášením produktu dutým čepem. Produkt ale může opouštět mlýn i šterbinovou mezistěnou, méně často potom sítím po obvodu válce. Výhodou mlýnů s mezistěnou je větší výkon a menší míra přemílání (vzniku příliš jemných zrn).

Obecně lze říct, že nevýhodou kulových mlýnů je nestejně rozemletí zrn, tedy velký počet příliš velkých a příliš malých zrn. To se řeší zařazením třídiče za výstup mlýna. Mlýn se nastaví na poněkud hrubší mletí, takže nevzniká tolik příliš jemných částic, a třídič vrací do vstupu mlýna naopak nedostatečně rozemletá zrna. Takto vzniká tzv. uzavřený obvod. Další nevýhodou je rychlé opotřebení nástrojů. Mlecí tělesa i z velmi pevných materiálů jako Ni-Hard ztrácejí až 1 kg/tunu zdrobněného materiálu. [5] To navíc způsobuje i kontaminaci materiálu.

Vzhledem k rozšíření použití kulových jsou jejich výhody nezpochybnitelné. Uvedme alespoň vysoký stupeň zdrobnění, který se může pohybovat i v řádu stovek i tisíců. Výsledná zrna se mohou pohybovat i v setinách mikrometru. Daní za takovýto stupeň je vysoká spotřeba energie, což ale není nedostatkem kulových mlýnů, ale procesu mletí obecně.

3 Modelování energetické spotřeby drcení a mletí

Drcení a mletí jsou velmi energeticky náročné procesy – je třeba vykonat velké množství práce. Dochází při nich totiž k velkým ztrátám. A to kvůli faktu, že se drtí velký soubor zrn zároveň. Jednotlivá zrna jsou pak namáhána různě velkými silami. Kromě energie nutné k samotnému překonání pevnosti částic a vzniku nových povrchů se jí velké množství spotřebuje na elastickou i plastickou deformaci zrn, ale také nástrojů, tření mezi zrny či zrny a nástroji. Ztrátou je i větší než potřebná kinematičká energie dodaná zrnu před nárazem. Vzniká tak mnoho ztrátového tepla.

Spotřeba energie závisí na množství nově vzniklého povrchu. Ten nám určuje již zmíněný stupeň zdobnění, jelikož poměr velikosti výstupního ku vstupnímu zrnu odpovídá poměru nového celkového povrchu vůči původnímu. Stupeň zdobnění bývá větší při mletí. Výrazně větší spotřeba energie u mletí je kromě toho dána také faktem, že „při zdobňování se jednotlivá zrna rozpadají vždy v místech se zmenšenou pevností (trhliny, plochy na rozhraní krystalů, vrostlice cizích minerálů). Při pokračujícím dalším zdobňování se počet takových míst postupně zmenšuje. Tím se odpor hornin a jiných materiálů vůči zdobnění zvětšuje. Zmenšující se počet vrubů má za následek zvýšenou spotřebu energie.“ [1, str.29].

Vzhledem k nepravidelnosti a neuniformitě procesu zdobňování velkého množství zrn je velice obtížné určit velikost vznikajících ztrát. Obzvláště když existuje velké množství různých strojů s různými přístupy k zdobňování. Některé starší teorie modelování spotřeby se tak omezují na odhad fyzikální zdobňovací práce, tedy energii potřebnou k samotnému zdobnění.

3.1 Rittingerova teorie

Mezi nejstarší patří Rittingerova teorie, tzv. povrchová. Ta se ale omezuje pouze na již zmíněný stupeň zdobnění. To je ale pouze část problému a nebere ohled na větší odpor menších částic. Rittingerova rovnice má tento tvar:

$$e_R = C_R \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{2(50)}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{1(50)}}} \right) \quad (3)$$

, kde e_R je měrná spotřeba práce podle Rittingera,

C_R je konstanta, která se musí stanovit empiricky,

$D_{2(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve finálním produktu,

$D_{1(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve vstupním vzorku. [1]

3.2 Kickova teorie

Další teorií je Kickova, také objemová, jelikož „rozpojovací práce je přímo úměrná objemu rozpojovaného materiálu“. [6, str.13] „Spotřeba práce vynaložené při zdrobňování jednotlivé krychle o délce hrany D na malé krychle od délce hrany $d=D/2^k$ je k -krát větší, než je spotřeba práce při zdrobňování na malé krychle s hranami dlouhými $d=D/2$ “. [1, str. 33] Kickova rovnice upravená pro zdrobňování většího počtu zrn vypadá takto:

$$e_K = C_K \times \log \frac{D_{1(50)}}{D_{2(50)}} \quad (4)$$

, kde e_K je měrná spotřeba práce podle Rittingera,

C_K je konstanta, která se musí stanovit empiricky,

$D_{2(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve finálním produktu,

$D_{1(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve vstupním vzorku. [1]

Ani jedna z těchto teorií nemá obecnou platnost a nevystihují zdaleka všechny vlivy na spotřebu energie. Hlavní chybou Kickovy teorie je předpoklad konstantní pevnosti všech velikostí částic. Nefunguje tak pro zdrobňování v oblasti mletí, kde výrazně stoupá pevnost. Rittingerova teorie naopak mletí modeluje dobře, jelikož při něm vzniká velký měrný povrch. Obě teorie ale naznačují hlavní principy modelování energetické náročnosti.

3.3 Bondova teorie

Frank Bond v roce 1952 zkombinoval oba přístupy, tedy množství potřebné energie je závislé jak na poměru velikostí částic (vliv objemu), tak na nově vznikajícímu povrchu. Objem částic má vliv na spotřebu energie i při pružných deformacích. „Další část energie je pak nutná k vlastnímu rozpojování zrn v místech nově vznikajících trhlin, což je funkcí nově vznikajícího povrchu.“ [7, str.12] Rovnice vypadá následovně:

$$e_B = 2 \times C_B \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{2(50)}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{1(50)}}} \right) \quad (5)$$

, kde C_B je empirická konstanta pro daný materiál,

$D_{2(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve finálním produktu,

$D_{1(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve vstupním vzorku. [1]

Z Bondovy teorie se při modelování energetické náročnosti vychází, ale i ona je v praxi těžko využitelná. V praxi se pracuje různými metodami, které za stanovených podmínek mletí určují součinitel melitelnosti podle energetické spotřeby ve srovnání s daným etalonem. Lze jmenovat metodu VTI nebo Hardgrove index. Metody jsou zpravidla omezené na daný způsob mletí. Zdaleka nejrozšířenější metodou pro bubnové mlýny je tzv. Bond work index.

3.4 Bond work index

Rovnice vypadá takto:

$$W = 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{2(80)}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{1(80)}}} \right) \quad (6)$$

, kde W je predikovaná spotřebovaná energie v kWh/t,

W_i je součinitel práce v kWh/t,

$D_{2(80)}$ je velikost, kterou nepřesahuje 80% částic ve finálním produktu,

$D_{1(80)}$ je velikost, kterou nepřesahuje 80% částic ve vstupním vzorku. [8]

Pro představu uvádím v tab. 1 hodnoty součinitelů pro neznámější horniny. Dle Bond work indexu je melitelnost dobrá, pokud W_i je menší než 9, střední, pokud je menší než 15, a špatná, pokud je menší než 20. Od 20 výše je již velmi špatná, tzn. extrémně energeticky náročná. Jak lze vidět, většina běžných hornin spadá do střední až špatné melitelnosti. [6]

Tab. 2: Hodnoty Bondovy konstanty a konstanty Bond work indexu [2, 9]

Materiál	C_B [kWh* $\mu\text{m}^{0.5}$ *t $^{-1}$]	W_i [kWh*t $^{-1}$]
korund	320,7	30,4
koks	114,1	16,7
čedič	112,5	18,9
železná ruda	85,5	13,5
žula	79,3	16,6
cementový slínek	74,4	15,0
křemen	70,4	15,0
vápenec	64,0	13,8
olovnatá ruda	62,9	12,9
uhlí	62,7	14,3
cementářská surovina	58,3	11,6

4 Experiment – praktická část

4.1 Cíl experimentu

Experiment provádím za účelem srovnání reálné energetické spotřeby při mletí kamenné drti s modelovou energetickou spotřebou podobných hornin.

4.2 Průběh experimentu

4.2.1 Požadavek mletí

Rozemlít vzorek (blíže nespecifikovanou kamennou drť) na velikost horninového prachu (střední velikost zrn menší než 5 μm).

4.2.2 Použitá zařízení

- bubnový mlýn Retsch TM300XL (objem: 10 l)
- kulová mlecí tělesa
- analyzátor výkonových parametrů Fluke 438 II
- laboratorní síťový třídíč se síty o velikostech 10, 7, 5 a 2,5 mm
- digitální váhy
- laserový analyzátor velikosti částic Fritsch analysette 22 COMPACT



Obr. 10: Laboratorní mlýn



Obr. 9: Vnitřek bubnu s mlecími tělesy po vyprázdnění produktu



Obr. 12: Sítový třídíč



Obr. 11: Laserový analyzátor velikosti částic

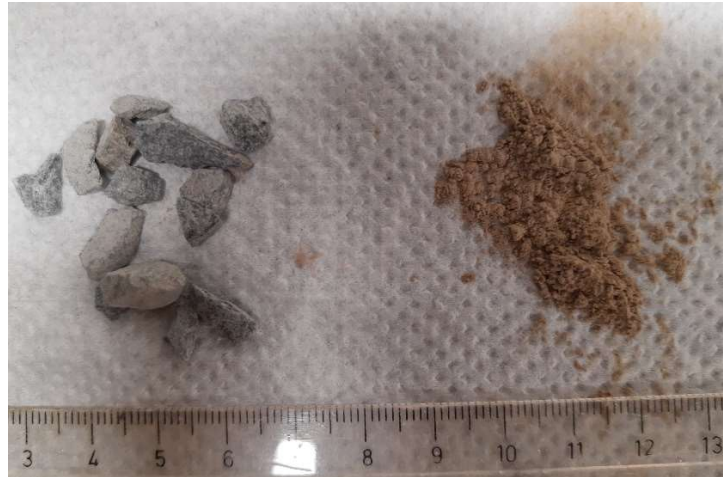
4.2.3 Postup

- odměřen vzorek 0,2 litru kamenné drtě (hmotnost 336,1 g)
- sítová analýza počátečního vzorku na laboratorním třídíči
 - o zvážení prázdných sít
 - o spuštění třídíče na 2 minuty
 - o opětovné zvážení jednotlivých sít
 - získání hmotností jednotlivých velikostních frakcí
- naplnění bubnu mlýna vzorkem
- vložení mlecích těles do bubnu
 - o nerezové hladké koule
 - o průměr: 3 cm
 - o celkový objem: 2 litry
- uzavření bubnu
- spuštění mlýna
 - o otáčky: 60 ot/min
 - o doba mletí: 2 h
- spuštění analyzátoru výkonových parametrů
 - o doba: 2 min
 - o časový krok: 1 s
- vyjmutí vzorku, vyčištění bubnu mlýna

- analýza velikosti částic produktu pomocí laserové difrakce
- vložení mlecích těles do prázdného bubnu (nerezové koule, průměr: 3 cm, objem: 2 litry)
- spuštění mlýnu (otáčky 60 ot/min) bez materiálu a analyzátoru výkonových parametrů
- spuštění analyzátoru výkonových parametrů při mletí naprázdno (doba: 2 min, časový krok: 1 s)



Obr. 13: Analyzátor výkonových parametrů

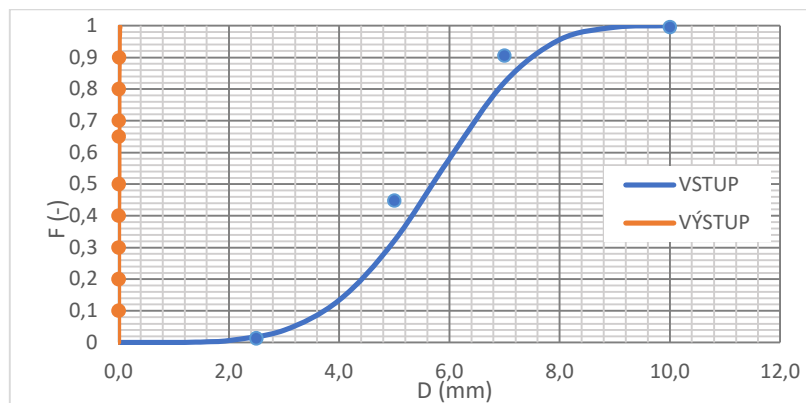


Obr. 14: Porovnání vstupního vzorku s produktem mletí

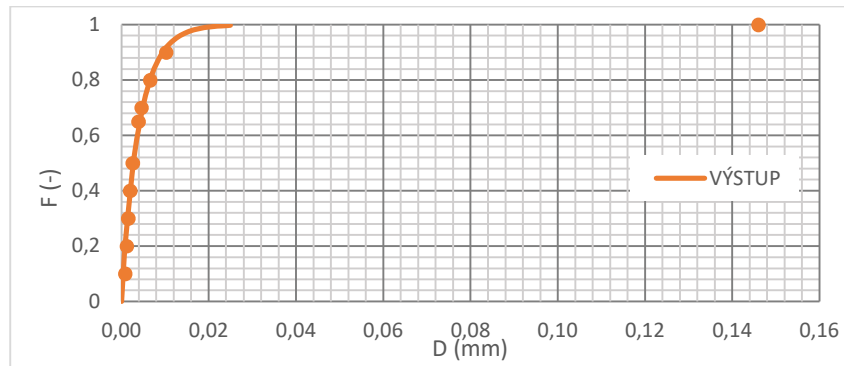
4.3 Zpracování naměřených dat

4.3.1 Zrnitostní složení

Ze získaných údajů jsme vytvořili tzv. součtovou zrnitostní křivku [1], kde jsme na osu x vynesli velikost zrn a na osu y součet hmotností složek menších než daná velikost zrna. U produktu si lze všimnout nedostatečně rozemletého asi desetiprocentního zbytku. Naopak vstupní produkt tvoří rovnoměrnou křivku. Viz. Obr. 15 a Obr. 16.



Obr. 15: Srovnání složení vstupních a výstupních zrn



Obr. 16: Zrnitostní složení výsledného produktu

RRB funkce

Pro další analýzu dat jsme využili tzv. RRB funkci Rosin-Rammler-Bennett (někdy také RRSB), která je jednou z nejběžněji používaných. Účelem této a podobných funkcí bylo získání rovných přímk, což usnadňovalo formulaci zákonů. [10] Nám rovnost přímek pomáhá i tím, že díky tomu nepotřebujeme větší počet hodnot různých velikostí zrn pro extrapolaci složitějších křivek. [1]. RRB funkce má rovnici:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x'}\right)^{n'}} \quad (7)$$

, kde F je hmotnostní podíl podsítneho u síta s oky o velikosti x ,

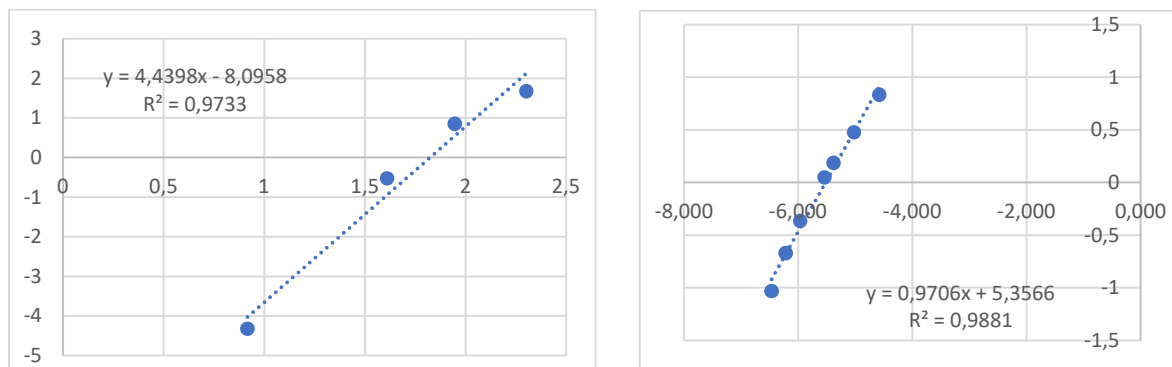
x' je modelová velikost ok síta, kterým propadne 63,2% hmotnosti zrn,

n' je parametr rovnoměrnosti rozdělení zrn podle velikosti. [10]

Linearizací této rovnice dostaneme vztah [11]:

$$\ln(-\ln(1 - F)) = n' \times \ln(x) - n' \times \ln(x') \quad (8)$$

Vzhledem k tomu, že znám hodnoty x a F jsem schopen sestavit graf závislosti $\ln(-\ln(1 - F))$ na $\ln(x)$, provedu lineární regresi a získám její rovnici. Členy a a b v lineárních rovnicích $y = ax + b$ potom odpovídají hodnotám $n' \times \ln(x)$ respektive $n' \times \ln(x')$. Z těch potom získávám hodnotu konstanty n' a x' .



Obr. 17: Lineární regrese RRB funkce pro vstupní vzorek a výstupní produkt

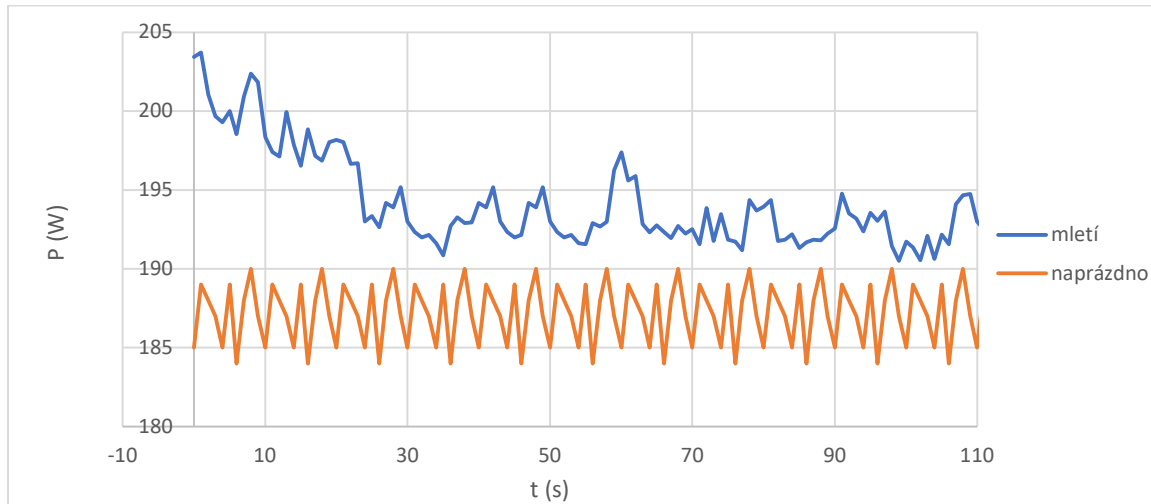
4.3.2 Naměřená spotřeba energie mlýna při mletí a naprázdno

Energie spotřebovaná k samotnému rozpojení byla určena jako rozdíl energie spotřebované při mletí drti a energie spotřebované při běhu mlýna naprázdno.

$$E_A = \int_0^t P_{AM} dt - \int_0^t P_{AI} dt \quad (9)$$

Měrná spotřeba práce (e) byla počítána jako podíl energie spotřebované k rozpojení (E_A) a hmotnosti použitého vzorku (m). [12]

$$e = \frac{E_A}{m} \quad (10)$$



Obr. 18: Elektrická energie odebíraná mlýnem naprázdno a při mletí vzorku

4.4 Modelování energetické náročnosti a hodnocení výsledků

4.4.1 Bondova teorie

K modelování energetické spotřeby použijí nejprve již zmíněný základní Bondův model, tj.

$$e = 2 \times C_B \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{2(50)}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{1(50)}}} \right) \quad (5)$$

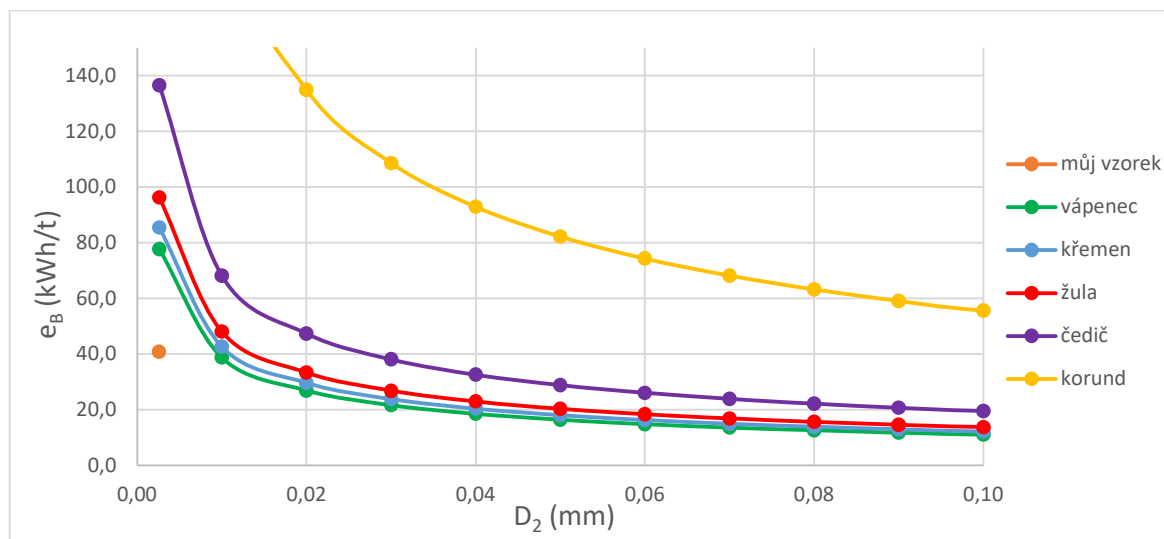
, kde C_B je empirická konstanta pro daný materiál,

$D_{2(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve finálním produktu,

$D_{1(50)}$ je velikost, které dosahuje 50% částic ve vstupním vzorku.

Obě posledně zmíněné hodnoty jsou mi známy. Pro vzorek jsem použil hodnotu spočtenou pomocí RRB funkce, zatímco hodnotu pro produkt mi přesně vyhodnotil difrakční analyzátor. Díky tomu jsem mohl pomocí součinitelů C_B pro zvolené běžné horniny (a pro zajímavost i pro korund) vytvořit křivky spotřeby energie v závislosti na jemnosti mletí a srovnat je s námi naměřenou spotřebou. Na Obr. 19 lze vidět, že

se náš materiál svou melitelností nejvíce blíží vápenici, ale i jemu je stále výrazně vzdálen. Liší se o bezmála 50%.



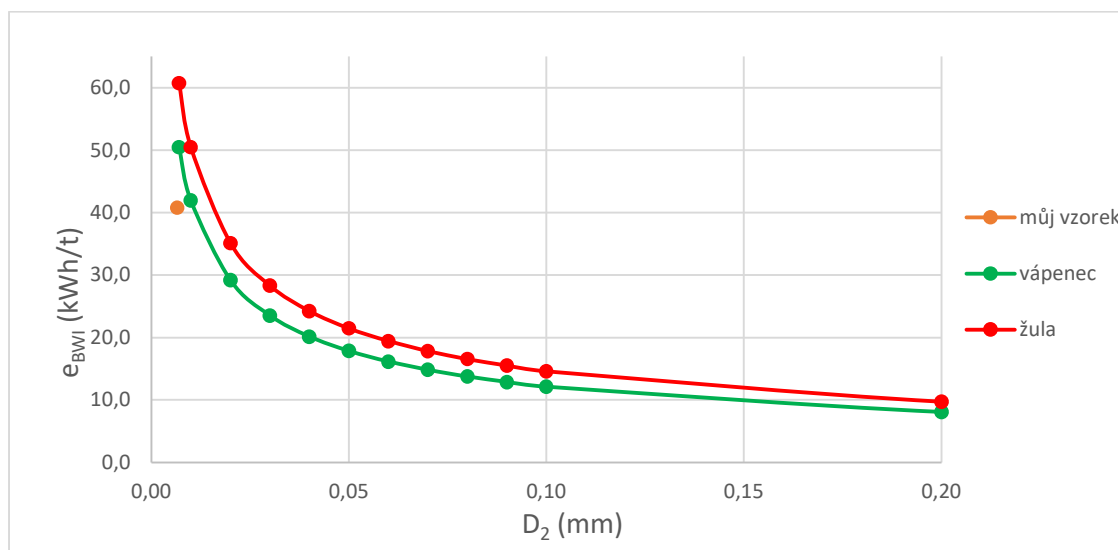
Obr. 19: Spotřeba práce dle Bonda v závislosti na jemnosti mletí

4.4.2 Bond work index

Druhou použitou metodou byl tzv. Bond work index, který pracuje s velikostí, kterou nepřesahuje 80 % hmotnosti zrn. Rovnice 6 zní:

$$W = 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{2(80)}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{1(80)}}} \right) \quad (6)$$

Postupoval jsem obdobně jako u předchozí metody. Tentokrát jsem již srovnání omezil pouze na žulu a vápenec. Bod změřené spotřeby je v tomto případě o poznání blíže modelované křivce vápence, jak lze vidět na Obr. 20. Liší se již pouze o necelých 20 %.



Obr. 20: Spotřeba práce dle Bond work index v závislosti na jemnosti mletí

5 Závěr

Cílem práce bylo v první řadě seznámit se se zdrobňovacími procesy a jejich úskalími. Zpracoval jsem rešerši zaměřenou na použitelnost strojů, princip jejich fungování a jejich klady a zápory. Seznámil jsem se se základními přístupy k modelování energetické spotřeby procesů a došel k zjištění, že se v praxi nejčastěji pracuje s Bondovou teorií.

Pomocí této teorie jsem poté modeloval energetickou náročnost mletí hornin podobných mému vzorku. Během experimentu na kulovém mlýně jsem naměřil reálně spotřebovanou elektrickou energii a srovnáním jsem došel k závěru, že v případě základní Bondovy teorie je chování mého vzorku výrazně odlišné od podobných hornin. Poté jsem opakoval tento postup s tzv. Bond work indexem a výsledek zde již byl uspokojivější. Ve srovnání s vápencem je o přibližně 19 % méně energeticky náročnější, tzn. je melitelnější.

Pro možnost lepšího srovnání získaných dat by bylo dobré znát přesné složení námi použitého vzorku. Za účelem minimalizace spotřeby by také šlo pracovat s nastavením mlecího procesu. Například zvýšit míru zaplnění bubny, použít více velikostí koulí zároveň či použít jiné nastavení otáček.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] DINTER, Oskar. *Drcení a mletí nerostných surovin*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [2] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.
- [3] WILLS, Barry A. and James A. FINCH. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 8th ed. Boston, MA: Elsevier/BH, 2018. ISBN 978-0-08-097053.
- [4] FLSmidth. *Crushing systems: Crushing, screening, feeding and plant solutions*. [online][cit.2020-09-02], Dostupné z: https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-products/crushing-and-sizing/2017/crushing_technology.pdf?rev=72c9719b-2433-4d70-b1c3-1a03c7074452
- [5] SEDLÁČKOVÁ, Věra a Pavel SEDLÁČEK. *Přípravné procesy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0582-0
- [6] VIRÁGOVÁ, Tereza. *Porovnání různých metod stanovení melitelnosti práškových pojiv*. Brno, 2016. 100 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Karel Dvořák, Ph.D. [online], Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=145130
- [7] ŠŤASTNÍK, Stanislav. *Těžba, lomářství a úpravnictví*. Brno: Šťastník, 2005 [online], (cit. 2020-08-26), Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BJ53-Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20%28M%29/Tezba%20a%20upravnictvi%20surovin%20-%20upravnictvi%20nerostnych%20surovin.pdf>
- [8] MICHAUD, David. *Bond work index formula – equation*. 2013 [online], (cit.2020-09-05) Dostupné z: <https://www.911metallurgist.com/blog/bond-work-index-formula-equation>
- [9] MICHAUD, David. *Table of Bond work index by minerals*. 2015 [online], (cit. 2020-08-23), Dostupné z: <https://www.911metallurgist.com/blog/table-of-bond-work-index-by-minerals>
- [10] PRASHER, Charles Lindsay. *Crushing and grinding process handbook*. Wiley, 1987. ISBN 0-471-10535-X
- [11] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03286-8.
- [12] KRÁTKÝ, Lukáš a Tomáš JIROUT. *Modelling of particle size characteristics and specific energy demand for mechanical size reduction of wheat straw by knife mill*. Prague, Science Direct, 2020. [online], [cit. 2020-09-10], Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.005>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

s	stupeň zdrobnění	[-]
$D_{1(80)}$	velikost ok síta, kterým propadne 80 % hmotnosti vstupního vzorku	[mm]
$D_{2(80)}$	velikost ok síta, kterým propadne 80% hmotnosti vystupujícího produktu	[mm]
e_R	měrná rozpojovací energie dle Rittingera	[W·s·kg ⁻¹]
C_R	rozpojovací konstanta dle Rittingera	[kWh·μm ^{0.5} ·t ⁻¹]
e_K	měrná rozpojovací energie dle Kicka	[W·s·kg ⁻¹]
C_K	rozpojovací konstanta dle Kicka	[kWh·μm ^{0.5} ·t ⁻¹]
e_B	měrná rozpojovací energie dle Bonda	[W·s·kg ⁻¹]
C_B	rozpojovací konstanta dle Bonda	[kWh·μm ^{0.5} ·t ⁻¹]
W	měrná rozpojovací energie pro Bond work index	[W·s·kg ⁻¹]
W_i	Bond work index (Bondův součinitel práce)	[kWh·t ⁻¹]
F	hmotnostní podíl podsítného u síta s oky o velikosti x	[-]
x	velikost ok síta, kterým propadne určitá hmotnost částic	[mm]
x'	modelová velikost ok síta, kterým propadne 63,2% hmotnosti zrn	[mm]
n'	parametr rovnoměrnosti rozdělení zrn podle velikosti	[-]
E_A	rozpojovací energie	[W·s]
t	čas	[s]
P_{AM}	činný výkon během mletí	[W]
P_{AI}	činný výkon mlýna bez vzorku	[W]
e	měrná rozpojovací energie	[W·s·kg ⁻¹]
m	hmotnost	[kg]

SEZNAM OBRÁZKŮ:

OBR. 1: ZPŮSOBY ZDROBŇOVÁNÍ [1]	8
OBR. 2: JEDNOVZPĚRNÝ ČELISŤOVÝ DRTIČ FIRMY FLSMIDTH [4]	10
OBR. 3: SCHÉMA FUNGOVÁNÍ DVOUVZPĚRNÉHO (A) A JEDNOVZPĚRNÉHO ČELISŤOVÉHO DRTIČE (B) [1]	10
OBR. 4: SCHÉMA TUPOÚHLÉHO KUŽELOVÉHO DRTIČE [1]	11
OBR. 5: SCHÉMA DVOUVÁLCOVÉHO (A) A JEDNOVÁLCOVÉHO (B) DRTIČE [3]	12
OBR. 6: SCHÉMATA KLADIVOVÝCH (1. ZLEVA), ODRAZOVÝCH (2.) A METACÍCH (3.) STROJŮ [1]	14
OBR. 7: SCHÉMA KOŠOVÉHO MLÝNU [1]	14
OBR. 8: DVOUKOMOROVÝ TROUBOVÝ KULOVÝ MLÝN [1]	15
OBR. 9: VNITŘEK BUBNU S MLECÍMI TĚLESY PO VYPRÁZDNĚNÍ PRODUKTU	20
OBR. 10: LABORATORNÍ MLÝN	20
OBR. 11: LASEROVÝ ANALYZÁTOR VELIKOSTI ČÁSTIC	21
OBR. 12: SÍTOVÝ TŘÍDIČ	21
OBR. 13: ANALYZÁTOR VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ	22
OBR. 14: POROVNÁNÍ VSTUPNÍHO VZORKU S PRODUKTEM MLETÍ	22
OBR. 15: SROVNÁNÍ SLOŽENÍ VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH ZRN	22
OBR. 16: ZRNITOSTNÍ SLOŽENÍ VÝSLEDNÉHO PRODUKTU	23
OBR. 17: LINEÁRNÍ REGRESE RRB FUNKCE PRO VSTUPNÍ VZOREK A VÝSTUPNÍ PRODUKT	23
OBR. 18: ELEKTRICKÁ ENERGIE ODEBÍRANÁ MLÝNEM NAPRÁZDNO A PŘI MLETÍ VZORKU	24
OBR. 19: SPOTŘEBA PRÁCE DLE BONDA V ZÁVISLOSTI NA JEMNOSTI MLETÍ	25
OBR. 20: SPOTŘEBA PRÁCE DLE BOND WORK INDEX V ZÁVISLOSTI NA JEMNOSTI MLETÍ	25

SEZNAM TABULEK

TAB. 1: VELIKOST ZRN V PRODUKTECH [1]	7
TAB. 2: HODNOTY BONDOVY KONSTANTY A KONSTANTY BOND WORK INDEXU [2, 9]	19