Terenska mjerenja energije drobljenja

Petrović, Grgur

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:266166

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

TERENSKA MJERENJA ENERGIJE DROBLJENJA

Diplomski rad

Grgur Petrović

R-153

Zagreb, 2017

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

TERENSKA MJERENJA ENERGIJE DROBLJENJA

GRGUR PETROVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Ovaj rad prikazuje rezultate terenskog mjerenja energije drobljenja na eksploatacijskom polju „Očura“. Hipoteza rada je da smanjenjem veličine čestica raste energija potrebna za njihovo sitnjenje. Na separacijskom postrojenju eksploatacijskog polja „Očura“ uzorci su drobljeni u čeljusnoj (primarnoj), konusnoj (sekundarnoj) i udarnoj (tercijarnoj) drobilici. Pomoću mjernog sustava mjerena je potrošnja električne energije elektromotora prilikom drobljenja u pojedinim drobilicama. U čeljusnoj drobilici izdrobljeno je 16 pojedinačnih uzoraka te je određivana njihova specifična energija. U konusnoj i udarnoj drobilici izdrobljen je materijal iz čeljusne drobilice, ali odjednom. Uspoređivana je specifična energija drobljenja u čeljusnoj, konusnoj i udarnoj drobilici. Statističkom analizom utvrđivana je ovisnost između mase uzorka, specifičnoj energiji drobljenja, prosječnoj snazi drobljenja i maksimalnoj snazi tijekom drobljenja.

Ključne riječi: sitnjenje, drobljenje, čeljusna drobilica, konusna drobilica, udarna drobilica, specifična energija, energija drobljenja

Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 5 tablica, 26 slika i 14 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor, RGNF

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Tomislav Korman, docent, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor, RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, docent, RGNF
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, docent, RGNF

Datum obrane: 21.7.2017., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master`s Thesis

CRUSHING ENERGY MEASUREMENTS ON THE FIELD

GRGUR PETROVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of Mining and Geotechnical Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

This thesis shows the results of crushing energy measurements on the field on „Očura“ surface mine. The hypothesis of the thesis is that lowering the particle size raises the energy needed for their comminution. Samples of rock were crushed in jaw (primary), cone (secondary) and impact (tertiary) crushers on the „Očura“ processing plant. Electrical energy consumption of the crushers motor was measured with the measuring system during sample crushing. In the jaw crusher, 16 individual samples were crushed and their specific crushing energy was calculated. In the cone and impact crushers the material form the jaw crusher was crushed all at once. Specific crushing energy of jaw, cone and impact crushers was compared. Dependence between samples mass, specific crushing energy, average crushing power and maximum crushing power was determined by statiscial data processing.

Keywords: comminution, crushing, jaw crusher, cone crusher, impact crusher, specific energy, crushing energy

Thesis contains: 43 pages, 5 tables, 26 figures i 14 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Dr. sc. Gordan Bedeković, Full Professor, RGNF

Technical support and assistance: Dr. sc. Tomislav Korman, Assistant Professor, RGNF

Reviewers: Dr. sc. Gordan Bedeković, Full Professor, RGNF
Dr. sc. Tomislav Korman, Assistant Professor, RGNF
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, Assistant Professor, RGNF

Date of defense: July 21, 2017

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Dosadašnja istraživanja 2
3. Sitnjenje 2
3.1. Efikasnost procesa sitnjenja 6
3.2. Zakoni sitnjenja 8
4. Drobljenje 13
4.1. Primarne drobilice 15
4.1.1. Čeljusne drobilice 15
4.1.2. Kružne drobilice 20
4.1.3. Odabir primarne drobilice 20
4.2. Sekundarne i tercijarne drobilice 21
4.2.1. Konusne drobilice 21
4.2.2. Horizontalne udarne drobilice 22
5. Terensko ispitivanje 23
5.1. Lokacija 23
5.2. Oplemenjivanje na eksploatacijskom polju „Očura“ 23
5.2.1. Primarni dio separacije 24
5.2.2. Sekundarni dio separacije 24
5.2.3. Tercijarni dio separacije 24
5.2. Postupak mjerenja 25
5.3. Mjerenje potrošnje električne energije 27
5.3.1. Opis mjernog sustava 29
6. Rezultati 31
7. Diskusija rezultata 37
8. Zaključak 40
9. Literatura 42

Popis tablica

Tablica 3-1. Vrste deformacijskih mehanizama uređaja za sitnjenje (Salopek i Bedeković 2000) 3
Tablica 5-1. Težine odabranih uzoraka kamena 25
Tablica 5-2. Raspored ubacivanja uzoraka u čeljusnu drobilicu 26
Tablica 6-1. Energija, masa, specifična energija, vrijeme drobljenja, prosječna snaga, maksimalna snaga i prosječna vrijednost snage praznog hoda pojedinih uzoraka drobljenih na čeljusnoj drobilici 36
Tablica 7-1. Usporedba mase, ukupne energije, prosječne snage tijekom drobljenja, maksimalne snage, vremena i specifične energije između čeljusne, konusne i udarne drobilice 39

Popis slika

Slika 3-1. Dijagram ovisnosti loma o sili ovisno o korištenom mehanizmu sitnjenja (Herbst et al. 2003) 4
Slika 3-2. Efikasnost procesa drobljenja kao funkcija Poissonovog koeficijenta 7
Slika 4-1. ovisnost vjerojatnosti loma o početnoj veličini čestice i specifičnoj energiji drobljenja (Herbst et al. 2003) 14
Slika 4-2. Princip rada čeljusne drobilice tipa Blake (1) i Dodge (2) 16
Slika 4-3. Čeljusna drobilica tipa Blake s dvije raspone ploče (1 – osovina njihala, 2 – nepomična čeljust, 3 – pomična čeljust, 4 – osovina ekscentra, 5 – zamašnjak, 6 – glavna poluga, 7 – zatezna šipka, 8 – raspone ploče, 9 – opruga, 10 – klin za regulaciju izlaza) 17
Slika 4-4. Čeljusna drobilica tipa Blake s jednom rasponom pločom (1 –osovina njihala, 2 – nepomična čeljust, 3 – pomična čeljust, 4 – zamašnjak, 5 – raspona ploča, 6 – zatezna šipka, 7 – opruga, 8 – klin za regulaciju izlaza) 19
Slika 4-5.Konusna drobilica (1 – nepomični, fiksni konus, 2 – pomični konus, 3 – distribucijski tanjur, 4 – ulaz, 5 – izlaz, 6 – ekscentrična osovina, 7 – pogonska osovina) 21
Slika 4-6. Horizontalna udarna drobilica (1 – ulaz, 2 – kućište, 3 – postolje, 4 – izlaz, 5 – rotor, 6 – udarne grede, 7 – odbojne ploče, 8 – vijci za regulaciju otvora, 9 – odbojne ploče) 22
Slika 5-1. Segregacijska shema procesa separacije na eksploatacijskom polju „Očura“ 23
Slika 5-2. Vaganje i označavanje uzoraka na kamenolomu „Očura“ 25
Slika 5-3. Dijagram snaga/vrijeme 29
Slika 5-4. Električna shema mjerenja snage 30
Slika 5-5. Sučelje programa LabVIEW (lijevo – prednji panel, desno – blok dijagram) 30

Slika 6-1. Dijagram snaga-vrijeme za čeljusnu drobilicu s pripadajućim oznakama uzoraka 31
Slika 6-2. Dijagram snaga-vrijeme za konusnu drobilicu 32
Slika 6-3. Dijagram snaga – vrijeme za udarnu drobilicu 32
Slika 6-4. Dijagram snaga-vrijeme uzorka 2 iz čeljusne drobilice 33
Slika 6-5. Povećanje snage praznog hoda tijekom drobljenja uzoraka 34
Slika 6-6. Izračun energije drobljenja uzorka #2 35
Slika 7-1. Dijagram ovisnosti maksimalne snage tijekom drobljenja o masi uzoraka 37
Slika 7-2. Dijagram ovisnosti ukupne energije drobljenja pojedinih uzoraka o njihovoj masi 37
Slika 7-3. Dijagram ovisnosti prosječne snage tijekom drobljenja o masi uzorka 38
Slika 7-4. Dijagram ovisnost vremena drobljenja o masi uzorka 38
Slika 7-5. Dijagram ovisnosti specifične energije drobljenja o masi uzorka 40

Popis i oznake simbola

E	-	Youngov modul elastičnosti	N/m^2
G_{cr}	-	Kritično naprezanje	N/m^2
P_f	-	Opterećenje	N
$\sigma_{x,y,z}$	-	Naprezanja duž x, y i z osi	Pa
v	-	Poissonov koeficijent	-
s	-	Specifična površina	m^2/t
D	-	Promjer zrna	m
P_{80}	-	Veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine nakon sitnjenja	m
F_{80}	-	Veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine nakon sitnjenja	m
a	-	Duljina pukotine	mm
I	-	Jakost struje	A
C	-	Količina elektriciteta	C
U	-	Napon	V
P	-	Električna snaga	W
φ	-	Fazni pomak	°
S	-	Prividna snaga	W
Q	-	Jalova snaga	W
W	-	Energija drobljenja	kWs
P_{sr}	-	Snaga u praznom hodu	kW

1. Uvod

Prvi korak u procesu oplemenjivanja mineralnih sirovina najčešće je sitnjenje tj. proces smanjenja veličine mineralnog zrna koji zahtjeva primjenu vanjskih sila za sitnjenje mineralnih zrna. Cilj sitnjenja jest raščin komponenti mineralnog zrna, a provodi se u dvije faze - drobljenje i mljevenje. Drobljenje se odvija u drobilicama gnječenjem između dvaju čvrstih površina ili uslijed udara u čvrstu površinu ili drugo zrno. Na sitnjenje otpada oko 2% sve električne energije proizvedene na svijetu te oko 50% troškova električne energije nekog oplemenjivačkog postrojenja (Tromans 2007). Jedna od glavnih karakteristika sitnjenja je niska efikasnost tog procesa. Efikasnost drobljenja je između 2-3%, a mljevenja do 1% (Herbst et al. 2013). Tako niska efikasnost rezultat je velikih gubitaka energije tijekom procesa sitnjenja uslijed zagrijavanja, trenja, vibracija, deformacija zrna, itd. Prema Rittingeru (1867) specifična energija potrebna za sitnjenje proporcionalna je novostvorenim slobodnim površinama. Prema Kicku (1885), specifična energija je proporcionalna smanjenju promjera promatranih čestica. Prema Bondu (1952), specifična energija je obrnuto proporcionalna korijenu novostvorene površine.

Cilj rada je potvrditi hipotezu kako smanjenjem veličine čestica raste energija potrebna za njihovo sitnjenje, tj. najmanje čestice zahtijevaju najveću specifičnu energiju (energija/kg). Terensko ispitivanje provedeno je na kamenolomu tehničko građevnog kamena „Očura“. Sa deponija je odabran određen broj uzoraka koje su potom izdrobljeni na separacijskom postrojenju kamenoloma. Separacijsko postrojenje se sastoji od tri stupnja drobljenja. Primarno drobljenje odvija se u čeljusnoj drobilici, sekundarno u konusnoj drobilici i tercijarno u udarnoj drobilici. Za ispitivanje je odabrano 16 pojedinačnih uzoraka koji su prvo pojedinačno izdrobljeni u čeljusnoj drobilici. Zatim je ukupni izdrobljeni materijal (svih 16 uzoraka) izdrobljen u konusnoj, a nakon toga i u udarnoj drobilici. Pomoću mjernog sustava izmjerena je potrošnja električne energije tijekom drobljenja na svakoj od drobilica. Očekivani rezultat mjerenja je specifična energija drobljenja. Prema hipotezi rada, najmanja potrebna energija očekuje se na primarnom dijelu separacije a na tercijarnom najveća. Također, kod drobljenja u čeljusnoj drobilici, očekivano je da uzorci s najvećom masom imaju najmanju specifičnu energiju drobljenja.

2. Dosadašnja istraživanja

Korman et al. (2014) mjerili su specifičnu energiju drobljenja više vrsta stijena na laboratorijskoj čeljusnoj drobilici prilikom određivanja utjecaja fizičko mehaničkih svojstava stijene na potrošnju energije drobilice. Drobili su se uzorci dolomita, vapnenca i dijabaza sa različitih kamenoloma. Drobljeni uzorci imali su težine od 4,34 kg do 5,55 kg. Uzorci su drobljeni pojedinačno a nakon toga u grupama od po tri uzorka. Kada su uzorci drobljeni u grupama od tri uzorka ukupna masa uzoraka bila je od 5,91 kg do 8,12 kg. Specifična energija drobljenja dolomita bila je 1,16 kJ/kg kada se drobio po jedan uzorak te 1,09 kJ/kg kada se drobilo više uzoraka odjednom. Specifična energija drobljenja vapnenca bila je 1,65 kJ/kg odnosno 1,93 kJ/kg. Vrijeme drobljenja dolomita bilo je približno slično kod pojedinačnog drobljenja (15,47 s) i drobljenja više uzoraka odjednom (17,07 s). Tosun i Konak (2014) mjerili su potrošnju energije čeljusne drobilice pri drobljenju vapnenca. Specifična energija drobljenja vapnenca iznosila je između 1,012 i 3,438 kJ/kg. U istraživanju Workman i Eloranta (2004) istražena je specifična potrošnja energije različitih stupnjeva sitnjenja u separacijskom procesu. Miniranje je imalo specifičnu potrošnju od 0,24 kWh/t. Primarno drobljenje sa stupnjem sitnjenja od 4:1 je imalo specifičnu potrošnju od 0,23 kWh/t. Sekundarno drobljenje sa stupnjem sitnjenja od 5:1 je imalo specifičnu potrošnju od 0,61 kWh/t. Mljevenje je pri stupnju sitnjenja od 360:1 imalo specifičnu potrošnju od 19,35 kWh/t. Samim time, pokazalo se da sa smanjenjem veličine zrna raste specifična energija potrebna za njegovo daljnje drobljenje, a značajno raste u procesu mljevenja gdje se veličina zrna značajno smanjuje (približava kristalnoj rešetci).

3. Sitnjenje

Sitnjenje je proces smanjenja veličine mineralnog zrna (Dryzmala 2007). Pomoću njega mijenjamo disperzno stanje čvrstih tvari, koje je određeno granulometrijskim sastavom (Salopek i Bedeković 2000). Proces sitnjenja zahtjeva primjenu vanjskih sila, a postoji mehaničko i kemijsko sitnjenje. Mehaničko sitnjenje obuhvaća primjenu udara, gnječenja, abrazije, rezanja, lomljenja, kidanja, itd. U pojedinom uređaju za sitnjenje (drobilica ili mlin) do sitnjenja dolazi uslijed više prethodno navedenih mehanizama od kojih je jedan

prevladavajući dok su ostali podređeni. Sitnjenju se podvrgava ruda (stijena) koja sadrži korisnu i nekorisnu komponentu u određenim omjerima. Cilj sitnjenja je oslobađanje odnosno raščin komponenti sirovine/mineralnog zrna, što je priprema za njihovu separaciju u daljnim procesima oplemenjivanja (koncentracija). Raščin može biti potpun ili nepotpun; ukoliko je nepotpun, dobiva se međuprodukt koji sadrži obje komponente u različitim omjerima. (Dryzmala 2007).

Sitnjenje se obično provodi u dvije faze, od kojih je prva faza drobljenje, a druga mljevenje. Kod drobljenja, zrno se sitni uslijed gnječenja između dviju čvrstih površina (sporo nanošenje sile) ili uslijed udara u čvrstu površinu ili drugo zrno (brzo nanošenje sile). Kod mljevenja, zrno se sitni uslijed abrazije i udara pod djelovanjem drobećih tijela (kugle, štapovi) koja se kreću u prostoru za drobljenje (Tablica 3-1.). (Salopek i Bedeković 2000).

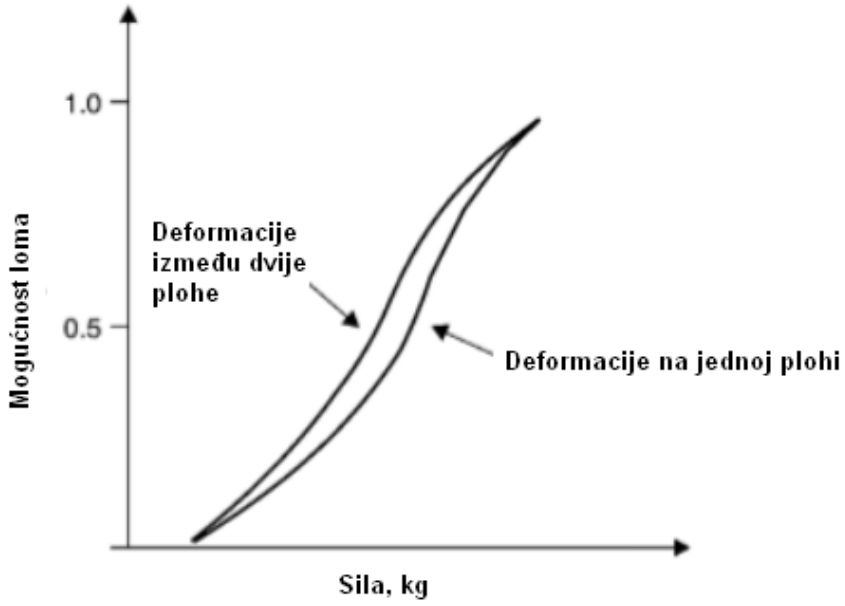
Tablica 3-1. *Vrste deformacijskih mehanizama uređaja za sitnjenje (Salopek i Bedeković 2000)*

Deformacija	Sila	Brzina	Uređaj
Deformacije između dvije plohe	Pritisak	5 m/s	Čeljusna drobilica
	Normalno naprezanje		
	Smicanje		
	Tangencijalno naprezanje	10 m/s	Drobilica s valjcima Mlin za rezanje
	Rezanje		
Deformacije na jednoj plohi	Udar	50 m/s	Udarna drobilica Drobilica čekićara
Deformacija u mediju	Udar	200 m/s	Mlinovi na zračni mlaz
	Smicanje		

Procjenjuje se kako se na sitnjenje minerala utroši oko 2% sve električne energije proizvedene u svijetu. Jedan od najvećih izazova u procesu oplemenjivanja je efikasan dizajn procesa sitnjenja. To je zato jer na sitnjenje otpada oko 50% troškova električne energije nekog postrojenja. (Herbst et al. 2003)

Sitnjenje se može obaviti drobljenjem ili mljevenjem. Razlika u ta dva procesa je u promjeru zrna koji u njima sudjeluju. Drobljenje se izvodi na materijalu promjera zrna obično iznad otprilike 50 mm, a mljevenje na materijalu s promjerom zrna obično ispod otprilike 50 mm. (Dryzmala 2007)

Kako bi se usitnilo mineralno zrno, potrebno je djelovanje jedne ili više sila. Kod korištenja slabe sile, rezultat je deformacija zrna i pojava naprezanja. Naprezanje je proporcionalno sili, a obrnuto proporcionalno poprečnom presjeku materijala. Naprezanje uzrokuje rastezanje kristalne rešetke što potom uzrokuje pojavu vlačnih sila u materijalu. Povećavanje sile dovodi do prijenosa veće količine energije na čestice sve dok naprezanje ne nadvlada kohezivne sile unutar materijala. To vodi do prekida veza unutar čestice i razaranju (sitnjenju) čestice. (Dryzmala 2007)



Slika 3-1. *Dijagram ovisnosti loma o sili ovisno o korištenom mehanizmu sitnjenja (Herbst et al. 2003)*

Sila potrebna kako bi došlo do loma nekog materijala može se izračunati prema donjem izrazu (Hookov zakon):

$$F_{cr} = E \cdot S \cdot \Delta \frac{l_{cr}}{l_o} \tag{3-1}$$

gdje je:

E – Youngov modul elastičnosti (N/m^2)

S – poprečni presjek uzorka (m^2)

l_{cr} – povećanje ili smanjenje duljine materijala (m)

l_o – početna duljina uzorka (m)

Po Hookovom zakonu za opis loma materijala potrebna su minimalno dva parametra – Youngov modul elastičnosti E i karakteristična promjena duljine l_{cr}. Uslijed nesavršenosti materijala, Youngov modul može varirati za različite uzorke istog materijala. Na lomljivost uzorka značajno utječu pukotine, mikrofrakture, i ostale nesavršenosti koje smanjuju čvrstoću materijala. Hookov zakon može se napisati i u skraćenom obliku:

$$F_{cr} = G_{cr} \cdot S \tag{3-2}$$

gdje je:

G_{cr} - kritično naprezanje ili Griffithovo (1921) naprezanje (N/m^2)

S - površina poprečnog presjeka uzorka (m^2)

3.1. Efikasnost procesa sitnjenja

Jedna od glavnih karakteristika sitnjenja je niska efikasnost. Općenito, efikasnost se definira kao omjer idealnog i realnog ponašanja nekog procesa ili sustava (Legendre 2014). Energetska efikasnost procesa sitnjenja može se definirati kao odnos promjene površinske energije i mehaničkog energetskog unosa. Efikasnost mljevenja je na između 1 i 2%, a drobljenja od 2 do 3%. (Tromans 2007). Prilikom procesa sitnjenja, dolazi do velikih gubitaka energije koji proizlaze od nasumične primjene sila unutar uređaja i između susjednih čestica. U procesu sitnjenja energija se troši na:

- stvaranje elastičnih deformacija prije stvaranja loma
- stvaranje neelastičnih deformacija koje rezultiraju sitnjenjem (lomom zrna)
- uzrokovanje elastičnih deformacija uređaja za sitnjenje
- trenje između čestica te između čestica i uređaja
- stvaranje topline, buke i vibracija. (Legendre 2014)

Zbog nasumičnog djelovanja sila na čestice u uređaju, nemoguće je postići 100%-tnu efikasnost. Prema Tromansu (2008), maksimalna teoretska energetska efikasnost u uvjetima drobljenja tlakom varira između 5% i 10%. On je definirao maksimalnu limitirajuću efikasnost na temelju tlačnog drobljenja čestice. Tlak dovodi do raspoređivanja naprezanja u čestici kao posljedica defekta/pukotine u sredini čestice. U ovom slučaju, maksimalna efikasnost, η_{limit}, predstavlja razliku između energije naprezanja po jedinici volumena savršene sferične čestice i energije naprezanja po jedinici volumena iste čestice s jednim defektom odnosno pukotinom, prilikom tlačnog naprezanja. Izraz je pomnožen sa 66%, što predstavlja omjer elipsoida naprezanja oko centralne pukotine i cilindra koji opisuje taj elipsoid:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{P_f}{\pi D^2}\left(\frac{3}{\sqrt{2}}(1-2\upsilon)\left(\frac{2}{\sqrt{2}+1}\right)\right);\ \sigma_z = -\frac{P_f}{\pi D^2}\left(12-\frac{3}{\sqrt{2}}\right) \tag{3-3}$$

$$\eta_{LIMIT} = \left[\frac{\sigma_x^2 - 2\upsilon\left(\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z\right)}{\left(\sigma_x^2+\sigma_y^2+\sigma_z^2\right) - 2\upsilon\left(\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z\right)}\right] \times 66\% \tag{3-4}$$

gdje je:

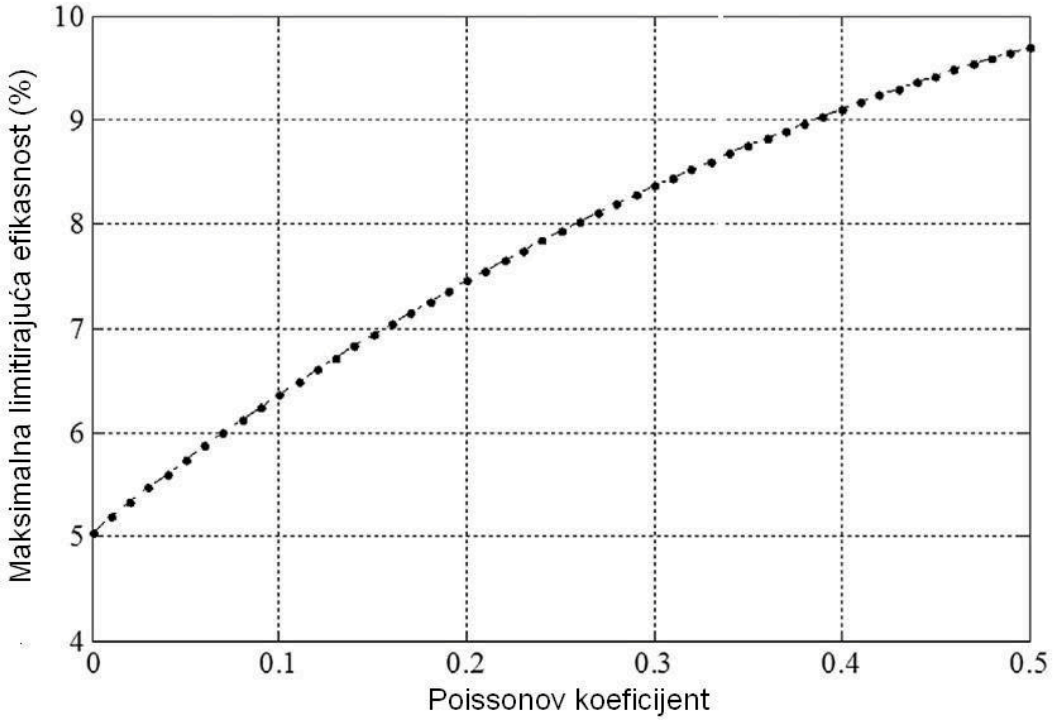
P_f – opterećenje (N)

D – promjer čestice (m)

$\sigma_{x,y,z}$ – naprezanja duž x, y i z osi (Pa)

v – Poissonov koeficijent

Po Tromansu, efikasnost je funkcija Poissonovog koeficijenta određenog materijala (Slika 3-2.). U praksi, efikasnost će uvijek biti manja od tih postotaka. (Tromans 2007)



Slika 3-2. *Efikasnost procesa drobljenja kao funkcija Poissonovog koeficijenta*

Mala energetska učinkovitost posljedica je načina nanošenja naprezanja. Naprezanje se nanosi na cjelokupni volumen materijala u uređaju za sitnjenje. Velik dio energije troši se na plastične deformacije, a dio te energije akumulira se u novonastalim defektima, pogotovo u slojevima blizu površine zrna. Formiranje plastične zone ispred pukotine koja se širi čini pukotinu stabilnom i zrno otpornim na drobljenje. Najkritičniji gubitak energije nastaje uslijed

trenja između novostvorenih zrna međusobno i tih istih zrna s kuglama i oblogom mlina prilikom mljevenja. (Salopek i Bedeković 2000).

U istraživanju Korman et al. (2014), istraživan je utjecaj različitih fizičko mehaničkih svojstava stijena na specifičnu energiju drobilice. Specifična energija drobilice dobivena je kao razlika potrošnje energije pri drobljenju i potrošnje energije u praznom hodu. Istraživanje je pokazalo kako povećanje mase materijala koji se drobi nema značajan utjecaj na specifičnu energiju. Zaključeno je kako energija potrebna za drobljenje ovisi o fizikalno mehaničkim svojstvima stijene, i to najviše tlačna čvrstoća, a nešto manje žilavost i vlačna čvrstoća. Tvrdoća je imala veoma malen utjecaj.

3.2. Zakoni sitnjenja

Rittinger (1867) je definirao zakon sitnjenja u kojemu je energija potrebna za sitnjenje proporcionalna novostvorenim slobodnim površinama:

$$E_s = K_r \cdot (s - s_0) \tag{3-5}$$

gdje je:

E_s – specifična potrošnja energije (kWh/t),

K_r – konstanta proporcionalnosti koja predstavlja energiju potrebnu za stvaranje 1 m^2 nove površine (kWh/m^2)

s – specifična površina sirovine nakon sitnjenja (m^2/t)

s_0 – specifična površina sirovine prije sitnjenja (m^2/t)

Specifična površina obrnuto je proporcionalna veličini čestice. Rittingerov zakon može se napisati i u drugom obliku:

$$E_s = C_R \cdot \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1}\right) \tag{3-6}$$

gdje je:

C_R – konstanta proporcionalnosti ovisna o mehaničkim značajkama sirovine, odgovara $6K_r/\rho$ (kWh · m/t)

D_1 – srednja veličina zrna prije sitnjenja (m)

D_2 – srednja veličina zrna poslije sitnjenja (m)

Kick (1885) je nedugo zatim predložio novu teoriju koja govori kako je specifična potrošnja energije tijekom sitnjenja proporcionalna smanjenju promjera čestica:

$$E_s = C_k \cdot \log\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \tag{3-7}$$

gdje je:

E_s – specifična potrošnja energije (kWh/t)

C_k – konstanta proporcionalnosti ovisna o mehaničkim značajkama sirovine (kWh/t)

D_1 – srednja veličina zrna prije sitnjenja (m)

D_2 – srednja veličina zrna nakon sitnjenja (m)

Bond je 1952. predložio treći zakon koji kaže kako je energija potrebna za sitnjenje obrnuto proporcionalna kvadratnom korijenu novostvorenih površina:

$$E_s = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \tag{3-8}$$

gdje je:

E_s – specifična potrošnja energije (kWh/t)

C_B – konstanta proporcionalnosti (kWh/t)

P_{80} – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80% sirovine nakon sitnjenja (m)

F_{80} – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80% sirovine prije sitnjenja (m) (Dryzmala 2007)

Primjena pojedine teorije ovisna je o veličini čestica koje se sitne. Kickova jednadžba primjerena je za drobljenje, Rittingerova za fino mljevenje, a Bondova za mljevenje. (Janković et al. 2010)

Čvrstoća određene čestice je naprezanje u točki loma. Čvrstoća je sila po jedinici površine poprečnog presjeka čestice u točci loma, a energija loma je rad koji mora biti obavljen na čestici kako bi došlo do loma. Stvarna čvrstoća materijala mnogo je manja od njegove teoretske čvrstoće. Teoretski model pretpostavlja da je materijal homogen i neoštećen. U pravom, „realnom“ materijalu uvijek postoje razne nesavršenosti (defekti) koji znatno utječu na njegovu čvrstoću (smanjuju je). Lom materijala odvija se procesom stvaranja i produljenja pukotina. Energija koja se koristi prilikom sitnjenja troši se na produljenje (širenje) tih pukotina. Dio te energije troši se na stvaranje novih površina i na stvaranje plastičnih deformacija materijala.

Kako bi se pukotina širila moraju se zadovoljiti dva uvjeta: uvjet sile i uvjet energije. Uvjet sile je da vlačno naprezanje mora prevladati molekularnu čvrstoću na vrhu pukotine. Naprezanje na vrhu je:

$$\sigma_{max} = \sigma_{\infty} \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \tag{3-9}$$

gdje je:

σ_{max} – naprezanje na vrhu pukotine (Pa)

σ_{∞} – naprezanje na ostatku čestice (Pa)

a – duljina pukotine (m)

ρ – radijus pukotine na vrhu

Maksimalno naprezanje na vrhu pukotine znatno je veće od prosječnog naprezanja na ostatku čestice. Kada se formira pukotina, energija njezinog produženja mora biti dostupna iz polja naprezanja okoline pukotine. Gubitak energije iz polja naprezanja (G), zbog širenja pukotine, jest energija produljenja pukotine duljine 2a:

$$G = \frac{-1}{2} \cdot \frac{\delta_u}{\delta_a} \tag{3-10}$$

gdje je:

δ_u – energija potrošena na pukotinu, jednaka $\beta 4\delta_a$ (J)

U ovom slučaju, kako bi se pukotina dalje širila energija produljenja pukotine (G) mora prijeći specifičnu energiju loma. To zahtjeva:

$$\beta < \frac{1}{4} \cdot \frac{\delta_u}{\delta_a} = \frac{1}{2} G \tag{3-11}$$

gdje je:

β – specifična površinska energija pukotine (potrošnja energije po jedinici površine od strane pukotine) (J/m^2)

Tek pola ili manje od pola energije iz polja naprezanja dostupno je za rad (stvaranje novih površina, plastične deformacije pri vrhu pukotine). Energija produljenja pukotine (G) se može povezati s geometrijom uzorka sljedećom vezom:

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma_\infty \cdot a}{E} \cdot (1 - \upsilon^2) \tag{3-12}$$

gdje je:

E – Youngov modul elastičnosti (N/m^2)

σ_∞ – naprezanje (N/m^2)

v – Poissonov koeficijent

Ukoliko je naprezanje konstantno, energija produljenja pukotine (G) povećava se s povećanjem duljine pukotine a. Samim time, energija iz polja naprezanja uvijek se povećava. Ako je specifična površinska energija pukotine (β) konstantna ili se povećava sporije od G, uvjet energije $\beta=G/2$ uvijek vrijedi teće se pukotina povećavati (širiti) jednom kad je nastala. (Herbst et al. 2003)

Dvije osnovne vrste opterećenja kojima se podvrgavaju čestice u uređajima za sitnjenje su jednostrano i dvostrano opterećenje. Dvostrano opterećenje naziva se još i tlačno opterećenje. Kod takvog opterećenja, naprezanja najbliža kontaktnoj površini najvažnija su za stvaranje pukotina. Ta vrsta pukotina nastaje kada je kontaktno vrijeme sile veće od vremena putovanja elastičnog vala kroz česticu. Kod većine uređaja za sitnjenje, kontaktno je vrijeme znatno veće od vremena putovanja vala. (Herbst et al. 2003)

4. Drobljenje

Tlačno drobljenje zbiva se između dvije površine. Drobilice koje koriste ovu metodu su kružne drobilice i čeljusne drobilice s dvije raspone ploče. Čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom uz tlak koriste i abraziju te su samim time manje korisne za abrazivni materijal zbog trošenja obloga čeljusti. Tlačno drobljenje koristi se:

- kada je materijal tvrd i čvrst
- kada je materijal abrazivan
- kod neljepljivog materijala
- kada je poželjan minimalan udio sitnih čestica
- kada je poželjan kubični oblik zrna.

Drobljenje udarom zbiva se odbacivanjem materijala na drugi materijal (prilikom čega se oba objekta miču) ili čvrstu površinu (pri čemu je jedan objekt (obično površina uređaja) nepomičan). Postoje dva mehanizma udara: gravitacijski udar i dinamički udar. Drobljenje udarom koristi se:

- kada je poželjan kubični oblik zrna
- kada produkt mora biti dobro graduiran
- kada je materijal pretvrd i abrazivan za drobilice čekićare, ali gdje se ne mogu koristiti kružne ili čeljusne drobilice (zbog visokog sadržaja vlage, zbog kapaciteta ili zahtjeva oblika zrna).

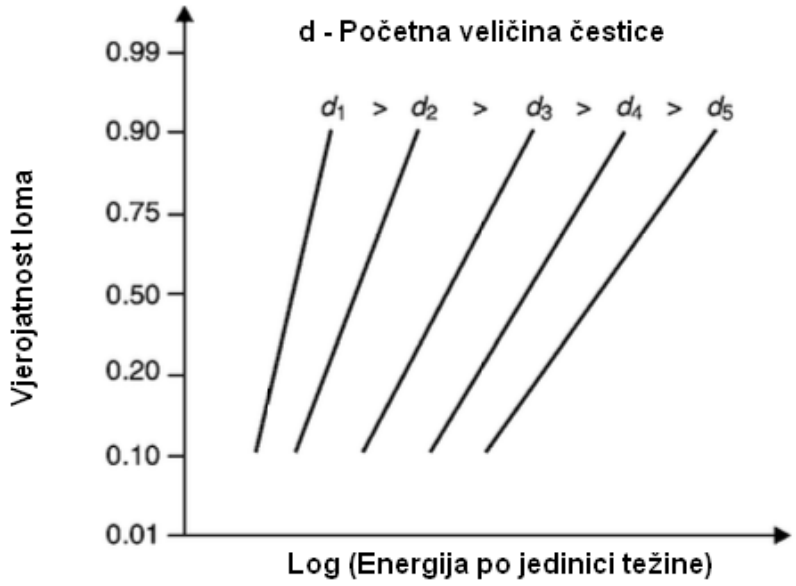
Drobljenje abrazijom odnosi se na sitnjenje materijala pomoću trenja između dvije tvrde površine. Uz tlačno drobljenje, čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom koriste i abrazivno drobljenje zbog ekscentrične putanje donjeg dijela pomične čeljusti. Drobljenje abrazijom se koristi:

- kada materijal nije abrazivan
- kada je poželjan velik udio sitnih čestica

Drobljenje smicanjem koristi mehanizme kidanja i savijanja. Kod većine stijena je odnos tlačne čvrstoće i posmične čvrstoće 10:1. Drobljenje smicanjem koristi se:

- kod materijala koji je lomljiv i ima nizak udio SiO_2
- kod materijala niske/srednje tvrdoće
- za primarno drobljenje stupnja sitnjenja od 6 do 1
- kada je potreban minimalan udio sitnih čestica (Major 2002)

Vjerojatnost loma čestice veoma je osjetljiva na veličinu čestice (Slika 4-1.). Glavni je razlog smanjenje broja defekata strukture zrna sa smanjenjem veličine zrna. Kod većih zrna, većina zrna ima bar jedan ili više značajnih defekata pa će samim time čvrstoća zrna biti slična. Kod manjih čestica defekti će biti nejednako raspoređeni te će čvrstoće čestica biti različite. (Herbst et al. 2003)



Slika 4-1. *Ovisnost vjerojatnosti loma o početnoj veličini čestice i specifičnoj energiji drobljenja (Herbst et al. 2003)*

Drobljenje je prva faza u sitnjenju. Ono se obično provodi suhim načinom, u dva do tri stupnja. Treći stupanj koristi se rjeđe i to kada je ruda iznimno čvrsta i žilava, ili kada je poželjno prekomjerno stvaranje sitnih čestica. U prvom stupnju drobljenja komadi rude i veći od 1500 mm mogu se usitniti na veličinu od 100 do 200 mm, a u drugom na veličinu približno od 5 do 20 mm. Za razliku od drobljenja, mljevenje je uglavnom mokar proces, no može biti i suh (mljevenje cementa, ugljena, pigmenata itd.). Glavna razlika između drobljenja i

mljevenja je u veličini čestica. Mljevenje je završna faza sitnjenja, gdje se zrna veličine od 5 do 250 mm sitne do veličine od 0,3 do 0,01 mm. Budući da je za sitnjenje manjih zrna potrebno više energije (zbog manjeg udjela defekata u zrnu), troškovi drobljenja približno su 50% niži od troškova mljevenja (Salopek i Bedeković 2000). Uređaj za sitnjenje radi najefikasnije unutar određenog stupnja sitnjenja. To je odnos veličine ulaznog i izlaznog zrna pri drobljenju, gdje je veličina definirana kao veličina otvora sita kroz koje prolazi 80% materijala. Stupanj sitnjenja varira od 3:1 do 20:1, a većina uređaja za sitnjenje ima stupanj sitnjenja od 4:1 do 8:1. Proces sitnjenja provodi se u više drobilica, sukcesivno od najvećeg prema najmanjem promjeru zrna, u primarnim, sekundarnim i tercijarnim drobilicama, od kojih svaka ima svoj stupanj sitnjenja i s odgovarajućem udjelu sudjeluje u ukupnom stupnju cjelokupnog procesa .

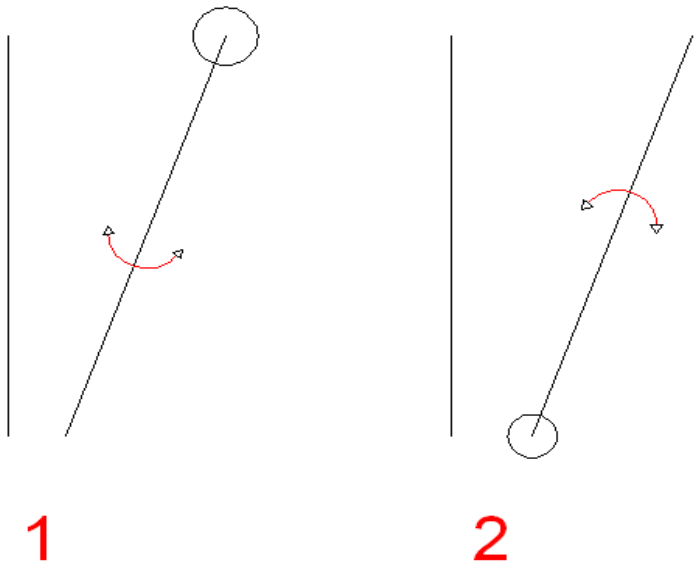
4.1. Primarne drobilice

Primarne drobilice su drobilice koje se koriste na početku procesa sitnjenja. U njih ulaze komadi rude dimenzija većih od 150 mm, a drobe se na veličinu koja omogućuje transport i ulaz za sekundarne drobilice i/ili mlinove. Kao primarne drobilice najčešće se koriste čeljusne i kružne drobilice. U ovom radu terenska mjerenja obavljena su na eksploatacijskom polju „Očura“. Primarna drobilica u separacijskom postrojenju kamenoloma „Očura“ je čeljusna drobilica s jednom rasponom pločom. U ovom poglavlju, uz takvu čeljusnu drobilicu, opisana je i drobilica s dvije raspone ploče zbog njihovih konstrukcijskih sličnosti i kako bi se istakle razlike.

4.1.1. Čeljusne drobilice

Osnovna konstrukcija i princip rada današnjih čeljusnih drobilica vuče korijene iz Blakeove drobilice koja je patentirana 1858. od strane E.W.Blakea. Blakeova drobilica sastoji se od dvije čeljusti; jedne nepomične i jedne pomične, između kojih se drobi tj. stini stijena. Čeljusne drobilice dijele se po metodi zakretanja pomične čeljusti. U drobilici tipa *Blake* (Slika 4-2., 1), pomična se čeljust zakreće na gornjem dijelu. Samim time ima konstantnu veličinu ulaza, a veličina izlaza varira tijekom rada drobilice, pri čemu se za veličinu izlaza smatra veličina pri maksimalnoj udaljenosti pomične od nepomične čeljusti. U drobilici tipa *Dodge* (Slika 4-2., 2) pomična čeljust se zakreće na donjem dijelu. Kod nje je izlaz

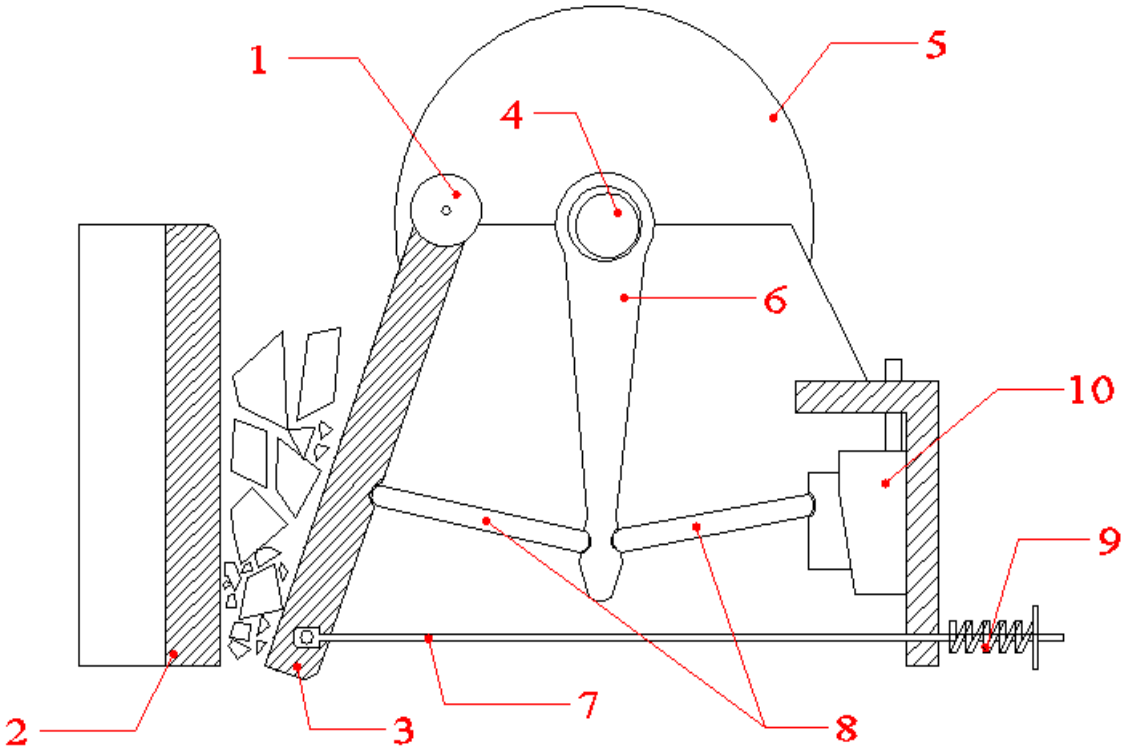
konstantan, a veličina ulaza može se varirati. Na većim postrojenjima gotovo se isključivo koriste drobilice tipa *Blake.*



Slika 4-2. *Princip rada čeljusne drobilice tipa Blake (1) i Dodge (2)*

Blake drobilice dijele se na osnovu konstruktivnih karakteristika, tj. prema broju rasponih ploča. Postoje drobilice s jednom te s dvije raspone ploče. (Wills 2016)

Kod drobilica s dvije raspone ploče (Slika 4-2.), pokretna se čeljust pokreće pomoću vertikalnog kretanja glavne poluge (Slika 4-3., poz. 6), koja se kreće gore-dolje uslijed zakretanja ekscentra (poz. 4). Stražnja raspona ploča (poz. 8 desno) tjera glavnu polugu na kretanje postrance prilikom gornjeg dijela pokreta. Pokret se prenosi na prednju rasponu ploču (poz. 8 lijevo), koja uzrokuje približavanje pomične čeljusti (2) prema nepomičnoj (poz. 3), na minimalnu udaljenost. Kretanje glavne poluge u donjem smjeru rezultira otvaranjem čeljusti. (Wills 2016)



Slika 4-3. *Čeljusna drobilica tipa Blake s dvije raspone ploče (1 – osovina njihala, 2 – nepomična čeljust, 3 – pomična čeljust, 4 – osovina ekscentra, 5 – zamašnjak, 6 – glavna poluga, 7 – zatezna šipka, 8 – raspone ploče, 9 – opruga, 10 – klin za regulaciju izlaza)*

Budući da je pomična čeljust ovješena za osovinu (poz. 1) u gornjem dijelu drobilice, kreće se minimalno u gornjem dijelu, te maksimalno u donjem dijelu prostora drobljenja kod ispusta materijala. Karakteristika svih čeljusnih drobilica je par velikih zamašnjaka (poz. 5). Zamašnjak je nužan za pohranu energije u praznom hodu drobilice, koju predaje u radnom dijelu ciklusa drobljenja. Čeljusne drobilice s dvije raspone ploče obično su korištene za čvrste, tvrde i abrazivne materijale (Wills 2016). Njezine prednosti nad ostalim tipovima drobilica:

- manji troškovi od kružne drobilice
- podnosi abrazivne materijale uz niske troškove održavanja
- podnosi tvrde materijale.

Glavni nedostaci:

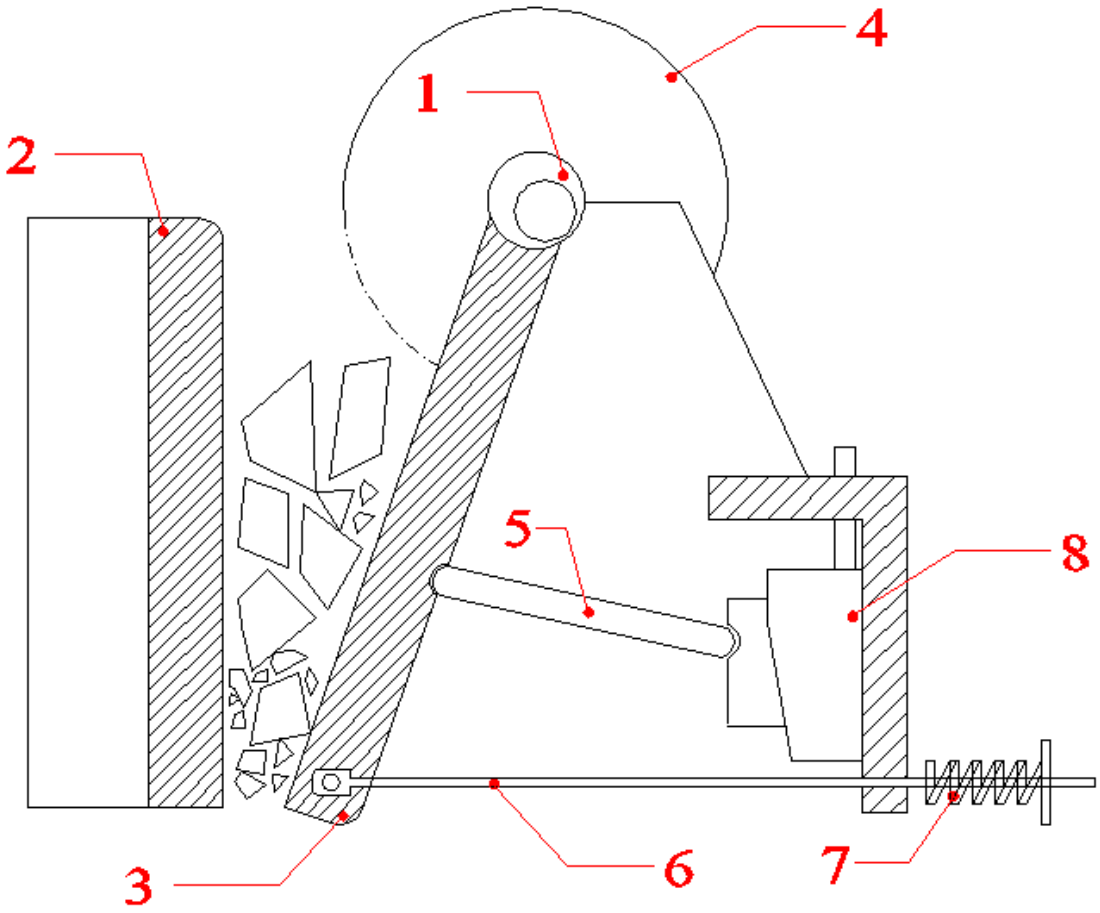
- ograničen kapacitet kao i kod čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom
- veći troškovi nego kod čeljusnih s jednom rasponom pločom
- isto ograničenje pri izboru veličine kao i kod čeljusnih s jednom rasponom pločom (Major 2002)

Čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom (slika 4-4.) koriste se za drobljenje stijena čvrstoće do 200 MPa. Kod njih je pomična čeljust (poz. 3) ovješena o ekscentrično vratilo (poz. 1). Uz to što se pomična čeljust primiče prema nepomičnoj (poz. 2) pod utjecajem raspone ploče (poz. 5), kreće se i vertikalno uslijed rotacije ekscentričnog vratila (poz. 1). Takvo eliptično kretanje pomične čeljusti pomaže pri guranju materijala iz komore za drobljenje, ali i povećava trošenje čeljusnih obloga (Wills 2016). Njezine glavne prednosti su:

- manji troškovi od čeljusnih drobilica s dvije raspone ploče
- manja potrošnja energije od drobilica s dvije raspone ploče
- podnosi ljepljive materijale lakše od drobilica s dvije raspone ploče ili kružnih drobilica.

Glavni nedostaci su:

- upotreba samo za srednje tvrde ili mekše materijale
- slabije podnosi abrazivne materijale od drobilice s dvije raspone ploče
- zahtjeva dozator



Slika 4-4. *Čeljusna drobilica tipa Blake s jednom rasponom pločom (1 –osovina njihala, 2 – nepomična čeljust, 3 – pomična čeljust, 4 – zamašnjak, 5 – raspona ploča, 6 – zatezna šipka, 7 – opruga, 8 – klin za regulaciju izlaza)*

Brzina gibanja pomične čeljusti čeljusnih drobilica varira, ali općenito je obrnuto proporcionalna veličini drobilice. Gibanje pomične čeljusti obično je u rasponu od 100 do 350 okretaja u minuti. Pri određivanju brzine potrebno je materijalu dati vremena da „klizne“ niz drobilicu. Maksimalna amplituda pokreta pomične čeljusti određena je tipom i veličinom drobilice, a varira se ovisno o vrsti materijala koji se drobi. Varira od 1 do 7 cm, ovisno o veličini uređaja. Najviša je za čvrste, plastične materijale, a najniža za tvrde, krte. Što je veća amplituda to je manja opasnost od „zapinjanja“ materijala, međutim također se proizvodi i veća količina sitnih čestica. Također, veća amplituda više troši sam uređaj (Wills 2016). Stupanj sitnjenja je između 4:1 i 6:1. Veličina produkta određena je širinom izlaza u trenutku

kada je pokretna čeljust maksimalno udaljena od nepomične. Najčešće se koriste kao primarne drobilice. (Smith et al. 2001)

4.1.2. Kružne drobilice

Kružna drobilica je u principu čeljusna drobilica, „“simetrično omotana oko vertikalne osi“ koja prolazi kroz pokretnu čeljust. Ona se sastoji od centralne ekscentrične osovine, koja nosi konusnu glavu koja se kreće i koja izvodi drobljenje. Osovina je s gornje strane slobodno ovješena te rotira brzinom obično između 85 i 150 okretaja u minuti. Prilikom rotacije opisuje konusnu putanju unutar fiksnog stošca. Kao u čeljusnoj drobilici, najveće kretanje glave izvodi se kod ispusta. Drobljenje se izvodi prilikom približavanja unutarnjeg stošca vanjskom.

Kod kružne drobilice, u bilo kojem poprečnom presjeku, u svakom su trenutku dvije „čeljusti“ koje se ili zatvaraju ili otvaraju, kao i kod čeljusne drobilice. Iz razloga što za razliku od čeljusne drobilice, kružna radi bez praznog hoda, time ima veći kapacitet za istu veličinu ulaza od čeljusne drobilice (otprilike od 2,5 do 3 puta), te je obično favorizirana u postrojenjima velikih kapaciteta (>900 t/h drobljenog materijala) (Wills 2016). Stupanj sitnjenja je između 4:1 do 6:1. (Smith et al. 2001)

Glavne prednosti kružnih drobilica:

- ne mogu se začepiti
- nema prazan hod (2,5 – 3 puta veći kapacitet od čeljusne pri istom izlaznom otvoru)
- manji utrošak energije po toni izdrobljenog materijala
- može primiti veće komade čvrstog i abrazivnog materijala
- ujednačeniji granulometrijski sastav izdrobljenog materijala
- pravilniji (kubični) oblik zrna. (Major 2002)

4.1.3. Odabir primarne drobilice

Glavni faktor kod odabira primarne drobilice jest veličina ulazne rude i kapacitet. Kada je potreban velik kapacitet, generalno se koriste kružne drobilice. Čeljusne drobilice više se koriste u slučajevima gdje je veličina rude bitnija od kapaciteta. Ukoliko je potrebno drobiti materijal određene veličine, utoliko kružna drobilica s odgovarajućim promjerom ima kapacitet otprilike 3 puta veći od čeljusne drobilice s istom veličinom ulaza. Međutim, ako

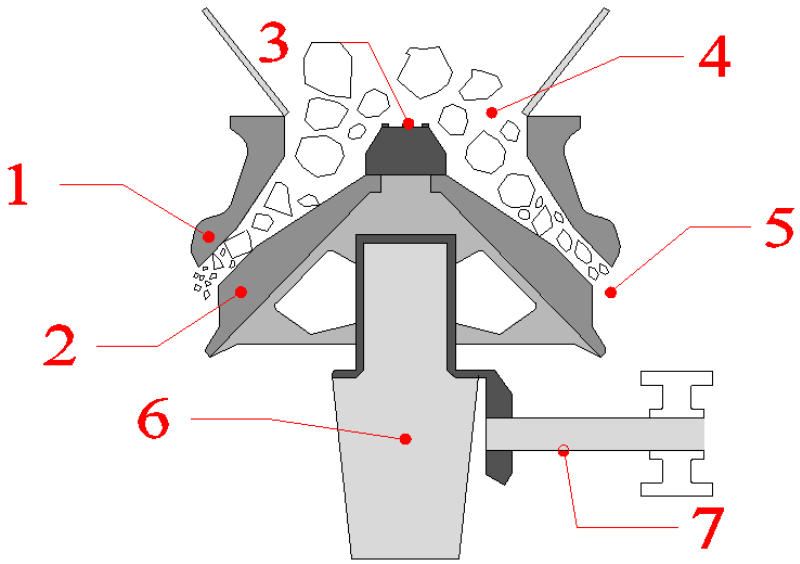
nije potreban velik kapacitet, odabir čeljusne drobilice bit će ekonomičniji zbog manje veličine uređaja i jer bi kružna drobilica većinom radila na prazno. Cijene održavanja nešto su niže za čeljusnu, dok su cijene postavljanja niže za kružne. (Wills 2016)

4.2. Sekundarne i tercijarne drobilice

Na eksploatacijskom polju „Očura“, kao sekundarna drobilica koristi se konusna („Symons“) drobilica. Kao tercijarna drobilica koristi se horizontalna udarna drobilica.

4.2.1. Konusne drobilice

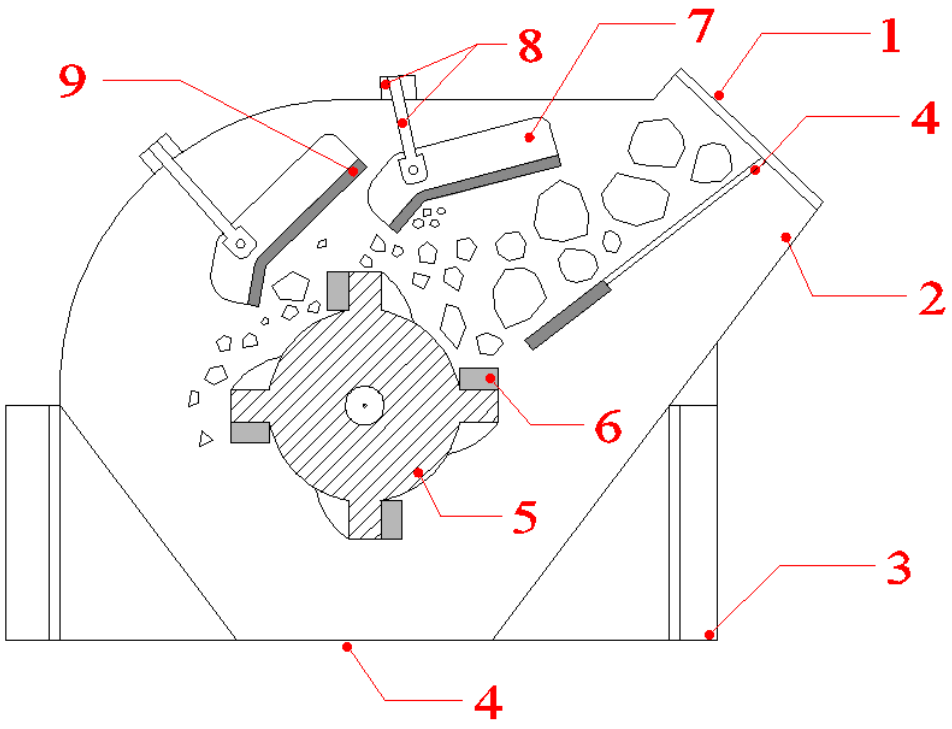
Konusna drobilica jest modificirana kružna drobilica. Koristi se najčešće kao sekundarna drobilica. Glavna razlika je da centralna osovina nije ovješena, već stoji u ležaju ispod pokretne glave (konusa) (Wills 2016). Ugao konusa je kod konusnih drobilica blaži nego kod kružnih. Također, približno¼ vanjskog konusa paralelno je s unutarnjim. Blaža kosina konusa služi kako bi se materijal dulje zadržao između površina drobljenja i samim time dobio što sitniji izlazni materijal (Gupta i Yan 2016). Stupanj sitnjenja je između 4:1 i 8:1. (Smith et al. 2001)



Slika 4-5.*Konusna drobilica (1 – nepomični, fiksni konus, 2 – pomični konus, 3 – distribucijski tanjur, 4 – ulaz, 5 – izlaz, 6 – ekscentrična osovina, 7 – pogonska osovina)*

4.2.2. Horizontalne udarne drobilice

Kod horizontalnih udarnih drobilica (HSI), materijal pada kroz ulaz na rotor koji rotira brzinom od 250 do 500 okretaja u minuti. Rotor s udarnim gredama odbacuje materijal prema odbojnim pločama postavljenim iznad rotora. Do sitnjenja dolazi uslijed udara udarne grede o zrno, zrna o odbojnu ploču i međusobnog udara zrna o zrno. Odbojne ploče mogu se lako okrenuti ili zamijeniti kada se jedna ili obje strane istroše. Najveće udarne drobilice imaju kapacitet do 3000 t/h. Zbog visoke brzine potrebne za drobljenje, trošenje je veće nego kod čeljusnih ili kružnih drobilica. Samim time ne preporučuje se korištenje udarnih (HSI) drobilica za drobljenje materijala s više od 15% SiO_2. Stupanj sitnjenja može biti i do 40:1 ako je materijal relativno neabrazivan. (Wills 2016)



Slika 4-6. *Horizontalna udarna drobilica (1 – ulaz, 2 – kućište, 3 – postolje, 4 – izlaz, 5 – rotor, 6 – udarne grede, 7 – odbojne ploče, 8 – vijci za regulaciju otvora, 9 – obloga odbojne ploče)*

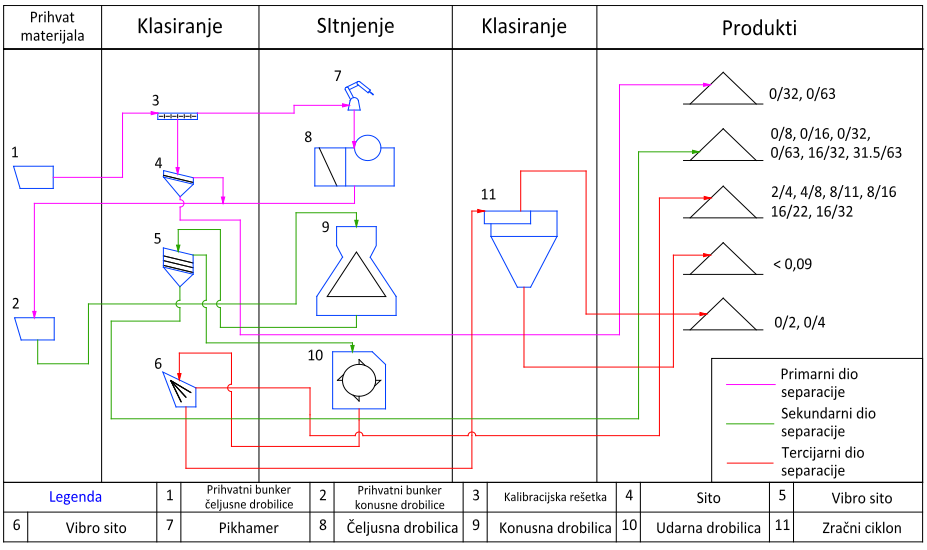
5. Terensko ispitivanje

5.1. Lokacija

Terensko ispitivanje je provedeno u dva navrata u kamenolomu „Očura“. Kamenolom „Očura“ je pod koncesijom Holcim mineralni agregati d.o.o. U kamenolomu “Očura” vrši se eksploatacija i obrada tehničko-građevnog kamena dolomita. To uključuje miniranje, drobljenje, separaciju, transport itd. Završni produkt ovog kamenoloma je agregat različitog granulometrijskog sastava. Frakcije (klase) koje se proizvode za izradu standardnih vrsta betona su -4, -8, 8/4, 16/8, 22/16 i 32/16 mm. Za izradu asfalta proizvode se dodatno još frakcije agregata -2, 4/2 i 11/8 mm, te kameno punilo i kameno brašno (dolomitni griz za proizvodnju staklene ambalaže). Fizičko-mehanička svojstva stijenske mase su: tlačna čvrstoća 184,2 MPa, gustoća 2,85 g/cm^3, upijanje vode 0,14-0,6 %, otpornost na habanje 22,00 cm^2, otpornost na drobljenje LA 24. (www.holcim.hr)

5.2. Oplemenjivanje na eksploatacijskom polju „Očura“

Prerada tj. oplemenjivanje mineralne sirovine sastoji se od primarnog, sekundarnog i tercijarnog dijela separacije (Slika 5-1.).



Slika 5-1. *Segregacijska shema procesa separacije na eksploatacijskom polju „Očura“*

5.2.1. Primarni dio separacije

U primarnom dijelu separacije (Slika 5-1., ružičaste linije) materijal iz usipnog bunkera pomoću vibrodozatora dolazi do kalibracijska rešetka. Materijal -50 mm propada kroz otvore kalibracijske rešetke, a materijal +50 mm ulazi u čeljusnu drobilicu „Nordberg C100b“ koja drobi materijal do max. veličine od 150 mm. Čeljusna drobilica je pokretana elektromotorom snage 110 kW. Izlazni je otvor podešen na veličinu od 150 mm. Ima kapacitet od 180 do 250 t/h. U slučaju da u drobilicu uđu preveliki komadi oni se usitnjavaju čekićem postavljenim iznad ulaza drobilice. Sav materijal izdrobljen u čeljusnoj drobilici odlazi prema usipnom bunkeru konusne drobilice. Prosjev kalibracijske rešetke odlazi na vibracijsko sito. Na sito se mogu postaviti mreže s veličinama otvora od 30, 25, 18 i 12 mm. Odsjev sita odlazi u sekundarni dio separacije. Ostatak se odlaže tračnim transporterima na deponij. Prilikom terenskog ispitivanja u primarnom dijelu separacije, svi su uzorci bili znatno veći od 50 mm te su svi išli direktno u čeljusnu drobilicu, bez propadanja kroz otvore kalibracijske rešetke.

5.2.2. Sekundarni dio separacije

U sekundarnom dijelu separacije (Slika 5-1., zelene linije) materijal veličine -150 mm preko dozatora odlazi na drobljenje u konusnu drobilicu „Nordberg HP 200 SX“, gdje se predrobljava na veličinu do 80 mm. Konusnu drobilicu pokreće elektromotor snage 132 kW. Promjer konusa iznosi 940 mm, a ulazni otvor ima promjer od 185 mm. Ima kapacitet od 200 do 245 t/h. Iz drobilice materijal odlazi na sijanje na 4-etažno sito "Nordberg" kapaciteta 300 t/h. Prosijavanjem se mogu dobiti sljedeći proizvodi tj. frakcije: -4, -10, -16, -32, 32/16 i 60/32 mm. Proizvodi 32/16 i 60/32 mogu se uputiti na daljnje sitnjenje.

5.2.3. Tercijarni dio separacije

U tercijarnom dijelu separacije (Slika 5-1., crvene linije) materijal iz distribucijskog bunkera pomoću dozatora ide u udarnu drobilicu „Vortex 9-10-4“, kapaciteta 200 t/h i snage elektromotora 200 kW. Iz drobilice materijal odlazi na sito „Mogensen sizer“ kapaciteta 250 t/h. Prosijavanjem se dobivaju frakcije 4/2, 8/4, 11/8, 16/8, 22/16 i 32/16 mm. Dio materijala ide u daljnju preradu za proizvodnju filera (-10) i griza (-150 μm).

5.2. Postupak mjerenja

Pri prvom posjetu kamenolomu „Očura“ s deponija odminirane stijene nasumično je izabrano 16 uzoraka različitih veličina i masa. Kamenje je potom izvagano na vagi in situ (Slika 5-2.). Izvagane mase pojedinih uzoraka prikazane su u tablici 5-1. Nakon odabira uzoraka, bager je uzorke pokupio u lopatu te ih pohranio do mjerenja na skladištenje.



Slika 5-2. *Vaganje i označavanje uzoraka na kamenolomu „Očura“*

Tablica 5-1. *Mase odabranih uzoraka kamena*

Uzorak	Masa (kg)	Uzorak	Masa (Kg)
1	110,0	9	120,0
2	166,7	10	78,0
3	100,0	11	118,2
4	95,7	12	54,4
5	101,3	13	54,9
6	95,8	14	115,0
7	107,7	15	53,8
8	78,5	16	66,7
Ukupno (kg):		1516,6	

Pri drugom posjetu kamenolomu „Očura“ obavljeno je mjerenje. Ovdje treba napomenuti da je cijelo oplemenjivačko postrojenje određeno vrijeme radilo bez dodavanja materijala kako bi se ispraznilo od materijala i u tom smislu bilo spremno za mjerenje „naših“ uzoraka. Prije ubacivanja uzoraka u drobilicu, ispražnjen je sav materijal iz usipnog bunkera čeljusne drobilice te je pogon zaustavljen. Uređaj za mjerenje tada je spojen na električni ormar čeljusne drobilice (poglavlje 5.3.1.). Pogon je zatim ponovno uključen te je zabilježena potrošnja energije u praznom hodu drobilice. Bager je zatim u svoju lopatu zahvatio 8 prethodno izabranih uzoraka s deponija. Uzorci su potom dozirani u čeljusnu drobilicu putem prihvatnog bunkera i kalibracijske rešetke. Kada bi se jedan uzorak potpuno izdrobio i prošao kroz drobilicu, ubačen je sljedeći uzorak, i tako dalje dok zaključno s drugom serijom od 8 uzoraka nije izdrobljeno svih 16 uzoraka. Raspored ubacivanja uzoraka prikazan je u tablici 5-2. Visinska razlika između lopate utovarivača iz kojeg su uzorci dodavani i dna prihvatnog bunkera je približno 2 do 3 metra. Stoga je prilikom ubacivanja uzoraka u prihvatni bunker vizualno praćeno hoće li eventualno doći do oštećenja pojedinog uzorka (npr. odlamanja dijela uzorka), no dodavanje svih 16 uzoraka je prošlo bez golim okom vidljivih eventualnih oštećenja.

Tablica 5-2. *Raspored ubacivanja uzoraka u čeljusnu drobilicu*

Redoslijed ubacivanja	**Uzorak# (Tablica 5-1.)**	**Redoslijed ubacivanja**	**Uzorak# (Tablica 5-1.)**
1.	3	9.	16
2.	12	10.	14
3.	7	11.	13
4.	1	12.	8
5.	15	13.	2
6.	4	14.	11
7.	6	15.	10
8.	9	16.	5

Materijal izdrobljen u čeljusnoj drobilici transportnim trakama doprema se u prihvatni bunker sekundarne, konusne drobilice. Nakon drobljenja u čeljusnoj drobilici, izdrobljeni materijal od

svih 16 uzoraka nalazio se u prihvatnom bunkeru konusne drobilice i to je bio ulazni uzorak za mjerenje energije u konusnoj drobilici. U tom trenutku pogon je ponovo zaustavljen. Uređaj za mjerenje odspojen je s električnog ormara čeljusne drobilice i spojen na električni ormar konusne drobilice. Nakon spajanja pogon je ponovno pokrenut. Prije doziranja uzorka u drobilicu pušteno je da drobilica neko vrijeme radi u praznom hodu kako bi se izmjerila snaga odnosno energija praznog hoda. Zatim je uzorak (svih 16 pojedinačnih izdrobljenih uzoraka zajedno) dozatorom dodavan u konusnu drobilicu. Materijal je nakon drobljenja u konusnoj drobilici transportnim trakama dopremljen u prihvatni bunker udarne drobilice. Tamo je ponovljen isti postupak, s prespajanjem mjernog sustava na električni ormar udarne drobilice (u istoj prostoriji gdje je i ormar konusne drobilice). Drobljenjem materijala u udarnoj drobilici završen je postupak mjerenja.

5.3. Mjerenje potrošnje električne energije

Energija utrošena na drobljenje mjeri se mjerenjem električne snage koju motor vuče iz električne mreže. Elektricitet koji izvor predaje trošilu jednak je umnošku struje *I* i vremena *t.*

$$C = I \cdot t \tag{5-1}$$

gdje je *C* količina elektriciteta (C), *I* jakost struje (A), i *t* vrijeme (s).

Rad koji struja izvrši u nekom trošilu jednak je:

$$W = U \cdot C = U \cdot I \cdot t = P \cdot t \tag{5-2}$$

gdje je *U* napon (V) a *P* snaga (W). Razlikuju se tri vrste snage: radna, jalova i prividna. U trošilu se radna snaga pretvara u neki drugi oblik energije i jednaka je:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \tag{5-3}$$

gdje je:

P - radna snaga (W),

U - linijski napon (V),

I - linijska struja (A)

φ - fazni pomak

Jalova snaga neiskorišteno prolazi kroz trošilo i vraća se u obliku električne energije u izvor. Jednaka je:

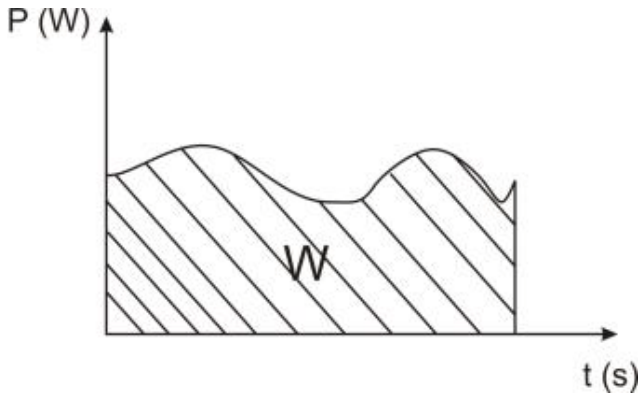
$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \tag{5-4}$$

Prividna snaga jednaka je zbroju radne i jalove snage:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{5-5}$$

Energija koja se mijenja u vremenu t jednaka je površini ispod krivulje snage (slika 5-3.):

$$W = \int p(t)\, dt \tag{5-6}$$

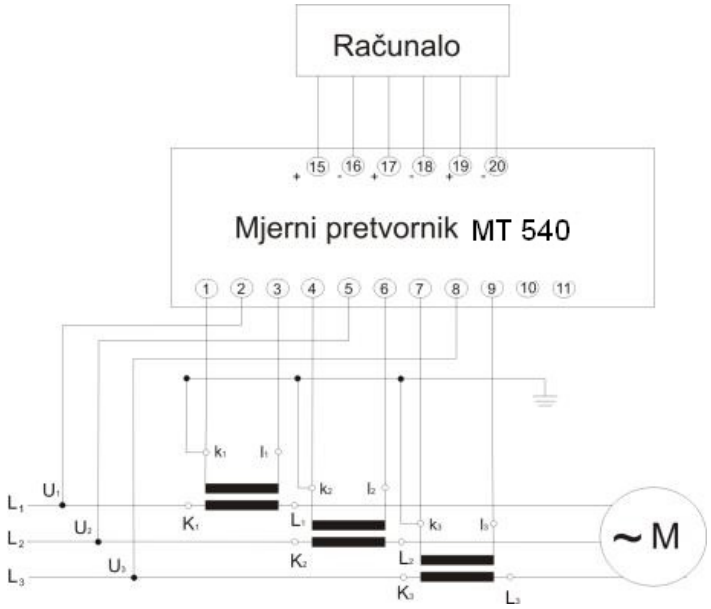


Slika 5-3. *Dijagram snaga/vrijeme*

Iz razloga što motor i bez opterećenja (uzrokovanog drobljenjem stijena) troši snagu iz mreže (snaga praznog hoda), energija za vrijeme drobljenja uzima se kao razlika mjerenih snaga u praznom hodu i za vrijeme drobljenja.

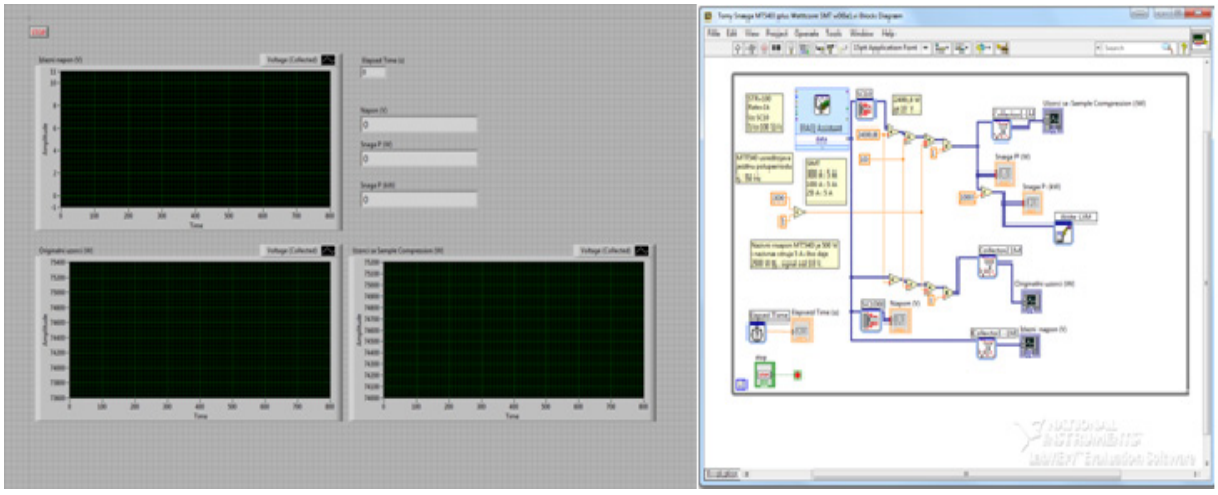
5.3.1. Opis mjernog sustava

Za mjerenje su korišteni mjerni pretvornik Iskra MT 540 i multifunkcijska mjerna kartica MyDAQ. Mjerni pretvornik MT 540 je namjenjen za mjerenje preko 140 različitih veličina (*U, I, P, Q, S, PF, PA, f,* energija...). Može mjeriti frekvenciju mreže u rasponu od 16 do 400 Hz-a. Maksimalna trajna dozvoljena struja je je 12,5 A, a napon 600 V. Koristi se na jednofaznoj ili trofaznoj električnoj mreži. Mjerni pretvornik se spaja na mrežu prema uputi proizvođača da bi se u pretvornik doveli signali napona i struje. Da bi se mogle mjeriti veće snage, potrebno je preko strujnih mjernih transformatora smanjiti struje. Korišteni su mjerni transformatori sa rastavljivom jezgrom jer se mogu montirati i demontirati na vodiče bez odspajanja vodiča koji energiju vode do motora. Tri strujna mjerna transformatora spojena su na pojedinačne faze. Izlazi su spojeni na pretvornik. Transformatori omogućuju smanjenje struje a time i snage 60 puta (300A : 5 A). Naponski ulazi pretvornika spojeni su dodatnim žicama (sa krokodilkama) na vijke vodiča motora (Slika 5-4.). Pretvornik ima 3 izlazna analogna kanala gdje se neke veličine (koje operater odabire i konfigurira) mogu pretvoriti u analogni signal od -10 do +10 V. U provedenom mjerenju uređaj je podešen da radnu snagu motora pretvara u analogni signal u omjeru 10V = 2,5 kW. Pomoću mjernih transformatora omogućuje se mjerenje većih snaga, odnosno konačni omjer je 10 V = 150 kW.



Slika 5-4. *Električna shema mjerenja snage*

Za mjerenje napona koristila se multifunkcijska mjerna kartica MyDAQ. Uređaj ima 2 analogna ulaza i izlaza te napajanje od 5 V i ±15V. MyDAQ se na računalo spaja preko USB sučelja i na računalu se izrađuje virtualni instrumenat u programu LabVIEW. Program LabVIEW sastoji se od dva prozora: prozor blok-dijagram i prozor prednjeg panela. (Slika 5-5.)

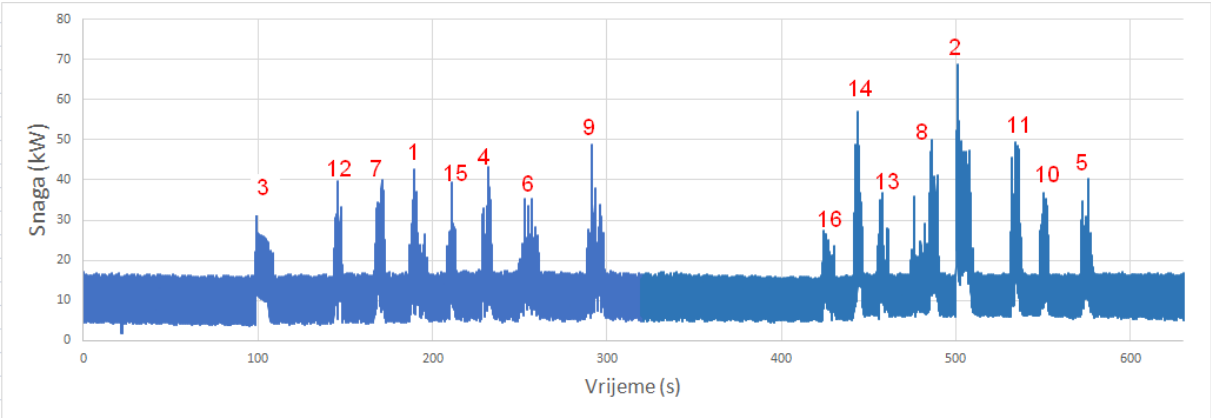


Slika 5-5. *Sučelje programa LabVIEW (lijevo – prednji panel, desno – blok dijagram)*

Na prednjem panelu (slika 5-5., lijevo) su tri dijagrama – izlazni napon po vremenu, napon preračunat u snagu po vremenu i usrednjavanje uzoraka u svrhu smanjenja količine podataka. Uz grafove, vrijednosti su prikazane i brojčano. Blok-dijagram (slika 5-5., desno) sastoji se od „while“ petlje koja omogućuje odvijanje programa dok se ne zaustavi izvođenje pritiskom na tipku STOP. Prva funkcija je DAQ assistant u kojoj se konfigurira mjerenje (određivanje mjernog područja, načina i brzine prikupljanja uzoraka, veličine bloka uzoraka). Prikupljeni se uzorci napona preračunavaju u snagu, prikazuju na grafovima i kućicama za prikaz brojčanih vrijednosti i na kraju pomoću funkcije „write LVM“ zapisuju uzorci snaga u kW.

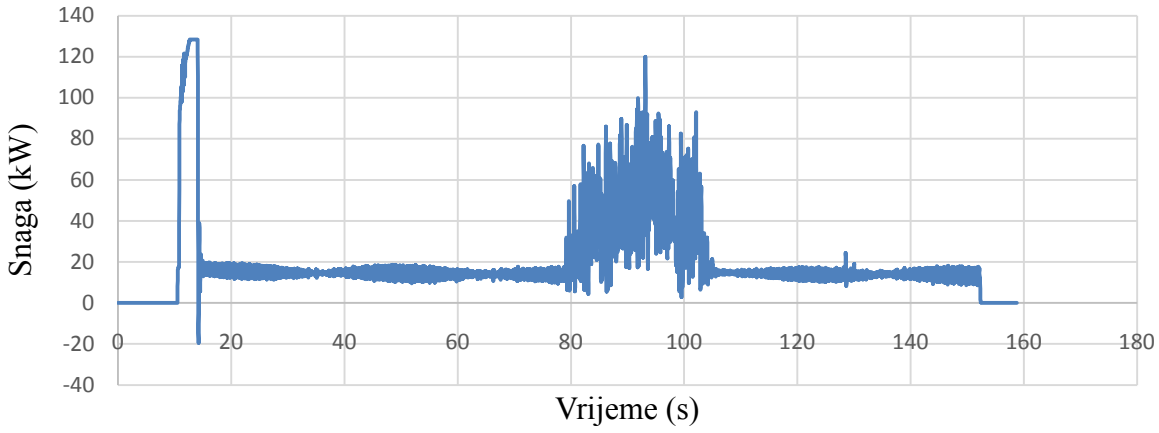
6. Rezultati

Mjerenje započinje uključivanjem elektromotora drobilice. Nakon uključivanja, elektromotor drobilice dostiže stanje praznog hoda. Ulaskom materijala u drobilicu i drobljenjem, naglo se povećava snaga elektromotora. Za svaki uzorak dobivena je krivulja potrošene snage u vremenu. Pri mjerenju drobljenja u čeljusnoj drobilici dobivena je kontinuirana krivulja od početka mjerenja, do kad je izdrobljeno svih 16 uzoraka (Slika 6-1.).



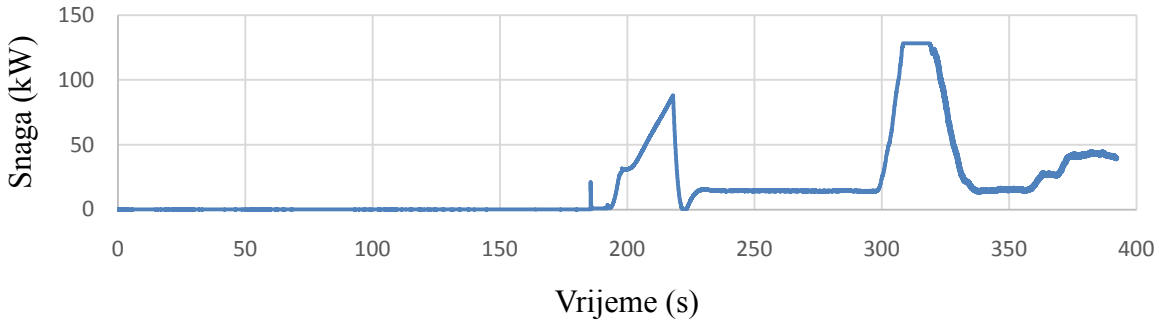
Slika 6-1. *Dijagram snaga-vrijeme za čeljusnu drobilicu s pripadajućim oznakama uzoraka*

Nakon što su svi uzorci izdrobljeni u čeljusnoj (primarnoj) drobilici, sav materijal je uz pomoć tračnih transportera transportiran u bunker iznad konusne (sekundarne) drobilice. Tamo se drobio sav materijal skupa pa je umjesto 16 manjih skokova u snazi uređaja dobiven jedan veliki skok (Slika 6-2.). Skok na početku mjerenja posljedica je pokretanja drobilice.



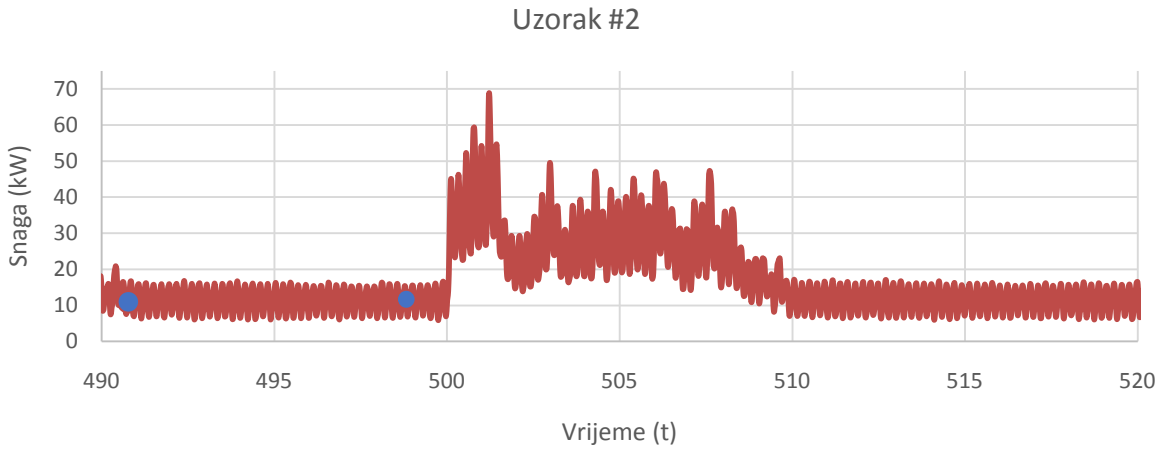
Slika 6-2. *Dijagram snaga-vrijeme za konusnu drobilicu*

Nakon drobljenja u konusnoj drobilici, izdrobljeni materijal je transportiran prema udarnoj (tercijarnoj) drobilici. Opet se, kao i kod konusne drobilice, sav materijal drobio odjednom pa je dobiven jedan veći skok snage (Slika 6-3.). Skok na početku mjerenja posljedica je puštanja u rad drobilice.



Slika 6-3. *Dijagram snaga – vrijeme za udarnu drobilicu*

Specifične energije drobljenja uzoraka dobivene su u Excelu izdvajanjem pripadajućih krivulja i računajući posebno specifičnu energiju za svaki uzorak. Primjer jednog takvog dijagrama snaga-vrijeme za uzorak #2 (izdvojen iz dijagrama na slici 6-1) vidljiv je na slici 6-4. .



Slika 6-4. *Dijagram snaga-vrijeme uzorka 2 iz čeljusne drobilice*

Na slici 6-4. uočljivo je variranje snage u praznom hodu tijekom vremena (krivulja između dvije označene plave točke). Iz tog razloga potrebno je izračunati prosječnu vrijednost snage praznog hoda prije drobljenja svakog pojedinog uzorka.

$$P_{sr} = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{n} \tag{6-1}$$

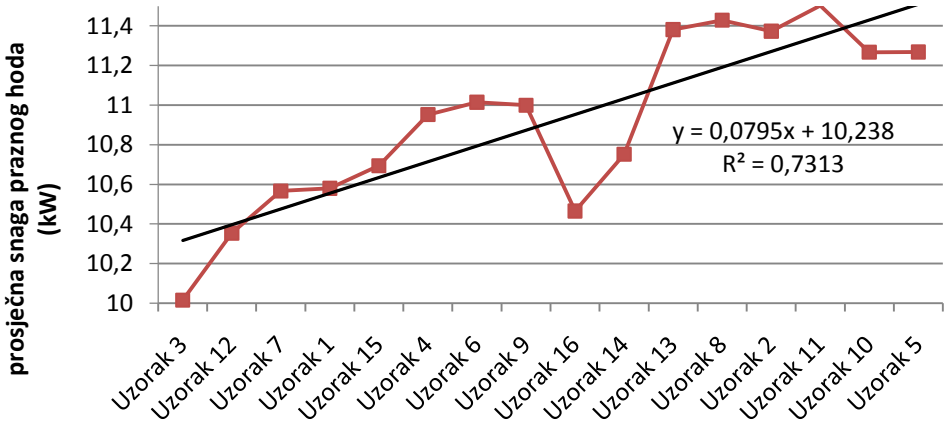
gdje je:

P_{pr} – prosječna snaga praznog hoda (kW)

$P_{1,2,n}$ – snaga u vremenu t_1, t_2, t_n (kW)

n – broj vremenskih intervala iz kojih se izračunava prosječna snaga praznog hoda

Na slici 6-4., za uzorak 2, prosječna vrijednost snage praznog hoda izračunata je između dvaju plavih točaka, otprilike deset sekundi prije nego je uzorak ubačen u drobilicu. Prosječna vrijednost snage praznog hoda računala se posebno za svaki uzorak iz razloga što je zagrijavanjem drobilice uobičajeno podizanje prosječne snage tokom vremena (Slika 6-5.).



Slika 6-5. *Povećanje snage praznog hoda tijekom drobljenja uzoraka*

Na slici 6-5. uočljiv je pad prosječne snage nakon drobljenja uzorka 9. Nakon drobljenja tog uzorka drobljenje je pauzirano na oko 2 minute kako bi utovarač skupio slijedeću grupu od 8 uzoraka za drobljenje, što je vidljivo na slici 6-1. (duži period praznog hoda između skokova snage za uzorke 9 i 16).

Kada smo dobili prosječnu snagu praznog hoda, možemo izračunati snagu drobljenja kao razliku ukupne snage tijekom drobljenja i snage praznog hoda (Slika 6-6. – šrafura zeleno):

$$W = \sum_{i=t_1}^{t_2} \frac{1}{2}\left[\left(S_i - S_{pr}\right) + \left(S_{i+1} - S_{pr}\right)\right] \cdot \left(t_{i+1} - t_i\right) \qquad (6\text{-}2)$$

gdje je:

W - energija drobljenja (kWs)

t_1 - vrijeme početka drobljenja (s)

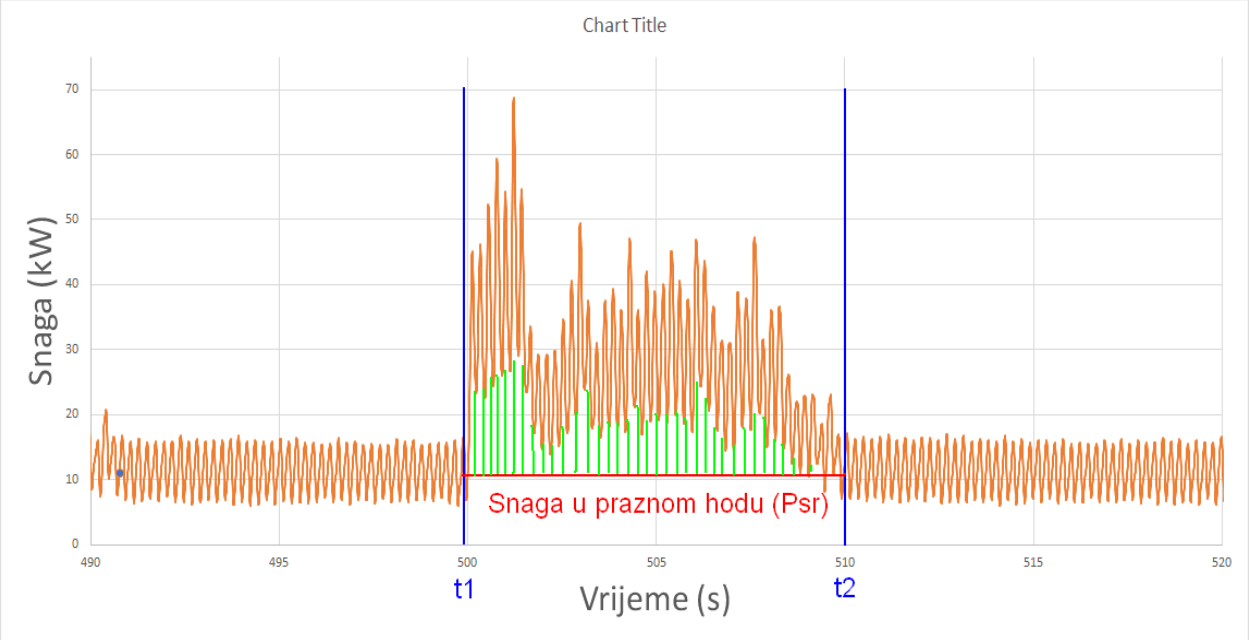
t_2 - vrijeme završetka drobljenja (s)

P - snaga (kW)

P_i - snaga u i-tom trenutku (kW)

t_i - vrijeme u i-toj točki mjerenja (s)

P_{sr} - prosječna snaga praznog hoda (kW)



Slika 6-6. *Izračun energije drobljenja uzorka #2*

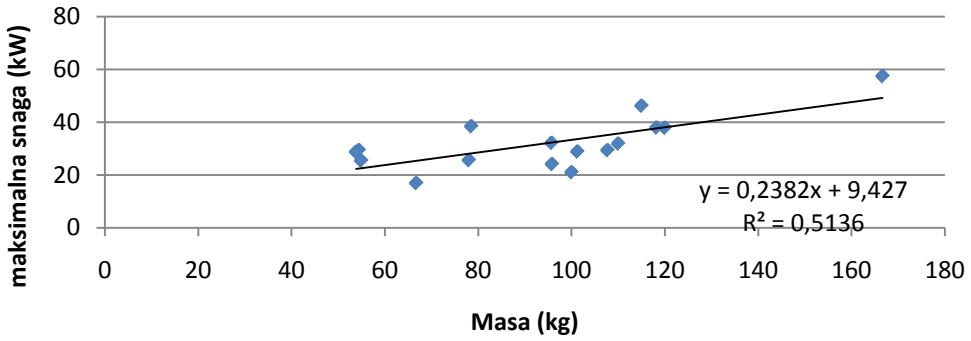
Rezultati izračuna za pojedine uzorke prikazani su u tablici 6-1.

Tablica 6-1. *Energija, masa, specifična energija, vrijeme drobljenja, prosječna snaga, maksimalna snaga i prosječna vrijednost snage praznog hoda pojedinih uzoraka drobljenih na čeljusnoj drobilici*

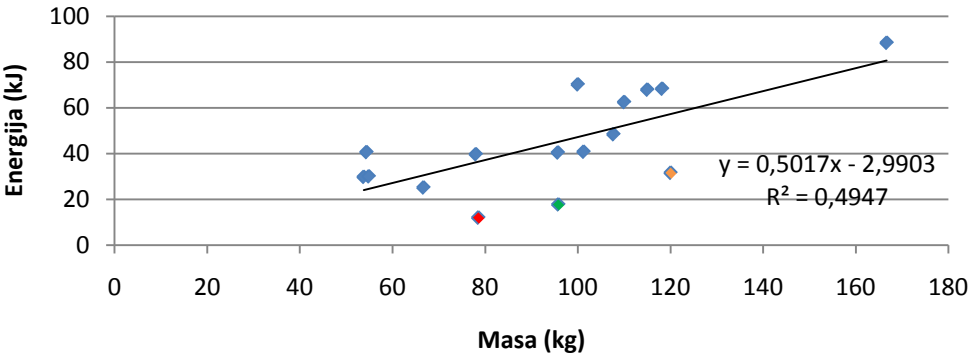
Redoslijed ubacivanja	Uzorak #	Energija (J)	Masa (kg)	Specifična energija (J/kg)	Vrijeme drobljenja (s)	Srednja vrijednost snage praznog hoda (kW)	Prosječna snaga (kW)	Maksimalna snaga (kW)
1	3	70,18	100	0,702	9,91	10,02	17,09	21,08
2	12	40,58	54,4	0,746	5,31	10,35	17,98	29,45
3	7	48,38	107,7	0,449	6	10,57	18,62	29,42
4	1	62,46	110	0,568	10,05	10,58	16,76	31,91
5	15	29,75	53,8	0,553	4,88	10,69	16,78	28,79
6	4	40,39	95,7	0,422	6,17	10,95	18,98	32,19
7	6	17,77	95,8	0,185	11,98	11,01	15,67	24,17
8	9	31,52	120	0,263	9,71	11,00	17,81	37,91
9	16	25,11	66,7	0,377	7,93	10,47	14,82	16,96
10	14	67,88	115	0,590	5,97	10,75	22,67	46,24
11	13	29,98	54,9	0,546	7,37	11,38	16,73	25,46
12	8	11,94	78,5	0,152	16,57	11,43	16,63	38,47
13	2	88,37	166,6	0,530	10,25	11,37	27,06	57,47
14	11	68,29	118,2	0,578	6,84	11,50	22,94	37,99
15	10	39,65	78	0,508	5,21	11,27	19,02	25,63
16	5	40,74	101,3	0,402	7,96	11,27	17,60	28,91

7. Diskusija rezultata

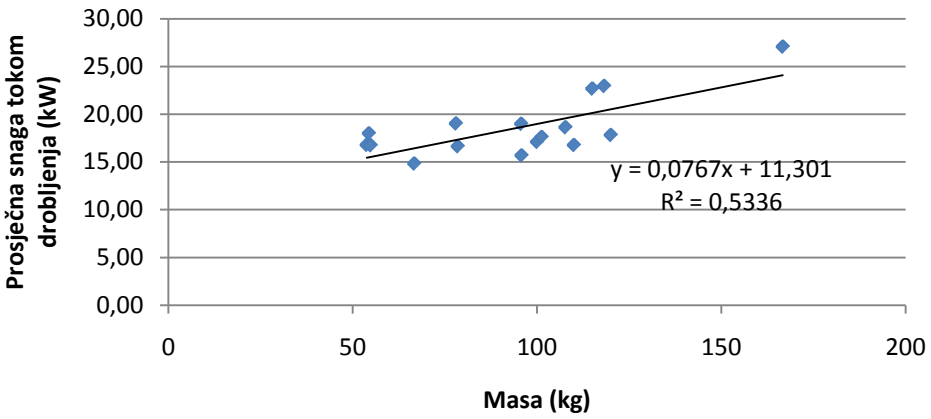
U čeljusnoj drobilici izdrobljeno je 16 uzoraka čije su težine varirale od 53,8 do 166,7 kg. Energija drobljenja bila je između 12 i 88 J. Specifična energija iznosila je od 0,15 do 0,70 kJ/kg . Vrijeme drobljenja variralo je između 4,88 i 16,57 sekundi. Srednja vrijednost snage praznog hoda varirala je od 10,02 kW do 11,50 kW. Prosječna snaga elektromotora tijekom drobljenja bila je između 14,82 kW i 27,06 kW. Maksimalna snaga tijekom drobljenja iznosila je od 16,96 kW do 57,47 kW. Iz rezultata drobljenja može se zaključiti kako masa ima primjetan utjecaj na energiju drobljenja, prosječnu snagu tijekom drobljenja i maksimalnu snagu prilikom drobljenja.



Slika 7-1. *Dijagram ovisnosti maksimalne snage tijekom drobljenja o masi uzoraka*

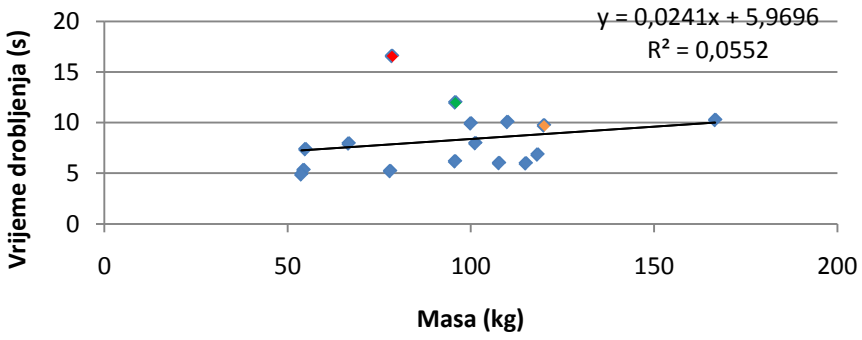


Slika 7-2. *Dijagram ovisnosti ukupne energije drobljenja pojedinih uzoraka o njihovoj masi*



Slika 7-3. *Dijagram ovisnosti prosječne snage tijekom drobljenja o masi uzorka*

Ukupna energija iz slike 7-2. izražena je bez energije praznog hoda kao što je objašnjeno u poglavlju „Rezultati“. Maksimalna snaga iz slike 7-1. dobivena je kao razlika maksimalne zabilježene snage tijekom drobljenja pojedinog uzorka i snage praznog hoda izračunatog prije drobljenja istog uzorka (npr. slika 6-6.). Na slici 7-2., tri uzorka (označena crveno, zeleno i narančasto) znatnije odskaču od pravca regresije, tj. ukupna energija iskorištena pri njihovom drobljenju je manja nego je očekivano za njihovu masu. Npr. uzorak 8 (označen crveno) drobljen je 16,57 sekundi što je dva puta više od prosječnog vremena koje iznosi 8,25 sekundi (Slika 7-4.). To ukazuje da je prilikom ulaza uzorka u drobilicu, drobilica imala „poteškoća“ prilikom zahvaćanja u čeljust i drobljenja, jer je došlo do poskakivanja uzorka unutar drobilice te je zbog toga drobljenje trajalo duže, zbog čega je energija tijekom drobljenja bila niža. Slično se može pretpostaviti za uzorak 6 (označen zeleno), koji se drobio za 45% vremena duže od prosjeka (Slika 7-4).



Slika 7-4. *Dijagram ovisnost vremena drobljenja o masi uzorka*

Uzorak 9 (označen narančasto) izdrobljen je u prosječnom vremenu kada se njegova masa uzme u obzir te se njegovo odstupanje time ne može objasniti. Na slici 7-1. i 7-3. prikazane su ovisnosti maksimalne zabilježene snage, te prosječne snage o masi uzorka. Na ovim dijagramima nema značajnijih odstupanja te se može zaključiti kako se povećanjem mase uzorka koji se drobi povećavaju prosječna snaga tijekom drobljenja i najveća zabilježena snaga tijekom drobljenja.

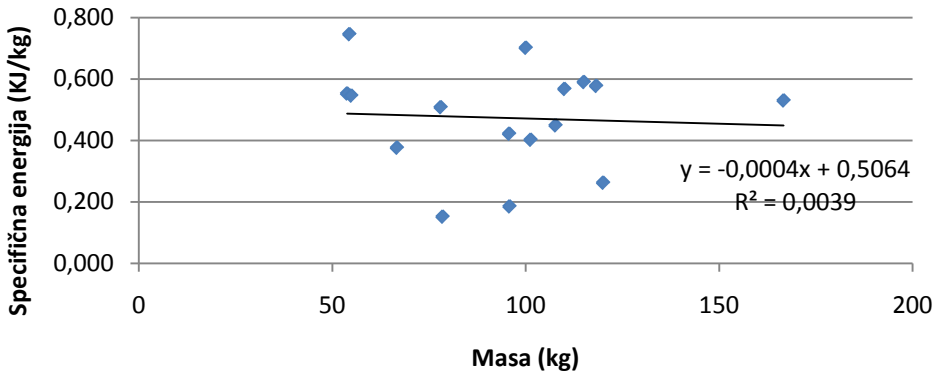
Iz razloga što se sa smanjenjem zrna povećava specifična energija potrebna za njihovo sitnjenje, bilo je za očekivati kako će čeljusna drobilica (u kojoj se drobe najkrupniji komadi) imati najmanju specifičnu energiju, a udarna drobilica (u kojoj se drobe najsitniji komadi) najveću specifičnu energiju. Iz razloga što se u konusnoj i udarnoj drobilici drobio kolektiv, a u čeljusnoj svaki uzorak zasebno, teško je napraviti usporedbu zbog različitih uvjeta ispitivanja. U svakom slučaju konusna drobilica ima znatno nižu specifičnu potrošnju energije od udarne drobilice (Tablica 7-1). Veličina ulaza konusne drobilice je 150 mm, a udarne 80 mm.

Tablica 7-1. *Usporedba mase, ukupne energije, prosječne snage tijekom drobljenja, maksimalne snage, vremena i specifične energije između čeljusne, konusne i udarne drobilice*

Drobilica	Masa (kg)	Energija Ukupno (kJ)	Prosječna snaga tijekom drobljenja (kW)	Max Snaga (kW)	Vrijeme (s)	specifična energija (kJ/kg)
Čeljusna	1516	713,00	18,57	68,84	132,11	0,47
Konusna	1516	668,41	40,27	119,92	26,11	0,44
Udarna	1516	2116,65	76,23	128,33	40,83	1,40

Iz tablice 7-1. vidljivo je znatno veće vrijeme drobljenja za čeljusnu drobilicu od vremena drobljenja u konusnoj i udarnoj drobilici. Razlog tome je što je vrijeme drobljenja u čeljusnoj drobilici dobiveno kao zbroj svih vremena drobljenja pojedinih uzoraka. Za očekivati je kako bi, kada bi se u čeljusnu drobilicu ubacili svi komadi odjednom umjesto jedan po jedan,

vrijeme drobljenja bilo znatno manje, čime bi i specifična energija čeljusne drobilice bila manja. Također se iz tablice 7-1. može vidjeti kako su i maksimalna i prosječna snaga znatno manje od istih za konusnu drobilicu (prosječna snaga 18,57 kW nasuprot 40,27 kW, maksimalna 68,84 kW nasuprot 119,92 kW) što je indikator da bi ukupna energija čeljusne drobilice trebala biti približno 40 do 50% manja od ukupne energije konusne drobilice, a ne 7% veća kako je dobiveno mjerenjem i izračunom.



Slika 7-5. *Dijagram ovisnosti specifične energije drobljenja o masi uzorka*

Na slici 7-5. vidi se ovisnost specifične energije o masi uzoraka. Teoretski, što je komad veći to je potrebna manja specifična energija za sitnjenje (zbog više defekata/pukotina po uzorku). Iz mjerenih 16 uzoraka koji su se izdrobljeni u čeljusnoj drobilici, nije pronađena značajna korelacija. Razlog može biti u tome da su pojedini uzorci imali unutarnje pukotine ili šupljine. Također, svaki uzorak nasumično pada u čeljust drobilice što uzrokuje lošije prihvaćanje uzorka u čeljust i/ili poskakivanje, što utječe na energiju drobljenja. Naposlijetku, uzorak je bio premali kako bi se izvukao siguran zaključak.

8. Zaključak

U ovom radu prikazano je terensko mjerenje energije drobljenja na tri različite drobilice na kamenolomu tehničko-građevnog kamena „Očura“. Mjerenje se izvodilo na čeljusnoj, konusnoj i udarnoj drobilici. U procesu separacije na kamenolomu, čeljusna drobilica je primarna, konusna sekundarna, a udarna tercijarna. Pomoću mjernog sustava mjerena je promjena snage motora drobilica tijekom vremena drobljenja. U primarnoj,

čeljusnoj drobilici je mjerena energija drobljenja svakog pojedinačnog uzorka zasebno. U konusnoj drobilici mjerena je energija drobljenja materijala usitnjenog u čeljusnoj drobilici, a u udarnoj drobilici je mjerena energija drobljenja materijala usitnjenog u konusnoj drobilici. Rezultati mjerenja bili su dijagrami snaga-vrijeme za pojedine drobilice. Dijagram snaga-vrijeme za čeljusnu drobilicu razdvojen je na segmente te je izračunata energija drobljenja za svaki uzorak posebno. Za konusnu i udarnu drobilicu dobivena je ukupna energija drobljenja. Cilj rada bio je potvrditi hipotezu da sa smanjenjem veličine komada/zrna sirovine raste energija potrebna za njihovo sitnjenje. Samim time smanjenjem veličine uzorka raste njegova specifična energija drobljenja.

Statistička analiza rezultata drobljenja na čeljusnoj drobilici pokazala je kako povećanje mase uzoraka utječe na povećanje energije drobljenja (slika 7-2.), prosječne snage pri drobljenju (slika 7-3.) i maksimalne snage pri drobljenju (slika 7-1.). Usporedbom energije drobljenja u različitim drobilicama i stupnjevima drobljenja zaključeno je kako se sa smanjenjem veličine čestica povećava energija potrebna za njihovo sitnjenje (tablica 7-1.). Specifična energija povećava se sa smanjenjem veličine uzoraka (slika 7-1.). Specifična energija uzoraka drobljenih u čeljusnoj drobilici ne pokazuje korelaciju s masom istih uzoraka (slika 7-5.).

Za nastavak istraživanja bilo bi potrebno na čeljusnoj drobilici umjesto pojedinačnih uzoraka izdrobiti jedan uzorak približno jednake mase kao svih 16 pojedinačnih uzoraka te usporediti ima li to utjecaja na vrijeme drobljenja i prosječnu snagu drobljenja te najvažnije na specifičnu energiju drobljenja u usporedbi s konusnom i udarnom drobilicom. Također bi se moglo provesti drobljenje u laboratorijskim drobilicama pri sličnom stupnju sitnjenja te usporediti rezultate s rezultatima terenskih mjerenja.

9. Literatura

Drzymala, J., 2007. Mineral Processing: Foundations of theory and practice of minerallurgy. Prvo izdanje. Wroclaw: Wroclaw University of Technology.

Gupta A., Yan D.S., Mineral Processing Design and Operation – An Introduction

Herbst, J.A., Lo C.Y., Flintoff, B., 2003. Size reduction and liberation. U: Principles of mineral processing. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2003, str. 61-119.

Iskra, 2010. Multifunctional Transducer UMT540/MT540

Jankovic, A., Dundar, H., Mehta, R., 2010. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110.

Korman, T., Bedeković, G., Kujundžić, T., Kuhinek, D., 2014. Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2015/51(2), 461-475.

Legendre, D., Zevenhoven, R., 2014. Assesing the Energy efficiency of a jaw crusher. Energy, 30, str. 1-12.

Major, K. 2002. Types and characteristics of Crushing Equipment and Circuit Flowsheets. U: Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2002, str. 566 – 584.

Salopek, B., Bedeković, G., 2000. Sitnjenje: Prvi stupanj u oplemenjivanju mineralnih sirovina. U: Rudarsko Geološko Naftni zbornik vol. 12. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2000., str. 83-88.

Smith, M.R., Collis, L., 2001. Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. 3. izdanje. London: The Geological Society.

Tromans, D., 2007. Mineral comminution: Energy efficiency considerations. Minerals Engineering, 2008/21, 613-620.

Wills, B.A., 2016. Wills` Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8. izdanje. Oxford: Elsevier.

Workman, L., Eloranta, J., 2004. The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption. U: Proceedings of the ISEE 29th Annual Conference on Explosives & Blasting Techniques, I, 131-140.