Zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja stijena

Cerle, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:169:514471

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

ZAVISNOST SPECIFIČNE ENERGIJE DROBLJENJA O SPECIFIČNOJ ENERGIJI REZANJA STIJENA

Diplomski rad

Dino Cerle
R 125

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko naftni fakultet

Diplomski rad

ZAVISNOST SPECIFIČNE ENERGIJE DROBLJENJA O SPECIFIČNOJ ENERGIJI REZANJA STIJENA

DINO CERLE

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

Sažetak

Osnovni cilj ovog rada je utvrditi u kojoj mjeri fizikalno-mehanička svojstva stijena utječu na energiju potrebnu za rezanje stijena, te analizirati zavisnost specifične energije drobljenja i specifične energije rezanja. Laboratorijska ispitivanja specifične energije rezanja provedena su na pet uzoraka različitog mineralnog sastava. Ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena pri čemu su mjerene sve tri komponente sile rezanja. Specifična energija rezanja dobivena je iz omjera energije utrošene na rezanje i mase odlomka. Statističkom obradom podataka dobiveni su korelacijski odnosi prema kojima najveći utjecaj na specifičnu energiju rezanja ima tlačna čvrstoća. Na temelju dobivenih rezultata i rezultata prijašnjih ispitivanja određena je zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja.

Ključne riječi: rudarstvo, fizikalno-mehanička svojstva, tlačna čvrstoća, energija rezanja, energija drobljenja

Diplomski rad sadrži: 33 stranice, 4 tablice, 22 slike, 17 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Voditelj: Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redovni profesor RGNF

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

Ocjenjivači: Dr.sc. Trpimir Kujundžić, redovni profesor RGNF
Dr.sc. Gordan Bedeković, redovni profesor RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, docent RGNF

Datum obrane: 19. rujan 2016.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

DEPENDENCE OF SPECIFIC CRUSHING ENERGY ON SPECIFIC CUTTING ENERGY

DINO CERLE

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department for Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

The main goal of this paper was to determine to what extent physical and mechanical properties of rocks affect the energy used for rock cutting and to analyse the dependence of the specific crushing energy on the specific cutting energy. The research activities of the specific cutting energy comprised 5 samples of different mineral compositions. Cuts on the samples were made by means of the linear cutting machine. After each cut all the three strength components were measured by means of the measurement converter. The specific cutting energy was obtained from the ratio between the energy used for cutting and the sample mass. The statistical data processing provided the correlation values, according to which the compressive strength has the highest impact on the specific cutting energy and the specific crushing energy. Based on the obtained results and the results of the previous research activities the dependence between the specific crushing energy and the specific cutting energy was determined.

Keywords: mining, physical and mechanical properties, compressive strength, cutting energy, crushing energy.

Thesis contains: 33 pages, 4 tables, 22 figures and 17 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: Library of the Faculty of Mining,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor
Technical support and assistance: PhD Tomislav Korman, Assistant Professor

Reviewers: PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor
PhD Gordan Bedeković, Full Professor
PhD Tomislav Korman, Assistant Professor

Date of defence: September 19, 2016

SADRŽAJ

POPIS TABLICA II
POPIS SLIKA III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA IV
1. UVOD 1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA 3
3. TEORETSKE OSNOVE 5
3.1. Fizikalno mehanička svojstva stijena 5
3.1.1. Tlačna čvrstoća 5
3.1.2. Tvrdoća 6
3.1.3. Vlačna čvrstoća 8
3.2. Drobljenje 9
3.2.1. Mjerenje energije utrošene na drobljenje 11
3.3. Teorija rezanja 14
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA 16
4.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena 16
4.1.1. Mjerni pretvornik sile 18
4.1.2. Opis uzoraka 20
4.1.3. Metoda ispitivanja 22
4.1.4. Obrada podataka 23
5. ANALIZA REZULTATA 25
6. ZAKLJUČAK 31
7. POPIS LITERATURE 32

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Mohsova skala tvrdoće 7
Tablica 4-1. Početne mase i dimenzije uzoraka 21
Tablica 5-1. Rezultati mjerenja fizikalno mehaničkih svojstava 25
Tablica 5-2. Prosječne vrijednosti komponenti sile i specifična energija rezanja 25

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Princip ispitivanja tlačne čvrstoće 6
Slika 3-2. Tipovi loma 6
Slika 3-3. Schmidtov čekić 7
Slika 3-4. Principi djelovanja uređaja za sitnjenje 9
Slika 3-5. Čeljusna drobilica 10
Slika 3-6. Dijelovi čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom 11
Slika 3-7. Dijagram snaga-vrijeme 12
Slika 3-8. Električna shema mjerenje snage 13
Slika 3-9. Rezultantna sila rezanja i njene komponente 14
Slika 4-1. Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja 16
Slika 4-2. Način glavnog gibanja mehaničke blanjalice 17
Slika 4-3. Uređaj za pravolinijsko rezanje s troosnim mjernim pretvornikom sile i mjerni sustav 17
Slika 4-4. Mjerni pretvornik sile za mjerenje sile rezanja 19
Slika 4-5. Uređaj za umjeravanje pretvornika sile 20
Slika 4-6. Odabrani uzorci za laboratorijsko ispitivanje 21
Slika 4-7. Uzorak pripremljen za ispitivanje 22
Slika 4-8. Primjer rezultata mjerenja pomoću troosnog pretvornika sile 23
Slika 5-1. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i tlačne čvrstoće 26
Slika 5-2. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i vlačne čvrstoće 27
Slika 5-3. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i tvrdoće 28
Slika 5-4. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i lomne žilavosti 29
Slika 5-5. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i specifične energije drobljenja 29

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

W – energija [kJ]

R – rezultantna sila [N]

F_c – horizontalna sila [N]

F_n – vertikalna sila [N]

F_f – bočna sila [N]

σ_t – tlačna čvrstoća [N/m^2,Pa]

F – maksimalna sila kod koje nastupa slom [N]

A – površina poprečnog presjeka uzorka [m^2]

σ_v – vlačna čvrstoća [N/m^2, Pa]

F_s – sila sloma [N]

D – promjer uzorka [m]

t – debljina uzorka [m]

E – energija [J]

s_k – kraj reza [cm]

s_p – početak reza [cm]

Se – specifična energija rezanja [kJ/kg]

m_p – masa uzorka prije nastanka reza [kg]

m_k – masa uzorka nakon nastanka reza [kg]

Sd – specifična energija drobljenja [kJ/kg]

d_s – odskok Schmidtovog čekića

σ_L – lomna žilavost (MN/m$^{1.5}$)

R^2 – faktor korelacije

1. UVOD

Rudarstvo je tehnička djelatnost koja se sastoji od istraživanja, eksploatacije i oplemenjivanja mineralnih sirovina. Eksploatacijom mineralnih sirovina, prema Zakonu o rudarstvu (NN 56/13), smatra se njihovo vađenje iz ležišta i oplemenjivanje. Svaka mineralna sirovina sastoji se od korisnog i nekorisnog dijela.

Oplemenjivanje je operacija kod koje se odvajanjem korisnog od nekorisnog dijela dobiva gotovi prodajni proizvod ili poluproizvod. Poluproizvod služi kao komponenta za dobivanje gotovog proizvoda u nekoj drugoj djelatnosti. Oplemenjivanje mineralnih sirovina je po definiciji prerada čvrstih mineralnih sirovina fizikalnim, fizikalno-kemijskim ili kemijskim postupcima s ciljem odvajanja korisnih od nekorisnih komponenti.

Prvi proces u tehnološkoj shemi oplemenjivanja je sitnjenje. Sitnjenje je proces u kojem pod djelovanjem mehaničkih sila mijenjamo disperzno stanje čvrstih tvari (Bedeković, 2013). Neke od zadaća sitnjenja su oslobađanje tj. raščin komponenti mineralnog zrna ili postizanje određene veličine i oblika zrna npr. za proizvodnju betona i asfalta. Za ostvarivanje procesa sitnjenja potrebno je djelovati nekom vanjskom silom tj. utroškom određene količine energije prouzročiti u čvrstom tijelu naprezanja koja će dovesti do deformacija. Kada intenzitet deformacija toliko naraste da dolazi do kidanja veza u strukturi materije, tada dolazi do sitnjenja.

Energija potrebna za drobljenje može se procijeniti na dva načina: teorijski pomoću zakona sitnjenja prema Rittingeru, Kicku i Bondu ili laboratorijskim mjerenjem utrošene energije za drobljenje (Bedeković, 2013). Mjerenje utrošene energije za drobljenje u laboratoriju moguće je izravnim mjerenjem snage na elektromotoru čeljusne drobilice. Specifičnu energiju drobljenja moguće je odrediti na temelju razlike energije koja se koristi za drobljenje uzoraka i energije praznog hoda čeljusne drobilice (Kujundžić et al., 2014).

Mehanika rezanja stijena istražuje utjecaj uvjeta rezanja na tijek i način nastajanja odvojene čestice, te sile, naprezanja i deformacija koje se pri tome javljaju. Ključni čimbenici koji utječu na intenzitet, pravac i smjer sile rezanja su fizikalno-mehaničke i strukturne značajke stijenske mase, geometrijske veličine reznog alata te uvjeti rezanja. Energiju rezanja moguće je odrediti laboratorijskim ispitivanjima na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena (Korman, 2014). Prilikom rezanja također dolazi do sitnjenja i odvajanja čestica, međutim mehanizmi rezanja i drobljenja su različiti. Iako su mehanizmi rezanja i drobljenja različiti, na temelju dosadašnjih ispitivanja (Kujundžić et al., 2014),

(Detournay et al., 2004) i (Copur et al., 2011), moguće je zaključiti da specifična energija drobljenja i rezanja značajno ovise o tlačnoj čvrstoći.

U skladu s navedenim postavljena je hipoteza rada koja glasi da se specifična energija drobljenja može odrediti na temelju specifične energije rezanja dobivene pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijena. Kako bi se potvrdila hipoteza rada provedena su laboratorijska ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Ispitivanja su provedena na pet uzorka različitih fizikalno mehaničkih svojstava pri čemu je mjerena masa odlomaka i sila rezanja. Iz dobivenih podataka izračunata je specifična energija rezanja, te je provedena statistička analiza utjecaja fizikalno-mehaničkih svojstava na specifičnu energiju rezanja. Na temelju dobivenih rezultata i rezultata prijašnjih ispitivanja (Korman, 2008) određena je zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja. Svrha rada je ispitati mogućnost primjene uređaja za linearno rezanje stijena u procjeni specifične energije drobljenja.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Kao što je već spomenuto u uvodu, mehanizmi rezanja i drobljenja su različiti. Međutim, moguće je pretpostaviti da postoji veza između specifične energije rezanja i drobljenja s obzirom da obje energije ovise o tlačnoj čvrstoći, što je i potvrđeno prijašnjim ispitivanjima (Kujundžić, et al., 2014), (Detournay et al., 2004) i (Copur et al., 2011).

Kujundžić i suradnici (2014) su u svojem istraživanju razvili mjerni sustav koji omogućuje izravno mjerenje snage na elektromotoru čeljusne drobilice. Specifičnu energiju drobljenja određena je na temelju razlike energije koja se koristi za drobljenje uzoraka i energije praznog hoda čeljusne drobilice. U istraživanju se došlo do zaključka da količina materijala koji se drobi ne utječe na specifičnu energiju drobljenja, te da potrošnja energije u čeljusnoj drobilici ovisi o mehaničkim i fizikalnim svojstvima drobljenog materijala. Prema navedenim ispitivanjima i na temelju empirijskih ovisnosti energije drobljenja o pojedinim svojstvima stijena, moguće je zaključiti da specifična energija drobljenja najviše ovisi o tlačnoj čvrstoći, te da lomna i vlačna čvrstoća imaju značajan utjecaj na energiju drobljenja. Pomoću dobivenih regresijskih jednadžbi, autori su proveli analizu odstupanja specifične energije drobljenja od mjerenih vrijednosti dobivenih proračunom. Najmanje maksimalno odstupanje specifične energije dobili su za sva ispitivana svojstva stijena, dok su značajno malo odstupanje dobili za samo tri ispitivana svojstva tj. za jednoosnu tlačnu čvrstoću, lomnu žilavost i tvrdoću. Istim ispitivanjem zaključeno je da povećanjem tlačne čvrstoće dolazi do povećanja udjela krupnijih čestica, dok se ostala svojstva ne mijenjaju.

Detournay i suradnici (2004) su u svojem istraživanju razvili uređaj pod nazivom "*Rock Strength Device*" (RSD) i metodu pomoću koje je moguće procijeniti čvrstoću stijene na temelju specifične energije rezanja. Uređaj je razvijen na Sveučilištu u Minnesoti, a omogućuje mjerenje normalne i tangencijalne komponente sile koje se javljaju na reznom alatu usljed rezanja. Navedeni autori proveli su ispitivanja na velikom broju uzorka, te zaključiti da postoji značajna zavisnost specifične energije rezanja o tlačnoj čvrstoći stijene. Copur i suradnici (2011) su proveli ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena, te su odredili specifičnu energiju rezanja za stijene različitog mineralnog sastava. Na temelju provedenih analiza autori su također ustanovili značajnu zavisnost između specifične energije rezanja i jednoosne tlačne čvrstoće.

Prema izloženim dosadašnjim istraživanjima moguće je zaključiti da energija drobljenja i rezanja ovise o tlačnoj čvrstoći. Upravo stoga, u ovome radu su provedena laboratorijska ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena s ciljem određivanja zavisnosti specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja.

3. TEORETSKE OSNOVE

3.1. Fizikalno mehanička svojstva stijena

3.1.1. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća se definira kao maksimalno opterećenje tj. naprezanje, kod kojeg dolazi do sloma materijala. Ispitivanje tlačne čvrstoće najčešći je postupak ispitivanja u mehanici stijena, a provodi se na uzorcima valjkastog ili prizmatičnog oblika određenih dimenzija uz dopušteno bočno širenje. Sila, odnosno opterećenje na uzorak, nanosi se postepeno uz pomoć hidrauličke preše (Slika 3-1). Naprezanje je definirano kao sila koja djeluje po jedinici površine, pa se tlačna čvrstoća može prikazati izrazom:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad [\mathrm{N/m^2, Pa}] \qquad [3\text{-}1]$$

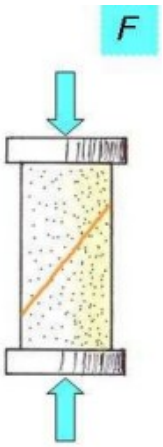
gdje je

σ_t – tlačna čvrstoća [N/m^2,Pa]

F – maksimalna sila kod koje nastupa slom [N]

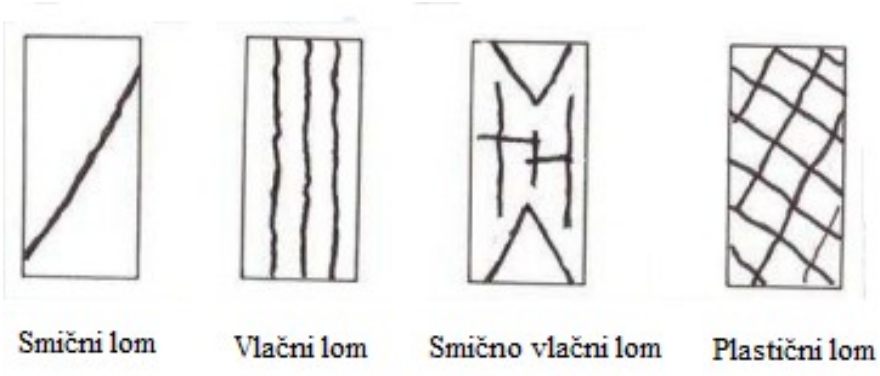
A – površina poprečnog presjeka uzorka [m^2]

Prema preporukama od stane Međunarodnog društva za mehaniku stijena, postupak se provodi na uzorcima u obliku pravilnih valjaka ili prizama, promjera najmanje 54 mm s odnosom visine i promjera od 2,5 – 3,0 : 1. Odnos visina promjer je definiran iz razloga što kod predugačkog uzorka može doći do sloma uslijed elastične nestabilnosti. Postupak ispitivanja provodi se s konstantnim prirastom opterećenja tako da se slom dogodi između 5-10 minuta ili s porastom naprezanja u granicama između 0,5 – 1,0 MPa/s (Hrženjak, 2013).



Slika 3-1. Princip ispitivanja tlačne čvrstoće (Hrženjak, 2015)

Postoje karakteristični oblici sloma uzorka koji se također bilježe pri ovom ispitivanju, a to su smični, vlačni, smično vlačni i plastični tip loma (Slika 3-2).



Slika 3-2. Tipovi loma (Hrženjak, 2015)

3.1.2. Tvrdoća

Tvrdoća predstavlja otpor tijela prodiranju drugog tijela u njegovu površinu, a još se može definirati i kao otpor materijala prema plastičnim deformacijama. Metode mjerenja tvrdoće mogu se podijeliti na parajuće, utiskujuće i na temelju odskoka čelične kuglice. Kod ispitivanja tvrdoće paranjem koristi se Mohs-ova skala koja se sastoji od deset minerala poredanih prema tvrdoći (Tablica 3-1.). Tvrdoća po Mohs-ovoj skali je relativna tvrdoća koja primjenu nalazi u mineralogiji.

Tablica 3-1. Mohsova skala tvrdoće (Hrženjak, 2013)

Mohs-ova tvrdoća	Mineral
1	Talk
2	Gips
3	Kalcit
4	Flourit
5	Apatit
6	Ortoklas
7	Kvarc
8	Topaz
9	Korund
10	Dijamant

Kod određivanja tvrdoće prema Knoopu ili Vickersu mjere se deformacije nastale na uzorku utiskivanjem čelične kuglice ili dijamantnog šiljka. Ova metoda se koristi kod određivanja tvrdoće metala.

Za određivanje tvrdoće pomoću odskoka koristi se Schmidtov čekić. Schmidtov čekić se sastoji od kućišta u kojem se nalazi klip**,** koji opuštanjem opruge u kućištu čekića, udara na nakovanj izduženog, cilindričnog oblika koji je u kontaktu s ispitivanim uzorkom (Slika 3-3). Veličina odskoka klipa se određuje očitavanjem na mjernoj skali smještenoj na tijelu čekića. Visina odskoka predstavlja mjeru za tvrdoću materijala koji se ispituje (Hrženjak, 2013).



Slika 3-3. Schmidtov čekić (Hrženjak, 2015)

3.1.3. Vlačna čvrstoća

Određivanje vlačne čvrstoće može se provesti na dva načina: direktnim postupkom i indirektnim postupkom (brazilijanskim testom). Osnovna razlika između ta dva načina je što kod direktnog postupka uzorak u obliku pravilnog valjka i opterećuje se vlačnim naprezanjem, dok se kod brazilijanskog testa uzorak u obliku diska opterećuje dijametralno na obodu tlačnom silom (Hrženjak, 2013)

Kod direktnog postupka vlačno naprezanje se prenosi pomoću cementiranih ili lijepljenih „kapica“ na krajevima uzorka. Vlačno naprezanje se nanosi kontinuirano s konstantnim prirastom tako da se lom dogodi unutar 5 min ili s prirastom između 0,5 i 1 MPa/s. Vlačna čvrstoća dobije se dijeljenjem ostvarene vlačne sile prilikom loma s početnom površinom poprečnog presjeka uzorka (Hrženjak, 2013).

Kod indirektnog postupka**,** pomoću brazilijanskog testa**,** ispitivanje se provodi pomoću čeličnih čeljusti kojima se obuhvati uzorak u obliku diska. Opterećenje se nanosi kontinuirano s konstantnim prirastom**,** tako da se za najslabije stijene lom dogodi između 15 i 30 sekundi, dok je preporučeni prirast sile 200 N/s. Vrijednost vlačne čvrstoće dobije se izrazom (Hrženjak, 2013):

$$\sigma_{\mathrm{v}} = \frac{0{,}636 \cdot F_{\mathrm{s}}}{D \cdot t} \quad , [\mathrm{Pa}] \qquad [3\text{-}2]$$

gdje je

σ_{v} – vlačna čvrstoća [N/m^2, Pa]

F_{s} – sila sloma [N]

D - promjer uzorka [m]

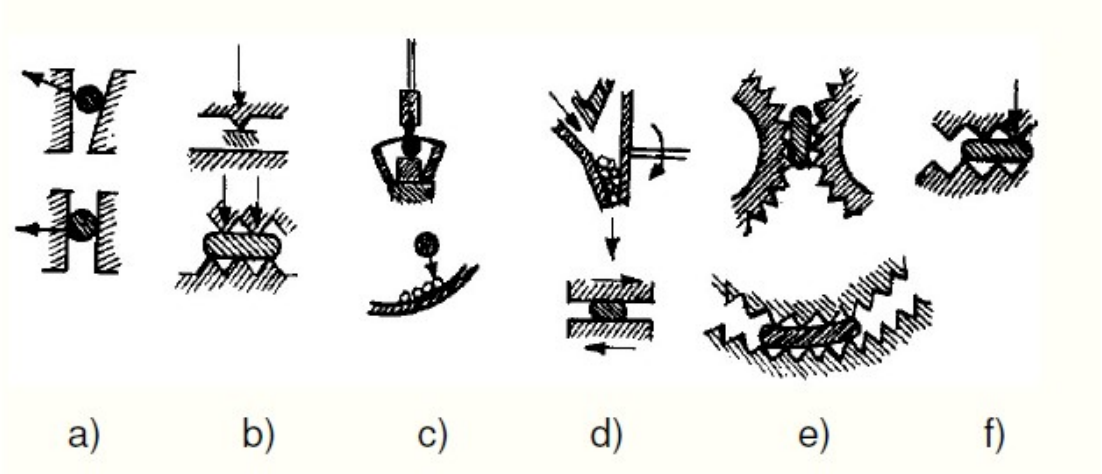
t – debljina uzorka [m]

3.2. Drobljenje

Drobljenje je prva faza sitnjenja sirovine, a njime se postiže sitnjenje čvrstog materijala pod djelovanjem vanjskih sila. Sitnjenje čvrstog materijala pod djelovanjem vanjskih sila događa se kada deformacija u materijalu naraste toliko da dolazi do kidanja veza u njegovoj strukturi. Drobljenje se u pravilu provodi suho, dok se mokro koristi samo kada drobimo sirovinu sa većim sadržajem gline (u tom slučaju ruda se pere tijekom drobljenja). Zadaća drobljenja je postizanje određenog granulometrijskog sastava, raščin korisnih od nekorisnih minerala, kao i postizanje odgovarajućeg oblika mineralnih zrna.

Principi djelovanja uređaja za sitnjenje su (Slika 3-4):

a) tlak, gnječenje
b) cijepanje
c) udar
d) trenje
e) kidanje
f) savijanje

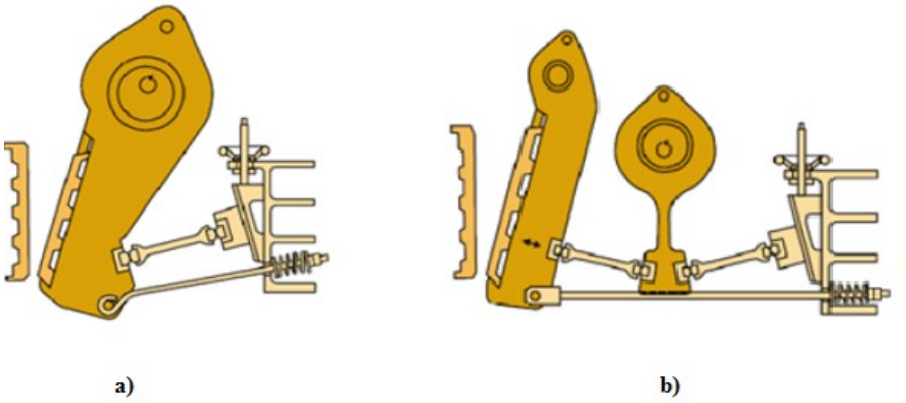


Slika 3-4. Principi djelovanja uređaja za sitnjenje (Bedeković, 2013)

Kod procesa sitnjenja prisutan je nizak stupanj iskorištenja uložene energije, što je kod drobljenja posljedica nanošenja naprezanja tj. naprezanje se nanosi na ukupni volumen materijala u prostoru drobljenja. Uslijed naprezanja dolazi do elastičnih deformacija koje se gube kao toplina, dok se veliki dio utrošene energije utroši na plastične deformacije.

Čeljusne drobilice najviše se koriste za primarno drobljenje. Prema konstrukcijskim karakteristikama postoje dvije izvedbe čeljusnih drobilica: čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom i čeljusne drobilice s dvije raspone ploče (Slika 3-5).

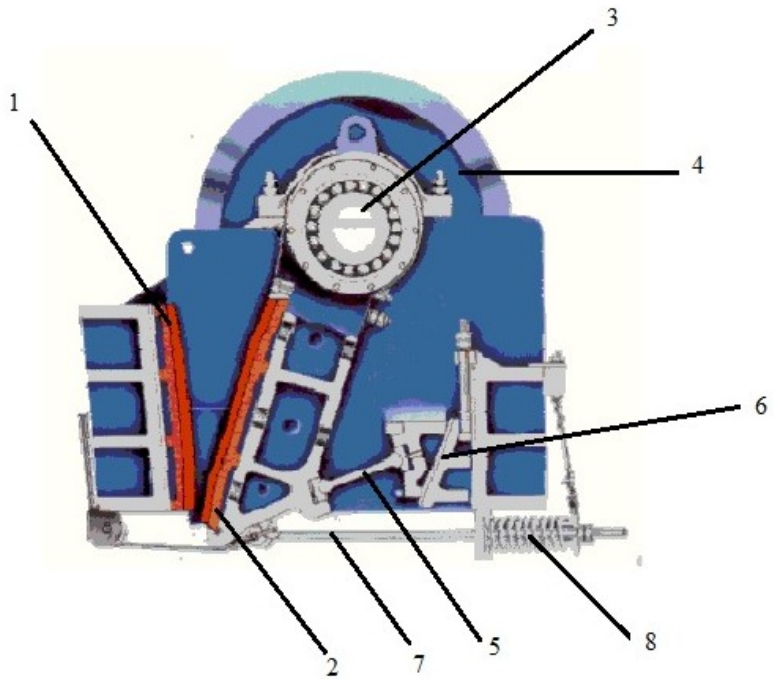
Sirovina u drobilicu ulazi kroz otvor na vrhu koji se naziva ždrijelo, a širina ždrijela naziva se zijev. Čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom imaju različit način rada od čeljusnih drobilica s dvije raspone ploče.



Slika 3-5. Čeljusna drobilica: a) s jednom rasponom pločom, b) s dvije raspone ploče (Bedeković, 2013)

Čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom imaju pokretnu čeljust ekscentrično ovješenu neposredno za pogonsko vratilo tj. da čeljust preuzima ulogu glavne poluge. Do drobljenja dolazi uslijed približavanja pomične čeljusti prema nepomičnoj, pa je glavni mehanizam drobljenja tlak. Kretanje čeljusti u gornjem dijelu je približno kružno, a u donjem izrazito eliptično. Osim tlaka javlja se i trenje, što uzrokuje veći sadržaj sitnih klasa u produktu i brže trošenje obloga čeljusti. Obloge čeljusti mogu biti glatke ili valovite pa se koriste za mekše materijale ili nazubljene za čvrste materijale (Bedeković, 2015).

Na slici 3-6. prikazani su dijelovi čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom.



Slika 3-6. Dijelovi čeljusne drobilice s jednom rasponom pločom (Bedeković, 2013)
(1- nepomična čeljust,2- pomična čeljust, 3- vratilo ekscentra, 4- zamašnjak, 5 – raspona ploča, 6- klin za regulaciju izlaza, 7- zatezna šipka, 8- opruga)

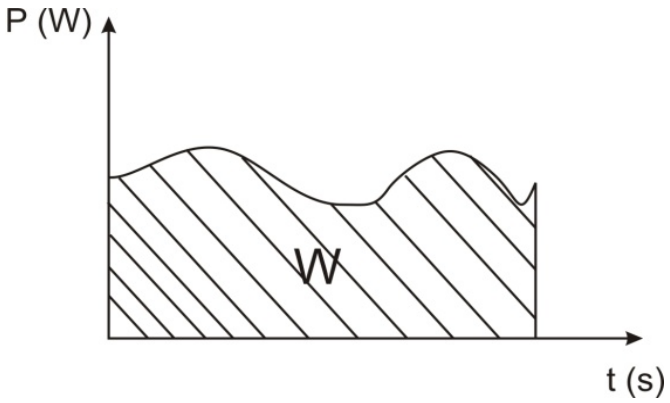
3.2.1. Mjerenje energije utrošene na drobljenje

Za drobljenje uzoraka različitih fizikalno-mehaničkih svojstava potrebna je i različita energija za njihovo sitnjenje. Energija utrošena za drobljenje uzorka može se procijeniti teorijski, pomoću zakona sitnjenja, prema Ritteru, Kicku i Bondu ili laboratorijski, mjerenjem električne snage na drobilici.

Rittinger je definirao prvi zakon sitnjenja prema kojem je energija potrebna za sitnjenje proporcionalna novonastalim (slobodnim) površinama tijekom sitnjenja. Kick je kasnije postavio drugu teoriju prema kojoj je specifična potrošnja energije tijekom sitnjenja proporcionalna smanjenju promjera promatranih čestica. Bond je temeljem rezultata eksperimentalnog rada predložio teoriju prema kojoj je uložena energija po toni obrnuto proporcionalna kvadratnom korijenu novostvorenih površina. Kickov zakon najbolje rezultate daje za drobljenje, Bondov daje najbolje rezultate za mljevenje, dok Rittingerov zakon daje najbolje rezultate za fino mljevenje (Bedeković, 2013).

Laboratorijski, energija potreba za drobljenje**,** se mjeri posredno**,** mjerenjem električne snage koju vuče trofazni asinhroni motor drobilice iz električne mreže.
Ako se energija mijenja, ovisno o vremenu, onda je energija u vremenu t jednaka površini koja se nalazi ispod krivulje snage (Slika 3-7).

$$W = \int p\,(t)dt \qquad [3\text{-}3]$$



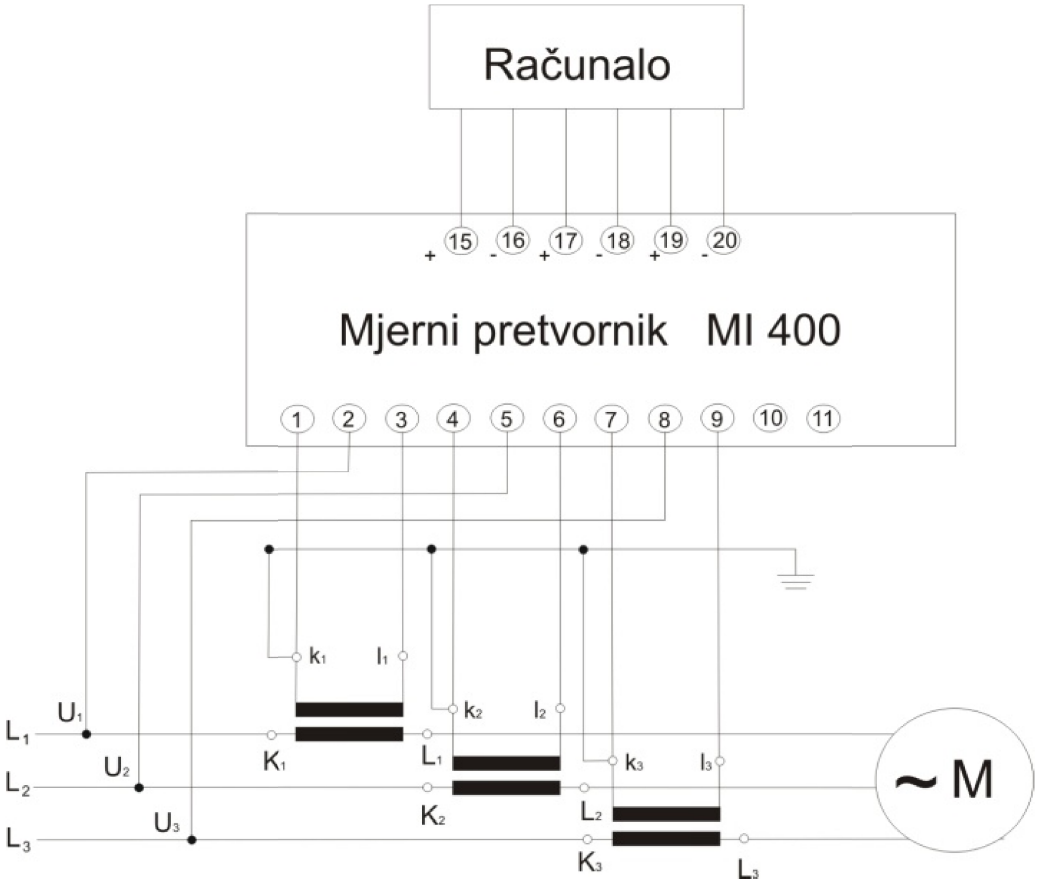
Slika 3-7. Dijagram snaga-vrijeme (Korman, 2008)

Mjerenje energije provodi se mjerenjem snage koju motor pri opterećenju uzima iz električne mreže i mjerenjem električne snage koju motor u praznom hodu uzima iz električne mreže. Razlikom snaga mjerenih pri opterećenju i u praznom hodu dobiva se energija potrebna za drobljenje.

U praksi se za mjerenje električne energije, u dužem vremenskom periodu, koriste električna brojila. Međutim, prosječno vrijeme drobljenja jednog uzorka iznosi tri sekunde, te je mjerenje električne energije primjenom električnog brojila neizvedivo.

U svrhu mjerenja upotrijebljen je pretvornik Iskra MI 400 koji mjeri prividnu, radnu i jalovu snagu te ih pretvara u napon na tri zasebna izlaza (Korman, 2008).

Na slici 3-8. prikazana je shema mjernog sustava.



Slika 3-8. Električna shema mjerenje snage (Korman, 2008)

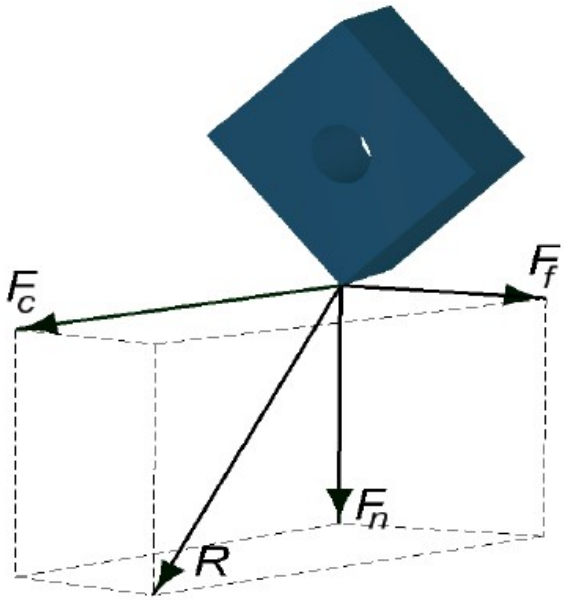
U ovim mjerenjima korištena su tri kanala (za tri naponska izlaza mjernog pretvornika). U LabVIEW-u programirana je rutina koja daje 20 uzorka po kanalu i prikazuje izmjerene vrijednosti na zaslonu u obliku dijagrama snaga-vrijeme, te ih bilježi na tvrdi disk u pripadnu datoteku (Korman, 2008).

Ispitivanje započinje pokretanjem elektromotora čeljusne drobilice. Nakon što se elektromotor čeljusne drobilice upusti u rad i dostigne stalnu, kontinuiranu brzinu u praznom hodu, započinje se sa bilježenjem podataka. Ubacivanjem uzorka stijene u ždrijelo čeljusne drobilice, tj. u trenutku kada čeljusti započinju s drobljenjem dolazi do naglog porasta snage. Za svaki uzorak dobiva se niz podataka promjene snage u vremenu, prikazanih na zaslonu monitora u obliku dijagrama snaga-vrijeme.

3.3. Teorija rezanja

Teorija rezanja stijena istražuje utjecaj uvjeta rezanja na tijek i način nastajanja odvojene čestice, te sile, naprezanja i deformacije, koje se pri tome javljaju (Korman, 2014). Rezultantna sila R koja se javlja pri rezanju, uslijed kontakta stijene i reznog alata, može se rastaviti na tri ortogonalne komponente (Slika 3-9):

- tangencijalna ili horizontalna sila F_c, koja djeluje u smjeru paralelnom s trajektorijom alata,
- normalna sila ili vertikalna sila F_n, koja djeluje okomito na trajektoriju alata,
- bočna sila F_f koja djeluje okomito na ravninu koja je određena prethodnim dvjema silama.



Slika 3-9. Rezultantna sila rezanja i njene komponente (Korman, 2014)

Brojni autori predložili su razne modele kako bi što bolje opisali veličine koje utječu na učinkovitost rezanja. Rezivost stijenske mase može se odrediti na temelju vrijednosti sila koje se javljaju na reznom alatu i energije koja se utroši na rezanje. Postoje četiri osnovna analitička modela pomoću kojih se može opisati teorija rezanja (Merchant-ov model, Evans-ov model, Nishimatsu-ov model, Detournay-ov i Defourny-ov model).

Merchant (1945) je predstavio model za proračun sila koje se javljaju na reznom alatu pri rezanju metala. Merchant-ov model primjenjiv je za rezne alate s oštricom u obliku klina, uz pretpostavku da do sloma dolazi po smičnoj ravnini tj. na mjestu gdje je vrh reznog alata okomit na pravac gibanja alata (Merchant, 1945). Evans (1962) je ustanovio da prilikom rezanja ugljena ne dolazi do kontinuiranog odvajanja odlomaka, nego da se odlomci ugljena odvajaju diskontinuirano uslijed vlačnih naprezanja. Na temelju ispitivanja i teoretskih razmatranja razvio je model za rezanje stijena sa reznim alatom u obliku klina (Evans, 1962). Nishimatsu (1972) je u svom modelu pretpostavio da do sloma materijala dolazi po posmičnoj ravnini, a oblik loma ima jednostavni geometrijski oblik klina. Na temelju oblika odlomljenih čestica, došao je do zaključka da pri rezanju stijena ne dolazi do plastičnih deformacija (Nishimatsu, 1972).

Detournay-ov i Defourny-ov model se zasniva na činjenici da se tlačna čvrstoća može procijeniti na temelju specifične energije koja se utroši na rezanje uzorka. Specifična energija određuje se pomoću uređaja za linearno rezanje, koji se sastoji od postolja na kojem je smješten pokretni dio uređaja. Na postolju uređaja nalazi prihvat za uzorak i pogonski motor. Detournay i Defournay (1992) su predložili model za rezanje stijena kvadratičnim reznim pločicama. Model je primjenjiv isključivo samo za male dubine rezanja, te uzima u obzir i stupanj istrošenosti reznog alata, odnosno primjenjiv je za oštre i istrošene rezne pločice (Detournay i Defourny, 1992).

Sile koje se javljaju pri rezanju ovise o vrsti stijene, dubini rezanja i kutu reznih pločica. Na temelju brojnih ispitivanja (Hood i Roxborough, 1992) utjecaja napadnog kuta na sile koje se javljaju na reznim alatima strojeva za iskop stijena vidljivo je da se prosječna sila (horizontalna i vertikalna) smanjuje sa povećanjem napadnog kuta. Vrijednosti sila za negativne napadne kutove mogu biti i do tri puta veće od vrijednosti sila za pozitivne napadne kutove. U pogledu učinkovitosti rezanja optimalni napadni kut reznog alata iznosi 20°, a daljnjim povećanjem vrijednosti napadnog kuta poboljšanja su marginalna, a vjerojatnost pucanja alata znatno se povećava.

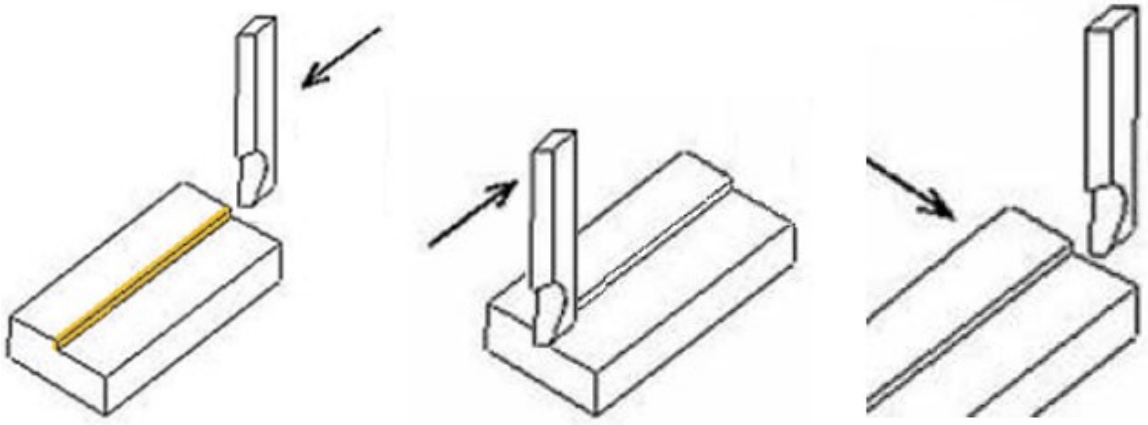
Kod reznih alata gdje je otklonski kut blizu ili jednak nuli sile na reznom alatu su velike obzirom na to da dolazi do povećanja trenja između reznog alata i stijena. Povećanjem kuta otklona do 5° sile se smanjuju, a daljnje povećanje kuta ne utječe na vrijednosti sile (Hood i Roxborough, 1992)

4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

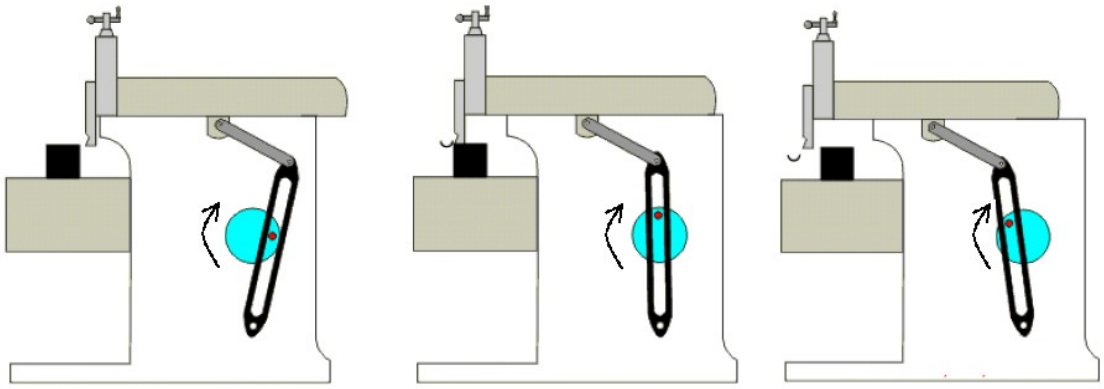
Na temelju dosadašnjeg istraživanja (Kujundžić et al., 2014), moguće je zaključiti da postoji zavisnost između energije drobljenja i fizikalno-mehaničkih svojstava.
Kako bi se odredila veza između energije drobljenja i energije rezanja, provedena su laboratorijska ispitivanja, a na temelju dobivenih rezultata provedena je analiza utjecaja fizikalno mehaničkih svojstava stijene na specifičnu energiju rezanja. U tu svrhu provedena su ispitivanja na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena.

4.1. Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena

Uređaj za pravolinijsko rezanje stijena je modificirana blanjalica za metal. Blanjanje je, postupak obrade odvajanjem čestica kojim se obrađuju ravne površine, različiti prizmatični utori, kanali, vodilice i dr.. Alat za blanjanje je nož definirane geometrije, koji dok reže obavlja pravocrtno glavno gibanje. Povrat alata u početni položaj je po istoj putanji. Nakon povratka alata u početni položaj slijedi posmak, koji je okomit na glavno gibanje i kod kratkohodnih blanjalica ga obavlja radni stol tj. obradak.
Dubina reza se određuje spuštanjem ili podizanjem noža u držaču alata (Slade, 2012). Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja prikazan je na slici 4-1. Glavno gibanje kod kratkohodne mehaničke blanjalice ostvaruje se kulisnim prigonom (Slika 4-2).



Slika 4-1. Shematski prikaz kratkohodnog blanjanja (Slade, 2012)



Slika 4-2. Način glavnog gibanja mehaničke blanjalice (Slade, 2012)

Uređajem za pravolinijsko rezanje stijena moguće je simulirati rad lančane sjekačice (Korman, 2014). Kod uređaja za linearno rezanje nož za obradu metala zamijenjen je reznom pločicom od volfram-karbida, a na nosaču alata je postavljen mjerni pretvornik sile koji se povezuje sa mjernim sustavom na računalo. Ovisno o izvedbi, pretvornik sile omogućuje bilježenje jedne ili više komponenti sile rezanja. Na slici 4-3. prikazan je uređaj za pravolinijsko rezanje s troosnim mjernim pretvornikom sile i mjerni sustav.



Slika 4-3. Uređaj za pravolinijsko rezanje s troosnim mjernim pretvornikom sile i mjerni sustav (Korman, 2014)

4.1.1. Mjerni pretvornik sile

Obzirom na zahtjeve prilikom mjerenja sila rezanja postoje različiti tipovi mjernih pretvornika sile. Ovisno o izvedbi pretvornika sile, sile se mogu mjeriti uslijed deformacije ili pomaka mjernog elementa. Deformacije mjernog elementa mogu se mjeriti pomoću elektrootpornih traka ili piezoelektričnih senzora (Youssef i El-Hofy, 2008).

Princip rada elektrootpornih traka temelji se na činjenici da kod metalnih vodiča uslijed mehaničkih deformacija, rastezanja kod vlačnog ili skupljanja kod tlačnog djelovanja, dolazi do relativnih promjena duljine, a time i do površine poprečnog presjeka, što rezultira promjenom otpora vodiča (Kujundžić, 2002):

S obzirom da trenutno ne postoji mjerni pretvornik sile komercijalne izvedbe koji bi odgovarao specifičnostima ovog ispitivanja, za potrebe ispitivanja doktorskog rada konstruiran je troosni pretvornik sile s elektrootpornim trakama (Korman, 2014). Pri odabiru materijala i dimenzija mjernih elemenata postavljaju se dva kontradiktorna zahtjeva, a to su krutost i osjetljivost. Krutost mora biti dovoljno velika kako bi mjerni elementi podnijeli dinamička naprezanja koja nastaju uslijed rezanja. Isto tako, krutost ne smije biti prevelika zato što osjetljivost pretvornika sile upravo ovisi o deformaciji elastičnog elementa u mjernom pretvorniku. Pretvornik sile sastoji se od krutih i elastičnih elemenata. Elastični elementi pretvornika sile su osmerokutni prsteni koji su učvršćeni vijcima između dvije krute ploče. Sila koja djeluje na prsten, mjeri se indirektno, mjerenjem deformacija pomoću elektrootpornih traka. Elektrootporne trake spojene su u Wheatstoneov most i mjere tri komponente sile (bočnu, horizontalnu i vertikalnu). Minimalna debljina stjenke mora zadovoljiti uvjet krutosti, odnosno deformacije nastale uslijed djelovanja maksimalne predviđene sile unutar elastičnog područja. Mjerni pretvornik sile projektiran je za maksimalne vrijednost sila do 5000 N (Korman, 2014).

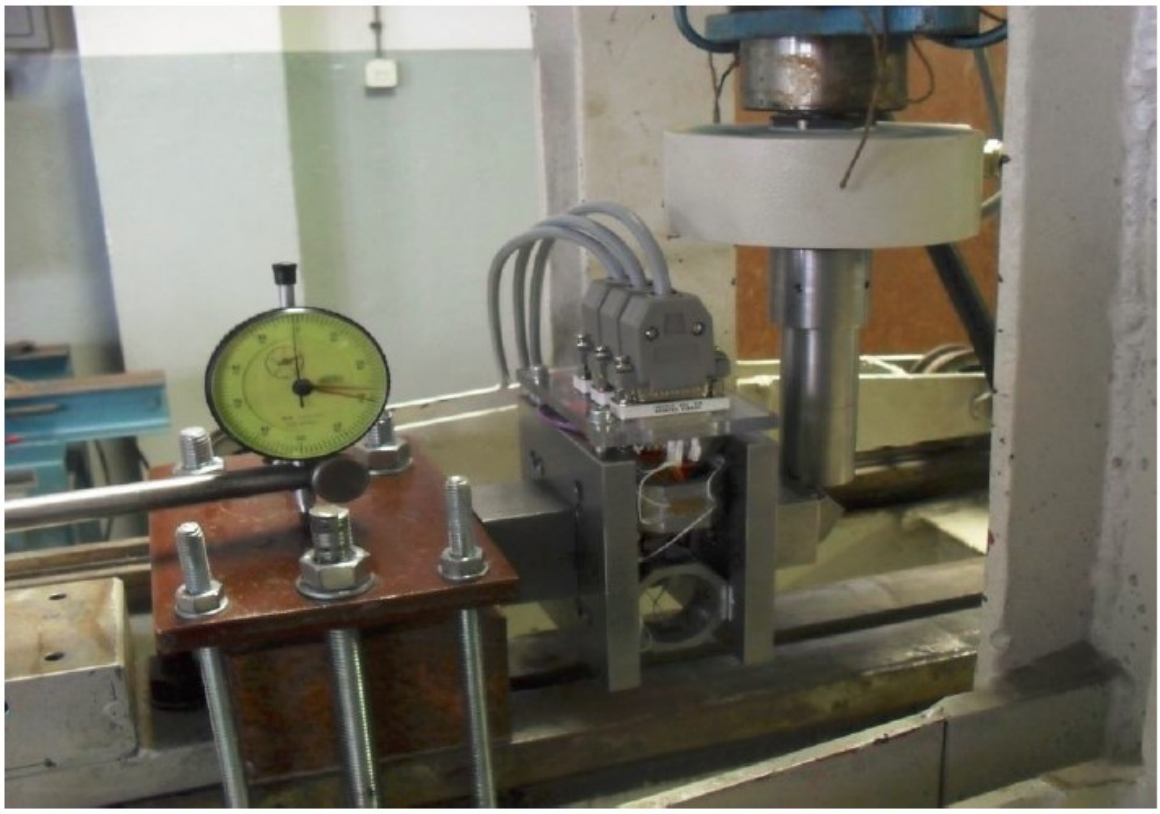
U svrhu ovog mjerenja korišten je uređaj za prikupljanje podataka„Hbm Spider 8“**,** sa četiri kanala**,** koji komuniciraju s računalom preko paralelnog sučelja. Kompletan nadzor nad uređajem i tijekom ispitivanja provodi se pomoću programa „Catman“. Programom „Catman“ moguće je vizualno pratiti tijek eksperimenta**,** odnosno promjenu sile duž reza (Korman, 2014). Mjerni sustav za mjerenje sile rezanja prikazan je na slici 4-4.



Slika 4-4. Mjerni pretvornik sile za mjerenje sile rezanja (Korman, 2014)

Prije početka mjerenja potrebno je povesti statičko umjeravanje kako bi se odredila veza između sile koja se nanosi na mjerni pretvornik sile i električnog signala na izlazu pretvornika. Umjeravanje je provedeno za sve tri osi pretvornika sile, pri čemu se sila kontinuirano nanosila od 0 N do 2000 N. Na ispitnom uređaju, tlačna sila postiže se pomoću hidrauličnog cilindra i ručne hidraulične pumpe. Radno gibanje klipa ostvaruje se pomoću hidraulične pumpe (Kujundžić, 2002).

Za vrijeme umjeravanja, prirast sile bio je konstantan, a intenzitet sile je registriran pomoću umjerenog pretvornika sile i uređaja za prikupljanje podataka „Spider8“. Neovisno o osi na koju se nanosila sila, prilikom umjeravanja mjerene su promjene izlaznog napona na sva tri kanala. Razlog tome je poprečna osjetljivost pretvornika sile. Kod idealnih pretvornika sile promjena intenziteta, sile u jednoj osi uzrokuje promjenu izlaznog napona, isključivo na jednom kanalu, dok na ostalima ne dolazi do promjene i izlaznog signala. Na temelju ispitivanja, dobivene su umjerene krivulje za pretvorbu vrijednosti izlaznog signala, u milivoltima/voltu za vrijednosti sile u njutnima (Korman, 2014). Na slici 4-5. prikazan je uređaj za umjeravanje pretvornika sile.



Slika 4-5. Uređaj za umjeravanje pretvornika sile (Korman, 2014)

4.1.2. Opis uzoraka

Za potrebe ispitivanja odabrani su uzorci stijena koji se međusobno razlikuju po svojim fizikalno mehaničkim svojstvima. Ukupno je pripremljeno pet uzoraka prikupljenih na sljedećim eksploatacijskim poljima: Špica, Vukov dol, Kraljev vrh, Brensberg i Lasinja.

Kamenolom „Špica“ smješten je na sjevernim obroncima Kalnika, u Varaždinskoj županiji, pokraj Ljubeščice. Kamenolom „Špica“ je ležište vapnenca trijaske starosti, a prevladavaju stromatolitni vapnenci, sitnozrnati vapnenci i dolomitizirani vapnenci.

Kamenolom „Vukov dol“, nalazi se otprilike 3 km sjeverno od mjesta Kašina. U ležištu se razlikuje nekoliko vrsta metamorfnih stijena: mramor, brečasti i kataklazirani mramor, kvarc-kalcitni filit, kataklazirani kvarc-kalcitni filit i argilošist.

Ležište dijabaza „Brenzberg-Točak“**,** nalazi se oko 4 km jugozapadno od Orahovice. Ležište je magmatskog postanka, nastalo kao intruzivno tijelo oblika sila utisnuto u metaklastite.

Kamenolom „Kraljev vrh“ (Jelenje vode) nalazi se na Medvednici. U ležištu se eksploatira magmatska stijena dijabaz, koja se zbog dobrih fizikalno-mehaničkih značajki koristi primarno u proizvodnji asfaltnih masa i habajućih slojeva u cestogradnji.

Kamenolom „Lasinja“ (Kamešnica) nalazi se kod Karlovca. U ležištu se eksploatira bazična žična stijena spilit.

Uzorci korišteni u ispitivanjima su u obliku valjka, a dimenzije su odabrane prema dimenzijama prihvata i maksimalnom hodu uređaja za pravolinijsko rezanje. Mase i dimenzije uzorka prikazane su u tablici 4-1., a fizikalno-mehanička svojstva u tablici 5-1. Na slici 4-6. prikazani su uzorci na kojima se provodilo laboratorijsko ispitivanje.

S obzirom da rezanjem nastaju odlomci male mase, zbog preciznijeg vaganja odabrani su uzorci s masom manjom od 1200 g.

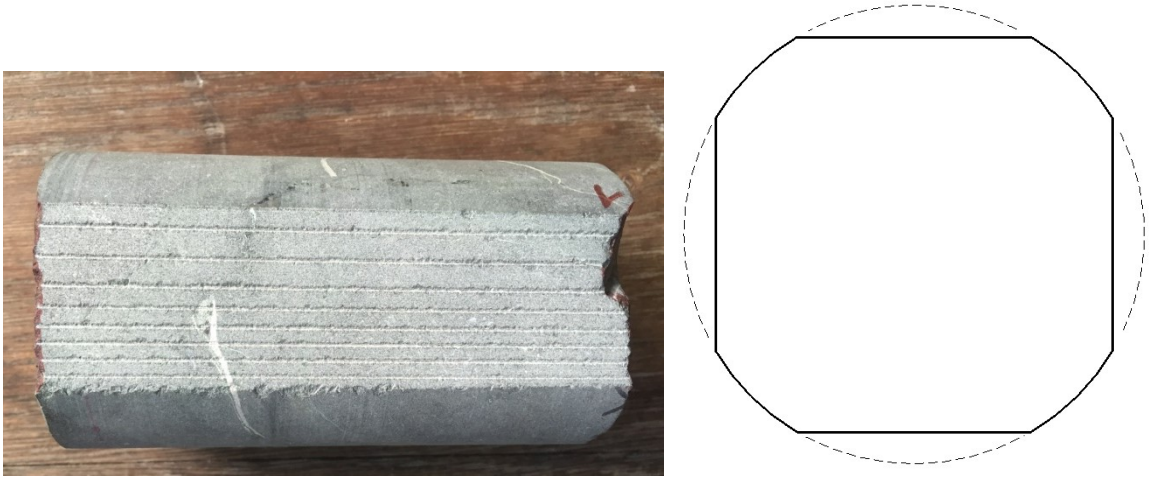
Tablica 4-1. Početne mase i dimenzije uzoraka

Kamenolom	**Početna masa uzorka (g)**	**Promjer uzorka (mm)**	**Prosječna dimenzija uzorka (mm)**
Špica	1095,84	64,00	137,20
Lasinja	748,86	64,00	87,56
Brensberg	1138,79	64,00	142,70
Vukov Dol	871,85	64,00	114,10
Kraljev vrh	937,16	64,00	112,30



Slika 4-6. Odabrani uzorci za laboratorijsko ispitivanje (Vukov Dol, Lasinja, Špica, Kraljev vrh, Brensberg)

Prije početka ispitivanja bilo je potrebno uređajem za pravolinijsko rezanje stijena poravnati uzorke sa sve četiri strane, kako bi se postigao što bolji prihvat čeljusti uređaja za pravolinijsko rezanje i kako bi se moglo napraviti potreban broj rezova (Slika 4-7). Drugi razlog poravnavanja uzoraka je taj što uzorci u obliku valjka nisu idealni, pa poravnavanjem uzoraka ravnina rezanja postaje paralelna sa trajektorijom reznog alata.



a) b)

Slika 4-7. Uzorak pripremljen za ispitivanje a) tlocrt, b) bokocrt

4.1.3. Metoda ispitivanja

Ispitivanja su provedena na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Ispitivanje se provodilo na 5 uzoraka valjkastog oblika s četiri ravne stranice. Prilikom svakog ispitivanja mjerena je tangencijalna, normalna i bočna komponenta sile, te je nakon svake serije ispitivanja određena masa uzorka prije i nakon izrade reza.

Mjerenje mase uzoraka provedeno je na digitalnoj vagi proizvođača „Mettler Toledo“. Razlučivost vage za uzorke mase do 1,2 kg jednaka je 0,01 g, a za uzorke do 6,1 kg jednaka je 0,1 g.

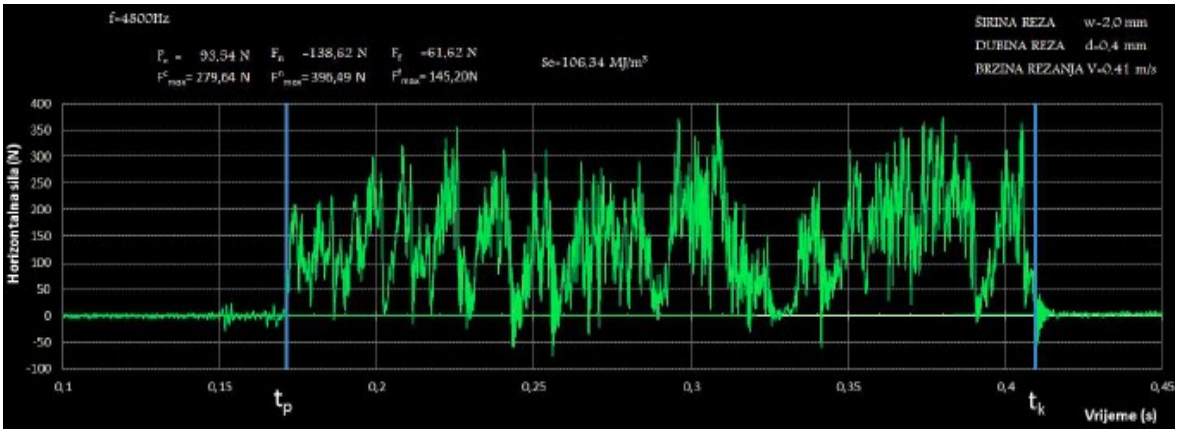
Masa odlomaka dobivena je kao razlika mase uzorka prije izrade reza i nakon izrade reza.

Rez se izrađivao pomoću reznog elementa lančane sjekačice oznake 1S, kod kojeg je napadni kut α = 7,4°, bočni kut β = 45° i bočni napadni kut γ= 0°. Tijekom svih ispitivanja dubina reza bila je konstantna i iznosila je 0,2 mm. Na svakom uzorku mjerenje mase odlomka i sile rezanja ponovljeno je minimalno šest puta.

Pomoću troosnog pretvornika sile izmjerene su vrijednosti pojedinačnih komponenti sile prilikom svakog reza. Izlazni signal pretvornika sile bilježen je brzinom

od 4800 uzoraka u sekundi tj. 4800 Hz. Vrijednosti izlaznog signala se pohranjuju u datoteku pri čemu je veličina električnog signala izražena u milivoltima/voltu [mV/V].

Na slici 4-8 prikazan je primjer rezultata mjerenja pomoću troosnog pretvornika sile koji prikazuje promjene tangencijalne sile u periodu rezanja. Tijekom svih laboratorijskih ispitivanja brzina rezanja bila je konstantna i približno je iznosila 0,4 m/s.



Slika 4-8. Primjer rezultata mjerenja pomoću troosnog pretvornika sile (Korman, 2014)

4.1.4. Obrada podataka

Vrijednosti izlaznog signala troosnog pretvornika sile izražena je kao omjer napona milivolti/voltu kao što je rečeno u poglavlju 4.1.3. U programskog paketa *„Microsoft Office Excel“* programirana je rutina koja pomoću kompenzacijske matrice vrijednosti električnog signal pretvara u veličine sile izražene u njutnima [N]. Također u programu se proračunavaju prosječne i maksimalne vrijednosti sile te specifična energija rezanja (Korman, 2014).

Nakon rješavanja kompenzacijske matrice dobivaju se tri jednadžbe (4-1, 4-2, 4-3) za svaku komponentu sile pomoću kojih se jednostavno, unošenjem neke izlazne vrijednosti napona izražene u milivoltima/voltima [mV/V], dobiva sila izražena u njutnima [N].

$$F_c = 18851{,}90 \cdot R_c + 3173{,}80 \cdot R_f + 70{,}80 \cdot R_n \quad [N] \quad [4\text{-}1]$$

$$F_f = 3328{,}90 \cdot R_c + 12579{,}73 \cdot R_f - 384{,}60 \cdot R_n \quad [N] \quad [4\text{-}2]$$

$$F_n = 1217{,}97 \cdot R_c - 199{,}98 \cdot R_f + 9748{,}42 \cdot R_n \quad [N] \quad [4\text{-}3]$$

Energija utrošena na rezanje dobivena je numeričkom integracijom tangencijalne sile F_c po prijeđenom putu noža s (jednadžba 4-4).

$$E = \int_{s_\mathrm{p}}^{s_\mathrm{k}} F_\mathrm{c}\, ds \qquad [4\text{-}4]$$

gdje je

E – energija [J]

s_k – kraj reza [cm]

s_p – početak reza [cm]

F_c – horizontalna (tangencijalna sila) [N]

Specifična energija rezanja S_e dobivena je iz omjera energije utrošene na rezanje E i razlike mase uzorka**,** prije m_p početka reza i masa nakon reza m_k (jednadžba 4-5).

$$Se = \frac{E}{m_\mathrm{p} - m_\mathrm{k}} \quad [\mathrm{J/kg}] \qquad [4\text{-}5]$$

gdje je

Se – specifična energija rezanja [J/kg]

E – energija [J]

m_p – masa uzorka prije reza [kg]

m_k - masa uzorka nakon reza [kg]

5. ANALIZA REZULTATA

Iz dosadašnjih istraživanja preuzete su izmjerene vrijednosti fizikalno mehaničkih svojstava i vrijednosti izračunate specifične energije drobljenja za 5 uzoraka, različitog mineralnog sastava. Mjerenja fizikalno mehaničkih svojstava provodila su se u sklopu laboratorijskog određivanja specifične energije drobljenja. Preuzete vrijednosti prikazane u tablici 5-1. (Korman, 2014).

Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja, u tablici 5-2. prikazani su rezultati sve tri komponente sile na temelju kojih je izračunata specifična energija rezanja stijena. Na temelju podataka iz tablice 5-1. i 5-2. konstruirani su dijagrami međusobne zavisnosti fizikalno mehaničkih svojstava o pojedinim komponentama sile i specifičnoj energiji rezanja.

Tablica 5-1. Rezultati mjerenja fizikalno mehaničkih svojstava i specifične energije drobljenja (Korman, 2008).

Kamenolom	**Vrsta stijene**	**Čvrstoća ispitana na uzorcima u obliku kocke $d = 5$**	**Tlačna Čvrstoća h/d 2,5 σ_t (MPa)**	**Vlačna čvrstoća σ_v (MPa)**	**Odskok Schmidtovog čekića d_s (ISRM)**	**Lomna žilavost σ_L**	**Specifična energija drobljenja *Sd* (kJ/kg)**
Špica	Vapnenac	141,00	122,20	10,62	53,00	3,02	1,65
Lasinja	Spilit	206,00	178,60	11,36	62,00	3,24	3,45
Brensberg	Dijabaz	219,10	189,90	13,11	60,00	4,12	3,51
Vukov Dol	Mramor	172,00	149,10	5,77	54,00	2,14	3,09
Kraljev vrh	Dijabaz	205,43	178,06	12,83	63,00	4,14	2,56

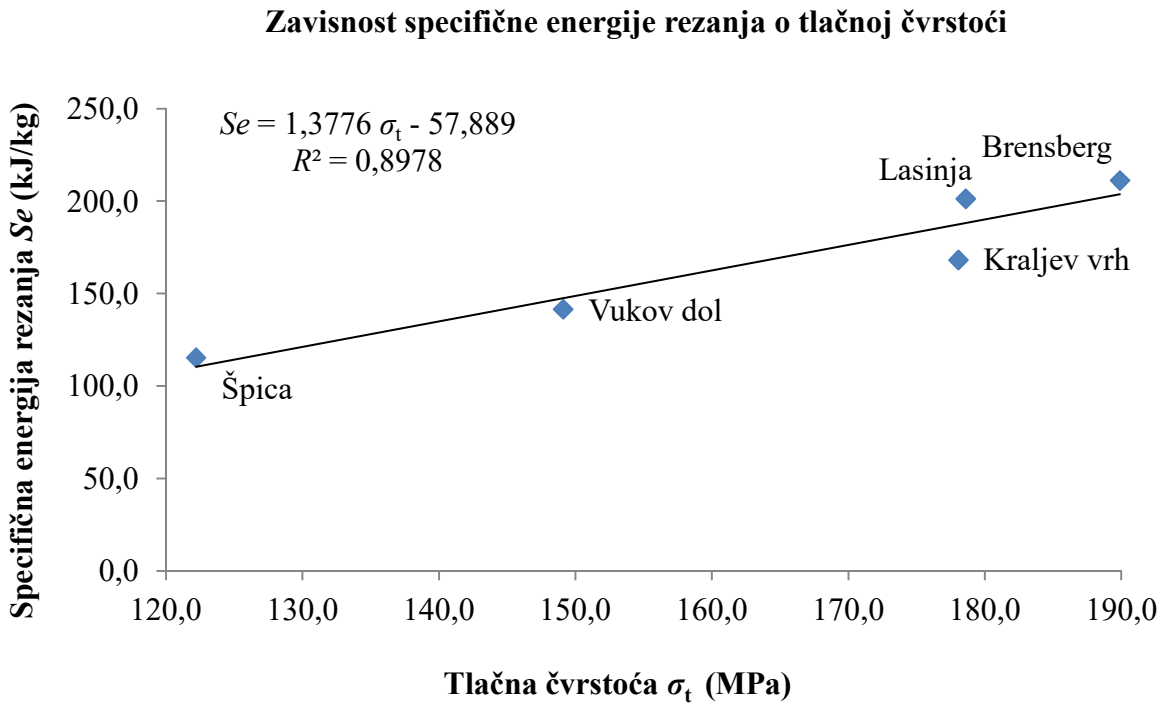
Tablica 5-2. Prosječne vrijednosti komponenti sile rezanja i specifične energije rezanja

Kamenolom	**Vrsta stijene**	**Prosječne vrijednosti sila**			**Specifična energije rezanja Se**
		Horizontalna	**Bočna**	**Vertikalna**	
		(N)	**(N)**	**(N)**	**(kJ/kg)**
Špica	Vapnenac	44,71	16,14	117,85	115,28
Lasinja	Spilit	61,31	29,85	235,36	201,24
Brensberg	Dijabaz	73,99	13,39	326,43	211,15
Vukov Dol	Mramor	35,75	14,00	87,00	141,49
Kraljev vrh	Dijabaz	69,09	37,73	263,36	168,11

Način na koji se ispitivalo kako i koliko specifična energija rezanja ovisi o ispitivanim fizikalno mehaničkim svojstvima provedena su ispitivanja korelacijske zavisnosti. Ispitivanja korelacijske zavisnosti se provode s ciljem određivanja zavisnosti neke pojave o više varijabli uz uvjet da veza među tim varijablama nije funkcionalna (Pauše, 1993).

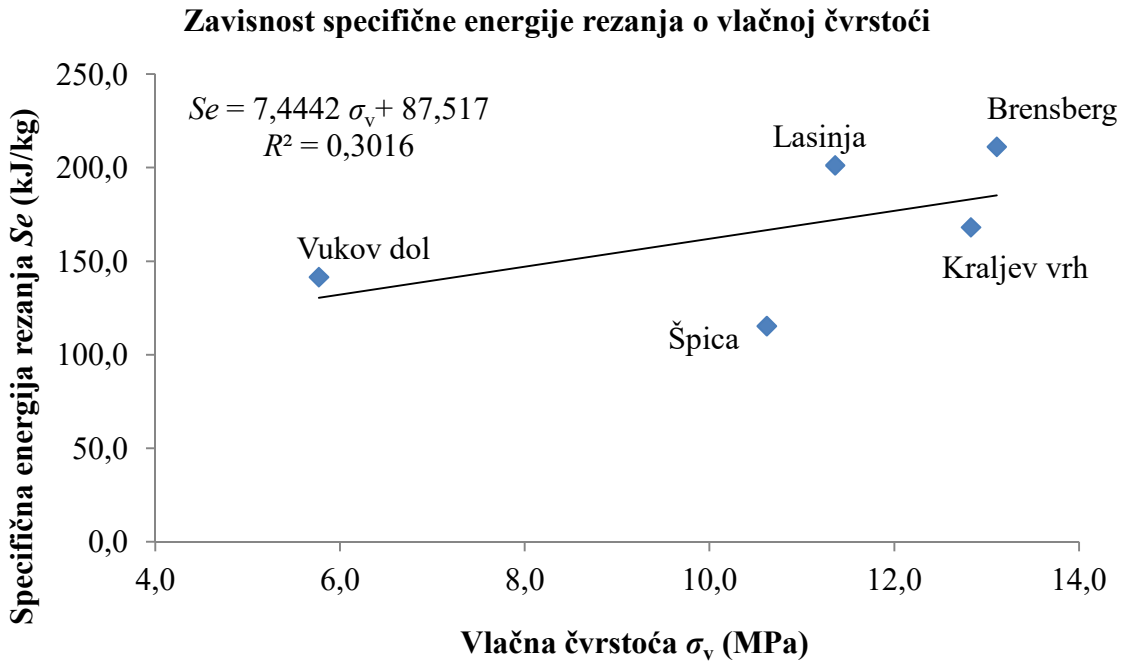
Veza između takvih varijabli naziva se stohastička veza, a zavisnost varijabli određena je prema određenom zakonu vjerojatnosti. Računanjem koeficijenta korelacije, prema teoriji najmanjih kvadrata, moguće je ustanoviti jačinu stohastičke veze među nezavisnim varijablama. Faktor korelacije R^2 služi kao mjera jačine stohastičke veze jedino u linearnoj korelaciji. Ukoliko je faktor korelacije $R^2 < 0,5$, kaže se da podaci slabo koreliraju, a ako je $R^2 \geq 0,5$, kaže se da podaci značajno koreliraju. Ispitivanja korelacije provedena su pomoću programa Microsoft Excel (Korman, 2008).

Nakon što je provedeno ovo ispitivanje uočena je najveća zavisnost specifične energije rezanja o tlačnoj čvrstoći na što ukazuje vrijednost faktora korelacije (R^2) koji iznosi 0,8978. Na slici 5-1. prikazana je linerana zavisnost specifične energije rezanja o tlačnoj čvrstoći.



Slika 5-1. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i tlačne čvrstoće

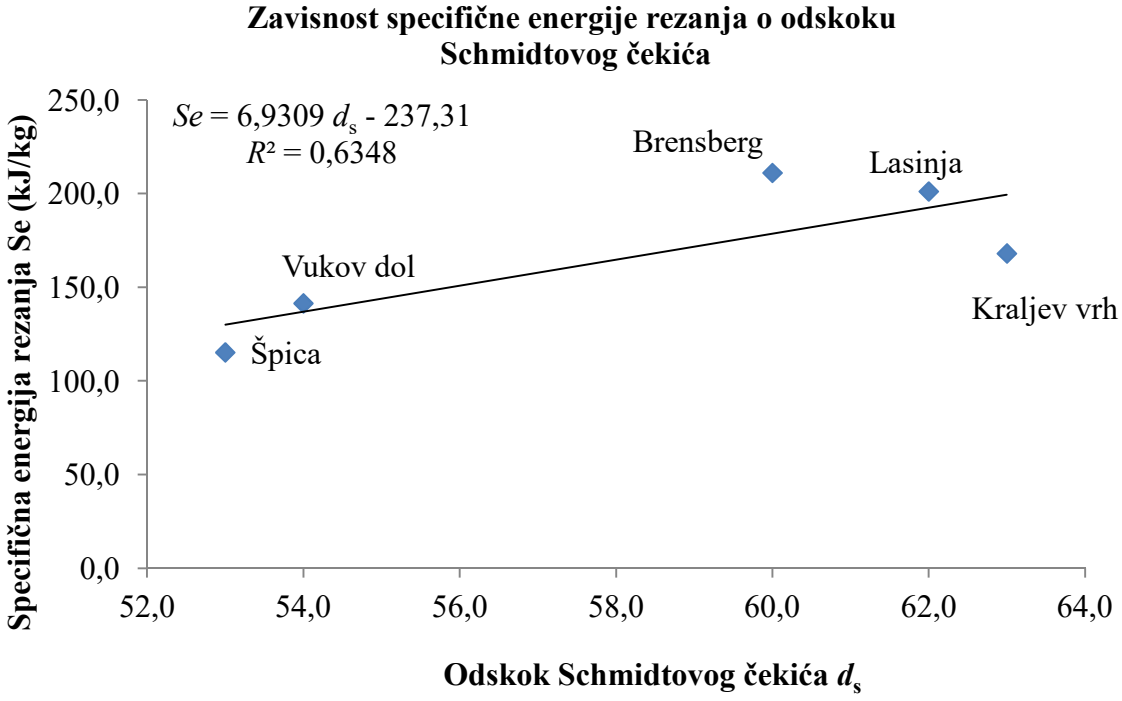
Iz dijagrama na slici 5-1. može se zaključiti da što je veća vrijednost tlačne čvrstoće stijene potrebna je veća energija potrebna za rezanje stijene. Od ispitivanih uzoraka najveću tlačnu čvrstoću ima uzorak dijabaza iz kamenoloma Brensberg, dok najmanju tlačnu čvrstoću ima uzorak vapnenca iz kamenoloma Špica. Na slici 5-2. prikazana je zavisnost specifične energije rezanja o vlačnoj čvrstoći.



Slika 5-2. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i vlačne čvrstoće

Iz dijagrama na slici 5-2. se može uočiti da vlačna čvrstoća ima mali utjecaj na specifičnu energiju rezanja, na što ukazuje niska vrijednost faktora korelacije. Najveća vrijednost vlačne čvrstoće izmjerena je na uzorku dijabaza iz kamenoloma Brensberg, dok je najmanja izmjerena vrijednost na uzorku mramora iz kamenoloma Vukov dol.

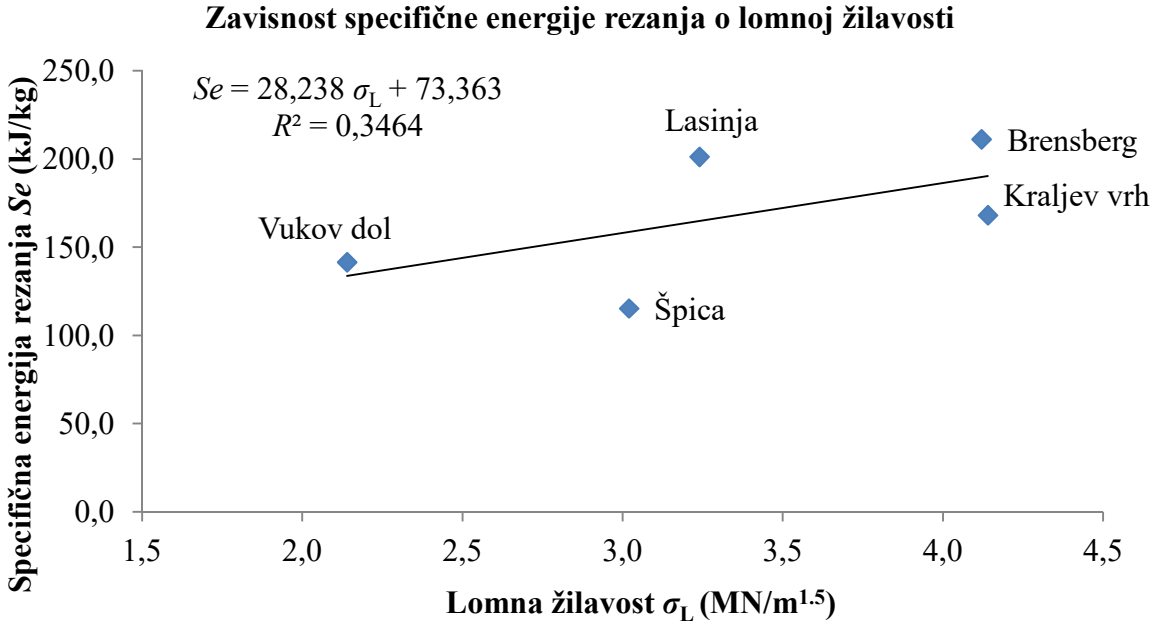
Na slici 5-3. prikazan je dijagram zavisnosti specifične energije rezanja o odskoku Schmitovog čekića.



Slika 5-3. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i tvrdoće

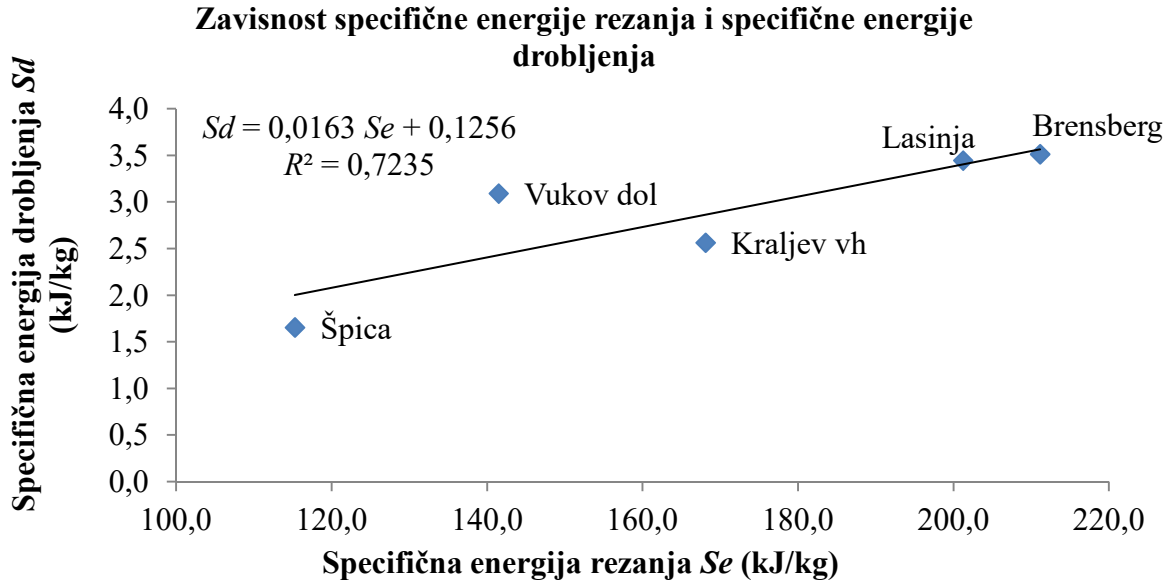
Iz dijagrama na slici 5-3. se može uočiti da tvrdoća ima relativno veliki utjecaj na specifičnu energiju rezanja na što ukazuje vrijednost faktora korelacije (R^2) koja iznosi 0,6348. Najveća tvrdoća izmjerena pomoću odskoka Schmidtovog je na uzorku dijabaza iz kamenoloma Kraljev vrh, dok je najmanja vrijednost tvrdoće izmjerena na uzorku vapnenca iz kamenoloma Špica.

Na slici 5-4. prikazana je zavisnost specifične energije rezanja o lomnoj žilavosti. Lomna žilavost nema značajan utjecaj na specifičnu energiju rezanja na što ukazuje faktor korelacije koji iznosi 0,3464.



Slika 5-4. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i lomne žilavosti

Kao što je već ranije spomenuto dosadašnjim istraživanjem (Kujundžić et al., 2014) došlo se do zaključka da tlačna čvrstoća ima najveći utjecaj na specifičnu energiju drobljenja. Stoga je na dijagramu na slici 5-5. prikazana zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja s obzirom na to da tlačna čvrstoća ima najveći utjecaj i na specifičnu energiju rezanja.



Slika 5-5. Linearna zavisnost specifične energije rezanja i specifične energije drobljenja

Iz dijagram na slici 5-5. može se uočiti da postoji zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja na što ukazuje faktor korelacije (R^2) koji iznosi 0,7235. Prema provedenoj regresijskoj analizi moguće je predvidjeti specifični utrošak energije drobljenja zavisno o specifičnoj energiji rezanja prema sljedećem izrazu:

$$Sd = 0{,}0163 \cdot Se + 0{,}1256 \text{ (kJ/kg)} \qquad [5\text{-}1]$$

gdje je:

Se – specifična energija rezanja (kJ/kg),
Sd – specifična energija drobljenja (kJ/kg).

Prema tome, moguće je zaključiti da se specifična energija drobljenja može odrediti na temelju specifične energije rezanja dobivene pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijena, čime je potvrđena hipoteza rada. Međutim, valja napomenuti da ova metoda ima određena ograničenja. Naime, specifična energija rezanja nije konstanta i ne ovisi isključivo o fizikalno mehaničkim svojstvima stijena. Dosadašnjim istraživanjima je ustanovljeno da specifična energija rezanja ovisi i o uvjetima tijekom rezanja, kao što su dubina reza i geometrijske veličine reznih pločica (Detournay et al., 2004). Stoga odnos specifične energije drobljenja i rezanja prikazan u jednadžbi 5-1 vrijedi isključivo za sljedeće uvjete rezanja (dubinu reza 0,2 mm, napadni kut α = 7,4°, bočni kut β = 45° i bočni napadni kut γ = 0°). Budućim istraživanjima potrebno je analizirati utjecaj dubine reza i geometrijskih veličina reznih pločica na odnos energije rezanja i drobljenja.

Prednost ove metode je mogućnost određivanja specifične energije drobljenja pomoću specifične energije rezanja što je brži i jednostavniji način od izravnog mjerenja energije na čeljusnoj drobilici.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je utjecaj fizikalno-mehaničkih svojstava stijena na specifičnu energiju rezanja. Specifična energija rezanja određena je laboratorijskim ispitivanjima na uređaju za pravolinijsko rezanje stijena. Iz dobivenih rezultata i rezultata prijašnjih ispitivanja određena je zavisnost specifične energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja. Na temelju teoretskih razmatranja i provedenih laboratorijskih ispitivanja proizlaze sljedeći zaključci:

- Ovim ispitivanjem je ustanovljeno da tlačna čvrstoća (R^2=0,8978) i tvrdoća (R^2= 0,6348) najviše utječu na specifičnu energiju rezanja, na što ukazuju vrlo visoki faktori korelacije. Nasuprot tome, vlačna čvrstoća i lomna žilavost imaju vrlo mali utjecaj na specifičnu energiju rezanja. Vrlo je bitno napomenuti da su navedene zavisnosti dobivene za dubinu reza 0,2 mm. Budućim istraživanjima potrebno je analizirati utjecaj dubine reza na zavisnost specifične energije rezanja o fizikalno mehaničkim svojstvima stijena.
- Na temelju vrijednosti fizikalno-mehaničkih svojstava (Korman, 2008) moguće je ustanoviti da magmatske stijene (Kraljev vrh, Lasinja, Brensberg) imaju veću tlačnu čvrstoću u odnosu na sedimentne stijene (Špica, Vukov dol).

  Prema tome, proizlazi zaključak da se specifična energija rezanja povećava proporcionalno sa tlačnom čvrstoćom stijene.
- Na temelju provedenih ispitivanja ustanovljena je značajna zavisnost energije drobljenja o specifičnoj energiji rezanja, čime je i potvrđena hipoteza rada. Iz provedenih analiza moguće je zaključiti da se rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjima, pomoću uređaja za pravolinijsko rezanje stijena, mogu koristi za procjenu specifične energije drobljenja.
- Specifična energija rezanja ne ovisi isključivo o fizikalno mehaničkim svojstvima stijena već i o dubini reza i geometrijskim veličinama reznih pločica. Prema tome, daljnjim istraživanjima potrebno je analizirati utjecaj navedenih veličina na odnos energije rezanja i drobljenja.

7. POPIS LITERATURE

1. BEDEKOVIĆ, G., 2013. *Interna digitalna skripta oplemenjivanje mineralnih sirovina,* RGN fakultet, Zagreb (neobjavljeno)

2. COPUR, H., BALCI, C., TUMAC, D., BBILGIN, N., 2011.: "*Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines.*", Int J Rock Mech & Min Sci, 48, 2, str. 269-282.

3. DETOURNAY, E., DRESCHER, A., MITAIM, S., DAGRAIN, F. RICHARD, T., 2004. *A novel apparatus to determine the rock strength parameters*, University of Minnesota, USA

4. DETOURNAY, E., DEFOURNEY, P.,1992.: *A phenomenological model for the drilling action of drag bits*. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. Vol. 29. No. 1. Pergamon.

5. EVANS, I., 1962.: *A theory of the basic mechanics of coal ploughing*, In Proceedings International Symposium on Mining Research, Pergamon Press, London., 2, str. 761-798

6. HOOD, M. C., ROXBOROUGH, F. F. (1992): *Rock breakage: mechanical*. SME mining engineering handbook, 1, str. 680-721.

7. HRŽENJAK, P., 2013. *Interna skripta mehanika stijena 1,* RGN fakultet, Zagreb (neobjavljeno)

8. HRŽENJAK, P., 2015. *Interna digitalna skripta mehanika stijena 2,* RGN fakultet, Zagreb (neobjavljeno)

9. KORMAN, T., 2008. *Utjecaj fizičko mehaničkih svojstava stijena na mehaničko usitnjavanje,* Diplomski rad, Zagreb, RGN fakultet

10. KORMAN, T., 2014., *Utjecaj konstrukcijskih i radnih veličina na učinak lančane sjekačice,* Doktorski rad, Zagreb, RGN fakultet

11. KORMAN, T., BEDEKOVIĆ, G., KUJUNDŽIĆ, T., KUHINEK, D., 2014. *Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher*, Physicochem. Probl. Miner. Process. 51(2), 2015, 461-475, RGN fakultet, Zagreb

12. KUJUNDŽIĆ, T., 2002. *Utjecajem veličine pri iskopu stijena hidrauličkim čekićem,* Disertacija, Zagreb, RGN fakultet

13. MERCHANT, M.E., 1945.: *Basic mechanics of the metal cutting process*. J. Appl. Mech.,66: str. 168-175.

14. NISHIMATSU, Y.,1972: *The mechanics of rock cutting*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9 ,str. 261- 270.

15. PAUŠE, Ž., 1993. *Uvod u matematičku statistiku*, Zagreb, Školska knjiga

16. SLADE, I., 2012. *Obrada materijala II*., Digitalni udžbenik, I. Tehnička škola Tesla, Zagreb

17. YOUSSEF, H. A., EL-HOFY, H., 2008. *Machining technology: machine tools and operations,* CRC Press