

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNIČKI FAKULTET U BORU

Vladimir N. Nikolić

**Definisanje modela za određivanje Bondovog
radnog indeksa izučavanjem meljivosti sirovina
nestandardne krupnoće**

doktorska disertacija

Bor, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
TECHNICAL FACULTY IN BOR

Vladimir N. Nikolić

**Defining a model for determining the Bond
work index by studying the grindability of raw
materials of non-standard size**

Doctoral Dissertation

Bor, 2022

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

.....

Prof. dr Milan Trumić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnčki fakultet u Boru

Članovi komisije:

.....

Prof. dr Maja Trumić, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnčki fakultet u Boru

.....

Prof. dr Predrag Lazić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

.....

dr Vladan Milošević, docent

Univerzitet u Beogradu, Tehnčki fakultet u Boru

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Izrada ove doktorske disertacije realizovana je na Katedri za Mineralne i reciklažne tehnologije, Tehničkog fakulteta u Boru, Univerziteta u Beogradu pod mentorstvom prof. dr Milana Trumića.

Veliku zahvalnost dugujem:

Prof. dr Milanu Trumiću, mom profesoru i mentoru, na ukazanom poverenju, sjajnim idejama, velikoj pomoći, razumevanju i podršci u svakom trenutku. Profesor Trumić je sa puno pažnje, saveta, motivacije i uz veliko zalaganje vodio izradu ove disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem članovima komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije prof. dr Maji Trumić, prof. dr Predragu Laziću i doc. dr Vladanu Miloševiću koji su svojim konstruktivnim, stručnim savetima i sugestijama dali veliki doprinos pri izradi doktorske disertacije.

Zahvaljujem se prof. dr Ljubiši Andriću, Mirku Maksimoviću, vlasniku firme I-Zeolit, mom dobrom prijatelju Aleksandru Đokiću, koji su mi omogućili da dobijem uzorke koji su korišćeni za ispitivanja u doktorskoj disertaciji.

Na kraju, ali ne i na poslednjem mestu, neizmerno se zahvaljujem mojoj porodici, supruzi Slađani i ćerci Vidi, roditeljima, Novici i Jasmini, bratu Nemanji, na ukazanoj bezrezervnoj podršci i razumevanju, безусловnoj ljubavi i ličnom odricanju tokom svih prethodnih godina mog školovanja i usavršavanja.

DEFINISANJE MODELA ZA ODREĐIVANJE BONDOVOG RADNOG INDEKSA IZUČAVANJEM MELJIVOSTI SIROVINA NESTANDARDNE KRUPNOĆE

SAŽETAK

Doktorska disertacija predstavlja rezultat ispitivanja uticaja krupnoće početnog uzorka na vrednosti Bondovog radnog indeksa određivanog laboratorijskim testom u Bondovom mlinu sa kuglama. Ispitivane su promene vrednosti Bondovog radnog indeksa (W_i) sa smanjenjem gornje granične krupnoće (GGK) početnog uzorka. Ispitivanja su vršena standardnim Bondovim postupkom za određivanje meljivosti.

Utvrđeno je da Bondov radni indeks (W_i) nije konstantan i da se povećava sa smanjenjem GGK početnog uzorka. Utvrđene su promene parametara Bondove jednačine u zavisnosti od smanjenja GGK početnog uzorka. Ispitivanja su vršena na sirovinama različitog mineraloškog sastava i fizičko-hemijskih osobina (zeolit, dacit i bazalt).

Na osnovu utvrđenih zavisnosti definisani su postupci za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće, i za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima standardne krupnoće ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće.

Za definisane postupke za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće, i za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima standardne krupnoće ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, dobijena odstupanja bila su manja od 2 %, što je daleko manje od odstupanja ostalih alternativnih procedura predloženih u postojećoj literaturi.

Ključne reči: Bondov radni indeks, nestandardna krupnoća, meljivost, usitnjavanje

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Mineralne i reciklažne tehnologije

UDK broj: 622.73:621.926.3(043.3)

**DEFINING A MODEL FOR DETERMINING THE BOND WORK INDEX BY
STUDYING THE GRINDABILITY OF RAW MATERIALS OF
NON-STANDARD SIZE**

ABSTRACT:

The doctoral dissertation is the result of examining the influence of the size of the initial sample on the values of the Bond work index determined by the laboratory test in the Bond ball mill. Changes in the value of the Bond work index (W_i) with a decrease of its top size (TS) of the initial sample were examined. The tests were performed using the standard Bond procedure for determining grindability.

It was found that the Bond work index (W_i) is not constant and increases with decreasing TS of the initial sample. Changes in the parameters of the Bond equation depending on the decrease in the TS of the initial sample were determined. The tests were performed on raw materials of different mineral composition and physico-chemical properties (zeolite, dacite and basalt).

Based on the established dependencies, procedures have been defined for determining the Bond work index on non-standard size samples, if it is known what the Bond work index is for a standard size sample, and for determining the Bond work index on standard size samples if it is known what the Bond work index is for the sample non-standard sizes.

For defined procedures for determining the Bond work index on non-standard size samples, if the Bond work index is known for the standard size sample, and for determining the Bond work index on standard size samples, if the Bond work index for the non-standard size sample is known, the error was less than 2 %, which is far less than the exclusion of other alternative procedures proposed in the existing literature.

Keywords: Bond work index, non-standard size, grindability, comminution.

Scientific field: Mining engineering

Field of Academic Expertise: Mineral and recycling technologies

UDC number: 622.73:621.926.3(043.3)

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. USITNJAVANJE	3
2.1. Oslobođenost i krupnoća sirovine	3
2.1.1. Oslobođenost minerala	3
2.1.2. Granulometrijski sastav	4
2.2. Osnovi teorije usitnjavanja	5
2.2.1. Principi usitnjavanja	7
2.2.2. Teorija usitnjavanja	9
2.2.3. Alternativni odnos energije-krupnoće čestice	13
2.3. Bondov radni indeks	15
2.3.1. Određivanje Bondovog radnog indeksa u laboratorijskom mlinu sa kuglama	17
2.3.2. Skraćeni postupci i predložene metode za određivanje Bondovog radnog indeksa	20
3. CILJ ISTRAŽIVANJA	62
4. EKSPERIMENTALNI DEO	64
4.1. Priprema uzoraka za ispitivanje	64
4.2. Metod rada	65
4.3. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka	65
5. REZULTATI I DISKUSIJA	69
5.1. Postupak određivanja Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće ..	71
6. ZAKLJUČAK	78
LITERATURA	80
BIOGRAFIJA AUTORA	88

1. UVOD

Usitnjavanje spada u red procesa koji se odnose na smanjenje krupnoće čestica, i predstavlja kritičan i energetski vrlo intenzivan korak u pripremi mineralnih i sekundarnih sirovina koji čine osnovu industrijske i potrošačke ekonomije. Proces usitnjavanja posmatran je i proučavan decenijama unazad. Usitnjavanje je proces u kome se smanjuje krupnoća sirovine u ciklusima drobljenja i mlevenja (*Lynch and Rowland, 2005*), i predstavlja proces ponavljanja, nastavlja se sve dok se čestice od početne krupnoće ne usitne do zahtevane krupnoće. Usitnjavanjem sirovine se dobijaju korisne informacije u vezi sa mehanizmom loma stene, koje se mogu koristiti za poboljšanje procesa prerade, uključujući projektovanje ciklusa mlevenja i optimizaciju rada mlinova. Projektovanje opreme za usitnjavanje sirovine i vreme trajanja u kome sirovina ostaje u zoni usitnjavanja kontrolišu krajnju krupnoću proizvoda.

Mlevenje, kao poslednji ciklus procesa usitnjavanja, energetski je najintenzivniji proces u preradi mineralnih sirovina, i može predstavljati više od 50 % operativnih troškova u postrojenjima za preradu minerala (*Radziszewski, 2013*). Pored toga, troškovi habanja čeličnih meljućih tela koje se koriste u procesima mlevenja, takođe su veoma važni, i utiču u znatnoj meri na ukupne operativne troškove prerade. Proizvodnja preusitnjene sirovine tokom mlevenja u količinama znatno većim od projektovanih vrednosti (finog materijala) takođe povećava troškove mlevenja i nepovoljno utiče na dobijanje proizvoda zahtevane krupnoće (*Aras et al., 2012*). U procesu mlevenja krupnoća sirovine se smanjuje kombinacijom udara i abrazije, bilo na suvo, ili češće u vodenoj suspenziji. Proces se izvodi se u cilindričnim čeličnim bubnjevima koji sadrže meljuća tela koja se kreću slobodno unutar mlina, čime se usitnjavaju čestice sirovine. Svrha procesa mlevenja je zadovoljavajući stepen oslobađanja korisnih minerala pri ekonomski prihvatljivim parametrima (*Wills and Finch, 2016*).

Teorija usitnjavanja bavi se odnosom između ulazne energije usitnjavanja i raspodele granulometrijskog sastava proizvoda dobijenog od zadate početne krupnoće. Testovi meljivosti imaju za cilj da procene potrošnju energije potrebnu za mlevenje i određivanje parametra za izbor mlina. Bondov standardni test, iako je industrijski standard, može zahtevati do 10 kg početnog uzorka, i izvođenje testa zahteva puno vremena. Prema standardnom Bondovom postupku, radni indeks se određuje simulacijom suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu u Bondovom mlinu sa kuglama do postizanja 250 % cirkulativne šarže (*Bond, 1949, 1952, 1961*). Za Bondov test je potrebno 7 - 10 ciklusa mlevenja, što pokazuje da je postupak vremenski dug i složen, i da je zato podložan greškama.

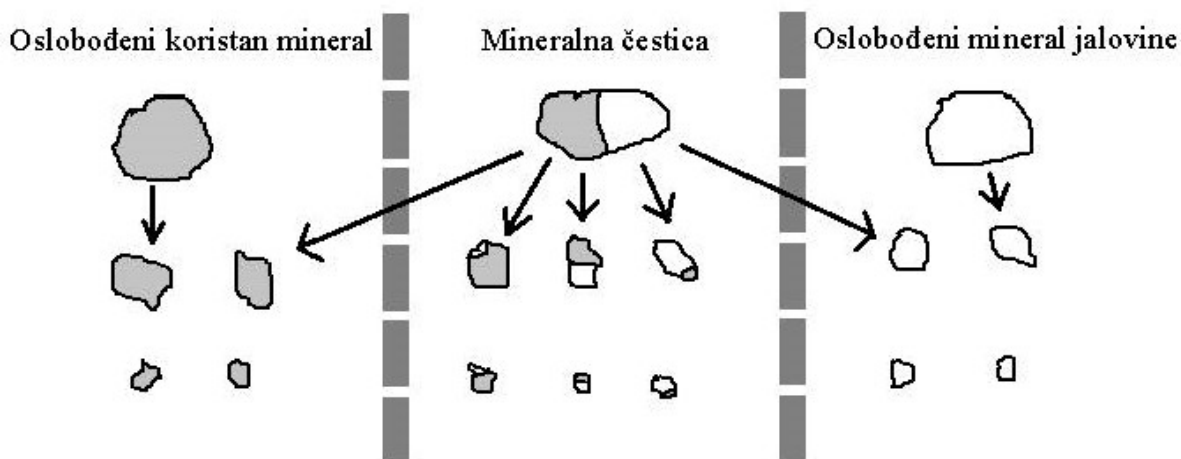
Bondov test i proračuni dobijenih rezultata pomoću Bondove jednačine su se pokazali kao izuzetno pouzdani za procenu potrebne energije za usitnjavanje sirovine u industrijskim uslovima, i zbog toga se Bondov test meljivosti široko koristi za procenu potrebne snage za mlevenje sirovine u mlinu sa šipkama i mlinu sa kuglama, i za izbor opreme u postrojenjima za usitnjavanje (*Babu and Cook, 1973; Tavares et al., 2012*). Zbog poteškoća u određivanju Bondovog radnog indeksa standardnom metodom, mnogi istraživači su razvili alternativne metode i postupke za izvođenje ovog testa koje će sam test pojednostaviti, i skratiti pojedine korake standardnog testa. Upotreba Bondove standardne metode u postrojenjima za mlevenje je veoma česta, jer daje zadovoljavajuće rezultate. Uprkos tome što ima mnogo prednosti, ova metoda ima i određene nedostatke, traje dugo i zahteva poseban mlin za mlevenje uzoraka. Često se dešava u industriji da su prisutni uzorci manji od - 3,35 mm, što može predstavljati problem, da li se na takvim uzorcima može odrediti Bondov radni indeks. Bond (1961) nije dao odgovor na ovo pitanje, već zahteva u svom testu meljivosti da krupnoća svih uzoraka mora biti krupnoće manje od 3,35 mm. U tom slučaju, meljivost finih sirovina se može odrediti iz podataka iz postrojenja koji se koriste za izračunavanje Bondovog radnog indeksa u tom postrojenju. Veoma mali broj istraživača se bavio ovom problematikom, i to je osnovni razlog zbog koga se u ovoj disertaciji obrađuje tema „Definisanje modela za određivanje Bondovog radnog indeksa izučavanjem meljivosti sirovina nestandardne krupnoće“.

2. USITNJAVANJE

2.1. Oslobodenost i krupnoća sirovine

2.1.1. Oslobodenost minerala

Glavni cilj postrojenja za preradu mineralnih sirovina je da odvoji korisne komponente od drugih, manje korisnih komponenata, ili jalovine (*Napier-Munn et al., 1999*). Oslobodenost korisnih minerala iz jalovine postiže se smanjenjem krupnoće ili usitnjavanjem (*Ipek and Goktepe, 2011*), što podrazumeva drobljenje i mlevenje do takve veličine da se dobije mešavina dva proizvoda, relativno oslobođene čestice minerala i jalovina. Cilj usitnjavanja je oslobađanje što je moguće krupnije veličine čestice. Ako se postigne takav cilj, onda se ne šteti samo energija, već se i smanjuje količina finog proizvoda, pri čemu naredni ciklusi izdvajanja korisnih minerala postaju lakši i ekonomski isplativiji za rad (*Wills and Finch, 2016*). Prema *Lynch (2015)* oslobađanje minerala je fenomen gde se „izvorne čestice sa datim mineralnim sastavom lome u svoje potomke manjih dimenzija (krupnoće) sa nizom mineralnih sastava“, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Prikaz oslobađanja minerala tokom lomljenja (*Lynch, 2015*)

Idealna krupnoća proizvoda potrebna za pravilno oslobađanje minerala jedan je od glavnih projektantskih kriterijuma bilo kog ciklusa usitnjavanja. Pravilno oslobađanje minerala je neophodno za naredne procese, kako bi se oslobođeni minerali izdvojili u koncentratu. Grubo mlevenje može dovesti do manjeg sadržaja korisnog minerala u koncentratu, dok fino mlevenje može biti negativno sa ekonomske strane zbog potrošnje električne energije i meljućih tela. Mlevenje je često najveći potrošač energije, gde potrošnja energije na mlevenje ide do 50 % od

ukupno utrošene energije u celom postrojenju za preradu minerala (*Aras et al., 2012; Radziszewski, 2013; Ebadnejad, 2016; Heiskari et al., 2019*). Pošto se mlevenjem postiže oslobađanje korisnog minerala od jalovine, tako je i proces mlevenja presudan za efikasno odvajanje minerala. Da bi se dobili koncentracije zahtevanog kvaliteta sa malim prisustvom jalovine, često je sirovinu potrebno usitniti do fine krupnoće (< 100 μm). Fino mlevenje povećava troškove energije i može dovesti do stvaranja vrlo finih čestica (*Gent et al., 2012*), koje se teško mogu tretirati nekim procesom koncentracije, i na taj način se mogu izgubiti u jalovini, ili čak odbaciti pre procesa koncentracije.

2.1.2. Granulometrijski sastav

Praćenje bilo kod istraživanja u procesima usitnjavanja određuje se raspodelom granulometrijskog sastava sirovine (*Napier-Munn et al., 1999*). Obično se opisuje analitičkim postupkom koji izražava opseg sirovine kao procenat mase koji predstavlja određenu klasu krupnoće. Primarna funkcija precizne analize raspodele granulometrijskog sastava je dobijanje kvantitativnih podataka o krupnoći i raspodeli krupnoće sirovine u uzorku (*Bernhardt, 1994; Allen, 1997*). Određivanje granulometrijskog sastava se vrši kako bi se odredila klasifikacija sirovine koja je podvrgnuta procesu razdvajanja u proizvode, u različitim uređajima za prosejavanje, kao i za poređenje rezultata različitih procesa separacije (*Drzymala, 2007*). Najčešći način određivanja raspodele granulometrijskog sastava sirovine je prosejavanjem. Analiza granulometrijskog sastava je proces koji treba da se zasniva na odobrenim standardnim metodama ispitivanja, i oslanja se na prosejavanje sirovine kroz set laboratorijskih sita. Sirovina se ručno seje na sitima otvora od 9,5 mm do 38 μm , pri čemu se otvor narednog sita u seriji smanjuje za veličinu otvora sita za $\sqrt{2}$ (9,5 mm, 6,7 mm, 4,75 mm, ..., 53 μm , 38 μm). Mogu se dobiti rezultati klasa krupnoća i za sita manjih otvora (20 μm), ali je to težak i dugotrajan proces. Postoji nekoliko načina na koje se mogu predstaviti rezultati analize granulometrijskog sastava (*Wills, 1992*):

1. Masa sirovine u svakoj pojedinačnoj klasi krupnoće,
2. Procenat mase u svakoj klasi krupnoće,
3. Kumulativni procenat mase sirovine koja je ostala na situ. Ovaj rezultat obuhvata svu sirovinu koja je ostala na sitima sa većim otvorima. Kumulativni procenat koji je ostao na situ, označava se dodavanjem znaka "+", pre vrednosti i jedinice (npr.: +75 μm).
4. Kumulativni procenat mase koji prolazi kroz određenu veličinu otvora sita. To obuhvata

sve čestice koje su manje od te određene veličine otvora sita. Kumulativni procenat koji prolazi kroz određenu veličinu otvora sita obeležava se znakom "-" pre vrednosti i jedinice (npr.: -75 μm).

Postoji širok spektar instrumentalnih i drugih metoda za analizu raspodele granulometrijskog sastava. Neke od najčešće primenjivanih metoda prikazane su u Tabeli 1. Uočava se efektivni raspon krupnoće prikazanih metoda u zavisnosti od toga da li je primenjen suvi ili mokri postupak i da li su podeljeni uzorci dostupni za dalje analize. Interesantno je da vrednosti raspona krupnoće u velikoj meri variraju u zavisnosti od metoda koja se primenjuje za analizu (*Wills and Finch, 2016*).

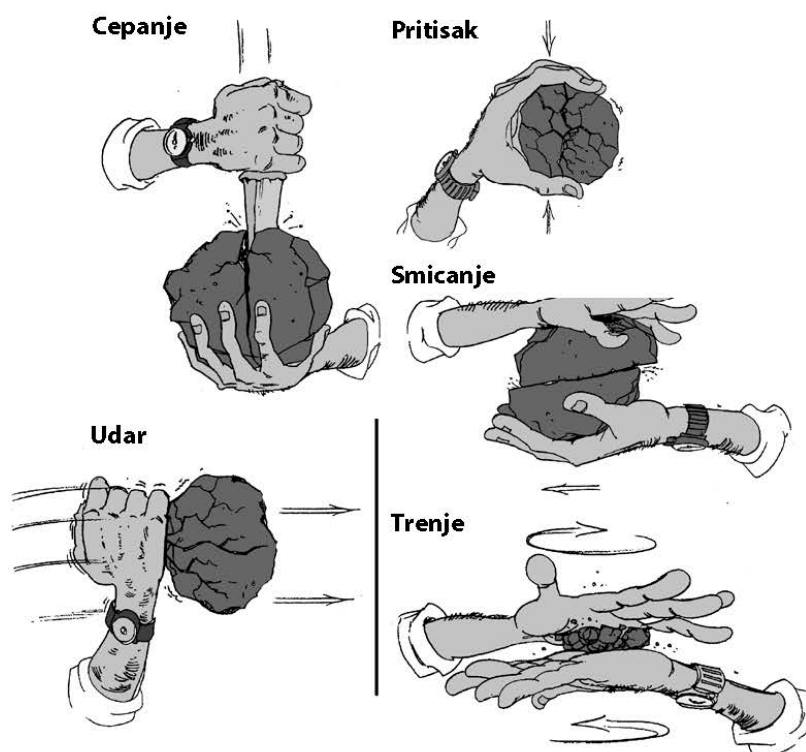
Tabela 1. Metode za određivanje raspodele granulometrijskog sastava (*Wills and Finch, 2016*)

Metoda	Suvo ili mokro	Frakcionisani uzorak?	Približno područje primene opsega krupnoće (μm)
Sitovna analiza	Suvo i mokro	Da	5 - 100.000
Laserska difrakcija	Suvo i mokro	Ne	0,1 - 2,500
Optička mikroskopija	Suvo	Ne	0,2 - 50
Elektronska mikroskopija	Suvo	Ne	0,005 - 100
Elutriacija (ciklosajzer)	Mokro	Da	5 - 45
Sedimentacija (gravitaciona)	Mokro	Da	1 - 40
Sedimentacija (centrifugalna)	Mokro	Da	0,05 - 5

2.2. Osnovi teorije usitnjavanja

Reč „usitnjavanje“ potiče od latinske reči „*comminuere*“ što znači učiniti malim (*Napier-Munn et al., 1999*). Korisni minerali su povezani sa mineralima jalovine, i zbog toga se moraju prvobitno osloboditi od jalovih minerala, pre nego što se pošalju na dalju separaciju. Ovaj postupak, oslobađanja korisnih minerala, se postiže usitnjavanjem, gde se krupnoća čestice postepeno smanjuje, sve dok se čisti minerali ne mogu odvojiti odgovarajućim procesima separacije.

Usitnjavanje je proces u kome se redukuje krupnoća sirovine u ciklusima drobljenja i mlevenja. (*Lynch and Rowland, 2005*). Osnovni procesi usitnjavanja su lomljenje i klasifikacija. Lomljenje je proces smanjenja krupnoće, a klasifikacija je postupak razdvajanja sirovine po klasama krupnoće, i može se vršiti prosejavanjem ili diferencijalnim kretanjem čestica u tečnostima ili gasovima. Proces usitnjavanja sirovine vrši se delovanjem spoljnih sila pritiska, cepanja, savijanja, smicanja ili udara (*Andrić and Trumić, 2013; Anticoi et al., 2018*). Delovanje pojedinih sila na sirovinu prilikom procesa usitnjavanja prikazano je na slici 2.



Slika 2. Metode usitnjavanja sirovine (*Metso, 2015*)

Drobljenje predstavlja prvi stadijum procesa usitnjavanja. Glavni cilj procesa drobljenja je oslobađanje korisnih minerala od minerala jalovine. Drobljenje se vrši kompresijom rude sa krutom površinom, ili udarom o krutu površinu koja ima ograničenu putanju kretanja. Drobljenje je obično suv proces i izvodi se u nekoliko ciklusa. Stepenu usitnjavanja drobilica je dosta mali, i kreće se od 3 do 6 u svakom pojedinačnom ciklusu drobljenja. Stepenu drobljenja se može definisati kao odnos maksimalne krupnoće čestice ulaza u proces drobljenje i maksimalne krupnoće čestice proizvoda procesa drobljenja, mada se koriste i druge definicije.

Mlevenje odvija se u cilindričnim obrtnim mlinovima, gde se sirovina dozira u bubanj mlina, bubanj mlina se okreće, što dovodi do pada meljućih tela i sirovine za mlevenje. Mlevenje se vrši prvenstveno silom udara i trenja, koji se javljaju u obrtnim, atricijskim i vibracijskim mlinovima (*Andrić and Trumić, 2013*). Mlevenje se obično izvodi na mokro, a na suvo se melju samo sirovine koje se podvrgavaju suvim postupcima koncentracije. Krupnoća proizvoda mlevenja zavisi od krupnoće zrna korisnih minerala, načina njihovog srastanja sa jalovim mineralima i primenjenog postupka koncentracije (*Magdalinović, 1999*).

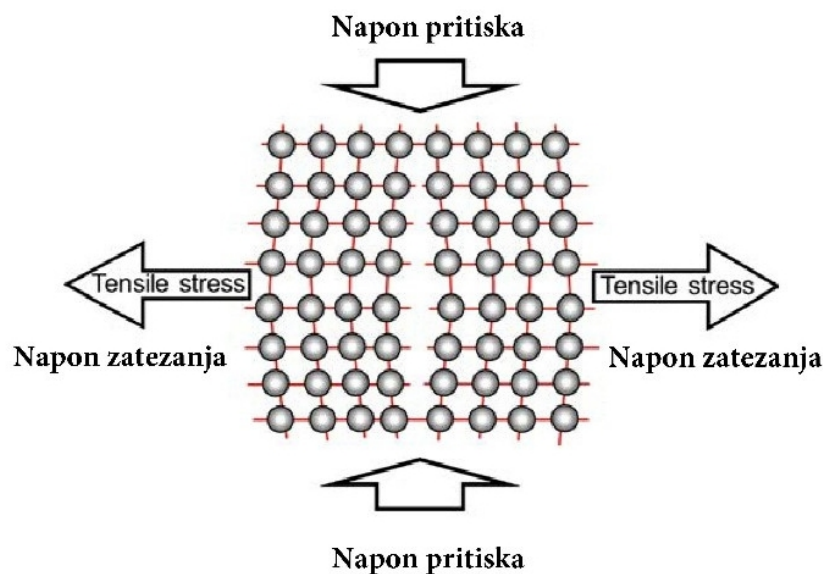
Primarni autogeni ili poluautogeni mlinovi su obrtni mlinovi koji mogu da melju vrlo krupne komade sirovine, i tako zamenjuju jedan ili dva ciklusa drobljenja. Ulogu meljućih tela u autogenim mlinovima imaju krupni komadi sirovine koji, padajući sa određene visine u mlinu, usitnjavaju sitnije čestice i istovremeno se i sami usitnjavaju.

Uređaji za usitnjavanje, koji su nešto između drobilica za usitnjavanje krutih materijala i mlinova za grubo mlevenje, su visoko pritiski valjci za mlevenje (*high pressure grinding rolls* - HPGR). Ovi uređaji se primenjuju za suvo drobljenje i koriste dva rotirajuća valjka koji pritiskom lome česticu na pojedinačne delove (*Schönert, 1988; Wills and Finch, 2016*). Energija potrebna za usitnjavanje u cilindričnim obrtnim mlinovima, može se znatno smanjiti primenom HPGR uređaja. Istraživanja su pokazala da HPGR uređaji smanjuju potrošnju električne energije između 20 - 50 % u odnosu na drobilice i mlinove (*Doll, 2015*).

Stirred mills se u skorije vreme sve više koriste u pogonima za pripremu mineralnih sirovina za fino mlevenje, mada se već dugi niz godina koriste u drugim industrijama (*Stehr and Schwedes, 1983; Wills and Finch, 2016*). Postoji vertikalna i horizontalna konfiguracija ovih mlinova. U poređenju sa mlinovima sa kuglama, kod ovih mlinova usitnjavanje se vrši se silom smicanja, a ne silom udara, i uglavnom se koriste za fino mlevenje (*Stief et al., 1987; Mazzinghy et al., 2012*). Ovi mlinovi takođe pružaju veći intenzitet snage (snaga po jedinici zapremine mlina, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$) u poređenju sa mlinovima sa kuglama (*Nesset et al., 2006*).

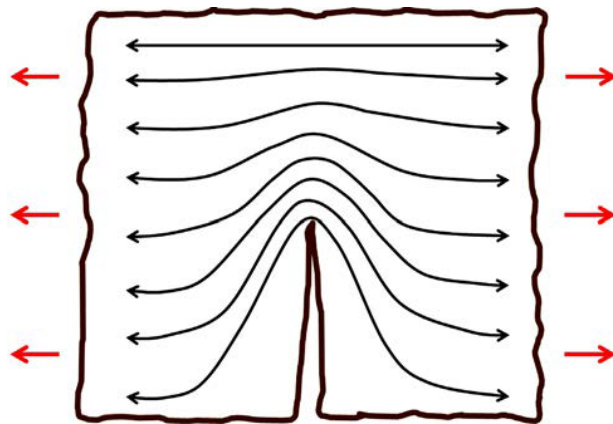
2.2.1. Principi usitnjavanja

Mnogi minerali imaju kristalnu strukturu u kojima su atomi pravilno raspoređeni u trodimenzionalne nizove. Raspored atoma određuje se veličinom i tipom fizičkih i hemijskih veza koje ih drže zajedno. U kristalnoj rešetki minerala, ove međuatomske veze su efikasne samo na malim rastojanjima, a mogu se pokidati spoljnim silama (silom pritiska i silom zatezanja). Takav napon može nastati zateznim opterećenjem ili opterećenjem pod pritiskom (slika 3).



Slika 3. Istezanje kristalne rešetke usled napona (*Wills and Finch, 2016*)

Čak i kada je spoljašnje opterećenje na sirovini ravnomerno, unutrašnji naponi nisu ravnomerno raspoređeni, zato što se sirovina sastoji od različitih minerala različite krupnoće. Podela napona zavisi od mehaničkih svojstava pojedinačnih minerala, ali ono što je još važnije zavisi od prisustva pukotina ili naprslina u matrici, koja deluju kao mesta za koncentraciju napona (slika 4).



Slika 4. Koncentracija napona na vrhu pukotine (*Wills, 2006; Wills and Finch, 2016*)

Inglis je pokazao da je povećanje napona na takvom mestu proporcionalno kvadratnom korenu dužine pukotine normalnoj na pravac pružanja napona. Zato postoji kritična vrednost za dužinu pukotine, na bilo kom određenom nivou napona, pri kojoj je povećani nivo napona na vrhu pukotine dovoljan da prekine atomsku vezu u tom trenutku. Takav prekid veze će povećati dužinu pukotine, povećaće na taj način koncentraciju napona i prouzrokovaće brzo širenje pukotine kroz matricu, i nakon toga će doći do lomljenja (*Inglis, 1913; Wills, 2006; Wills and Finch, 2016*).

Iako teorije usitnjavanja pretpostavljaju da je sirovina krta, kristali mogu da čuvaju energiju bez lomljenja i da je se oslobode tek kada se napon otkloni. Takvo ponašanje je poznato kao elastično. Kada dođe do lomljenja, deo sačuvane energije se pretvara u slobodnu površinsku energiju, koja je potencijalna energija atoma na novoproduženim površinama. Zbog ovog povećanja površinske energije, novonastale površine su često hemijski aktivnije, i lakše oksidišu kod sulfidnih minerala (*Inglis, 1913; Wills, 2006; Wills and Finch, 2016*).

Griffith je pokazao da sirovina gubi snagu širenjem pukotina kada je to energetski izvodljivo, odnosno kada je energija koja je oslobođena slabljenjem energije deformacije, veća od energije novonastale površine. Krte sirovine oslobađaju energiju deformacije uglavnom širenjem pukotina, dok tvrde i žilave sirovine mogu izgubiti energiju deformacije bez širenja pukotina, nego pomoću mehanizma plastičnog protoka, pri čemu atomi ili molekuli prelaze jedan preko

drugog, a energija se troši u deformisanju (izobličavanju) oblika sirovine. Širenje pukotina takođe može biti usporeno prilikom sudara sa drugom pukotinom ili spajanjem granica kristala (*Griffith, 1921; Wills, 2006; Wills and Finch, 2016*).

2.2.2. Teorija usitnjavanja

Teorija usitnjavanja govori o odnosu između potrošene energije sa smanjenjem krupnoće, i krupnoće čestice proizvedene od početne krupnoće. Teorija usitnjavanja otkriva da se može naći veza između energije potrebne za lomljenje sirovine i nove površine stvorene u procesu usitnjavanja. Ovaj odnos se može pokazati samo ako se energija koja se koristi za stvaranje nove površine može odvojeno meriti. Izvedeno je puno teorija, ali nijedna ne izgleda potpuno zadovoljavajuća. Sve teorije usitnjavanja prepostavljaju da je sirovina krta, tako da se zbog toga u procesu usitnjavanja ne adsorbuje energija koja se na kraju ne koristi u lomljenju (usitnjavanju) rude (*Wills and Finch, 2016*).

Najpoznatija opšta jednačina usitnjavanja zasnovana na energiji, je jednačina (1) koju su predstavili Walker i saradnici (*Walker et al., 1937; Morrell, 2004*). U diferencijalnom je obliku, i glasi:

$$dE = -C \frac{dx}{x^n} \quad (1)$$

gde je:

E - ukupna potrebna energija po jedinici mase (specifična energija);

x - faktor koji ukazuje na finoću proizvoda;

n - eksponent koji ukazuje na redosled procesa;

C - konstanta povezana sa karakteristikama sirovine i jedinica odabrana za uravnoteženje jednačine.

U integralnom obliku jednačina (1) glasi:

$$E = -C \int_F^P \frac{dx}{x^n} \quad (2)$$

gde su:

F i P - jedinice za krupnoću ulazne sirovine i krupnoću proizvoda.

Na osnovu jednačine koju se dali Walker i saradnici, promena krupnoće čestice je proporcionalna potrošenoj energiji po jedinici mase sirovine, a energija potrebna za malu promenu krupnoće neke sirovine proporcionalna je promeni krupnoće i obrnuto, proporcionalna krupnoći neke sirovine na stepen n (*Charles, 1957; Acar, 2013*). Na osnovu ove matematičke jednačine, predložene su razne teorije, od kojih nijedna nije u potpunosti zadovoljavajuća (*Wills and Atkinson, 1993*), ali se smatra da su one važne za određene krupnoće.

Kada je $n = 2$; 1 ili 1,5 dobijaju se tri zakona usitnjavanja, zakon Von Rittinger-a, Kick-a, i Bond-a.

Prvu i najstariju teoriju usitnjavanja predstavio je Paul von Rittinger 1867. godine (*Paul von Rittinger, 1867; Wills and Finch, 2016*). Prema Rittinger-ovom zakonu, energija potrošena u procesu usitnjavanja direktno je proporcionalna novostvorenoj površini:

$$E_{VR} = C \cdot \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{F} \right) \quad (3)$$

gde je:

E_{VR} - energija koja se korsi za usitnjavanje [kWh/t],

F i P - jedinice za krupnoću ulazne sirovine i krupnoću proizvoda.

C - konstanta koja zavisi od sirovine.

Drugu najstariju teoriju usitnjavanja, dao je Kick, i ona se može definisati kao „energija potrebna za stvaranje jednakih promena konfiguracije u geometrijskim sličnim telima jednakog tehnološkog stanja varira u zavisnosti od zapremine ili mase ovih tela“ (*Kick, 1885; Wills and Finch, 2016*). Prema Kick-ovom zakonu, energija potrebna za promenu proporcionalna je masi ili zapremini čestice.

$$E_K = C \cdot \left(\ln \frac{F}{P} \right) \quad (4)$$

gde je:

$\frac{F}{P}$ - odnos smanjenja.

Kick-ova teorija kaže da potrebna energija zavisi samo od odnosa smanjenja, a ne od originalne krupnoće čestica.

Često se naziva „trećom teorijom“, Fred C. Bond je izjavio da je ulazna energija proporcionalna novoj dužini vrha pukotine koja nastaje pri lomljenju čestica (*Fred C. Bond, 1952; Wills and Finch, 2016*). Bondova teorija je široko korišćena u industriji, i pretpostavlja da je energija korišćena za usitnjavanje obrnuto proporcionalna kvadratnom korenu prečnika čestice, kao što je prikazano u jednačini (5):

$$W = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (5)$$

gde je:

W - ulazna energija (rad) u kilovat po satima po metričkoj toni, [kWh/sht]

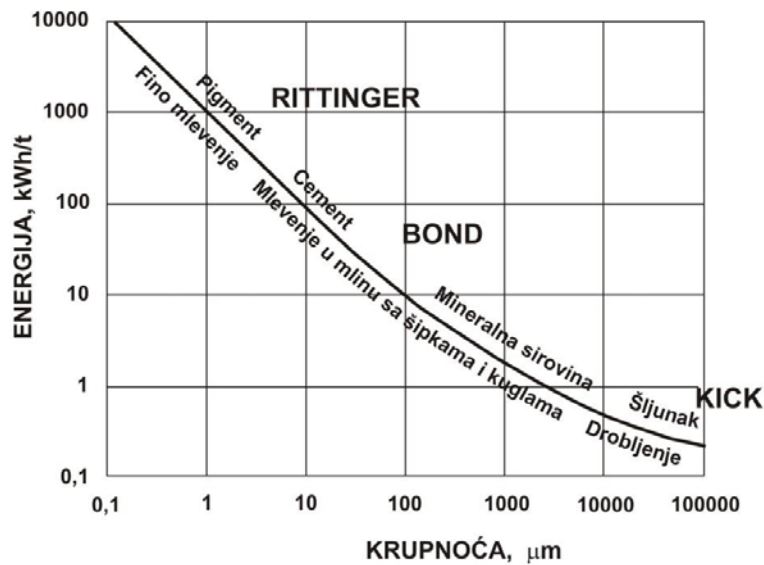
W_i - Bondov radni indeks u kilovat po satima po metričkoj toni, [kWh/sht]

P_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % proseva komparativnog sita, [μm].

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka [μm].

Sve tri teorije usitnjavanja mogu se izvesti iz osnovne diferencijalne jednačine (1) koju su stvorili Walker i saradnici (*Walker et al., 1937; Wills and Finch, 2016*). Energija potrebna za usitnjavanje raste kako se krupnoća čestice smanjuje, ili drugim rečima, finoća čestice se povećava. Tako su sve tri teorije usitnjavanja upotrebljive u određenom opsegu krupnoće čestice. Kick-ov zakon je primenljiv u opsegu grubih krupnoća čestica (za drobljenje), Bond-ov zakon za srednju krupnoću čestica (klasično mlevenje) i Rittinger-ov zakon u opsegu finog mlevenja. Tipične specifične vrednosti energije (u kWh/t) su:

- primarno drobljenje (1000 - 100 mm), 0,1 - 0,15 (kWh/t);
- sekundarno drobljenje (100 - 10 mm), 1 - 1,2 (kWh/t);
- grubo mlevenje (10 - 1 mm), 3 - 3,5 (kWh/t);
- fino mlevenje (1 - 0,1 mm), 10 (kWh/t).



Slika 5. Oblasti primenljivosti zakona usitnjavanja (*Todorović, 2016*)

Hukki (1962) je rekao da opšta jednačina za određivanje procesa usitnjavanja potiče iz Walker-ove jednačine (1) (*Hukki, 1962; Morrell, 2004*). Ako je eksponent n u jednačini (1) zamenjen vrednostima 2; 1,5 i 1, a zatim integrisan, dobijaju se jednačine koje su predložili von Rittinger, Bond i Kick:

$$E_{1-2} = C \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (6)$$

$$E_{1-2} = C \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (7)$$

$$E_{1-2} = C (\ln(x_1) - \ln(x_2)) \quad (8)$$

gde je:

E_{1-2} - ukupna specifična energija za smanjenje raspodele krupnoće 1 do raspodele krupnoće 2,

x_1, x_2 - pokazatelji raspodele krupnoće gde je $x_1 > x_2$.

Hukki-jevo ocenjivanje ovih jednačina dovelo ga je do zaključka da bi svaka jednačina mogla biti primenljiva, ali samo u relativno uskom opsegu raspodele krupnoće. On je takođe posumnjao da jednačina (1) koju su dali Walker i saradnici ima pogrešan oblik i da eksponent n nije konstantan, već varira sa raspodelom krupnoće indeksa x (*Morrell, 2004*). Hukki je predložio da je prikladnija opšta diferencijalna jednačina (9):

$$dE = -C \frac{dx}{x^{f(x)}} \quad (9)$$

gde je:

E - ukupna potrebna energija po jedinici mase (specifična energija);

x - faktor koji ukazuje na finoću proizvoda;

C - konstanta povezana sa karakteristikama sirovine i jedinica odabrana za uravnoteženje jednačine.

Hukki nije dao detaljan opis za funkciju $f(x)$, iako je opisao eksperimente koji bi mogli da daju podatke kako bi se utvrdilo šta bi trebalo da bude funkcija $f(x)$ (Morrell, 2004).

2.2.3. Alternativni odnos energije-krupnoće čestice

Morrell (2004) je ispitivao Hukki-jevu jednačinu (9) i otkrio da Hukki nije dao detaljan opis funkcije $f(x)$ i pretpostavio je da su karakteristike sirovine u pogledu krupnoće čestica konstantne. U stvari, čvrstoća stena se uglavnom povećava kako se krupnoća čestice smanjuje (Morrell, 2004). Zato je Morrell predložio da se opšti oblik jednačine usitnjavanja može opisati kao:

$$dE = -Cg(x) \frac{dx}{x^{f(x)}} \quad (10)$$

gde je:

$g(x)$ - funkcija koja opisuje promenu karakteristike lomljenja sa krupnoćom čestice,

C - konstanta koja je povezana sa karakteristikama lomljenja sirovine.

U nastavku svojih istraživanja, Morrell je predložio alternativni odnos energije-krupnoće za čestice od (- 100 + 0,1) mm u odnosu na Bondov, na osnovu eksponenta krupnoće čestice koji je u funkciji krupnoće početnog uzorka i proizvoda mlevenja, ali nije dao vrednosti za predloženu funkciju (Morrell, 2004). Modifikovana Bondova jednačina (11) koju je predložio Morrell pokazuje specifičnu energiju sa smanjenjem krupnoće. Morrell je pretpostavio da su karakteristike lomljenja stene konstantne u odnosu na krupnoću čestice, ali nije pokazao da je ovaj predlog primenljiv za mlevenje manje < 100 μm. Označavanjem M_i kao indeksa

usitnjavanja, K kao konstante za uravnoteženje jedinica jednačine, Morrell-ova jednačina može se izraziti jednačinom (11). Vrednost za M_i može se odrediti eksperimentalno pomoću Bondovog laboratorijskog testa meljivosti sa odgovarajućim modifikacijama Bondove jednačine (20) ili određivanjem iz podataka iz postrojenja. Morrell je zaključio da ova nova jednačina neće pretrpeti štetu od istog nedostatka kao Bondova jednačina i da je Bondova jednačina korisna posebno za srednje krupnoće čestica (*Morrell, 2004*).

$$W = M_i \cdot K \cdot (x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad (11)$$

gde je:

W - specifična energija (kW h/t),

K - konstanta izabrana za uravnoteženje jedinica jednačine,

M_i - indeks koji se odnosi na karakteristike lomljenja rude (kWh/t),

x_2 - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % proizvoda mlevenja (μm),

x_1 - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % početnog uzorka (μm).

Morrell (2008) je predložio opšti pristup za određivanje specifične energije za mlevenje sirovine, od krupnozrne do sitnozrne sirovine, kao i indekse rada koji su povezani sa otpornošću sirovine na mlevenje (*Morrell, 2008; Usman, 2015*). Metoda zahteva samo dva indeksa rada koja su povezana sa svojstvima grube i fine rude/stene sa jednim faktorom efikasnosti. Gruba krupnoća rude/stene je definisana kao krupnoća koja se kreće od P_{80} od 750 μm do P_{80} proizvoda koji dolaze iz poslednjeg ciklusa drobljenja, fina krupnoća rude/stene pokriva krupnoću od P_{80} od 750 μm do P_{80} krupnoće koja se obično može dobiti mlevenjem u mlinu sa kuglama. Indeks rada za mlevenje grubih krupnoća, označen je kao M_{ia} , i može se predvideti pomoću standardnog SAG testa usitnjavanja. Indeks rada za mlevenje finih krupnoća, označen kao M_{ib} , određuje se pomoću standardnog Bondovog testa u mlinu sa kuglama (M_{ib} nije Bondov indeks u mlinu sa kuglama). Pretpostavlja se da je indeks rada koji predstavlja karakteristike lomljenja stene konstantan i da funkcija $f(x)$ varira u zavisnosti od krupnoće čestice (*Morrell, 2008; Usman, 2015*). Zato je autor predložio opštu jednačinu koja je povezana sa specifičnom energijom za smanjenje krupnoće, i ona glasi:

$$W_i = M_i 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad (12)$$

gde je:

M_i - indeks rada koji se odnosi na karakteristike lomljenja rude (kWh/t); za mlevenje, od proizvoda poslednjeg ciklusa drobljenja do P_{80} od 750 μm (grube čestice) indeks se označava sa M_{ia} , a za smanjenje krupnoće od 750 μm do konačnog proizvoda P_{80} koji se obično dobija mlevenjem u mlinu sa kuglama (fine čestice) indeks rada se označava sa M_{ib} .

W_i - specifična energija usitnjavanja na zupčaniku (kWh/t),

x_2 - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % prizvoda mlevenja (μm),

x_1 - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka (μm),

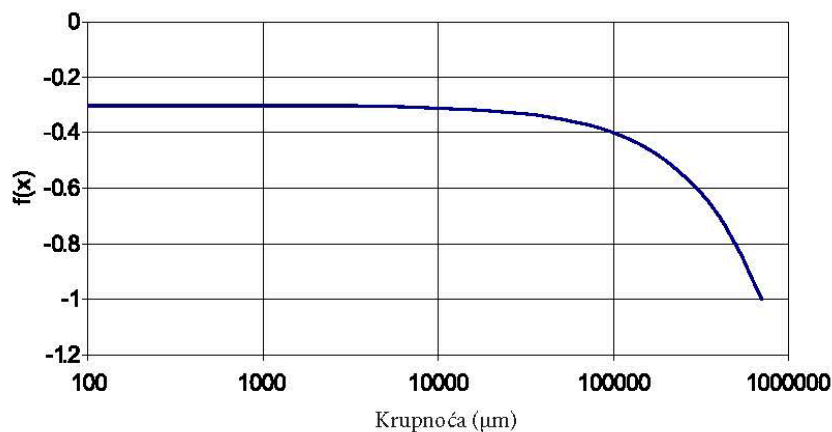
$f(x)$ - se izračunava kao (Morrell, 2006):

$$f(x) = \left(0,295 + \frac{x}{10^6}\right) \quad (13)$$

gde je:

x - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine.

Funkcija $f(x)$ u odnosu na krupnoću čestice prikazana je na slici 6.



Slika 6. Eksponent funkcije $f(x)$ u odnosu na krupnoću čestice (Morrell, 2004)

2.3. Bondov radni indeks

Kako bi pomogao u određivanju potrebne energije za proces usitnjavanja, Fred Bond je 1952. godine razvio pristup koji proizvođači opreme koriste kao alat za projektovanje i u današnje vreme (Napier-Munn et al., 1999). Metoda je poznata kao Bondova treća teorija koja

se koristi za procenu i optimizaciju ovih ciklusa. Metoda pretpostavlja da je potrebna energija proporcionalna novoj dužini vrha pukotine koja nastaje lomljenjem čestice (*Wills, 1992*). Numerički uloženi rad opisuje energiju (kWh/t) koja je potrebna kako bi se smanjila krupnoća sirovine koja je teoretski beskonačno velika, do određenog procenta koji prolazi određenu klasu krupnoće, npr. 80 % sirovine koja prolazi kroz sito otvora od 100 μm (*Hafeez, 2012; Gupta, 2018*).

Drobljivost i meljivost su parametri pomoću kojih se karakteriše otpornost sirovina na usitnjavanje. Meljivost ili otpornost sirovine na mehanički uticaj je veoma važna karakteristika sirovine. Ova karakteristika značajno utiče na postupak mlevenja, efikasnost procesa mlevenja, energiju potrebnu za mlevenje itd. Određivanje veličine mlina, optimizacija i određivanje specifične potrošnje energije zasnivaju se na poznavanju meljivosti date sirovine (*Mucsi et al., 2019*). Postoji više postupaka za određivanje drobljivosti i meljivosti, a u praksi najširu primenu našli su postupci F. C. Bonda. Bondova metoda i dalje ima veliku pažnju u industrijskoj razmeri zbog svog pragmatizma (*Kelly and Dawe, 1989; Menéndez-Aguado et al., 2006; Jankovic et al., 2015*).

Metode za ispitivanje meljivosti sirovine koriste se za određivanje utroška energije za mlevenje proizvoda do željene veličine. Ovi postupci variraju u zavisnosti od vrste mlinova i proizvođača. Proizvođači mlinova obično koriste Bondov test za dimenzionisanje veličina kugli za mlevenje.

Standardni Bondov test nije bez ograničenja (*Mosher and Tague, 2001*). Test zahteva specifičnu pripremu uzorka za rad i tačno definisanu krupnoću polaznog uzorka. Za jedan Bondov test potrebno je 10 kg uzorka, i obično pomoć stručnog tehničkog lica za izvođenje jednog testa, koji može trajati i preko 8 sati. Prema standardnom Bondovom testu, radni indeks (W_i) se određuje simulacijom suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu u Bondovom mlinu sa kuglama do uspostavljanja cirkulativne šarže do 250 % (*Bond, 1949, 1952, 1961; Magdalinovic et al., 2012*). Bondov radni indeks (BWI) se obično određuje na komparativnim sitima od (300, 212, 150, 106, 75, 50, 26,7) μm . Prosejavanje sirovine finije od 75 μm suvim postupkom, može nekad dati nepouzdan rezultate, zato što se sitna zrna slepljuju međusobno i sa krupnijim zrnima, pri čemu nepotrebno ostaju u odsevu (*Mucsi, 2008*). Dodatni problem može biti ako početni uzorak sadrži prekomernu količinu gotovog proizvoda mlevenja, zato što ovo produžava postizanje stabilnog stanja. U praktične svrhe, za proces mlevenja idealan je uzorak koji sadrži 15 % gotovog proizvoda mlevenja ili manje (*Yap et al., 1982*). Međutim, u industrijskoj praksi, uzorak koji ima veliki deo gotovog proizvoda mlevenja nije redak.

Bondov test i proračuni dobijenih rezultata pomoću njegove jednačine su se pokazali kao izuzetno pouzdani za procenu potrebne energije za usitnjavanje sirovine u industrijskim uslovima. U tabeli 2 su date vrednosti Bondovog radnog indeksa za neke sirovine.

Tabela 2. Vrednost Bondovog randog indeksa za neke sirovine (*Metso, 2015*)

Uzorak	Wi, kwh/t	Uzorak	Wi, kwh/t
Andezit	18,25	Grafit	43,56
Barit	4,73	Magnetit	9,97
Bazalt	17,10	Ruda olova	11,90
Boksit	8,78	Olovo-Cinkove rude	10,93
Cementni klinker	13,45	Krečnjak	12,74
Cement	10,51	Ruda mangana	12,20
Glina	6,30	Magnezit	11,13
Ugalj	13,00	Molibden	12,80
Koks	15,13	Ruda nikla	13,65
Ruda bakra	12,72	Uljni škriljac	15,84
Diorit	20,90	Ruda pirita	9,57
Dolomit	11,27	Kvarcit	9,58
Šmirgla	56,70	Kvarc	13,57
Feldspat	10,80	Ruda cinka	11,56
Hematit	12,84	Ruda titanijuma	12,33
Fero-mangan	8,30	Šljaka	10,24
Fero-silicijum	10,01	Škriljac	14,30

Bondov radni indeks (BWI) se takođe smatra osnovnim parametrom tvrdoće stene, pri čemu je dokazano da je u jakoj korelaciji sa jednoosnom pritisnom čvrstoćom (UCS) (*Napier-Munn et al. 1999*). U tabeli 3 dat je širok spektar tvrdoće stena.

Tabela 3. Veza između jednoosne pritisne čvrstoće (UCS) i Bondovog indeksa rada (*Napier-Munn et al. 1999*)

Karakteristike	Meke	Srednje	Tvrde	Veoma tvrde
UCS (MPa)	50 - 100	100 - 150	150 - 250	> 250
BWI (kWh/t)	7 - 9	9 - 14	14 - 20	> 20

2.3.1. Određivanje Bondovog radnog indeksa u laboratorijskom mlinu sa kuglama

Bondov mlin sa kuglama ima glatku unutrašnju površinu bubnja, dimenzije $D \times L = 305 \times 305$ mm. Brzina rotiranja bubnja iznosi 70 obr/min. Masa šarže kugli, dimenzije od 15,5 do 36,8 mm iznosi 20,125 kg. Mlin poseduje uređaj za registraciju obrtaja. Mlevenje se vrši na suvo, simulirajući zatvoreni ciklus, do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250 %.

Postupak rada:

1. Određivanje granulometrijskog sastava uzorka pre mlevenja (za jedan ciklus mlevenja potrebno je oko 10 kg uzorka krupnoće 100 % - 3,327 mm).

2. Iz pripremljenog uzorka uzeti uzorak zapremine $V = 700 \text{ cm}^3$ i izmeriti njegovu masu (M). Uzorak se ubacuje u mlin i melje prema proizvoljnom broju obrtaja mlina ($N = 50; 100 \text{ ili } 150 \text{ obrtaja}$).

3. Nakon mlevenja mlin se prazni, šarža kugli se odstranjuje i uzorak se proseje na komparativnom (uporednom) situ čiji otvor karakteriše krupnoću proizvoda mlevenja u mlinu sa kuglama.

4. Izmeriti masu proseva komparativnog sita.

5. Izračunati idealni proizvod mlevenja:

$$IPM = \frac{M}{3,5} [g] \quad (14)$$

6. Izračunati masu novostvorenog proseva:

$$m_{p_n} = m_p - m_{p_u} \quad (15)$$

gde je: m_{p_n} - masa novostvorenog proseva

m_p - masa proseva komparativnog sita

m_{p_u} - masa proseva uneta sa ulaznom sirovinom

U prvom testu mlevenja je:

$$m_{p_u} = M \cdot \alpha_{-d} \quad (16)$$

gde je: α_{-d} - sadržaj klase $-d + 0$ u uzorku. Određuje se sitovnom analizom.

U narednim testovima mlevenja je:

$$m_{p_u} = m_{p_{n-1}} \cdot \alpha_{-d} \quad (17)$$

gde je: $m_{p_{n-1}}$ - masa proseva iz prethodnog testa.

Ovo se radi zbog toga što se za svaki naredni test mlevenja, odsevu komparativnog sita doda sveži uzorak čija je masa jednaka masi proseva iz prethodnog testa mlevenja, tako da ukupna masa uvek iznosi M .

7. Izračunati masu novostvorenog proseva G po 1 obrtaju mlina:

$$G = \frac{m_{p_n}}{N} [g/obr] \quad (18)$$

gde je: N - broj obrtaja mlina u dotičnom testu mlevenja.

8. Izračunati broj obrtaja mlina (N_{n+1}) za sledeći test mlevenja:

$$N_{n+1} = \frac{IPM - m_{p_{n-1}} \cdot \alpha_{-d}}{G} [obr] \quad (19)$$

9. Odsevu komparativnog sita doda se sveži uzorak čija je masa jednaka masi proseva iz prethodnog testa mlevenja. Tako formiran ulaz ubaci se u mlin i melje N_{n+1} obrtaja.

10. Dalji postupak se ponavlja sve dok masa proseva komparativnog sita ne bude konstantna tokom tri testa mlevenja i približno jednaka veličini IPM , čime je postignuta cirkulativna šarža od 250 %.

11. Odrediti granulometrijski sastav proseva komparativnog sita iz poslednjeg testa mlevenja, i uz pomoć ucrtanih karakteristika krupnoće ulaza i proseva odrediti veličinu otvora sita kroz koje prolazi 80 % ulaza u mlin i proseva komparativnog sita iz poslednjeg testa mlevenja (*Magdalinović, 1985; Trumić M. and Trumić M. S., 2020*).

12. Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine:

$$W_i = 1,1 \cdot \frac{44,5}{p_k^{0,23} \cdot G^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} [kWh/t] \quad (20)$$

gde je:

p_k - veličina otvora komparativnog sita [μm],

G - novostvoreni prosev po 1 obrtaju mlina [g/obr] (uzima se prosek iz 3 zadnja testa mlevenja),

P_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % proseva komparativnog sita, iz poslednjeg testa mlevenja [μm],

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka na kome se Bondov indeks određuje [μm].

Bondova jednačina se široko primenjuje u pripremi mineralnih sirovina za poređenje otpora mlevenju u mlinu sa kuglama različitih vrsta sirovine, procenu potrebne energije u industrijskim pogonima za drobljenje i mlevenje i za podešavanje parametara procesa mlevenja.

2.3.2. Skraćeni postupci i predložene metode za određivanje Bondovog radnog indeksa

Bondov test meljivosti se široko koristi za procenu potrebne energije za mlevenje sirovine u mlinu sa šipkama i mlinu sa kuglama, i za odabir opreme u postrojenjima za usitnjavanje (*Babu and Cook, 1973; Tavares et al., 2012*). Zbog poteškoća u određivanju Bondovog radnog indeksa standardnom metodom, mnogi istraživači su razvili alternativne metode (*Weiss, 1985; Ahmadi i Shahsavari, 2009*). Upotreba Bondove standardne metode u postrojenjima za mlevenje je veoma česta, zato što daje zadovoljavajuće rezultate. Uprkos tome što ima mnogo prednosti, ova metoda ima i neke nedostatke, traje dugo i zahteva poseban mlin za izvođenje testa. U ovom delu prikazane su ostale, skraćene metode koje su razvili drugi istraživači za određivanje Bondovog radnog indeksa.

Berry i Bruce (1966) su predstavili aproksimativni postupak u kome se upoređuje meljivost nepoznate rude sa poznatom meljivošću referentne rude, određene u Bondovom mlinu sa kuglama. Postupak može da se izvede u bilo kom laboratorijskom mlinu sa kuglama. Uzorci referentne rude i rude nepoznate meljivosti mase 2 kg, krupnoće -1,651 mm melju se na mokro u laboratorijskom mlinu sa kuglama prečnika 305 mm pod identičnim uslovima (*Berry and Bruce, 1966; Magdalinović, 1997; Todorović, 2016*). Na osnovu laboratorijskih ispitivanja došli su do zaključka da energija potrebna za usitnjavanje približno je jednaka za oba uzorka, odakle je:

$$W_{ir} \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P_r}} - \frac{10}{\sqrt{F_r}} \right] = W_i \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right] \quad (21)$$

gde je:

W_{ir} - Bondov radni indeks referentne rude, [kWh/t],

P_r - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase proizvoda mlevenja referentne rude, [μm],

F_r - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase referentne rude, [μm]

W_i - Bondov radni indeks nepoznate rude, [kWh/t]

P_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase proizvoda mlevenja nepoznate rude, [μm]

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase ulaza nepoznate rude, [μm]

Bondov radni indeks rude čija se meljivost određuje izračunava se iz jednačine (22):

$$W_i = W_{ir} \cdot \frac{\left[\frac{10}{\sqrt{P_r}} - \frac{10}{\sqrt{F_r}} \right]}{\left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]}, [kWh/t] \quad (22)$$

Horst i Bassarear (1977) su dali postupak sličan Berry i Bruce, s' tim što je ovaj postupak malo duži, i takođe se porede podaci referentne i nepoznate rude na kojoj se određuje Bondov radni indeks. Jedina razlika između ova dva postupka je u tome što se kod postupka Horst-a i Bassarear-a ne uzima u obzir granulometrijski sastav ulaza i proizvoda mlevenja nepoznatog uzorka, nego se polazi od granulometrijskog sastava ulaza referentne rude, a granulometrijski sastav proizvoda mlevenja nepoznate rude se proračunava jednačinom zakona kinetike prvog reda. Test se izvodi u bilo kom laboratorijskom mlinu sa kuglama na uzorku početne krupnoće -1,651 mm. Uzorak referentne rude mase 1 kg se melje toliko dugo kako bi se dobio željeni granulometrijski sastav mlina. Tri uzorka rude mase 1 kg čija se meljivost određuje, melju se u istom mlinu kao i referentni uzorak, pri istim uslovima i sa različitim vremenima mlevenja. Vremena mlevenja ova tri uzorka treba da obuhvataju vreme mlevenja referentne rude. Na proizvodima mlevenja se određuje granulometrijski sastav. Dobijeni podaci se predstavljaju grafički [$t; \ln R$] i sa grafika se izračunavaju konstante brzine mlevenja k_i za različite otvore sita. Granulometrijski sastav samlevene rude, čija se meljivost određuje se izračunava pomoću granulometrijskog sastava ulaza referentne rude. Vremena mlevenja referentne rude do željene krupnoće i konstanta brzine mlevenja k_i određuju se iz testa meljivosti uzorka čija se meljivost određuje. Na osnovu granulometrijskog sastava koji je proračunat na ovaj način, određuje se vrednost parametra P_{80} [μm], a vrednost parametra F_{80} [μm] se uzima da je jednaka parametru F_r . Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (22). U tabeli 4 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim postupkom, postupkom Berry i Bruce i postupkom Horst i Bassarear korišćenjem rude bakra kao referentne rude (*Horst and Bassarear, 1977; Magdalinović, 1997; Todorović, 2016*).

Tabela 4. Uporedni rezultati radnog indeksa po standardnom Bondovom testu, postupku Berry-Bruce i postupku Horst-Bassarear (*Magdalinović, 1997; Todorović, 2016*)

Uzorak	Bondov radni indeks po standardnom Bondovom testu (kWh/t)	Proračunati Bondov radni indeks			
		Berry-Bruce postupak (kWh/t)	Razlika Δ (%)	Horst-Bassarear postupak (kWh/t)	Razlika Δ (%)
Ruda bakra 1	10,0	9,6	- 4,0	9,9	- 1,00
Ruda bakra 2	14,7	14,6	- 1,36	15,0	2,04
Ruda bakra 3	19,9	20,7	4,02	20,3	2,01
Ruda bakra 4	13,9	14,7	5,76	13,6	- 2,16
Ruda bakra 5	17,8	15,7	- 11,80	18,1	1,69
Ruda bakra 6	19,7	16,9	- 14,21	19,5	- 1,02

Smith i Lee (1968) su određivali Bondov radni indeks na osam različitih sirovina na različitim otvorima komparativnog sita po standardnom Bondovom testu. Upoređivali su podatke dobijene standardnim Bondovim testom i podatke iz otvorenog ciklusa mlevenja, tj. prvog ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa. Ispitivanjima su dobili da su parametar G_z [g/ob] poslednjeg ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa i parametar G_0 otvorenog ciklusa mlevenja pri istim uslovima u direktnoj korelacionoj vezi $G_0 = f(G_z)$. Ova korelaciona veza je ustanovljena na sitima manjih otvora i za testove izvedene sa manje od 300 obrtaja mlina. Koristeći ovu korelacionu vezu, moguće je na bazi vrednosti G_0 određene u otvorenom ciklusu proceniti G_z u standardnom Bondovom testu, a zatim pomoću jednačine (23) izračunati Bondov radni indeks (*Smith and Lee, 1968; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016*).

$$W_i = 1,1 \cdot \frac{16}{G^{0,82}} \cdot \sqrt{\frac{P_k}{100}} \quad [kWh/t] \quad (23)$$

Ovako ustanovljena korelaciona veza je korisna samo za sirovine na kojima je ona određena. Rezultati Smith-a i Lee-a pokazuju da razlike u odnosu na standardni Bondov test i vrednosti W_i izračunate pomoću jednačine (20) ne prelaze 15 % (*Magdalinović, 1977; Todorović, 2016; Nikolić et al., 2021*).

Kapur (1970) je analizirao cikluse mlevenja koji sačinjavaju standardni Bondov test uz pomoć matematičkog algoritma zasnovanog na kinetici mlevenja prvog reda i došao do zaključka da se procena radnog indeksa može izvršiti na bazi rezultata prva dva testa mlevenja iz standardnog Bondovog testa. U više testova na različitim sirovinama Kapur je došao do zaključka da nema velike razlike između konstante brzine mlevenja klasa + P_k iz svežeg uzorka i cirkulativne šarže u standardnom Bondovom testu. Predložio je da se konstanta brzine

mlevenja iz drugog testa mlevenja standardnog Bondovog testa iskoristi za procenu radnog indeksa pomoću jednačine (24) (Kapur, 1970; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016):

$$W_i = 1,1 \cdot 2,648 \cdot P_k^{0,406} \cdot k_2^{-0,81} \cdot (XM)^{-0,853} \cdot (1 - X)^{-0,099}, (kWh/t) \quad (24)$$

gde je:

P_k - veličina otvora komparativnog sita, [μm],

k_2 - konstanta brzine mlevenja klase + P_k iz drugog testa mlevenja standardnog

Bondovog testa:

$$k_2 = \frac{\ln[M - Z_1 \cdot (1 - X)] - \ln(M - Z_2)}{N_2} \quad (25)$$

gde je:

X - učešće klase krupnoće + P_k u polaznom uzorku, [del.jed.]

M - masa uzorka u mlinu, [g]

Z_1 i Z_2 - masa proseva komparativnog sita u prvom i drugom testu mlevenja, [g],

N_2 - broj obrtaja mlina u drugom testu mlevenja, [obr].

U tabeli 5 date su uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Kapur.

Tabela 5. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku (Kapur, 1970; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Kapur	
Hematit 1	74	11,18	11,20	0,18
Hematit 2	74	8,95	8,50	- 5,03
Hematit 3	74	14,71	14,50	- 1,43
Hematit 4	74	18,38	18,76	2,07
Getit	74	10,63	10,71	0,75
Ruda bakra 1	147	16,83	16,78	- 0,30
Ruda bakra 2	295	12,09	13,96	15,47
Ruda bakra 3	295	18,24	17,10	- 6,25
Ruda bakra 4	208	8,53	9,41	10,32
Ruda bakra 5	208	24,24	22,16	- 8,58
Retke zemlje 1	208	9,81	9,77	- 0,41
Retke zemlje 2	208	8,84	8,85	0,11

Tabela 5 (nastavak). Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku (Kapur, 1970; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016)

Krečnjak 1	74	7,27	7,78	7,02
Krečnjak 2	74	6,31	7,28	15,37
Krečnjak 3	208	12,00	12,00	0,00
Krečnjak 4	147	10,71	12,34	15,22
Krečnjak-glina-peščar	74	7,00	6,19	- 11,57
Feldspat-kvarc-muskovit	208	10,59	8,27	- 21,91
Škriljac	74	14,37	13,38	- 6,89

Karra (1981) je razradio matematički algoritam simulacije Bondovog testa na osnovu rezultata prva dva testa mlevenja iz standardnog testa. To je ustvari modifikovani postupak Kapur-a. Uzeo je u obzir činjenicu da je cirkulativna šarža u standardnom Bondovom testu tvrđa od ulazne sirovine i da se zbog toga melje sporije. Bondov test se simulira do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250 %. Iz zadnjeg simuliranog testa mlevenja dobija se vrednost G [g/ob] ali se ne može proceniti P_{80} [μm]. Zato se u ovom postupku za izračunavanje vrednosti radnog indeksa ne može koristiti Bondova jednačina, već se koristi empirijska jednačina dobijena statističkom obradom podataka. Algoritam Karra se izvodi tako što se izvrše prva dva testa mlevenja standardnog Bondovog testa a zatim se određuje (Karra, 1981; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016):

M - masa uzorka, [g]

$C = \frac{x}{3,5}$ - željena masa proseva komparativnog sita kod ustaljenog ciklusa, [g]

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka, [μm]

Y - učešće klase $- P_k + 0$ u polaznom uzorku, [del.jed.]

Z_1 i Z_2 - mase proseva komparativnog sita u prvom i drugom testu mlevenja, [g]

N_1 i N_2 - broj obrtaja mlina u prvom i drugom testu mlevenja.

Dalja simulacija se izvodi računskim putem, pod uslovom da je $XY < C$, po sledećim jednačinama:

$$k_1 = \frac{(1 - Y)}{N_1} \cdot \left(\frac{Z_1 - M \cdot Y}{M - M \cdot Y} \right) \quad (26)$$

$$k_2 = \frac{1}{(M - Z_1) \cdot N_2} \cdot (Z_2 - Z_1 \cdot Y - Z_1 \cdot k_1 \cdot N_2) \quad (27)$$

I ciklus

$$G_1 = \frac{Z_1 - M \cdot Y}{N_1} \quad (28)$$

II ciklus

$$G_2 = \frac{Z_2 - Z_1 \cdot Y}{N_2} \quad (29)$$

III i svi naredni ciklusi

$$N_i = \frac{C - Y \cdot Z_{i-1}}{G_{i-1}} \quad (30)$$

$$Z_i = Z_{i-1} \cdot Y + Z_{i-1} \cdot N_i \cdot k_1 + (M - Z_{i-1}) \cdot N_i \cdot k_2 \quad (31)$$

$$G_i = \frac{Z_i - Y \cdot Z_{i-1}}{N_i} \quad (32)$$

Simulacija se izvodi sve dotle dok G [g/ob] ne postane konstantna vrednost. Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine:

$$W_i = 1,1 \cdot 9,934 \cdot P_k^{0,308} \cdot G^{-0,696} \cdot F_{80}^{-0,125}, [kWh/t] \quad (33)$$

gde je:

P_k - veličina otvora komparativnog sita, [μm]

G - procenjeni novostvoreni prosev komparativnog sita po jednom obrtaju mlina u zadnjem testu mlevenja, [g/ob]

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % uzorka pre mlevenja, [μm].

U tabeli 6 date su uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Karra.

Tabela 6. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po Bondovom standardnom testu i algoritmu (Karra, 1981; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Karra	
Ruda bakra 1	74	9,68	9,63	- 0,5
Ruda bakra 2	74	10,16	10,94	7,7
Kvarcit 1	295	4,81	5,00	4,0
Kvarcit 2	208	13,23	13,67	3,3
Kvarcit 3	208	11,99	12,65	5,5
Kvarcit 4	208	13,53	13,72	1,4
Kvarcit 5	208	13,76	14,27	3,7
Krečnjak	417	10,12	10,06	- 0,6
Ruda gvožđa	74	11,98	11,16	- 6,8
Diorit	208	7,69	7,18	- 6,6
Andezit 1	147	16,04	16,58	3,4
Andezit 2	208	17,64	15,84	- 10,2
Ruda olova	74	11,20	11,31	1,0
Ruda gvožđa 1	74	17,33	17,23	- 0,6
Ruda gvožđa 2	74	19,20	19,43	1,2

Mular i Jergensen (1982) su svoju metodu nazvali Anakonda postupak koji ne zahteva Bondov mlin ni referentnu rudu za poređenje kod svakog testa. Anakonda postupak koristi mlin koji je kalibrisan sa referentnom rudom ili rudama, a Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (34) (Mular and Jergensen, 1982; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016):

$$W_i = \frac{A}{\left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right)}, [kWh/t] \quad (34)$$

gde je:

A - kalibraciona konstanta mlina, [kWh/t]

F_{80} - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % polaznog uzorka, [μm]

P_{80} - proizvod mlevenja čija se meljivost određuje, nakon vremena (t), [μm]

Za određivanje kalibracione konstante A dotičnog laboratorijskog mlina treba na referentnoj rudi, ili rudama standardnim Bondovim testom odrediti vrednost radnog indeksa W_{i_b} pri datoj veličini otvora komparativnog sita P_k . Nakon toga, u laboratorijskom mlinu treba mleti uzorke istih ruda, za isto vreme t i odrediti za svaki test mlevenja F_{80} i P_{80} . Na bazi dobijenih rezultata,

kalibraciona konstanta mlina A izračunava se iz jednačine (35) (*Mular and Jergensen, 1982; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016*):

$$A = W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (35)$$

Iz više dobijenih vrednosti za A se uzima srednja vrednost, ili se najverovatnija vrednost A izračunava metodom najmanjih kvadrata. U Anakondinom istraživačkom centru radili su sa mlinom $D \times L = 210 \times 251$ mm sa šaržom kugli od 9,083 kg prečnika od 22-38 mm (tabela 7).

Tabela 7. Prečnik, broj i masa kugli koje su korišćene u Anakondinom postupku (*Mular and Jergensen, 1982; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016*)

Prečnik kugli, mm	Broj kugli	Masa, g
35,6 - 38,1	11	2316,5
31,8 - 33,0	17	2325,4
29,2 - 31,0	13	1534,8
25,4 - 27,9	10	822,5
24,1 - 25,4	7	449,7
22,9 - 24,1	30	1634,0
Ukupno	88	9082,9

Brzina rotiranja mlina je 96 % od kritične. Za mlevenje su korišćeni uzorci mase 1 kg krupnoće - 1,651 mm iz kojih je pre mlevenja, sejanjem izdvojena klasa krupnoće (-0,147 + 0) mm. Kao komparativno sito korišćeno je sito otvora $P_k = 147 \mu\text{m}$. Mlevenje je vršeno na mokro, pri sadržaju čvrstog u pulpi od 50 %. Vreme mlevenja je iznosilo 10 minuta. Za ove uslove i za uzorke koji su tretirani dobili su da je $A = 0,5031 \text{ kWh/t}$. Za ove uslove jednačina (35) ima oblik (*Mular and Jergensen, 1982; Magdalinović, 1977; Todorović, 2016*):

$$W_i = \frac{0,5031}{\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)}, [\text{kWh/t}] \quad (36)$$

U tabeli 8 date su uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom postupku i Anakondinom postupku za različite vrste sirovine (*Magdalinović, 1997; Todorović, 2016*).

Tabela 8. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i Anakondinom postupku (Magdalinović, 1997; Todorović, 2016)

Uzorak	F_{80} (μm)	P_{80} (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
			Bond	Anakonda	
Ruda bakra 1	1310	194	11,69	11,39	-2,57
Ruda bakra 2	1320	205	11,36	11,89	+4,67
Ruda bakra 3	1300	225	12,19	12,92	+5,99
Ruda molibdena 1	1300	143	8,77	9,00	+2,62
Ruda molibdena 2	1200	192	12,00	11,62	-3,17
Ruda molibdena 3	1200	162	10,84	10,33	-4,70
Ruda molibdena 4	1175	185	11,17	11,34	+1,52
Ruda molibdena 5	1140	188	11,83	11,61	-1,86
Ruda molibdena 6	1140	188	11,57	11,61	+0,35
Ruda molibdena 7	1180	185	12,12	11,31	-6,52
Ruda bakra 1	1430	215	11,26	12,05	+7,02
Ruda bakra 2	1370	224	12,00	12,64	+5,33
Ruda bakra 3	1320	210	12,82	12,13	-5,38
Ruda bakra 4	1170	200	12,32	12,13	-1,54
Ruda bakra 5	1250	210	12,18	12,35	+1,40
Ruda bakra 6	1350	200	11,47	11,57	+0,87
Ruda bakra 7	1350	200	10,96	11,57	+5,57
Ruda bakra 8	1350	195	11,91	11,33	+4,87
Uljni škriljci	1440	550	31,11	30,89	0,71

Magdalinović (1989) je predstavio skraćeni postupak određivanja Bondovog radnog indeksa, koji se sastoji od dva ciklusa mlevenja, i oslanja na zakon kinetike prvog reda po kojem se odvija usitnjavanje sirovine u Bondovom mlinu sa kuglama. Test se izvodi na uzorku standardne krupnoće 100 % -3,35 mm u standardnom Bondovom mlinu. Određuje se analiza granulometrijskog sastava, parametar F_{80} (μm), masa polaznog uzorka M [g] 700 cm^3 , i izračunava se masa idealnog proizvoda mlevenja po obrascu $IPM = M/3,5$ [g]. Spajanjem odseva komparativnog sita polaznog uzorka mase $2,5/3,5 \cdot M$ i polaznog uzorka mase IPM dobija se uzorak za prvo mlevenje koji se melje za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_1 = 50, 100$ ili 150 obr), i isti se seje na komparativnom situ, gde se određuje masa odseva m_{o_1} [g] i proseva m_{p_1} [g]. Na osnovu sadržaja klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i jednačine (38) izračunava se konstanta brzine mlevenja za dati uzorak (Magdalinović, 1997; Magdalinović, 1989; Todorović, 2016).

$$k = n \cdot \frac{\ln R_0 - \ln R_1}{N_1} \quad (38)$$

gde je:

n - broj obrtaja u minuti, [min^{-1}]

N_1 - ukupan broj obrtaja mlina.

Kada se odredi konstanta brzine mlevenja, pomoću ove konstante se izračunava broj obrtaja mlina N_2 [ob] koji je potreban da bi se dobila cirkulativna šarža od 250 %. Uzorak za drugo mlevenje se dobija na isti način kao i uzorak za prvo mlevenje i melje se za izračunati broj obrtaja mlina N_2 , a zatim se seje na komparativnom situ, gde se određuje masa odseva m_{o_2} [g] i masa proseva m_{p_2} [g]. Masa proizvoda mlevenja bi trebala da bude ista ili približno ista idealnom proizvodu mlevenja *IPM*. Zatim se izračunava novostvoreni prosev po obrascu $G = m_{p_2}/N_2$ [g/ob]. Na proizvodu mlevenja se određuje analiza granulometrijskog sastava i parametar P_{80} [μm]. Na osnovu izračunatih parametara G [g/ob], P_{80} [μm], F_{80} [μm] i jednačine (20) izračunava se Bondov radni indeks. U tabeli 9 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim testom i skraćenim testom Magdalinovića sa dva testa mlevenja (*Magdalinović, 1997; Magdalinović, 1989; Ahmadi and Shahsavari, 2009; Todorović, 2016*).

Tabela 9. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i skraćenom testu Magdalinovića (1989) (*Magdalinović, 1997; Magdalinović, 1989; Ahmadi and Shahsavari, 2009; Todorović, 2016*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Magdalinović	
Ruda bakra	500	15,40	14,57	5,4
	315	13,79	12,83	7,0
	160	11,84	11,46	3,2
	80	12,90	13,07	- 1,3
Andezit	500	25,05	24,42	2,5
	315	19,90	21,25	- 6,8
	160	22,70	21,31	6,1
	80	22,38	22,00	1,7
Krečnjak	500	14,26	13,33	6,5
	315	13,57	12,78	5,8
	160	11,04	10,48	5,1
	80	11,70	11,41	2,5
Ruda gvođža	500	8,10	8,46	- 4,4
	150	12,20	11,55	5,3
	38	15,10	15,86	- 5,0

Magdalinović (2003) je dao skraćeni postupak sa tri testa mlevenja. Ovaj postupak je sličan prethodnom postupku, takođe se oslanja na zakon kinetike prvog red po kojem se usitnjavanje sirovine odvija u Bondovom mlinu sa kuglama. Postupak se izvodi na uzorku standardne

krupnoće 100 % -3,35 mm u standardnom Bondovom mlinu. Na polaznom uzorku se određuje analiza granulometrijskog sastava, parametar F_{80} (μm), masa polaznog uzorka M [g] 700 cm^3 , i izračunava se masa idealnog proizvoda mlevenja po obrascu $IPM = M/3,5$ [g]. Formirani početni uzorak se melje za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_1 = 50, 100$ ili 150 obr), a posle mlevenja se seje na komparativnom situ, gde se određuje masa odseva m_{o_1} [g] i proseva m_{p_1} [g]. Na osnovu sadržaja klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i jednačine (38) izračunava se konstanta brzine mlevenja za dati uzorak.

Pomoću izračunate konstante izračunava se broj obrtaja mlina N_2 [ob] koji je potreban da bi se dobila cirkulativna šarža od 250 %. Odsevu komparativnog sita iz prvog testa mlevenja dodaje se sveži uzorak mase ($m = M - m_{o_1}$) [g]. Novoformirani uzorak se melje za izračunati broj obrtaja mlina N_2 , a zatim se seje na komparativnom situ i određuje masa odseva m_{o_2} [g] i proseva m_{p_2} [g]. Na osnovu sadržaja klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i jednačine (39) izračunava se konstanta brzine mlevenja za novoformirani uzorak (*Magdalinović, 1997; Magdalinović, 2003; Todorović, 2016*).

$$k = n \cdot \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{N_2} \quad (39)$$

Na osnovu izračunate konstante izračunava se broj obrtaja mlina N_3 [ob] koji je potreban da bi se dobila cirkulativna šarža od 250 %. Odsevu komparativnog sita iz drugog testa mlevenja dodaje se sveži uzorak mase ($m = M - m_{o_2}$) [g]. Novoformirani uzorak se melje za izračunati broj obrtaja mlina N_3 [ob], a zatim se seje na komparativnom situ i određuje masa odseva m_{o_3} [g] i proseva m_{p_3} [g]. Masa proizvoda mlevenja bi trebala da bude ista ili približno ista idealnom proizvodu mlevenja IPM .

Zatim se izračunava novostvoreni prosev po obrascu $G = m_{p_3}/N_3$ [g/ob]. Na proizvodu mlevenja se određuje analiza granulometrijskog sastava i parametar P_{80} [μm]. Na osnovu izračunatih parametara G [g/ob], P_{80} [μm], F_{80} [μm] i jednačine (20) izračunava se Bondov radni indeks. U tabeli 10 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom Magdalinovića sa tri testa mlevenja (*Magdalinović, 1997; Magdalinović, 2003; Todorović, 2016*).

Tabela 10. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom postupku i skraćenom postupku Magdalinovića (2003) (*Magdalinović, 1997; Magdalinović, 2003; Todorović, 2016*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Magdalinović	
Ruda bakra	500	16,79	17,04	- 1,49
	315	13,44	13,77	2,45
	160	13,76	13,46	- 2,18
	80	13,99	14,48	3,50
Andezit	500	22,62	23,19	- 2,52
	315	18,58	18,13	2,42
	160	18,45	18,36	- 2,22
	80	19,27	18,60	3,48
Krečnjak	500	9,87	9,56	3,50
	315	7,07	7,30	- 3,42
	160	7,27	7,12	2,10
	80	7,33	7,16	2,80

Ford i Sithole (2015) su dali skraćeni postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa koji se sastoji iz dva postupka. Prvi postupak je odrađen samo sa jednim testom mlevenja, a drugi postupak sa tri testa mlevenja (*Ford and Sithole, 2015*).

Postupak 1: Uzorak 700 cm^3 krupnoće 100 % -3,35 mm se melje u standardnom Bondovom mlinu sa kuglama, za unapred određen broj obrtaja, u vremenskim intervalima od 0,5 minuta, 1 minuta, 2 minuta, 4 minuta. Posle svakog mlevenja meri se masa uzorka i određuje granulometrijski sastav. Ovi podaci se zatim koriste za izračunavanje parametara (k) za svaki granulometrijski sastav, pomoću jednačine (40):

$$W_{(x,t)} = W_{(x,0)} \cdot \exp(-k \cdot t) \quad (40)$$

gde je:

t – vreme mlevenja (minut),

$W_{(x,t)}$ – kumulativni sadržaj odseva otvora sita x za vreme mlevenja t ,

$W_{(x,0)}$ – kumulativni sadržaj odseva početnog uzorka za otvor sita x ,

k - konstanta brzine mlevenja (min^{-1}).

Model opisuje matematičku simulaciju u zatvorenom ciklusu mlevenja. Kod simulacije broj obrtaja varira dok se ne postigne cirkulativna šarža od 250 %. Izračunavaju se parametri G [g/ob], P_{80} [μm], F_{80} [μm], a Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (20).

Odlika ove metode sastoji se u tome da se indeksi rada mogu simulirati za različite granulometrijske sastave zasnovane na rezultatima samo jednog testa mlevenja.

Postupak 2: Drugi postupak je zasnovan na standardnom Bondovom testu, ali se sastoji samo iz tri ciklusa mlevenja. Masa novostvorenog proseva poslednjeg ciklusa mlevenja u kombinaciji sa granulometrijskim sastavom se koriste za izračunavanje Bondovog radnog indeksa pomoću jednačine (20). Postupak sa tri ciklusa mlevenja, iako traje duže, daje bolje rezultate nego metoda u kojoj se primenjuje samo jedan ciklus mlevenja.

U tabeli 11 date su odstupanja koja se dobijaju postupkom 1 i postupkom 2. Na testiranim uzorcima sa tri ciklusa mlevenja postignuti su bolji rezultati, nego samo sa jednim ciklusom mlevenja (*Ford and Sithole, 2015*).

Tabela 11. Uporedne vrednosti dobijene testom 1 i testom 2 sa standardnim Bondovim testom (*Ford and Sithole, 2015*)

Uzorak	P_k (μm)	Test 1	Test 2
Bakar kobaltova ruda 1	106	- 0,21	- 0,76
Bakar kobaltova ruda 2	212	- 7,62	1,49
Bakar kobaltova ruda 3	106	- 20,81	- 3,74
Bakar kobaltova ruda 4	212	- 15,35	- 1,97
Bakar kobaltova ruda 5	106	- 4,22	0,46
Bakar kobaltova ruda 6	212	- 8,85	- 2,84

Todorovic i saradnici (2017) su dali skraćeni postupak koji može da se radi sa dva, tri ili četiri ciklusa mlevenja. Svaki ciklus mlevenja se radi identično kao i kod standardnog Bondovog postupka. Kod skraćenog postupka sa dva ciklusa mlevenja određuje se granulometrijski sastav polaznog uzorka, parametar F_{80} [μm] i učešće klase veće od otvora komparativnog sita X [u delovima jedinice]. Uzima se uzorak zapremine 700 cm^3 krupnoće 100 % -3,327 mm, određuje se njegova masa M [g], i uzorak se melje u Bondovom mlinu sa kuglama za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_1 = 50, 100$ ili 150 obrtaja). Posle mlevenja uzorak se prosejava na komparativnom situ i određuje masa proseva D [g] i odseva R [g]. Prosev D se sastoji od mase proseva D_u koja je uneta sa ulazom i mase novostvorenog proseva u mlinu D_n . Izračunava se masa novostvorenog proseva $D_n = D - D_u$. U prvom testu mlevenja je $D_u = M \cdot (1 - X)$, [g], dok je u narednim testovima mlevenja $D_u = D_{(n-1)} \cdot (1 - X)$, [g], gde $D_{(n-1)}$ predstavlja masu proseva iz prethodnog testa mlevenja, [g]. Zatim se izračunava masa novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina G [g/ob.] i broj obrtaja mlina za sledeći test mlevenja N_n pomoću jednačine (41) (*Todorovic et al., 2017*).

$$N_n = \frac{\frac{M}{3,5} - D_{(n-1)} \cdot (1 - X)}{G}, [\text{obrtaja}] \quad (41)$$

Odsevu komparativnog sita se dodaje sveži uzorak čija je masa jednaka masi proseva iz prethodnog testa mlevenja $D_{(n-1)}$. Tako formiran uzorak ubacuje se u mlin i melje N_n obrtaja. Nakon mlevenja uzorak se prosejava na komparativnom situ i meri se odsev R [g]. Zatim se izračunava konstanta k pomoću jednačine (42):

$$k = \frac{n \cdot (\ln R_0 - \ln R)}{N} = \frac{n \cdot \left[\ln \left(\frac{R_{(n-1)}}{M} + \frac{D_{(n-1)}}{M} \cdot X \right) - \ln \frac{R}{M} \right]}{N} \quad (42)$$

Izračunava se potreban broj obrtaja N za slučaj da se brzinom k kao u drugom mlevenju mlela količina sirovine kao kada je postignut ekvilibrijum (kružna šarža 250 %) pomoću jednačine (43).

$$N = \frac{n}{k} \left[\ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 + \frac{X}{3,5} \cdot 100 \right) - \ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 \right) \right] \quad (43)$$

Zatim se izračunava parametar G [g/ob] pomoću jednačine (44). Dobijena vrednost G [g/ob] se množi sa konstantom 1,158 i dobija se vrednost G_e [g/ob], koja bi trebala da je približno jednaka sa vrednošću G [g/ob] u poslednjem ciklusu mlevenja prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa.

$$G = \frac{\frac{M}{3,5} \cdot X}{N} \quad (44)$$

Prosevu drugog mlevenja se određuje granulometrijski sastav i parametar $P_{2,80}$ [μm]. Ova vrednost se množi sa konstantom 1,035. Dobijeni rezultat bi trebalo da bude približno jednak sa vrednošću P_{80} [μm] proseva poslednjeg mlevenja prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa. Pomoću ovako dobijenih vrednosti G [g/ob] i P_{80} [μm] i jednačine (20) dobija se približna vrednost W_i [kWh/t]. Kada se radi skraćeni postupak sa tri ili četiri mlevenja, računaju se parametri G [g/ob] i P_{80} [μm] kao kod postupka sa dva mlevenja, sa tom razlikom, što se množe

sa odgovarajućim parametrima za tri ili četiri ciklusa mlevenja. U tabeli 12 dati su uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni standardnim Bondovim testom i rezultati dobijeni skraćenim testom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja (*Todorovic et al., 2017*).

Tabela 12. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i skraćenom testu (*Todorovic et al., 2017*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)				Razlika Δ (%)		
		Bond	<i>Todorovic et al. (2017)</i>			II cik.	III cik.	IV cik.
			II cik.	III cik.	IV cik.			
Krečnjak : andezit 0 : 100	74	18,09	17,53	17,37	17,90	- 3,09	- 3,98	- 1,05
Krečnjak : andezit 25 : 75	74	17,03	17,69	16,73	16,80	3,87	- 1,75	- 1,33
Krečnjak : andezit 50 : 50	74	15,15	15,58	14,89	15,03	0,51	- 3,93	- 3,02
Krečnjak : andezit 75 : 25	74	14,51	14,39	13,86	14,03	- 0,82	- 4,48	- 3,34
Krečnjak : andezit 100 : 0	74	13,90	14,50	15,14	14,53	4,32	8,93	4,52

Lewis i saradnici (1990) su razvili novu metodu ispitivanja meljivosti koja se zasniva na kompjuterskoj simulaciji koja je usko povezana sa standardnom Bondovom metodom. Simulacija je zasnovana na matematičkom algoritmu koji simulira standardni Bondov test, i podeljena je u dva različita dela. Prvi deo koristi eksperimentalne podatke iz prvog ciklusa mlevenja za dobijanje početnih parametara modela. Izračunati parametri modela, zajedno sa karakteristikama sirovine, čuvaju se u bazu podataka, kako bi mogli da se koriste u drugom delu simulacije, za predviđanje. Metoda predviđanja simulacijom oponaša standardni test. Za svaki ciklus mlevenja, sirovina koja je sitnija od otvora komparativnog sita zamenjuje se reprezentativnom masom polaznog uzorka. Računanje se nastavlja, koristeći vrednosti parametra koji su podešeni za dati ciklus mlevenja. Četiri ciklusa mlevenja se automatski izračunavaju. U četvrtom i narednim cilusima mlevenja vrši se provera, kako bi se procenilo da li je novostvoreni prosev G [g/obr] konstantan (u granicama do 3 %) za poslednja tri ciklusa mlevenja. Ako je G [g/obr] konstantno, postignuto je stabilno stanje, u suprotnom kompjuterska simulacija se nastavlja sa sledećim ciklusom mlevenja. Kada se postigne stabilno stanje, Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (20). U tabeli 13 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim testom i rezultati dobijeni kompjuterskom simulacijom (*Lewis et al., 1990; Todorović, 2016*).

Tabela 13. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnim Bondovim testom i vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih kompjuterskom simulacijom (*Lewis et al., 1990; Todorović, 2016*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Simulacija	
Ruda zlata	125	15,58	15,85	1,73
	125			
Tuf	38	9,14	9,19	0,55
	38			
Ruda zlata 2	100	16,39	16,39	0,00
	100			
Krečnjak	50	8,36	8,15	- 2,51
	50			
	100	7,77	8,25	6,18
	100			
	250	7,69	7,72	0,39
	250			
Sulfid	90	18,78	18,48	- 1,60
	90			
Fluorit	100	13,40	13,38	- 0,15
	100			
Granit	100	16,67	15,98	- 4,14
	100			
	250	14,78	14,28	- 3,38
	250			

Aksani i Sönmez (2000) su u svojoj studiji istraživali računarsku simulaciju Bondovog testa meljivosti koja koristi kumulativni kinetički model (*Finch and Ramirez-Castro, 1981*). Model sadrži samo dva parametra, što pojednostavljuje interpretaciju rezultata. Odnos između funkcije brzine usitnjavanja i krupnoće sirovine dat je jednačinom (*Aksani and Sönmez, 2000; Todorović, 2016*):

$$k = C \cdot x^n \quad (45)$$

gde su:

C i n - konstante koje zavise od karakteristike mlina i sirovine (*Ersayin, et al., 1993*)

x - veličinu otvora sita [μm].

Za određivanje parametara modela korišćeni su standardni Bondov mlin i standardni Bondov test meljivosti. Test se izvodi na uzorku masa M [g] 700 cm^3 klase krupnoće -3,35 mm. Uzorak se melje sa vremenima 0,5 minuta, 1 minut, 2 minuta i 4 minuta. Posle svakog ciklusa mlevenja

na uzorku se određuje analiza granulometrijskog sastava. Proizvodi analize granulometrijskog sastava se spajaju i vraćaju u mlin za sledeći ciklus mlevenja. Konstanta brzine mlevenja k se izračunava nelinearnom regresijom pomoću dobijenih podataka kumulativnog odseva u odnosu na vreme mlevenja. Za izračunavanje parametara C i n jednačina (45) treba da se logaritmuje, a zatim se primenjuje linearna regresija (Aksani and Sönmez, 2000; Todorović, 2016).

Kompjuterska simulacija koristi podatke analize granulometrijskog sastava, početnu masu ulaza, parameter kinetičkog modela i broj obrtaja mlina za prvi ciklus mlevenja. Test predviđanja simulacijom oponaša standardni Bondov postupak. Posle svakog ciklusa mlevenja računa se novostvoreni prosek po jednom obrtaju mlina G [g/ob], a sirovina koja je sitniji od otvora komparativnog sita zamenjuje se sa reprezentativnom masom polaznog uzorka. Izračunavanje (kalkulacija) se nastavlja sve dok G [g/ob] ne postane konstantan za poslednja tri ciklusa mlevenja. Kada se dostigne stabilno stanje za izračunavanje Bondovog radnog indeksa koriste se parametri dobijeni u poslednjem ciklusu mlevenja i Bondova jednačina (jednačina 20). U tabeli 14 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim testom i rezultati dobijeni kompjuterskom simulacijom (Aksani and Sönmez, 2000; Todorović, 2016).

Tabela 14. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnim Bondovim testom i vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih kompjuterskom simulacijom (Aksani i Sönmez, 2000; Todorović, 2016)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bond	Simulacija	
Ruda bakra	150	11,12	11,09	0,25
Feldspat 1	212	10,14	9,73	4,01
Feldspat 2	212	9,34	9,29	0,51
Hromit	300	6,23	5,99	3,85
Krečnjak	212	12,15	12,10	0,41
Uleksit	150	7,09	7,28	-2,68

Gharehgheshlagh (2015) je predstavio metodu za proračun Bondovog radnog indeksa koja prati kinetiku mlevenja u Bondovom mlinu sa kuglama. Metoda je brza i praktična, zato što uspostavlja niz odnosa između parametara mlevenja i parametara Bondove jednačine, i eliminiše pojedine korake laboratorijskog testa zbog smanjenja ciklusa mlevenja. Test se izvodi mlevenjem 700 cm^3 uzorka krupnoće 100 % -3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama sa vremenom mlevenja od (0,33; 1; 2; 4; i 8) minuta. Posle svakog ciklusa mlevenja na uzorku se radi analiza granulometrijskog sastava. Dobijeni proizvodi analize granulometrijskog sastava se spajaju i vraćaju u mlin za naredni ciklus mlevenja. Podaci dobijeni kinetikom mlevenja i

analizom granulometrijskog sastava proizvoda mlevenja se koriste za određivanje funkcionalne zavisnosti između broja obrtaja mlina i mase proseva komparativnog sita m_p [g], kao i broja obrtaja mlina i parametra P_{80} [μm] pomoću numeričke metode najmanjih kvadrata. Pomoću prve funkcije određuje se broj obrtaja mlina $N_{250\%}$ [obrtaja] koji je potreban kako bi se dobila masa proseva, takva da kružna šarža iznosi 250 %. Na osnovu vrednosti $N_{250\%}$ [obrtaja] i utvrđenih funkcionalnih zavisnosti izračunavaju se parametri G [g/ob] i P_{80} [μm]. Na osnovu izračunatih vrednosti i Bondove standardne jednačine (20) izračunava se Bondov radni indeks. Odstupanja između rezultata dobijenih ovom metodom i rezultata dobijenih standardnim Bondovim testom za sve uzorke ne prelaze 2,6 %. U tabeli 15 date su uporedne vrednosti dobijene Bondovom standardnom metodom i metodom Gharegheshlagh (*Gharegheshlagh, 2015; Todorović, 2016*).

Tabela 15. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnom Bondovom metodom i vrednosti dobijene metodom (*Gharegheshlagh, 2015; Todorović, 2016*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bondov test	Gharegheshlagh test	
Boksit	106	10,172	10,321	- 1,47066
Hematit	106	12,531	12,525	0,04788
Hromit 1	106	14,082	14,330	- 1,76406
Hromit 2	106	14,497	14,649	- 1,04807
Halkopirit 1	106	13,150	13,054	0,733376
Halkopirit 2	106	12,416	12,298	0,951632
Klinker 1	106	15,625	15,471	0,985496
Klinker 2	106	14,999	14,865	0,898863
Dolomit	106	13,249	13,479	- 1,73527
Magnetit	106	12,120	11,806	2,590589
Krečnjak 1	106	13,997	13,998	- 0,01085
Krečnjak 2	106	13,727	13,646	0,584285
Kvarcit	106	11,282	11,238	0,387378

Ciribeni i saradnici (2020) su testirali simulaciju Bondovog testa zasnovanu na kumulativnom kinetičkom modelu (CKM) (*Ersayin et al., 1993*). Analiza dobijenih rezultata omogućila je razvijanje uprošćenog postupka za izračunavanje kinetičkih parametara i njihovu primenu za određivanje Bondovog radnog indeksa kroz simulaciju. Pre početka mlevenja vrši se analiza granulometrijskog sastava na sitima između (3350 - 37) μm , i određuje parametar F_{80} . Test se izvodi mlevenjem od 5 minuta 700 cm^3 uzorka krupnoće 100 % -3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama. Vršiti se analiza granulometrijskog sastava kako bi se dobio

parametar P_{80} . Zatim se određuju kinetički parametri, parametar k se izračunava linearizacijom logaritmovanjem jednačine (40) pri čemu se dobija jednačina (46), a parametri C i n se izračunavaju pomoću jednačine (47). Kada se utvrde kinetički parametri, Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (20). U tabeli 16 date su uporedne vrednosti dobijene Bondovom standardnom metodom i simulacijom Bondovog testa zasnovanom na kumulativnom kinetičkom modelu (Ciribeni et al., 2020).

$$\ln(W_{(x,t)}) - \ln(W_{(x,0)}) = k \cdot t \quad (46)$$

$$\ln(k) = \ln(C) + n \cdot \ln(x) \quad (47)$$

Tabela 16. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnom Bondovom metodom i vrednosti dobijene simulacijom zasnovanom na kumulativnom kinetičkom modelu (Ciribeni et al., 2020)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bondov test	Simulacija	
Feldspat	100	14,69	13,38	8,91
Feldspat	150	12,41	11,20	9,76
Kvarc	100	17,88	17,82	0,33
Kvarc	150	13,88	14,63	- 5,37
Krečnjak	100	9,98	9,41	5,72
Kalcit	100	6,30	6,24	0,96
Kritične rude metala 1	100	19,25	21,11	- 9,68
Kritične rude metala 2	100	14,83	15,40	- 3,85
Kritične rude metala 3	100	15,98	17,01	- 6,47
Kritične rude metala 4	100	17,35	16,79	3,21

Ciribeni i saradnici (2021) su u nastavku svojih istraživanja pokušali da istraže vezu između kinetičkih parametara dobijenih pomoću kumulativnog kinetičkog modela (CKM) i parametara u standardnom Bondovom test (G i W_i) kako bi predložili alternativnu metodologiju za procenu Bondovog indeksa rada sa praktičnim prednostima. Cilj je bio da se pronađe veza između CKM kinetičkog parametra k i parametara potrošnje energije u Bondovom standardnom testu (G i W_i). Postupak prati metodologiju koju su opisali Ciribeni i saradnici (2020) u svom radu, pri čemu se kinetički parametar k izračunava jednačinom (46), a kinetički parametri C i n se izračunavaju jednačinom (47). Istraživanjem su pronašli vezu između parametra G (koji je određen standardnom Bondovom metodom) i kinetičkog parametra k (određen simulacijom) koja je predstavljena jednačinom (48) (Ciribeni et al., 2021).

$$G = 14,97 \cdot k \quad (48)$$

Zatim su pronašli vezu između parametra W_i (koji je izračunat standardnom Bondovom jednačinom (20) i kinetičkog parametra k (određen simulacijom) koja je predstavljena jednačinom (49) (Ciribeni et al., 2021).

$$W_{i(SIM)} = -10,07 \cdot \ln(k) - 7,28 \quad (49)$$

U tabeli 17 dato je poređenje vrednosti Bondovog radnog indeksa koje su dobijene standardnom metodom i vrednosti Bondovog radnog indeksa koje su dobijene jednačinom (49).

Tabela 17. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnom Bondovom jednačinom (20) i vrednosti dobijene jednačinom (49) (Ciribeni et al., 2021)

Uzorak	P_c [μm]	W_i [kWh/t]	k [$@P_c$]	$W_{i(SIM)}$ [kWh/t]	Razlika Δ (%)
Ruda metala 1	74	26,59	0,03667	26,09	1,89
Ruda metala 2	74	25,17	0,03656	26,12	- 3,77
Ruda metala 3	149	13,82	0,12543	13,67	1,10
Ruda metala 4	149	21,17	0,06539	20,25	4,36
Ruda metala 5	149	16,31	0,09132	16,87	- 3,45
Ruda metala 6	149	17,57	0,08693	17,37	1,13
Ruda metala 7	149	19,08	0,08143	18,03	5,50
Kvarc 1	149	15,27	0,10141	15,81	- 3,57
Kvarc 2	105	19,89	0,06492	20,32	- 2,16
Feldspat 1	149	13,65	0,13860	12,66	7,26
Feldspat 2	105	16,16	0,09183	16,82	- 4,06
Krečnjak	149	10,88	0,15128	11,78	- 8,23
Kalcit	149	6,93	0,25711	6,42	7,38
Kristali od krečnjaka	149	8,46	0,20919	8,50	- 0,49
Kristali od krečnjaka	105	10,91	0,14956	11,89	- 8,99

Nematollahi (1994) je dizajnirao manji mlin za određivanje Bondovog indeksa, i nazvao ga kalibrisan Bondov mlin sa kuglama. Prečnik mlina iznosio je 200x200 mm i koristio je 85 čeličnih kugli za mlevenje. Težina kugli iznosila je 5,9 kg, i kugle su bile u rasponu prečnika od 16-38 mm (tabela 18) (Nematollahi, 1994).

Tabela 18. Karakteristike kugli koje je Nematollahi (1994) koristio u testu

Prečnik kugli (mm)	38,1	31,75	25,4	19,05	15,87
Broj kugli	13	20	3	21	28

Početni uzorak imao je zapreminu od 207 cm³ umesto 700 cm³, što je standardno u Bondovom testu. Test se izvodi mlevenjem na suvo u zatvorenom ciklusu do postizanja 250 % cirkulativne šarže. Mlevenje se ponavlja dok proizvedeni prosej kontrolnog sita po jednom obrtaju mlina ne postane konstantan u poslednja tri mlevenja. Bondov radni indeks se izračunava prema jednačini (50) (Nematollahi, 1994):

$$W_i = \frac{11,76}{p_k^{0,23}} \cdot \frac{1}{G^{0,75}} \cdot \frac{1}{\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}} \quad (50)$$

U tabeli 19 date su uporedne vrednosti dobijene sa standardnim Bondovim mlinom sa kuglama i sa novim mlinom koji je dizajnirao Nematollahi.

Tabela 19. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene u standardnom Bondovom mlinu i vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene u Nematollahi-jevom mlinu (Nematollahi, 1994)

Uzorak	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
	Bondov mlin	Nematollahi-jev mlin	
Barit	6,12	6,21	1,47
Feldspat	11,75	11,12	- 5,36
Hematit	13,89	14,31	3,02
Kalcit	8,36	8,50	1,67
Hrom	14,98	15,70	4,81
Dolomit	21,77	19,18	- 11,90
Koks	30,43	28,75	- 5,52
Ugalj	12,99	12,33	- 5,08
Silicijum	11,93	11,49	- 3,69
Fluorit	7,40	7,28	- 1,62
Magnetit	9,33	9,54	2,25

Menéndez-Aguado i saradnici (2005) su ispitivali mogućnost određivanja indeksa rada u Denverovom laboratorijskom mlinu. Istraživanja su vršena na klasi krupnoće 100 % - 3,35 mm na uzorcima gipsa, celestita, feldspata, klinkera, krečnjaka, fluorita i bakarnoj šljaci. Denverov laboratorijski mlin je dimenzije $D \times L = 305 \times 152,5$ mm. Kako bi se odredila početna masa uzorka, prvo je bilo potrebno odrediti faktor korekcije zapremine između mlinova, jer i Bondov i Denverov mlin imaju isti prečnik, ali različitu dužinu. Ovaj faktor korekcije određen je korigovanjem razlike u unutrašnjosti zapremine mlina. Koristili su vrednost korekcije 2,15. Polazna zapremina uzorka iznosila je 326 cm³. Test za mlevenje u Denverovom mlinu je pratio

Bondovu metodologiju, ali su izvršene neke korekcije. I u Denverovom i u Bondovom mlinu metoda je pratila tri ciklusa mlevenja za svaki uzorak. Zbog razlike u zapremini između Denverovog i Bondog mlina, u mlinu su korišćene kugle za mlevenje drugih dimenzija, kao što je dato u tabeli 20. Bondov radni indeks se izračunava prema jednačini (51) (*Menéndez-Aguado et al., 2005*):

$$W_i = \frac{44,5}{p_k^{0,23} \cdot (2,15 \cdot G)^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (51)$$

Tabela 20. Veličine čeličnih kugli u Bondovom i Denverovom mlinu (*Menéndez-Aguado et al., 2005*)

Bondov mlin (1952)			Denverov mlin		
Broj kugli	Prečnik, cm	Masa, g	Broj kugli	Prečnik, cm	Masa, g
22	3,810	5951	10	3,810	2705,0
34	3,175	4767	16	3,175	2243,2
50	2,540	3750	23	2,540	1725,0
54	2,223	3007	25	2,223	1392,6
73	1,905	2920	34	1,905	1360,1
∑ 233	-	20396	∑ 108	-	9425,9

U tabeli 21 date su uporedne vrednosti dobijene u Bondovom i Denverovom mlinu.

Tabela 21. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene u standardnom Bondovom mlinu i vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene u Denverovom mlinu, (*Menéndez-Aguado et al., 2005*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bondov mlin	Denverov mlin	
Krečnjak	200	8,99	9,05	- 0,67
Feldspat	200	11,06	10,92	+ 1,27
Celestit	200	5,41	5,57	- 2,96
Klinker	200	12,36	12,25	+ 0,89
Gips	200	6,08	5,78	+ 4,93
Fluorit	200	6,94	7,41	- 6,77
Bakarna šljaka	200	18,40	19,10	- 3,80

Mucsi (2008) je predstavio relativno brzu metodu za određivanje Bondovog radnog indeksa za krte sirovine (krečnjak, drobljeni šljunak, boksit, zeolit i bazalt) pomoću

univerzalnog Hardgrovog mlina. Ovo istraživanje se radi u laboratorijskom Hardovom mlinu koji se sastoji od merača obrtnog momenta (merna ćelija) koji omogućava direktno merenje snage koja se isporučuje u mlin za mlevenje. Izvršena je kalibracija Hardgrovog mlina, za test je potrebno 50 g polaznog uzorka krupnoće od 1180 - 600 μm , opterećenje prstena na vrhu za mlevenje je 290 N, vreme mlevenja je 3 min (60 obrtaja mlina pri brzini od 20 obr/min). Komparativno sito je 75 μm , a Hardgrov indeks se izračunava pomoću jednačine (52) (Mucsi, 2008):

$$H = 13 + 6,93 \cdot m_H \quad (52)$$

gde je:

m_H - masa proseva proizvoda mlevenja (- 75 μm),

H - Hardgrov indeks.

Prema Csöke et al. (2003) Bondov radni indeks se može izračunati iz Hardgrovog broja kao:

$$W_B^H = \frac{435}{H^{0,82}} \quad (53)$$

Hardgrov indeks zasnovan je na finim proizvodima za dat broj obrtaja, a Bondov radni indeks na masi finog proizvoda po broju obrtaja mlina. Međutim, treba uzeti u obzir da i drugi faktori mogu uticati na dati ulazni obrtni moment u mlinu za mlevenje, kao što su trenje, kohezija, adhezija, i karakteristike protoka zapremine sirovine. Ovi parametri se uzimaju u obzir kada se specifično mlevenje meri merenjem obrtnog momenta, na ranije opisani način. Specifično mlevenje (W_s) se izračunava pomoću jednačine (54) kada se mlevenje vrši u univerzalnom Hardgrovom mlinu. Merenje energije bez opterećenja (obrnog momenta) mora da se oduzme od ukupno izmerene energije kako bi se odredila samo specifična energija usitnjavanja (Mucsi, 2008).

$$W_{s,H} = \frac{\int_0^{\tau} 2\pi n [M(t) - M_0] dt}{m} \quad (54)$$

gde je:

$M(t)$ - obrtni moment (mlinske kugle + uzorak) [Nm],

M_0 - obrtni moment bez opterećenja [Nm],

n - broj obrtaja [1/s],

t - vreme mlevenja [s],

m - masa proseva poslednjeg ciklusa mlevenja, sita 75 μm [g].

Specifična potrošnja energije na usitnjavanje u Bondovom mlinu izračunava se pomoću jednačini (55).

$$W_{s,B} = \frac{W_{balls+material} - W_0}{m_p} \quad (55)$$

gde je:

$W_{balls+material}$ - izmereni rad sa punjenjem kugli i potrebnom količinom uzorka, [Kwh/t],

W_0 - rad bez opterećenja [Kwh/t],

m_p - masa proizvoda mlevenja [g].

Ukoliko su poznate vrednosti $W_{s,B}$ (ili $W_{s,H}$), P_{80} i F_{80} Bondov radni indeks može da se izračuna pomoću jednačine (20) za oba slučaja. Ako se ne uzima u obzir kompleksna ruda boksita, relativna razlika između Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnom metodom i obrtnog momenta merenjem univerzalnog Hardgrovog mlina kretala se od - 3,4 do 6,06 %. Relativna razlika između vrednosti standardne Bondove metode i vrednosti izračunate na osnovu jednačine (54) iz Hardgrovog indeksa kretala se od - 8,1 do 24,1 % (*Mucsi, 2008*).

Swain i Rao (2009) su istraživali mogućnost određivanja Bondovog radnog indeksa na osnovu Hardgrovog indeksa meljivosti. Istraživanja su vršena na rudama boksita u Indiji, koje su bogate: feldspatom, getitom, limonitom, kaolinom, litomerom, kondalitom. Ispitivanja su izvedena u standardnom mlinu sa kuglama dimenzije $D \times L = 300 \times 300$ mm, a Bondov radni indeks je određen Bondovom standardnom metodom, pri 100 obrtaja, i na komparativnom situ od 150 μm . Dobijene vrednosti su približne vrednostima 8,78 kWh/t koje je *Bond (1961)* dobio za boksit. Hardgrov indeks meljivosti je određen metodom koju su opisali *Haese et al. (1975)*. Mlevenje se izodi na reprezentativnom uzorku od 50 g klase - 1,18 + 0,6 mm pri 60 obrtaja. Proizvod mlevenja je prosejan na situ od 75 μm . Hardgrov indeks je izračunat pomoću jednačine (52). Bondov radni indeks se računa pomoću jednačine (53). U tabeli 22 date su uporedne vrednosti dobijene Bondovom standardnom metodom i uz pomoć Hardgrovog indeksa (*Swain and Rao, 2009*).

Tabela 22. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnom Bondovom metodom i vrednosti dobijene pomoću Hardgrovog indeksa (*Swain and Rao, 2009*)

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
		Bondov test	Izračunato sa Hardgrovim indeksom	
Ruda bogata feldspatom	150	9,4	9,2	2,13
Ruda bogata getitom	150	9,4	9,2	2,13
Ruda bogata kaolinom	150	9,9	10,3	- 4,04
Ruda bogata litomerom	150	7,9	8,2	- 3,80
Ruda bogata limonitom	150	9,4	9,2	2,13
Ruda bogata kondalitom	150	7,9	7,7	2,53

Saeidi i saradnici (2013) su koristili specijalan mlin za određivanje Bondovog radnog indeksa, koji je dizajnirao Nematollahi (1994). Broj i prečnik kugli koje su korišćene u ovom eksperimentu, dat je u tabeli 18, a Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (50).

Na reprezentativnom uzorku, (ruda gvožđa) od 2 kg odredi se granulometrijski sastav, a zatim se reprezentativni uzorak melje u vremenskim intervalima od 20, 60, 120 i 180 sekundi. Nakon svakog mlevenja, uzorak se proseje, odredi se parametar P_{80} [μm] i Bondov radni indeks. Dobijeni rezultati dati su u tabeli 23 (*Saeidi et al., 2013*).

Tabela 23. Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim postupkom i postupkom (*Saeidi et al., 2013*)

Vreme mlevenja, s	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
	Bond	Saeidi et al.	
20	13,1	8,21	37,33
60	12,36	8,04	34,95
120	11,68	7,84	32,88
180	11,11	7,81	29,70

Zbog velikih odstupanja u vrednostima Bondovog radnog indeksa, autori su definisali novu jednačinu (58) za izračunavanje Bondovog radnog indeksa na osnovu dobijenih rezultata. Do nove jednačine su došli tako što su ispitivali odnos između parametara G [g/ob] i P_{80} [μm] sa vremenom mlevenja. Bilo je neophodno stvoriti odnos između ovih parametara, koji bi mogli zameniti G [g/ob] i P_{80} [μm]. Veza između G [g/ob] i P_{80} [μm] ukazuje da su oni zavisni od vremena mlevenja, i da se mogu predstaviti jednačinama (56) i (57) (*Saeidi et al., 2013*).

$$P_{80} = -0,1085 \cdot t + 122,56 \quad (56)$$

$$G = -1E - 0,6 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t + 0,3397 \quad (57)$$

Kada se jednačine (56) i (57) ubace u jednačinu za određivanje Bondovog radnog indeksa (50), koju je predložio Nematollahi (1994), dobija se nova jednačina (58):

$$W_i = \frac{5,6}{(-1E - 0,6 \cdot t^2 + 0,0004 \cdot t + 0,3397)^{0,75}} \cdot \frac{1}{\frac{10}{\sqrt{-0,1085 \cdot t + 122,56}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}} \quad (58)$$

Kako bi se utvrdila tačnost jednačine (58), urađen je još jedan test mlevenja, pri vremenu mlevenja od 100 sekundi, i određen je Bondov radni indeks. Dobijene vrednosti date su u tabeli 24.

Tabela 24. Poređenje rezultata dobijenih standardnim Bondovim postupkom i postupkom (Saeidi et al., 2013)

Vreme mlevenja, s	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
	Bond	Saeidi et al.	
100	12,18	12,13	0,41

Mwanga i saradnici (2017) su razvili Geometalurški test usitnjavanja za koji je potrebna mala količina početnog uzorka. Test meljivosti se radi na uzorku klase krupnoće -3,35 mm polazne mase 220 g, i može se odraditi u roku od 2-3 sata. Kako bi se pojednostavila priprema uzorka i merenje energije, test koristi konstantnu masu uzorka, kao što je slučaj i kod drugih testova meljivosti, npr. u Hardgro-om testu ili Zeisel-ovom testu (Böhm et al., 2015). Uzorak se melje na suvo na 2, 5, 10, 17 i 25 minuta mlevenja. Posle svakog vremena mlevenja, uzorak se proseje na suvo i odredi se analiza granulometrijskog sastava, i uzorak se vraća u mlin na dalje mlevenje. Analiza granulometrijskog sastava numerički se procenjuje za parametar P_{80} . Zapisivanje ukupne potrošnje električne energije tokom testa vrši se pomoću konvencionalnog brojila energije. Kada se ispitivanje izvodi pri konstatnoj masi uzorka i parametrima mlina (broj obrtaja, šarža za mlevenje), pretpostavlja se da je energija koja se dovodi u mlin po jedinici vremena konstantna. Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (59) (Mwanga et al., 2017):

$$W_i = W_{i,GTC} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \cdot \eta \cdot 1/4 \right) \quad (59)$$

gde je:

λ - geometrijski faktor deljenja i iznosi $\lambda = 2,65$

η - pogon mlina i efikasnost motora, iznosi $\eta = 0,64$

$W_{i,GTC}$ - indeks rada Geometalurškog testa usitnjavanja, koji se računa kao stara Bondova jednačina (23).

Autori su naveli da su test i izvođenje predstavljene metode potvrđeni na nekoliko vrsta rude, i da je relativna razlika bila u rasponu od 0,70 % do maksimalnih 8,8 % (*Mwanga et al., 2017*).

Kaya i saradnici (2003) su predstavili rad koji govori o ponavljanju ispitivanja Bondovog testa meljivosti pomoću tri komercijalna Bonda mlina sa kuglama. Korišćena su tri različita mlina sa kuglama, pri čemu su dva već bila korišćena, a jedan je bio potpuno nov. Unutrašnja površina novog mlina je bila prilično hrapava, kao kora od pomorandže, dok su preostala dva mlina imala vrlo glatke površine, zbog dužeg vremenskog perioda upotrebe. Površinske nepravilnosti ili hrapavost mlina uklonjene su električnom brusilicom i šmirglom. Bondov radni indeks u ovom mlinu je odrađen pre i posle uklanjanja površinske nepravilnosti (hrapavosti). U svakom mlinu su menjane različite dimenzije mlinskih kugli. Bondov radni indeks je određen po standardnom postupku na porfirskoj rudi bakra i izračunat pomoću jednačine (20). Veličina, masa i broj kugli koje su korišćene u ovim testovima dati su tabeli 25 (*Kaya et al., 2003*).

Tabela 25. Raspodela mlinskih kugli u Bonovom mlinu (*Kaya et al., 2003*)

Nominalna veličina kugle [cm]	Bondove originalne kugle		Punjenje 1		Punjenje 2		Punjenje 3		Punjenje 4	
	Broj kugli	Masa [g]	Broj kugli	Masa [g]	Broj kugli	Masa [g]	Broj kugli	Masa [g]	Broj kugli	Masa [g]
3,68	43	8800	43	9106	43	8901	25	5885	18	4508
2,97	67	7209	67	7402	67	7206	39	4801	36	5378
2,54	10	672	10	660	10	605	60	3945	58	4208
1,91	71	2012	71	2125	78	2168	68	3331	71	3426
1,55	94	1432	94	832	66	1063	93	2163	102	2605
1,27					21	182				
Ukupno	285	20125	285	20125	285	20125	285	20125	285	20125

Rezultati Bondovog radnog indeksa izmereni pomoću tri različita mlina i četiri punjenja sa različitim dimenzijama mlinskih kugli dati su u tabeli 26. Rezultati ovih ispitivanja otkrili su da se vrednost Bondovog radnog indeksa mogu znatno razlikovati kod različitih standardnih Bondovih mlinova sa kuglama.

Cilj rada je bio da se utvrdi kako promena standardnih Bondovih kugli sa novim kuglama utiče na određivanje Bondovog radnog indeksa. Dimenzije nekih kugli su izbačene, a ubačene

su kugle novih dimenzija, i manjan je broj kugli (tabela 25). Posle svakog desetog testa proveravane su težine kugli, i svaka kugla čija je početna masa bila manja za 10 g, zamenjena je novom kuglom. Zamena istrošenih kugli, novim kuglama podrazumeva veći operativni trošak, ali je taj trošak minimalan u poređenju sa investicijama koje su potrebne za sam test (Kaya et al., 2003).

Tabela 26. Rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni u različitim mlinovima i sa različitim punjenjem mlinskih kugli (Kaya et al., 2003)

Mlin	Kugle za punjenje	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)
Mlin 1	Punjenje 1	12,50
	Punjenje 2	12,33
	Punjenje 3	11,77
	Punjenje 4	11,82
Mlin 2	Punjenje 1	13,04
	Punjenje 2	12,75
	Punjenje 3	12,78
	Punjenje 4	12,31
Mlin 3 posle ukanjanja nepravilnosti	Punjenje 1	12,11
	Punjenje 2	12,03
	Punjenje 3	11,77
	Punjenje 4	-
Mlin 3 Sa nepravilnostima	Punjenje 1	10,66
	Punjenje 2	10,85

Menéndez i saradnici (2017) su određivali Bondov radni indeks na 6 različitih uzoraka (kalcit, magnezit, feldspat, kvarc, andaluzit i staklo). Pre procesa mlevenja svi uzorci su svedeni na ggk - 3,15 mm, i prosejani na sitima (2800, 2000, 1400, 1000, 710, 500, 355, 250, 180, 125, 90, 63, 45, 36 i 25) μm . Rezultati granulometrijskog sastava pokazuju da postoje znazne razlike u granulometrijskom sastavu svih šest uzoraka. Razilike u granulometrijskom sasatvu dokazuju da će se dobiti različite vrednosti za parameter P_{80} , a upravo ovaj podatak će pokazati da li parametar P_{80} utiče na proizvod mlevenja. Posle 10 testa mlevenja proveravane su sve kugle u mlinu. U tabeli 27 date su karakteristike kugli koje su korišćene u radu. Bondov radni indeks se izračunava pomoću jednačine (20) (Menéndez et al., 2017).

Koristili su komparativna sita otvora (500, 250, 125, 90 i 63) μm . Vršena su minimum 4 mlevenja dok masa komparativnog proseva nije bila konstantna. Kada je proizvod mlevenja prosejavan na sitima (90 i 63) μm , prosejavanje je vršeno na mokro. Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 28 (Menéndez et al., 2017).

Tabela 27. Veličina, masa i ukupna površina kugli koje su korišćene u radu (*Menéndez et al., 2017*)

Karakteristike kugli koje se menjaju	Originalne Bondove kugle		<i>Menéndez et al., (2017)</i> kugle	
	Broj kugli	Masa (g)	Broj kugli	Masa (g)
Prečnik kugle (cm)				
3,81	-	-	37	8795
3,68	43	8800	-	-
2,18	-	-	52	6460
2,97	67	7209	-	-
2,54	10	672	12	894
1,91	71	2012	-	-
1,90	-	-	82	2316
1,60	-	-	102	1663
1,55	94	1432	-	-
Ukupna masa (g)		20125		20128
Ukupan broj kugli	285		285	
Ukupna površina kugli (cm)	5414		5330	

Tabela 28. Vrednosti P_{80} za sve uzorke koji su korišćeni u Bondovom testu (*Menéndez et al., 2017*)

P_k (μm)	Andaluzit P_{80} (μm)	Kvarc P_{80} (μm)	Staklo P_{80} (μm)	Feldspat P_{80} (μm)	Magnezit P_{80} (μm)	Kalcit P_{80} (μm)
500	393	406	399	409	409	410
250	195	200	203	207	193	193
125	94	95	94	94	94	89
90	73	72	71	72	70	71
63	52	52	52	51	50	51

Iz tabele 28 se vidi da su rezultati za vrednost P_{80} veoma slične za svih 6 uzoraka. Na osnovu ovih rezultata predloženi su matematički modeli za izračunavanje vrednosti P_{80} :

$$P_{80} = 0,8133 \cdot p_k - 3,4562 \quad (60)$$

$$P_{80} = 0,7704 \cdot p_k^{1,0051} \quad (61)$$

$$P_{80} = 0,0001 \cdot p_k^2 + 0,7539 \cdot P_1 + 1,681 \quad (62)$$

gde je:

p_k - komparativno sito.

Rezultati ove studije su pokazali da iako je korišćen nešto veći procenat kugli za mlevenje manjih dimenzija od onih koje preporučuje Bond, dobijene su nešto grublje vrednosti od onih

koje preporučuje Bond. Pošto nije poznato kako je Bond odredio granulometrijski sastav proizvoda mlevenja, ovo odstupanje uključuje nekoliko mogućnosti:

- u polaznom uzorku za mlevenje je bilo više krutih i sitnih čestica, što je rezultiralo većim brojem finiji, sitnih čestica,
- prosejavanje na uzorcima $< 125 \mu\text{m}$ je vršeno suvim a ne vlažnim postupkom, što je rezultiralo velikom razlikom u vrednostima parametra P_{80} ,
- možda masa komparativnog proseva nije bila konstantna (možda su bile veće razlike u masama komparativnog proseva od 0,5 %).

U tabeli 29 date su razlike Bondovog indeksa između dobijenih vrednosti standardnim Bondovim postupkom i vrednosti dobijene iz jednačina (60), (61) i (62). Iz tabele se može videti da jednačina (61) daje najbolje rezultate.

Tabela 29. Razlike između dobijenih vrednosti Bondovog radnog indeksa i vrednosti izračunatih na osnovu jednačina (60), (61) i (62) *Menéndez et al., (2017)*

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)	Razlika između standardnog W_i i izračunatog W_i pomoću jedn. (%)		
			jednačina 60	jednačina 61	jednačina 62
Andaluzit	63	26,94	2,46	2,46	4,53
Kalcit	63	10,35	1,67	1,67	3,76
Staklo	63	22,37	2,78	2,78	4,83
Feldspat	63	19,18	1,25	1,25	3,33
Magnezit	63	12,15	0,08	0,08	2,21
Kvarc	63	21,56	2,96	2,96	5,00
Andaluzit	90	22,36	1,36	1,86	2,37
Kalcit	90	8,95	0,24	0,76	1,28
Staklo	90	19,04	0,17	0,68	1,19
Feldspat	90	17,02	0,80	1,30	1,81
Magnezit	90	11,25	- 1,12	-0,61	-0,09
Kvarc	90	18,12	0,70	1,21	1,71
Andaluzit	125	19,96	- 3,11	-2,31	-2,79
Kalcit	125	8,55	- 3,69	-2,88	-3,36
Staklo	125	17,00	- 3,21	-2,42	-2,89
Feldspat	125	15,46	- 3,25	-2,46	-2,93
Magnezit	125	10,14	- 3,11	-2,31	-2,79
Kvarc	125	15,11	- 2,32	-1,53	-2,00
Andaluzit	250	17,91	- 1,03	-0,42	-1,66
Kalcit	250	7,14	- 1,92	-1,30	-2,57
Staklo	250	14,56	1,73	2,31	1,13
Feldspat	250	13,57	2,85	3,42	2,25

Tabela 29 (nastavak). Razlike između dobijenih vrednosti Bondovog radnog indeksa i vrednosti izračunatih na osnovu jednačina (60), (61) i (62) *Menéndez et al., (2017)*

Magnezit	250	9,75	- 1,86	-1,24	-2,50
Kvarc	250	13,33	0,74	1,33	0,13
Andaluzit	500	17,85	- 1,10	-2,41	-2,32
Kalcit	500	6,93	2,62	1,34	1,44
Staklo	500	13,98	0,28	-0,97	-0,88
Feldspat	500	13,49	2,39	1,18	1,27
Magnezit	500	8,98	2,47	1,21	1,30
Kvarc	500	13,36	1,65	0,43	0,52
Prosečna razlika	-	-	1,83	1,64	2,23
Standardno odstupanje	-	-	2,14	1,86	2,56

Tüzün (2001) je naveo da opseg aktivnosti koje su uključene u Bondov test mogu proizvesti greške koje lako mogu ući u rezultate zbog nepoznavanja obima i granica završetka samog testa. Utvrđeno je da kada se kao komparativno sito koristi sito veličine 53 μm vrednosti koje se dobijaju za Bondov radni indeks su veće od očekivanih. Vrednosti Bondovog radnog indeksa koje se tom prilikom dobijaju su uglavnom veće zbog grešaka koje se mogu javiti prilikom suvog prosejavanja. Suvo prosejavanje može izazvati slepljivanje uzorka što može dati loše rezultate kada se prosejavaju finije klase. Istraživanja su vršena na uzorku kvarca, i korišćena su komparativna sita od (53, 75 i 106) μm . Postupak određivanja Bondovog radnog indeksa mokrim postupkom prati standardni Bondov test, ali se pri svakom mlevenju dodaje 1 kg vode, a prosejavanje se vrši mokrim postupkom u vremenu od 10 minuta. Zatim se odsev filtrira, suši i meri se njegova masa, kako bi se izračunala masa proseva koja je potrebna za određivanje mase novostvorenog preseva po jednom obrtaju mlina G [g/ob]. Test je gotov kada masa preseva komparativnog sita bude konstantna tokom tri testa mlevenja i približno jednaka masi idealnog proizvoda mlevenja. Tada se izračunava Bondov radni indeks pomoću Bondove jednačine (20), i dobijena vrednost se pomnoži sa korekcionim faktorom od 1,3 koju je utvrdio Bond. U tabeli 30 dati su rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni mokrim i suvim postupkom mlevenja (*Tüzün, 2001*).

Tabela 30. Uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni mokrim i suvim postupkom mlevenja *Tüzün (2001)*

P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t) dobijen mokrim postupkom		Bondov radni indeks W_i (kWh/t) dobijen suvim postupkom	Razlika Δ (%)
	W_i	$W_i \cdot 1,3$	W_i	
212	-	-	14,5	-
150	11,7	15,2	15,5	1,94
106	-	-	16,8	-

Tabela 30 (nastavak). Uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni mokrim i suvim postupkom mlevenja *Tüzün (2001)*

75	13,5	17,6	17,7	0,56
53	15,7	20,4	19,3	- 5,70

Deniz i saradnici (2003) su ispitivali odnos između Bondovog radnog indeksa sa cirkulativnom šaržom (CŠ) i veličinom komparativnog sita P_k (μm). Ispitivanja su vršena na uzorku silicijum-dioksida, standardnim Bondovim testom meljivosti na tri različite veličine komparativnog sita P_k (150, 106 i 63) μm i za četiri različite cirkulativne šarže CŠ (100 %, 250 %, 400 % i 550 %). Vrednosti Bondovog radnog indeksa izračunate su pomoću jednačine (20). Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 31. Ispitivanjima je utvrđeno je da se Bondov radni indeks povećava sa manjom vrednošću cirkulativne šarže za svaku veličinu komparativnog sita, i da se Bondov radni indeks povećava sa smanjenjem veličine komparativnog sita (*Deniz et al., 2003*).

Tabela 31. Vrednosti parametara G [g/ob] i Bondovog radnog indeksa za različite krupnoće komparativnog sita i cirkulativne šarže *Deniz et al., (2003)*

P_k (μm)	CŠ (%)	G (g/ob)	W_i (kWh/t)	G (g/ob)	W_i (kWh/t)	G (g/ob)	W_i (kWh/t)	G (g/ob)	W_i (kWh/t)
150	100	2,091	11,11	2,066	11,41	1,627	12,99	1,895	11,89
150	250	2,911	8,94	3,297	8,05	2,272	10,78	2,055	10,83
150	400	3,047	8,52	3,720	7,05	2,386	10,28	2,450	10,07
150	550	3,247	8,12	4,036	6,51	2,639	9,61	2,737	9,19
106	100	1,454	13,77	1,307	14,62	1,239	14,95	1,349	14,30
106	250	1,958	11,44	1,858	11,94	1,739	12,67	1,584	13,16
106	400	2,095	11,18	2,709	9,25	1,823	12,16	1,759	12,42
106	550	2,195	10,75	3,143	8,24	1,951	11,53	1,927	11,77
63	100	0,755	18,11	0,679	19,16	0,652	19,45	0,688	19,07
63	250	1,216	14,62	1,095	15,88	1,051	15,88	1,110	15,48
63	400	1,360	13,40	1,567	11,93	1,405	13,11	1,282	14,66
63	550	1,516	12,25	1,807	10,50	1,505	12,37	1,476	12,38

Menéndez i saradnici (2018) su dali korigovanu jednačinu za određivanje Bondov radnog indeksa. Istraživanja su vršena na pet uzoraka (kvarc, staklo, feldspat, magnezit i kalcit) klase - 3,35 mm. Korišćena su komparativna sita od (500, 250, 125, 90 i 63) μm . Na komparativnim sitima od (90 i 63) μm prosejavanje je vršeno mokrim postupkom, kako bi se tačno odredili masa komparativnog proseva i granulometrijski sastav. Bondov radni indeks je određen po standardnoj Bondovoj metodi, ali su date korigovane jednačine za masu novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina G [g/ob], i korigovana jednačina za izračunavanje Bondovog radnog indeksa. Došli su do konstatacije da masa novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina G

[g/ob] zavisi od procenta finih klasa svežeg uzorka koji se dodaje u mlin za novi test mlevenja, i na osnovu ovoga je izvedena korigovana jednačina (63) za masu novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina G [g/ob] (Menéndez *et al.*, 2018):

$$G_f = \frac{G}{\left(1 - \left(0,01 \cdot \frac{U}{3,5}\right)\right)} \quad (63)$$

gde je:

G_f – korigovana masa novostvorenog proseva po 1 obrtaju mlina [g/ob],

G – masa novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina,

U – masa uzorka.

Pošto se Bondov radni indeks zasniva na konstantnoj zapremini uzorka od 700 cm³, ali se rezultati predstavljaju u gramima, dva uzorka istih meljivosti ali različitih gustina moraju da imaju različite vrednosti za parametar G [g/ob]. Predložena je nova jednačina (64) za izračunavanje parametara G [g/ob] (Menéndez *et al.*, 2018):

$$G_\gamma = \frac{G_f}{\gamma} = \frac{G}{\gamma \cdot \left[1 - \left(0,01 \cdot \frac{U}{3,5}\right)\right]} \quad (64)$$

gde je:

γ – gustina uzorka.

Korigovana jednačina za izračunavanje Bondovog radnog indeksa data je jednačinom (65):

$$BW i_c = \frac{49,1}{\left[P_k^{0,23} \cdot \left\{ \frac{G}{\gamma \cdot \left[1 - \left(0,01 \cdot \frac{U}{3,5}\right)\right]} \right\}^{0,82} \cdot \left(\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} \right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right) \right]} \quad (65)$$

U tabeli 32 dati su uporedni rezultati dobijeni standardnom Bondovom jednačinom (20) i rezultati dobijeni pomoću korigovane jednačine (65) koju su predložili Menéndez i saradnici.

Tabela 32. Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom jednačinom i rezultata dobijenih pomoću korigovane jednačine (65) *Menéndez et al., (2018)*

Uzorak	P_k (μm)	Bondov radni indeks, W_i (kWh/t)	
		Jednačina (20)	Korigovana jed. (65)
Kvarc	500	13,35	18,32
Kvarc	250	13,35	18,56
Kvarc	125	15,14	21,18
Kvarc	90	18,17	25,48
Kvarc	63	21,47	30,16
Staklo	500	13,97	17,83
Staklo	250	14,58	19,00
Staklo	125	17,04	22,41
Staklo	90	19,07	25,20
Staklo	63	22,39	29,69
Feldspat	500	13,60	19,29
Feldspat	250	13,57	19,62
Feldspat	125	15,41	22,53
Feldspat	90	17,07	25,03
Feldspat	63	19,14	28,16
Magnezit	500	9,29	14,34
Magnezit	250	9,65	15,25
Magnezit	125	10,29	16,49
Magnezit	90	11,40	18,32
Magnezit	63	12,98	20,98
Kalcit	500	6,93	10,21
Kalcit	250	7,14	10,78
Kalcit	125	8,32	12,76
Kalcit	90	9,38	14,43
Kalcit	63	10,56	16,30

Deniz i Ozdag (2002) su ispitivali uticaj elastičnih parametara na mlevenje i vezu između njih. Ispitivali su vezu između parametara Bondove metode (W_i , [kWh/t] i G [g/ob]) i dinamičkih elastičnih parametara sirovine (modul smicanja G_d , elastični modul E_d i modul mase K_d). Nakon određivanja njihove veze, cilj je bio pronaći praktičan način određivanja Bondove meljivosti i indeksa rada. Merenja su vršili na osam sedimentnih i pet vulkanskih sirovina. Istraživanjem su utvrdili da se najbolja korelacija može ostvariti između Bondovog indeksa W_i , [kWh/t] i modula mase K_d . Parametar modula mase K_d se može nazvati i modul krutosti. Ovaj parametar (modul mase K_d) uzima u obzir stanje poroznosti i diskontinuiteta, kao što su spojevi neke sirovine. U tabeli 33 dati su rezultati dobijeni standardnim Bondovim testom i računске vrednosti dobijene pomoću dinamičkih elastičnih parametara sirovine (*Deniz and Ozdag, 2002; Todorović, 2016*).

Tabela 33. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i vrednosti dobijene računski pomoću dinamičkih elastičnih parametara (*Deniz i Ozdag, 2002; Todorović, 2016*)

Broj uzorka	W_i (kWh/t)	K_d		E_d		G_d	
		W_i	Δ (%)	W_i	Δ (%)	W_i	Δ (%)
1	4,98	5,37	- 7,83	5,26	- 5,62	5,36	- 7,63
2	6,03	5,88	2,49	6,56	- 8,79	6,55	- 8,62
3	6,44	5,37	16,61	5,63	12,58	5,67	11,96
4	7,21	7,43	- 3,05	9,13	- 26,63	9,07	- 25,80
5	12,49	11,31	9,45	10,67	14,57	11,29	9,61
6	13,52	13,73	- 1,55	12,20	9,76	13,17	2,59
7	7,87	8,48	- 7,75	7,00	11,05	7,35	6,61
8	7,50	9,04	- 20,53	9,63	- 28,40	9,93	- 32,40
9	6,42	6,04	5,92	6,22	3,12	6,24	2,80
10	6,95	7,95	- 14,39	8,34	- 20,00	8,35	- 20,14
11	7,83	7,37	5,87	7,20	8,05	7,26	7,28
12	12,54	12,55	- 0,08	13,29	- 5,98	13,76	- 9,73
13	13,95	13,75	1,43	12,33	11,61	12,94	7,24
Srednja razlika		9,63		14,83		14,54	

Ozkahraman (2005) je pokazao da se Bondov radni indeks W_i [kWh/t] i indeks meljivosti G [g/obr] mogu odrediti na osnovu vrednosti krtosti sirovine S . Pronašao je lineranu vezu između indeksa meljivosti G [g/obr], i vrednosti krtosti sirovine S , i ova veza je predstavljena jednačinom (66). Koeficijent korelacije je vrlo visok i iznosi 0,99 (*Ozkahraman, 2005*).

$$G = 0,171 + 0,021 \cdot S \quad (66)$$

Odnos između vrednosti krtosti sirovine S i Bondovog indeksa rada W_i [kWh/t] takođe ima visoku korelaciju od 0,97, i ovaj odnos predstavljen je jednačinom (67) (*Ozkahraman, 2005*).

$$W_i = 61,839 \cdot 10,158 \cdot \ln(S) \quad (67)$$

Chandar i saradnici (2016) su pokušali da odrede Bondov radni indeks koristeći karakteristike ruda, kao što su gustina (ρ), Protođakonov koeficijent čvrstoće (PSI), i tvrdoća rude (RHN). Ispitivanja su sprovedena na tri različita uzorka (bazalt, škriljac i granit). Osam uzoraka svake vrste prikupljeno je iz različitih kamenoloma. Određivanje Bondovog radnog indeksa je vršeno na uzorcima klase - 3,35 mm standardnom Bondovom metodom do postizanja cirkulativne šarže od 250 %. Korišćena su dva matematička modela za analizu laboratorijskih rezultata, veštačke neuronske mreže (*Artificial Neural Networks - ANN*) i regresiona analiza.

Veštačke neuronske mreže (ANN) su korišćene za proveru tačnosti podataka na bazi eksperimentalnih rezultata, a regresiona analiza je korišćena za pronalaženje korelacionih matematičkih faktora. Pristup veštačkih neuronskih mreža je korišćen kako bi se obezbedilo da rezultati dobijeni iz laboratorijskih eksperimenata budu bez greške. Utvrđeno je da je procenat razlike između stvarnih vrednosti Bondovog radnog indeksa, dobijenih laboratorijskim testom i predviđenih rezultata dobijenih na osnovu veštačkih neuronskih mreža, između maksimalnog odstupanja od 5,44 % i minimalnog odstupanja od 0,05 %. Koeficijent korelacije je određen pojedinačno za odnose između gustine, protodakonovog koeficijenta čvrstoće, tvrdoće rude sa Bondovim radnim indeksom. Određen je i kombinovani odnos između Bondovog radnog indeksa i svih ostalih parametara. Modeli dobijeni regresionom analizom predstavljeni su jednačinama (68), (69) i (70) (*Chandar et al., 2016*).

$$W_i = 8,85 \cdot \rho - 12,58 \quad (68)$$

$$W_i = 4,32 \cdot (PSI) - 2,2 \quad (69)$$

$$W_i = 0,34 \cdot (RHN) - 6,61 \quad (70)$$

Poređenje stvarnih vrednosti Bondovog radnog indeksa i predviđenih vrednosti Bondovog radnog indeksa na osnovu veštačke neuronske mreže (ANN) i iz razvijenih jednačina regresionom analizom dato je u tabeli 34. Vrednosti predviđenih indeksa rada su prilično bliske standardnim vrednostima dobijenih na osnovu Bondovog testa.

Tabela 34. Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i uz pomoć veštačke neuronske mreže (ANN) i jednačina (68), (69) i (70), (*Chandar et al., 2016*)

Uzorak	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)	ANN		Regresiona analiza					
		W_i	Δ (%)	W_i Jed. (68)	Δ (%)	W_i Jed. (69)	Δ (%)	W_i Jed. (70)	Δ (%)
Bazalt 1	12,089	12,080	0,072	11,62	3,84	11,74	2,92	12,02	0,57
Bazalt 2	11,018	11,008	0,128	11,14	- 1,09	11,30	- 2,56	11,61	- 5,34
Bazalt 3	11,568	11,529	0,340	11,49	0,66	11,74	- 1,46	11,74	- 1,52
Bazalt 4	12,604	12,232	2,949	11,70	7,14	12,20	3,22	12,23	2,99
Bazalt 5	11,421	11,388	0,290	11,46	- 0,31	12,20	- 6,81	11,68	- 2,22
Bazalt 6	11,805	11,727	0,660	11,39	3,55	11,74	0,58	11,88	- 0,65
Bazalt 7	11,984	11,964	0,168	11,24	6,25	11,30	5,71	12,09	- 0,88
Bazalt 8	12,214	12,192	0,185	11,84	3,09	12,70	- 3,94	12,16	0,46
Škriljac 1	8,524	8,528	- 0,046	7,99	6,30	8,34	2,20	8,57	- 0,54

Tabela 34 (nastavak). Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i uz pomoć veštačke neuronske mreže (ANN) i jednačina (68), (69) i (70), *Chandar et al., (2016)*

Škriljac 2	8,564	8,558	0,072	8,14	4,98	8,88	- 3,65	8,64	- 0,88
Škriljac 3	8,129	8,363	- 2,881	8,40	- 3,37	8,60	- 5,79	8,16	- 0,33
Škriljac 4	8,625	8,429	2,283	8,52	1,24	8,09	6,25	8,78	- 1,76
Škriljac 5	8,748	8,758	- 0,112	8,67	0,90	9,17	- 4,83	8,78	- 0,33
Škriljac 6	7,941	8,373	- 5,439	8,28	- 4,26	8,34	- 4,98	8,02	- 0,97
Škriljac 7	8,434	8,466	- 0,386	8,38	0,68	8,88	- 5,25	8,43	0,02
Škriljac 8	8,439	8,453	- 0,173	8,32	1,37	8,60	- 1,91	8,43	0,08
Granit 1	10,220	10,162	0,574	10,96	- 7,25	9,80	4,10	10,23	- 0,06
Granit 2	10,133	10,094	0,386	10,85	- 7,12	10,14	- 0,09	10,09	0,44
Granit 3	10,094	10,099	- 0,048	10,55	- 4,47	10,51	- 4,07	9,95	1,43
Granit 4	10,595	10,586	0,089	10,67	- 0,70	10,89	- 2,78	10,64	- 0,42
Granit 5	10,357	10,294	0,605	11,13	- 7,46	10,14	2,07	10,09	2,60
Granit 6	11,018	10,992	0,231	11,15	- 1,17	10,51	4,65	10,71	2,80
Granit 7	10,879	10,818	0,569	10,91	- 0,27	9,80	9,91	10,57	2,83
Granit 8	10,521	10,682	- 1,536	10,81	- 2,75	10,14	3,60	10,50	0,18

Josefin i Doll (2018) su dali postupak koja se koristi za korekciju indeksa rada izmerenog na uzorku iz jedne veličine otvora komparativnog sita P_{80} u drugu veličinu otvora komparativnog sita P_{80} pomoću kalibracionog uzorka. Napravili su okvir modela pogodan za Geometalurške skupove podataka koji omogućavaju praktikantima da kalibrišu i koriguju bilo koji indeks rada pri bilo kojoj promenljivoj veličini otvora komparativnog sita pri datoj odgovarajućoj kalibraciji. Standardan Bondov test je izveden u mlinu sa kuglama na uzorku klase -3,35 mm na različitim otvorima komparativnog sita (300, 212, 15, 106 i 75) μm . Da bi se napravio model koji se prilagođava procesu, potrebno je imati dva različita uzorka, jedan kao referentni uzorak za kalibraciju eksponenta ($-a$) i drugi uzorak koji treba prilagoditi i na kojem će se odrediti koeficijent (K). Korigovani Bondov radni indeks izračunava se jednačinom (71) (*Josefin and Doll, 2018*):

$$W_{i_{corrected}} = \frac{K_{test} \cdot (P_{80})^{-a}}{10 \cdot ((P_{80})^{-0,5} - (F_{80})^{-0,5})} \quad (71)$$

gde je:

$-a$ - eksponent koji potiče iz referentnog uzorka,

K_{test} - koeficijent specifičan za uzorak koji varira na različitim nepoznatim uzorcima i izračunava se pomoću jednačine (72).

$$K_{test} = \frac{10 \cdot W_{i_{test}} \cdot ((P_{80})^{-0,5} - (F_{80})^{-0,5})}{(P_{80})^{-a}} \quad (72)$$

Postupak se izvodi na sledeći način:

1. Izračunati specifičnu energiju za svaki test kalibracionog uzorka kako bi se utvrdio odnos energije i krupnoće uzorka.
2. Nacrtati dijagram energije u odnosu na krupnoću i prilagoditi jačinu snage. Očitati vrednosti eksponenta ($-a$).
3. Odrediti indeks rada u mlinu sa kuglama na željenom uzorku na bilo kojoj veličini otvora komparativnog sita.
4. Izračunati koeficijent (K) koristeći jednačinu (72). Vrednosti P_{80} i F_{80} odrediti iz analize granulometrijskog sastava.
5. Izračunati korigovani indeks rada pomoću jednačine (71) na željenom parametru P_{80} i sa dobijenom vrednošću (K).

Na osnovu svojih istraživanja koja su vršena na porfirskoj rudi bakra, autori Josefin i Doll, su dobili da vrednost koeficijenta ($-a$) iznosi (-0,56). Upotreba fiksnog eksponenta od (-0,56) za različite vrste ruda čiji je stvarni eksponent daleko različitiji od dobijenog, može izazvati veliki procenat greške u merenju vrednosti. Ovaj eksponent je primenljiv samo za porfirske rude bakra i druge rude čiji je eksponent u ovom opsegu. Dobijene vrednosti korigovanog indeksa rada i vrednosti dobijene pomoću Bondovog testa date su u tabeli 35 (*Josefin and Doll, 2018*).

Tabela 35. Poređenje rezultata korigovanog indeksa rada i rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom *Josefin and Doll, (2018)*

P_k (μm)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Specifična energija (kWh/t)		Razlika Δ (%)
	Bondov test	Korigovani test	Izmerena	Korigovana	
300	20,92	21,09	10,09	10,17	0,8
212	19,89	20,08	12,45	12,57	1,0
150	19,50	19,50	15,10	15,10	0,0
106	19,39	19,09	18,45	18,17	1,5
75	19,37	18,80	23,32	22,64	2,9

García i saradnici (2021) su u svom radu izvršili analizu rezultata mlevenja dobijenih u širokom opsegu krupnoća čestica i nekoliko kritičnih ruda metala (šelit, wolframit i tantalum). Promenljivost (varijabilnost) indeksa rada u Bondovom mlinu sa kuglama i Bondovom mlinu sa šipkama su proučavali kako bi predložili metodologiju za modelovanje navedene promenljivosti. Definisali su seriju testova za analizu varijacija karakteristika meljivosti za

odabrane rude. Svaki test je rađen na različitom komparativnom situ za svaku rudu. Za svako dobijeno W_i i G za svaki uzorak, izveden je pokušaj modelovanja njihove varijacije sa komparativnim sitom. Na osnovu dobijenih rezultata, zaključili su da postoji značajna promenljivost vrednosti W_i sa krupnoćom proizvoda mlevenja, kako kod testova meljivosti u Bondovom mlinu sa kuglama tako i kod testova meljivosti u Bondovom mlinu sa šipkama (*García et al., 2021*).

Na osnovu dijagrama krivih dobijeno je da ne postoji kontinuitet (zavisnost) vrednosti W_i sa promenom veličine komparativnog sita, ali za parametar G sa promenom veličine komparativnog sita dobijen je paraboličan oblik krive kod svih ispitanih uzoraka. Koeficijenti determinacije za parametar G sa promenom veličine komparativnog sita bili su preko 99,70 % za sve uzorke. Dali su predlog da se parametar G imenuje kao Maxson-ov indeks meljivosti (*Maxson et al., 1933; García et al., 2021*).

Levin (1989) je predložio metodu za određivanje meljivosti finih sirovina, koja uključuje procenu potrebne energije za mlevenje finih sirovina. Za fine sirovine mora se koristiti komparativni test mlevenja u kojem se referentna sirovina iz pogona melje u laboratorijskom mlinu kako bi se odredila ekvivalentna potrošnja energije po obrtaju laboratorijskog mlina. Kako su Bondov mlin za mlevenje i radni uslovi standardizovani, ekvivalentna potrošnja energije po obrtaju treba da bude konstantna, i ona je označena sa B . Kada se jednom odredi vrednost B , mlin se može koristiti za procenu meljivosti finih sirovina bez potrebe za referentnim sirovinama. Vrednost B se može izračunati iz bilo kog Bondovog testa meljivosti. Levin je došao do zaključka da je ekvivalentna energija po obrtaju mlina za Bondov test meljivosti konstantna i iznosi blizu $B = 198 \cdot 10^{-7}$ kWh/obr, i da izračunate vrednosti B koje nisu blizu ove vrednosti potiču od sirovina za koje Bondov test meljivosti daje obmanjujuće ili lažne vrednosti indeksa rada (*Levin, 1989*).

Predloženi test meljivosti za fine sirovine pokazuje specifičnu energiju potrebnu za mlevenje dotične sirovine od njegove početne krupnoće do bilo koje određene krupnoće. Pošto je mali stepen usitnjavanja često prisutan pri domeljavanju grubih koncentrata, jalovine i međuproizvoda, u praksi se često koristi otvoren ciklus mlevenja, a opis testa meljivosti za fine sirovine zasnovan je na mlevenju u otvorenom ciklusu. Radni uslovi koji su određeni za Bondov test, primenjuju se i u testu meljivosti za fine sirovine. Masa početnog uzorka za mlevenje se određuje iz relativne gustine sirovine pomoću jednačine (73) koja se odnosi na izračunavanje mase sirovine. Ova jednačina se koristi u raznim Bondovim testovima meljivosti (*Levin, 1989*).

$$\text{Masa (g)} = \frac{1300 \cdot \text{gustina}}{2,75} = 473 \cdot \text{gustina} \quad (73)$$

Energija potrebna za mlevenje do x % klase - 75 μm u otvorenom ciklusu mlevenja određuje se na sledeći način. Uzorci poznatih masa (g) se melju za različit broj obrtaja ($r_1, r_2 \dots$). Iz analize granulometrijskog sastava samlevenih proizvoda, odredi se učešće klase - 75 μm u procentima, proizveden pri različitom broju obrtaja ($r_1, r_2 \dots$), i odredi se broj obrtaja potreban za dobijanje x % klase - 75 μm . Ako je taj broj N , tada se dobija masa (g) željenog proizvoda za N obrtaja, i 10^6 (g) željenog proizvoda da bi se dobilo $\frac{N}{m} \cdot 10^6$ obrtaja. Svaki obrtaj mlina ekvivalentan je energiji od $198 \cdot 10^{-7}$ kWh/obr. Potrebna specifična energija (W) za smanjenje 10^6 (g) na željenu krupnoću jednaka je:

$$W = \frac{198 \cdot 10^{-7} \cdot N \cdot 10^6}{m} = \frac{19,8 \cdot N}{m} \text{ [kWh]} \quad (74)$$

gde je:

m - masa željenog proizvoda za N obrtaja (g),

N - broj obrtaja.

Tačnost testa meljivosti za fine sirovine može se pokazati samo poređenjem podataka iz postrojenja za mlevenje sitnih sirovina sa procenom potrebne energije koja je naznačena testom meljivosti. Međutim, u vreme kada je ovaj test opisan, bio je dostupan samo jedan izvor odgovarajuće sirovine i bili su pouzdani samo podaci iz postrojenja. Da bi se dopunio taj izvor, test meljivosti primenjen je na uzorku ulaza u sekundarne mlinove u postrojenju gde su korišćena dva ciklusa mlevenja, i gde je primarni mlin radio u otvorenom ciklusu. Testovi su sprovedeni u otvorenom ciklusu, a rezultati su prilagođeni mlevenju u zatvorenom ciklusu primenom korekcionih faktora. Podaci iz postrojenja i rezultati testova meljivosti dati su u tabeli 36 (Levin, 1989).

Tabela 36. Poređenje rezultata iz postrojenja sa rezultatima testa meljivosti za fine sirovine (Levin, 1989)

Uzorak	Bondov radni indeks, W_i (kWh/t)	
	Podaci iz postrojenja	Test meljivosti za fine sirovine
Ruda zlata	14,4	14,8
Ruda zlata	10,8	11,3
Ruda zlata	14,7	13,8

Tabela 36 (nastavak). Poređenje rezultata iz postrojenja sa rezultatima testa meljivosti za fine sirovine (Levin, 1989)

Ruda zlata	17,6	16,4
Fluorit	4,3	3,3
Ruda bakar-olovo-cink	12,8	11,1
Ruda bakar-cink	13,6	12,8
Pesak	9,3	9,3

Magdalinovic i saradnici (2012) su određivali Bondov radni indeks na uzorcima nestandardne krupnoće. Na uzorcima dolomita, rude bakra i kvarcita različitih klasa krupnoće (- 3,327 + 0; - 2,356 + 0; - 1,651 + 0; - 1,168 + 0; - 0,833 + 0) mm odradili su Bondov test na komparativnim sitima od 75 μm i 149 μm . Na osnovu dobijenih rezultata, utvrđena su pravila za promenu parametara G [g/ob], P_{80} [μm] i F_{80} [μm] u Bondovoj jednačini. U zavisnosti od promene krupnoće uzorka identifikovane su promene. Magdalinovic i saradnici su došli do zaključka da je (Magdalinovic et al., 2012):

$$F_{80} = 3327 \cdot k_F, (\mu\text{m}) \quad (75)$$

gde je:

k_F - koeficijent čija je vrednost u opsegu od 0,7 za meke sirovine i do 0,8 za tvrde sirovine.

$$P_{80} = P_n \quad (76)$$

gde je:

P_n - krupnoća proizvoda mlevenja za uzorak nestandardne krupnoće.

$$G = \frac{G_n \ln F_n}{\ln F_{80}} \quad (77)$$

gde su:

G_n i F_n vrednosti određene Bondovim testom na uzorku nestandardne krupnoće,

G i F_{80} vrednosti koje odgovaraju uzorku standardne krupnoće (- 3,327 + 0) mm.

Za uzorak nestandardne krupnoće (uzorak manji od (- 3,327 + 0) mm), prvo se odradi Bondov test na komparativnom situ otvora P_k [μm], kako bi se odredili parametri F_n [μm], P_n [μm] i G_n

[g/ob]. Zatim se izračunavaju vrednosti za: F_{80} (jednačina 75), P_{80} (jednačina 76), G (jednačina 77) i na kraju se izračuna W_i pomoću Bondove jednačine (20). Magdalinovic i saradnici navode da se najmanje odstupanje dobija kada se za k_F uzima vrednost $k_F = 0,75$. Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene Bondovim testom na uzorcima standardne krupnoće i izračunatih vrednosti na osnovu rezultata Bondovog testa na uzorcima nestandardne krupnoće (- 0,833 + 0) mm, za vrednost koeficijenta $k_F = 0,75$ date su u tabeli 37 (Magdalinovic et al., 2012).

Tabela 37. Uzorak: klasa (- 0,833 + 0) mm, $k_F = 0,75$ Magdalinovic et al., (2012)

Uzorak	$P_c = 75 \mu\text{m}$			$P_c = 149 \mu\text{m}$		
	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)	Bondov radni indeks W_i (kWh/t)		Razlika Δ (%)
	Bond test	Magdalinovic		Bond test	Magdalinovic	
Dolomit	12,70	12,86	1,26	9,82	9,82	0,00
Ruda bakra	15,67	15,86	1,21	15,32	15,10	- 1,44
Kvarcit	22,63	23,47	3,71	19,00	19,38	2,00

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Dobijanje novih površina čestica postiže se procesom drobljenja i mlevenja, a ti procesi troše znatnu količinu energije, i zbog toga je vrlo važno da se oni izvrše na što efikasniji način. Prekomerno usitnjavanje (preusitnjavanje) treba izbegavati zbog velike potrošnje električne energije, a i fino mlevenje dodatno otežava sam proces usitnjavanja. Energija neophodna za drobljenje i mlevenje definisana je Bondovim radnim indeksom tj. specifičnom potrošnjom energije po toni sirovine koja se usitnjava. Ovaj parametar se određuje u laboratorijskim uslovima, sprovođenjem Bondovog testa meljivosti, u Bondovom mlinu sa kuglama. Numerički, radni indeks je energija (kWh/sht) neophodna da se jedna kratka tona sirovine beskonačno velike krupnoće usitni do krupnoće pri kojoj 80 % sirovine prolazi kroz sito kvadratnog otvora veličine 100 μm .

Određivanje Bondovog radnog indeksa je deo faze projektovanja postrojenja za pripremu u okviru rudarskog projekta (*Rodríguez et al., 2016*), i može značajno uticati na projektovane troškove koji su vezani za usitnjavanje. Proces usitnjavanja u rudarstvu su energetski najintenzivniji, a takođe i oblast sa najvećom mogućnošću za uštedu energije. Precizno određivanje Bondovog radnog indeksa je od suštinskog značaja za projektovanje i procenu očekivanih troškova koji su vezani za proces usitnjavanja.

Prema standardnom Bondovom postupku, radni indeks se određuje simulacijom suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu u Bondovom mlinu sa kuglama do postizanja 250 % cirkulativne šarže (*Bond, 1949, 1952, 1961; Magdalinovic et al., 2012*). Za Bondov test je potrebno 7 – 10 ciklusa mlevenja, što pokazuje da je postupak vremenski dug i složen, i da je zato podložan greškama.

Iako se smatra industrijskim standardom, sam Bond nije u potpunosti definisao svoj postupak, i zato se ponekad mogu dobiti značajna odstupanja u rezultatima ispitivanja zbog nekih nedefinisanih koraka u samoj metodi. Jedan od tih slučajeva jeste i početna krupnoća uzorka za mlevenje, zašto to mora biti početna krupnoća uzorka od 3,35 mm, i da li je moguće odrediti Bondov radni indeks na uzorcima finijih klasa. U praksi je moguće pronaći sirovinu čija je krupnoća manja od 3,35 mm.

Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je da se pokaže teorijski i praktični doprinos poznavanju odvijanja procesa usitnjavanja na uzorcima nestandardne krupnoće u laboratorijskom Bondovom mlinu sa kuglama. Istraživanja u okviru ove disertacije biće usmerena na:

- Praćenje uticaja početne krupnoće uzorka na vrednosti Bondovog radnog indeksa tokom izvođenja Bondovog standardnog testa,
- Praćenje promene parametra G [g/obr] na uzorcima nestandardne krupnoće prilikom izvođenja Bondovog standardnog testa,
- Praćenje promene parametra P_{80} [μm] na uzorcima nestandardne krupnoće prilikom izvođenja Bondovog standardnog testa,
- Definisanje matematičkog modela za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ako se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće,
- Testiranje tačnosti matematičkog modela za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, na osnovu rezultata iz laboratorijskih ispitivanja i dostupnih rezultata iz obrađene literature.

4. EKSPERIMENTALNI DEO

4.1. Priprema uzoraka za ispitivanje

Uzorci korišćeni u radu su pripremljeni drobljenjem u čeljusnoj drobilici i prosejavanjem na situ otvora krupnoće 3,35 mm sa vraćanjem odseva sita na ponovno drobljenje. Nakon svođenja cele količine uzoraka na klasu krupnoće (- 3,35 + 0) mm, svi uzorci su homogenizovani, a zatim su pripremani za potrebnu polaznu krupnoću uzoraka, na kojima je kasnije određivan Bondov radni indeks. Gornje granične krupnoće nestandardnih polaznih uzoraka u seriji za svaki uzorak su određivane prosejavanjem na standardnoj Retsch-ovoj seriji sita. Gornje granične krupnoće uzoraka nestandardne krupnoće su: 2,36 mm, 1,70 mm, 1,18 mm i 0,850 mm. Formirano je 5 uzoraka od po 10 kg različitih polaznih krupnoća (- 3,35 + 0 mm; - 2,36 + 0 mm; - 1,70 + 0 mm; - 1,18 + 0 mm; - 0,850 + 0 mm) za svaki pojedinačni uzorak, za testove meljivosti po standardnom Bondovom postupku.

U radu su korišćene tri monomineralne sirovine različitih otpornosti na usitnjavanje, zeolit, dacit i bazalt.

Uzorak zeolita je uzet iz ležišta "Jablanica" kod Kruševca. Ležište zeolitiziranog tufa Jablanica se nalazi na periferiji sela Jablanica, u središnjem delu istražnog polja. U tabeli 38 dat je hemijski sastav zeolita.

Tabela 38. Hemijski sastav zeoliza iz ležišta Jablanica

Hemijski element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	g.ž.*
Sadržaj, %	65,0	13,32	1,52	3,15	1,73	0,77	2,28	3,57	7,96

* Gubitak žarenjem

Uzorak dacita je uzet sa površinskog kopa "Krš" koji se nalazi kod Ljubovije i nalazište je tehničkog kamena dacita, eruptivnog porekla. Opština Ljubovija pripada Mačvanskom okrugu i smeštena je na krajnjem zapadu Srbije. U tabeli 39 dat je hemijski sastav dacita.

Tabela 39. Hemijski sastav dacita sa površinskog kopa "Krš"

Hemijski element	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	g.ž.*
Sadržaj, %	64,80	0,72	16,00	1,79	3,45	0,18	1,62	3,90	3,72	1,86	0,03	2,40

* Gubitak žarenjem

Uzorak bazalta uzet je iz ležište bazalta "Vrelo" koje se nalazi u ataru sela Štave na

jugoističnim obroncima centralnog dela planine Kopaonik na nadmorskoj visini od 1390 - 1530 m.n.. U tabeli 40 dat je hemijski sastav bazalta.

Tabela 40. Hemijski sastav bazalta iz ležišta bazalta Vrelo

Hemijski element	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	g.ž.*
Sadržaj, %	48,91	0,86	17,15	2,94	0,97	6,38	8,40	2,90	2,39	0,47	1,82

* Gubitak žarenjem

4.2. Metod rada

Za određivanje Bondovog radnog indeksa korišćen je standardni Bondov laboratorijski mlin sa kuglama, a za određivanje analize granulometrijskog sastava korišćena su laboratorijska sita iz Retsch serije. Mlevenje je vršeno na suvo, simulirajući zatvoreni ciklus mlevenja, do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250 %. Predloženi minimalni broj ciklusa mlevenja je 7, bez obzira na to koliko brzo će se postići stabilni uslovi (*Mosher and Tague, 2001*). Standardni Bondov test je detaljno opisan u uvodnom delu (poglavlje 1.3.1.). Bondov laboratorijski test je vršen na tri sirovine različitih fizičko-hemijskih karakteristika i otpornosti na mlevenje, na komparativnom situ (P_k) od 75 μm . Specifikacije standardnog Bondovog laboratorijskog mlina sa kuglama i uslovi mlevenja dati su u tabeli 41.

Tabela 41. Uslovi mlevenja i specifikacija standardnog Bondovog mlina sa kuglama (*Gharehgheshlagh, 2015; Mwangi et al., 2015*)

Prečnik mlina, D_m , cm	30,48
Dužina mlina, L_m , cm	30,48
Broj obrtaja mlina u minuti, n , min^{-1}	70
Brzina obrtanja mlina, % kritične brzine	91
Masa kugli, M_b , kg	21,125
Zapreminska zapunjenost mlina kuglama, %	19,27
Minimalna dimenzija kugli, mm	15,5
Maksimalna dimenzija kugli, mm	36,8
Geometrija obloge mlina	Glatka
Način mlevenja	Suvo
Zapremina uzorka, V_{rude} , cm^3	700

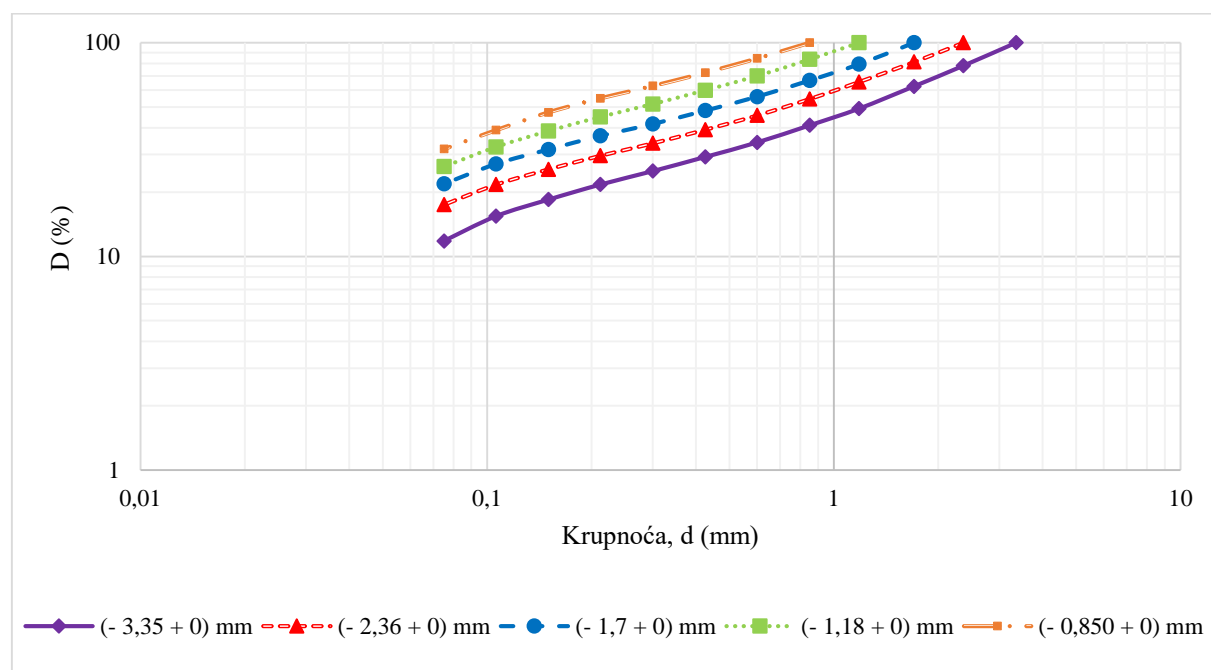
4.3. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka

Granulometrijski sastav polaznih uzoraka za sve tri sirovine dati su u tabelama 42-44 i

prikazani na slikama 7-9. Na osnovu granulometrijskog sastava polaznih sirovina određeni su i potrebni parametri za proračun Bondovog radnog indeksa (parametri F_{80} (μm) i α_{-d} (%)).

Tabela 42. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka zeolita

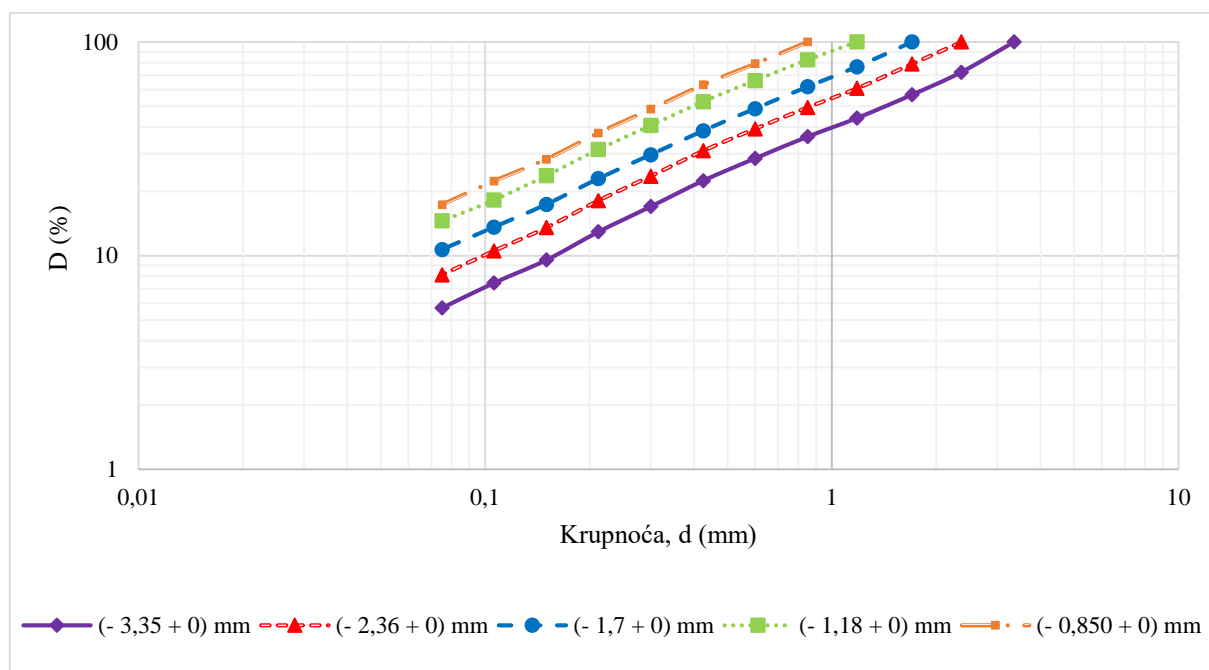
Klase krupnoće (mm)	Uzorak krupnoće - 3,35 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 2,36 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,70 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,18 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 0,850 + 0 mm
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
- 3,35 + 2,36	21,95				
- 2,36 + 1,70	15,55	18,74			
- 1,70 + 1,18	13,35	16,72	20,64		
- 1,18 + 0,850	8,10	9,99	12,74	16,42	
- 0,850 + 0,600	6,90	8,86	10,69	13,64	15,51
- 0,600 + 0,425	4,95	6,51	7,80	9,99	12,02
- 0,425 + 0,300	4,14	5,33	6,46	8,28	9,68
- 0,300 + 0,212	3,37	4,26	5,02	6,66	7,82
- 0,212 + 0,150	3,26	4,04	5,00	6,39	7,75
- 0,150 + 0,106	3,01	3,87	4,56	6,07	8,23
- 0,106 + 0,075	3,62	4,23	5,27	6,25	7,20
- 0,075 + 0,00	11,80	17,45	21,82	26,30	31,79
Σ	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Slika 7. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka zeolita

Tabela 43. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka dacita

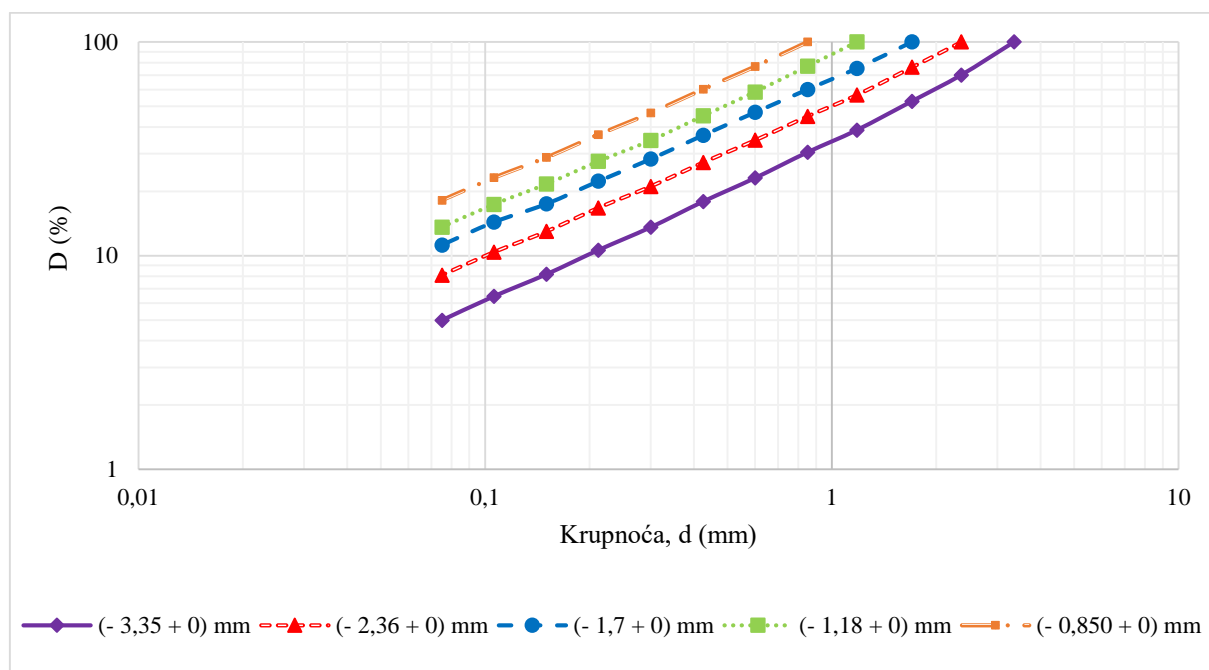
Klase krupnoće (mm)	Uzorak krupnoće - 3,35 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 2,36 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,70 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,18 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 0,850 + 0 mm
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
- 3,35 + 2,36	27,77				
- 2,36 + 1,70	15,60	21,08			
- 1,70 + 1,18	12,59	18,24	23,42		
- 1,18 + 0,850	7,99	11,28	14,83	17,54	
- 0,850 + 0,600	7,52	10,18	12,98	16,40	20,91
- 0,600 + 0,425	6,10	8,28	10,36	13,47	16,02
- 0,425 + 0,300	5,45	7,39	8,76	11,94	14,62
- 0,300 + 0,212	4,05	5,46	6,73	9,21	10,95
- 0,212 + 0,150	3,39	4,57	5,55	7,76	9,25
- 0,150 + 0,106	2,08	3,00	3,78	5,46	5,93
- 0,106 + 0,075	1,77	2,39	2,92	3,68	5,02
- 0,075 + 0,00	5,69	8,13	10,67	14,54	17,30
Σ	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Slika 8. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka dacita

Tabela 44. Granulometrijski sastav polaznih uzoraka bazalta

Klase krupnoće (mm)	Uzorak krupnoće - 3,35 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 2,36 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,70 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 1,18 + 0 mm	Uzorak krupnoće - 0,850 + 0 mm
	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)	Masa (%)
- 3,35 + 2,36	29,92				
- 2,36 + 1,70	17,28	23,84			
- 1,70 + 1,18	14,10	19,64	24,71		
- 1,18 + 0,850	8,24	11,63	15,34	23,05	
- 0,850 + 0,600	7,38	10,22	13,14	18,60	23,14
- 0,600 + 0,425	5,18	7,39	10,20	13,29	16,76
- 0,425 + 0,300	4,33	6,19	8,32	10,45	13,55
- 0,300 + 0,212	2,96	4,36	6,00	7,00	9,71
- 0,212 + 0,150	2,44	3,76	4,84	6,00	8,04
- 0,150 + 0,106	1,72	2,59	3,10	4,23	5,64
- 0,106 + 0,075	1,47	2,28	3,14	3,79	4,98
- 0,075 + 0,00	4,98	8,10	11,21	13,59	18,18
Σ	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Slika 9.** Granulometrijski sastav polaznih uzoraka bazalta

Na osnovu prikazanih granulometrijskih sastava, primećuje se da se sa smanjenjem početne krupnoće (GGK) svih uzoraka povećava maseni sadržaj gotovog proizvoda mlevenja (α_{-d} (%)).

5. REZULTATI I DISKUSIJA

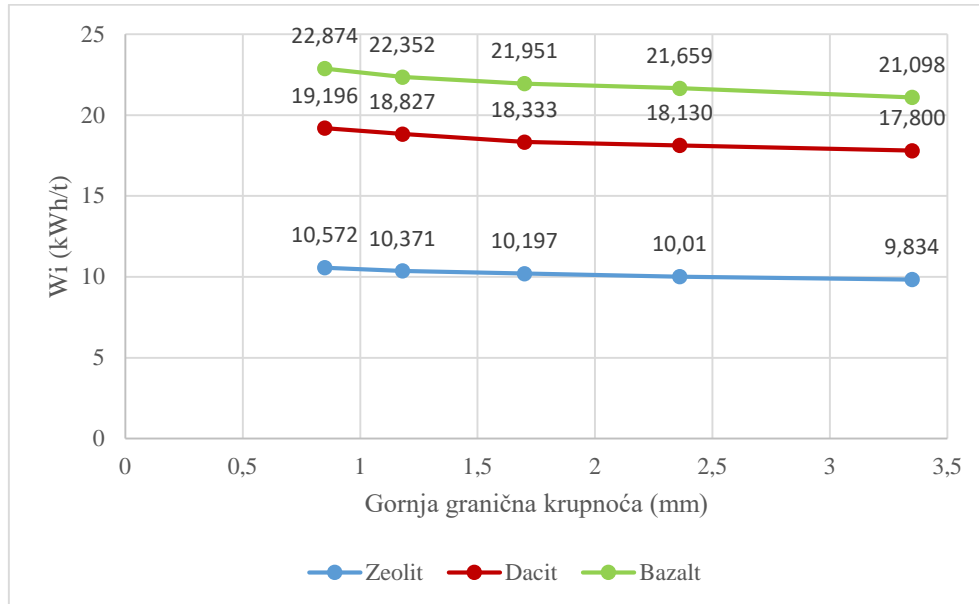
Standardnim Bondovim testom meljivosti određen je Bondov radni indeks W_i na uzorcima zeolita, dacita i bazalta na komparativnom situ (P_k) od 75 μm na uzorcima standardne i nestandardne krupnoće. Pre izvođenja standardnog Bondovog testa meljivosti na svim uzorcima je urađena analiza granulometrijskog sastava kako bi se dobio parametar F_{80} (μm). Kada je ispitivanje završeno, izračunat je parametar G (g/obr), a na svim proizvodima mlevenja izvršena je analiza granulometrijskog sastava proseva komparativnog sita, kako bi se dobio parametar P_{80} (μm). Kada su svi ovi parametri dobijeni, izračunat je Bondov radni indeks W_i pomoću jednačine (20). Rezultati dobijenih vrednosti Bondovog radnog indeksa za uzorke zeolita, dacita i bazalta za standardne i nestandardne krupnoće dati su u tabeli 45 i prikazani na slici 10.

Tabela 45. Rezultati Bondovog radnog indeksa za uzorke standardne i nestandardne krupnoće

Uzorak	Klasa krupnoće (mm)	$P_k = 75 \mu\text{m}$			
		F_{80} (μm)	P_{80} (μm)	G (g/obr)	W_i (kWh/t)
Zeolit	- 3,35 + 0	2440	65,72	2,03	9,834
	- 2,36 + 0	1652	66,40	2,13	10,010
	- 1,70 + 0	1090	66,48	2,20	10,197
	- 1,18 + 0	727	66,84	2,35	10,371
	- 0,850 + 0	544	67,12	2,57	10,572
Dacit	- 3,35 + 0	2646	64,70	0,96	17,800
	- 2,36 + 0	1729	64,76	1,00	18,130
	- 1,70 + 0	1253	65,76	1,05	18,333
	- 1,18 + 0	807	65,20	1,10	18,827
	- 0,850 + 0	609	65,64	1,12	19,196
Bazalt	- 3,35 + 0	2609,1	61,40	0,75	21,098
	- 2,36 + 0	1800,1	63,10	0,79	21,659
	- 1,70 + 0	1278	63,90	0,82	21,951
	- 1,18 + 0	892	63,50	0,85	22,352
	- 0,850 + 0	633	62,30	0,89	22,874

Rezultati iz tabele 45 i slike 10 pokazuju da sa smanjenjem gornje granične krupnoće (GGK) polaznog uzorka, vrednosti Bondovog radnog indeksa (W_i) određene po standardnom Bondovom testu rastu. Primećuje se da se sa promenom krupnoće polaznog uzorka, krupnoća proizvoda mlevenja P_{80} ostaje približno ista ili se u pojedinim slučajevima blago povećava sa smanjenjem GGK polaznog uzorka. Takođe, utvrđeno je da se masa proseva komparativnog sita po jednom obrtaju mlina sa kuglama G povećava sa smanjenjem krupnoće polaznog uzorka.

Jedino se parametar F_{80} smanjuje se smanjenjem krupnoće polaznog uzorka. Promene ovih parametara P_{80} , G i F_{80} u Bondovoj jednačini (20), dovode do povećanja Bondovog indeksa sa smanjenjem krupnoće polaznog uzorka.



Slika 10. Vrednosti Bondovog radnog indeksa sa promenom krupnoće polaznih uzoraka

Prema teoriji, otpornost sirovine na usitnjavanje se povećava sa smanjenjem krupnoće (Magdalinović, 1992), i to može biti jedan od razloga, da se Bondov radni indeks povećava sa smanjenjem krupnoće polaznog uzorka. Takođe, povećanje masenog sadržaja gotovog proizvoda mlevenja (α_d (%)) u polaznom uzorku, može prouzrokovati smanjenje efikasnosti mlevenja što može doprineti povećanju Bondovog radnog indeksa W_i . Za proces mlevenja, idealan je uzorak koji sadrži 15 % gotovog proizvoda mlevenja ili manje (Yap et al., 1982). Na osnovu analize granulometrijskog sastava može se primetiti da samo kod uzorka zeolita maseni sadržaj gotovog proizvoda mlevenja kod uzorka nestandardne krupnoće prelazi 15 %, dok kod uzorka dacita ovo povećanje se primećuje samo kod klase krupnoće (- 0,850 + 0) mm gde maseni sadržaj gotovog proizvoda mlevenja iznosi 17,30 % i kod uzorka bazalta povećanje je primetno samo kod klase krupnoće (- 0,850 + 0) mm gde maseni sadržaj gotovog proizvoda mlevenja iznosi 18,18 %.

U praksi je moguće pronaći sirovinu čija je krupnoća manja od 3,35 mm. Zato je predmet ispitivanja ove doktorske disertacije određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, kako bi se definisao matematički model za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ako se zna koliko iznosi Bondov radni

indeks za uzorak standardne krupnoće. Na osnovu eksperimentalnih rezultata istraživanja u narednom poglavlju definiše se matematički model i daće se postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće.

5.1. Postupak određivanja Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće

Na osnovu teorije i istraživanja koje je Hukki (1962) predstavio jednačinom (9) koja je zasnovana na energiji usitnjavanja i promenljivog eksponenta koji varira sa krupnoćom čestice i istraživanja Josefin i Doll (2018) koji su proširili prethodnu teoriju jednačinom (71), koja omogućava izračunavanje korigovanog radnog indeksa sa promenom izlazne krupnoće (parametra P_{80}), i na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata u ovoj disertaciji definisan je model koji u potpunosti prati i potvrđuje prethodne teorije i istraživanja, ali uz nove određene koeficijente. Jednačina (78) u potpunosti opisuje promenu Bondovog radnog indeksa u funkciji promene gornje granične krupnoće (GGK) polaznog uzorka. Definisani matematički model omogućava određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ukoliko se zna vrednost Bondovog radnog indeksa (W_i) za uzorak standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm.

$$W_{NK} = k \frac{W_i}{F_{80(NK)}^{0.05}} \quad (78)$$

gde je:

W_{NK} - Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, (kWh/t);

W_i - Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm, (kWh/t);

$F_{80(NK)}$ - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine za uzorak nestandardne krupnoće, (μm),

k - vrednosti koeficijenta k date su u tabeli 46.

Tabela 46. Vrednosti koeficijenta k

Vrednosti koeficijenta k	$k = 1,47$	$k = 1,48$	$k = 1,49$
BWI (kWh/t)	10 - 17	18 - 20	> 21

Kako bi se odredio Bondov radni indeks na uzorcima nestandardne krupnoće, neophodno je prvo da se zna kolika je vrednost Bondovog radnog indeksa za standardnu krupnoću (- 3,35 + 0) mm. Drugi korak je da se na uzorku nestandardne krupnoće uradi analiza

granulometrijskog sastava kako bi se dobio parametar (F_{80}). Kada su ovi uslovi ispunjeni, pomoću jednačine (78) može se izračunati vrednost Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće.

U tabeli 47 dati su uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa za uzorke nestandardne krupnoće dobijeni eksperimentalnim putem (W_i) i Bondov radni indeks dobijen korišćenjem matematičkog modela datog jednačinom (78) (W_{NK}).

Tabela 47. Uporedni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem i pomoću jednačine (78)

Uzorak	Krupnoća (mm)	F_{80} (μm)	$P_k = 75 \mu\text{m}$		W_{NK} (kWh/t)	Razlika Δ (%)
			W_i (kWh/t)	k		
Zeolit	- 3,35 + 0	2440	9,834	1,47	-	-
	- 2,36 + 0	1652	10,010		9,980	+ 0,30
	- 1,70 + 0	1090	10,197		10,190	+ 0,07
	- 1,18 + 0	727	10,371		10,399	- 0,27
	- 0,850 + 0	544	10,572		10,550	+ 0,21
Dacit	- 3,35 + 0	2646	17,800	1,48	-	-
	- 2,36 + 0	1729	18,130		18,146	- 0,88
	- 1,70 + 0	1253	18,333		18,441	- 0,60
	- 1,18 + 0	807	18,827		18,851	- 0,13
	- 0,850 + 0	609	19,196		19,118	+ 0,41
Bazalt	- 3,35 + 0	2609,1	21,098	1,49	-	-
	- 2,36 + 0	1800,1	21,659		21,610	+ 0,23
	- 1,70 + 0	1278	21,951		21,984	- 0,15
	- 1,18 + 0	892	22,352		22,383	- 0,14
	- 0,850 + 0	633	22,874		22,770	+ 0,45

Rezultati testiranja definisanog modela ukazuju da je razlika između vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenog računskim i eksperimentalnim putem jako mala, ispod 1 %. Ovakav rezultat potvrđuje veliku pouzdanost modela. Pored nesumljivo prisutnog naučnog doprinosa, definisani model ima i veliku mogućnost primene u praksi. Često je prilikom projektovanja nekog pogona potrebno znati koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće. Jednačina (78) omogućava projektantima i inženjerima u praksi da na veoma jednostavan način izračunaju Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, koji je veoma čest problem u procesima mlevenja. Korišćenjem modela u praksi štedi se vreme i novac, a smanjuje rad i utrošena energija.

Iz obrađene literature, navedeni su radovi u kojima su istraživači određivali Bondov radni indeks na uzorcima nestandardne krupnoće. Kako bi se potvrdila pouzdanost definisanog

modela prikazanog jednačinom (78) izvršeno je testiranje modela korišćenjem rezultata iz dostupne literature. Usporedne vrednosti rezultata koje su istraživači (*Magdalinovic et al., 2012*; *Jankovic et al., 2015*) dobili eksperimentalnim putem i rezultati dobijeni pomoću jednačine (78) dati su u tabeli 48.

Tabela 48. Usporedni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem (*Magdalinovic et al., 2012*; *Jankovic et al., 2015*) i pomoću jednačine (78)

Uzorak	Reference	Krupnoća (mm)	F_{80} (μm)	$P_k = 75 \mu\text{m}$		W_{NK} (kWh/t)	Razlika Δ (%)
				W_i (kWh/t)	k		
Dolomit	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2468	12,70	1,47	-	-
		- 2,356 + 0	1662	12,91		12,89	+ 0,15
		- 1,651 + 0	1090	13,16		13,16	0,00
		- 1,168 + 0	727	13,38		13,43	- 0,37
		- 0,833 + 0	544	13,69		13,63	+ 0,44
Komerzijalni agregat	<i>Jankovic et al. (2015)</i>	- 3,35 + 0	2134	15,0	1,47	-	-
		- 2,36 + 0	1492	15,3		15,3	0,00
Ruda bakra	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2646	15,67	1,47	-	-
		- 2,356 + 0	1729	15,70		15,87	- 1,08
		- 1,651 + 0	1253	15,84		16,14	- 1,89
		- 1,168 + 0	807	16,19		16,48	- 1,79
		- 0,833 + 0	609	16,79		16,72	+ 0,42
Kvarcit	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2650	22,63	1,49	-	-
		- 2,356 + 0	1790	23,17		23,19	- 0,09
		- 1,651 + 0	1240	23,52		23,62	- 0,43
		- 1,168 + 0	870	24,14		24,04	+ 0,41
		- 0,833 + 0	610	24,72		24,47	+ 1,01

Predložena jednačina (78) je testirana na rezultate iz literature, i na osnovu dobijenih rezultata potvrđena je konstatacija iz tabele 46, da vrednosti koeficijenta k , kada se određuje Bondov radni indeks na različitim sirovinama po tvrdoći, iznose: $k = 1,47$ (kada je Bondov radni indeks u opsegu od 10 - 17 kWh/t); $k = 1,48$ (kada je Bondov radni indeks u opsegu od 18 - 20 kWh/t); $k = 1,49$ (kada je Bondov radni indeks veći od 21 kWh/t). Rezultati iz tabele 48 pokazuju da kada se testira jednačina (78) dobija se odstupanje koje je manje od ± 2 %, što potvrđuje tačnost i validnost modela datog jednačinom (78).

Kada se uporede dobijeni rezultati pomoću jednačine (78) sa rezultatima koje su dobili ostali istraživači ranijih godina, koji su određivali Bondov radni indeks na uzorcima nestandardne krupnoće, može se zaključiti da predstavljeni postupak za određivanje Bondovog radnog

indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće daje veoma pouzdane i tačne rezultate, i da je dobijeno odstupanje manje od ostalih odstupanja koje su dobili istraživači ranijih godina. *Berry and Bruce (1966)* su određivali Bondov radni indeks na uzorcima klase krupnoće -1,651 mm i srednja kvadratna relativna greška iznosila je 8,25 %. *Horst and Bassarear (1977)* su određivali Bondov radni indeks na uzorcima klase krupnoće -1,651 mm i srednja kvadratna relativna greška iznosila je 1,72 %. *Mular and Jergensen (1982)* su određivali Bondov radni indeks na uzorcima klase krupnoće -1,651 mm i srednja kvadratna relativna greška iznosila je 4,09 %. *Magdalinovic et al. (2012)* su određivali Bondov radni indeks na uzorcima klase krupnoće (-3,327+0; -2,356+0; -1,651+0; -1,168+0; -0,833+0) i maksimalno odstupanje iznosilo je 3,71 %. U tabeli 49 dati su zbirni rezultati testiranja jednačine (78) na svim uzorcima nestandardne krupnoće na kojima je određivan Bondov radni indeks.

Tabela 49. Zbirni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem i pomoću jednačine (78)

Uzorak	Reference	Krupnoća (mm)	F_{80} (μm)	$P_k = 75 \mu\text{m}$		W_{NK} (kWh/t)	Razlika Δ (%)
				W_i (kWh/t)	k		
Zeolit		- 3,35 + 0	2440	9,834	1,47	-	-
		- 2,36 + 0	1652	10,010		9,980	+ 0,30
		- 1,70 + 0	1090	10,197		10,190	+ 0,07
		- 1,18 + 0	727	10,371		10,399	- 0,27
		- 0,850 + 0	544	10,572		10,550	+ 0,21
Dolomit	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2468	12,70		-	-
		- 2,356 + 0	1662	12,91		12,89	+ 0,15
		- 1,651 + 0	1090	13,16		13,16	0,00
		- 1,168 + 0	727	13,38		13,43	- 0,37
		- 0,833 + 0	544	13,69		13,63	+ 0,44
Komerčijalni agregat	<i>Jankovic et al. (2015)</i>	- 3,35 + 0	2134	15,0	-	-	
		- 2,36 + 0	1492	15,3	15,3	0,00	
Ruda bakra	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2646	15,67	-	-	
		- 2,356 + 0	1729	15,70	15,87	- 1,08	
		- 1,651 + 0	1253	15,84	16,14	- 1,89	
		- 1,168 + 0	807	16,19	16,48	- 1,79	
		- 0,833 + 0	609	16,79	16,72	+ 0,42	
Dacit		- 3,327 + 0	2646	17,800	1,48	-	-
		- 2,356 + 0	1729	18,130		18,146	- 0,88
		- 1,651 + 0	1253	18,333		18,441	- 0,60
		- 1,168 + 0	807	18,827		18,851	- 0,13
		- 0,833 + 0	609	19,196		19,118	+ 0,41

Tabela 49 (nastavak). Zbirni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem i pomoću jednačine (78)

Bazalt		- 3,327 + 0	2609,1	21,098	1,49	-	-
		- 2,356 + 0	1800,1	21,659		21,610	+ 0,23
		- 1,651 + 0	1278	21,951		21,984	- 0,15
		- 1,168 + 0	892	22,352		22,383	- 0,14
		- 0,833 + 0	633	22,874		22,770	+ 0,45
Kvarcit	<i>Magdalinovic et al. (2012)</i>	- 3,327 + 0	2650	22,63	-	-	
		- 2,356 + 0	1790	23,17	23,19	- 0,09	
		- 1,651 + 0	1240	23,52	23,62	- 0,43	
		- 1,168 + 0	870	24,14	24,04	+ 0,41	
		- 0,833 + 0	610	24,72	24,47	+ 1,01	

Na osnovu rezultata iz tabele 49 primećuje se da je odstupanje koje se dobija testiranjem modela opisanog jednačinom (78) manje od 2 %, što potvrđuje tačnost modela za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće. Uparvo ova činjenica, da je dobijeno odstupanje manje od 2 %, potvrđuje prethodnu konstataciju da je definisani model pokazao da i sa promenom ulaznog parametra (F_{80}) i sa novim definisanim koeficijentima, važi Hukki-jeva jednačina. Definisani model je nastavak ranijih teorija i istraživanja vezanih za potrošnju specifične energije sa promenom izlazne krupnoće sirovine, i na osnovu dobijenih rezultata pokazao da se može izračinati specifična potrošnja energije sa promenom ulazne krupnoće sirovine.

Osim korišćenja matematičkog modela za proračun Bondovog radnog indeksa uzoraka nestandardne krupnoće kada je poznat Bondov radni indeks na standardnoj krupnoći, moguće je model iskoristiti i na inverzan način. Kada želimo da znamo koliko iznosi Bondov radni indeks na uzorku standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm, a isti ne posedujemo, moguće je odrediti Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće eksperimentalnim putem a zatim proračunati Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm upotrebom jednačine (79):

$$W_{i(3,35+0)} = \frac{W_{NK} \cdot F_{80(NK)}^{0.05}}{k} \quad (79)$$

gde je:

W_{NK} - Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, (kWh/t);

$W_{i(3,35+0)}$ - Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm, (kWh/t);

$F_{80(NK)}$ - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine za uzorak nestandardne krupnoće, (μm),

k - vrednosti koeficijenta k date su u tabeli 45.

U tabeli 50 dati su uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa za uzorke nestandardne krupnoće dobijeni eksperimentalnim putem (W_i) i Bondov radni indeks dobijen korišćenjem jednačine (79) ($W_{i(3,35+0)}$).

Tabela 50. Uporedni rezultati Bondovog radnog indeksa dobijeni Bondovim testom i jednačinom (79)

Uzorak	Krupnoća (mm)	F_{80} (μm)	$P_k = 75 \mu\text{m}$		W_i (kWh/t)	$W_{i(3,35+0)}$	Razlika Δ (%)
			W_{NK} (kWh/t)	k			
Zeolit	- 2,36 + 0	1652	10,010	1,47	9,834	9,863	- 0,29
	- 1,70 + 0	1090	10,197			9,841	- 0,07
	- 1,18 + 0	727	10,371			9,827	+ 0,07
	- 0,850 + 0	544	10,572			9,854	- 0,20
Dolomit	- 2,356 + 0	1662	12,91		12,70	12,72	- 0,16
	- 1,651 + 0	1090	13,16			12,70	0,00
	- 1,168 + 0	727	13,38			12,65	+ 0,39
	- 0,833 + 0	544	13,69			12,76	- 0,47
Komercijalni agregat	- 2,36 + 0	1492	15,3		15,0	15,0	0,00
Ruda bakra	- 2,356 + 0	1729	15,70		15,67	15,51	+ 1,02
	- 1,651 + 0	1253	15,84			15,39	+ 1,79
	- 1,168 + 0	807	16,19			15,39	+ 1,79
	- 0,833 + 0	609	16,79	15,74		- 0,45	
Dacit	- 2,356 + 0	1729	18,130	1,48	17,800	17,784	+ 0,09
	- 1,651 + 0	1253	18,333			17,696	+ 0,58
	- 1,168 + 0	807	18,827			17,777	+ 0,13
	- 0,833 + 0	609	19,196			17,873	- 0,41
Bazalt	- 2,356 + 0	1800,1	21,659	1,49	21,098	21,145	- 0,22
	- 1,651 + 0	1278	21,951			21,067	+ 0,15
	- 1,168 + 0	892	22,352			21,069	+ 0,14
	- 0,833 + 0	633	22,874			21,195	- 0,46
Kvarcit	- 2,356 + 0	1790	23,17	22,63	22,61	+ 0,09	
	- 1,651 + 0	1240	23,52		22,54	+ 0,40	
	- 1,168 + 0	870	24,14		22,73	- 0,44	
	- 0,833 + 0	610	24,72		22,86	- 1,02	

Rezultati iz tabele 50 pokazuju da kada se Bondov radni indeks računa pomoću jednačine (79), dobija se odstupanje koje je manje od 2 %. Na osnovu ovoga može se zaključiti da i jednačina (79), pomoću koje može da se odredi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, takođe daje veoma tačne i pouzdane rezultate.

Prednost predstavljenih postupaka za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće, i za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima standardne krupnoće ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, je u tome što daje veoma pouzdane rezultate, pri čemu je odstupanje manje od 2 %. Druga prednost ovog postupka je što nije potrebno određivanje Bondovog testa meljivosti, koji zahteva težak fizički rad u laboratoriji, obično i pomoć stručnog tehničkog lica za izvođenje testa meljivosti koji može trajati i preko 8 sati.

6. ZAKLJUČAK

Određivanje Bondovog radnog indeksa smatra se najsavremenijom metodom koja se koristi za proračun kritičnih parametara procesa mlevenja, izbora opreme i kontrolu procesa mlevenja. Bondov test se smatra standardnim laboratorijskim postupkom za određivanje parametra W_i . Kao početni uslov za sprovođenje Bondovog testa meljivosti neophodno je da gornja granična krupnoća sirovine bude 3,35 mm.

Određivanje Bondovog radnog indeksa u mlinu sa kuglama na sirovinama čija je polazna krupnoća manja od standardne krupnoće (- 3,35 + 0) mm, nije posvećeno dovoljno pažnje. Zbog toga je u ovoj doktorskoj disertaciji ispitivan uticaj krupnoće sirovine čija je gornja granična krupnoća manja od 3,35 na vrednost Bondovog radnog indeksa. Ispitivanja su vršena u funkciji krupnoće polaznog uzorka na sirovinama koje su različitog mineralnog sastava i fizičko-mehaničkih karakteristika (zeolit, dacit i bazalt).

Na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata ispitivanja koja su vršena u okviru ove doktorske disertacije na uzorcima zeolita, dacita i bazalta, analize i diskusije rezultata, može se zaključiti sledeće:

- Vrednost Bondovog radnog indeksa raste sa smanjenjem krupnoće sirovine. Za uzorke čija je gornja granična krupnoća znatno manja od standardne, vrednost Bondov radnog indeksa je veća nego vrednost Bondov radnog indeksa dobijena na uzorku standardne krupnoće.
- Masa novostvorenog proseva G [g/obr] po jednom obrtaju mlina sa kuglama raste sa smanjenjem krupnoće polaznog uzorka.
- Karakteristika krupnoće proizvoda mlevenja, parametar P_{80} [μm] koji se koristi u jednačini za proračun Bondovog radnog indeksa, neznatno se povećava sa smanjenjem krupnoće polaznog uzorka.

Istraživanja koje je sproveo Hukki (1962) iz teorije usitnjavanja i opisao jednačinom (9), koja predstavlja jednačinu usitnjavanja zasnovanu na energiji, i proširenim istraživanjem iz ove oblasti koja su nastavili Josefin i Doll (2018) (koja se odnose na teoriju usitnjavanja i izračunavanja korigovanog Bondovog radnog indeksa sa promenom izlazne krupnoće (parametar P_{80})), opisanim jednačinom (71), i na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata Bondovog radnog indeksa za uzorke standardne i nestandardne krupnoće definisan je postupak određivanja Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće. Određivanje

Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće je moguće ukoliko je poznata vrednost Bondovog radnog indeksa za uzorak standardne krupnoće, i korišćenjem jednačine (78). Primenom ovog postupka, na ispitivanim uzorcima dobijeno maksimalno odstupanje za W_i iznosilo je - 0,88 %, što je daleko manja vrednost od odstupanja drugih alternativnih postupaka objavljenih u literaturi. Definisani postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće testirana je i na drugim sirovinama koje su preuzete iz literature, i dobijeno je maksimalno odstupanje za W_i od - 1,89 %. Na osnovu prethodnog postupka, definisan je i postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima standardne krupnoće, ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće. Za ovaj postupak koristi se jednačina (79), a odstupanje koje je dobijeno korišćenjem jednačine (79) je manje od 2 %. Ovako male vrednosti odstupanja dobijene korišćenjem jednačina (78) i (79) potvrđuju tačnost i validnost predstavljenih postupaka, i potvrđuju konstataciju da je definisani model dokazao da i sa promenom ulaznog parametra (F_{80}) i sa novim definisanim koeficijentima, važi Hukki-jeva jednačina.

Kada se uporede dobijeni rezultati pomoću jednačine (78) sa rezultatima koje su dobili ostali istraživači ranijih godina, koji su određivali Bondov radni indeks na uzorcima nestandardne krupnoće, dobijeno odstupanje je manje od odstupanja koja su dobili istraživači ranijih godina.

Definisani postupci za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima nestandardne krupnoće, ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak standardne krupnoće, i za određivanje Bondovog radnog indeksa na uzorcima standardne krupnoće ukoliko se zna koliko iznosi Bondov radni indeks za uzorak nestandardne krupnoće, daju veoma mala odstupanja, koja su manja od 2 %, i predstavljaju praktični doprinos koji će u velikoj meri pomoći inženjerima prilikom projektovanja novih ili optimiziranja procesa u postojećim postrojenjima.

Literatura

Acar C., Investigation of particle breakage parameters in locked-cycle ball milling, (Dissertation), East Technical University, Department of Mining Engineering, Ankara, Turkey, 2013, 116,

Ahmadi R., Shasavari Sh., Procedure for determination of ball Bond work index in the commercial operations, Minerals Engineering, 22, 2009, 104-106,

Aksani B., Sönmez B., Simulation of bond grindability test by using cumulative based kinetic model, Minerals Engineering, 13 (6), 2000, 673-677,

Allen T., Particle Size Measurement: Volume 1: Powder sampling and particle size measurement, Springer, 1997, 526,

Andrić Lj. D., Trumić M. Ž., Usitnjavanje mlevenjem – mikronizacija, mehanička i mehanohemijska aktivacija minerala, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, 2013, 202,

Anticoi H, Guasch E., Hamid S. A., Oliva J., Alfonso P., Garcia-Valles M., Bascompta M., Sanmiquel L., Escobet T., Argelaguet R., Escobet A., de Felipe J. J., Parcerisa D., Peña-Pitarch E., Breakage Function for HPGR: Mineral and Mechanical Characterization of Tantalum and Tungsten Ores, Minerals, 8 (4), 2018, 170,

Aras A., Ozkan A., Aydogan S., Correlations of Bond and Breakage Parameters of Some Ores with the Corresponding Point Load Index, Particle & Particle Systems Characterization, 29, 2012, 204-210,

Babu S. P., Cook D. S., Breaking, crushing and grinding, SME Mining Engineering Handbook, Volume 2, AIMMPE, Inc., New York, 1973,

Bernhardt C., Particle Size Analysis: Classification and sedimentation methods, Particle Technology Series (5), Springer, 1994, 440,

Berry T. F., Bruce R.W., A simple method of determining the grindability of ores, Canadian Mining Journal, 87, 1966, 63-65,

Bond F.C., Standard grindability test tabulated, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 183, 1949, 313-329,

Bond F.C., The third theory of comminution, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 193, 1952, 484-494,

Bond F.C., Crushing and grinding calculation part I and II. British Chemical Engineering 6 (6 and 8), 1961, 378-385 & 543-548,

Böhm, A., Flachberger, H. Überblick über Methoden der Mahlbarkeitsprüfung, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 151, 2006, 223-232,

Chandar R. K., Deo N. S., Baliga J. A., Prediction of Bond's work index from field measurable rock properties, International Journal of Mineral Processing, 157, 2016, 134-144,

Charles R. J., Energy-size reduction relationships in comminution, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 208, 1957, 80-88,

Ciribeni V., Bertero R., Tello A., Puerta M., Avellá E., Paez M., Menéndez-Aguado J. M., Application of the Cumulative Kinetic Model in the Comminution of Critical Metal Ores, Metals, 10 (7), 2020, 925,

Ciribeni V., Menéndez-Aguado J. M., Bertero R., Tello A., Avellá E., Paez M., Coello-Velázquez A. L., Unveiling the Link between the Third Law of Comminution and the Grinding Kinetics Behaviour of Several Ores, Metals, 11 (7), 2021, 1079,

Csóke B., Hatvani Z., Faitli J., Solymár K. Papanastassiou, D., New test method for investigation of grindability in alkaline media at high temperature, XXIII International Mineral Processing Congress, Cape Town, South Africa, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 434-441,

Deniz V., Ozdag H., A new approach to Bond grindability and work index: dynamic elastic parameters, Minerals Engineering., 16 (3), 2002, 211-217,

Deniz, V., Sütçü, N., Umucu, Y., 2003. The effect of circulating load and test sieve size on the Bond work index based on natural amorphous silica. 18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET Antalya, Turkey, 10-13 June, 517-522. ISBN 975-395-605-3,

Doll A. G., A simple estimation method of materials handling specific energy consumption in HPGR circuits, 47th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors CIM, Ottawa, Canada, 20-22 January, 2015, 3-13,

Drzymala J., Mineral Processing: Foundations of theory and practice of minerallurgy, 1st edition, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Poland, 2007, 508,

Ebadnejad A., Investigating of the effect of ore work index and particle size on the grinding modeling of some copper sulphide ores, Journal of Materials Research and Technology, 5 (2), 2016, 101-110,

Ersayin S., Sönmez B., Ergtün L., Aksani B., Erkal F., Simulation of the Grinding Circuit at Gümüşköy Silver Plant, Turkey, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section C), 1993, 102, C32-38,

Ford E., Sithole V., A Comparison of Test Procedures for Estimating the Bond Ball Work Index on Zambian/DRC Copper-Cobalt Ores and Evaluation of Suitability for Use in Geometallurgical Studies, Copper Cobalt Africa, incorporating the 8th Southern African Base Metals Conference, Livingstone, Zambia, 6-8 July 2015, 65-68,

Finch J. A., Ramirez-Castro J., Modelling Mineral Size Reduction in Closed-Circuit Ball Mill at the Pine Point Mines Concentrator, International Journal of Mineral Processing, 8, 1981, 67-78,

García G. G., Oliva J., Guasch E., Anticoi H., Coello-Velázquez A. L., Menéndez-Aguado J. M., Variability Study of Bond Work Index and Grindability Index on Various Critical Metal Ores, Metals, 11 (6), 2021, 970,

Gent M., Menendez M., Toraño J., Torno S., A correlation between Vickers Hardness indentation values and the Bond Work Index for the grinding of brittle minerals, Powder Technology, 224, 2012, 217-222,

Gharehgheshlagh H. H., Kinetic grinding test approach to estimate the ball mill work index, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 52 (1), 2015, 342-352,

Griffith A. A., The phenomena of rupture and flow in solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 221 (582-593), 163-198,

Gupta V. K., Understanding production of fines in batch ball milling for mill scale-up design using the population balance model, Advanced Powder Technology, 29, 2018, 2035-2047,

Haese U., Scheffler P., Fasbender H., Mahlbarkeitsprüfung und Rohrmühlenauslegung bei Zementrohstoffen (Grindability testing and tube mill design for cement raw materials), Cement-Kalk-Gips, 8, 1975, 316-324,

Hafeez G. S. A., Correlation between bond work index and mechanical properties of some Saudi ores, Journal of Engineering Sciences, 40 (1), 2012, 271-280,

Heiskari H., Kurki P., Luukkanen S., Gonzalez M. S., Lehto H., Liipo J., Development of a comminution test method for small ore samples, Minerals Engineering, 130, 2019, 5-11,

Horst W. E., Bassarear J. H., Use of simplified ore grindability technique to evaluate plant performance, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 260, 1977, 348-351,

Hukki R. T., Proposal for a solomonic settlement between the theories of Von Rittinger, Kick, and Bond, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 223, 1962, 403-408,

Inglis C. E., Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 60, 1913, 219-241,

Ipek H., Goktepe F., Determination of grindability characteristics of zeolite, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 47 (1), 2011, 183-192,

Jankovic A., Suthers S., Wills T., Valery W., Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an airclassifier, *Minerals Engineering*, 71, 2015, 133-138,

Josefin Y., Doll A. G., Correction of Bond Ball Mill Work Index Test for Closing Mesh Sizes, *Procemin-Geomet 2018, 14th International Mineral Processing Conference & 5th International Seminar on Geometallurgy*, 28-30 November, Santiago, Chile, 2018, 1-12,

Kapur P. C., Analysis of the Bond grindability test, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 79, 1970, 103-107,

Karra V. K., Simulation of Bond grindability tests, *CIM Bulletin*, 74 (827), 1981, 195-199,

Kaya E., Fletcher P. C., Thompson P., Reproducibility of Bond grindability work index, *Mining, Metallurgy & Exploration*, 20, 2003, 140-142,

Kelly E. G., Dawe G. A., Modified Bond method for the evaluation of crusher efficiency, *Mining, Metallurgy & Exploration*. 6, 1989, 14-17,

Kick F., *Das Gesetz der Proportionalen Widerstände und Seine Anwendungen: Nebst Versuchen über das Verhalten Verschiedener Materialien bei Gleichen Formänderungen Sowohl unter der Presse als dem Schlagwerk*, Verlag von Arthur Felix, Leipzig, Germany, 1885,

Levin J., Observations on the Bond Standard Grindability Test, and a Proposal for a Standard Grindability Test for Fine Materials, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1989, 89 (1), 13-21,

Lewis K. A., Pearl M., Tucker P., Computer Simulation of the Bond Grindability test, *Minerals Engineering*, 3 (1-2), 1990, 199-206,

Lynch A. J., Rowland C. A., *The History of Grinding*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; Illustrated edition, 2005, 209,

Lynch A. J., *Comminution handbook*, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Carlton, Victoria, Australia, 2015, 350,

Magdalinović N., *Meljivost mineralnih sirovina*, Nauka, 1977, 103,

Magdalinović N., *Usitnjavanje i klasiranje mineralnih sirovina (Praktikum)*, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, 1985, 177,

Magdalinović N., A procedure for rapid determination of the Bond work index, *International Journal of Mineral Processing*, 27 (1-2), 1989, 125-132,

Magdalinović N., *Energija usitnjavanja*, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, 1992, 57,

- Magdalinović N., Usitnjavanje i klasiranje, Nauka, Beograd, 1999, 346,
- Magdalinović N., Abbreviated test for quick determination of Bond's Work index, Journal of Mining and Metallurgy, 39 (1-4) A, 2003, 1-10,
- Magdalinovic N., Trumic M., Trumic G., Magdalinovic S., Trumic M., Determination of the Bond work index on samples of non-standard size, International Journal of Mineral Processing, 114-117, 2012, 48-50,
- Maxson W. L., Cadena F., Bond F. C., Grindability of various ores, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 112, 1933, 130-145,
- Mazzinghy D., Alves V., Schneider C., Faria P., Alvarenga T., Galéry R., Predicting the size distribution in the product and the power requirements of a pilot scale vertimill, 9th International Mineral Processing Conference, (Procemin 2012), Santiago, Chile, 21-23 November, 2012, 412-420,
- Menéndez-Aguado J. M., Dzioba B. R., Coello-Valazquez A. L., Determination of work index in a common laboratory mill, Minerals & Metallurgical Processing, 22 (3), 2005, 173-176,
- Menéndez-Aguado J. M., Coello-Velázquez A. L., Tijonov O. N., Rodríguez Díaz M. A., Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba), Powder Technology, 170, 2006, 153-157,
- Menéndez M., Gent M., Torno S., Crespo, N., A Bond Work index mill ball charge and closing screen product size distributions for grinding crystalline grains, International Journal of Mineral Processing. 165, 2017, 8-14,
- Menéndez M., Sierra M. H., Gent M., De Cos Juez F. J., The comminution energy-size reduction of the Bond Mill and its relation to Vickers Hardness, Minerals Engineering, 119, 2018, 228-235,
- Metso, Basics in Minerals Processing Handbook, Edition 10, 2015, Metso Corporation, preuzeto 05.02.2018.,
[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EAE6CA3B8E216295C2257E4B003FBBA6/\\$File/Basics-in-minerals-processing.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/EAE6CA3B8E216295C2257E4B003FBBA6/$File/Basics-in-minerals-processing.pdf),
- Morrell S., An alternative energy-size relationship to that proposed by bond for the design and optimisation of grinding circuits, International Journal of Mineral Processing, 74 (1-4), 2004, 133-141,
- Morrell S., Rock characterisation for high pressure grinding rollscircuit design, International Conference on Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, Volume 4, Vancouver, Canada, 2006, 267-278,

Morrell S., A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilisation efficiency, *Minerals Engineering*, 21, 2008, 224-233,

Mosher J. B., Tague C. B., Conduct and precision of Bond grindability testing, *Minerals Engineering*, 14 (10), 2001, 1187-1197,

Mucsi G., Fast test method for the determination of the grindability of fine materials, *Chemical Engineering Research and Design*, 86 (4), 2008, 395-400,

Mucsi G., Rácz Á., Mag G., Antal G., Csóke B., Volume based closed-cycle Hardgrove grindability method, *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 2019, 9-17,

Mular A. L., Jergensen G. V., Design and installation of comminution circuits, *Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc*, New York, 1982, 1022,

Mwanga A., Lamberg P., Rosenkranz J., Comminution test method using small drill core samples, *Minerals Engineering*, 72, 2015, 129-139,

Mwanga A., Rosenkranz J., Lamberg P., Development and experimental validation of the Geometallurgical Comminution Test (GCT), *Minerals Engineering*, 108, 2017, 109-114,

Napier-Munn T., Morell S., Morrison R., Kojovic T., *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation*, Second edition, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 1999, 413,

Nematollahi H., New size laboratory ball mill for Bond work index determination, *Mining Engineering*, 46 (4), 1994, 352-353,

Neset J. E., Radziszewski P., Hardie C., Leroux D., Assessing the performance and efficiency of fine grinding technologies, *Canadian Mineral Processors 38th Annual Operators Conference*, Ottawa, Canada, 17-19 January, 2006, 283-309,

Nikolić V., García G. G., Coello-Velázquez A. L., Menéndez-Aguado J. M., Trumić M., Trumić S. M., A Review of Alternative Procedures to the Bond Ball Mill Standard Grindability Test, *Metals*, 11 (7), 2021, 1114,

Ozkahraman H. T., A meaningful expression between bond work index, grindability index and friability value, *Minerals Engineering*, 18 (10), 2005, 1057-1059,

Radziszewski P., Energy recovery potential in comminution processes, *Minerals Engineering*, 46-47, 2013, 83-88,

Rodríguez B. Á., García G. G., Coello-Velázquez A. L., Menéndez-Aguado J. M., Product size distribution function influence on interpolation calculations in the Bond ball mill grindability test, *International Journal of Mineral Processing*, 157, 2016, 16-20,

Saeidi N., Noaparast M., Azizi D., Aslani S., Ramadi A., A developed approach based on grinding time to determine ore comminution properties, *Journal of Mining & Environment*, 4 (2), 2013, 105-112,

Schönert K., A first survey of grinding with high-compression roller mills, *International Journal of Mineral Processing*, 22 (1-4), 1988, 401-412,

Smith R. W., Lee K. H., A comparison of data from Bond type simulated closed-circuit and batch type grindability tests, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 241, 1968, 91-99,

Stehr N., Schwedes J., Investigation of the grinding behaviour of a stirred ball mill. *German Chemical Engineering*, 6 (6), 1983, 337-343,

Stief D. E., Lawruk W. A., Wilson L. J., Tower mill and its application to fine grinding, *Mining, Metallurgy & Exploration*, 4, 1987, 45-50,

Swain R., Rao R. B., Alternative Approaches for Determination of Bond Work Index on Soft and Friable Partially Laterised Khondalite Rocks of Bauxite Mine Waste Materials, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 8 (9), 2009, 729-743,

Tavares L. M., de Carvalho R. M., Guerrero J. C., Simulating the Bond rod mill grindability test, *Minerals Engineering*, 26, 2012, 99-101,

Todorović Č. D., Izučavanje meljivosti nehomogenih kompozitnih materijala i testiranje skraćenog postupka za određivanje bondovog radnog indeksa, (Disertacija), Univerzitet u Beogradu, Tehnički Fakultet u Boru, Bor, 2016, 122,

Todorovic D., Trumic M., Andric Lj., Milosevic V. Trumic M., A quick method for bond work index approximate value determination, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53 (1), 2017, 321-332,

Trumić M., Trumić M., Praktikum iz usitnjavanja i klasiranja sirovine, Univerzitet u Beogradu, Tehnički Fakultet u Boru, 2020, 199,

Tüzün M. A., Wet bond mill test, *Minerals Engineering*, 14 (3), 2001, 369-373,

Usman H., Measuring the efficiency of the tumbling mill as a function of lifter configurations and operating parameters, (Dissertation), Colorado School of Mines, Golden, Colorado, United States, 2015, 173,

Von Rittinger P. R., *Lehrbuch der Aufbereitungs Kunde*. Ernst and Korn, Berlin, Germany, 1867,

Walker W.H., Lewis W. K., McAdams W. H., Gilliland E. R., *Principles of Chemical Engineering*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, London, 1937, 749,

Weiss N. L., Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1985,

Wills B. A., Mineral Processing Technology, 5th Edition, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Pergamon, 1992, 855,

Wills B. A., Atkinson K., Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies, Minerals Engineering, 6 (7), 1993, 697-706,

Wills B. A., Wills' Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 7th edition, Butterworth-Heinemann, Boston, 2006, 464,

Wills B. A., Finch J. A., Wills' Mineral Processing Technology, 8th edition, Butterworth-Heinemann, Boston, 2016, 512,

Yap R. F., Sepulveda J. L., Jauregui R., Determination of the Bond work index using an ordinary batch ball mill, In: Mular A. L., Jergensen, G. V. (Eds.), Design and Installation of Comminution Circuits, AIME, New York, 1982, 176-203.

Biografija autora

Vladimir Nikolić je rođen 10.05.1989. godine u Boru, gde je završio osnovnu školu i srednju Mašinsko - elektrotehničku školu, smer: Elektrotehničar računara, sa odličnim uspehom.

Osnovne akademske studije na Tehničom fakultetu u Boru upisao je 2008. god. i završio 2013. god. na studijskom programu Rudarsko inženjerstvo, modul: Reciklažne tehnologije i održivi razvoj sa prosečnom ocenom u toku studija 8,33 i ocenom 10 na završnom radu. Master akademske studije na istom studijskom programu, modul: Priprema mineralnih sirovina upisao je 2015. god. i završio 2017. god. sa prosečnom ocenom 9,50 i ocenom 10 na master radu. Doktorske akademske studije na Tehničkom fakultetu u Boru, na studijskom programu Rudarsko inženjerstvo upisao je školske 2017/2018. godine.

Maja 2016. godine zasnovao je radni odnos na Tehničkom fakultetu u Boru, na poslovima univerzitetskog saradnika u nastavi za užu naučnu oblast Mineralne i reciklažne tehnologije, sa punim radnim vremenom. Marta 2018. godine izabran je u zvanje asistenta za užu naučnu oblast Mineralne i reciklažne tehnologije, sa punim radnim vremenom. U prethodnim izbornim periodima bio je angažovan u nastavi za izvođenje vežbi iz predmeta iz uže naučne oblasti Mineralne i reciklažne tehnologije na osnovnim akademskim studijama i master akademskim studijama: Priprema mineralnih sirovina, Tehnologija pripreme tehnogenih otpada, Specijalne metode koncentracije, Tehnologija PMS, Fizičke metode koncentracije, Ispitivanje mineralnih sirovina, Projektovanje deponija, Sanacija i rekultivacija zemljišta, Teorijske osnove za izradu master rada.

Tokom zaposlenja učestvovao je u organizaciji XI i XII International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development, XIII i XIV International Mineral Processing and Recycling Conference i 5., i 6. Studentskog Simpozijuma „Reciklažne tehnologije i održivi razvoj“. Bio je i tehnički urednik na XI International Symposium on Recycling Technologies and Sustainable Development i 5., i 6. Studentskom Simpozijumu „Reciklažne tehnologije i održivi razvoj“. Tehnički urednik Časopisa nacionalnog značaja „Recycling and Sustainable Development“ bio je 2017., 2018. 2020 i 2021. godine. Autor ili koautor je sedamnaest radova, od čega su 2 rada publikovana u kategoriji (M21a), 1 rad je publikovan u kategoriji (M21), 1 rad je publikovan u kategoriji (M50), 11 radova je publikovano u zbornicima sa međunarodnih naučnih skupova (M30) i 2 saopštenja sa konferencija nacionalnog značaja iz kategorije (M60).