

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNIČKI FAKULTET U BORU

Dejan Č. Todorović

IZUČAVANJE MELJIVOSTI
NEHOMOGENIH KOMPOZITNIH
MATERIJALA I TESTIRANJE SKRAĆENOG
POSTUPKA ZA ODREĐIVANJE
BONDOVOG RADNOG INDEKSA

-DOKTORSKA DISERTACIJA -

Bor, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Dejan Č. Todorović

INHOMOGENEOUS COMPOSITE
MATERIALS GRINDABILITY STUDY AND
SHORTENED PROCEDURE TESTING FOR
THE DETERMINATION OF BOND WORK
INDEX

-DOCTORAL DISSERTATION -

Bor, 2016.

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

.....

Prof. dr Milan Trumić, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu, Tehnčki fakultet u Boru

Članovi komisije:

.....

Dr , Maja Trumić, docent

Univerzitet u Beogradu, Tehnčki fakultet u Boru

.....

Prof. dr , Ljubiša Andrić, redovni profesor

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina

.....

Dr , Vladan Milošević, viši naučni saradnik

Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Ova doktorska disertacija je urađena u laboratorijama za pripremu mineralnih sirovina i hemijska ispitivanja Instituta za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina.

Želim da se zahvalim svom mentoru prof. dr Milanu Trumiću na strpljenju, ukazanoj slobodi tokom istraživanja, korisnim savetima, sugestijama, i velikoj stručnoj pomoći tokom izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se članovima komisije dr Maji Trumić i dr Ljubiši Andriću koji su svojim korisnim savetima i predlozima pomogli da ovaj rad dobije konačan oblik.

Zahvaljujem se kolegama iz ITNMS dr Vladanu Miloševiću, mr Zoranu Bartuloviću, Blaženku Raškoviću, Branislavu Ivoševiću, Jeleni Čarapić, dr Vladimiru Jovanoviću, dr Sonji Milićević, dr Draganu Raduloviću, dr Milanu Petrovu, Ani Popović, Miroslavu Čosoviću, Snežani Zildžović, Jeleni Petrović na pomoći pri izboru teme, u realizaciji eksperimentalnog dela disertacije i pomoći i savetima u toku pisanja. Ova doktorska disertacija je rezultat projekta TR33007.

Zahvaljujem Rukovodstvu RTB Bor i kolegama Darku Milićeviću i Ivici Mladenoviću, koji su mi omogućili da dobijem uzorke iz Pogona RBB koji su korišćeni za ispitivanja.

Zahvaljujem se prof. dr Nedeljku Magdalinoviću na korisnim savetima i sugestijama u osmišljavanju skraćenog postupka za određivanje Bondovog radnog indeksa koji je bio predmet ispitivanja ove doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici.

IZUČAVANJE MELJIVOSTI NEHOMOGENIH KOMPOZITNIH MATERIJALA I TESTIRANJE SKRAĆENOG POSTUPKA ZA ODREĐIVANJE BONDOVOG RADNOG INDEKSA

IZVOD

Ovaj doktorska disertacija bavi se istraživanjem usitnjavanja mineralnih mešavina sa različitim meljivostima u Bondovom mlinu sa kuglama. Razumevanje kako se mešavine različitih sirovina sa različitim meljivostima melju, od velike je važnosti u pripremi mineralnih sirovina. Energija neophodna za drobljenje i mlevenje predstavlja se Bondovim radnim indeksom i određuje se pomoću Bondovog testa meljivosti, u Bondovom mlinu sa kuglama. Njegova vrednost je karakteristika rude i služi za dizajniranje industrijskih postrojenja za usitnjavanje. Određivanje vrednosti Bondovog radnog indeksa je dosta komplikovano, zahteva utrošak vremena i obučeno osoblje za rad i zbog toga je podložno proceduralnim greškama. U radu je dat kraći pregled skraćenih postupaka za određivanje vrednosti Bondovog radnog indeksa zajedno sa uporednim rezultatima dobijenim ovim postupcima i standardnim Bondovim postupkom na različitim uzorcima.

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljen je skraćeni postupak za određivanje približne vrednosti Bondovog radnog indeksa, koji se bazira na zakonu kinetike mlevenja prvog reda. Ovaj skraćeni postupak može da se radi sa dva, tri ili četiri ciklusa mlevenja, u zavisnosti od željene preciznosti traženog podatka.

Ispitivanja su vršena na uzorcima andezita, krečnjaka, topioničke šljake i rude bakra, kao i na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka i kompozitnim uzorcima topioničke šljake i rude bakra u različitim masenim odnosima. Ispitivanja su vršena standardnim Bondovim postupkom za određivanje meljivosti i skraćenim postupkom. Tokom izvođenja eksperimenata meljivosti na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka, praćena je promena sastava proizvoda mlevenja i kružne šarže mlina za prvih devet ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa.

Na osnovu rezultata meljivosti dobijenih standardnim Bondovim postupkom, pokazani su odnosi potrošnje energije za usitnjavanje, kada se komponente mešavine andezita i krečnjaka i mešavine topioničke šljake i rude bakra melju zasebno, i kada se melju zajedno kao mešavina.

Predstavljene su uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijene standardnim i skraćenim postupkom na svim jednokomponentnim i dvokomponentnim uzorcima, koji su bili predmet ispitivanja ove doktorske disertacije. Takođe su pokazane greške koje se dobijaju skraćenim postupkom u odnosu na standardni postupak.

Ključne reči: usitnjavanje, kinetika mlevenja, Bondov radni indeks, skraćeni postupak, kompozitni materijali.

Naučna oblast: Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Mineralne i reciklažne tehnologije

UDK 622.73:621.926.3(043.3)

INHOMOGENEOUS COMPOSITE MATERIALS GRINDABILITY STUDY AND SHORTENED PROCEDURE TESTING FOR THE DETERMINATION OF BOND WORK INDEX

SUMMARY

This doctoral thesis investigates grinding of mineral mixtures with different grindabilities in the Bond ball mill. Understanding the ore mixture grinding is of great importance in mineral processing. The energy required for crushing and grinding is presented by the Bond work index and is determined by means of Bond grindability test. Its value constitutes ore characteristic and it is used for industrial comminution plants designing. Determining the Bond work index value is quite complicated, time-consuming and requires trained operating personnel and therefore is subjected to procedural errors. The paper gives a brief abbreviated procedures overview for determining the value of Bond work index, together with the comparative results obtained by these methods and standard procedures Bond on various samples.

A abbreviated method for the Bond work index approximate value determining, which is based on the first order grinding kinetics law, is presented in this doctoral thesis. This procedure can be performed by two, three or four cycles of grinding depending on the desired precision of the required data.

Tests were conducted on samples of andesite, limestone, smelter slag and copper ore, as well as two-component composite samples of andesite and limestone and composite samples of smelter slag and copper ore in different weight ratios. The tests were performed by standard Bond procedure and abbreviated procedure for grindability determination. During the Bond work index value determining, changes in the composition of the milling products and mill circulating load for the first nine cycles of standard Bond grinding test was monitored.

Based on the results obtained by standard Bond grindability procedure, comminution energy consumption relations, when mixtures component andesite and limestone and mixtures component smelter slag and copper ore are grinding separately and together as a mixture, are presented.

Comparative values obtained by standard and abbreviated Bond work index procedure for all single component and two component samples that were the subject matter of this doctoral thesis, are presented. The error of values that are obtained by abbreviated procedure compared to standard procedure, are also shown.

Keywords: comminution, grinding kinetics, Bond work index, abbreviated procedure, composite materials.

Scientific field: Mining engineering

Field of Academic Expertise: Mineral and recycling technologies

UDC 622.73:621.926.3(043.3)

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. TEORIJSKE OSNOVE.....	3
1.1. Granulometrijski sastav.....	3
<i>1.1.1. Tabelarno prikazivanje granulometrijskog sastava.....</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2. Grafičko prikazivanje granulometrijskog sastava.....</i>	<i>5</i>
1.2. Usitnjavanje.....	7
<i>1.2.1. Struktura čvrstih tela i usitnjavanje.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2. Zakoni usitnjavanja.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3. Načini usitnjavanja.....</i>	<i>14</i>
1.3. Bondov radni indeks.....	15
<i>1.3.1. Skraćeni postupci za određivanje Bondovog radnog indeksa.....</i>	<i>17</i>
<i>1.3.2. Dosadašnja istraživanja Bondovog radnog indeksa mešavina sirovina sa različitim meljivostima.....</i>	<i>32</i>
1.4. Teorijska osnova skraćenog postupka.....	36
1.5. Procedura za izvođenje skraćenog postupka.....	38
2. CILJ ISTRAŽIVANJA.....	41
3. EKSPERIMENTALNI DEO.....	43
3.1. Uzorci za ispitivanja.....	43
<i>3.1.1. Priprema uzoraka.....</i>	<i>45</i>
3.2. Metode laboratorijskih ispitivanja.....	47
<i>3.2.1. Standardni postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa..</i>	<i>47</i>
<i>3.2.2. Postupak za određivanje nerastvornog dela uzorka u hlorovodoničnoj kiselini.....</i>	<i>51</i>

4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	53
4.1. Testovi meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnim uzorcima krečnjaka i andezita.....	53
4.1.1. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 74μm.....</i>	53
4.1.2. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 74μm..</i>	56
4.1.3. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 74μm..</i>	58
4.1.4. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 74μm..</i>	60
4.1.5. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 74μm.....</i>	63
4.1.6. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 105μm.....</i>	65
4.1.7. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 105μm</i>	67
4.1.8. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 105μm</i>	70
4.1.9. <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 105μm</i>	72
4.1.10 <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 105μm.....</i>	74
4.1.11 <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	77
4.1.12 <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150μm</i>	79
4.1.13 <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150μm</i>	81
4.1.14 <i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150μm</i>	84

4.1.15	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	86
4.2	Testovi meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnim uzorcima topioničke šljake i rude bakra.....	88
4.2.1.	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku šljake sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	88
4.2.2.	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	91
4.2.3.	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra =50:50 sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	93
4.2.4.	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	95
4.2.5.	<i>Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku rude bakra sa komparativnim sitom otvora 150μm.....</i>	98
4.3.	Određivanje konstante g_{ki} i konstante p_{ki}.....	100
4.4.	Računske vrednosti W_i kompozitnih uzoraka prema W_i komponenti mešavine i njihovim masenim udelima.....	101
4.5.	Promena sastava cirkulativne šarže i proizvoda mlevenje tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka.....	104
4.6.	Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti.....	109
4.6.1.	<i>Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka.....</i>	109
4.6.2.	<i>Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na kompozitnim uzorcima šljake i rude bakra.....</i>	113

4.6.3.	<i>Objedinjeni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na uzorcima andezita, krečnjaka, šljake i rude bakra.....</i>	115
5.	ZAKLJUČAK.....	118
	LITERATURA.....	120

UVOD

Usitnjavanje je jedan od osnovnih industrijskih procesa koga opterećuju veliki rashodi u teškoj opremi, energiji, funkcionisanju i održavanju. Za usitnjavanje rude do projektovane krupnoće potrebno je utrošiti najviše energije, znatno više od utroška svih ostalih procesa pripreme i koncentracije. Energija neophodna za usitnjavanje neke sirovine se predstavlja vrednošću Bondovog radnog indeksa. 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 μ m.

Fred C. Bond je primetio da su eksperimenti mlevenja u otvorenom ciklusu nepodesni za određivanje utroška energije prilikom mlevenja, odnosno da mogu da prouzrokuju netačno predviđanje utroška energije potrebne za mlevenje, naročito u zatvorenom ciklusu ili za složene rude sastavljene od različitih minerala. Na osnovu ovih zapažanja, Bond i ostali u Allis-Chalmers su razvili test mlevenja u mlinu sa kuglama u zatvorenom ciklusu do uspostavljanja stabilne kružne šarže (Maxson et al., 1933). Prema standardnom Bondovom postupku, radni indeks se određuje simulacijom suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu u Bondovom mlinu sa kuglama do postizanja 250% cirkulativne šarže (F.C. Bond, 1949, 1952, 1961). Za Bondov test je potrebno 7 – 10 ciklusa mlevenja.

Zbog složenosti i dužine Bondovog testa i mogućnosti da se naprave greške prilikom njegovog izvođenja, mnogi naučnici su pokušavali sa manje ili više uspeha da ovaj postupak pojednostave i skrate (Weiss, 1985).

U pripremi mineralnih sirovina sa aspekta uštede energije je od velike važnosti da se razume kako će se mleti mešavine ruda sa različitim meljivostima iz različitih delova ležišta. Prirodni minerali i stene su generalno vrlo heterogene po njihovim fizičkim osobinama. Pri usitnjavanju heterogenih materijala bitno je razumevanje kako će se pojedini sastojci ponašati zasebno i sa druge strane kako će u mlinu ovi sastojci uticati jedan na drugi, da bi se optimizovao proces mlevenja. Dalje važno je razumeti kako će mineralne komponente različite meljivosti neke rude reagovati na mlevenje posle njihovog oslobađanja, pošto zbog različitog odgovora komponentni šarže mlina na mlevenje može doći do formiranja nepovoljne krupnoće za dalji proces koncentracije.

Veliki broj istraživača se bavio izučavanjem procesa mlevenja višekomponentnih mešavina sirovina (Feurstenau i Venkataraman, 1988, Kapur i Feurstenau, 1989, Yan i Eaton, 1994, Hosten i Avsar, 1998, Oner, 2000, Ipek i ostali, 2005, Tavares i Kallembach, 2013).

1. TEORIJSKE OSNOVE

1.1. Granulometrijski sastav

Krupnoća smeše zrna različitog oblika i krupnoće izražava se pomoću granulometrijskog sastava. Granulometrijska analiza različitih proizvoda koncentracije čini osnovni deo laboratorijskih ispitivanja i veoma je važna za određivanje kvaliteta mlevenja i utvrđivanje stepena oslobađanja korisnih minerala od jalovine pri različitim krupnoćama zrna. U fazi koncentracije granulometrijski sastav služi za određivanje optimalne krupnoće ulaza za postizanje što veće efikasnosti. Granulometrijski sastav pokazuje koliki je sadržaj zrna pojedinih uskih klasa krupnoće, odnosno sadržaj zrna čija se krupnoća kreće u određenom rasponu od d_1 do d_2 . Za precizniji i detaljniji uvid u krupnoću smeše, raspon krupnoće klasa treba da bude što manji. Raspon krupnoća klasa zavisi od zahteva u pogledu uvida u sastav smeše i od uređaja na kojima se granulometrijski sastav određuje.

Postoji širok opseg metoda kojima može da se odredi granulometrijski sastav sirovine i proizvoda koncentracije. U tabeli 1 je navedena kratka lista najčešće upotrebljivanih metoda za određivanje sastava materijala po krupnoći, zajedno sa područjem primene, da li se primenjuju na mokrim ili suvim uzorcima i da li su podeljeni uzorci dostupni za dalje analize.

Tabela 1 – Metode za određivanje granulometrijskog sastava i područja primene

Metoda	Suvo ili mokro	Frakcionisani uzorci	Približno područje primene d, μm
Sitovna analiza	suvo i mokro	da	5 – 1.000.000
Laserska difrakcija	suvo i mokro	ne	0,1 – 2.000
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

Sitovna analiza se najčešće koristi za određivanje granulometrijskog sastava proizvoda mlevenja i klasiranja i pokriva veoma širok opseg veličina zrna. Na ovaj način se uzorak razvrstava na klase krupnoće po geometrijskoj veličini zrna. Raspon krupnoća klasa zavisi od veličine otvora sita (d) koja se koriste za sitovnu analizu. Najčešće korišćena u praksi je serija sita sistema Tyler, kod koje je odnos veličina otvora bilo koja dva susedna sita u seriji konstantan i iznosi $\sqrt{2}=1,414$.

$$\frac{d_{n-1}}{d_n} = \dots = \frac{d_2}{d_3} = \frac{d_1}{d_2} = 1,414. \quad (1)$$

Sitovna analiza je jedna od najstarijih metoda granulometrijske analize, vrši se sukcesivnim sejanjem mase uzorka na sitima sve manjeg otvora i merenjem ostataka na njima. Može se izvoditi sejanje mokrog ili suvog materijala. Sejanjem na jednom situ, uzorak se razvrstava na dve klase krupnoće. Krupna klasa, koja ostaje na situ, čine je zrna veća od otvora sita i naziva se odsev ili nadrešetni proizvod. Sitna klasa, koja prolazi kroz otvore sita, čine je zrna manja od otvora i naziva se prosev ili podrešetni proizvod. Sejanjem uzorka na više sita iz serije izdvajaju se uske klase krupnoće, koje su ograničene dimenzijama otvora sita (d_1) i (d_2), označava se sa ($-d_1+d_2$, $d_1>d_2$). To znači da je ta klasa krupnoće sitnija od dimenzije (d_1) i krupnija od dimenzije (d_2). Krupnoća najvećeg zrna u uzorku označava se sa (d_{max}). Krupnoća najsitnije klase označava se sa ($-d_n+0$).

1.1.1. Tabelarno prikazivanje granulometrijskog sastava

Postoji nekoliko načina kako mogu tabelarno da se prikažu rezultati sitovne analize. U tabeli 2 su prikazana tri najčešće upotrebljivana načina za tabelarni prikaz rezultata. U tabeli 2 je prikazano:

Kolona 1 – Klase krupnoće koje su korišćene u testu.

Kolona 2 – Mase pojedinačnih klasa krupnoće dobijenih sitovnom analizom.

Kolona 3 – Mase pojedinačnih klasa krupnoće izražene u procentima (popunjavaju se računskim putem).

Kolona 4 – Nominalna veličina otvora sita korišćenih u testu.

Kolona 5 - Kumulatивно procentualno učešće materijala koji ostaje na situ.

Kolona 6 – Kumulatивно procentualno učešće materijala koji prolazi kroz sito.

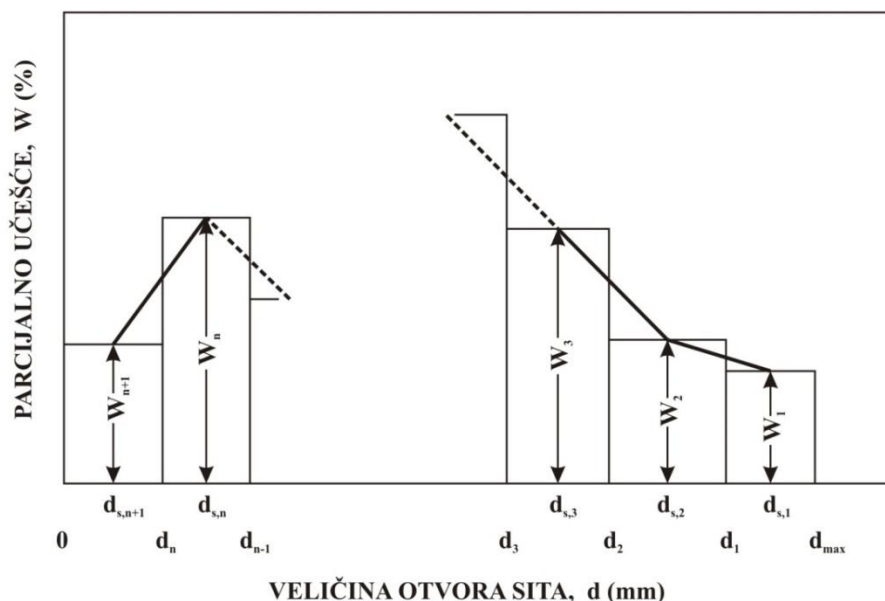
Tabela 2 – Model tabličnog prikazivanja granulometrijskog sastava (Magdalinović, 1991.)

Klasa krupnoće d_i , mm	Parcijalno učešće		Nominalna veličina otvora d_i , mm	Kumulativno učešće	
	Maseno m_i , kg	Procentualno W_i , %		Po odsevu R_i , %	Po prosevu D_i , %
$-d_{\max}+d_1$	m_1	W_1	d_{\max}	$R_1 = W_1$	$D_1 = \sum_{i=n+1}^1 W_i$
$-d_1+d_2$	m_2	W_2	d_1	$R_2 = \sum_{i=1}^2 W_i$	$D_2 = \sum_{i=n+1}^2 W_i$
$-d_2+d_3$	m_3	W_3	d_2	$R_3 = \sum_{i=1}^3 W_i$	$D_3 = \sum_{i=n+1}^n W_i$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$-d_{n-1}+d_n$	m_n	W_n	d_{n-1}	$R_n = \sum_{i=1}^n W_i$	$D_n = \sum_{i=n+1}^n W_i$
$-d_n+0$	m_{n+1}	W_{n+1}	d_n	$R_{n+1} = \sum_{i=1}^{n+1} W_i$	$D_{n+1} = W_{n+1}$
	$\sum_{i=1}^{n+1} m_i = M$	$\sum_{i=1}^{n+1} W_i = 100$			

Tabelarni prikaz granulometrijskog sastava pruža uvid samo u one podatke o krupnoći smeše, koji su određeni izborom raspona krupnoće klasa pri analizi. Podaci o krupnoći koji služe za teorijska razmatranja i praktične proračune u usitnjavanju i klasiranju mineralnih sirovina, najčešće se ne mogu očitati neposredno iz tabele. Očitavanje takvih podataka je jedino moguće iz grafičkog ili analitičkog prikaza granulometrijskog sastava.

1.1.2. Grafičko prikazivanje granulometrijskog sastava

Postoji puno različitih načina za prikazivanje granulometrijskog sastava. Najčešće se tabelarni podaci prikazuju histogramski ili kao kumulativna kriva proseva (ili odseva). Na slici 1 je predstavljen histogramski način prikazivanja granulometrijskog sastava. Veličina otvora sita, odnosno krupnoća zrna se nanosi na apscisnoj osi koordinatnog sistema, a na ordinati procentualna učešća zrna. Grafički prikaz se može predstaviti u vidu histograma ili u vidu grafika koji se naziva karakteristika krupnoće ili kriva granulometrijskog sastava.



Slika 1 – Histogramski prikaz granulometrijskog sastava (Magdalinović, 1991.)

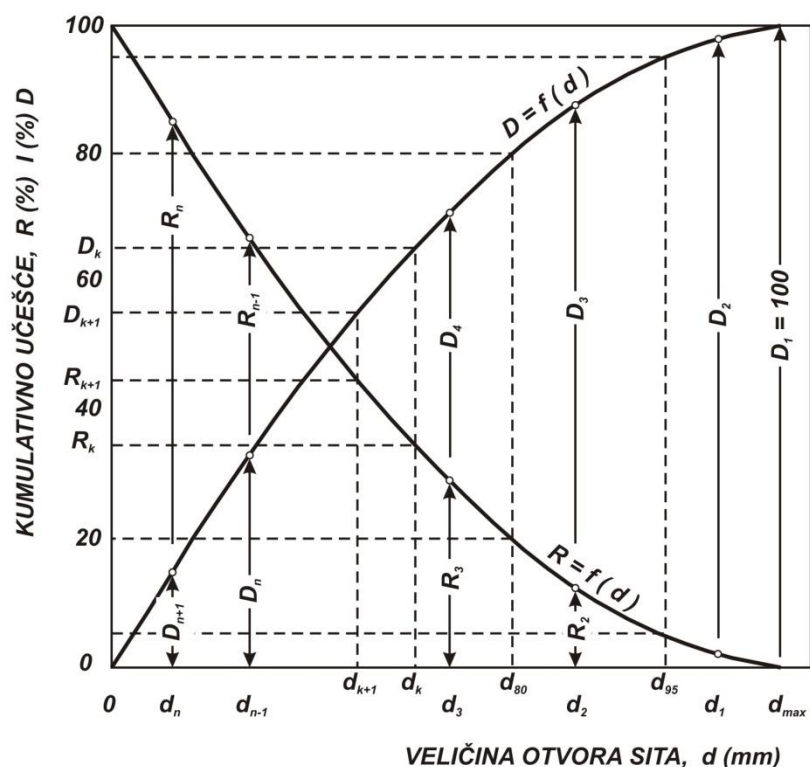
Kumulativne karakteristike krupnoće po plusu $R=f(d)$ ili po minusu $D=f(d)$ pružaju potpunu grafičku interpretaciju granulometrijskog sastava (slika 2). Veličina otvora sita se nanosi na apscisnoj osi koordinatnog sistema, a na ordinati kumulativna procentualna učešća zrna proseva ili odseva. Kumulativne krive odseva ili proseva omogućavaju da se odredi učešće bilo koje uske klase krupnoće, kao i drugi podaci o krupnoći uzorka kao što su d_{80} , d_{95} i d_{max} , koji se koriste u praktičnim proračunima.

Učešće klase (d_k+d_{k+1}) se određuje sa grafika na slici 2 kao razlika ordinata

$$W_{k+1} = R_{k+1} - R_k = D_k - D_{k+1} \quad (2)$$

Maksimalnu krupnoću zrna (d_{max}), koja se naziva i gornja granična krupnoća (*GGK*) određuje se kao presek krive $R=f(d)$ sa apscisom, ili krive $D=f(d)$ sa ordinatom 100%. Gornja granična krupnoća se u nekim publikacijama podrazumeva kao otvor sita kroz koje prolazi 95% uzorka (d_{95}) i odgovara prosevu $D=95\%$ na krivi $D=f(d)$ i odsevu $R=5\%$ na krivi $R=f(d)$ - slika 2.

Krupnoća (d_{80}) koja predstavlja veličinu otvora sita kroz koje prolazi 80% uzorka se često koristi za praktične proračune u usitnjavanju – slika 2.



Slika 2 – Kumulativne karakteristike krupnoće (Magdalinović, 1991.)

1.2. Usitnjavanje

Korisni minerali u prirodi se najčešće javljaju u jako finim frakcijama i čvrsto su vezani za minerale jalovine. Zbog toga je neophodno da se prvo izvrši njihovo oslobađanje pre separacije. Ovo se postiže usitnjavanjem, gde se veličina zrna rude progresivno smanjuje sve dok se ne dobiju čista zrna minerala koja se kasnije mogu razdvojiti nekom od metoda separacije u pripremi mineralnih sirovina (King, 1993, Gay, 2004).

Usitnjavanje rude počinje na kopu mašinama za otkopavanje i miniranjem, da bi se odvojila od svog prirodnog ležišta i da bi bila lakša za rukovanje mašinama za otkopavanje, utovar i transport. Dalje se usitnjavanje rude nastavlja u postrojenjima za pripremu mineralnih sirovina kao niz drobljenja i mlevenja do željene kontrolisane krupnoće zrna. Drobilice koje se primenjuju u pripremi mineralnih sirovina rade na principu pritiska i udara. Usitnjavanje se dalje upotpunjava sa mlevenjem koje radi na principu abrazije i udara zrna rude meljućom šaržom mlina (šipke, kugle ili šljunak).

Stepen usitnjavanja (n) ili stepen smanjenja krupnoće je definisan odnosom maksimalne krupnoće sirovine pre (D_{max}) i maksimalne krupnoće posle usitnjavanja (d_{max}):

$$n = \frac{D_{max}}{d_{max}} \quad (3)$$

Drobljenje se po pravilu vrši na suvo, osim kada sirovina sadrži veliki udeo gline, pa se istovremeno vrši i pranje sirovine. Drobljenje se vrši u jednom, dva, tri, a ređe u četiri stadijuma. Broj stadijuma zavisi od krupnoće ulazne sirovine i definitivnog proizvoda drobljenja. Step en usinjavanja drobilica je dosta mali, i kreće se od 3 do 6 u svakoj pojedinačnoj fazi drobljenja.

Obrtni mlinovi se koriste u poslednjim fazama usitnjavanja i kao meljuća tela mogu koristiti čelične šipke, čelične kugle ili krupni komadi rude. Mlevenje se najčešće izvodi u gustoj pulpi (mešavina rude i vode), mada se u ograničenom obimu primenjuje i mlevenje suve rude. Postoji oblast krupnoće rude gde je moguće vršiti usinjavanje i mlevenjem i drobljenjem.

U većini slučajeva step en usitnjavanja sirovina je veoma veliki. Na primer za rudu bakra $n=1000/0,2=5000$. Tako veliki step en usitnjavanja se ostvaruje postupnim usitnjavanjem u više drobilica i mlinova $n=n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k$. U tabeli 3 su prikazani nazivi pojedinih stadijuma usitnjavanja i rasponi krupnoće sirovine na ulazu i izlazu iz svakog stadijuma.

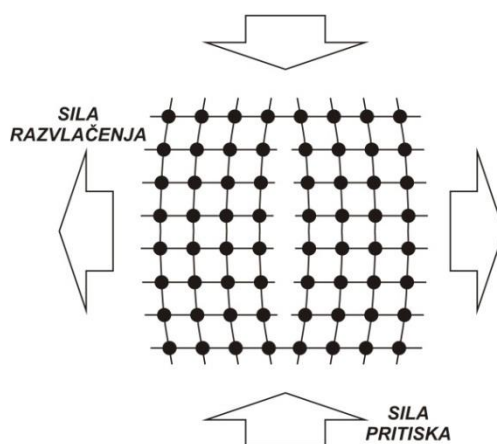
Tabela 3 – Stadijumi usitnjavanja

Stadijum	Naziv	Krupnoća, mm	
		Ulazna sirovina	Proizvod usitnjavanja
Drobljenje			
Prvi	Krupno (primarno) drobljenje	1000 ÷ 300	350 ÷ 100
Drugi	Srednje (sekundarno) drobljenje	350 ÷ 100	100 ÷ 40
Treći	Sitno (tercijarno) drobljenje	100 ÷ 40	30 ÷ 5
Mlevenje			
Prvi	Grubo mlevenje	30 ÷ 20	4 ÷ 2
Drugi	Fino mlevenje	10 ÷ 2	0,5 ÷ 0,1

Mašine za usitnjavanje koje se koriste u pripremi mineralnih sirovina, po konstruktivnim karakteristikama i osnovnom načinu dejstva, se svrstavaju u pet grupa: 1. čeljusne drobilice; 2. konusne drobilice; 3. drobilice sa valjcima; 4. udarne drobilice; 5. cilindrični mlinovi.

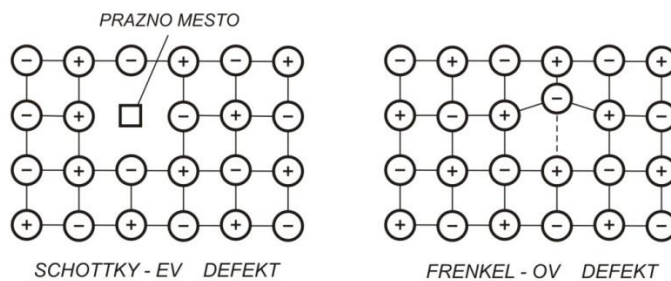
1.2.1. Struktura čvrstih tela i usitnjavanje

Većina minerala su kristalne strukture u kojima su atomi pravilno raspoređeni u trodimenzionalnim nizovima. U kristalnoj rešetki minerala dejstvuju međuatomske veze i imaju osobinu da su delotvorne samo na malim rastojanjima. Ove veze mogu da se pokidaju spoljnim silama (silom razvlačenja ili silom pritiska) – slika 3.



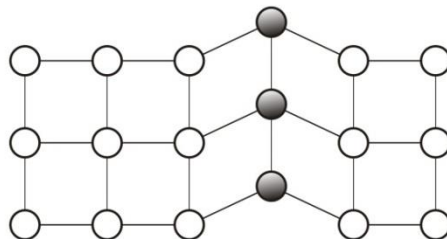
Slika 3 – Naprezanje kristalne rešetke i nastanak pukotine pod uticajem sile razvlačenja ili sile pritiska (Wills, 2006.)

Otpornost koju telo pruža delovanju spoljnih sila naziva se čvrstoća (čvrstoća na pritisak, čvrstoća na smicanje itd.). Za idealnu strukturu kristalne rešetke mogu se izračunati sile vezivanja elementarnih čestica u kristalu, a time i da se odredi teorijska čvrstoća. Eksperimentalna merenja pokazuju da su stvarne čvrstoće $10^2 \div 10^3$ puta manje od teorijskih vrednosti. Ovo se dešava zato što čvrsta tela u prirodi nemaju idealnu strukturu, već su u njihovim kristalnim rešetkama prisutni makroskopski, mikroskopski i submikroskopski defekti. Na slici 4 su prikazani tačkasti defekti u kristalu.



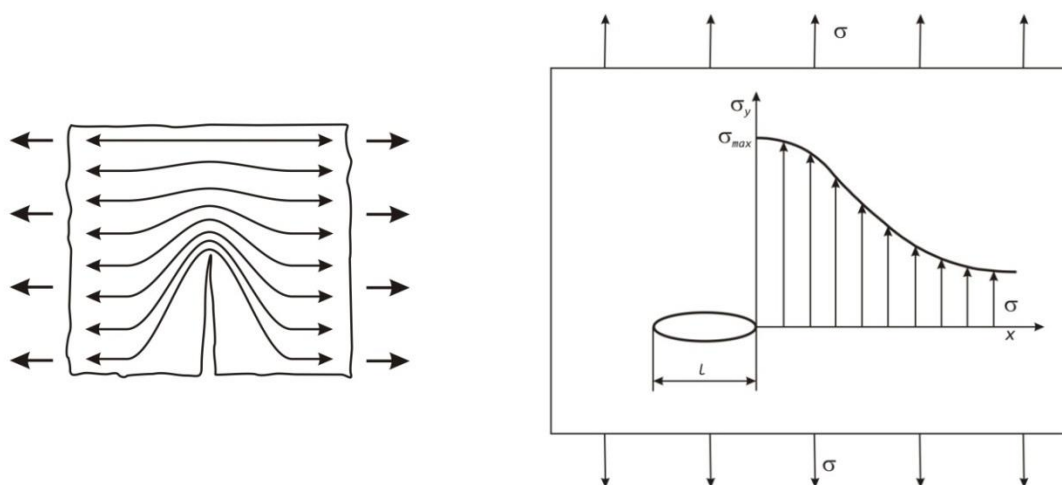
Slika 4 – Šematski prikaz tačkastih defekata kristala (Magdalinović, 1991.)

Dislokacije u kristalu (slika 5) imaju najveći uticaj na čvrstoću, a pod uticajem spoljnih sila se lako premeštaju kroz kristal i spajaju se sa drugim defektima i tako grupisane na jednom mestu stvaraju mikropukotine (Magdalinović, 1991).



Slika 5 – Šematski prikaz dislokacije u kristalu (Magdalinović, 1991.)

Stene se sastoje od različitih minerala sa različitim veličinama zrna, i zbog toga čak i kada je spoljašnje opterećenje ravnomerno, unutrašnja napreznja se ne distribuiraju podjednako. Distribucija napreznja zavisi od mehaničkih osobina pojedinačnih minerala, a najviše od prisustva pukotina i nepravilnosti u kristanim rešetkama, koje se ponašaju kao mesta koncentracije napreznja.



Slika 6 – Koncentracija napreznja na vrhu pukotine i mikropukotina sa dijagramom naponskog polja (Wills, 2006., Magdalinović, 1991.)

Inglis (1913) je pokazao da je povećanje napreznja na ovakvim mestima proporcionalno kvadratnom korenu dužine pukotine normalnoj na pravac pružanja napreznja –slika 6. Zbog toga postoji kritična vrednost dužine pukotine za svaki nivo napreznja na kome je povećano napreznje na vrhu pukotine dovoljno da pokida atomsku vezu u toj tački. Ovakav prekid atomske veze će povećati dužinu pukotine, i

time povećati koncentraciju naprezanja, širenje pukotine kroz sredinu i prouzrokovati nastanak preloma (Wills, 2006). Kritična dužina mikropukotine kod krtih materijala, među koje spada većina ruda, iznosi $1\div 10\mu\text{m}$.

1.2.2. Zakoni usitnjavanja

Teorija usitnjavanja se bavi odnosom utrošene energije i ostvarenim promenama u krupnoći materijala. Postoje razne teorijske hipoteze i empirijske formule koje povezuju utrošak energije i ostvarene promene u krupnoći, i ni jedna od njih nije potpuno zadovoljavajuća.

Najveći problem leži u tome što se u praksi najveći deo energije potroši na pokretanje delova mašina za usitnjavanje, a samo mali deo ukupne energije se potroši na samo usitnjavanje materijala (Chu-wen i Lu, 2007, Radziszewski, 2013). Na primer, u mlinu sa kuglama, manje od 1% ukupne energije se upotrebi za smanjenje krupnoće sirovine, a glavni deo se pretvara u toplotu (Fuerstenau i Abouzeid, 2002).

Kod plastičnih materijala će se energija trošiti na menjanje oblika bez stvaranja novih slobodnih površina (Mudze, 2016). Sve teorije usitnjavanja pretpostavljaju da su materijali koji se usitnjavaju krti i da se energija ne troši na plastične deformacije (produžavanje ili skraćivanje), već samo na lomljenje (usitnjavanje).

Prvu teoriju (zakon) usitnjavanja definisao je **Rittinger** (1867) i po njemu je specifična potrošnja energije na usitnjavanje proporcionalna novostvorenoj specifičnoj površini sirovine:

$$E_R = K_R \cdot (s - s_0), [kWh/t] \quad (4)$$

gde je:

E_R – specifična potrošnja energije, $[kWh/t]$,

K_R – konstanta proporcionalnosti, koja predstavlja energiju potrebnu za stvaranje 1m^2 nove površine, $[kWh/m^2]$,

s – specifična površina sirovine nakon usitnjavanja, $[m^2/t]$,

s_0 – specifična površina sirovine pre usitnjavanja, $[m^2/t]$.

Specifična površina sirovine pre i posle usitnjavanja može se izraziti kao (Lešić i Marković, 1968):

$$s_0 = \frac{6}{\rho D_s} \quad (5)$$

$$s_0 = \frac{6}{\rho d_s} \quad (6)$$

gde je:

ρ – gustina sirovine, [t/m^3].

D_s – srednji prečnik sirovine pre usitnjavanja, [m].

d_s – srednji prečnik sirovine posle usitnjavanja, [m].

Kada se izrazi (5) i (6) uvrste u jednačinu (4) dobija se:

$$E_R = K_R \cdot \frac{6}{\rho} \cdot \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right), [kWh/t] \quad (7)$$

$$E_R = C_R \cdot \left(\frac{1}{d_s} - \frac{1}{D_s} \right), [kWh/t] \quad (8)$$

gde je:

$C_R = 6 \cdot K_R / \rho$ - konstanta proporcionalnosti koja zavisi od mehaničkih karakteristika sirovine, [$kWh m/t$].

Drugu teoriju (zakon) usitnjavanja definisao je **Kick** (1885) i po njemu je rad potreban da se izvrše promene oblika i konfiguracije tela sličnih geometrijskih oblika i sličnog sastava proporcionalan zapremini odnosno masama ovih tela (Stamboliadis, 2006, Liu i ostali, 2016). Ovo prikazano u drugom obliku znači da se slična tela pod delovanjem sličnih sila deformišu na sličan način, i da shodno tome i rad na usitnjavanju proporcionalan samo stepenu usitnjavanja a ne i polaznoj dimenziji D :

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{V_n}{V_m} = \frac{G_n}{G_m} \quad (9)$$

gde je:

A – rad,

V - zapremina,

G – težina,

m i n – stepeni usitnjavanja.

Prema Kicku specifična potrošnja energije na usitnjavanje proporcionalna je logaritmu broja zrna ili stepenu usitnjavanja:

$$E_K = C_K \cdot \log \frac{D_s}{d_s}, [kWh/t] \quad (10)$$

gde je:

C_K – konstanta proporcionalnosti, koja zavisi od mehaničkih karakteristika sirovine, [kWh/t].

Bond (1952) je kao rezultat eksperimentalnog rada definisao treću teoriju (zakon) usitnjavanja, po kojoj je specifična potrošnja energije na usitnjavanje obrnuto proporcionalna kvadratnom korenu novostvorene specifične površine sirovine:

$$W = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right), \text{ [kWh/sht]} \quad (11)$$

gde je:

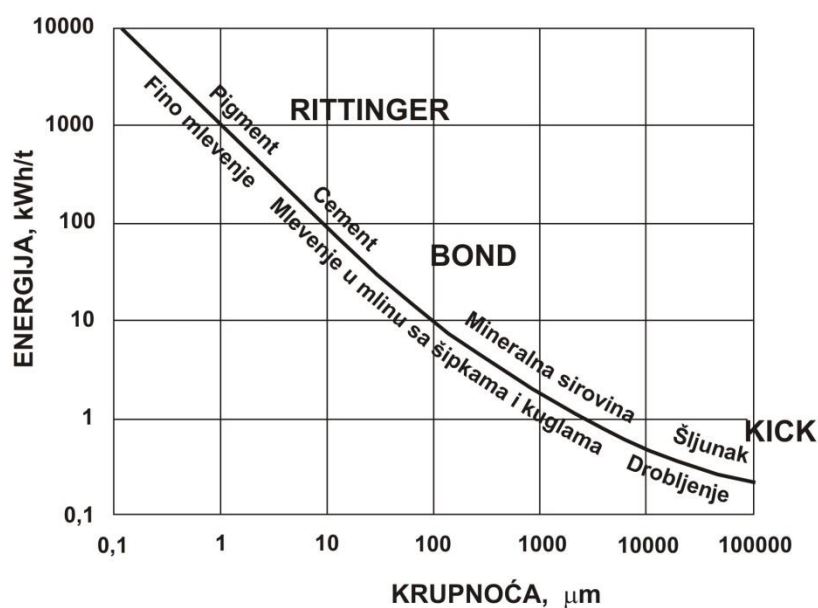
E_B – specifična potrošnja energije, [kWh/sht],

C_B – konstanta proporcionalnosti, [kWh/sht],

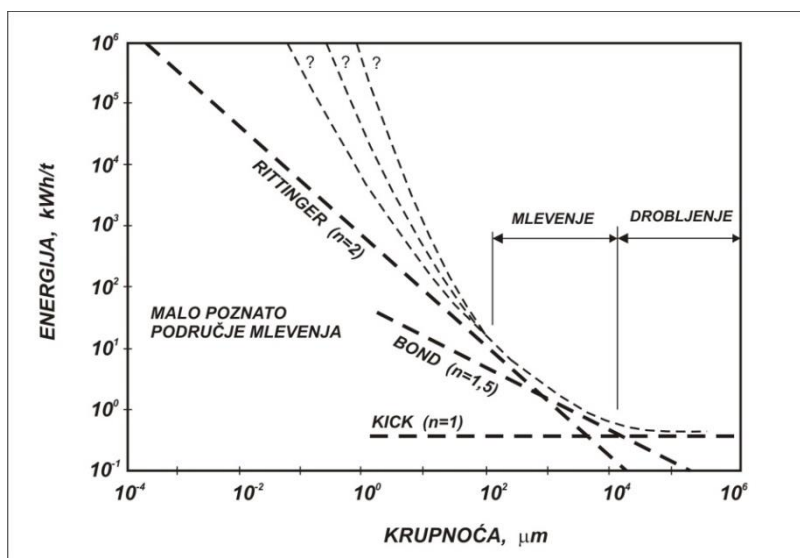
P – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80% sirovine posle usitnjavanja, [μm],

F – veličina kvadratnih otvora sita kroz koje prolazi 80% sirovine pre usitnjavanja, [μm].

Istraživanja su pokazala da „zakon“ Kicka dobro opisuje proces drobljenja za krupnoće iznad 1cm, Bondov „zakon“ je primenljiv u opsegu usitnjavanja u mlinovima sa šipkama i mlinovima sa kuglama a Rittingerov „zakon“ je primenljiv u oblasti finog mlevenja sa krupnoćama sirovine od 10 do 1000 μm – slika 7 (Austin, 1973).



Slika 7 – Oblasti primenljivosti zakona usitnjavanja



Slika 8 – Zavisnost potrebne energije od krupnoće čestica pri usitnjavanju (Magdalinović, 1991.)

Charles i Holmes (1957) i Hukki (1961) su pokušali da objedine ova tri predhodno opisana zakona. Prema njihovoj hipotezi, Kickova, Rittingerova i Bondova jednačina se mogu smatrati kao delovi iste diferencijalne jednačine, po kojoj je energija (dE) potrebna da se ostvari mala promena u krupnoći (dx) direktno proporcionalna promeni krupnoće (dx), a obrnuto proporcionalna krupnoći (x) na stepen (n):

$$dE = -C \frac{dx}{x^n} \quad (12)$$

gde je:

C – konstanta proporcionalnosti; znak (-) ispred konstante (C) potiče od toga što se krupnoća zrna (x) pri usitnjavanju smanjuje.

Kada se u jednačini (17) zameni vrednost za stepen (n) dobija se: za $n=2$ „zakon“ Rittingera, za $n=1$ „zakon“ Kicka i za $n=1,5$ „zakon“ Bonda – slika 8 (Martins, 2016).

1.2.3. Načini usitnjavanja

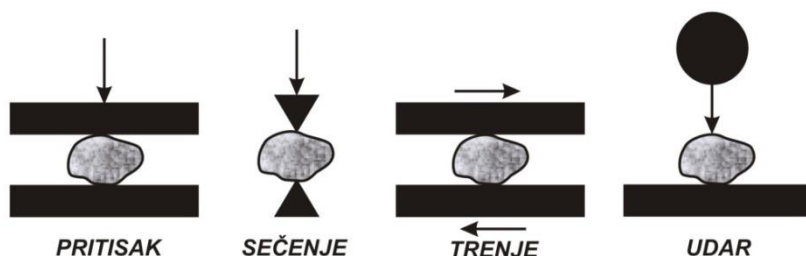
U pripremi mineralnih sirovina se usitnjavanje vrši da bi se postiglo sledeće:

- Pevećanje specifične površine sirovine, zato što su brzine reakcija između sirovine i druge faze direktno proporcionalne sa veličinom kontaktnih površina.
- Smanjenje veličina zrna da bi se odvojili korisni minerali od jalovine.

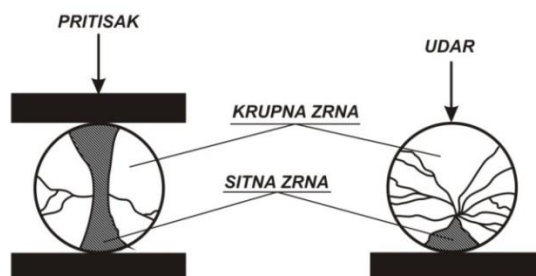
- Izvela što bolja homogenizacija materijala.

Deformacijski postupci koji se javljaju u mašinama za usitnjavanje su sledeći (slika 9 i 10)(Sadrai i ostali, 2011):

- Udar – naprezanje komada sirovine pojedinačnom kratkotrajnom krutom silom (čekić),
- Pritisak – naprezanje komada sirovine sa dve krute sile (čeljusna drobilica),
- Sečenje, smicanje – naprezanje proizvedeno kada su slojevi komada sirovine podvrgnuti silama koje deluju u suprotnim smerovima,
- Trenje, atricija – naprezanje koje nastaje trljanjem komada sirovine između sebe i sa krutim površinama delova mašina za usitnjavanje.



Slika 9 – Šematski prikaz načina usitnjavanja (Magdalinović, 1991.)



Slika 10 – Šematski prikaz usitnjavanja komada pri delovanju pritiska i udara (Magdalinović, 1991.)

Izbor mašine za usitnjavanje, a time i načina usitnjavanja zavisi od fizičko-mehaničkih karakteristika sirovine, krupnoće sirovine i krupnoće željenog proizvoda usitnjavanja. Tvrdе i krte sirovine treba usitnjavati pritiskom i udarom. Žilave sirovine treba usitnjavati sečenjem. U mlinovima se usitnjavanje vrši udarom i trenjem.

1.3. Bondov radni indeks

Fred C. Bond je primetio da su laboratorijski testovi kinetike mlevenja neodgovarajući za procenu utroška energije za mlevenje sirovine, a naročito u zatvorenom ciklusu sa

klasiranjem i kod poliminerálnih ruda. Na osnovu ovih zapažanja, Bond i ostali u Allis-Chalmers su razvili laboratorijski test mlevenja u zatvorenom ciklusu koji omogućava da se odredi utrošak energije za mlevenje rude kada se postigne stabilna kružna šarža, „stanje ekvilibrijuma“ (Maxson i ostali, 1933).

Test u mlinu sa kuglama je većim delom ostao neizmenjen osim u delu obrade dobijenih podataka (Powell i Morrison, 2006). Takođe je Bond kasnije razvio i analogni laboratorijski test mlevenja u zatvorenom ciklusu u mlinu sa šipkama. Na osnovu ovih testova za karakterizaciju rude, Bond je nastavio da razvija metodologiju za tumačenje rezultata testova i kako oni mogu da se upotrebe za predviđanje utroška energije za usitnjavanje. Sva ova istaživanja su dovela do uobličjenja „trećeg zakona“ usitnjavanja (Bond, 1952). Ova jednačina je finalno izmenjena i objavljena 1961. i od tada je u širokoj primeni (Bond, 1961).

Bondov test i proračuni dobijenih rezultata preko njegove jednačine su se pokazali kao izvanredno pouzdani za procenu potrebne energije za usitnjavanje sirovine u industrijskim uslovima (Ahmadi i ostali, 2013, Mucsi i ostali, 2016).

Bondova konstanta proporcionalnosti (C_B) iz jednačine (11) je „radni indeks“ (W_i) koji predstavlja energiju potrebnu da se jedna kratka tona ($1\text{sht}=907,18\text{kg}$) sirovine beskonačno velike krupnoće ($F=\infty$) usitni do krupnoće pri kojoj 80% sirovine prolazi kroz sito sa kvadratnim otvorima veličine $100\mu\text{m}$ ($P=100\mu\text{m}$). Prema tome sledi:

$$W = C_B \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right), [kWh/sht] \quad (13)$$

Odakle je:

$$C_B = 10 \cdot W_i \quad (14)$$

Zamenom izraza (13) u jednačinu (11) dobijamo:

$$W = W_i \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right), [kWh/sht] \quad (15)$$

odnosno

$$W = 1,102 \cdot W_i \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right), [kWh/t] \quad (16)$$

ili

$$W = W_i' \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right), [kWh/t] \quad (17)$$

Bondov test mlevenja u mlinu sa kuglama je laboratorijski test mlevenja u zatvorenom ciklusu. Pomoću njega se dobija Bondov radni index koji predstavlja otpor različitih vrsta materijala mlevenju u mlinu sa kuglama.

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

U tabeli 4 su date vrednosti Bondovog radnog indeksa za neke sirovine.

Tabela 4 – Srednja vrednost Bondovog radnog indeksa za neke sirovine

Materijal	Broj izvedenih opita	Gustina, kg/m ³	W _i , kwh/t
Andezit	6	2840	24,34
Barit	11	4280	6,86
Bazalt	10	2890	22,45
Boksit	11	2390	10,39
Bakarna ruda	308	3020	14,44
Cementni klinker	60	3090	14,84
Cinkova ruda	87	3680	13,66
Ugalj	10	1630	12,51
Koks	12	1510	22,77
Diorit	6	2780	21,34
Kvarcit	5	2650	28,78
Dolomit	18	2820	12,44
Feldspat	8	2590	12,84
Fluorit	8	2980	10,74
Fosfat	27	2660	11,10
Granit	3	3300	13,61
Grafit	6	1750	49,53
Galenit	7	5390	11,21
Glina	9	2230	7,81
Granat	3	3300	13,61
Ruda gvožđa	8	3960	16,98
Hematit	79	3760	13,95
Krečnjak	119	2690	12,77
Kvarc	17	2640	14,05
Limonit	2	2530	9,29
Liskun	2	2890	147,95
Magnetit	83	3880	11,23
Piritna ruda	4	3480	9,79
Sintermagnezit	1	5220	17,80

1.3.1. Skraćeni postupci za određivanje Bondovog radnog indeksa

Prema standardnom Bondovom postupku, radni indeks se određuje simulacijom suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu u Bondovom mlinu sa kuglama do postizanja 250% cirkulativne šarže (F.C. Bond, 1949, 1952,1961). Test se izvodi na sirovini mase

približno 10 kg čija je krupnoća 100% -3,327 mm (Mwanga i ostali, 2015). Prvo mlevenje se izvodi na uzorku zapremine 700 cm³ pri proizvoljnom broju obrtaja mlina. Posle svakog ciklusa mlevenja se samlevena sirovina iz mlina prosejava na kontrolnom situ. Odsevu sita se dodaje svež uzorak tako da se dobije polazna masa sirovine, kao u prvom mlevenju. Broj obrtaja mlina za sva naredna mlevenja se izračunava prema podacima iz predhodnih ciklusa tako da se dobije cirkulativna šarža od 250 %. Procedura se ponavlja dok proizvedeni prosev kontrolnog sita po jednom obrtaju mlina ne postane konstantan u zadnja tri mlevenja. Ovo je takođe i pokazatelj da je postignuta željena cirkulativna šarža. Za Bondov test je potrebno 7 – 10 ciklusa mlevenja. Bondov radni indeks se izračunava pomoću formule:

$$W_i = 1,1 \cdot \frac{44,5}{P_c^{0,23} \cdot G^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \text{ [kWh/t]} \quad (18)$$

gde je:

W_i – Bondov radni indeks [kWh/t];

P_k – veličina otvora kontrolnog sita [μm];

G – masa novostvorenog proseva kontrolnog sita po obrtaju mlina [g/ob];

F_{80} – veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja [μm];

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

Zbog složenosti i dužine Bondovog testa i mogućnosti da se naprave greške prilikom njegovog izvođenja, mnogi naučnici su pokušavali da ovaj postupak pojednostave i skrate (Weiss, 1985).

Berry i Bruce (1966) smislili su aproksimativnu proceduru gde se porede podaci o meljivosti nepoznate rude sa referentnom rudom čiji su podaci o meljivosti poznati i određeni u Bondovom mlinu sa kuglama. Ova procedura može da se izvede u bilo kom laboratorijskom mlinu sa kuglama. Berry i Bruce su uzorke referentne rude i rude nepoznate meljivosti mase 2 kg, krupnoće -1,651 mm mleli na mokro u laboratorijskom mlinu sa kuglama prečnika 305 mm pod identičnim uslovima. Zaključili su da je energija potrebna za usitnjavanje približno jednaka za oba uzorka, pa je:

$$W_{ir} \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P_r}} - \frac{10}{\sqrt{F_r}} \right] = W_i \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right] \quad (19)$$

gde je:

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

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

F_r - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase ulaza u mlevenje ref. rude, [μm]

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

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

F - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % mase ulaza u mlevenje nepoznate rude, [μm]

Iz jednačine (19) sledi da je Bondov radni indeks rude čija se meljivost određuje:

$$W_i = W_{ir} \cdot \frac{\left[\frac{1}{\sqrt{P_r}} - \frac{1}{\sqrt{F_r}} \right]}{\left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]}, \quad [\text{kWh/t}] \quad (20)$$

Horst i Bassarear (1977) su dali malo dužu sličnu procedu kao Berry i Bruce (1966) u kojoj se porede podaci referentne i rude za koju se traži vrednost Bondovog indeksa. Razlika ovog postupka u odnosu na postupak Berry-Bruce je u tome što ne uzima u obzir granulometrijski sastav ulaza i proizvoda mlevenja ispitivanog 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 na uzorcima krupnoće -1,651 mm u bilo kom laboratorijskom mlinu sa kuglama. Uzorak referentne rude mase 1 kg se melje toliko dugo da bi se ostvario željeni granulometrijski sastav mliva. Tri uzorka rude čija se meljivost određuje mase 1 kg se melju 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 dalje izvodi granulometrijska analiza. Dobijeni podaci se iscrtavaju grafički [t; lnR] i odatle 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 finoće i konstanti brzine mlevenja k_i za različite otvore sita određenih opitima meljivosti rude čija se meljivost određuje. Iz granulometrijskog sastava proračunatog na ovaj način se određuje vrednost P , a vrednost F se uzima da je jednaka sa F_r . Bondov radni indeks se izračunava po formuli (20).

U tabeli 5 su dati uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim postupkom, postupkom Berry-Bruce i postupkom Horst-Bassarear korišćenjem rude bakra kao referentne rude (Magdalinović, 1997).

Tabela 5 - Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim postupkom, postupkom Berry-Bruce i postupkom Horst-Bassarear

Uzorak	Standardni Bondov postupak W_i , kWh/t	Berry-Bruce postupak		Horst-Bassarear postupak	
		W_i , kWh/t	Greška, %	W_i , kWh/t	Greška, %
Ruda bakra 1	10,0	9,6	-4,00	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
Srednja relativna kvadratna		8,25		1,72	

Smith i Lee (1968) su poredili podatke dobijene standardnim Bondovim testom i podatke iz otvorenog ciklusa mlevenja, odnosno prvog ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa. Ispitivanja su vršili na osam različitih sirovina pri različitim otvorima komparativnog sita po standardnom Bondovom testu ispitivanja meljivosti. Utvrdili su da parametar G_e [g/ob] poslednjeg mlevenja standardnog Bondovog testa i parametar G_0 otvorenog ciklusa mlevenja pri istim uslovima stoje u direktnoj korelacionoj vezi $G_0 = f(G_e)$. Ova korelaciona veza je ustanovljena na sitima manjih otvora i za testove izvedene sa manje od 300 obrtaja mlina. Korišćenjem ove korelacione veze, moguće je pomoću jednog mlevenja u otvorenom ciklusu odrediti vrednost G_0 i na osnovu nje proceniti vrednost parametra G_e standardnog Bondovog postupka, i izračunati Bondov radni indeks pomoću formule (18).

Korelaciona veza između parametara G važi samo za određeni materijal i potrebno je dosta rada da bi se ona utvrdila. Smith i Lee su izneli da razlike između vrednosti W_i

dobijenih standardnim Bondovim postupkom i njihovim skraćenim postupkom ne prelaze 15%.

Postupak Anakonda (Mular i Jergensen, 1982) se izvodi u bilo kom laboratorijskom mlinu sa kuglama koji je kalibrisan sa referentnom rudom ili rudama u odnosu na Bondov radni indeks. Za kalibraciju nekog mlina je potrebno na referentnoj rudi ili rudama standardnim Bondovim postupkom odrediti vrednosti Bondovog radnog indeksa W_i pri datoj veličini otvora komparativnog sita. Referentnu rudu ili rude iste mase i krupnoće, dalje treba mleti u laboratorijskom mlinu koji se kalibriše za isto vreme t i odrediti za svaki F i P . Pomoću dobijenih rezultata, se određuje kalibraciona konstanta mlina A :

$$A = W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right), [\text{kWh/t}] \quad (21)$$

gde je:

A - kalibraciona konstanta mlina, [kWh/t]

F - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80% polaznog uzorka, [μm]

P - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80% proizvoda mlevenja, [μm]

Za više dobijenih vrednosti A na različitim sirovinama se uzima srednja vrednost, ili se vrednost A izračunava metodom najmanjih kvadrata. Bondov radni indeks W_i se izračunava prema forumuli:

$$W_i = \frac{A}{\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)}, [\text{kWh/t}] \quad (22)$$

U tabeli 6 su dati uporedne vrednosti radnog indeksa po standardnom Bondovom postupku i Anakondinom postupku za različite vrste materijala (Magdalinović, 1997).

Tabela 6 - Uporedne vrednosti radnog indeksa po standardnom Bondovom postupku i Anakondinom postupku

Uzorak	Bondov radni indeks W_i , kWh/t		Greška, %
	Standardno	Anakonda	
Ruda bakra 1	11,69	11,39	-2,57
Ruda bakra 2	11,36	11,89	+4,67
Ruda bakra 3	12,19	12,92	+5,99
Ruda molibdena 1	8,77	9,00	+2,62
Ruda molibdena 2	12,00	11,62	-3,17
Ruda molibdena 3	10,84	10,33	-4,70
Ruda molibdena 4	11,17	11,34	+1,52
Ruda molibdena 5	11,83	11,61	-1,86
Ruda molibdena 6	11,57	11,61	+0,35
Ruda molibdena 7	12,12	11,31	-6,52
Ruda bakra 1	11,26	12,05	+7,02
Ruda bakra 2	12,00	12,64	+5,33
Ruda bakra 3	12,82	12,13	-5,38
Ruda bakra 4	12,32	12,13	-1,54
Ruda bakra 5	12,18	12,35	+1,40
Ruda bakra 6	11,47	11,57	+0,87
Ruda bakra 7	10,96	11,57	+5,57
Ruda bakra 8	11,91	11,33	+4,87
Uljni škriljci	31,11	30,89	+0,71
Srednja relativna kvadratna greška			4,09

Kapur (1970) je došao do zaključka da se procena Bondovog indeksa može izvršiti na osnovu podataka iz prva dva ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa. Do ovog zaključka je došao analizirajući cikluse mlevenja standardnog testa pomoću matematičkog algoritma zasnovanog na kinetici mlevenja prvog reda. Primetio je da nema velike razlike između konstante brzine mlevenja klase $+P_k$ u drugom i u krajnjem ciklusu mlevenja standardnog Bondovog testa. Predložio je da konstanta brzine mlevenja iz drugog ciklusa posluži za procenu vrednosti Bondovog radnog indeksa pomoću formule:

$$W_i = 1,1 \cdot 2,648 \cdot P_k^{0,406} \cdot k_2^{-0,81} \cdot (XM)^{-0,853} \cdot (1 - X)^{-0,099}, [\text{kWh/t}] \quad (23)$$

gde je:

P_k - veličina otvora komparativnog sita, [μm]

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

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

M - masa uzorka u mlinu, [g]

$$k_2 = \frac{\ln[M-Z_1 \cdot (1-X)] - \ln(M-Z_2)}{N_2} \quad (24)$$

gde je:

Z₁ - masa proseva komparativnog sita u prvom ciklusu mlevenja, [g]

Z₂ - masa proseva komparativnog sita u drugom ciklusu mlevenja, [g]

U tabeli 7 su prikazane uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Kapur.

Tabela 7 - Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Kapur

Uzorak	P _k , μm	W _i , kWh/t	W _i , kWh/t	Greška, %
		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
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
Srednja kvadratna relativna greška				9,7

Karra (1981) je modifikovao metodu Kapura time što je uzeo u obzir da je kružna šarža kod standardnog Bondovog testa tvrđa od svežeg uzorka i da se time i sporije melje. Ova metoda matematičkim algoritmom simulira Bondov test na osnovu rezultata dobijenih iz prva dva ciklusa mlevenja standardnog testa do uspostavljanja stabilne cirkulativne šarže od 250 %. Iz zadnjeg simuliranog opita se dobija vrednost parametra G. Vrednost parametra P se na ovaj način ne može proceniti, pa se za izračunavanje Bondovog

indeksa ne može koristiti Bondova formula koja uključuje ovaj parametar. Za izračunavanje Bondovog indeksa se koristi empirijska formula dobijena na osnovu statističke obrade podataka:

$$W_i = 1,1 \cdot 9,934 \cdot P_k^{0,308} \cdot G^{-0,696} \cdot F^{-0,125}, \text{ [kWh/t]} \quad (25)$$

gde je:

P_k - veličina otvora komparativnog sita, [μm]

G - procenjeni novostvoreni prosevi komp. sita po obrtaju mlina u zadnjem opitu, [g/ob]

F - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % uzorka pre mlevenja, [μm]

Algoritam Karra se izvodi tako što se izvrše prva dva mlevenja standardnog Bondovog testa i određuju se:

M - masa 700 cm^3 uzorka, [g]

$C=M/3,5$ - željena masa proseva komparativnog sita kod ustaljenog procesa, [g]

F - veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % uzorka pre mlevenja, [μm]

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

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

N_1 i N_2 - broj obrtaja mlina u prvom i drugom ciklusu mlevenja, [ob.].

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

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

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

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

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

III i svi naredni ciklusi mlevenja $N_i = \frac{C - Y Z_{i-1}}{G_{i-1}} \quad (30)$

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

$$G_i = \frac{Z_i - Z_{i-1} Y}{N_i}$$

U tabeli 8 su prikazane uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Karra.

Tabela 8 - Uporedne vrednosti Bondovog radnog indeksa po standardnom Bondovom testu i po postupku Karra

Uzorak	P _k , μm	W _i , kWh/t	W _i , kWh/t	Greška, %
		Bond	Kapur	
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
Srednja kvadratna relativna greška				4,77

Magdalinović (1989) je dao skraćenu metodu za određivanje Bondovog radnog indeksa, koja uključuje dva mlevenja. Ova metoda se oslanja na zakon kinetike prvog reda po kojem se odvija usitnjavanje sirovine u Bondovom mlinu sa kuglama. Postupak se izvodi na uzorku krupnoće 100% -3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama. Određuje se granulometrijski sastav, parametar F (μm) i masa M [g] 700 cm³ polaznog uzorka. Izračunava se masa idealnog proizvoda mlevenja $M / 3,5 = IPM$ [g]. Uzorak za prvo mlevenje se formira spajanjem odseva komparativnog sita polaznog uzorka mase $2,5 / 3,5 \cdot M$ i polaznog uzorka mase IPM. Vršiti se mlevenje ovako formiranog uzorka za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_1 = 50, 100$ ili 150 ob). Nakon mlevenja uzorak se seje na komparativnom situ i određuje se masa odseva m_{o1} [g] i proseva m_{p1} [g]. Pomoću udela klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i formule (20) se određuje konstanta brzine mlevenja za dati uzorak. Na osnovu ove konstante se izračunava broj obrtaja mlina N_2 [ob] koji je potreban da bi se dobio

idealni proizvod mlevenje odnosno kružna šarža od 250 %. Uzorak za drugo mlevenje se formira na isti način kao i uzorak za prvo mlevenje i melje se za izračunati N broj obrtaja mlina. Nakon mlevenja uzorak se seje na komparativnom situ i određuje se masa odseva m_{o2} [g] i proseva m_{p2} [g]. Masa proizvoda mlevenja bi trebala da bude ista ili približno ista idealnom proizvodu mlevenja IPM. Izračunava se parametar $m_{p2} / N_2 = G$ [g/ob]. Na proizvodu mlevenja se radi granulometrijska analiza i određuje se parametar P [μ m]. Pomoću dobijenih parametara F [μ m], P [μ m] i G [g/ob] i formule [18] izračunava se Bondov radni indeks (Ahmadi i Shahsavari, 2009). U tabeli 9 su dati uporedni rezultati dobijeni standardnom Bondovom metodom i skraćenom metodom na određenim sirovinama.

Tabela 9 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih skraćenom metodom (Magdalinović, 1989)

Uzorak	Komparativno sito, μ m	W_i , kWh/t		Greška, %
		Standardno	Skraćeno	
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

Magdalinović (2003) je dao skraćenu metodu sličnu kao prethodno opisanoj, s tim što ona uključuje tri mlevenja. Ova metoda se takođe oslanja na zakon kinetike prvog reda po kojem se odvija usitnjavanje sirovine u Bondovom mlinu sa kuglama. Postupak se izvodi na uzorku krupnoće 100% -3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama. Određuje se granulometrijski sastav, parametar F [μ m] i masa M [g] 700 cm³ polaznog uzorka. Izračunava se masa idealnog proizvoda mlevenja $M / 3,5 = IPM$ [g]. Uzorak mase M se šaržira u mlin i melje za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_1 = 50, 100$ ili 150 ob). Nakon mlevenja uzorak se prosejava na komparativnom situ i određuje se masa proseva m_{p1} [g] i odseva m_{o1} [g]. Pomoću udela klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i formule (20) se određuje konstanta brzine mlevenja za dati uzorak. Na

osnovu ove konstante se izračunava broj obrtaja mlina N_2 [ob] koji je potreban da bi se dobio idealni proizvod mlevenje odnosno kružna šarža od 250 %. Odsevu komparativnog sita iz prvog mlevenja se dodaje svež uzorak mase $m = M - m_{o1}$ [g]. Uzorak se sipa u mlin i melje za izračunatih N_2 obrtaja. Nakon mlevenja uzorak se seje na komparativnom situ i određuje se masa proseva m_{p2} [g] i odseva m_{o2} [g]. Pomoću udela klase krupnije od otvora komparativnog sita pre i posle mlevenja i formule $R = R_0 \cdot e^{-kt}$ se određuje konstanta brzine mlevenja za dati uzorak. Na osnovu ove konstante se izračunava broj obrtaja mlina N_3 [ob] koji je potreban da bi se dobio idealni proizvod mlevenje odnosno kružna šarža od 250 %. Odsevu komparativnog sita iz drugog mlevenja se dodaje svež uzorak mase $m = M - m_{o2}$ [g]. Uzorak se sipa u mlin i melje za izračunatih N_3 obrtaja. Nakon mlevenja uzorak se seje na komparativnom situ i određuje se masa proseva m_{p3} [g] i odseva m_{o3} [g]. Masa proizvoda mlevenja bi trebala da bude ista ili približno ista idealnom proizvodu mlevenja IPM. Izračunava se parametar $m_{p3} / N_3 = G$ [g/ob]. Na proizvodu mlevenja se radi granulometrijska analiza i određuje se parametar P [μm]. Pomoću dobijenih parametara F [μm], P [μm] i G [g/ob] i formule (18) izračunava se Bondov radni indeks. U tabeli 10 su dati uporedni rezultati dobijeni standardnom Bondovom metodom i ovom skraćenom metodom na nekim sirovinama.

Tabela 10 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih skraćenom metodom (Magdalinović, 2003)

Uzorak	Komparativno sito, μm	W_i , kWh/t		Greška, %
		Standardno	Skraćeno	
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
Boksit	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

Lewis i ostali (1990) su dali matematički algoritam koji simulira standardni Bondov test. Kompjuterska simulacija bazirana na matematičkom algoritmu je podeljena u dva posebna dela. Prvi deo simulacije koristi eksperimentalne podatke iz prvog ciklusa mlevenja standardnog Bondovog testa da bi se formirali početni parametri modela. Početni parametri modela zajedno sa opisom polaznog materijala se zatim pohranjuju u bazu podataka koja se koristi u drugoj fazi simulacije za predviđanje. Metod predviđanja simulacijom oponaša tradicionalnu proceduru. Za svaki ciklus mlevenja, materijal sitniji od otvora komparativnog sita se zamenjuje sa reprezentativnom količinom polaznog uzorka. Kalkulacija se nastavlja upotrebom parametara koji su podešeni prema trenutnom ciklusu mlevenja. Četiri ciklusa mlevenja se računaju automatski.

Tabela 11 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih kompjuterskom simulacijom Bondovog testa (Lewis i ostali, 1990)

Uzorak	Metoda	Komparativno sito, μm	W_i , kWh/t	Greška, %
Ruda zlata	Izmereno	125	15,58	+1,73
	Simulacija	125	15,85	
Tuf	Izmereno	38	9,14	+0,55
	Simulacija	38	9,19	
Ruda zlata 2	Izmereno	100	16,39	0,00
	Simulacija	100	16,39	
Krečnjak	Izmereno	50	8,36	-2,51
	Simulacija	50	8,15	
	Izmereno	100	7,77	+6,18
	Simulacija	100	8,25	
	Izmereno	250	7,69	+0,39
	Simulacija	250	7,72	
Sulfid	Izmereno	90	18,78	-1,60
	Simulacija	90	18,48	
Fluorit	Izmereno	100	13,40	-0,15
	Simulacija	100	13,38	
Granit	Izmereno	100	16,67	-4,14
	Simulacija	100	15,98	
	Izmereno	250	14,78	-3,38
	Simulacija	250	14,28	

Na četvrtom i narednim ciklusima radi se provera da li je parametar G [g/ob] konstantan (u granicama od 3 %) za poslednja tri ciklusa mlevenja. Ako jeste, onda je postignuto stabilno stanje, a u suprotnom kompjuterska simulacija se nastavlja sa sledećim

ciklusom mlevenja. Kada se dostigne stabilno stanje koriste se parametri dobijeni u poslednjem ciklusu mlevenja i računa se Bondov radni indeks pomoću formule (18). Poredili su rezultate dobijene standardnim postupkom sa rezultatima dobijenim simulacijom na uzorcima rude zlata, krečnjaka, feldspata, fluorita i granita sa različitim komparativnim sitima i izneli da je maksimalna dobijena razlika 6,18 %. U tabeli 11 je dat prikaz uporednih rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih kompjuterskom simulacijom.

Aksani i Sonmez (2000) su dali kompjutersku simulaciju Bondovog testa meljivosti koja se oslanja na kumulativni kinetički model (Finch i Ramirez-Castro, 1980). Kod ovog kumulativnog kinetičkog modela konstanta brzine mlevenja $k = C \cdot x^n$, gde su C i n konstante koje zavise od karakteristika mlina i karakteristika sirovine a x predstavlja veličinu otvora sita. Postupak se izvodi mlevenjem 700 cm³ uzorka krupnoće 100% - 3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama sa vremenom mlevenja 0,5 minuta, 1 minut, 2 minuta, 4 minuta. Posle svakog ciklusa mlevenja uzorak se prazni iz mlina i radi se njegova granulometrijska analiza. Dobijeni proizvodi granulometrijske analize se spajaju i vraćaju u mlin za sledeći ciklus mlevenja. Na osnovu dobijenih podataka kumulativnog odseva u odnosu na vreme mlevenja se nelinearnom regresijom izračunava konstanta brzine mlevenja k . Da bi se izračunali parametri C i n , obe strane gore pomenute jednačine se logaritmuju i onda se primenjuje linearna regresija. Simulacioni program koristi podatke o granulometrijskom sastavu, masi ulaza, parametre kinetičkog modela i broj obrtaja mlina prvog ciklusa mlevenja. Metod predviđanja simulacijom oponaša tradicionalnu proceduru. Za svaki ciklus mlevenja, računa se parametar G [g/ob] i materijal sitniji od otvora komparativnog sita se zamenjuje sa reprezentativnom količinom polaznog uzorka. Kalkulacija se nastavlja sve dok parametar G ne postane konstantan za poslednja tri mlevenja. Kada se dostigne stabilno stanje koriste se parametri dobijeni u poslednjem ciklusu mlevenja i računa se Bondov radni indeks pomoću formule (18). U tabeli 12 je dat prikaz uporednih rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih kompjuterskom simulacijom.

Tabela 12 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih kompjuterskom simulacijom (Askani i Sonmez, 2000)

Uzorak	Komparativno sito, μm	W_i , kWh/t		Greška, %
		Standardno	Skraćeno	
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

Deniz i Ozdag (2002) su istraživali 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). Ustanovili su da najbolja korelacija može da se uspostavi između Bondovog indeksa i modula mase K_d koji se još zove i modul krutosti. Ovaj modul uzima u obzir stanje poroznosti i diskontinuiteta, kao što su spojevi nekog materijala. Izvršili su merenja na 8 sedimentnih i 5 vulkanskih sirovina. U tabeli 13 je dat prikaz rezultata dobijenih standardnim Bondovim postupkom i računске vrednosti dobijene pomoću dinamičkih elastičnih parametara sirovine.

Tabela 13 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i rezultata dobijenih računski pomoću dinamičkih elastičnih parametara (Deniz i Ozdag, 2002)

Broj uzorka	Bondov test W_i , kWh/t	K_d		E_d		G_d	
		W_i , kWh/t	Greška, %	W_i , kWh/t	Greška, %	W_i , kWh/t	Greška, %
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 greška		9,63		14,83		14,54	

Gharehgheshlagh (2015) je dao metodu za procenu Bondovog radnog indeksa koja se oslanja na praćenje kinetike mlevenja u Bondovom mlinu sa kuglama i uspostavljanju

serije odnosa parametara mlevenja i parametara Bondove jednačine. Postupak se izvodi mlevenjem 700 cm³ uzorka krupnoće 100% -3,35 mm u Bondovom mlinu sa kuglama sa vremenom mlevenja 0,33 minuta, 1 minut, 2 minuta, 4 minuta i 8 minuta.

Tabela 14 - Poređenje rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i kinetičkim mlevenjem (Gharehgheshlagh, 2015)

Uzorak	Metoda	W _i , kWh/t	Greška, %
Boksit	Kinetičko mlevenje	10,321	-1,47066
	Standardni Bond	10,172	
Hematit	Kinetičko mlevenje	12,525	0,04788
	Standardni Bond	12,531	
Hromit 1	Kinetičko mlevenje	14,330	-1,76406
	Standardni Bond	14,082	
Hromit 2	Kinetičko mlevenje	14,649	-1,04807
	Standardni Bond	14,497	
Halkopirit 1	Kinetičko mlevenje	13,054	0,73338
	Standardni Bond	13,150	
Halkopirit 2	Kinetičko mlevenje	12,298	0,95163
	Standardni Bond	12,416	
Klinker 1	Kinetičko mlevenje	15,471	0,98550
	Standardni Bond	15,625	
Klinker 2	Kinetičko mlevenje	14,865	0,89886
	Standardni Bond	14,999	
Dolomit	Kinetičko mlevenje	13,479	-1,73527
	Standardni Bond	13,249	
Magnetit	Kinetičko mlevenje	11,806	2,59059
	Standardni Bond	12,120	
Krečnjak 1	Kinetičko mlevenje	13,998	-0,01085
	Standardni Bond	13,997	
Krečnjak 2	Kinetičko mlevenje	13,646	0,58428
	Standardni Bond	13,727	
Kvarcit	Kinetičko mlevenje	11,238	0,38738
	Standardni Bond	11,282	

Posle svakog ciklusa mlevenja uzorak se prazni iz mlina i radi se njegova granulometrijska analiza. Dobijeni proizvodi granulometrijske analize se spajaju i vraćaju u mlin za sledeći ciklus mlevenja. Na osnovu podataka dobijenih kinetičkim mlevenjem i granulometrijskim analizama proizvoda mlevenja se numeričkom metodom najmanjih kvadrata određuje funkcionalna zavisnost broja obrtaja mlina i mase proseva komparativnog sita m_p [g], kao i broja obrtaja mlina i parametra P₈₀. Na osnovu prve funkcije se određuje broj obrtaja mlina N_{250%} (obrtaja) koji je potreban da se dobije masa proseva takva da je kružna šarža 250%. Pomoću vrednosti N_{250%} i

utvrđenih funkcionalnih zavisnosti se izračunavaju parametri G [g/ob] i P_{80} [μm]. Bondov radni indeks se izračunava korišćenjem dobijenih vrednosti i formule (18). Gharehgheshlagh je izneo da greška između rezultata dobijenih ovom metodom i rezultata dobijenih standardnim Bondovim testom ne prelazi 2,6%. U tabeli 14 je dat prikaz uporednih rezultata dobijenih standardnom Bondovom metodom i ovom skraćenom metodom sa komparativnim sitom otvora 106 μm .

1.3.2. Dosadašnja istraživanja Bondovog radnog indeksa mešavina sirovina sa različitim meljivostima

Mlevenje je važna operacija u nekoliko industrijskih grana, kao što su priprema mineralnih sirovina, cementna industrija, keramika, farmaceutska industrija i hemijska industrija. Mlevenje je operacija koja zahteva veliku količinu energije i koja troši najveći deo energije potrebne za rad postrojenja za pripremu mineralnih sirovina. Mlevenje se najčešće vrši na mineralnim mešavinama sa različitim meljivostima i na prirodnim stenama koje su nehomogene po fizičkim i hemijskim osobinama. Takođe je česta praksa u pripremi mineralnih sirovina da se mešaju različiti tipovi ruda sa različitim meljivostima, da bi se postigao konstantan sadržaj korisne komponente. Sa aspekta uštede energije pri mlevenju mineralnih mešavina i nehomogenih materijala od velike je važnosti razumevanje kako će se pri mlevenju pojedine komponente mešavine ponašati u ovom složenom sistemu, odnosno kako će prisustvo različitih minerala sa različitim meljivostima međusobno uticati jedni na druge u pogledu meljivosti.

Veliki broj istraživača u svojim naučnim radovima se bavi različitim aspektima usitnjavanja mineralnih mešavina u mlinu sa kuglama. U daljem tekstu je dat kraći prikaz istraživanja meljivosti u mlinu sa kuglama kompozitnih materijala.

Feurstenau i Venkataraman (1988) su radili opite suvog mlevenja u laboratorijskom mlinu sa kuglama u otvorenom i zatvorenom ciklusu na uzorcima kvarca i krečnjaka i njihovoj mešavini u zapreminskom odnosu 1:1.

Opiti suvog mlevenja u laboratorijskom mlinu sa kuglama u otvorenom ciklusu na svim uzorcima krupnoće krupnoće -2,0+1,4mm su rađeni za vreme mlevenja od 0,5 , 1,0 , 2,0 , 4,0 i 8,0 minuta. Nakon mlevenja rađena je granulometrijska analiza samlevenog proizvoda. Svaka klasa krupnoće samlevenog uzorka mešavine kvarca i krečnjaka je

rastvarana u hlorovodoničnoj kiselini. Nerastvoreni deo svake klase krupnoće je meren i na taj način je određena masa kvarca, a masa krečnjaka je određena iz razlike polazne mase pre rastvaranja i mase kvarca. Ovim opitima su pokazali da se mlevenje u mlinu sa kuglama odvija po kinetici prvog reda. Utvrdili su da se krečnjak melje brže u prisustvu tvrdog kvarca nego kada se melje sam, i sa druge strane da se kvarc melje sporije u prisustvu mekšeg krečnjaka nego kada se melje sam.

Opiti suvog mlevenja u laboratorijskom mlinu sa kuglama u zatvorenom ciklusu na svim uzorcima krupnoće krupnoće -1,4mm su rađeni za vreme jednog ciklusa mlevenja od 2,0 min do uspostavljanja stabilnog stanja (konstantne kružne šarže). Nakon svakog ciklusa mlevenja samleveni uzorak je prosejavan na situ veličine otvora 0,25 mm. Otsevu sita je dodavana potrebna količina svežeg uzoraka da bi se dobila početna masa uzorka. Sadržaj kvarca i krečnjaka na proizvodima mlevenja je određivan rastvaranjem u hlorovodoničnoj kiselini. Pokazali su da je pri mlevenju mešavine kvarca i krečnjaka potrebno 25 dvominutnih ciklusa mlevenja da bi se postigla konstantna kružna šarža, pri čemu se ona po sastavu stalno menjala, tj. došlo je do koncentracije materijala koji se teže melje u kružnoj šarži.

Kapur i Feurstenau (1989) su izveli opite mlevenja u zatvorenom ciklusu sa konstantnim vremenom mlevenja na uzorcima kvarca i krečnjaka i na njihovim binarnim mešavinama u masenim odnosima od 1:0; 3:1; 2:1; 1:1; 1:2; 1:3 i 0:1. Predstavili su jedan opšti i dva pojednostavljena matematička algoritma za simulaciju mlevenja mineralnih mešavina u zatvorenom ciklusu. Poredili su eksperimentalno dobijene rezultate sa rezultatima dobijenim pomenutim algoritmima. Pokazali su da je za postizanje mirnog stanja, odnosno konstantne kružne šarže kod jednokomponentnih uzlaza u mlin potrebno 3 do 6 ciklusa mlevenja, a kod mešavina ovih komponenti i do 35 ciklusa. Zaključili su da što je veći sadržaj tvrde komponente u ulazu to je veća promena u kružnoj šarži od jednog do drugog ciklusa mlevenja. Ovi rezultati su pokazali da mlevenje heterogenih materijala u zatvorenom ciklusu je manje stabilno od mlevenja čistih minerala na isti način. Slučajne i nehotimične varijacije u karakteristikama rude i količini ulaza, čak i one vrlo male, onemogućuju postizanje stabilnog stanja, odnosno konstantne kružne šarže.

Yan i Eaton (1994) su proučavali promene Bondovog radnog indeksa mešavine ruda kao funkciju sastava mešavine. Određivali su Bondov radni indeks na čistim uzorcima tvrde rude ($W_i=14\text{kWh/t}$) i meke rude ($W_i=6\text{kWh/t}$) i na tri njihove dvokomponentne mešavine u različitim odnosima, pomoću standardne Bondove procedure i pomoću Magdalinovićeve skraćene metode. Ustanovili su da vrednost Bondovog radnog indeksa mešavine ovih ruda nije jednostavno srednja vrednost Bondovih radnih indeksa komponenti prema njihovom masenom učešću, već da su vrednosti nešto više. Zaključili su da je razlog dobijanja ovakvih vrednosti to što u cirkulativnoj šarži dolazi do koncentracije tvrde komponente. Magdalinovićevom metodom su dobili dobre rezultate na čistim uzorcima, dok na mešavinama su dobili niže vrednosti Bondovog radnog indeksa od realnih. Ovo su objasnili time što Magdalinovićeva metoda ne uzima u obzir promene sastava cirkulativne šarže, što je slučaj prilikom mlevenja mešavina ruda. Kvalitativnom analizom parametara usitnjavanja su utvrdili da interakcija između komponenti mešavine utiče na parametre usitnjavanja pojedinačnih komponenti. U ovom slučaju je utvrđen veći uticaj tvrde komponente na parametre usitnjavanja i Bondov radni indeks mešavine.

Hosten i Avsar (1998) su izvodili opite meljivosti standardnim Bondovim postupkom i opite kinetike mlevenja na uzorcima klinkera i vulkanskog tufa kao i njihovim mešavinama u različitim odnosima. Testove su prvo izvodili na čistim uzorcima klinkera i vulkanskog tufa, a nakon toga na mešavinama ove dve komponente sa 20% i 35% zapreminskog udela vulkanskog tufa (17% i 31% masenog udela). Granulometrijski sastav ulaza i proizvoda mlevenja prilikom izvođenja Bondovog testa meljivosti su određivali suvim postupkom. Pokazali su da vrednost Bondovog radnog indeksa mešavine ovih komponenti je veća od Bondovog radnog indeksa tvrde komponente, klinkera. Opiti kinetike mlevenja su izvođeni u Bondovom mlinu sa kuglama na uskim klasama krupnoće uzoraka zapremine 700cm^3 , pri vremenu mlevenja od 0,5, 1,0, 2,0 i 4,0 minuta. Samleveni proizvod svakog testa je prosejavan suvim postupkom da bi se odredio granulometrijski sastav. Svaka klasa krupnoće je hemijski analizirana da bi se dobio sadržaj klinkera i vulkanskog tufa u njima. Na osnovu dobijenih podataka su izračunati parametri brzine i distribucije usitnjavanja. Zaključili su da su ovi parametri za dominantnu i tvrđu komponentu, klinker, nezavisni od

vremena i sastava mešavine za kratko vreme mlevenja, dok su za mekšu komponentu, vulkanski tuf, bili vremenski nezavisni i zavisni od sastava mešavine.

Oner (2000) je izvodio opite meljivosti standardnim Bondovim postupkom i opite kinetike mlevenja na uzorcima klinkera i šljake visoke peći i njihovim mešavinama u različitim masenim odnosima. Testovi kinetike mlevenja su izvođeni u Bondovom mlinu sa kuglama pri standardnim uslovima na uskim klasama krupnoće (-2,8+2,0mm; -2,0+1,4mm; -1,4+1,0mm; -1,0+0,71mm; -0,71+0,05mm) uzoraka klinkera i šljake i njihovim mešavinama pri različitim masenim odnosima (udeo šljake 20%, 35%, 50%, 65% i 80%). Kinetika mlevenja je karakterizovana pomoću parametra brzine usitnjavanja, koji predstavlja brzinu nestajanja (usitnjavanja) određene klase krupnoće, i parametra distribucije usitnjavanja, koji predstavlja raspodelu usinjenih zrna u sitnije klase. Utvrdio je da su vrednosti Bondovog indeksa mešavine ovih komponenti pri svim masenim odnosima uvek niže od vrednosti koje se dobijaju računski kao srednja vrednost Bondovih radnih indeksa komponenti mešavine prema njihovom masenom učešću. Brzine mlevenja krupnijih klasa krupnoće je veća kod klinkera nego kod šljake, a kod pri mlevenju sitnijih klasa situacija je obratna. Pri mlevenju mešavine klinkera i šljake, šljaka pošto ima manju meljivost se akumulira u krupnijim klasama krupnoće, a klinker sa većom meljivošću se akumulira u sitnijim klasama krupnoće.

Ipek i ostali (2005) su vršili merenja Bondovog radnog indeksa standardnim postupkom na uzorcima sirovina za keramičku industriju (kvarca, kaolina i feldspata) i na njihovim dvokomponentnim i trokomponentnim smešama. Pokazali su da je u svim slučajevima mešavina ovih sirovina, potrebna energija za usitnjavanje manja kada se komponente mešavine melju zasebno nego kada se melju zajedno kao mešavina.

Tavares i Kallemback (2013) su na uzorcima krečnjaka, bazalta i rude bakra i na njihovim mešavinama u različitim masenim odnosima određivali vrednosti Bondvog radnog indeksa standardnim Bondovim postupkom. Pokazali su da je potrebna energija za usitnjavanje ovih sirovina najčešće manja kada se komponente mešavine melju zasebno nego kada se melju zajedno kao mešavina. Utvrdili su da se tvrđa komponenta

koncentriše u kružnoj šarži kako napreduje mlevenje. Utvrdili su da je akumulacija tvrđe komponente veća, što je veća razlika u meljivostima komponenti mešavine .

1.4. Teorijska osnova skraćenog postupka

Usitnjavanje različitih sirovina u Bondovom mlinu sa kuglama se odvija prema zakonu kinetike prvog reda (Magdalinovic, 2003., Austin i ostali, 1981.):

$$R = R_0 \cdot e^{-kt} \quad (32)$$

gde je:

R – odsev komparativnog sita u trenutku (t),

R_0 – odsev komparativnog sita na početku mlevenja ($t=0$),

k – konstanta brzine mlevenja,

t – vreme mlevenja, [min].

Konstanta brzine mlevenja (k) može da se odredi za svaki ciklus mlevenja standardnog Bondovog postupka.

$$k = \frac{\ln R_0 - \ln R}{t} = \frac{n \cdot (\ln R_0 - \ln R)}{N} \quad (33)$$

gde je:

N – ukupan broj obrtaja mlina, [ob.],

n – broj obrtaja mlina u minuti.

Konstanta brzine mlevenja polako raste od drugog ka poslednjem ciklusu mlevenja prilikom izvođenja standardnog Bondovog postupka. Razlog ovome leži u tome što je kružna šarža sa svakim narednim mlevenjem sve sitnija pa je time i lakše dobiti željeni proizvod mlevenja, odnosno prosej komparativnog sita. Za drugi, treći i četvrti ciklus mlevenja konstante bi bile k_2 , k_3 i k_4 i njihov odnos bi bio $k_2 < k_3 < k_4$.

Pomoću ovako dobijenih vrednosti k , moguće je izračunati koliko je potrebno vreme mlevenja, odnosno potreban broj obrtaja mlina da se usitni materijal u slučaju kada je postignuto mirno stanje (kružna šarža 250%).

U slučaju kada je postignuta kružna šarža od 250%, odnosno stanje ekvilibrijuma:

$$R_0 = \frac{2,5}{3,5} \cdot 100 + \frac{X}{3,5} \cdot 100 \quad \text{i} \quad R = \frac{2,5}{3,5} \cdot 100 \quad (34)$$

gde je:

M – masa polaznog uzorka (700cm^3),

X – sadržaj klase $+P_c$ u polaznom uzorku (u delovima jedinice).

$$t = \frac{1}{k} \left[\ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 + \frac{X}{3,5} \cdot 100 \right) - \ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 \right) \right] \quad (35)$$

$$N = \frac{n}{k} \left[\ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 + \frac{X}{3,5} \cdot 100 \right) - \ln \left(\frac{2,5}{3,5} \cdot 100 \right) \right] \quad (36)$$

Za drugo mlevenje bi se dobile vrednosti t_{2e} i N_{2e} , za treće t_{3e} i N_{3e} i za četvrto t_{4e} i N_{4e} .

Novo stvoreni prosev komparativnog sita kada je postignuto mirno stanje je

$$Z = \frac{M}{3,5} - \frac{M}{3,5} \cdot (1 - X) = \frac{M}{3,5} \cdot X.$$

Pomoću izračunate vrednosti N može da se izračuna vrednost G (g/ob):

$$G = \frac{Z}{N} = \frac{\frac{M}{3,5} \cdot X}{N} \quad (37)$$

Na ovaj način se dobijaju vrednosti G_{2e} , G_{3e} i G_{4e} , za drugo, treće i četvrto mlevenje.

Prilikom izvođenja standardnog Bondovog postupka na različitim sirovinama, primećeno je, da ovako dobijene vrednosti G stoje u stalno istom odnosu sa vrednošću G_e u poslednjem mlevenju:

$$\begin{aligned} g_{k2} = \frac{G_e}{G_{2e}} \approx \text{const.} = 1,158 & \quad g_{k3} = \frac{G_e}{G_{3e}} \approx \text{const.} = 1,096 \\ g_{k4} = \frac{G_e}{G_{4e}} \approx \text{const.} = 1,037 & \end{aligned} \quad (38)$$

Što znači da je moguće izvršiti dva ciklusa mlevenja prema standardnom Bondovom postupku, izračunati G_{2e} i pomnožiti sa konstantom i dobiti približnu vrednost G_e poslednjeg mlevenja. Isto pravilo važi i za treće i četvrto mlevenje.

Parametar P_{80} proseva, od prvog ka poslednjem ciklusu mlevenja standardnog Bondovog postupka, takođe se menja po tačno određenom pravilu koje je slično za različite sirovine, tako da je:

$$p_{k2} = \frac{P_{80}}{P_{80\ 2}} \approx \text{const.} = 1,035 \quad p_{k3} = \frac{P_{80}}{P_{80\ 3}} \approx \text{const.} = 1,030$$

$$p_{k4} = \frac{P_{80}}{P_{80.4}} \approx const. = 1,017 \quad (39)$$

Što znači da je moguće izvršiti dva ciklusa mlevenja prema standardnom Bondovom postupku, uraditi granulometrijsku analizu proseva, odrediti grafički parametar P_{80} i pomnožiti sa konstantom i dobiti približnu vrednost P_{80} poslednjeg mlevenja. Isto pravilo važi i za treće i četvrto mlevenje.

1.5. Procedura za izvođenje skraćenog postupka

Skraćeni postupak sa dva ciklusa mlevenja za određivanje približne vrednosti Bondovog radnog indeksa se radi potpuno isto kao prva dva mlevenja standardnog Bondovog testa i sastoji se od sledećih operacija:

- Priprema uzorka kao i za standardni Bondov test (drobljenje do krupnoće 100% -3,327mm).
- Određivanje granulometrijskog sastava polaznog uzorka i vrednosti F_{80} (μm), kao i učešće klase veće od otvora komparativnog sita X (u delovima jedinice).
- Uzima se uzorak zapremine 700cm^3 , određuje se njegova masa M (g), šaržira se u Bondov mlin sa kuglama i melje se za proizvoljan broj obrtaja mlina ($N_I=50, 100$ 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 .

$$D = D_u + D_n, [g] \quad (40)$$

- Izračunava se masa novostvorenog proseva D_n :

$$D_n = D - D_u \quad (41)$$

U prvom opitu je:

$$D_u = M \cdot (1 - X), [g] \quad (42)$$

U narednim opitima je:

$$D_u = D_{(n-1)} \cdot (1 - X), [g] \quad (43)$$

gde je:

$D_{(n-1)}$ – masa proseva iz prethodnog opita, [g].

Izračunava se masa novostvorenog proseva po jednom obrtaju mlina:

$$G = \frac{D_n}{N}, \text{ [g/ob.]} \quad (44)$$

gde je:

N – broj obrtaja u dotičnom opitu, [ob.].

- Izračunava se broj obrtaja mlina za sledeći opit mlevenja:

$$N_n = \frac{M}{3,5 - D_{(n-1)} \cdot (1-X)}, \text{ [ob.]} \quad (45)$$

- Otsevu komparativnog sita se dodaje sveži uzorak čija je masa jednaka masi proseva iz prethodnog opita $D_{(n-1)}$. Tako formiran ulaz ubacuje se u mlin i melje N_n obrtaja.
- Nakon mlevenja uzorak se prosejava na komparativnom situ i meri se odsev R [g].
- Izračunava se konstanta k pomoću formule (20):

$$k = \frac{n \cdot (\ln R_0 - \ln R)}{N} = \frac{n \cdot \left[\ln \left(\frac{R_{(n-1)}}{M} + \frac{D_{(n-1)} \cdot X}{M} \right) - \ln \frac{R}{M} \right]}{N} \quad (46)$$

- Izračunava se potreban broj obrtaja N za slučaj da se brzinom k kao u drugom mlevenju mlela količina materijala kao kada je postignut ekvilibrijum (kružna šarža 250%) pomoću formule (23).
- Izračunava se parametar G [g/ob] pomoću formule (24). Dobijena vrednost G se množi sa konstantom 1,158 i dobija se vrednost G_e , koja bi trebala da je približno jednaka sa vrednošću G u poslednjem ciklusu mlevenja prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa.
- Presevu drugog mlevenja se određuje granulometrijski sastav i parametar P_{280} . Ova vrednost se množi sa konstantom 1,035. Dobijeni rezultat bi trebalo da bude približno jednak sa vrednošću P_{80} proseva poslednjeg mlevenja prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa.

- Pomoću ovako dobijenih vrednosti G i P_{80} i formule (18) dobija se približna vrednost W_i [kWh/t].

U slučaju da se radi skraćeni postupak sa tri ili četiri mlevenja, rade se tri odnosno četiri ciklusa mlevenja, identično kao i kod standardnog Bondovog postupka. Računaju se parametri G i P_{80} kao kod postupka sa dva mlevenja, sa tom razlikom što se množe sa odgovarajućim parametrima za tri ili četiri ciklusa mlevenja. Bondov radni indeks se takođe izračunava pomoću formule (18).

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Usitnjavanje je jedan od osnovnih industrijskih procesa koga opterećuju veliki rashodi u teškoj opremi, energiji, funkcionisanju i održavanju. Njegov mehanički učinak je izuzetno nizak, često i niži od 1%, i gotovo sva upotrebljena energija potrebna da se usitni rovna stenska masa se manifestuje u vidu toplote. Usitnjavanje rude je tekući ekonomski zadatak za nauku i industriju. U oblasti rudarstva, za usitnjavanje rude do projektovane krupnoće potrebno je utrošiti najviše energije, znatno više od utroška svih ostalih procesa pripreme i koncentracije. Sa tog aspekta, u svetu sa ograničenim izvorima energije, veoma je bitno da se predvidi potrošnja energije u industrijskim procesima.

Bondov radni indeks W_i se određuje simuliranjem suvog zatvorenog ciklusa mlevenja do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250%, u specijalnom laboratorijskom Bondovom mlinu. Određivanje Bondovog radnog indeksa je složen postupak za koji je neophodan: specijalni Bondov laboratorijski mlin, oko 10 kg uzorka krupnoće $-3,326+0$ mm, obučeno osoblje za rad i potrebno je isvesti 7-10 ciklusa mlevenja do uravnoteženja procesa.

Zbog složenosti i dužine izvođenja ovog postupka moguće su greške u radu i dobijanje pogrešnog rezultata. Zbog svega napred iznetog činjeni su pokušaji da se ovaj postupak olakša i skрати.

Takođe, postoji problem određivanja meljivosti nehomogenih kompozitnih materijala. U mineralnoj industriji je od posebne važnosti da se razume kako će mlevenje uticati na mešavine rude sa različitim meljivostima iz različitih delova ležišta ili iz dva ležišta.

Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je da se da teorijski i praktični doprinos poznavanju odvijanja procesa usitnjavanja u Bondovom laboratorijskom mlinu sa kuglama.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je da se na osnovu dobijenih rezultata odredi meljivost nehomogenih kompozitnih materijala i testira skraćeni postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa kao i da se utvrdi i pokaže njegova pouzdanost.

Istraživanja na ovoj doktorskoj disertaciji obuhvatala su:

- Praćenje promena odnosa parametara G_e/G_{ie} u različitim ciklusima mlevenja tokom izvođenja standardnog Bondovog postupka na nehomogenim kompozitnim materijalima pri različitim masenim učešćima istih.

- Praćenje promena odnosa parametara $P_{80}/P_{80 i}$ u različitim ciklusima mlevenja tokom izvođenja standardnog Bondovog postupka na nehomogenim kompozitnim materijalima pri različitim masenim učešćima istih.

- Praćenje promene sastava kružne šarže i proizvoda mlevenja različitih ciklusa mlevenja tokom izvođenja standardnog Bondovog postupka na nehomogenim kompozitnim materijalima pri različitim masenim učešćima istih.

- Izračunavanje Bondovog radnog indeksa nehomogenim kompozitnih materijala na osnovu vrednosti Bondovih radnih indeksa komponenti mešavine i njihovih masenih udela. Na taj način se utvrđuje količina energije potrebna za mlevenje mešavine u odnosu na količinu enertije potrebne za mlevenje komponenti mešavine odvojeno.

- Testiranje skraćenog postupka za određivanje Bondovog radnog indeksa na nehomogenim kompozitnim materijalima pri različitim masenim učešćima istih i određivanje njegove pouzdanosti.

3. EKSPERIMENTALNI DEO

3.1. Uzorci za ispitivanja

Ispitivanja su rađena na četiri vrste sirovine i na njihovim kompozitnim uzorcima sastavljenim od po dve sirovine u različitim masenim odnosima:

- Krečnjak iz Zagrađa,
- Andezit iz Majdanpeka,
- Ruda bakra iz Borske jame,
- Šljaka iz Topionice Bor.

Krečnjak iz Zagrađa

Krečana "Zagrađe" pored komadastog negašenog kreča i hidratisanog kreča proizvodi i agregate (klase $-16 + 8$ mm, $-8 + 4$ mm i $-4 + 0$ mm) koji se trenutno koriste u putnoj privredi i građevinarstvu. Uzorak krečnjaka koji je bio predmet ispitivanja ove doktorske disertacije je uzet iz pogona Krečana "Zagrađe" nakon primarnog drobljenja u čeljusnoj drobilici.

Rovni uzorak krečnjaka iz ležišta Zagrađe, tretiran je sa HCl, a njegov nerastvorni deo iznosio je 0,43%.

Andezit iz Majdanpeka

Uzorak andezita iz ležišta „Andezitski prst“ u Majdanpeku predstavlja jezgra bušotina geoloških istražnih radova koja su izvršena na ovoj lokaciji.

Gustina $\rho = 2,77$ g/cm³.

Prirodna pH vrednost uzorka andezita iz Majdanpeka je pH – 4,50.

Hemijski sastav uzorka andezita iz Majdanpeka prikazan je u tabeli 15.

Tabela 15 - Hemijski sastav andezita iz Majdanpeka

Hemijski element	Cu	S	Cu_{ox}	SiO₂	Al₂O₃	CaO
Sadržaj, %	0,184	3,51	0,040	64,130	17,430	0,420
Hemijski element	MgO	Fe₂O₃	K₂O	Na₂O	TiO₂	GŽ
Sadržaj, %	1,250	6,000	3,990	0,849	0,50	5,15
Hemijski element	Zn	Cr	Pb	Cd	Mn	Ni
Sadržaj, ppm	30,49	42,49	20,00	0,10	93,50	44,90
Hemijski element	Mo	/	/	/	/	/
Sadržaj, ppm	47,99	/	/	/	/	/

Mineraloškom analizom uzorka andezita iz Majdanpeka utvrđen je sledeći mineralni sastav: pirit, halkopirit, kovelin, galenit, sfalerit, magnetit getit, minerali jalovine.

Ruda bakra iz Borske jame

Uzorak rude bakra koji je predmet ispitivanja ove doktorske disertacije je uzet iz pogona Borske flotacije nakon sekundarnog i tercijarnog drobljenja.

Gustina rude bakra je $\rho = 2,95 \text{ g/cm}^3$.

Nasipna masa uzorka rude bakra pri krupnoći $-3,36+0\text{mm}$ je $\gamma = 1,50 \text{ g/cm}^3$.

Prirodna pH vrednost uzorka rude bakra je pH – 6,97.

Hemijski sastav rude bakra prikazan je u tabeli 16.

Tabela 16 - Hemijski sastav rude bakra

Hemijski element	Cu_{uk.}	Cu_{ox.}	Cu_{sulf.}	S	Al₂O₃	SiO₂
Sadržaj, %	0,440	0,017	0,423	4,88	17,10	57,52
Hemijski element	Fe	Fe₂O₃	CaO	/	/	/
Sadržaj, %	3,21	<0,03	7,22	/	/	/
Hemijski element	Au	Ag	Mo	/	/	/
Sadržaj, g/t	30,49	42,49	20,00	/	/	/

Mineraloškom analizom uzorka rude bakra utvrđen je sledeći mineralni sastav: pirit, halkopirit, hematit, magnetit, kovelin, halkozin, bornit, digenit, sfalerit, rutil, minerali jalovine (kvarc, kalcit, anhidrit, gips). Minerali oksida bakra, kao i minerali zlata i srebra nisu utvrđeni.

Šljaka iz Topionice Bor

Šljaka predstavlja otpadni proizvod metalurških procesa prerade flotacijskog koncentrata bakra. U postrojenju Borske flotacije se prerađuje metalurška šljaka da bi se povećala valorizacija bakra. Uzorak šljake koji je predmet ispitivanja ove doktorske disertacije je uzet iz pogona Borske flotacije nakon sekundarnog i tercijarnog drobljenja.

Gustina šljake $\rho = 3,5 \text{ g/cm}^3$.

Prirodna pH vrednost uzorka šljake je pH – 7,40.

Hemijski sastav šljake prikazan je u tabeli 17.

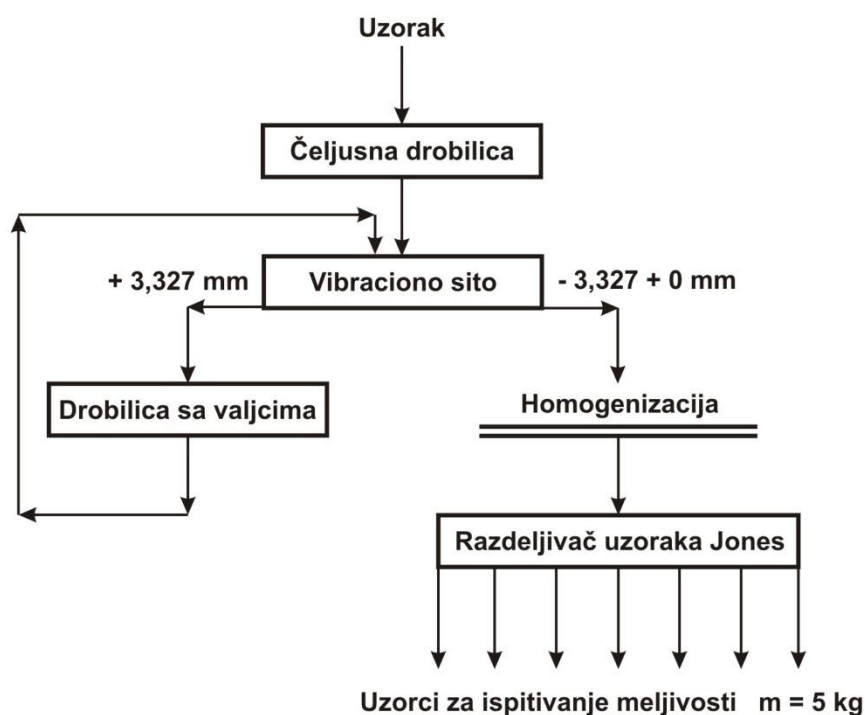
Tabela 17 - Hemijski sastav topioničke šljake

Hemijski element	Cu	Cu _{sulf}	Cu _{ox}	S
Sadržaj, %	0,881	0,761	0,120	0,720

Mineraloškom analizom topioničke šljake utvrđen je sledeći mineralni sastav: halkozin, kovelin, pirit, troilit, metalni bakar, kuprit, magnetit i minerali jalovine. Glavni minerali su fajalit (Fe₂SiO₄) i magnetit (Fe₃O₄).

3.1.1. Priprema uzoraka

Svi uzorci su pripremani prema šemi koja je prikazana na slici 11. Uzorci su prvo drobljeni u čeljusnoj drobilici. Izdrobljeni materijal iz čeljusne drobilice je prosejavan na vibracionom situ sa prosevnom površinom veličine otvora 3,327 mm. Klasa krupnoće + 3,327 mm je drobljena u drobilici sa valjcima. Izdrobljeni proizvod je vraćan na prosejavanje na vibraciono sito. Nakon svođenja cele količine uzoraka na klasu krupnoće - 3,327 + 0 mm, uzorak je homogenizovan. Dalje su uzorci na razdeljivaču uzoraka Jones razdeljeni na reprezentativne uzorke mase $m = 5 \text{ kg}$ koji su išli na dalju pripremu i ispitivanja meljivosti.



Slika 11 – Šema pripreme uzoraka za dalja ispitivanja

Nakon ustinjavanja spremljeni su pojedinačni uzorci od po 10 kg za testove meljivosti po standardnoj Bondovoj proceduri. Kompozitni uzorci su pravljani mešanjem sirovina u odgovarajućim masenim udelima. Ispitivanja meljivosti po standardnom Bondovom testu su rađena na sledećim jednokomponentnim i dvokomponentnim uzorcima:

- andezit,
- andezit : krečnjak = 75 : 25,
- andezit : krečnjak = 50 : 50,
- andezit : krečnjak = 25 : 75,
- krečnjak,
- šljaka,
- šljaka : ruda bakra = 75 : 25,
- šljaka : ruda bakra = 50 : 50,
- šljaka : ruda bakra = 25 : 75,
- ruda bakra.

3.2. Metode laboratorijskih ispitivanja

3.2.1. Standardni postupak za određivanje Bondovog radnog indeksa

Bondov radni indeks se određuje u laboratorijskom Bondovom mlinu sa kuglama (Bond, 1949, 1952, 1961) i predstavlja otpor materijala mlevenju u mlinu sa kuglama. Standardni Bondov test je simulacija suvog mlevenja u zatvorenom ciklusu do uspostavljanja stabilne kružne šarže od 250 %. Laboratorijski Bondov mlin sa kuglama je prikazan na slici 12. Na slikama 13 i 14 su prikazana laboratorijska ručna sita i tresać laboratorijskih sita Ro-tap koji su korišćeni u radu. Na slici 15 je prikazan razdeljivač uzoraka Jones na kome su izvršena sva uzorkovanja.

Eksperimentalni uslovi izvođenja standardnog Bondovog testa zajedno sa specifikacijom Bondovog mlina su dati u tabeli 18 (Mosher i Tague, 2001, Man, 2002).



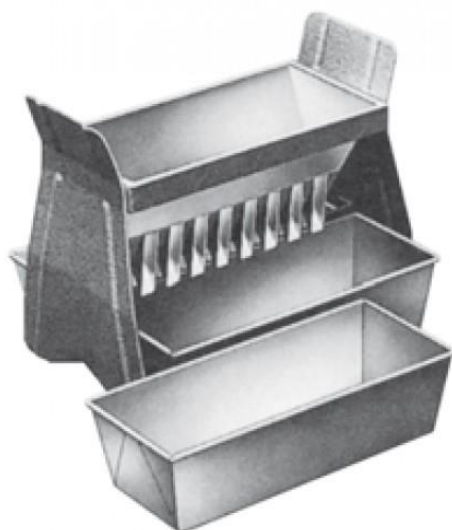
Slika 12 – Laboratorijski Bondov mlin sa kuglama (Bico-Braun International)



Slika 13 – Laboratorijska ručna sita (Endecotts)



Slika 14 – Tresač laboratorijskih sita Ro-tap (www.sbswinstruments.com, 20.05.2016.)



Slika 15 – Razdeljivač uzoraka Jones (www.novanna.co.uk, 20.05.2016.)

Tabela 18 – Specifikacija Bondovog mlina i uslovi mlevenja

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
Tip mlevenja	Suvo
V_{rude} , cm^3	700

Postupak rada (Magdalinović, 1985)

1. Uzorak za određivanje Bondovog radnog indeksa se usitnjava do krupnoće 100 % -3,327 mm (- 6 #). Za izvođenje Bondovog testa meljivosti potrebno je približno 10 kg uzorka (Magdalinović i dr., 2012).
2. Na srednjem uzorku se određuje granulometrijski sastav. Podaci se prikazuju grafički i odatle se očitava parametar F_{80} koji predstavlja veličinu otvora sita kroz koju prolazi 80 % materijala polaznog uzorka.
3. Uzima se 700 cm^3 pripremljenog uzorka i meri njegova masa M [g]. Izračunava se idealni proizvod mlevenja IPM:

$$IPM = \frac{M}{3,5}, \text{ [g]} \quad (47)$$

gde je:

M - masa uzorka zapremine 700 cm^3 , [g]

3,5 – označava da se mlevenje vrši do uspostavljanja cirkulativne šarže od 250 %.

4. Uzorak se dalje ubacuje u mlin i melje pri proizvoljnom broju obrtaja mlina ($N = 50, 100$ ili 150 obrtaja).
5. Posle mlevenja, uzorak se prazni iz mlina i prosejava na komparativnom situ sa veličinom otvora koja je bliska veličini otvora sita koja karakteriše krupnoću proizvoda mlevenja u mlinu sa kuglama za koji se traži Bondov radni indeks. Za komparativno sito, najčešće se koristi sito od 74, 100, 150 ili 200 mesh.

6. Meri se masa proseva komparativnog sita m_p [g]. Masu proseva m_p čine masa proseva koja je uneta sa ulazom m_{pu} [g] i masa novostvorenog proseva u mlinu m_{pn} .

7. Izračunava se masa novostvorenog proseva m_{pn} :

$$m_{pn} = m_p - m_{pu}, \quad [\text{g}] \quad (48)$$

gde je:

m_{pn} - masa novostvorenog proseva, [g]

m_p - masa proseva komparativnog sita, [g]

m_{pu} - masa proseva uneta sa ulaznim materijalom, [g].

U prvom opitu je:

$$m_{pu} = M \cdot \alpha_{-d}, \quad [\text{g}] \quad (49)$$

gde je:

α_{-d} - sadržaj klase $-d+0$ u uzorku (u del. jed.), određuje se sitovnom analizom iz tačke 2,

d - veličina otvora komparativnog sita.

U narednim opitima je:

$$m_{pu} = m_{p(n-1)} \cdot \alpha_{-d}, \quad [\text{g}] \quad (50)$$

gde je:

$m_{p(n-1)}$ - masa proseva iz prethodnog opita. Za svaki naredni opit, otsevu komparativnog sita se dodaje sveži uzorak mase jednake masi proseva iz prethodnog opita, tako da ukupna masa iznosi M .

8. Izračunava se masa novostvorenog proseva G po jednom obrtaju mlina:

$$G = \frac{m_{pn}}{N}, \quad [\text{g/ob.}] \quad (51)$$

gde je:

N - broj obrtaja mlina u trenutnom opitu, [ob.].

9. Izračunava se broj obrtaja mlina za sledeći opit mlevenja N_{n+1} :

$$N_{n+1} = \frac{IPM - m_{p(n-1)} \cdot \alpha_{-d}}{G}, \quad [\text{ob.}] \quad (52)$$

10. Sveži uzorak mase jednake prosevu komparativnog sita iz prethodnog opita mlevenja $m_{p(n-1)}$ se dodaje odsevu. Ovaj uzorak se ubacuje u mlin i melje za $N_{(n+1)}$ obrtaja.
11. Postupak mlevenja se ponavlja, dok masa proseva u poslednja tri mlevenja ne postane približno jednaka veličini IPM i konstantna. Ovime se postiže kružna šarža od 250 %.
12. Na prosevu komparativnog sita se određuje granulometrijski sastav. Podaci se prikazuju grafički i odatle se očitava parametar P_{80} koji predstavlja veličinu otvora sita kroz koju prolazi 80 % materijala proseva komparativnog sita.
13. Bondov radni indeks W_i [kWh/t] se izračunava pomoću formule (18).

3.2.2. *Postupak za određivanje nerastvornog dela uzorka u hlorovodoničnoj kiselini*

Određivanje nerastvornog dela uzorka u hlorovodoničnoj kiselini je rađeno prema standardu SRPS B.B8.070 „Krečnjak i dolomit – metode hemijskih ispitivanja“.

Princip - Uzorak, usitnjen, osušen i odmeren, rastvara se u hlorovodoničnoj kiselini i filtrira kroz filter papir. Talog na filter-papiru predstavlja nerastvorni deo u kiselini.

Reagensi - Za određivanje nerastvornog dela upotrebljava se hlorovodonična kiselina (HCl) razblažena 1+1.

Postupak – Odmeri se 1 g uzorka sa tačnošću od 0,1 mg, stavi u čašu od 250 ml i ovlaži sa nekoliko mililitara vode, razmulji i pažljivo ispod staklenog poklopca dodaje oko 10 ml hlorovodonične kiseline u količinama od po 1 ml, tako da se svaka sledeća količina dodaje tek kada se reakcija smiri. Zagreva se da bi se ubrzalo rastvaranje i odstranio ugljen-dioksid. Kada je rastvaranje završeno i rastvor postao bistar, stakleni poklopac se ispere toplom vodom. Rastvor se filtrira kroz filter-papir (crna traka) u odmernu tikvicu od 250 ml. Čaša i nerastvorljivi deo na filtru dobro se isperu toplom vodom 5 do 6 puta. Papir sa nerastvorljivim ostatkom prenese se u prethodno izmereni platinski lončić, sagori, a zatim žari na 1100 °C do konstantne mase, ohladi u eksikatoru i meri.

$$\text{Nerastvorljivo} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m}, \quad [\%] \quad (53)$$

gde je:

m_1 – masa lončića sa nerastvorljivim ostatkom, g;

m_2 – masa praznog lončića, g;

m – masa uzorka, g.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Testovi meljivosti standardnim Bondovim postupkom urađeni su na uzorcima andezita, krečnjaka, topioničke šljake, rude bakra i na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka i na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima topioničke šljake i rude bakra u različitim masenim odnosima. Prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa meljivosti na svim uzorcima rađena je granulometrijska analiza proseva komparativnog sita svih ciklusa mlevenja i na taj način je određivan parametar P_{80} i za proizvod mlevenja svakog ciklusa.

4.1. Testovi meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnim uzorcima krečnjaka i andezita

Prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa meljivosti na uzorcima andezita, krečnjaka i na njihovim dvokomponentnim kompozitnim uzorcima u različitim masenim odnosima uzimani su uzorci proseva komparativnog sita prvih devet ciklusa mlevenja i određivanja je njihova rastvorljivost u HCl.

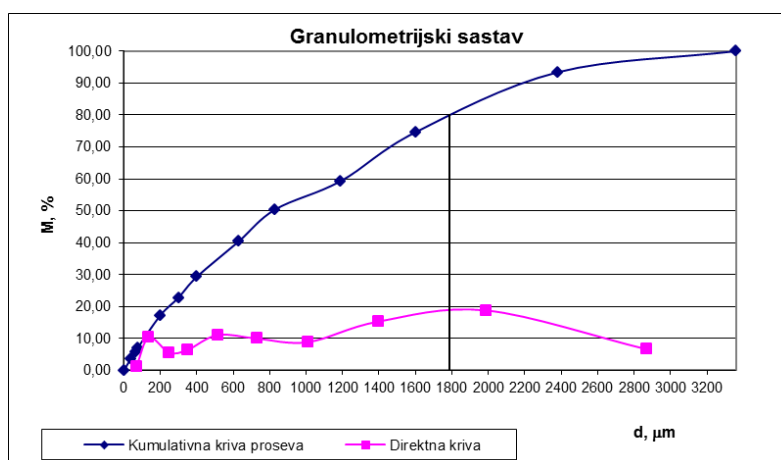
4.1.1. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 74 μ m

U tabeli 19 prikazani rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 74 μ m. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1126,7$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 321,9$ g.

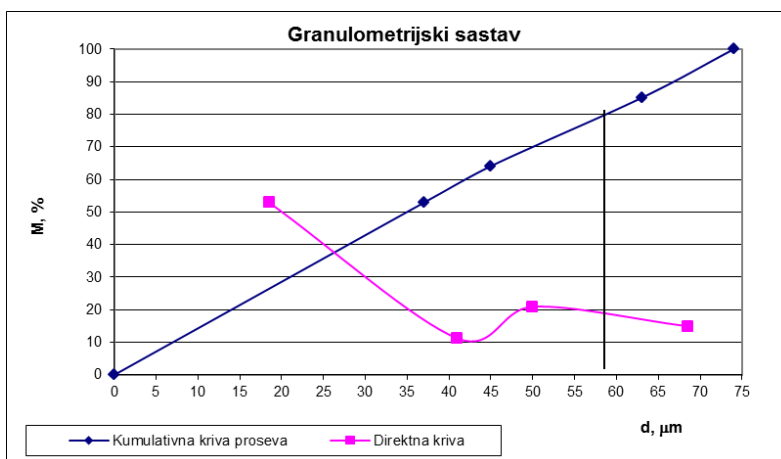
Tabela 19 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora 74 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	219,8	77,9	141,9	0,95	/	/	/
2	324	287,7	15,2	272,5	0,84	0,81	1,135	0,943
3	359	335,5	19,9	315,6	0,88	0,88	1,047	0,963
4	340	330,2	23,2	307,0	0,90	0,91	1,011	0,944
5	331	331,0	22,8	308,2	0,93	/	/	/
6	321	322,2	22,9	299,3	0,93	/	/	/
7	322	317,5	22,3	295,2	0,92	/	/	/
8	327	322,2	21,9	300,3	0,92	/	/	/
9	326	321,9	22,3	299,6	0,92	/	/	/
10	326	321,8	22,3	299,5	0,92	/	/	/

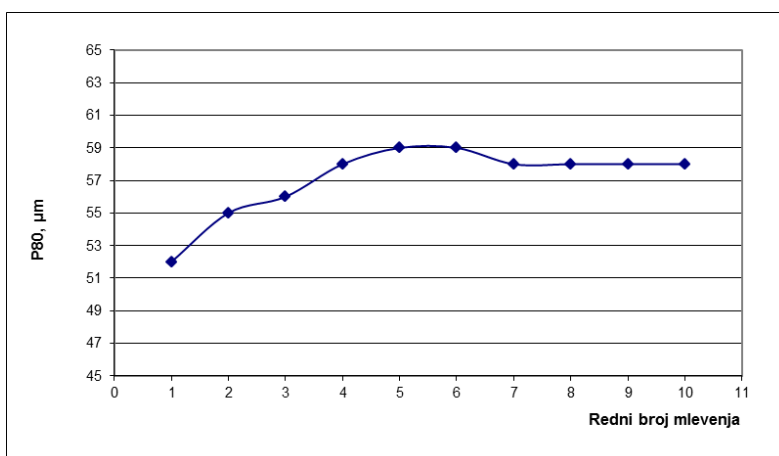
Na slici 16 prikazan je granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1790\mu$ m. Na slici 17 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita posljednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 18 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka andezita.



Slika 16 - Granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja, $F_{80}=1790\mu$ m



Slika 17 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=58\mu\text{m}$



Slika 18 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka andezita

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=55\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=56\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=58\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka andezita iznosile su: $P_{80\ r2}=56,93\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=57,68\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=58,99\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=18,09\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=17,53\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=17,37\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=17,90\text{kWh/t}$.

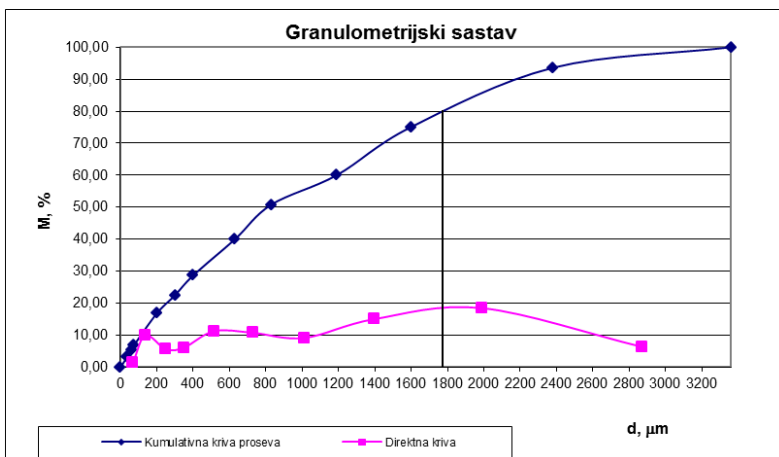
**4.1.2. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku
andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 74 μ m**

U tabeli 20 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 74 μ m. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijene su korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1106,5$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 316,1$ g.

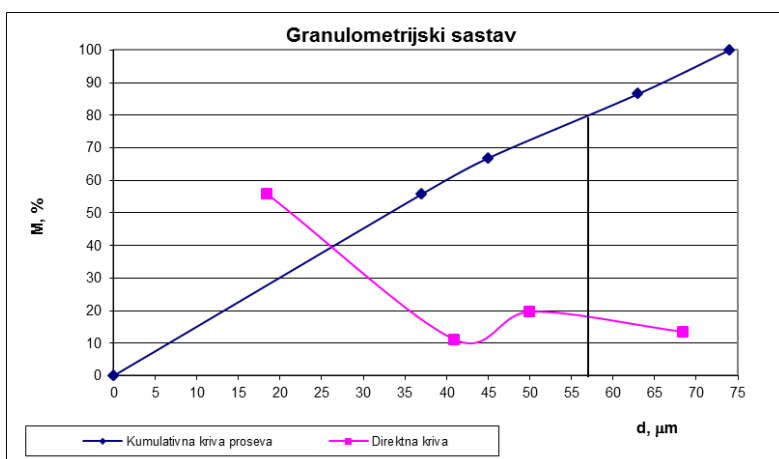
Tabela 20 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 74 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G , g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	216,2	75,9	140,3	0,94	/	/	/
2	322	283,2	14,8	268,4	0,83	0,81	1,222	0,935
3	356	341,5	19,4	322,1	0,90	0,91	1,080	0,997
4	324	331,4	23,4	308,0	0,95	0,96	1,018	0,996
5	308	323,5	22,7	300,8	0,98	/	/	/
6	301	314,5	22,2	292,3	0,97	/	/	/
7	304	307,5	21,6	285,9	0,94	/	/	/
8	313	324,3	21,1	303,2	0,97	/	/	/
9	304	320,1	22,2	297,9	0,98	/	/	/
10	300	316,2	22,0	294,2	0,98	/	/	/
11	300	316,1	21,7	294,4	0,98	/	/	/
12	300	316,2	21,7	294,5	0,98	/	/	/

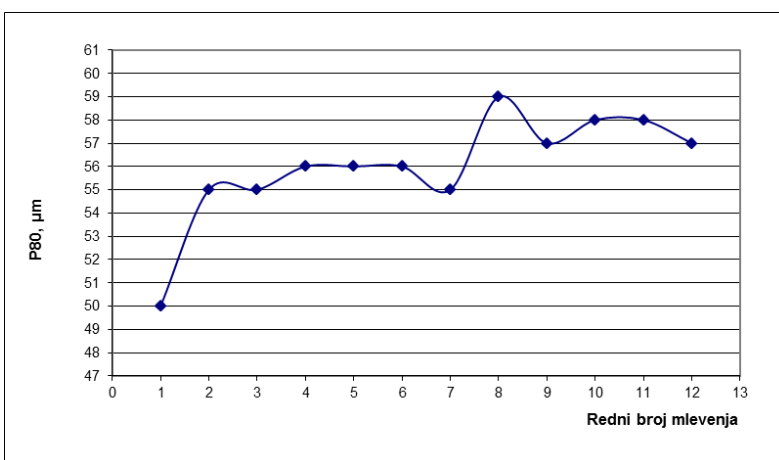
Na slici 19 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1760\mu$ m. Na slici 20 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 21 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25.



Slika 19 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja, $F_{80}=1760\mu\text{m}$



Slika 20 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=57\mu\text{m}$



Slika 21 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25

Vrednosti parametra $P_{80\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=55\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=55\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=56\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 iznosile su: $P_{80\ r2}=56,93\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=56,65\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=56,95\mu\text{m}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=17,03\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=17,69\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=16,73\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=16,80\text{kWh/t}$.

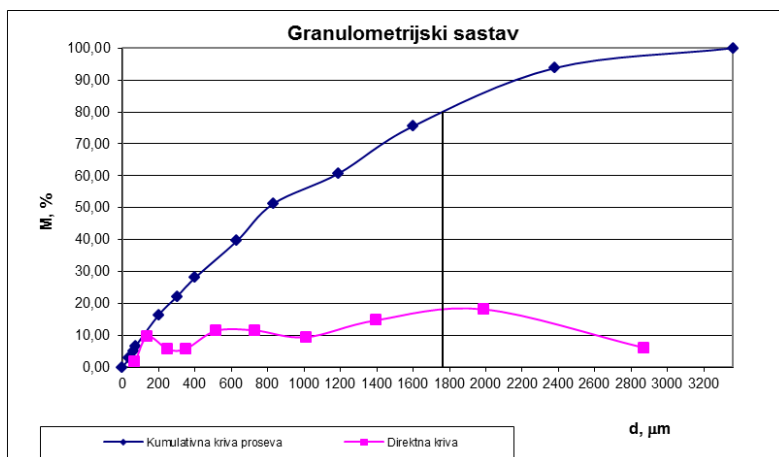
4.1.3. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$

U tabeli 21 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1083,2\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 309,5\text{ g}$.

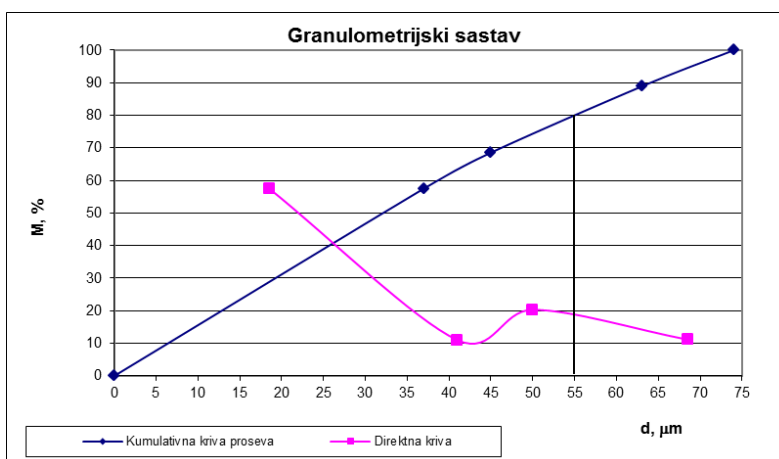
Tabela 21 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	235,8	73,7	162,1	1,08	/	/	/
2	272	272,2	16,1	256,1	0,94	0,92	1,172	1,061
3	308	328,0	18,5	309,5	1,00	1,01	1,066	1,102
4	286	325,7	22,3	303,4	1,06	1,07	0,998	1,110
5	271	315,0	22,2	292,8	1,08	/	/	/
6	267	311,6	21,4	290,2	1,09	/	/	/
7	265	299,3	21,2	278,1	1,05	/	/	/
8	275	312,9	20,4	292,5	1,06	/	/	/
9	271	311,4	21,3	290,1	1,07	/	/	/
10	270	309,7	21,2	288,5	1,07	/	/	/
11	270	309,5	21,1	288,4	1,07	/	/	/
12	270	309,6	21,1	288,5	1,07	/	/	/

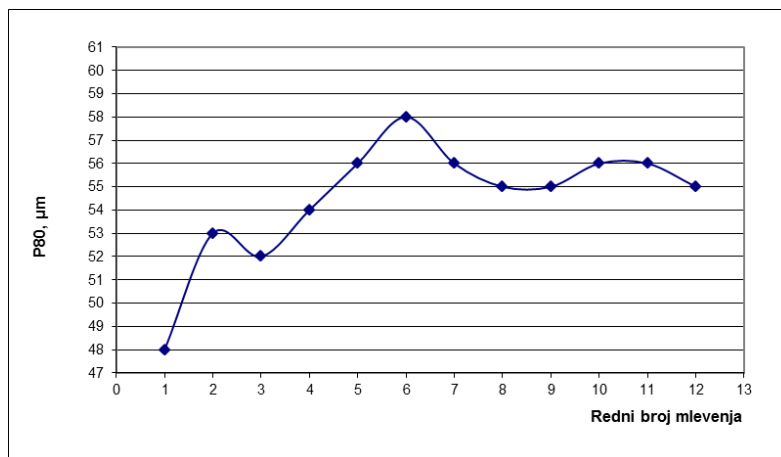
Na slici 22 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1760\mu\text{m}$. Na slici 23 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 24 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50.



Slika 22 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja, $F_{80}=1760\mu\text{m}$



Slika 23 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=55\mu\text{m}$



Slika 24 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=53\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=52\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=54\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 iznosile su: $P_{80\ r2}=54,86\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=53,56\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=54,92\mu\text{m}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=15,50\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=15,58\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=14,89\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=15,03\text{kWh/t}$.

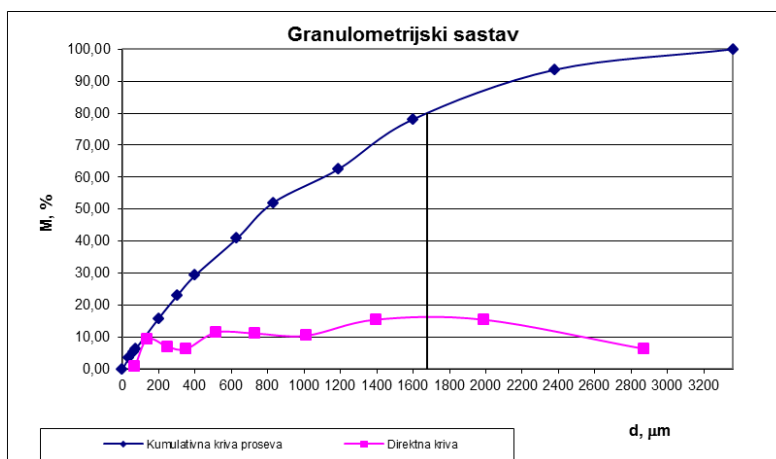
4.1.4. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$

U tabeli 22 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1083,2\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 309,5\text{ g}$.

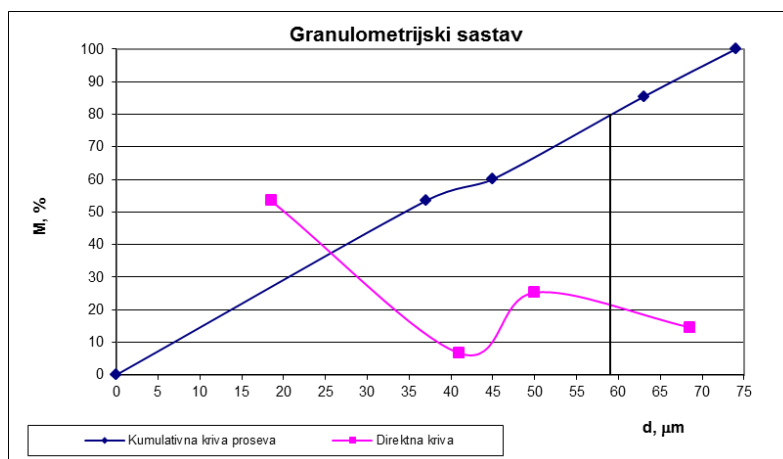
Tabela 22 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 74 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	254,5	72,6	181,9	1,21	/	/	/
2	251	285,7	16,4	269,3	1,07	1,04	1,187	1,209
3	283	342,6	18,4	324,2	1,15	1,15	1,075	1,262
4	261	336,6	22,1	314,5	1,21	1,22	1,013	1,265
5	249	331,0	21,7	309,3	1,24	/	/	/
6	241	314,1	21,4	292,7	1,21	/	/	/
7	248	326,0	20,3	305,7	1,23	/	/	/
8	243	321,5	21,0	300,5	1,23	/	/	/
9	243	321,3	20,8	300,5	1,23	/	/	/
10	243	321,2	20,7	300,5	1,23	/	/	/

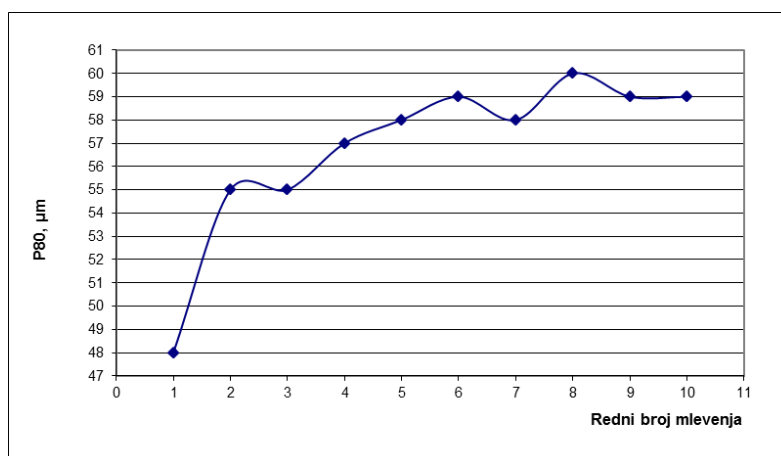
Na slici 25 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1680\mu\text{m}$. Na slici 26 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 27 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75.



Slika 25 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja, $F_{80}=1680\mu\text{m}$



Slika 26 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=59\mu\text{m}$



Slika 27 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=55\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=55\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=57\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 iznosile su: $P_{80\ r2}=56,93\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=56,65\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=57,97\mu\text{m}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=14,51\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom

za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=14,39\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=13,86\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=14,03\text{kWh/t}$.

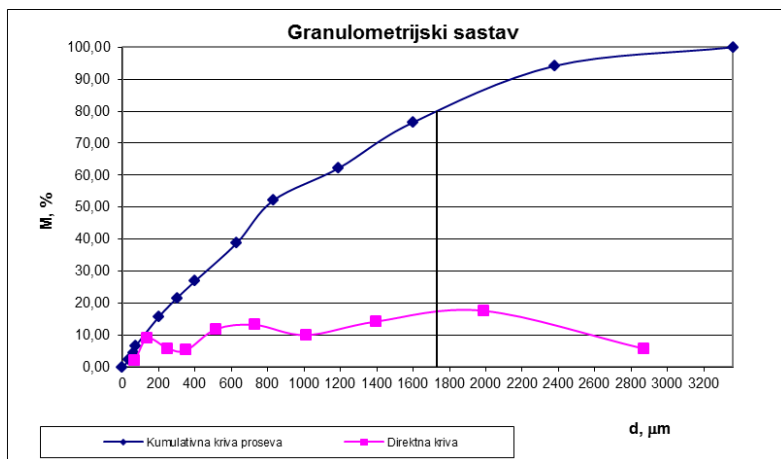
4.1.5. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$

U tabeli 23 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1020,6\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 291,6\text{ g}$.

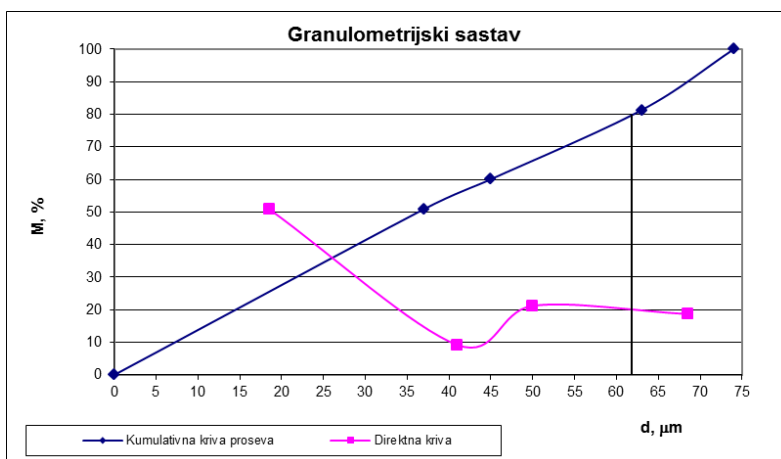
Tabela 23 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora $74\mu\text{m}$

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	100	224,2	68,4	155,8	1,56	/	/	/
2	178	232,9	15,0	217,9	1,23	1,18	1,140	1,369
3	225	293,0	15,6	277,4	1,23	1,22	1,103	1,339
4	220	304,0	19,6	284,4	1,29	1,30	1,034	1,348
5	210	298,5	20,4	278,1	1,32	/	/	/
6	205	293,7	20,0	273,7	1,33	/	/	/
7	204	293,1	19,7	273,4	1,34	/	/	/
8	203	291,9	19,6	272,3	1,34	/	/	/
9	203	291,6	19,6	272,0	1,34	/	/	/
10	203	291,7	19,5	272,2	1,34	/	/	/

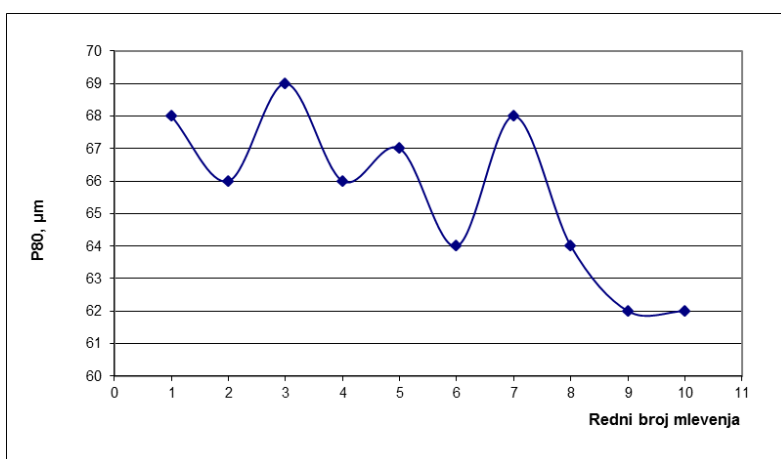
Na slici 28 prikazan je granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1730\mu\text{m}$. Na slici 29 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka krečnjaka poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 30 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka krečnjaka.



Slika 28 - Granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja, $F_{80}=1730\mu\text{m}$



Slika 29 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka krečnjaka poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=59\mu\text{m}$



Slika 30 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka krečnjaka

Vrednosti parametra $P_{80\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=66\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=69\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=66\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednost parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka krečnjaka iznosile su: $P_{80\ r2}=68,31\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=71,07\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=67,12\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=13,90\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=14,50\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=15,14\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=14,53\text{kWh/t}$.

4.1.6. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $105\mu\text{m}$

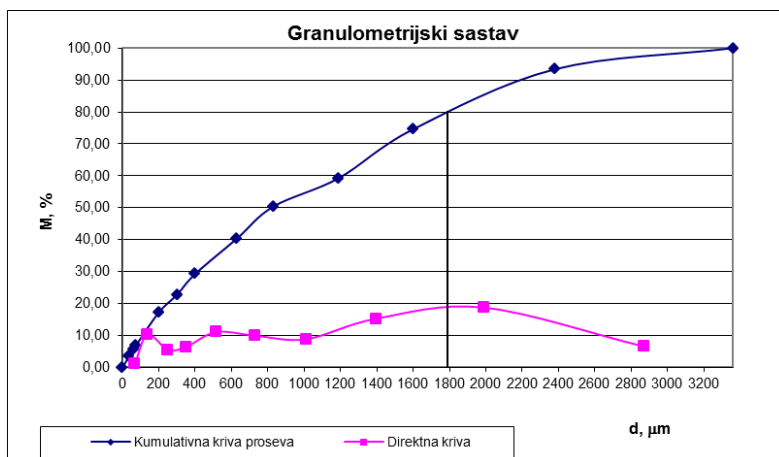
U tabeli 24 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $105\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1126,7\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 321,9\text{ g}$.

Tabela 24 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $105\mu\text{m}$

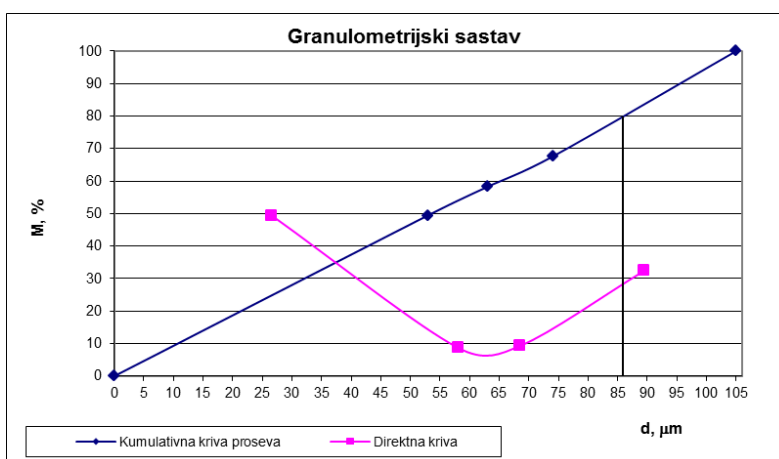
R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	276,3	107,8	168,5	1,12	/	/	/
2	263	308,6	26,4	282,2	1,07	1,06	1,158	1,223
3	273	340,9	29,5	311,4	1,14	1,15	1,065	1,261
4	253	332,1	32,6	299,5	1,18	1,19	1,021	1,234
5	245	320,8	31,8	289,0	1,18	/	/	/
6	247	330,7	30,7	300,0	1,21	/	/	/
7	239	324,2	31,6	292,6	1,22	/	/	/
8	238	320,9	31,0	289,9	1,22	/	/	/
9	239	321,9	30,7	291,2	1,22	/	/	/
10	239	321,8	30,8	291,0	1,22	/	/	/
11	239	321,8	30,8	291,0	1,22	/	/	/

Na slici 31 prikazan je granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1790\mu\text{m}$. Na slici 32

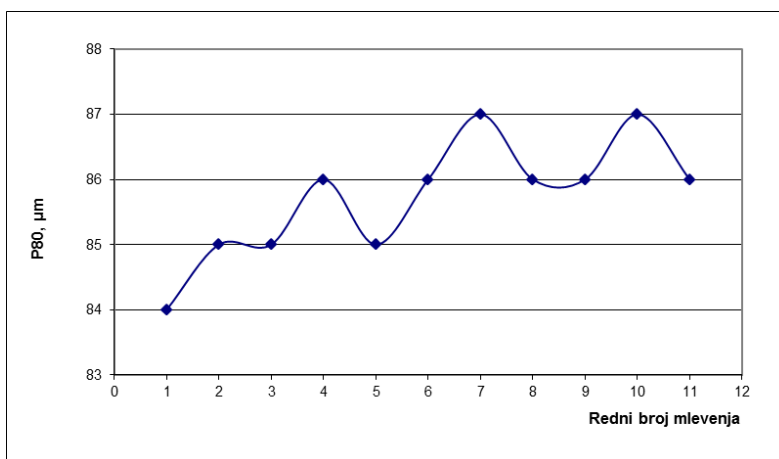
prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 33 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka andezita.



Slika 31 - Granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja, $F_{80}=1790\mu\text{m}$



Slika 32 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=86\mu\text{m}$



Slika 33 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka andezita

Vrednosti parametra $P_{80\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=85\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=85\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=86\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ r\ i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ r\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka andezita iznosile su: $P_{80\ r\ 2}=87,98\mu\text{m}$, $P_{80\ r\ 3}=87,55\mu\text{m}$ i $P_{80\ r\ 4}=87,46\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=16,93\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=17,15\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=16,68\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=16,96\text{kWh/t}$.

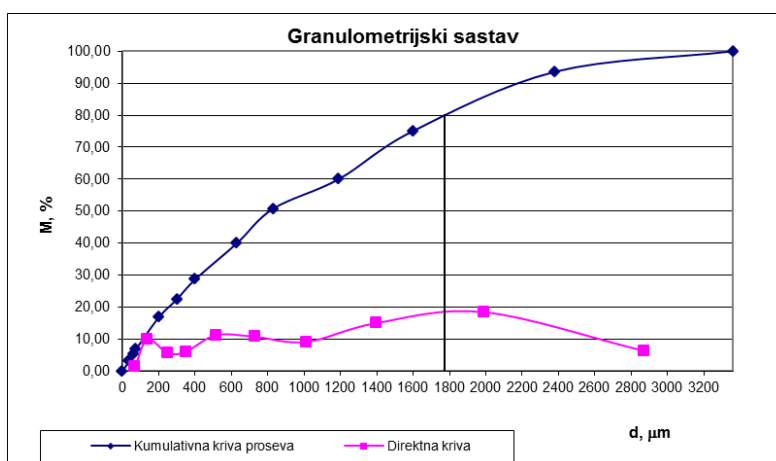
4.1.7. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 105μm

U tabeli 25 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 105μm. Vrednost parametra G_{ic} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1106,5$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 316,1$ g.

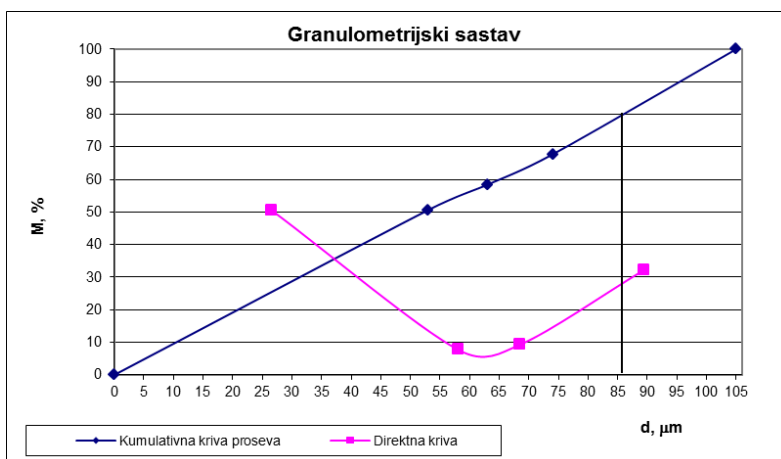
Tabela 25 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 105 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	282,5	104,5	178,0	1,19	/	/	/
2	244	295,8	26,7	269,1	1,10	1,09	1,168	1,259
3	261	334,6	27,9	306,7	1,17	1,18	1,078	1,289
4	242	328,0	31,6	296,4	1,22	1,23	1,025	1,276
5	233	319,9	31,0	288,9	1,24	/	/	/
6	231	326,9	30,2	296,7	1,29	/	/	/
7	222	314,5	30,9	283,6	1,28	/	/	/
8	224	313,2	29,7	283,5	1,27	/	/	/
9	226	316,3	29,6	286,7	1,27	/	/	/
10	226	316,2	29,9	286,3	1,27	/	/	/
11	226	316,1	29,8	286,3	1,27	/	/	/

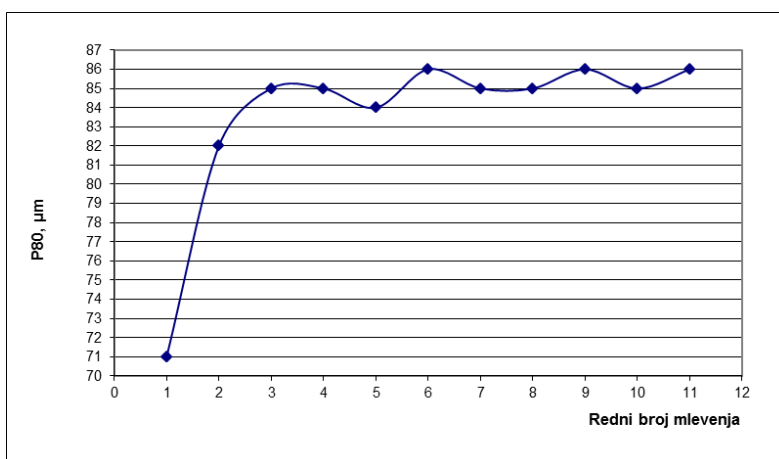
Na slici 34 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1773\mu\text{m}$. Na slici 35 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 36 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25.



Slika 34 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja, $F_{80}=1773\mu\text{m}$



Slika 35 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=86\mu\text{m}$



Slika 36 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80_2}=82\mu\text{m}$, $P_{80_3}=85\mu\text{m}$ i $P_{80_4}=85\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80_{ri}}$ [μm] dobijeni su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80_{ri}}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 iznosile su: $P_{80_{r2}}=84,87\mu\text{m}$, $P_{80_{r3}}=87,55\mu\text{m}$ i $P_{80_{r4}}=86,45\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=16,41\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom

za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=16,38\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=16,39\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=16,40\text{kWh/t}$.

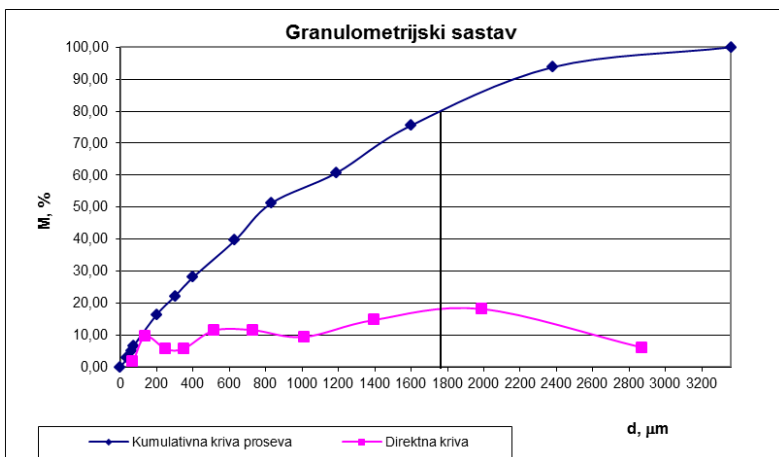
4.1.8. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 105 μm

U tabeli 26 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 105 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1083,2$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 309,5$ g.

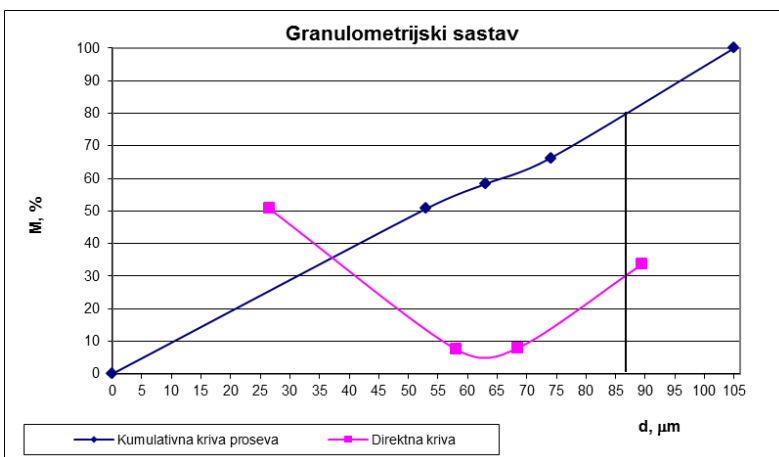
Tabela 26 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 105 μm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	302,3	101,0	201,3	1,34	/	/	/
2	210	290,1	28,2	261,9	1,25	1,24	1,194	1,436
3	226	324,2	27,0	297,2	1,31	1,32	1,126	1,442
4	212	323,9	30,2	293,7	1,38	1,39	1,060	1,441
5	202	317,2	30,2	287,0	1,42	/	/	/
6	197	309,6	29,6	280,0	1,42	/	/	/
7	197	318,6	28,9	289,7	1,47	/	/	/
8	191	311,8	29,7	282,1	1,48	/	/	/
9	189	309,4	29,1	280,3	1,48	/	/	/
10	190	309,5	28,8	280,7	1,48	/	/	/
11	190	309,4	28,8	280,6	1,48	/	/	/

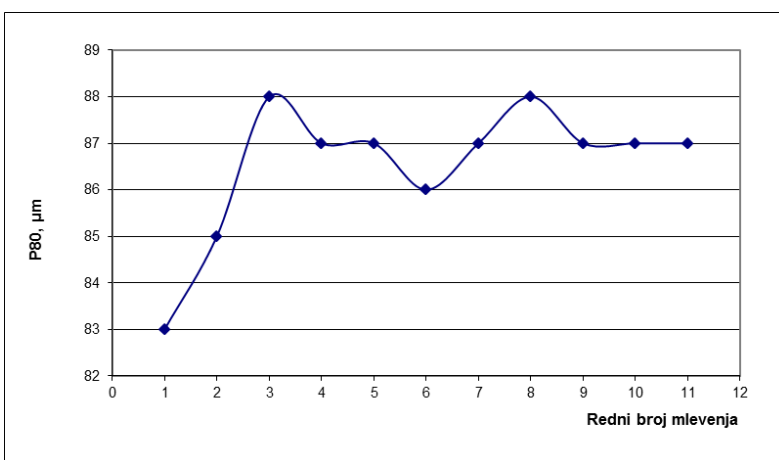
Na slici 37 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1760\mu\text{m}$. Na slici 38 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 39 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50.



Slika 37 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja, $F_{80}=1760\mu\text{m}$



Slika 38 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=87\mu\text{m}$



Slika 39 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50

Vrednosti parametra $P_{80 i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80 2}=85\mu\text{m}$, $P_{80 3}=88\mu\text{m}$ i $P_{80 4}=87\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80 ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80 ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 iznosile su: $P_{80 r2}=87,98\mu\text{m}$, $P_{80 r3}=90,64\mu\text{m}$ i $P_{80 r4}=88,48\mu\text{m}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=14,60\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=15,07\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=15,31\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=15,08\text{kWh/t}$.

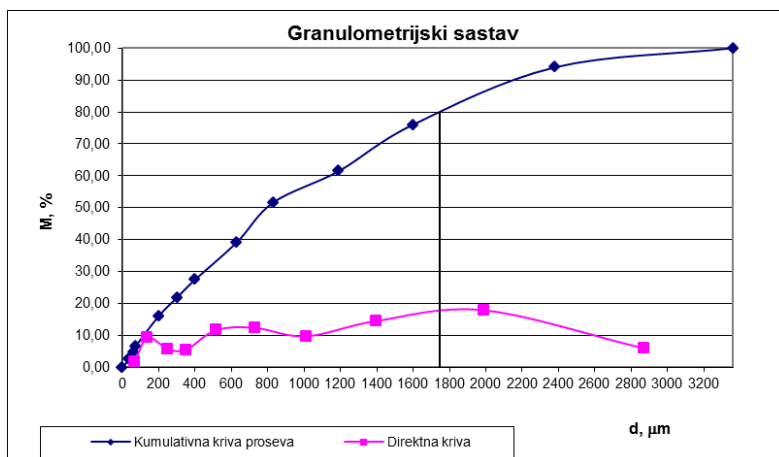
4.1.9. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 105 μm

U tabeli 27 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 105 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1124,5$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $\text{IPM} = 321,3$ g.

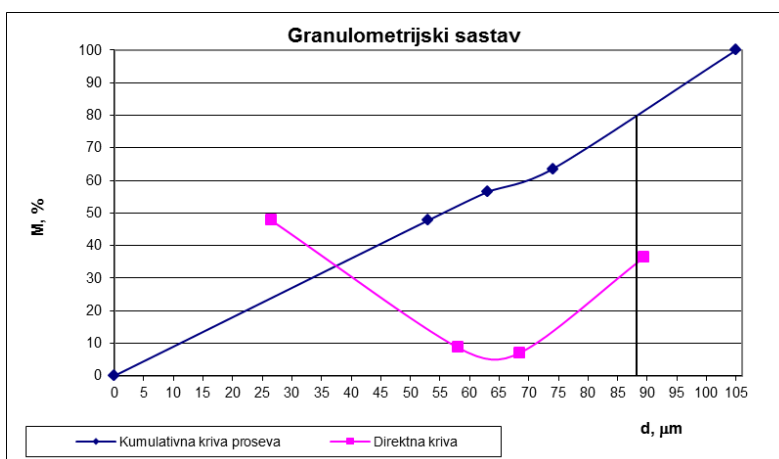
Tabela 27 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 105 μm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	100	273,7	103,3	170,4	1,70	/	/	/
2	174	262,5	25,2	237,3	1,37	1,33	1,211	1,538
3	218	330,8	24,1	306,7	1,41	1,40	1,153	1,529
4	206	338,4	30,4	308,0	1,49	1,50	1,064	1,556
5	194	333,2	31,1	302,1	1,55	/	/	/
6	187	327,9	30,6	297,3	1,59	/	/	/
7	183	322,9	30,1	292,8	1,60	/	/	/
8	183	321,9	29,7	292,2	1,60	/	/	/
9	182	321,4	29,6	291,8	1,60	/	/	/
10	182	321,5	29,5	292,0	1,60	/	/	/
11	182	321,5	29,5	292,0	1,60	/	/	/

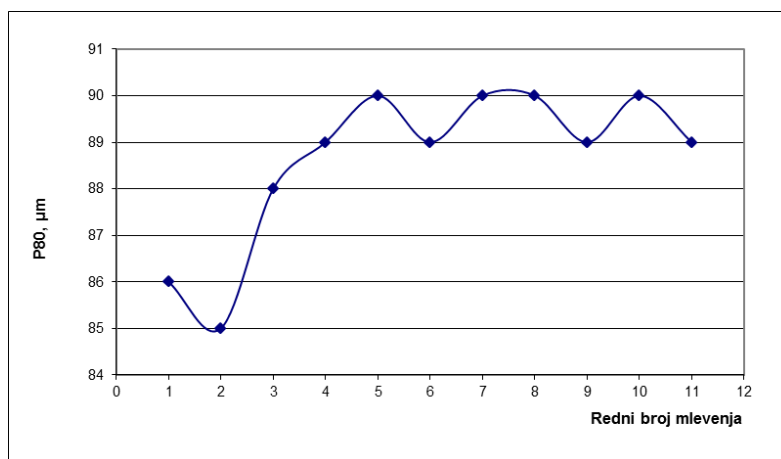
Na slici 40 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1743\mu\text{m}$. Na slici 41 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 42 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75.



Slika 40 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja, $F_{80}=1743\mu\text{m}$



Slika 41 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=89\mu\text{m}$



Slika 42 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=85\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=88\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=89\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 iznosile su: $P_{80\ r2}=87,98\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=90,64\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=90,51\mu\text{m}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=13,91\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=14,27\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=14,61\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=14,40\text{kWh/t}$.

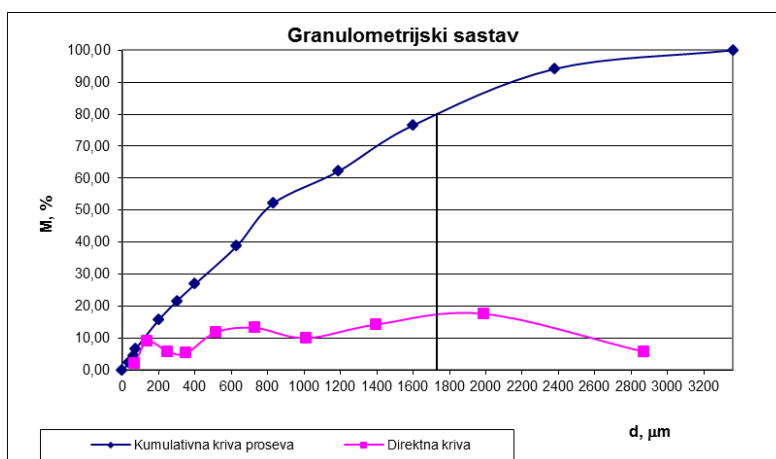
4.1.10. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 105μm

U tabeli 28 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 105μm. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1020,6$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 291,6$ g.

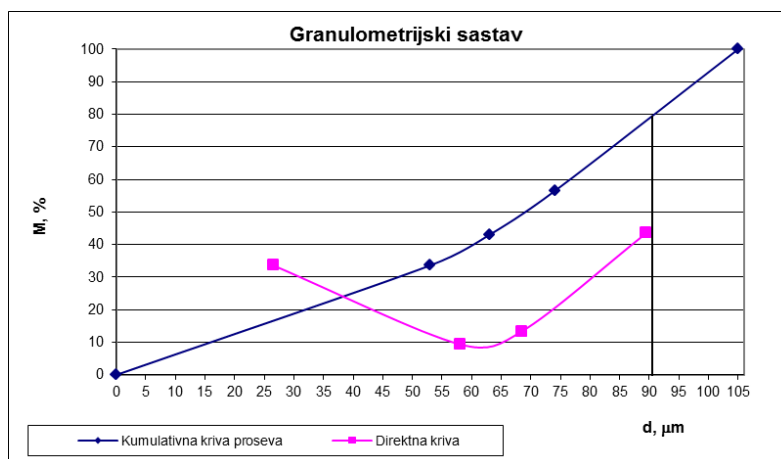
Tabela 28 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 105µm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	100	278,3	92,6	185,7	1,86	/	/	/
2	143	249,8	25,2	224,6	1,57	1,54	1,178	1,785
3	172	296,5	22,7	273,8	1,59	1,58	1,151	1,733
4	166	304,8	26,9	277,9	1,67	1,68	1,076	1,742
5	158	304,8	27,6	277,2	1,76	/	/	/
6	150	299,8	27,6	272,2	1,81	/	/	/
7	146	292,5	27,2	265,3	1,82	/	/	/
8	146	290,8	26,5	264,3	1,81	/	/	/
9	146	291,6	26,4	265,2	1,81	/	/	/
10	146	291,5	26,4	265,1	1,81	/	/	/
11	146	291,6	26,4	265,2	1,81	/	/	/

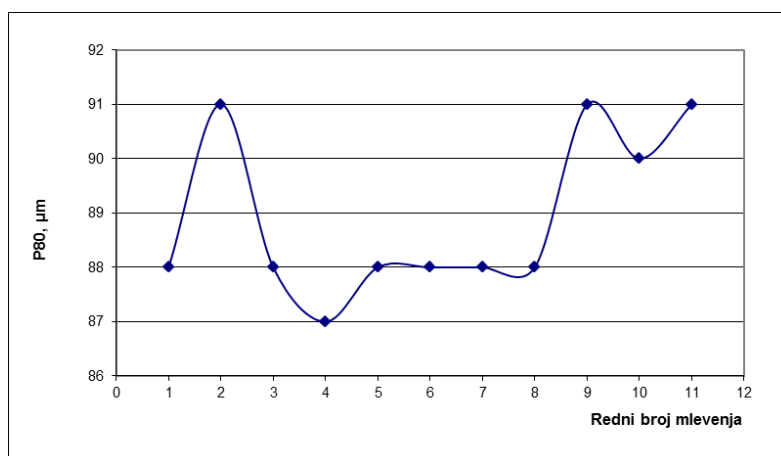
Na slici 43 prikazan je granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1730\mu\text{m}$. Na slici 44 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka krečnjaka poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 45 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka krečnjaka.



Slika 43 - Granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja, $F_{80}=1730\mu\text{m}$



Slika 44 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka krečnjaka poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=91\mu\text{m}$



Slika 45 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka krečnjaka

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=91\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=88\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=87\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka krečnjaka iznosile su: $P_{80\ r2}=94,19\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=90,64\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=88,48\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=12,77\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom

za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=13,21\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=13,20\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=12,94\text{kWh/t}$.

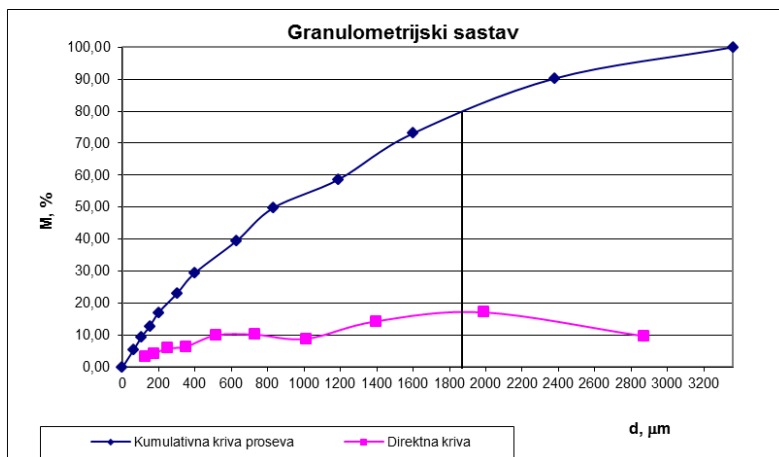
4.1.11. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$

U tabeli 29 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1126,7\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 321,9\text{ g}$.

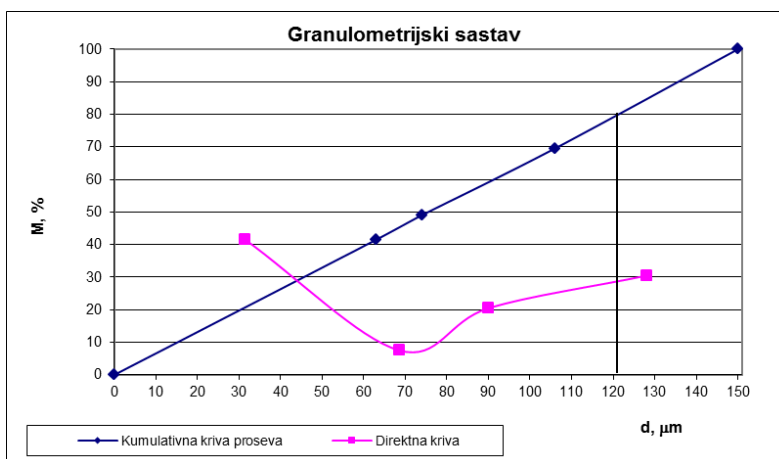
Tabela 29 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku andezita sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	361,4	144,4	217,0	1,45	/	/	/
2	190	313,6	46,3	267,3	1,40	1,42	1,077	1,645
3	201	330,1	40,2	289,9	1,44	1,44	1,067	1,580
4	194	332,1	42,3	289,8	1,50	1,50	1,022	1,556
5	187	334,8	42,6	292,2	1,57	/	/	/
6	178	319,6	42,9	276,7	1,55	/	/	/
7	181	314,3	41,0	273,3	1,51	/	/	/
8	186	326,6	40,3	286,3	1,54	/	/	/
9	182	322,3	41,9	280,4	1,54	/	/	/
10	182	322,0	41,3	280,7	1,54	/	/	/
11	182	321,9	41,3	280,6	1,54	/	/	/

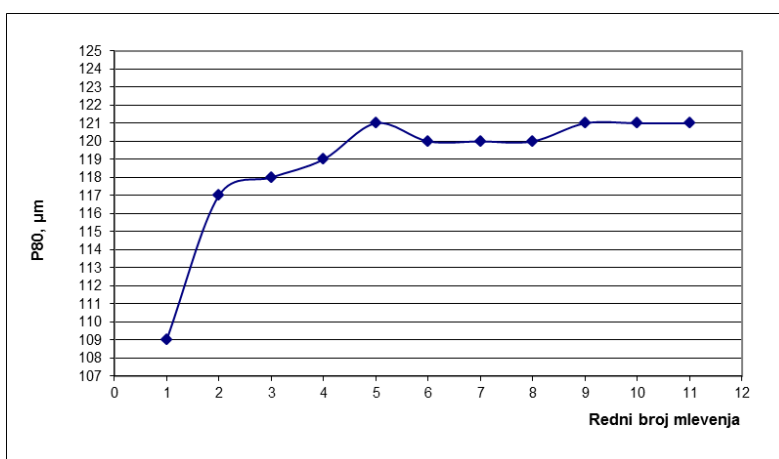
Na slici 46 prikazan je granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1872\mu\text{m}$. Na slici 47 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 48 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka andezita.



Slika 46 - Granulometrijski sastav uzorka andezita pre mlevenja, $F_{80}=1872\mu\text{m}$



Slika 47 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka andezita poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=121\mu\text{m}$



Slika 48 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka andezita

Vrednosti parametra $P_{80\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=117\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=118\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=119\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka andezita iznosile su: $P_{80\ r2}=121,10\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=121,54\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=121,02\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=16,01\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=15,17\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=15,72\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=15,88\text{kWh/t}$.

4.1.12. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

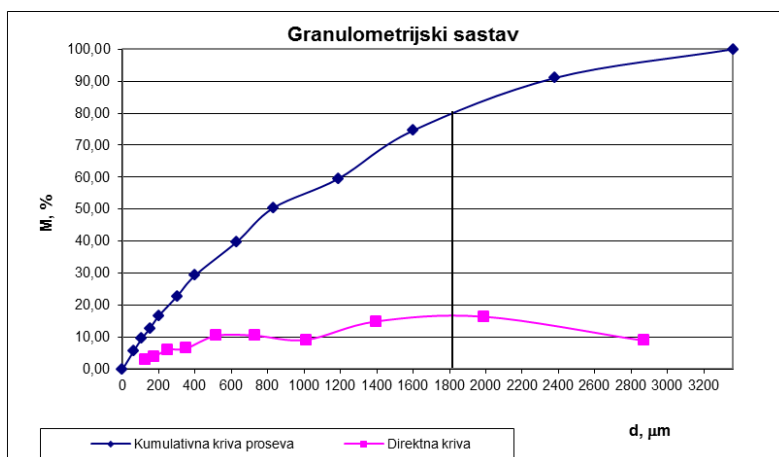
U tabeli 30 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1106,5$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 316,1$ g.

Tabela 30 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

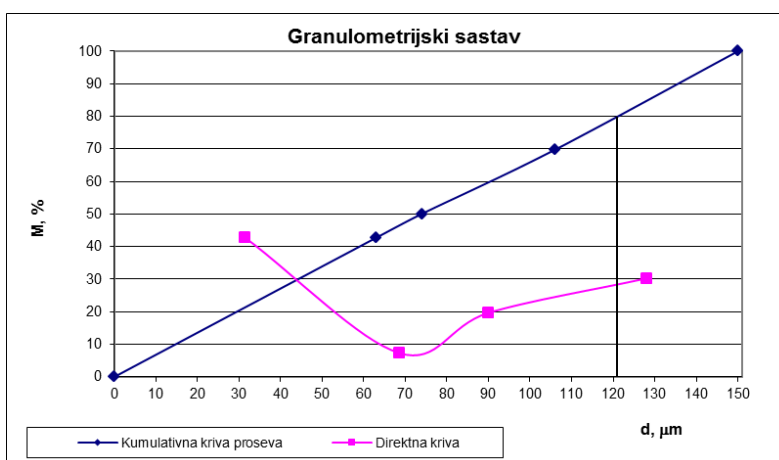
R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	359,8	140,5	219,3	1,46	/	/	/
2	185	317,3	45,7	271,6	1,47	1,47	1,126	1,697
3	188	326,2	40,3	285,9	1,52	1,53	1,083	1,678
4	181	326,3	41,4	284,9	1,58	1,59	1,044	1,649
5	174	325,9	41,4	284,5	1,63	/	/	/
6	168	318,9	41,4	277,5	1,65	/	/	/
7	167	317,1	40,5	276,6	1,66	/	/	/
8	167	316,5	40,3	276,2	1,66	/	/	/
9	166	316,2	40,2	276,0	1,66	/	/	/
10	166	316,1	40,2	275,9	1,66	/	/	/
11	166	316,2	40,1	276,1	1,66	/	/	/

Na slici 49 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 %

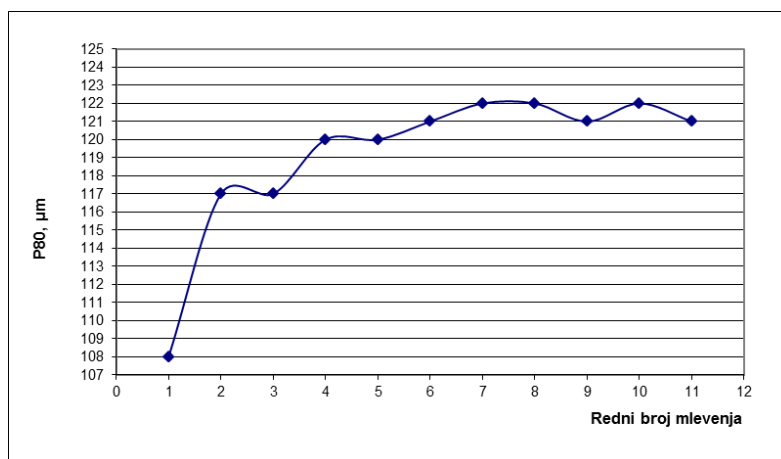
sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1815\mu\text{m}$. Na slici 50 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 51 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25.



Slika 49 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 pre mlevenja, $F_{80}=1815\mu\text{m}$



Slika 50 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=121\mu\text{m}$



Slika 51 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=117\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=117\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=120\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=75:25 iznosile su: $P_{80\ r2}=121,10\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=120,51\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=122,04\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=15,13\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=14,87\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=14,96\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=15,30\text{kWh/t}$.

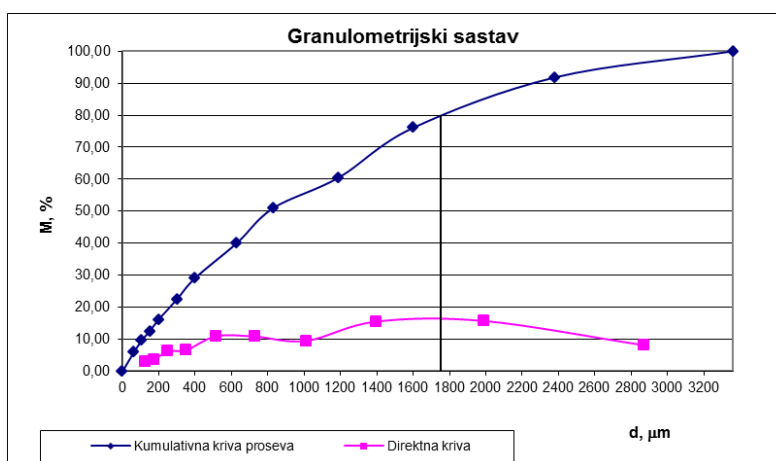
4.1.13. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150μm

U tabeli 31 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150μm. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1083,2$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 309,5$ g.

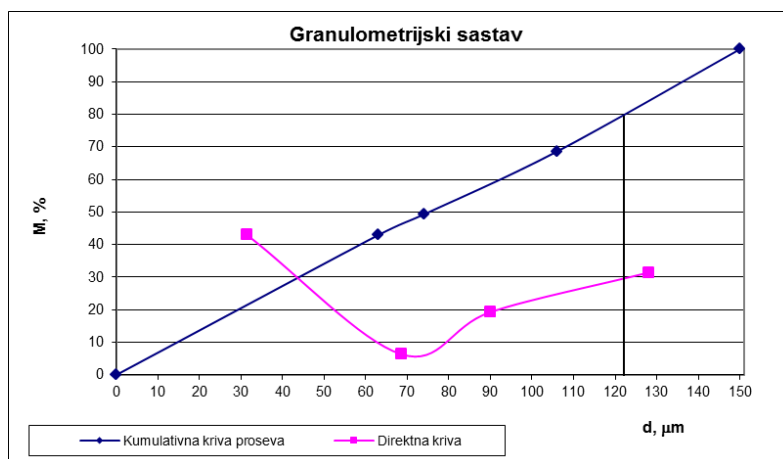
Tabela 31 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	365,4	136,3	229,1	1,53	/	/	/
2	173	326,1	46,0	280,1	1,62	1,63	1,102	1,893
3	165	320,6	41,0	279,6	1,69	1,70	1,065	1,864
4	159	316,9	40,3	276,6	1,74	1,74	1,039	1,804
5	155	311,8	39,9	271,9	1,75	/	/	/
6	154	313,7	39,2	274,5	1,78	/	/	/
7	152	309,8	39,5	270,3	1,78	/	/	/
8	152	314,3	39,0	275,3	1,81	/	/	/
9	149	309,6	39,6	270,0	1,81	/	/	/
10	149	309,6	39,0	270,6	1,81	/	/	/
11	149	309,5	39,0	270,5	1,81	/	/	/

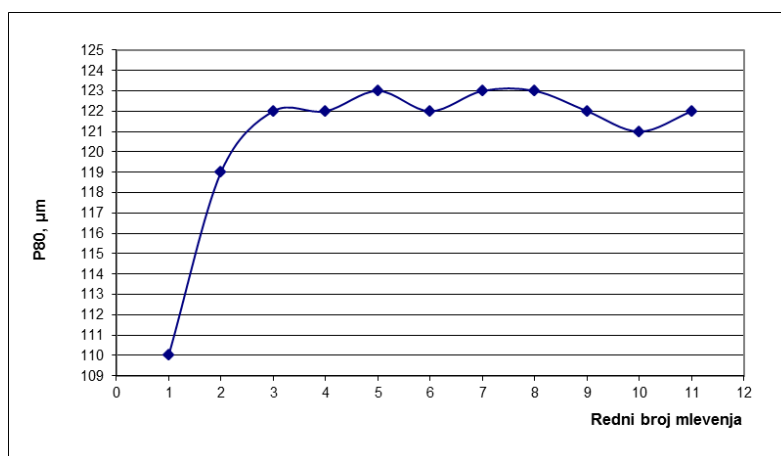
Na slici 52 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1757\mu\text{m}$. Na slici 53 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 54 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50.



Slika 52 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 pre mlevenja, $F_{80}=1757\mu\text{m}$



Slika 53 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=122\mu\text{m}$



Slika 54 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=119\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=122\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=122\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=50:50 iznosile su: $P_{80\ r_2}=123,17\mu\text{m}$, $P_{80\ r_3}=125,66\mu\text{m}$ i $P_{80\ r_4}=124,07\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=14,26\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom

za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=13,83\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=14,20\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=14,46\text{kWh/t}$.

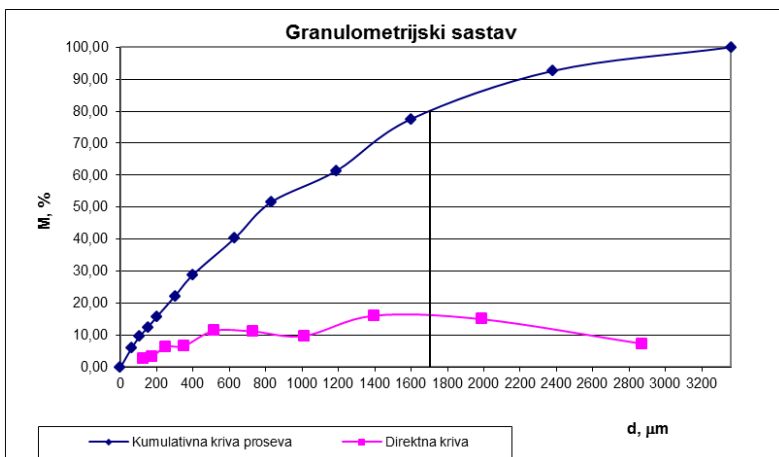
4.1.14. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

U tabeli 32 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1056,5$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 301,9$ g.

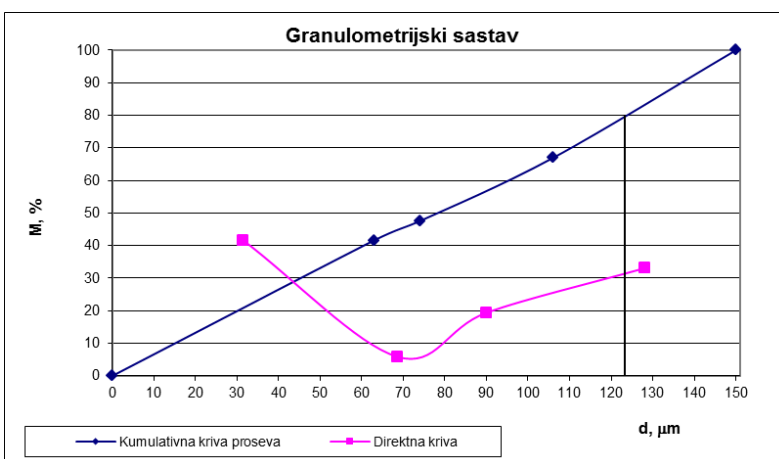
Tabela 32 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku andezit:krečnjak=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	100	309,3	131,8	177,5	1,78	/	/	/
2	148	285,5	38,6	246,9	1,67	1,65	1,187	1,908
3	160	318,1	35,6	282,5	1,77	1,79	1,097	1,958
4	148	310,7	39,7	271,0	1,83	1,83	1,064	1,898
5	144	311,8	38,7	273,1	1,90	/	/	/
6	139	312,4	38,9	273,5	1,97	/	/	/
7	133	301,6	39,0	262,6	1,97	/	/	/
8	134	300,1	37,6	262,5	1,96	/	/	/
9	135	301,9	37,4	264,5	1,96	/	/	/
10	135	301,8	37,7	264,1	1,96	/	/	/
11	135	301,9	37,6	264,3	1,96	/	/	/

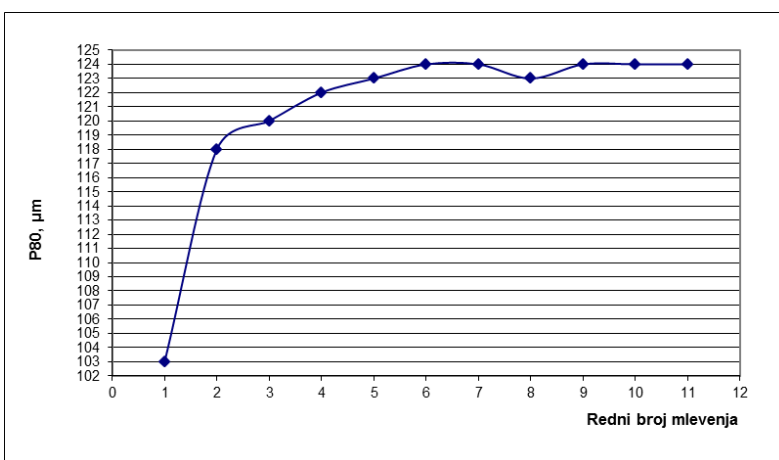
Na slici 55 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1697\mu\text{m}$. Na slici 56 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 57 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75.



Slika 55 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 pre mlevenja, $F_{80}=1697\mu\text{m}$



Slika 56 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=124\mu\text{m}$



Slika 57 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75

Vrednosti parametra $P_{80\ i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=118\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=120\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=122\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka andezit:krečnjak=25:75 iznosile su: $P_{80\ r2}=122,13\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=123,60\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=124,07\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=13,59\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=13,75\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=13,57\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=13,96\text{kWh/t}$.

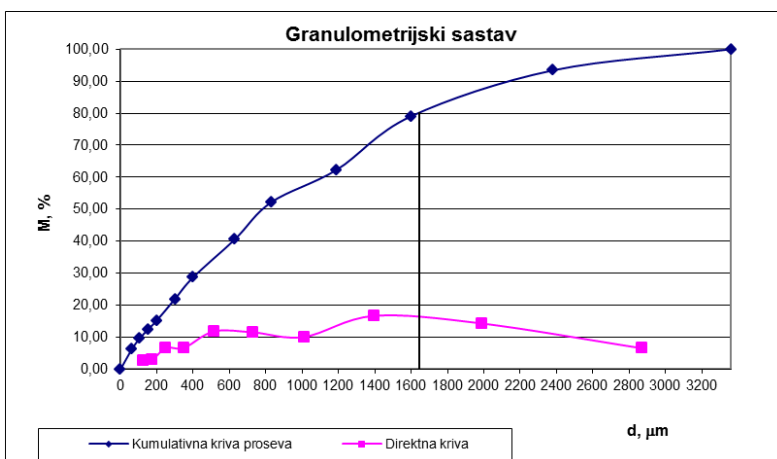
4.1.15. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 150 μm

U tabeli 33 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 150 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1020,6$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 291,6$ g.

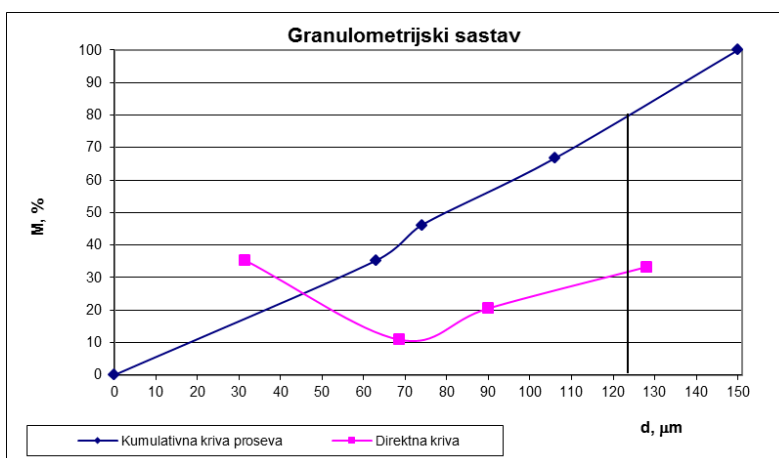
Tabela 33 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku krečnjaka sa komparativnim sitom otvora 150 μm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	100	302,5	126,1	176,4	1,76	/	/	/
2	144	290,3	37,4	252,9	1,75	1,75	1,229	2,029
3	146	312,8	35,9	276,9	1,90	1,93	1,119	2,112
4	133	309,2	38,7	270,5	2,03	2,05	1,047	2,126
5	125	297,9	38,2	259,7	2,08	/	/	/
6	122	296,5	36,8	259,7	2,12	/	/	/
7	120	289,8	36,6	253,2	2,11	/	/	/
8	121	297,7	35,8	261,9	2,16	/	/	/
9	118	291,4	36,8	254,6	2,16	/	/	/
10	119	291,5	36,0	255,5	2,16	/	/	/
11	119	291,6	36,0	255,6	2,16	/	/	/

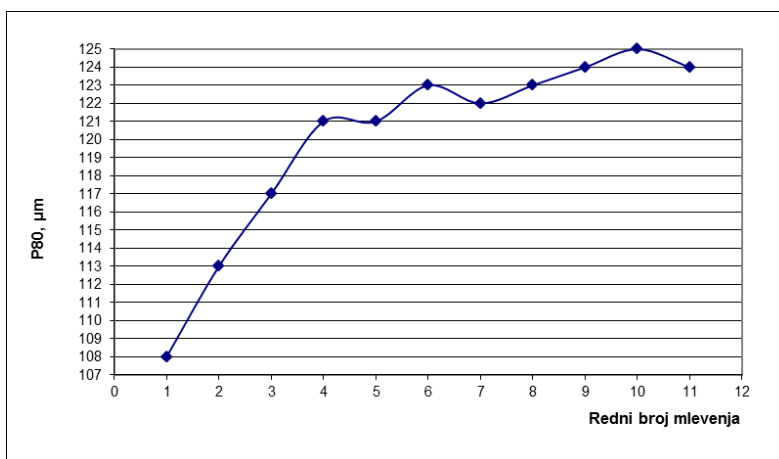
Na slici 58 prikazan je granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1637\mu\text{m}$. Na slici 59 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja poslednjeg ciklusa mlevenja uzorka krečnjaka. Na slici 60 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka krečnjaka.



Slika 58 - Granulometrijski sastav uzorka krečnjaka pre mlevenja, $F_{80}=1637\mu\text{m}$



Slika 59 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka krečnjaka poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=124\mu\text{m}$



Slika 60 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka krečnjaka

Vrednosti parametra P_{80i} [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile: $P_{80\ 2}=113\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=117\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=121\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka krečnjaka iznosile su: $P_{80\ r2}=116,96\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=120,51\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=123,06\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=12,36\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=12,77\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=12,62\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=12,73\text{kWh/t}$.

4.2. Testovi meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnim uzorcima topioničke šljake i rude bakra

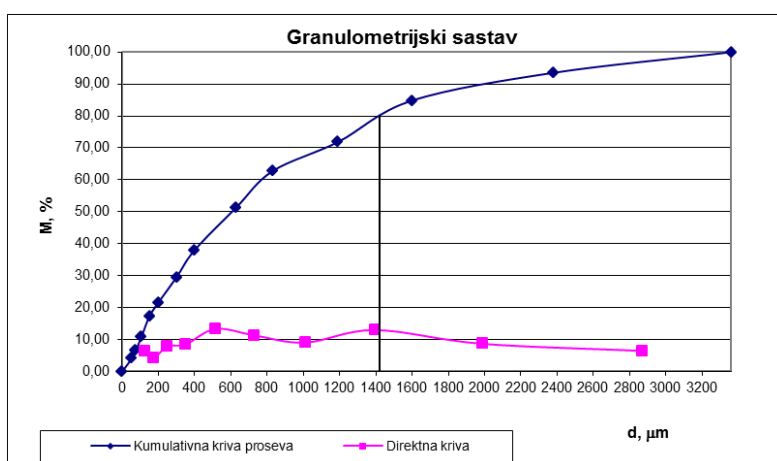
4.2.1. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku šljake sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$

U tabeli 34 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku šljake sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1581,1\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 451,7\text{ g}$.

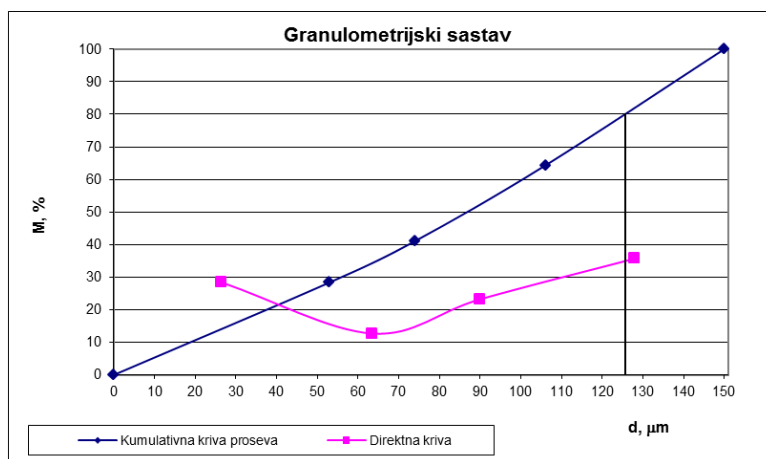
Tabela 34 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku šljake sa komparativnim sitom otvora 150 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	523,8	272,7	251,1	1,67	/	/	/
2	216	463,6	90,3	373,3	1,73	1,73	1,060	2,000
3	215	456,1	80,0	376,1	1,75	1,75	1,055	1,920
4	213	465,1	78,7	386,4	1,81	1,82	1,015	1,890
5	205	452,1	80,2	371,9	1,81	/	/	/
6	206	454,0	78,0	376,0	1,82	/	/	/
7	205	453,3	78,3	375,0	1,83	/	/	/
8	204	455,2	78,2	377,0	1,85	/	/	/
9	202	451,9	78,5	373,4	1,85	/	/	/
10	202	451,8	77,9	373,9	1,85	/	/	/
11	202	451,7	77,9	373,8	1,85	/	/	/

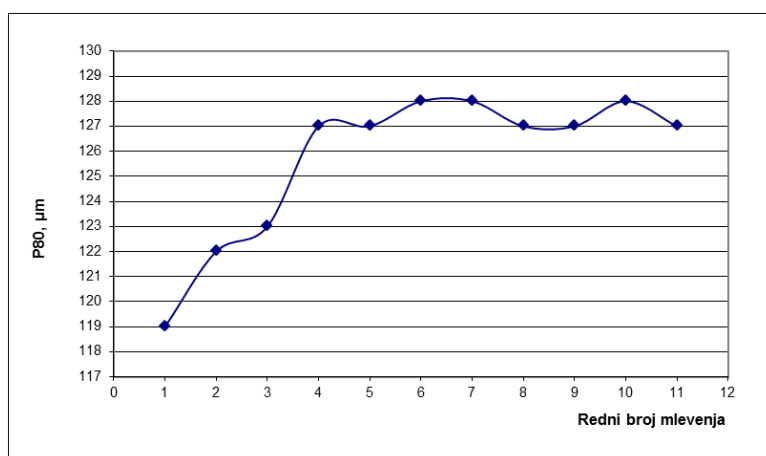
Na slici 61 prikazan je granulometrijski sastav uzorka šljake pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1414\mu$ m. Na slici 62 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka šljake posljednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 63 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka šljake.



Slika 61 - Granulometrijski sastav uzorka šljake pre mlevenja, $F_{80}=1414\mu$ m



Slika 62 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka šljake poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=127\mu\text{m}$



Slika 63 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka šljake

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=122\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=123\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=127\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka šljake iznosile su: $P_{80\ r2}=126,27\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=126,69\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=129,16\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=15,02\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=14,01\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=14,55\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=14,95\text{kWh/t}$.

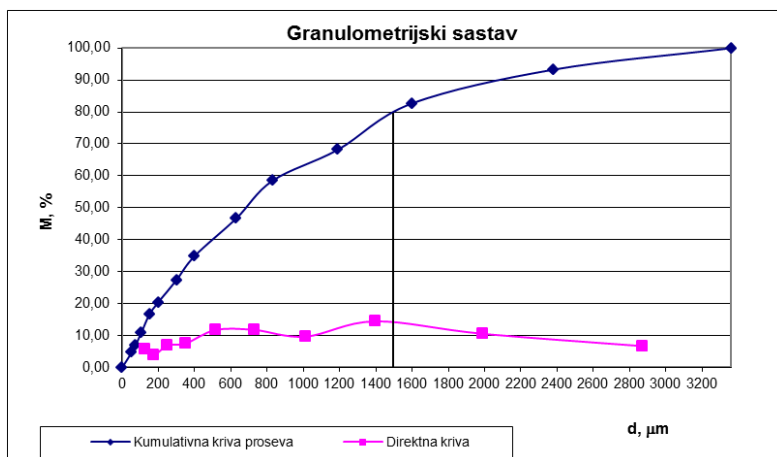
**4.2.2. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku
šljaka:ruda bakra=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μ m**

U tabeli 35 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra =75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μ m. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm³ iznosila $M = 1451,7$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 414,8$ g.

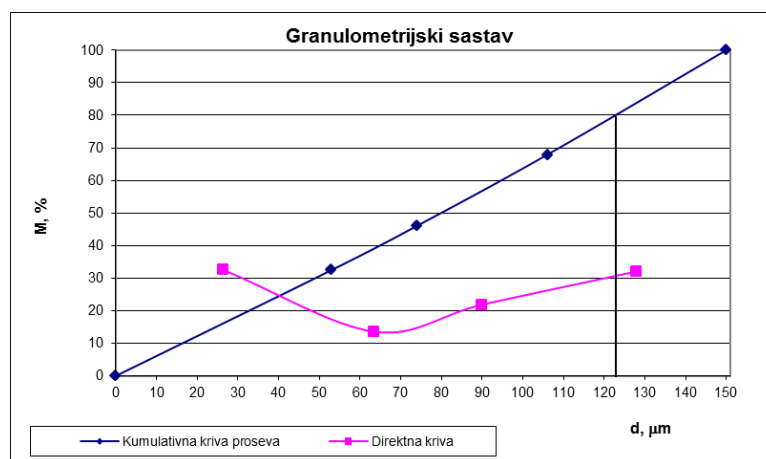
Tabela 35 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=75:25 sa komparativnim sitom otvora 150 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	515,5	241,2	274,3	1,83	/	/	/
2	180	416,1	85,6	330,5	1,84	1,83	1,063	2,110
3	188	418,1	69,1	349,0	1,85	1,86	1,059	2,030
4	186	421,6	69,5	352,1	1,89	1,90	1,036	1,970
5	182	420,2	70,0	350,2	1,92	/	/	/
6	180	418,9	69,8	349,1	1,94	/	/	/
7	178	413,8	69,6	344,2	1,94	/	/	/
8	179	419,8	68,7	351,1	1,97	/	/	/
9	175	414,7	69,7	345,0	1,97	/	/	/
10	176	414,7	68,9	345,8	1,97	/	/	/
11	176	414,9	68,9	346,0	1,97	/	/	/

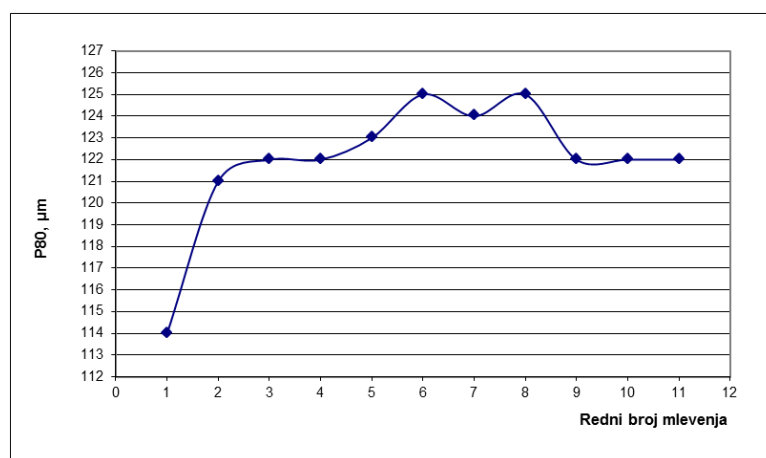
Na slici 64 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1495\mu$ m. Na slici 65 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 66 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25.



Slika 64 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25 pre mlevenja, $F_{80}=1495\mu\text{m}$



Slika 65 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=122\mu\text{m}$



Slika 66 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25

Vrednosti parametra $P_{80 i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80 2}=121\mu\text{m}$, $P_{80 3}=122\mu\text{m}$ i $P_{80 4}=122\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80 ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80 ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=75:25 iznosile su: $P_{80 r2}=125,24\mu\text{m}$, $P_{80 r3}=125,66\mu\text{m}$ i $P_{80 r4}=124,07\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=13,71\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=13,17\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=13,63\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=13,89\text{kWh/t}$.

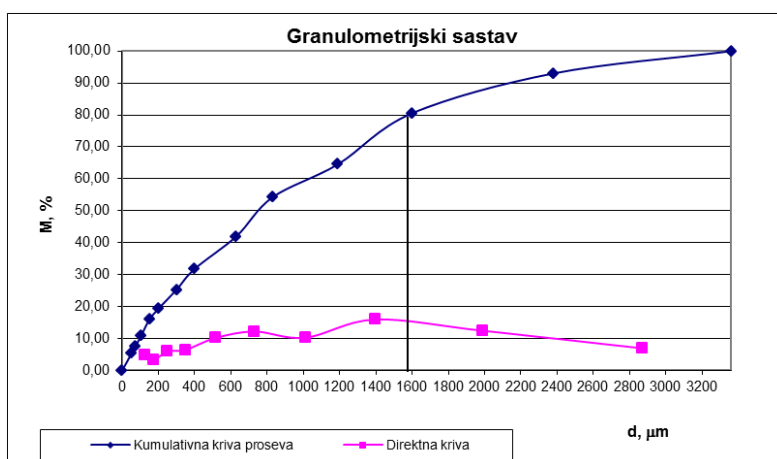
4.2.3. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra =50:50 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

U tabeli 36 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1351,3$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $\text{IPM} = 386,1$ g.

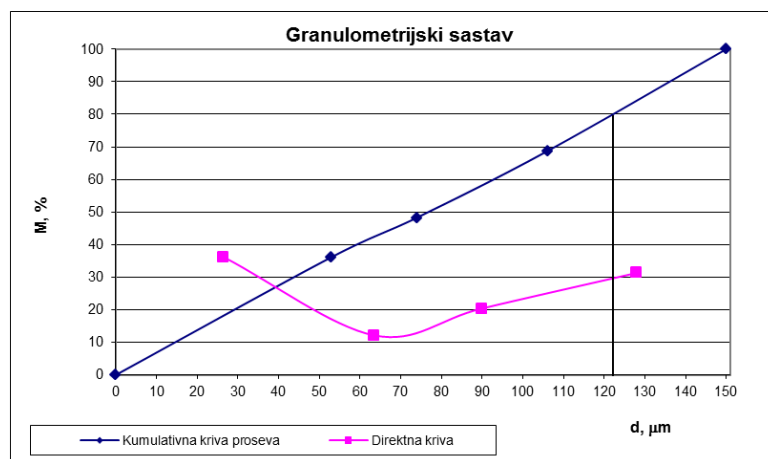
Tabela 36 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=50:50 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G , g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	511,1	215,9	295,2	1,97	/	/	/
2	155	375,1	81,7	293,4	1,90	1,87	1,051	2,170
3	172	393,1	59,9	333,2	1,94	1,95	1,028	2,130
4	167	385,2	62,8	322,4	1,93	1,93	1,034	2,000
5	168	397,1	61,5	335,6	2,00	/	/	/
6	161	387,5	63,4	324,1	2,01	/	/	/
7	162	394,7	61,9	332,8	2,06	/	/	/
8	157	376,2	63,1	313,1	2,00	/	/	/
9	163	386,3	60,1	326,2	2,00	/	/	/
10	162	386,2	61,7	324,5	2,00	/	/	/
11	162	386,2	61,7	324,5	2,00	/	/	/

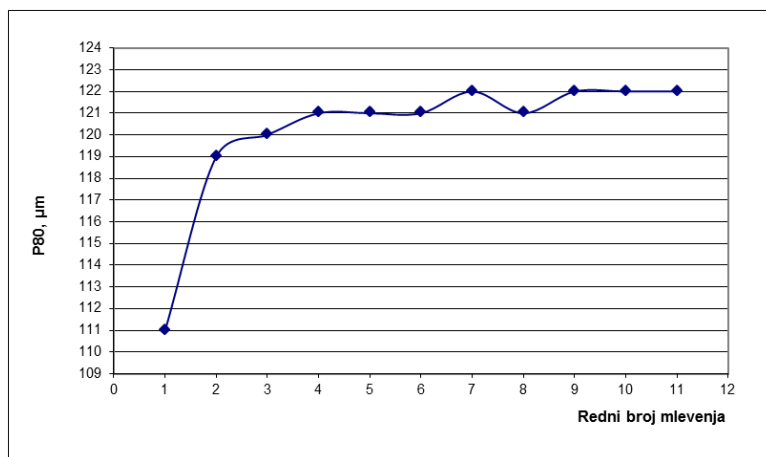
Na slici 67 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1578\mu\text{m}$. Na slici 68 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 69 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50.



Slika 67 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50 pre mlevenja, $F_{80}=1578\mu\text{m}$



Slika 68 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=122\mu\text{m}$



Slika 69 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=119\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=120\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=121\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ ri}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=50:50 iznosile su: $P_{80\ r2}=123,17\mu\text{m}$, $P_{80\ r3}=123,60\mu\text{m}$ i $P_{80\ r4}=123,06\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=13,40\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=12,62\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=12,83\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=13,47\text{kWh/t}$.

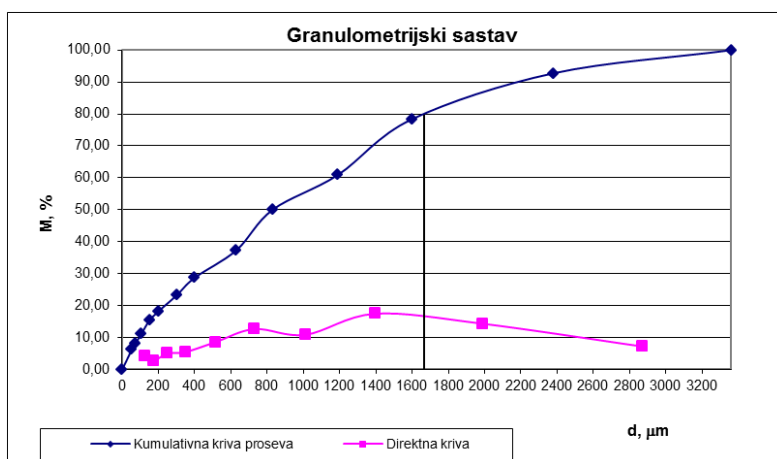
4.2.4. Test meljivosti Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μm

U tabeli 37 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μm . Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1241,9$ g. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $\text{IPM} = 354,8$ g.

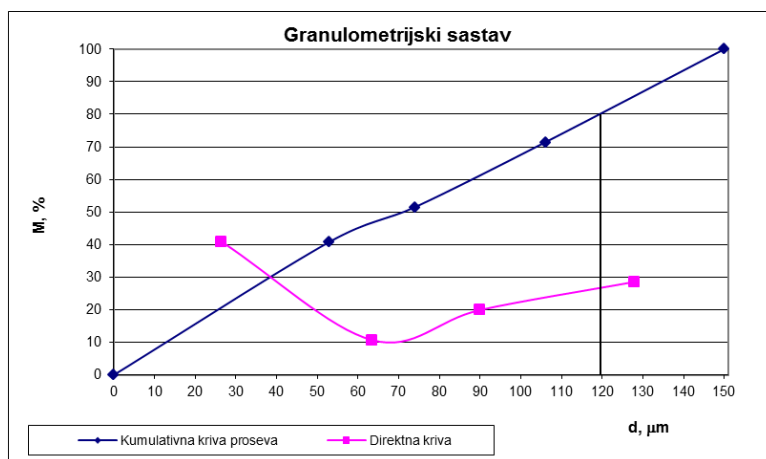
Tabela 37 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na kompozitnom uzorku šljaka:ruda bakra=25:75 sa komparativnim sitom otvora 150 μ m

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	492,4	190,5	301,9	2,01	/	/	/
2	139	335,8	75,5	260,3	1,88	1,84	1,126	2,130
3	162	367,2	51,5	315,7	1,95	1,97	1,075	2,160
4	153	376,1	56,3	319,8	2,09	2,11	0,996	2,190
5	142	350,0	57,7	292,3	2,06	/	/	/
6	146	356,4	53,7	302,7	2,07	/	/	/
7	145	356,3	54,7	301,6	2,08	/	/	/
8	144	359,3	54,7	304,6	2,11	/	/	/
9	142	354,9	55,1	299,8	2,11	/	/	/
10	142	354,9	54,4	300,5	2,11	/	/	/
11	142	354,8	54,4	300,4	2,11	/	/	/

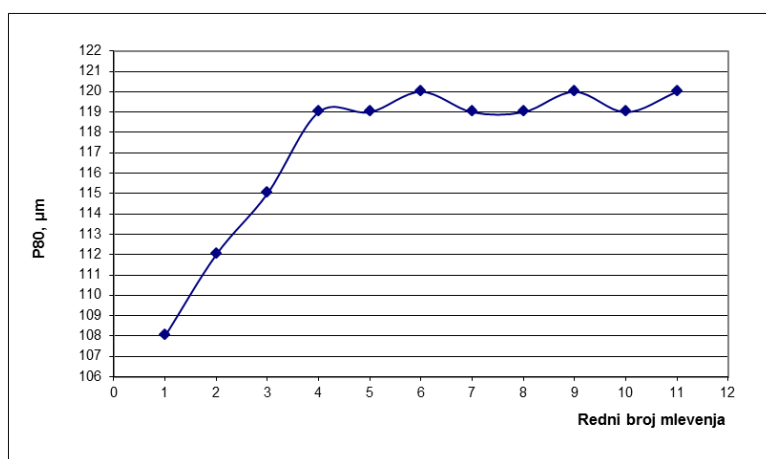
Na slici 70 prikazan je granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75 pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1643\mu\text{m}$. Na slici 71 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 72 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75.



Slika 70 - Granulometrijski sastav kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75 pre mlevenja, $F_{80}=1643\mu\text{m}$



Slika 71 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75 poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=120\mu\text{m}$



Slika 72 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75

Vrednosti parametra P_{80} i [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80\ 2}=112\mu\text{m}$, $P_{80\ 3}=115\mu\text{m}$ i $P_{80\ 4}=119\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80\ r_i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje kompozitnog uzorka šljaka:ruda bakra=25:75 iznosile su: $P_{80\ r_2}=115,92\mu\text{m}$, $P_{80\ r_3}=118,45\mu\text{m}$ i $P_{80\ r_4}=121,02\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=12,58\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom

za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=12,19\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=12,25\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=12,27\text{kWh/t}$.

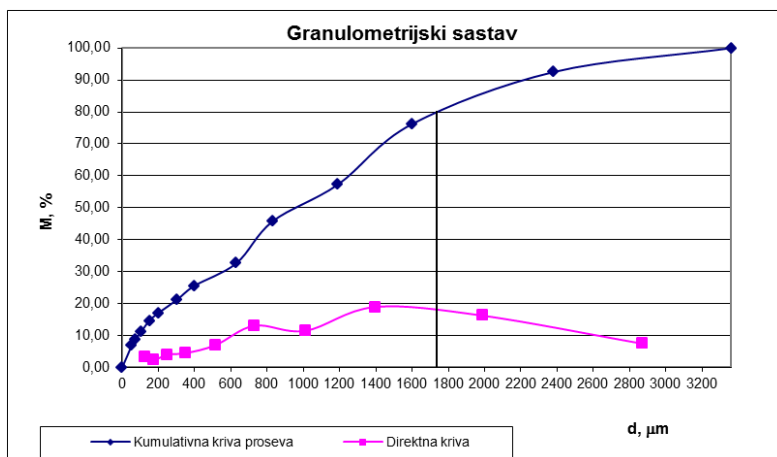
4.2.5. Test meljivosti Bondovim postupkom na uzorku rude bakra sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$

U tabeli 38 prikazani su rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku rude bakra sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$. Vrednost parametra G_{ie} [g/ob] dobijena je korišćenjem formula (33), (36) i (37). Vrednosti konstante g_{ki} korišćene su iz formule (38). Masa 700 cm^3 iznosila $M = 1121,1\text{ g}$. Masa idealnog proizvoda mlevenja iznosila $IPM = 320,3\text{ g}$.

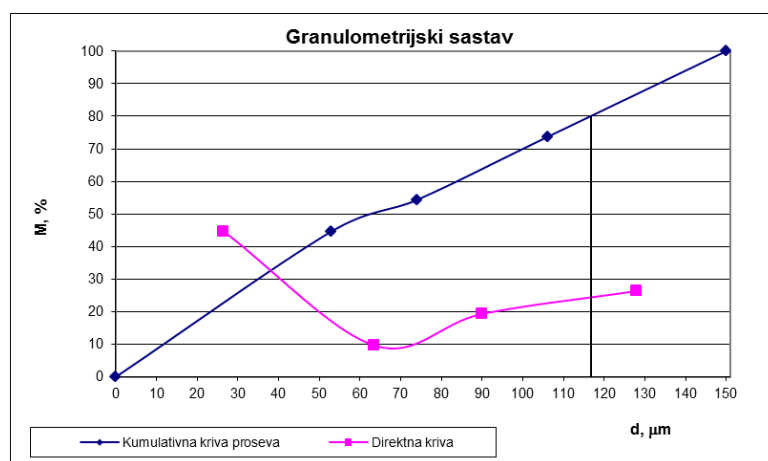
Tabela 38 - Rezultati izvođenja testa meljivosti standardnim Bondovim postupkom na uzorku rude bakra sa komparativnim sitom otvora $150\mu\text{m}$

R.B.	Broj obrtaja	m_p , g	m_{pu} , g	m_{pu} , g	G, g/ob	G_{ie} , g/ob	G_e/G_{ie}	$G_{ie} \cdot g_{ki}$, g/ob
1	150	470,0	164,8	305,2	2,03	/	/	/
2	123	306,8	69,1	237,7	1,92	1,89	1,104	2,190
3	143	317,0	45,1	271,9	1,90	1,90	1,124	2,080
4	144	335,2	46,6	288,6	2,01	2,02	1,054	2,100
5	135	325,4	49,3	276,1	2,04	/	/	/
6	133	327,4	47,8	279,6	2,10	/	/	/
7	130	324,4	48,1	276,3	2,13	/	/	/
8	128	320,8	47,7	273,1	2,13	/	/	/
9	128	320,4	47,2	273,2	2,13	/	/	/
10	128	320,4	47,1	273,3	2,13	/	/	/
11	128	320,3	47,1	273,2	2,13	/	/	/

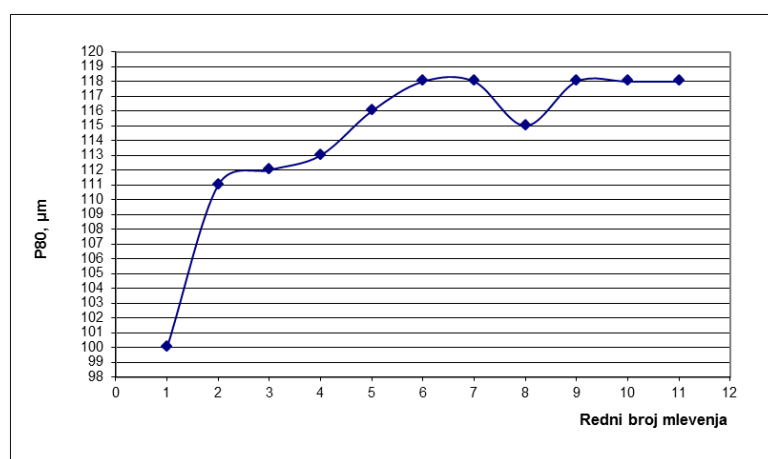
Na slici 58 prikazan je granulometrijski sastav uzorka rude bakra pre mlevenja. Veličina otvora sita kroz koje prolazi 80 % sirovine pre mlevenja je $F_{80}=1736\mu\text{m}$. Na slici 59 prikazan je granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka rude bakra poslednjeg ciklusa mlevenja. Na slici 60 prikazana je promena parametra P_{80} i u različitim ciklusima mlevenja uzorka rude bakra.



Slika 58 - Granulometrijski sastav uzorka rude bakra pre mlevenja, $F_{80}=1736\mu\text{m}$



Slika 59 - Granulometrijski sastav proizvoda mlevenja uzorka rude bakra poslednjeg ciklusa mlevenja, $P_{80}=118\mu\text{m}$



Slika 60 – Promena parametar P_{80} u funkciji rednog broja ciklusa mlevenja uzorka rude bakra

Vrednosti parametra $P_{80 i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosile su: $P_{80 2}=111\mu\text{m}$, $P_{80 3}=112\mu\text{m}$ i $P_{80 4}=113\mu\text{m}$. Vrednosti parametra $P_{80 r i}$ [μm] dobijene su korišćenjem formule (39). Vrednosti konstante p_{ki} korišćene su iz formule (39). Vrednosti parametra $P_{80 r i}$ [μm] za drugo, treće i četvrto mlevenje uzorka rude bakra iznosile su: $P_{80 r2}=114,89\mu\text{m}$, $P_{80 r3}=115,36\mu\text{m}$ i $P_{80 r4}=114,92\mu\text{m}$.

Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih standardnim i skraćenim postupkom izračunate su pomoću formule (18) korišćenjem odgovarajućih parametara. Vrednost Bondovog radnog indeksa dobijenog standardnim postupkom iznosila je $W_i=12,22\text{kWh/t}$. Vrednosti Bondovog radnog indeksa dobijenih skraćenim postupkom za dva, tri i četiri mlevenja iznosile su: $W_{ir2}=11,73\text{kWh/t}$, $W_{ir3}=12,26\text{kWh/t}$ i $W_{ir4}=12,15\text{kWh/t}$.

4.3. Određivanje konstante g_{ki} i konstante p_{ki}

U tabeli 39 prikazane su vrednosti odnosa parametara $\frac{G_e}{G_{ie}}$ i $\frac{P_{80}}{P_{80 i}}$ u drugom, trećem i četvrtom ciklusu mlevenja standardnog Bondovog postupka za određivanje meljivosti na uzorcima andezita i krečnjaka i njihovim kompozitnim uzorcima u različitim masenim odnosima i komparativnim sitima 74, 105 i 150 μm . U opitima na uzorcima sa sadržajem krečnjaka većim od 50% prosejavanje proizvoda mlevenja bilo je dosta loše zbog aglomeracije zrna krečnjaka, pa ovi opiti nisu ušli u razmatranje odnosa vrednosti

$$\frac{P_{80}}{P_{80 i}}$$

Tabela 39 – Kretanje odnosa vrednosti $\frac{G_e}{G_{1e}}$ i $\frac{P_{80}}{P_{80i}}$ u drugom, trećem i četvrtom ciklusu mlevenja standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka

Uzorak	P_k , μm	$\frac{G_e}{G_{1e}}$	$\frac{G_e}{G_{2e}}$	$\frac{G_e}{G_{3e}}$	$\frac{P_{80}}{P_{801}}$	$\frac{P_{80}}{P_{802}}$	$\frac{P_{80}}{P_{803}}$
Andezit : krečnjak = 100 : 0	74	1,135	1,040	1,011	1,055	1,036	1,000
Andezit : krečnjak = 75 : 25	74	1,222	1,080	1,018	1,036	1,036	1,018
Andezit : krečnjak = 50 : 50	74	1,172	1,066	0,998	1,038	1,058	1,034
Andezit : krečnjak = 25 : 75	74	1,187	1,075	1,013	/	/	/
Andezit : krečnjak = 0 : 100	74	1,140	1,103	1,034	/	/	/
Andezit : krečnjak = 100 : 0	105	1,158	1,065	1,021	1,015	1,012	1,000
Andezit : krečnjak = 75 : 25	105	1,168	1,078	1,025	1,049	1,012	1,012
Andezit : krečnjak = 50 : 50	105	1,194	1,126	1,060	1,024	1,002	1,000
Andezit : krečnjak = 25 : 75	105	1,211	1,153	1,064	/	/	/
Andezit : krečnjak = 0 : 100	105	1,178	1,151	1,076	/	/	/
Andezit : krečnjak = 100 : 0	150	1,087	1,067	1,022	1,034	1,025	1,017
Andezit : krečnjak = 75 : 25	150	1,126	1,083	1,044	1,034	1,034	1,008
Andezit : krečnjak = 50 : 50	150	1,102	1,065	1,039	1,025	1,002	1,000
Andezit : krečnjak = 25 : 75	150	1,187	1,097	1,064	/	/	/
Andezit : krečnjak = 0 : 100	150	1,229	1,119	1,047	/	/	/
Najveća vrednost		1,229	1,153	1,076	1,055	1,058	1,034
Najmanja vrednost		1,087	1,040	0,998	1,015	1,002	1,000
Srednja vrednosto najveće i najmanje vrednosti		1,158	1,096	1,037	1,035	1,030	1,017

Odnos parametara $\frac{G_e}{G_{1e}}$ se kretao u rasponu od 1,229 do 1,087. Odnos parametara $\frac{G_e}{G_{2e}}$ se kretao u rasponu od 1,153 do 1,040. Odnos parametara $\frac{G_e}{G_{3e}}$ se kretao u rasponu od 1,076 do 0,998. Za vrednosti konstanti g_{ki} uzete srednje vrednosti najveće i najmanje vrednosti odnosa $\frac{G_e}{G_{1e}}$, pa je $g_{k1}=1,158$, $g_{k2}=1,096$ i $g_{k3}=1,037$.

Odnos parametara $\frac{P_{80}}{P_{801}}$ se kretao u rasponu od 1,055 do 1,015. Odnos parametara $\frac{P_{80}}{P_{802}}$ se kretao u rasponu od 1,058 do 1,002. Odnos parametara $\frac{P_{80}}{P_{803}}$ se kretao u rasponu od 1,034 do 1,000. Za vrednosti konstanti p_{ki} uzete srednje vrednosti najveće i najmanje vrednosti odnosa $\frac{P_{80}}{P_{80i}}$, pa je $p_{k1}=1,035$, $p_{k2}=1,030$ i $p_{k3}=1,017$.

4.4. Računske vrednosti W_i kompozitnih uzoraka prema W_i komponenti mešavine i njihovim masenim udelima

Pregled rezultata dobijenih izvođenjem Bondovih testova meljivosti na uzorcima andezita i krečnjaka i na njihovim kompozitnim uzorcima u različitim masenim

odnosima prikazan je u tabeli 40. Pregled rezultata dobijenih izvođenjem Bondovih testova meljivosti na uzorcima topioničke šljake i rude bakra i na njihovim kompozitnim uzorcima u različitim masenim odnosima prikazan je u tabeli 35. Računske vrednosti Bondovog radnog indeksa su dobijene pomoću formule:

$$W_{i r} = W_{i meko} \cdot r_{meko} + W_{i tvrdo} \cdot r_{tvrdo} \quad (54)$$

gde su:

$W_{i meko}$ – Bondov radni indeks mekše komponente (kWh/t);

r_{meko} – maseni udeo mekše komponente (u delovima jedinice);

$W_{i tvrdo}$ – Bondov radni indeks tvrđe komponente (kWh/t);

r_{tvrdo} – maseni udeo tvrđe komponente (u delovima jedinice).

Tabela 40 - Vrednosti W_i dobijene standardnim Bondovim postupkom i računskim postupkom na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka prema W_i komponenti mešavine i njihovim masenim udelima

Uzorak	Komparativno sito, μm	W_i , kWh/t	W_i računski, kWh/t	Greška, %
Andezit:krečnjak 100 : 0	74	18,09	/	/
	105	16,93	/	/
	150	16,01	/	/
Andezit:krečnjak 75 : 25	74	17,03	17,04	+0,07
	105	16,41	15,89	-3,17
	150	15,13	15,17	+0,23
Andezit:krečnjak 50 : 50	74	15,50	16,00	+3,19
	105	14,60	14,85	+1,71
	150	14,26	14,32	+0,42
Andezit:krečnjak 25 : 75	74	14,51	14,95	+3,02
	105	13,91	13,81	-0,72
	150	13,59	13,48	-0,85
Andezit:krečnjak 0 : 100	74	13,90		/
	105	12,77		/
	150	12,63		/
Srednja greška				1,49

Eksperimentalno dobijeni rezultati prikazani u tabeli 40 ukazuju da maksimalna greška između računskih vrednosti i vrednosti dobijenih standardnim Bondovim postupkom iznosi 3,19%, što se može smatrati da je u opsegu operativne greške za izvođenje Bondovog testa.

Tabela 41 - Vrednosti W_i dobijene standardnim Bondovim postupkom i računskim postupkom na kompozitnim uzorcima topioničke šljake i rude bakra prema W_i komponenti mešavine i njihovim masenim udelima

Uzorak	Komparativno sito, μm	W_i , kWh/t	W_i računski, kWh/t	Greška, %
Šljaka : Ruda Cu 100 : 0	150	15,02	/	/
Šljaka : Ruda Cu 75 : 25	150	13,71	14,32	+4,45
Šljaka : Ruda Cu 50 : 50	150	13,40	13,62	+1,64
Šljaka : Ruda Cu 25 : 75	150	12,58	12,92	+2,70
Šljaka : Ruda Cu 0 : 100	150	12,22	/	/
Srednja greška				1,49

Eksperimentalno dobijeni rezultati prikazani u tabeli 41 ukazuju da maksimalna greška između računskih vrednosti i vrednosti dobijenih standardnim Bondovim postupkom iznosi 4,45%, što se može smatrati da je u opsegu operativne greške za izvođenje Bondovog testa. Takođe, kod sva tri kompozitna uzorka topioničke šljake i rude bakra na komparativnom situ otvora $150\mu\text{m}$ uočava se neznatno manji uztošak energije nego kada se komponente mešavine melju zajedno.

Prema ranijim istraživanjima naučnika opšti zaključak je da se Bondov indeks mešavine ruda ne može predvideti jednostavnim računanjem Bondovih radnih indeksa komponenti i njihovih masenih udela:

- Yan i Eaton (1994) koji su radili eksperimente na uzorcima dve različite rude zlata i njihovim mešavinama sa velikom razlikom u meljivosti $W_i=14$ i $W_i=6$, i utvrdili da nije moguće predvideti računski Bondov indeks mešavine na osnovu W_i komponenti;
- Hosten i Avsar (1998) koji su dobili da W_i mešavina klinkera i vulkanskog tufa u različitim masenim odnosima je veća od W_i trvde komponente;
- Oner (2000) je na uzorcima klinkera i šljake visoke peći, kao i Tavares i Kallembach (2013) na uzorcima krečnjaka, bazalta i rude bakra su utvrdili da W_i mešavine manji od računске srednje vrednosti W_i komponenti prema masenim udelima.

- Ipek i dr. (2005) na uzorcima kvarca, kaolina i feldspata utvrdili su da je W_i mešavine veći od računске srednje vrednosti W_i komponenti prema masenim udelima.

Opiti meljivosti mešavina uzoraka krečnjaka i andezita i mešavina šljake i rude bakra u različitim masenim odnosima, koji predstavljaju osnovni predmet ispitivanja ove doktorske disertacije, pokazali su da je maksimalna razlika između stvarne vrednosti Bondovog radnog indeksa i srednjih vrednosti Bondovog radnog indeksa komponenti mešavine prema masenim udelima, iznosila je 4,45%. Može se reći da energija potrebna za usitnjavanje ovih sirovina kada se melju kao mešavina i kao odvojene komponente je skoro ista, i da je moguće računski dobiti Bondov radni indeks mešavine pomoću formule (54), vrednosti Bondovog radnog indeksa komponenti mešavine i njihovih masenih udela.

4.5. Promena sastava cirkulativne šarže i proizvoda mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka

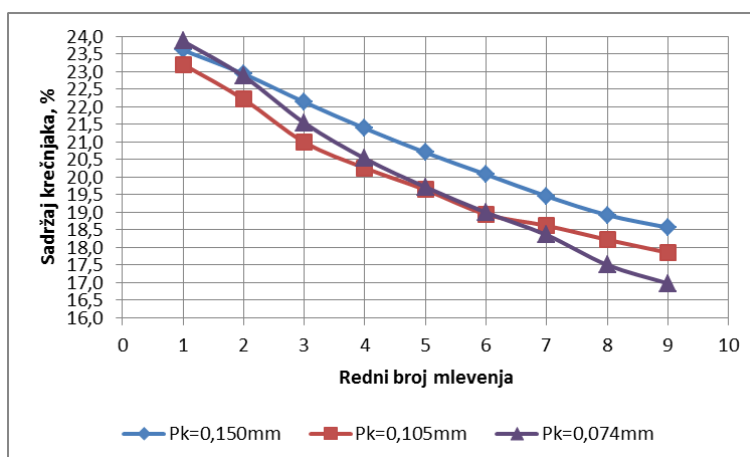
Prilikom izvođenja standardnog Bondovog testa meljivosti sa komparativnim sitima otvora $P_k=74\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$ i $150\mu\text{m}$ na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka u različitim masenim odnosima korišćeni su uzorci proseva komparativnog sita prvih devet ciklusa mlevenja. Na ovim uzorcima određivana je rastvorljivost u HCl. Na osnovu podataka o rastvorljivosti uzoraka proseva komparativnog sita izračunat je sadržaj krečnjaka i andezita u proizvodu mlevenja i cirkulativnoj šarži.

U tabeli 42 je prikazana promena sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti sa komparativnim sitima otvora $P_k=74\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$ i $150\mu\text{m}$ za prvih devet ciklusa mlevenja na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka u različitim masenim odnosima.

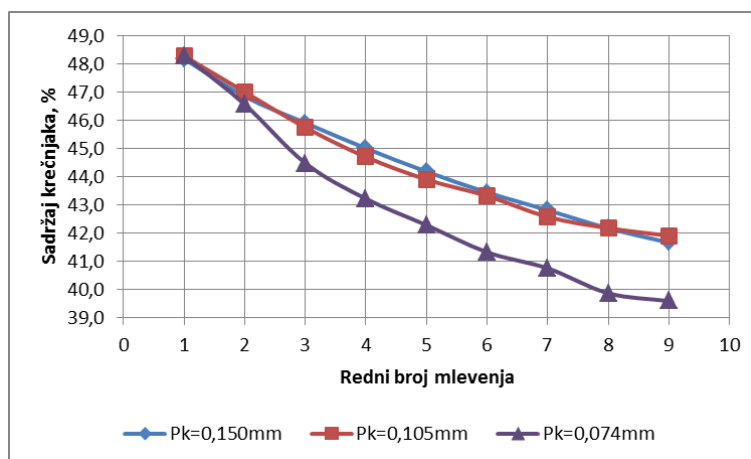
Tabela 42 – Promena sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti

Redni broj mlev.	Sadržaj krečnjaka, %								
	Andezit:krečnjak=75:25			Andezit:krečnjak=50:50			Andezit:krečnjak=25:75		
	P _k =74μm	P _k =105μm	P _k =150μm	P _k =74μm	P _k =105μm	P _k =150μm	P _k =74μm	P _k =105μm	P _k =150μm
1	23,86	23,20	23,60	48,28	48,27	48,16	74,12	74,21	74,29
2	22,86	22,21	22,93	46,55	47,00	46,83	73,18	73,62	73,68
3	21,54	20,99	22,13	44,47	45,74	45,90	71,92	72,69	72,97
4	20,53	20,26	21,38	43,21	44,69	45,00	71,00	71,88	72,47
5	19,72	19,64	20,70	42,28	43,89	44,17	70,26	71,18	71,98
6	19,00	18,94	20,08	41,32	43,31	43,44	69,67	70,56	71,56
7	18,36	18,62	19,46	40,75	42,57	42,81	68,89	69,98	71,27
8	17,51	18,22	18,92	39,86	42,17	42,16	68,26	69,51	70,96
9	16,98	17,86	18,57	39,59	41,90	41,66	67,68	69,12	70,76

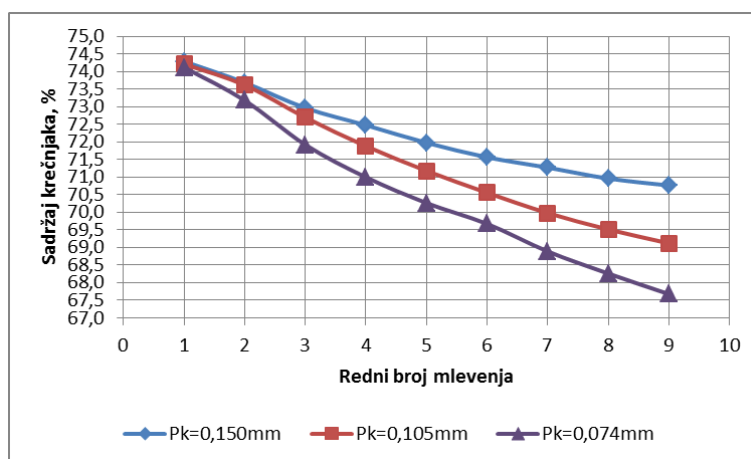
Na slikama 61, 62 i 63 su prikazani podaci o promeni sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti sa komparativnim sitima otvora P_k=74μm, 105μm i 150μm za prvih devet ciklusa mlevenja na kompozitnim uzorcima andezita:krečnjaka=75:25, andezita:krečnjaka=50:50 i andezita:krečnjaka=25:75.



Slika 61 – Promena sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=75:25



Slika 62 – Promena sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=50:50



Slika 63 – Promena sadržaja krečnjaka u cirkulativnoj šarži tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=25:75

Na slikama 61, 62 i 63 se može videti da prilikom izvođenja svih Bondovih testova na uzorcima sa različitim masenim udelima komponenti mešavine i sa različitim komparativim sitima u cirkulativnoj šarži mlina sa porastom broja ciklusa mlevenja sadržaj tvrde komponente (andezita) polako raste.

U početnim ciklusima mlevenja mekša komponenta (krečnjak) pošto se lakše usitnjava brže postiže željenu krupnoću i prelazi u proizvod mlevenja u većem masenom udelu od tvrde komponente (andezita) u odnosu na njihov polazni maseni odnos. Sa porastom broja ciklusa mlevenja u cirkulativnoj šarži mlina, gomila se tvrda komponenta (andezit), zato što joj se sporije smanjuje krupnoća. Prilikom postizanja stabilnog stanja se formira takva kružna šarža mlina u kojoj imamo smanjen sadržaj mekše komponente sa većim srednjim prečnikom i povećan sadržaj tvrde komponente sa manjim srednjim prečnikom

(Feurstenau i Venkataraman, 1988; Kapur i Feurstenau, 1989; Yan i Eaton, 1994; Hosten i Avsar, 1998; Oner, 2000; Tavares i Kallembach, 2013).

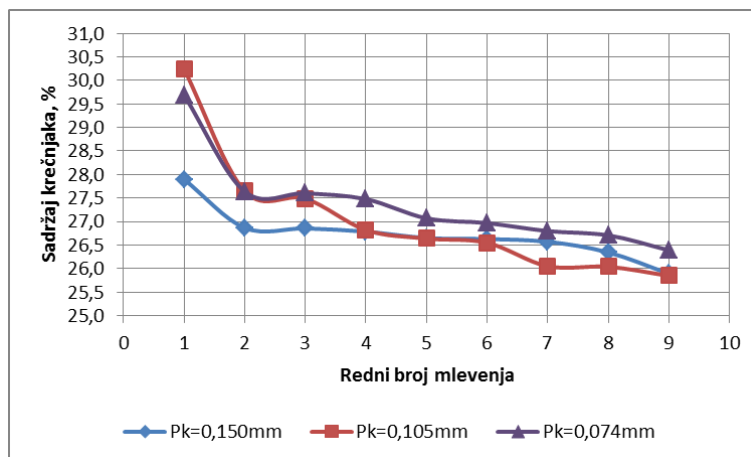
U tabeli 42 i na slikama 61, 62 i 63 se može videti da se promena sastava cirkulativne šarže za isti kompozitni uzorak pri različitim komparativnim sitima odvija na isti ili sličan način.

U tabeli 43 je prikazana promena sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti sa komparativnim sitima otvora $P_k=74\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$ i $150\mu\text{m}$ za prvih devet ciklusa mlevenja na dvokomponentnim kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka u različitim masenim odnosima.

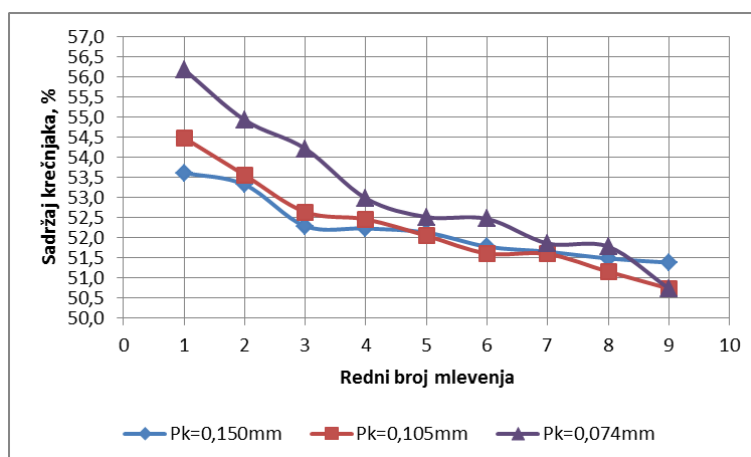
Tabela 43 – Promena sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti

Redni broj mlev.	Sadržaj krečnjaka, %								
	Andezit:krečnjak=75:25			Andezit:krečnjak=50:50			Andezit:krečnjak=25:75		
	$P_k=74\mu\text{m}$	$P_k=105\mu\text{m}$	$P_k=150\mu\text{m}$	$P_k=74\mu\text{m}$	$P_k=105\mu\text{m}$	$P_k=150\mu\text{m}$	$P_k=74\mu\text{m}$	$P_k=105\mu\text{m}$	$P_k=150\mu\text{m}$
1	29,68	30,24	27,90	56,18	54,48	53,61	78,01	77,45	76,72
2	27,64	27,65	26,87	54,92	53,55	53,31	77,66	77,00	76,69
3	27,60	27,49	26,85	54,21	52,63	52,28	77,57	76,93	76,53
4	27,48	26,82	26,79	52,97	52,45	52,22	77,21	76,84	76,23
5	27,07	26,64	26,65	52,51	52,04	52,12	76,83	76,71	76,18
6	26,97	26,55	26,63	52,46	51,60	51,77	76,78	76,58	75,98
7	26,80	26,05	26,57	51,85	51,59	51,65	76,72	76,50	75,85
8	26,71	26,04	26,34	51,77	51,15	51,48	76,66	76,18	75,81
9	26,39	25,85	25,89	50,73	50,73	51,38	76,46	75,99	75,47

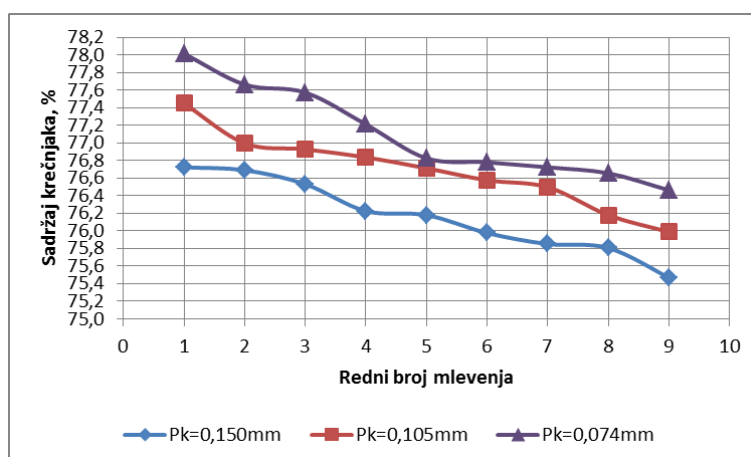
Na slikama 64, 65 i 66 su prikazani podaci o promeni sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti sa komparativnim sitima otvora $P_k=74\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$ i $150\mu\text{m}$ za prvih devet ciklusa mlevenja na kompozitnim uzorcima andezita:krečnjaka=75:25, andezita:krečnjaka=50:50 i andezita:krečnjaka=25:75.



Slika 64 – Promena sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=75:25



Slika 65 – Promena sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=50:50



Slika 66 – Promena sadržaja krečnjaka u proizvodu mlevenja tokom izvođenja Bondovog testa meljivosti na kompozitnim uzorcima andezit:krečnjak=25:75

Na slikama 64, 65 i 66 se može videti da prilikom izvođenja svih Bondovih testova na uzorcima sa različitim masenim udelima komponenti mešavine i sa različitim

komparativim sitima u početnim ciklusima mlevenja u proizvodu mlevenja je povećan sadržaj mekše komponente (krečnjak). Sa porastom broja ciklusa mlevenja sadržaj mekše komponente (krečnjak) u proizvodu mlevenja polako opada. Prilikom postizanja stabilnog stanja (kružne šarže od 250%) sadržaj mekše komponente u proizvodu mlevenja se izjednačava po sastavu sa ulazom u proces mlevenja.

Na tabeli 43 i na slikama 64, 65 i 66 se može videti da se promena sastava proizvoda mlevenja za isti kompozitni uzorak pri različitim komparativnim sitima odvija na isti ili sličan način.

4.6. Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti

4.6.1. Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na kompozitnim uzorcima andezita i krečnjaka

U tabelama 44, 45 i 46 su prikazani uporedni rezultati, dobijeni standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja, parametara G i P_{80} i Bondovog radnog indeksa W_i .

Tabela 44 – Poređenje parametra G dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	G_e , g/ob	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			G_{r2} , g/ob	Greška, %	G_{r3} , g/ob	Greška, %	G_{r4} , g/ob	Greška, %
Andezit:krečnjak 100 : 0	74	0,920	0,943	+2,17	0,963	+4,35	0,944	+2,57
	105	1,190	1,223	0,00	1,261	+3,28	1,234	+1,15
	150	1,540	1,645	+7,14	1,580	+2,60	1,556	+1,01
Andezit:krečnjak 75 : 25	74	0,980	0,935	-5,10	0,997	+2,04	0,996	+1,58
	105	1,270	1,259	-0,79	1,289	+1,57	1,276	+0,43
	150	1,660	1,697	+2,14	1,678	+1,20	1,649	-0,67
Andezit:krečnjak 50 : 50	74	1,070	1,061	-0,93	1,102	+2,80	1,110	+3,70
	105	1,480	1,436	-2,70	1,442	-2,70	1,441	-2,61
	150	1,810	1,893	+4,42	1,864	+2,76	1,804	-0,31
Andezit:krečnjak 25 : 75	74	1,230	1,209	-1,63	1,262	+2,44	1,265	+2,86
	105	1,600	1,538	-3,75	1,529	-4,38	1,556	-2,78
	150	1,960	1,908	-2,55	1,958	0,00	1,898	-3,18
Andezit:krečnjak 0 : 100	74	1,340	1,369	+2,44	1,339	0,00	1,348	+0,60
	105	1,810	1,785	-1,66	1,733	-4,42	1,742	-3,75
	150	2,160	2,029	-6,02	2,112	-2,31	2,126	-1,58
Najveća greška			7,14		4,42		3,75	
Sred. vrednost greške			2,90		2,46		1,92	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 7,14%, a srednja vrednost greške je 2,90%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 4,42%, a srednja vrednost greške je 2,46%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 3,75%, a srednja vrednost greške je 1,92%.

Tabela 45 – Poređenje parametra P_{80} dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	P_{80} , μm	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			$P_{80\ r2}$, μm	Greška, %	$P_{80\ r3}$, μm	Greška, %	$P_{80\ r2}$, μm	Greška, %
Andezit:krečnjak 100 : 0	74	58	56,93	-1,84	57,68	-0,55	58,99	+1,71
	105	86	87,98	+2,30	87,55	+1,80	87,46	+1,70
	150	121	121,10	+0,08	121,54	+0,45	121,02	+0,02
Andezit:krečnjak 75 : 25	74	57	56,93	-0,12	56,65	-0,61	56,95	-0,09
	105	86	84,87	-1,31	87,55	+1,80	86,45	+0,52
	150	121	121,10	+0,08	120,51	-0,40	122,04	+0,86
Andezit:krečnjak 50 : 50	74	55	54,86	-0,25	53,56	-2,62	54,92	-0,15
	105	87	87,98	+1,13	90,64	+4,18	88,48	+1,70
	150	122	123,17	+0,96	125,66	+3,00	124,07	+1,70
Andezit:krečnjak 25 : 75	74	59	56,93	-3,51	56,65	-3,98	57,97	-1,75
	105	89	87,98	-1,15	90,64	+1,84	90,51	+1,70
	150	124	122,13	-1,51	123,60	-0,32	124,07	+0,06
Andezit:krečnjak 0 : 100	74	62	68,31	+10,18	71,07	+14,63	67,12	+8,26
	105	91	94,19	+3,51	90,64	-0,40	88,48	-2,77
	150	124	116,96	-5,68	120,51	-2,81	123,06	-0,76
Najveća greška			10,18		14,63		8,26	
Sred. vrednost greške			2,24		2,63		1,58	
Najveća gr. za prva 3 uzorka			2,30		4,18		1,71	
Sr.vred. gr. za prva 3 uzorka			0,41		1,33		0,55	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 10,18%, a srednja vrednost greške je 2,24%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 14,63%, a srednja vrednost greške je 2,63%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 8,26%, a srednja vrednost greške je 1,58%.

U uzorcima gde je sadržaj krečnjaka veći od 50% prilikom određivanja granulometrijskog sastava proseva komparativnog sita prosejavanjem na ručnim sitima, dolazilo je do pojave aglomeracije zrna krečnjaka. Zbog toga su dobijeni nerealni rezultati za parametar P_{80} , tako da su i dobijene greške kod ovih uzoraka dosta veće.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka ne prelazi 50% kod parametra P_{80} najveća dobijena greška je 2,30%, a srednja vrednost greške je 0,41%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka ne prelazi 50% kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 4,18%, a srednja vrednost greške je 1,33%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka ne prelazi 50% kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 1,71%, a srednja vrednost greške je 0,55%.

Tabela 46 – Poređenje Bondovog radnog indeksa W_i dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	W_i , kWh/t	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			W_{ir2} , kWh/t	Greška, %	W_{ir3} , kWh/t	Greška, %	W_{ir2} , kWh/t	Greška, %
Andezit:krečnjak 100 : 0	74	18,09	17,53	-3,09	17,37	-3,98	17,90	-1,05
	105	16,93	17,15	+1,26	16,68	-1,53	16,96	+0,14
	150	16,01	15,17	-5,24	15,72	-1,76	15,88	-0,81
Andezit:krečnjak 75 : 25	74	17,03	17,69	+3,87	16,73	-1,75	16,80	-1,33
	105	16,41	16,38	-0,15	16,39	-0,09	16,40	-0,02
	150	15,13	14,87	-1,74	14,96	-1,14	15,30	+1,14
Andezit:krečnjak 50 : 50	74	15,50	15,58	+0,51	14,89	-3,93	15,03	-3,02
	105	14,60	15,07	+3,23	15,31	+4,88	15,08	+3,30
	150	14,26	13,83	-3,00	14,20	-0,39	14,46	+1,41
Andezit:krečnjak 25 : 75	74	14,51	14,39	-0,82	13,86	-4,48	14,03	-3,34
	105	13,91	14,27	+2,55	14,61	+5,00	14,40	+3,46
	150	13,59	13,75	+1,18	13,57	-0,15	13,96	+2,73
Andezit:krečnjak 0 : 100	74	13,90	14,50	+4,32	15,14	+8,93	14,53	+4,52
	105	12,77	13,21	+3,45	13,20	+3,37	12,94	+1,32
	150	12,63	12,77	+1,12	12,62	-0,13	12,73	+0,78
Najveća greška			5,24		8,93		4,52	
Sred. vrednost greške			2,37		2,77		1,89	
Najveća gr. za prva 3uzorka			5,24		4,88		3,30	
Sr.vred. gr. za prva 3 uzorka			0,96		1,16		0,99	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 5,24%, a srednja vrednost greške je 2,37%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 8,93%, a srednja vrednost greške je 2,77%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 4,52%, a srednja vrednost greške je 1,89%.

Veće greške vrednosti parametra P_{80} kod uzoraka sa većim sadržajem krečnjaka su uticale i na veće greške vrednosti Bondovog radnog indeksa W_i .

Najrealniju sliku pouzdanosti skraćenog postupka daje uporedni prikaz parametra G koji je prikazan u tabeli 38 i vrednosti Bondovog radnog indeksa za uzorke gde krečnjak ne prelazi 50% u tabeli 40.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka nije prelazio 50%, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 5,24%, a srednja vrednost greške je 0,96%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka nije prelazio 50%, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 4,88%, a srednja vrednost greške je 1,16%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka nije prelazio 50%, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 3,30%, a srednja vrednost greške je 0,99%.

4.6.2. *Uporedni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na kompozitnim uzorcima šljake i rude bakra*

U tabelama 47, 48 i 49 su prikazani uporedni rezultati, dobijeni standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja, parametara G i P_{80} i Bondovog radnog indeksa W_i .

Tabela 47 – Poređenje parametra G dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	G_e , g/ob	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			G_{r2} , g/ob	Greška, %	G_{r3} , g/ob	Greška, %	G_{r4} , g/ob	Greška, %
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	1,85	2,00	+8,11	1,92	+3,78	1,89	+2,16
Šljaka:ruda Cu 75 : 25	150	1,97	2,11	+7,11	2,03	+3,05	1,97	0,00
Šljaka:ruda Cu 50 : 50	150	2,00	2,17	+8,50	2,13	+6,50	2,00	0,00
Šljaka:ruda Cu 25 : 75	150	2,11	2,13	+0,95	2,16	+2,37	2,19	+3,79
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	2,13	2,19	+2,82	2,08	-2,35	2,10	-1,41
Najveća greška			8,50		6,50		3,79	
Sred. vrednost greške			5,50		3,61		1,47	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 8,50%, a srednja vrednost greške je 5,50%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 6,50%, a srednja vrednost greške je 3,61%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra G najveća dobijena vrednost greške je 3,79%, a srednja vrednost greške je 1,47%.

Tabela 48 – Poređenje parametra P_{80} dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	P_{80} , μm	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			$P_{80\ r2}$, μm	Greška, %	$P_{80\ r3}$, μm	Greška, %	$P_{80\ r2}$, μm	Greška, %
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	127	126,27	-0,57	126,69	0,00	129,16	+1,70
Šljaka:ruda Cu 75 : 25	150	122	125	+2,65	126	+3,00	124	+1,70
Šljaka:ruda Cu 50 : 50	150	122	123	+0,95	124	+1,31	123	+0,87
Šljaka:ruda Cu 25 : 75	150	120	116	-3,40	118	-1,29	121	+0,85
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	118	115	-2,60	115	-2,60	115	-2,60
Najveća greška			3,40		3,00		2,60	
Sred. vrednost greške			2,03		1,64		1,54	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 3,40%, a srednja vrednost greške je 2,03%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 3,00%, a srednja vrednost greške je 1,64%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra kod parametra P_{80} najveća dobijena vrednost greške je 2,60%, a srednja vrednost greške je 1,54%.

Tabela 49 – Poređenje Bondovog radnog indeksa W_i dobijenog standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri ciklusa mlevenja

Uzorak	Sito, μm	W_i , kWh/t	2. Mlevenje		3. Mlevenje		4. Mlevenje	
			W_{ir2} , kWh/t	Greška, %	W_{ir3} , kWh/t	Greška, %	W_{ir4} , kWh/t	Greška, %
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	15,02	14,01	-6,73	14,55	-3,14	14,95	-0,50
Šljaka:ruda Cu 75 : 25	150	13,71	13,17	-3,93	13,63	-0,58	13,89	+1,34
Šljaka:ruda Cu 50 : 50	150	13,40	12,62	-5,81	12,83	-4,27	13,47	+0,50
Šljaka:ruda Cu 25 : 75	150	12,58	12,19	-3,15	12,25	-2,63	12,27	-2,51
Šljaka:ruda Cu 100 : 0	150	12,22	11,73	-3,99	12,26	+0,34	12,15	-0,56
Najveća greška			6,73		4,27		2,51	
Sred. vrednost greške			4,72		2,19		1,08	

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa dva mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 6,73%, a srednja vrednost greške je 4,72%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa tri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 4,27%, a srednja vrednost greške je 2,19%.

Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa četiri mlevenja i standardnog Bondovog postupka na uzorcima topioničke šljake i rude bakra, najveća greška vrednosti Bondovog radnog indeksa je 2,51%, a srednja vrednost greške je 1,08%.

4.6.3. Objedinjeni rezultati dobijeni standardnim Bondovim i skraćenim postupkom za određivanje meljivosti na uzorcima andezita, krečnjaka, šljake i rude bakra

Analizom izvedenih opita standardnim Bondovim postupkom i skraćenim postupkom na uzorcima andezita i krečnjaka gde sadržaj krečnjaka ne prelazi 50% i uzorcima topioničke šljake i rude bakra došlo se do sledećih konstatacija:

- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **dva mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra G** najveća dobijena vrednost greške je 8,50%,

- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **tri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra G** najveća dobijena vrednost greške je 6,50%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **četiri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra G** najveća dobijena vrednost greške je 3,79%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **dva mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra P₈₀** najveća dobijena vrednost greške je 3,40%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **tri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra P₈₀** najveća dobijena vrednost greške je 4,18%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **četiri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka kod **parametra P₈₀** najveća dobijena vrednost greške je 2,60%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **dva mlevenja** i standardnog Bondovog postupka najveća greška vrednosti **Bondovog radnog indeksa** iznosi 6,73%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **tri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka najveća greška vrednosti **Bondovog radnog indeksa** iznosi 4,88%,
- Prilikom izvođenja skraćenog postupka sa **četiri mlevenja** i standardnog Bondovog postupka najveća greška vrednosti **Bondovog radnog indeksa** iznosi 3,30%.

Rezultati koje su postigli istraživači pomoću skraćenih postupaka koje su predložili u odnosu na standardni Bondov postupak: Berry i Bruce (1966) srednja kvadratna relativna greška iznosi oko 8%; Smith i Lee (1968) maksimalna greška iznosi 15%; Kapur (1970) srednja kvadratna relativna greška iznosi oko 9,7%; Horst i Bassarear (1977) srednja relativna greška iznosi oko 1,72%; Karra (1981) srednja kvadratna relativna greška iznosi oko 4,8%; Postupak Anakonda (Mular i Jergensen, 1982) srednja

relativna kvadratna greška iznosi 4,09%; Magdalinovic(1989) srednja kvadratna relativna greška iznosi oko 4,9%, Lewis i ostali (1990) maksimalna greška ne prelazi 6,2%, Magdalinovic (2003) maksimalna greška ne prelazi 3,5%; Aksani i Sonmez (2000) maksimalna greška iznosi 4,01%; Gharehgheshlagh (2015) maksimalna greška iznosi 2,59%. Poredeći rezultate koje su postigli istraživači ranijih godina i rezultate dobijene ovim postupkom, maksimalna greška sa dva ciklusa mlevenja iznosi 6,73%, maksimalna greška sa tri ciklusa mlevenja iznosi 4,88% i maksimalna greška sa četiri ciklusa mlevenja iznosi 3,30%, može se reći da su zadovoljavajući.

Prednost ovog postupka za određivanje približne vrednosti Bondovog radnog indeksa je u tome što je dao dobre rezultate i na nehomogenim kompozitnim materijalima koji su bili predmet ispitivanja ove doktorske disertacije. Druga prednost ovog postupka ogleda se u tome što se izvodi potpuno isto kao prva dva, tri ili četiri mlevenja standardnog Bondovog testa, tako da nije potrebna specijalna obuka osoblja koje izvodi eksperiment, a razlikuje se samo u računskom delu procedure.

5. ZAKLJUČAK

Nakon ispitivanja koja su vršena u ovoj doktorsoj disertaciji na uzorcima andezita, krečnjaka, topioničke šljake i rude bakra i na njihovim dvokomponentnim kompozitnim uzorcima sa različitim masenim udelima, analize i diskusije rezultata, može se zaključiti sledeće:

- Nema velike razlike u pogledu utroška energije da li se kompozitni uzorci andezita i krečnjaka i kompozitni uzorci topioničke šljake i rude bakra melju odvojeno ili zajedno.
- U početnim ciklusima mlevenja mekša komponenta, pošto se lakše usitnjava, brže postiže željenu krupnoću i prelazi u proizvod mlevenja u većem masenom udelu od tvrde komponente u odnosu na njihov polazni maseni odnos. Sa porastom broja ciklusa mlevenja u cirkulativnoj šarži mlina gomila se tvrđa komponenta, zato što joj se sporije smanjuje krupnoća. Prilikom postizanja stabilnog stanja se formira takva kružna šarža u mlinu u kojoj je smanjen sadržaj mekše komponente sa većim srednjim prečnikom i povećan sadržaj tvrde komponente sa manjim srednjim prečnikom.
- Mlevenje u Bondovom laboratorijskom mlinu sa kuglama se odvija prema kinetici prvog reda. Ova činjenica omogućava da se za svaki ciklus mlevenja standardnog Bondovog testa izračuna konstanta k (brzina mlevenja sirovine) i pomoću k odredi parametar G (g/ob) u slučaju da se melju količine materijala kao kada je postignut ekvilibrijum, mirno stanje (kružna šarža 250%). Ovako dobijene vrednosti G i stvarna vrednost G_e poslednjeg mlevenja kod standardnog Bondovog postupka imaju približno isti odnos za različite sirovine. Konstanta g_{ki} predstavlja vrednost odnosa $\frac{G_e}{G_{ie}}$, i za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosi: $g_{k1}=1,158$, $g_{k2}=1,096$ i $g_{k3}=1,037$.
- Parametar P_{80} proseva komparativnog sita za različite cikluse mlevenja kod svih sirovina se menja po tačno određenom pravilu. Konstanta p_{ki} predstavlja vrednost odnosa $\frac{P_{80}}{P_{80i}}$, i za drugo, treće i četvrto mlevenje iznosi: $p_{k1}=1,035$, $p_{k2}=1,030$ i $p_{k3}=1,017$.

- Konstante g_{ki} i p_{ki} omogućavaju da se procene parametri G i P_{80} , i pomoću ovako procenjenih vrednosti da se izračuna vednost Bondovog radnog indeksa W_i .
- Pouzdanost skraćenog postupka za određivanje Bondovog radnog indeksa raste sa brojem izvedenih ciklusa mlevenja.
- Najveće greške Bondovog radnog indeksa dobijene skraćenim postupkom sa dva, tri i četiri mlevenja iznosile: 6,73%, 4,88% i 3,30%.

LITERATURA

- AHMADI R., HASHEMZADEHFINI M., PARIAN M.A., 2013, Rapid determination of Bond rod-mill work index by modeling the grinding kinetics, *Advanced Powder Technology*, 24, pp. 441-445
- AHMADI R., SHAHSAVARI SH., 2009, Procedure for determination of ball Bond work index in the commercial operations, *Minerals Engineering*, 22, 104-106.
- AKSANI B., SONMEZ B., 2000, Technical note – Simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model, *Mineral Engineering*, vol.13, no.6, pp.673-677
- AUSTIN L.G., 1973, A Commentary on the Kick, Bond and Rittinger Laws of Grinding, *Powder Technology*, 7, pp. 315-317
- AUSTIN L.G., BAGGA P. NAD CELIK M., 1981, Breake Properties of some Materials in Laboratory Ball Mill, *Powder Technology*, 28, 235-241.
- BERRY T.F., BRUCE R.W., 1966, A simple method of determining the grindability of ores., *Can. Min. J.* 87, 63-65.
- BOND F.C., 1949, Standard grindability test tabulated, *Trans Am. Inst. Min. Eng.*, 183, 313.
- BOND F.C., 1952, The third theory of comminution, *Trans Am. Inst. Min. Eng.*, 193, 484-494.
- BOND F.C., 1961. Crushing and grinding calculation part I and II. *British Chemical Engineering* 6 (6 and 8),378-385 & 543-548.
- CHU-WEN G., LU D., 2007, Energy Consumption in Comminution of Mica with Cavitation Abrasive Water Jet, *Journal of China University of Mining & Technology*, vol.17, no.2, pp.0251-0254
- DENIZ V., OZDAG H., 2003, A new approach to Bond grindability and work index: dynamic elastic parameters, *Mineral Engineering*, vol.16, no.3, pp.211-217
- FUERSTENAU D.W., ABOUZEID A.-Z.M., 2002, The energy efficiency of ball milling in comminution, *Int. J. Miner. Process.*, 67, pp.161-185
- FUERSTENAU D.W., VENKATARAMAN D.W., 1988, The comminution of Multicomponent Feeds under Batch and Locked-Cycle Condition: Kinetics, Simulation and Energy Distribution, *International Journal of Mineral Processing* 22, 105-118.
- GAY S.L., 2004, A liberation model for comminution based on probability theory, *Minerals Engineering*, 17, pp. 525-534
- GHAREHGESHLAGH H.H., 2015, Kinetic grinding test approach to estimate the ball mill work index, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 52(1),342-352.
- HORST W.E., BASSAREAR J.H., 1977, Use of simplified ore grindability technique to evaluate plant performance, *Trans. Soc. Min. Eng. (AIME)* 260, 348-351.
- HOSTEN C., AVSAR C., 1998, Grindability of mixtures of cement clinker and trass, *Cement and Concrete Research*, vol.28, no.11, 1519-1524.
- INGLIS C.E., 1913, Stresses in a plate due to presence of cracks and sharp comers, *Proc.Inst.Nav.Arch.*
- IPEK H., UCBAS Y., HOSTEN C., 2005, The bond work index of mixtures of ceramic raw materials, *Minerals Engineering* 18, 981-983.
- KAPUR P.C., 1970, Analysis of the Bond grindability test, *Trans. Inst. Min. Metal L*, 79, 103.

- KAPUR P.C., FUERSTENAU D.W., 1989, Simulation of Locked-Cycle Grinding Tests Using Multicomponent Feeds, *Powder Technology* 58, 39-48.
- KARRA V.K., 1981, Simulation of the Bond Grindability test, *CIM Bulletin*, Vol. 74(827), 195.
- KING R.P., 1993, Comminution and liberation of minerals, *Minerals Engineering*, vol.7, nos.2/3, pp. 129-140
- LEŠIĆ Đ., MARKOVIĆ S., 1968, Priprema mineralnih sirovina, Građevinska knjiga, Beograd
- LEWIS K.A., PEARL M., TUCKER P., 1990, Computer Simulation of the Bond Grindability test, *Mineral Engineering*, Vol.3, 199.
- LIU X., ZHANG M., HU N., YANG H., LU J., 2016, Calculation model of coal comminution energy consumption, *Minerals Engineering*, 92, pp.21-27
- MAGDALINOVIĆ N., 1985, Usitnjavanje i klasiranje mineralnih sirovina - praktikum, Tehnički fakultet, Bor
- MAGDALINOVIĆ N., 1989. A procedure for rapid determination of the Bond work index. *International Journal of Mineral Processing* 27 (1-2), 125-132
- MAGDALINOVIĆ N., 1991, Usitnjavanje i klasiranje mineralnih sirovina, Naučna knjiga, Beograd
- MAGDALINOVIĆ N., 1997, Meljivost mineralnih sirovina, Tehnički fakultet, Bor
- MAGDALINOVIĆ N., 2003, Abbreviated test for quick determination of Bond's Work index, *J. Min. And Metall.* 39, 1-4.
- MAGDALINOVIĆ N., TRUMIĆ M., TRUMIĆ G., MAGDALINOVIĆ S., TRUMIĆ M., 2012, Determination of the Bond work index on samples of non-standard size, *Int. J. Miner. Process.*, 114-117, pp.48-50
- MAN Y.T., 2002, Why is the Bond Ball Mill Grindability Test done the way it is done?, *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, vol.2, no.1, pp. 34-39
- MARTINS S., 2016, Size - energy relationship in comminution, incorporating scaling laws and heat, *International Journal of Mineral Processing*, 153, pp.29-43
- MAXSON W.L., CADENA F. AND BOND F.C., 1933, Grindability of Various Ores. *Transactions American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, Vol. 112, P. 130.
- MOSHER J.B., TAGUE C.B., 2001, Conduct and precision of Bond grindability testing, *Mineral Engineering*, vol.14, no.10, pp. 1187-1197
- MUCSI G., MOLNAR Z., GEBER R., FERENCZI T., MCGUINNESS L., CSOKE B., 2016, Bauxite grindability at elevated temperature in various mills, *International Journal of Mineral Processing*, 153, pp.8-16
- MUDZE T., 2016, Modelling the stress behaviour in particle bed comminution, *International Journal of Mineral Processing*, article in press
- MULAR A.L. AND JERGENSEN G.V., II editors, 1982, Design and installation of comminution circuits, pp. 176-203.
- MWANGA A., LAMBERG P., ROSENKRANZ J., 2015, Comminution test method using small drill core samples, *Minerals Engineering*, 72, pp. 129-139
- ONER M., 2000, A study of intergrinding and separate grinding of blast furnace slag cement, *Cement and Concrete Research* 30, 473-480.
- POWELL M.S., MORRISON R.D., 2006, The future of comminution modeling, *Int. J. Miner. Process.*, 84, pp. 228-239

- RADZISZEWSKI P., 2013, Energy recovery potential in comminution processes, Minerals Engineering, 46-47, pp.83-88
- SADRAI S., MECH J.A., TROMANS D., SASSANI F., Energy efficient comminution under high velocity impact fragmentation, Minerals Engineering, 24, pp. 1053-1061
- SMITH R.W., LEE K.H., 1968, A Comparison of data from Bond type simulated closed-circuit and batch type grindability in batch ball mill, Powder Technology 146 (Issue 3), 193-199.
- STAMBOLIADIS E.T., 2006, The energy distribution theory of comminution specific surface energy, mill efficiency and distribution mode, Minerals Engineering, 20, pp. 140-145
- TAVARES L.M., KALLEMBACK R.D.C., 2013, Grindability of binary ore blends in ball mills, Minerals Engineering 41, 115-120.
- WEISS N.L., 1985, Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers, AIMM, New York
- WILLS B.A., 2006, Mineral Processing Technology, 7th edn., Pergamon Press.
- www.novanna.co.uk/sample-splitter-6.3mm
- www.sbswinstruments.com/detail.php?pid=166&cid=9
- YAN D., EATON R., 1994, Breakage properties of ore blends, Minerals Engineering vol.7, nos. 2/3, 185-199.

Биографија

Кандидат Дејан (Чедомир) Тодоровић, рођен је 22. 09. 1972. године у Неготину где је завршио основну и средњу школу. Рударско-геолошки факултет у Београду, одсек припрема минералних сировина, уписао је 1991. године, а дипломирао је 2000. године са просечном оценом 8,05, оценом 10 на дипломском испиту са темом „Флотацијска концентрација минерала олова, бакра и цинка из композитног узорка претконцентрата и класе -3+0 мм руде рудника “Рудник” “ и стекао звање дипломирани инжењер рударства за припрему минералних сировина. Магистарске студије на Рударско-геолошком факултету, одсек за рударство, смер припрема минералних сировина, уписао 2000. године, а магистрирао 19.11.2007. године на тему под називом „Корелација услова магнетске концентрације и квалитета производа кварцног песка“.

Од 2000. године запослен је у Институту за технологију нуклеарних и других минералних сировина у Београду као истраживач сарадник где ради на пројектима које финансира министарство за науку и технолошки развој, као и на пројектима финансираним од стране привредних организација.

Аутор је и коаутор: 1 рада публикованог у међународном часопису категорије М24, 1 рада публикованог у националном часопису категорије М50, 25 саопштења са конференција међународног значаја категорије М30, 9 саопштења националног значаја категорије М60, 6 техничких решења категорије М80.

Учествовао је у организацији научно стручног скупа као члан техничког и организационог одбора: Balkan mineral processing congress 2015. године.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Дејан Тодоровић

број индекса /

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Изучавање мељивости нехомогених композитних материјала и тестирање
скраћеног поступка за одређивање Бондовог радног индекса

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 15.09.2016.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Дејан Тодоровић

Број индекса /

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Изучавање мељивости нехомогених композитних материјала и
тестирање скраћеног поступка за одређивање Бондовог радног индекса

Ментор Проф. Др Милан Трумић

Потписани/а Дејан Тодоровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 15.09.2016.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Изучавање мељивости нехомогених композитних материјала и тестирање
скраћеног поступка за одређивање Бондовог радног индекса

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 15.09.2016.



1. Ауторство - Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.