



www.ror.tf.bor.ac.rs

UPOREDNA ANALIZA KINETIKE PROSEJAVANJA MINERALNIH I SEKUNDARNIH SIROVINA

COMPARATIVE ANALYSIS OF MINERAL AND SECUNDARY RAW MATERIALS SCREENING KINETICS

Aleksandra Stojanović[#], Milan Trumić, Maja Trumić, Grozdanka Bogdanović, Ljubiša Andrić, Dejan Antić, Dragana Marilović

Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Bor, Srbija

Primljen: 3. novembar 2015.

Prihvaćen: 17. decembar 2015.

IZVOD – Pod efikasnošću prosejavanja podrazumeva se uspešnost prosejavanja u odnosu na idealno prosejavanje kojim bi se ostvarilo potpuno odvajanje klasa krupnoće, bez prisustva zrna krupnoće manje od otvora sita za prosejavanje u nadrešetnom proizvodu i zrna veće krupnoće od otvora za prosejavanje u podrešetnom proizvodu. Efikasnost raste brzo i nakon izvesnog vremena se smanjuje, to se objašnjava time da brzina prosejavanja zavisi od procenta lakih, teških i otežavajućih zrna. U radu je prikazano kako data zrna, njihov oblik i gustina utiču na kinetiku prosejavanja.

Ključne reči: kinetika prosejavanja, mineralne sirovine, sekundarne sirovine

ABSTRACT - Efficiency of screening shows screening performance compared to an ideal screening to achieve a complete separation of the fractions without the presence of grains of size less than the mesh openings left on sieve and grains of size larger than the mesh opening that passed through the sieve. Efficiency is growing rapidly and after a certain time is reduced. This is explained by the fact that the speed of screening depends on the percentage of 'small', 'small-to large' and 'large' grain. The paper shows how for the given grain, their shape and density affect the kinetics of screening.

Key words: screening kinetics, mineral raw materials, secondary raw materials

UVOD

Prosejavanje je proces razdvajanja sirovine zasnovan na geometrijskom upoređivanju oblika i veličine zrna sa oblikom i veličinom otvora prosevne površine [1]. Prosejavanje je jedan od najstarijih metoda analize veličine čestica i ostvaruje se uspešnim propuštanjem poznate mase uzorka sirovine kroz sita i merenjem prosejane mase sa svakog sita radi određiva-

nja procentualnih učešća određenih klasa krupnoće. Prosejavanje čestica nepravilnog oblika je komplikovano i utiče na efikasnost prosejavanja ukoliko one imaju krupnoću približnu veličini otvora sita. Efikasnost prosejavanja opada i kod samo jednog sloja sirovine na prosevnoj površini zbog intezivnijeg poskakivanja i veće brzine kretanja zrna, što takođe utiče negativno na prolaz zrna kroz otvore. Na osnovu efikasnosti analiziramo kinetiku prosejavanja. Pri prosejavanju rasutih materijala

[#] Kontakt adresa autora: Aleksandra Stojanović, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija. E-mail: astojanovic@tf.bor.ac.rs

efikasnost prosejavanja na početku raste veoma brzo, a nakon izvesnog vremena sve sporije, što se može objasniti brzinom prosejavanja zrna donje klase krupnoće koja je zavisna od mase takvih zrna koja se u datom trenutku nalaze na situ [2]. Na početku prosejavanja takvih zrna ima više na situ i kroz otvore prvenstveno prolaze zrna čiji je srednji prečnik manji od $0,75 \cdot a$, (a – veličina otvora sita). Zatim se prosejavaju zrna koja zahtevaju duže vreme i čiji je srednji prečnik $0,75 \cdot a \leq d_s \leq a$, (d_s – srednji prečnik zrna). Zrna sa prečnikom $a \leq d_s \leq 1,5 \cdot a$, zaglavljaju otvore i sprečavaju prolaz ostalih zrna [1, 3]. Generalno, može se reći da sirovina sa manjim sadržajem zrna sa srednjim prečnikom $0,75 \cdot a \leq d_s \leq a$ i $a \leq d_s \leq 1,5 \cdot a$, ima bržu kinetiku prosejavanja. Za matematičku interpolaciju kinetike prosejavanja u literaturi predloženo je više modela [1,2,4,5]. Modeli koji su korišćeni u radu su: klasičan model prosejavanja i modifikovani model prosejavanja Magdalinović-Trumić.

– Klasičan model prosejavanja

$$\ln \frac{1}{1-E} = k \cdot t \quad (1)$$

– Modifikovani model prosejavanja Magdalinović-Trumić

$$\frac{E}{1-E} = k \cdot t \quad (2)$$

gde je: k – konstanta brzine prosejavanja

E – efikasnost prosejavanja i računa se:

$$E = 1 - \frac{m}{m_0} \quad (3)$$

m – masa zrna donje klase krupnoće koja se u datom trenutku (t) nalazi na situ.

MATERIJAL I METOD RADA

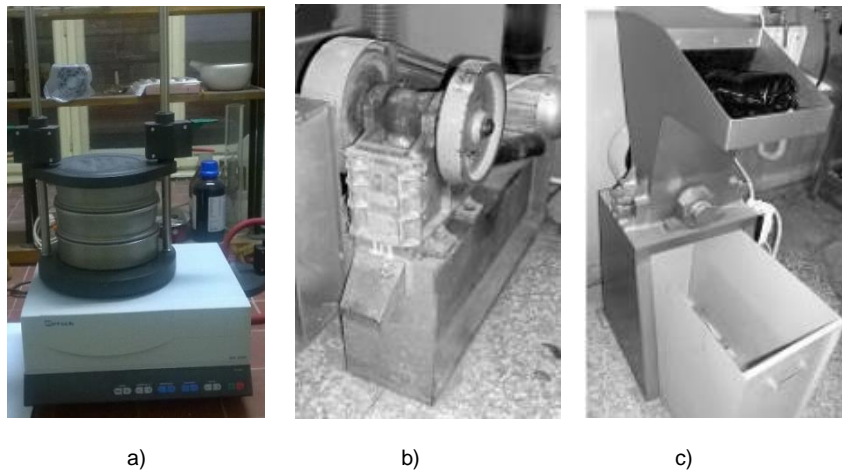
Ispitivanje se vršilo na uzorcima tri sirovine: kriveljska ruda, bakarna žica i PVC izolacija. Uzorci su bili u rastresitom stanju i prekrivali su celu površinu sita u jednom karakterističnom sloju. Gustine, oblik zrna i masa korišćenih sirovina, date su u tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike uzorka

Vrsta uzorka (sirovina)	Gustina (kg/m^3)	Oblik zrna	Masa (g)
Kriveljska ruda	2680	kubičast	100,00
PVC izolacija	1400	igličast	30,00
Cu – žica	8900	kubičast	250,00

Opiti prosejavanja izvođeni su pomoću laboratorijskog vibro uređaja na suvo (slika 1a) na sintetičkim uzorcima mineralne i sekundarnih sirovina.

Uzorak kriveljske rude je usitnjavan u čeljusnoj drobilici (slika 1b) a uzorci PVC izolacije i bakarne žice u mlinu sa noževima (slika 1c).



Slika 1. Laboratorijski uređaji: a) laboratorijski vibro uređaj, b) čeljusna drobilica, c) mlin

U tabeli 2. dat je granulometrijski sastav uzoraka i procentualno učešće lakih, teških i otežavajućih zrna.

Ispitivanje se vršilo tako što se uzorak nakon određenog perioda prosejavanja uklanjao sa sita u cilju

definisanja mase proseva a zatim vraćen na sito za dalje prosejavanje. Vremenski intervali na kojima se merio sadržaj klase krupnoće (-1,70+0) mm su sledeći: 10s, 20s, 30s, 45s, 60s, 90s, 180s.

Tabela 2. Granulometrijski sastav uzorka krivelske rude, bakarne žice i PVC izolacije

d (mm)	W _{uzorak LTO*} (%)	W _{uzorak O**} (%)	W _{uzorak T***} (%)
-3,35 +2,36	10	10	10
-2,36 +1,7	30	50	10
-1,7 +1,18	30	10	50
-1,18 +850	20	20	20
-850 +600	10	10	10
Σ	100	100	100

Napomena:

Uzorak LTO* - Uzorak sa podjednakim učešćem lakih, teških i otežavajućih zrna

Uzorak O** - Uzorak sa većim učešćem otežavajućih zrna

Uzorak T*** - Uzorak sa većim učešćem teških zrna

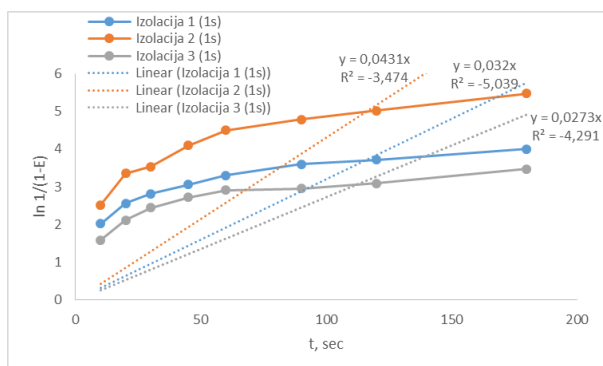
REZULTATI I DISKUSIJA

krivelsku rudu, bakarnu žicu i PVC izolaciju dati su u tabelama 3, 4, 5 i prikazani na slikama 2, 3, 4, 5, 6, 7.

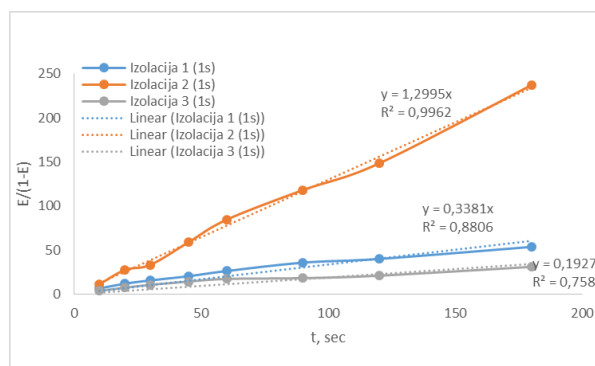
Rezultati kinetike prosejavanja za sva tri uzorka

Tabela 3. Kinetika prosejavanja PVC izolacije

	t	10	20	30	45	60	90	120	180
PVC izolacija (uzorak LTO)	D (g)	15,62	16,61	16,92	17,16	17,34	17,51	17,56	17,67
	E (%)	86,77	92,28	94,00	95,33	96,33	97,28	97,56	98,17
	$\ln \frac{1}{1-E}$	2,02	2,56	2,81	3,06	3,30	3,60	3,71	4,00
	$\frac{E}{1-E}$	6,56	11,95	15,67	20,41	26,25	35,76	39,98	53,64
PVC izolacija (uzorak O)	D (g)	11,03	11,58	11,65	11,80	11,86	11,90	11,92	11,95
	E (%)	91,92	96,5	97,08	98,33	98,83	99,16	99,33	99,58
	$\ln \frac{1}{1-E}$	2,52	3,35	3,53	4,09	4,49	4,78	5,01	5,47
	$\frac{E}{1-E}$	11,38	27,57	33,25	58,88	84,47	118,05	148,25	237,10
PVC izolacija (uzorak T)	D (g)	19,10	21,13	21,93	22,43	22,69	22,75	22,91	23,25
	E (%)	79,58	88,04	91,38	93,46	94,54	94,79	95,46	96,88
	$\ln \frac{1}{1-E}$	1,59	2,12	2,45	2,72	2,91	2,95	3,09	3,47
	$\frac{E}{1-E}$	3,90	7,36	10,60	14,29	17,32	18,19	21,03	31,05



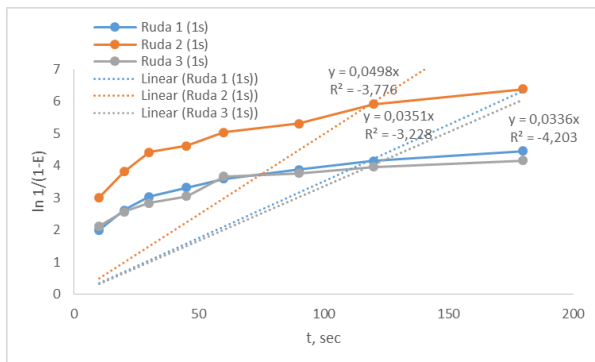
Slika 2. Klasični model kinetike prosejavanja PVC izolacije



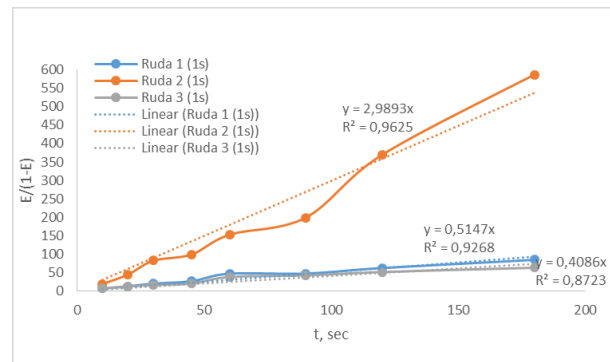
Slika 3. Modifikovani model kinetike prosejavanja PVC izolacije

Tabela 4. Kinetika prosejavanja krivelske rude

	t	10	20	30	45	60	90	120	180
Ruda 1 (uzorak LTO)	D (g)	51,95	55,63	57,14	57,82	58,35	58,76	59,05	59,30
	E (%)	86,58	92,72	95,23	96,37	97,25	97,93	98,42	98,83
	$\ln \frac{1}{1-E}$	2,00	2,62	3,04	3,32	3,59	3,88	4,15	4,45
	$\frac{E}{1-E}$	6,45	12,74	19,96	26,55	46,98	47,31	62,29	84,48
Ruda 2 (uzorak O)	D (g)	38,02	39,12	39,52	39,60	39,74	39,80	39,89	39,93
	E (%)	95,05	97,80	98,80	99,00	99,35	99,50	99,73	99,83
	$\ln \frac{1}{1-E}$	3,01	3,82	4,42	4,61	5,04	5,30	5,91	6,38
	$\frac{E}{1-E}$	19,20	44,45	82,33	99,00	152,85	199,00	369,37	587,24
Ruda 3 (uzorak T)	D (g)	70,36	73,89	75,32	76,21	77,94	78,15	78,47	78,75
	E (%)	87,95	92,36	94,15	95,26	97,43	97,69	98,09	98,44
	$\ln \frac{1}{1-E}$	2,12	2,57	2,84	3,05	3,66	3,77	3,96	4,16
	$\frac{E}{1-E}$	7,30	12,09	16,09	20,10	37,91	42,29	51,36	63,10



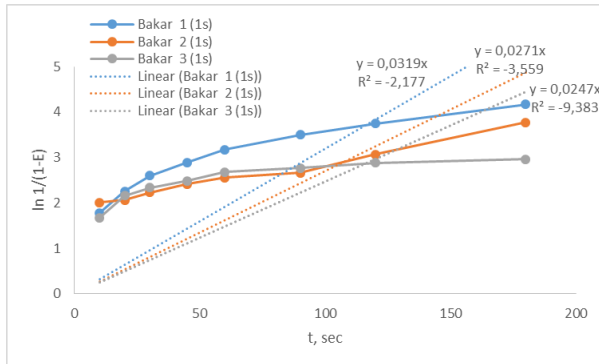
Slika 4. Klasični model kinetike prosejavanja krivelske rude



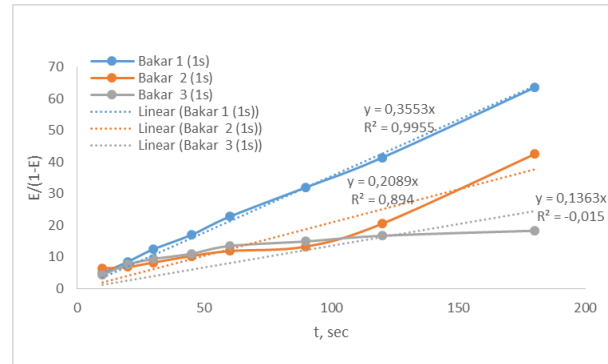
Slika 5. Modifikovani model kinetike prosejavanja krivelske rude

Tabela 5. Kinetika prosejavanja bakarne žice

	t	10	20	30	45	60	90	120	180
Bakarna žica (uzorak LTO)	D (g)	124,69	134,30	138,86	141,67	143,68	145,68	146,46	147,67
	E (%)	83,13	89,53	92,57	94,45	95,79	96,97	97,64	98,45
	$\ln \frac{1}{1-E}$	1,78	2,26	2,60	2,89	3,17	3,50	3,75	4,17
	$\frac{E}{1-E}$	4,93	8,55	12,46	17,02	22,75	32,00	41,37	63,52
Bakarna žica (uzorak O)	D (g)	86,59	87,30	89,24	91,17	92,25	93,01	95,35	97,70
	E (%)	86,59	87,30	89,24	91,17	92,25	93,01	95,35	97,70
	$\ln \frac{1}{1-E}$	2,01	2,06	2,23	2,42	2,56	2,66	3,07	3,77
	$\frac{E}{1-E}$	6,46	6,87	8,29	10,33	11,90	13,31	20,51	42,48
Bakarna žica (uzorak T)	D (g)	162,71	176,95	180,76	183,40	186,22	187,46	188,72	189,64
	E (%)	81,35	88,48	90,38	91,70	93,11	93,73	94,36	94,82
	$\ln \frac{1}{1-E}$	1,68	2,16	2,34	2,49	2,68	2,77	2,88	2,96
	$\frac{E}{1-E}$	4,36	7,68	9,40	11,05	13,51	14,95	16,73	18,31



Slika 6. Klasični model kinetike prosejavanja bakarne žice



Slika 7. Modifikovani model kinetike prosejavanja bakarne žice

Posmatranjem grafika kinetike prosejavanja sve tri sirovine, korišćenjem klasičnog modela, može se uočiti da tačke ne slede pravolinijski raspored, odnosno model kinetike prosejavanja prikazan jednačinom 1 ne opisuje dobro kinetiku prosejavanja. Ovim modelom prosejavanja ne može se opisati kinetika prosejavanja uzorka kriveljske rude, PVC izolacije i bakarne žice za sve tri vrste uzorka, jer koeficijent korelacije ima negativne vrednosti kod sve tri sirovine.

Analizom grafika kinetike prosejavanja sve tri sirovine, korišćenjem modifikovanog modela, može se uočiti da tačke na graficima slede pravolinijski raspored, odnosno modelom kinetike prosejavanja koji je predstavljen jednačinom 2 može se opisati kinetika prosejavanja.

Analizirajući korelacione koeficijente prikazane na slikama modifikovanog modela kinetike prosejavanja, može se reći da je vrednost istih veća od $R^2_{\min} = 0,443$ za sve tri sirovine i sva tri uzorka.

Za uzorak kod kojeg je sadržaj lakih, teških i otežavajućih zrna podjednak, može se opisati dobro kinetika prosejavanja sa veoma dobrim korelacionim koeficijentom ($R^2 > 0,9$ za bakarnu žicu i kriveljsku rudu, dok kod PVC izolacije $R^2 > 0,8$).

Kod uzorka sa većim sadržajem otežavajućih zrna, isto se može opisati dobro kinetika prosejavanja sa veoma dobrim korelacionim koeficijentom ($R^2 > 0,9$ za kriveljsku rudu, dok kod PVC izolacije i bakarne žice $R^2 > 0,8$).

Analiza kinetike prosejavanja uzorka sa većim sadržajem teških zrna je pokazala da je prosejavanje kriveljske rude, PVC izolacije dobro opisano datim modelom sa veoma dobrim korelacionim koeficijentom ($R^2 > 0,8$), za razliku od prosejavanja bakarne žice, gde je dobijen mali korelacioni koeficijent.

U tabeli 6 prikazani su koeficijenti brzine prosejavanja za sve tri sirovine i za sva tri uzorka.

Tabela 6. Koeficijenti brzine prosejavanja

	Koeficijent brzine (k)		
	PVC izolacija	Kriveljska ruda	Bakarna žica
Uzorak LTO	0,3381	0,5147	0,3553
Uzorak O	1,2955	2,9893	0,2089
Uzorak T	0,1927	0,4086	0,1363

Iz date tabele 6 se može videti da je najbrža kinetika prosejavanja kriveljske rude, za sva tri granulometrijska sastava a najsporiju kinetiku ima bakarna žica. Analizom uticaja granulometrijskog sastava na brzinu prosejavanja može se zaključiti da je najveća brzina prosejavanja pri povećanom sadržaju otežavajućih zrna, a najsporija pri povećanom sadržaju teških zrna.

S obzirom da je gustina sirovine različita, dolazi se do zaključka da uzorci manje gustine (kriveljska ruda i PVC izolacija) imaju veću brzinu u odnosu na uzorak veće gustine (bakarna žica). Posmatrajući koeficijente brzine prosejavanja za uzorke približno iste gustine (kriveljska ruda i PVC izolacija) može se uočiti da kriveljska ruda ima izrazito veću brzinu prosejavanja od PVC izolacije što se može pripisati povoljnijem obliku zrna kriveljske rude (kubičast) u odnosu na PVC izolaciju (igličast).

ZAKLJUČAK

Upoređivanjem rezultata dobijenih analiziranjem kinetike prosejavanja pomoću klasičnog i modifikovanog modela, dolazi se do zaključaka da se klasičnim modelom ne može opisati kinetika prosejavanja testiranih sirovina datih karakteristika jer tačke na dijagramu ne slede pravolinijski raspored. Model Magdalinović-Trumić opisuje kinetiku prosejavanja testiranih sirovina datih karakteristika sa veoma dobrim korelacionim koeficijentom u svim slučajevima.

Navedena zapažanja potvrđuju rezultate dobijene u prethodnim istraživanjima [6,7,8] da pored granulometrijskog sastava i oblik i gustina zrna imaju značajan uticaj na kinetiku prosejavanja.

Dalja istraživanja bi trebalo usmeriti na utvrđivanje datih pretpostavki.

LITERATURA

1. Magdalinović, N. Usitnjavanje i klasiranje, Nauka Beograd, 1999; pp. 235, 242, 246.
2. Trumić, M.; Magdalinović, N. Osvrt na kinetičke modele prosejavanja. *Bakar* **1999**, 4(1), 95-100.
3. James, P.; Syvitski, M. Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis. Cambridge University Press, New York, USA 2007; pp 65.
4. Subashinghe, G.K.N.S.; Schaap, W.; Kelly, E.G. Modelling screening as a conjugate rate process. *International Journal of Mineral Processing* **1990**, 28(3-4), 289-300.
5. Trumić, M.; Magdalinović, N. New model of screening kinetics. *Minerals Engineering* **2011**, 24(1), 42-49.
6. Trumić, Maja; Trumić, Milan Analiza kinetike prosejavanja mineralnih i sekundarnih sirovina. 7. Simpozijum „Reciklažne tehnologije i održivi razvoj“, Soko Banja, Srbija 2012, Zbornik radova; pp 50-55.
7. Trumić, Milan; Trumić, Maja Uticaj fizičkih karakteristika sirovina na kinetiku prosejavanja. 8. Simpozijum „Reciklažne tehnologije i održivi razvoj“, Borsko jezero, Srbija 2013, Zbornik radova; pp 83-88.
8. Stojanović, A.; Trumić, Milan; Trumić, Maja The influence of particle shape on the screening kinetics. 47th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia 2015, Proceedings.