

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

**Una Sofilić**

**KOMPARATIVNA ISTRAŽIVANJA PROCESA USITNJAVANJA  
ELEKTROPEĆNE TROSKE I DOLOMITA**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: dr. sc. Gordana Matijašić, docent

Članovi ispitne komisije:  
dr. sc. Gordana Matijašić, docent  
dr. sc. Antun Glasnović, redoviti profesor  
dr. sc. Vesna Tomašić, izvanredni profesor

Zagreb, listopad 2010.

Diplomski rad izrađen je u Zavodu za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo Fakulteta  
kemijskog inženjerstva i tehnologije.

# Sažetak

U okviru istraživanja primjenjivosti elektropećne troske kao zamjene za dolomit u cestograđevnoj industriji, provedena su i istraživanja njenog ponašanja u procesu suhog usitnjavanja u kugličnom mlinu. Dobiveni rezultati uspoređeni su s onima dobivenim za dolomit.

Istraživanje je provedeno na uzorcima dolomita i elektropećne troske dobivenih izdvajanjem čestica jednoveličinskog intervala od 3350 do 2360  $\mu\text{m}$  iz uzorka početne veličine 2 – 4 mm. Uzorci su usitnjavani u planetarnom mlinu pri dva broja okretaja uz upotrebu četiri promjera tijela za usitnjavanje.

Rezultati dobiveni tijekom procesa suhog usitnjavanja u kugličnom mlinu ukazali su na linearnu ovisnost promjene masenog udjela neusitnjenog dolomita s vremenom dok je kod suhog usitnjavanja elektropećne troske uočeno odstupanje od linearnosti. Utvrđena je pojava maksimalne vrijednosti specifične brzine loma kod promjera tijela za usitnjavanje od 30 mm pri svim procesnim uvjetima, a sa povećanjem broja okretaja mlina zabilježeno je povećanje specifične brzine loma i za dolomit i elektropećnu trosku, pri čemu je intenzitet povećanja za trosku znatno manji što se objašnjava njenom strukturom i tvrdoćom.

**Ključne riječi:** kinetika usitnjavanja, populacijska bilanca, funkcija selekcije, specifična brzina loma, elektropećna troska, dolomit, planetarni mlin

## **Comparative studies of the grinding process of steel slag and dolomite**

The applicability of steel slag as a substitute for dolomite in road construction was investigated. Research was focused on the process of dry grinding in planetary ball mill. The results were compared to those obtained for the dolomite.

One-size intervals 3350-2360  $\mu\text{m}$  of dolomite and steel slag were obtained by the separation from the initial sample size of 2 - 4 mm. Prepared samples were ground in planetary ball mill at two different revolution speeds using four different ball sizes.

The results obtained during the process of dry grinding in the planetary ball mill showed the linear change of the unbroken material content with time, while for the steel slag some deviations from linearity were observed. There is occurrence of the specific breakage rate maximum for 30 mm ball diameter at both revolution speeds. Increase specific breakage rate with revolution speed was recorded for both, dolomite and steel slag, but the increase was substantially lower for the steel slag, explained with its structure and hardness.

**Keywords:** comminution kinetics, population balance, selection function, specific breakage rate, steel slag, dolomite, planetary ball mill

Velika hvala dr. sc. Gordani Matijašić, doc. na stručnim savjetima, dragocjenim uputama i svesrdnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem i Krunoslavu Žižeku, dipl. ing. na poticaju i pomoći tijekom provedbe čitavog eksperimenta.

Hvala mojoj obitelji na podršci, razumijevanju i velikoj pomoći.

Također se zahvaljujem svima koji su mi na bilo koji način pružili pomoć i podršku.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1 Dolomit i njegova primjena .....	2
2.2 Troska i njezina primjena.....	4
2.3 Kinetika usitnjavanja.....	6
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	10
3.1 Ispitivani sustav .....	10
3.2 Uređaj.....	11
3.3 Određivanje raspodjele veličina čestica .....	13
3.4. Određivanje specifične površine i raspodjele veličina pora .....	13
3.5. Modeliranje procesa – određivanje specifične brzine loma .....	14
4. REZULTATI .....	15
4.1. Specifična brzina loma .....	15
4.3. Raspodjela veličina čestica .....	24
4.3.1. Raspodjela veličina čestica usitnjenog uzorka dolomita .....	24
4.3.2. Raspodjela veličina čestica usitnjenog uzorka troske .....	29
5. RASPRAVA .....	33
6. ZAKLJUČAK.....	35
7. SIMBOLI .....	37
8. LITERATURA .....	38

# 1. UVOD

Zbog rastućih količina industrijskog otpada koji nastaje u različitim industrijskim procesima, upravljanje otpadom postalo je jedna od najznačajnijih aktivnosti u području zaštite okoliša. Porastom ekološke svijesti, povećanjem broja odlagališta kao i visokih cijena odlaganja otpada, uporaba industrijskih nusproizvoda i/ili otpada postala je atraktivna alternativa odlaganju. Upotreba industrijskih nusproizvoda i/ili neopasnih otpada kao alternativnih sirovina u građevinskoj industriji, posebno u cestogradnji, bazira se na tehničkim, ekonomskim i ekološkim kriterijima. Sukladno tome, uporaba industrijskih nusproizvoda i/ili otpada u cestogradnji može se promatrati kao čimbenik očuvanja prirodnih neobnovljivih izvora mineralnih agregata i istovremenog neželjenog utjecaja na okoliš svih aktivnosti koje su u svezi s eksploatacijom i prijevozom od izvorišta do mjesta ugradnje. Upravo ovi čimbenici nameću potrebu boljeg razumijevanja ekoloških i ekonomskih aspekata uporabe prirodnih mineralnih sirovina u odnosu na alternativne izvore ovih materijala – industrijski otpadni materijali – što u mnogome može pomoći unapređenju održivog razvoja u području cestogradnje.

U posljednjih 30-ak godina u svijetu je značajno porasla primjena industrijskih nusproizvoda i/ili otpada u cestogradnji, posebno u području primjene otpadnih materijala nastalih u cestograđevnoj industriji kao što su oštećeni asfaltni slojevi, lomljeni beton, ugljeni leteći pepeo, visokopećna troska i čeličanska troska.

Korištenje otpadnih materijala u cestogradnji i zamjena prirodnih neobnovljivih mineralnih izvora doprinosi zaštiti izvora ovih materijala i izbjegavanju visokih troškova povezanih sa eksploatacijom i transportom. Industrijski otpadni materijali imaju vrlo široku primjenu u građevinskoj industriji. Tako na primjer M. Nehdi u jednom od svojih radova<sup>1</sup> navodi 43 tipa sekundarnih sirovina korištenih u cestogradnji od čega je njih 11 industrijski otpad i/ili nusproizvod, a 7 pripada metalurškoj industriji.

Ovaj rad dio je istraživanja mogućnosti primjene elektropećne troske u cestogradnji kao potencijalne zamjene za dolomit. Opisana je kinetika procesa usitnjavanja dolomita i elektropećne troske te su uspoređena nastala granulometrijska svojstva produkta.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1 Dolomit i njegova primjena

Kamen se kao sirovina za izradu građevinskih materijala može svrstati u tri skupine: arhitektonsko građevinski kamen, tehnički kamen, pijesak i šljunak. Osim što se upotrebljava u prirodnom stanju, kamen se prerađuje različitim postupcima. Najčešće se koristi tehnički kamen čija se široka primjena u građevinarstvu osniva na njegovim fizikalnim i mehaničkim svojstvima<sup>2</sup>. Pod tehničkim kamenom podrazumijevaju se sve vrste prirodnog kamena koje mogu biti: obični lomljeni kamen, nedrobljeni ili drobljeni kamen, nefrakcionirani kamen ili frakcionirani kameni agregat, za koje je potrebno udovoljiti propisanim kriterijima kakvoće.

Dolomit ili kalcijev magnezijev karbonat je jedan od najčešće korištenih kamenih građevinskih materijala, slika 2.1.



2.1. Dolomit, mineralni agregat korišten u graditeljstvu

Dolomit se ubraja u sedimentne karbonatne stijene kojih čini oko 10%, a sastoji se uglavnom od minerala dolomita<sup>3</sup>,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Mineral dolomit je otkrio francuski mineralog Deodat de Dolomieu 1791., a po kojem je kasnije ovaj mineral i dobio ime.



Teoretski, dolomit sadrži 54,35 %  $\text{CaCO}_3$  i 45,65 %  $\text{MgCO}_3$  i onečišćenja poput Si-, Al- i Fe-oksida<sup>4</sup>. Za komercijalne svrhe udio ovih onečišćenja ne smije prijeći 7 %, jer tada njegova industrijska uporaba postaje upitna<sup>4</sup>. Prema dostupnim literaturnim podacima<sup>3-7</sup> dolomit nalazi primjenu u različitim industrijskim granama. Tako se npr. koristi za izradu vatrootpornih materijala (opeka) ili kao topitelj u metalurgiji željeza i čelika, u proizvodnji nekih vrsta cementa, stakla, keramike, te kao agrotehničko sredstvo u poljoprivredi. Služi i kao sirovina za proizvodnju  $\text{MgO}$ , metalnog Mg, te kao sirovina u kemijskoj industriji (proizvodnja laksativa – magnezijevo mlijeko). Posebno značajna upotreba dolomita je primjena dolomitnog kamenog agregata u cestogradnji i proizvodnji betona, u svojstvu punila.

Izdvojeni podaci o svjetskoj proizvodnji i potrošnji dolomita kao mineralne sirovine nisu dostupni, pa se do tih podataka za neke zemlje, proizvođače ove vrijedne mineralne sirovine, može doći i na temelju procjene. Tako npr. u SAD vapno i dolomit čine oko 70% od ukupne proizvodnje drobljenog kamena<sup>8</sup>, pa se na temelju kretanja proizvedenih količina ovog građevnog materijala može procijeniti i količina proizvedenog vapna i dolomita. U posljednjih 30 godina se proizvodnja drobljenog kamena u SAD prema podacima U.S. Geology Survey<sup>8</sup> kretala od 892 milijuna t/god do 1,55 milijardi t/god, na temelju čega se procjenjuje količina proizvedenog vapna i dolomita u rasponu od 625 milijuna t/god do 1,24 milijardi t/god. Relativno veliki značaj dolomita kao građevinskog materijala u Europi može se ilustrirati podatkom za Veliku Britaniju gdje je 2004. od ukupno proizvedenih 12,2 milijuna tona svega 1,4 milijuna tona iskorišteno u industrijske i poljoprivredne svrhe dok je ostalo upotrijebljeno u građevinarstvu<sup>5</sup>.

Ležišta dolomita u Hrvatskoj se nalaze u Hrvatskom Zagorju, Slavoniji, Kordunu, Banovini, Lici, Gorskom Kotaru i Dalmaciji. Izdvojeni podaci o količinama proizvedenog dolomita se ne prate, već su sadržani u statističkim podacima o proizvodnji lomljenog i drobljenog kamena prema kojima se proizvodnja u razdoblju 2001.-2007. kretala između 14,7 i 21,7 milijuna t/god<sup>9</sup>.

Posljednjih godina upotreba dolomita u industrijske svrhe sve više opada, što je posljedica smanjene metalurške proizvodnje, pa otuda i smanjena potreba za vatrootpornim materijalima i topiteljima. U prilog smanjenju upotrebe dolomita za industrijske svrhe ide i njegova djelomična zamjena nekim otpadnim materijalima od kojih je posebno značajna čeličanska troska<sup>10</sup>.

## 2.2 Troska i njezina primjena

Troska je nusproizvod nastao pri taljenju i drugim metalurškim procesima odnosno procesima spaljivanja, a čine ju onečišćenja u metalima, rudama ili spaljivanim materijalima. Za vrijeme procesa taljenja ili rafinacije troska "pliva" na površini rastaljenog metala štiteći ga od oksidacijskog ili redukcijskog djelovanja atmosfere držeći ga pri tom čistim. U procesima proizvodnje sirovog željeza i čelika troska nastaje u određenoj fazi procesa rafinacije taline dodavanjem nemetalnih dodataka i topitelja (smjese različitih oksida) kao i međudjelovanjem taline i vatrostalnog materijala kojim je obzidana unutrašnja strana peći. Većina troski je svrstana u tri tipa: željezne troske, uključujući visokopećnu trosku i čeličansku trosku, neželjezne troske nastale pri proizvodnji neželjeznih (lakih i obojenih) metala (Cu, Zn, Pb, Ni, ...), troske nastale u termoenergetskim postrojenjima, kao i troske nastale u spalionicama krutog otpada<sup>11</sup>.

Prema kemijskom sastavu čeličanska troska, slika 2.2., ima vrlo kompleksnu osnovu koja se primarno sastoji od oksida kalcija, željeza, silicija, aluminija, magnezija i mangana povezanih u složene spojeve kalcijevih silikata, aluminosilikata i aluminoferita. Nakon uklanjanja tekuće troske, primjenjuje se jedna od metoda hlađenja<sup>12</sup> što izravno utječe na njezine fizičke karakteristike (gustoću, poroznost i krupnoću zrna), a samim time i na njezinu primjenjivost kao sekundarne sirovine u drugim granama industrije<sup>13</sup>.



**Slika 2. 2.** Elektropećna troska (CMC Sisak d.o.o., Sisak)

Prema dostupnim literaturnim podacima<sup>14-17</sup>, raznolika primjena troske kroz povijest, ogleda se i u činjenici da se u Njemačkoj već 1589. koristi pri izradi topovskih kugli, a u Engleskoj se od 1652. koristi u proizvodnji streljiva.

Primjena u industriji cementa počinje u Njemačkoj 1852., a za izradu mineralne vune u Welsu je koriste od 1840. Za izradu ojačanog betona Nijemci je počinju koristiti već 1892., a u Japanu trosku koriste pri izradi opeka od 1901.

Primjena čeličanske troske u prošlosti nije bila atraktivna jer su u cijelom svijetu bile na raspolaganju relativno velike količine visokopećne troske. Čeličanska troska se u stvari komercijalno koristi od sredine 19. stoljeća, a početkom 20. stoljeća bilježi se ubrzani razvoj i unapređenje raznih industrijskih proizvodnih procesa u kojima se počinje značajnije koristiti kao sekundarna sirovina. Smanjenjem raspoloživih količina visokopećne troske gašenjem procesa proizvodnje sirovog željeza (u Hrvatskoj 1991.) i porasta proizvodnje čelika elektropećnim postupkom, značaj čeličanske troske raste kao i njena primjena u različitim granama industrije i u poljoprivredi (tablica 1.)

**Tablica 2.1.:** Neke od najčešćih primjena visokopećne i čeličanske troske<sup>10</sup>

Primjena troske	Područje primjene				
	Graditeljstvo	Uređenje odlagališta otpada	Održavanje riječnih korita i morske obale	Ostala industrija	Poljoprivreda
Agregat u cestogradnji (asfaltne mješavine, nosivi slojevi)	x				
Agregat u industriji cementa i betona				x	
Sipina (sprječavanje poledice u zimskim uvjetima)	x				
Uređenje nasipa i obala rijeka	x		x		
Stabilizirani nosivi slojevi (sprječavanje erozije)	x		x		
Uređenje morskih luka i obala	x		x		
Nosivi sloj od zrnatog materijala	x				
Nasipanje neasfaltiranih cesta i putova	x				
Željeznički nasipi	x				
Neutraliziranje otpadnih voda rudarske industrije	x		x		
Agrotehničke mjere (reguliranje pH tla, donor Ca i sl.)					x
Granulirana ispuna (posteljice) kod polaganja cjevovoda, nasipanje neasfaltiranih parkirališta i sl.	x				
U čeličanama kao topitelj			x	x	
Pokrivanje otpada na odlagalištima		x			
Nasipni materijali (krajobrazna arhitektura)	x				
Ispuna za drenaže	x				
Pokrivalo krovova				x	
Punilo (boje, polimerni materijali, adhezivna sredstva)				x	
Mineralna vuna (izolacijski materijali)				x	

Zbog činjenice da troska nije prirodni mineral statistički podaci o njenoj proizvodnji u svijetu nisu dostupni, pa se godišnje svjetske količine nastale troske procjenjuju na temelju tipičnih odnosa troske i sirovog željeza odnosno čelika<sup>18</sup> u čijim procesima proizvodnje troska i nastaje. U razdoblju od 2000.-2008., za koje postoje izvještajni podaci o svjetskoj proizvodnji željeza i čelika,<sup>19</sup> zabilježeno je da se proizvodnja sirovog željeza kretala između 576 i 947 milijuna tona godišnje dok je u istom razdoblju proizvodnja čelika bila između 850 i 1340 milijuna tona godišnje. Ukoliko se uzme u obzir da količina nastale visokopećne troske po toni sirovog željeza iznosi 250 kg, može se procijeniti da se količina nastale visokopećne troske u svijetu, u navedenom razdoblju, kretala od 144 – 237 milijuna tona godišnje.

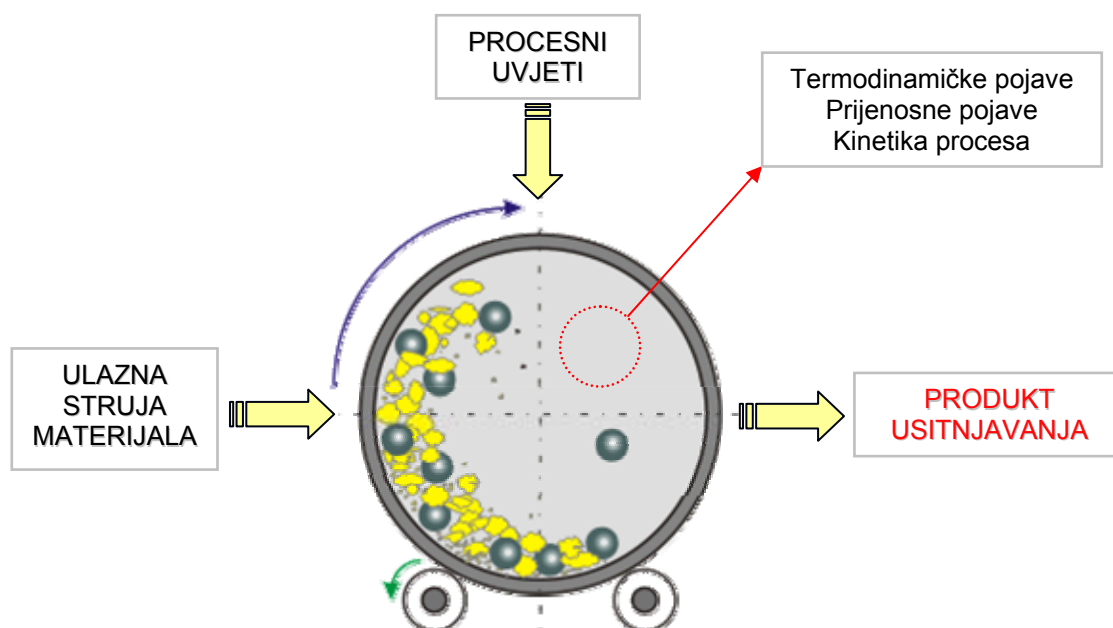
S obzirom da se količina troske koja nastaje u procesu proizvodnje čelika postupkom kisikovih konvertorskih peći kreće od 85-165 kg po toni konvertorskog čelika, a u elektropečnom postupku od 60 do 263 kg po toni elektročelika<sup>18</sup>, za procjenu nastale količine čeličanske troske može se uzeti prosječna količina od 100 kg/t proizvedenog čelika. Na ovaj način se za razdoblje 2000.-2008. može reći da se količina čeličanske troske u svijetu kretala od 85-134 milijuna tona godišnje<sup>20</sup>. Analogno ovome, procijenjena količina nastale visokopećne troske u EU-27 u istom razdoblju bila je između 28 i 29 tona godišnje, a količina nastale čeličanske troske u tom razdoblju procjenjuje se od 19 do 21 milijun tona godišnje<sup>19</sup>.

Čeličanska troska se zahvaljujući rezultatima dosadašnjih istraživanja vrlo uspješno primjenjuje kao sekundarna sirovina u cestogradnji, kao djelomična ili potpuna zamjena za neki od uobičajeno korištenih mineralnih agregata vapnenačkog i/ili dolomitnog podrijetla.

### **2.3 Kinetika usitnjavanja**

Usitnjavanje je proces u kojem se pod djelovanjem mehaničkih sila mijenja disperzno stanje čvrstih tvari, koje je jednoznačno određeno granulometrijskim sastavom. Proces usitnjavanja provodi se sa ciljem dobivanja sitnijih čestica, novih materijala ili u svrhu poboljšanja kvalitete postojećeg proizvoda (aktivacija površine, optička svojstva, čvrstoća itd.), a jedna je od najvažnijih operacija korištenih u raznim industrijskim granama uključujući farmaceutsku, kompozitnu, prehrambenu, keramičku industriju, industriju lakova i sprejeva itd. Karakteristike produkta nastalog procesom usitnjavanja ovise o nizu

čimbenika kao što su karakteristike ulaznog materijala, broj okretaja mlina, vrsti, veličini i broju tijela za usitnjavanje, raspodjeli veličina tijela za usitnjavanje i sl., slika 2.3.



**Slika 2.3.** Shematski prikaz uvjeta koji određuju svojstva produkta usitnjavanja

Kontrolirana proizvodnja produkta određenih svojstava moguća je povezivanjem utjecaja navedenih parametara i opisom kinetike samoga procesa. Kinetika procesa usitnjavanja dana je populacijskom bilancom koja se temelji na dva slijedna fenomena<sup>21</sup>:

- a) čestica odabrana za lom
- b) slomljena čestica rezultira danom raspodjelom.

Promotri li se diskontinuirani proces usitnjavanja u mlinu u kojem je ostvareno idealno miješanje, populacijska bilanca poprima oblik bilance „masa-veličina“:

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j} \cdot S_j \cdot w_j(t) - S_i \cdot w_i(t) \quad i > j \quad (2.1)$$

gdje je:

$w_i(t)$  - udio čestica veličine  $i$  u vremenu usitnjavanja  $t$

$S_i$  - specifična brzina loma čestica veličine  $i$  (funkcija selekcije)

$b_{i,j}$  - udio čestica veličine  $i$  dobivenih lomom čestica veličine  $j$  (funkcija raspodjele produkata loma)

Dakle, promjena mase čestica određene veličine ovisi samo o funkciji nastajanja i funkciji nestajanja. Rješavanje jednadžbe 2.1. podrazumijeva određivanje kinetičkih parametara; funkcije selekcije ( $S_j$ ) i funkcije raspodjele produkata loma ( $b_{i,j}$ ), a na temelju čega je moguće predvidjeti vladanje partikulskih sustava tijekom procesa usitnjavanja<sup>22-25</sup>. Funkcija selekcije i funkcija raspodjele produkata loma, parametri su koji se određuju direktno eksperimentom. Funkcija selekcije predstavlja vjerojatnost da čestica veličine  $i$  bude "odabrana" (engl. *selected*) i slomljena u jedinici vremena<sup>26,27</sup>.

Za eksperimentalno određivanje funkcije selekcije najčešće se koristi metoda radioaktivnog obilježavanja ili metoda jednoveličinskih intervala. Zbog poteškoća u samoj izvedbi mjerenja metodom radioaktivnog obilježavanja, u praksi se najčešće, zbog jednostavnosti, primjenjuje metoda jednoveličinskih intervala<sup>28,29</sup>.

Kod metode jednoveličinskih intervala uzorak se podijeli na uske veličinske intervale čestica tako da omjer gornje i donje granice veličinskog intervala iznosi  $\sqrt{2}$  ili  $\sqrt[4]{2}$  prema ASTM E-11 standardu. Svaki se interval usitnjava zasebno, te se prati udio neusitnjenog materijala početnog intervala  $j$  u vremenu.

Primjenom metode jednoveličinskih intervala na izraz 2.1. gubi se funkcija nastajanja (prvi član izraza 2.1.). Brzina nestajanja čestica iz odabranog početnog intervala može se opisati izrazom:

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i \cdot w_i(t) \quad (2.2)$$

Integriranjem izraza 2.2. u granicama od 0 do  $t$  dobije se sljedeća jednadžba:

$$w_i(t) = w_i(0) \cdot \exp(-S_i \cdot t) \quad (2.3.)$$

koja logaritmiranjem prelazi u oblik koji predstavlja temelj za određivanje specifične brzine loma određene veličine čestica:

$$\ln w_i(t) = \ln w_i(0) - S_i \cdot t \quad (2.4.)$$

Ako je funkcija selekcije,  $S_i$ , konstanta tijekom procesa usitnjavanja, kinetika loma će biti prvoga reda, što znači da akumulacija finih (sitnijih) čestica u posudi mlina nema utjecaja na specifičnu brzinu loma čestica početnog veličinskog intervala.

Kinetika loma čestica početnog veličinskog intervala može odstupati od hipoteze kinetike prvoga reda. To se objašnjava postupnim povećanjem udjela sitnijih čestica uslijed čega se stupanj promjene smanjuje, a to za posljedicu ima pojavu smanjenja specifične

brzine loma. Usporavanje procesa, odnosno smanjenje specifične brzine loma opisuje se polinomnom funkcijom drugoga reda<sup>30</sup>:

$$w_i(t) = w_i(0) \cdot \exp -At - Bt^2 \quad (2.5)$$

gdje su  $A$  i  $B$  konstante ovisne o procesnim uvjetima.

Za određivanje stupnja promjene specifične brzine loma čestica početnog veličinskog intervala nužno je definirati faktor promjene,  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{S_i(t)}{S_i(0)} \quad (2.6)$$

gdje je:

$S_i(t)$  - trenutna vrijednost specifične brzine loma u vremenu  $t$ , a određuje se iz nagiba pravca za proces prvoga reda

$S_i(0)$  - početna vrijednost specifične brzine loma u vremenu 0, a odgovara vrijednosti konstante  $A$ .

Iz izraza 2.5 slijedi:

$$S_i(t) = -\frac{d}{dt} \ln \frac{w_i(t)}{w_i(0)} = A + 2 \cdot B \cdot t \quad (2.7)$$

Vrijednosti faktora promjene ukazuju na odstupanje od kinetike procesa prvoga reda:

- $\kappa = 1$  - proces usitnjavanja prvoga reda
- $\kappa > 1$  - proces usitnjavanja s izraženim efektom ubrzanja
- $\kappa < 1$  - proces usitnjavanja s izraženim efektom usporavanja

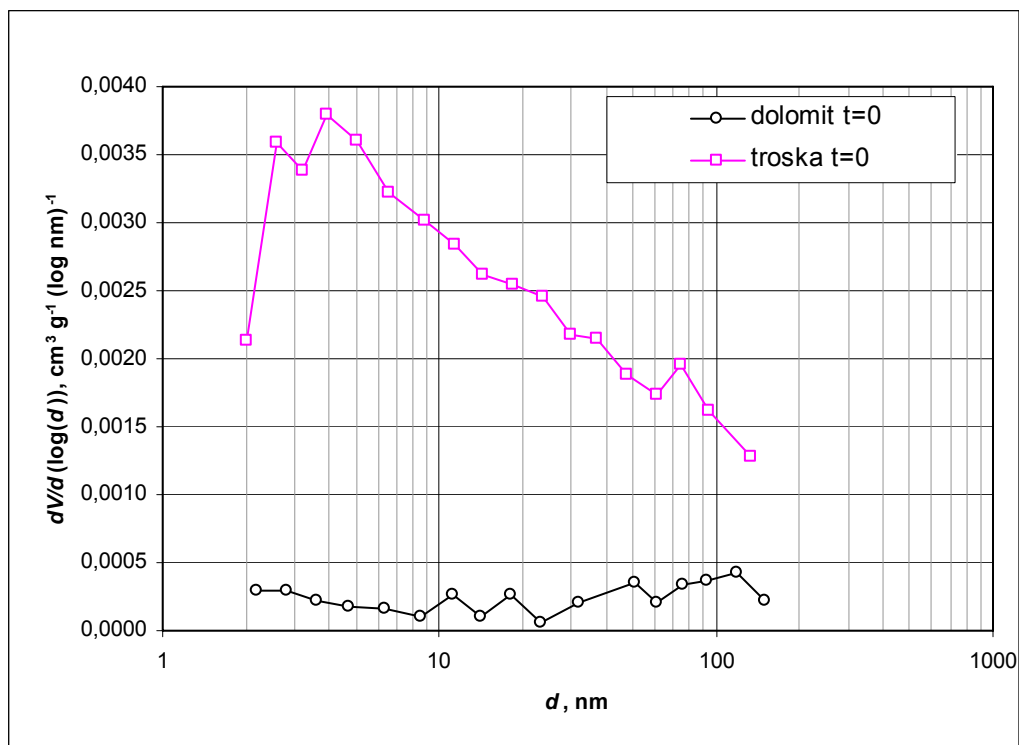
### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1 Ispitivani sustav

Istraživanje procesa usitnjavanja provedeno je na uzorcima dolomita i elektropećne troske. Veličina čestica zaprimljenih uzoraka nalazila se u intervalu 2 do 4 mm. Za provedbu ispitivanja izdvojen je jednoveličinski interval 3350-2360  $\mu\text{m}$  iz početnih uzoraka, a svojstva početnih intervala prikazana su u tablici 3.1.

**Tablica 3.1.** Svojstva početnih intervala uzoraka dolomita i elektropećne troske

	DOLOMIT	TROSKA
IZVOR	Samoborka d.o.o.	čeličana CMC Sisak d.o.o.
Gustoća, $\text{kg m}^{-3}$	2780	3490
Specifična površina, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	0,209	2,522
Kumulativni volumen pora, $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$	$4,48 \cdot 10^{-4}$	$4,99 \cdot 10^{-3}$
Srednji promjer pora, nm	8,00	7,36
Tvrdoća po Mohsu	3,5-4	7



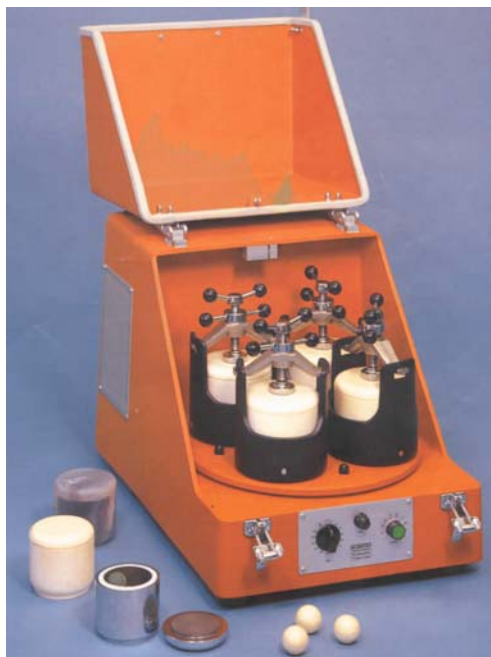
**Slika 3.1.** Raspodjela veličina pora uzorka dolomita i elektropećne troske prije usitnjavanja



Raspodjela veličina pora i specifična površina početnih jednoveličinskih intervala dolomita i troske određena je BET metodom (Micromeritics, ASAP 2000) opisanom u poglavlju 3.4.

### 3.2 Uređaj

Za provedbu eksperimenta korišten je laboratorijski planetarni mlin *Fritsch Pulverisette 5*, slika 3.2.

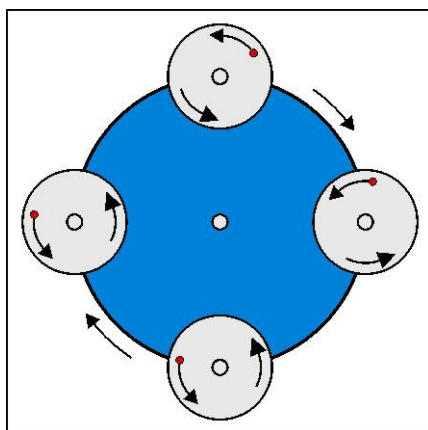


**Slika 3.2.** Laboratorijski planetarni mlin *Fritsch Pulverisette 5*

Mlin se sastoji od četiri čelične posude volumena 500 ml. Tijela za usitnjavanje su čelične kuglice promjera:

- $d = 16 \text{ mm}; 25 \text{ mm}; 30 \text{ mm}; 33 \text{ mm}$

Planetarni mlin je odabran za eksperiment zbog mogućnosti postizanja veće energije udara čime se skraćuje vrijeme potrebno za usitnjavanje. Veća razvijena energija postiže se zbog suprotne rotacije diska i posuda za usitnjavanje (slika 3.3.). Prednost ovog mlina je i ta što ima četiri posude što omogućava istovremeno usitnjavanje s različitim kuglicama u posudama, što osigurava iste uvjete provedbe eksperimenta i smanjuje eksperimentalnu pogrešku.



**Slika 3.3.** Shematski prikaz rotacije posuda i diska u planetarnom mlinu

Budući da je pri rotaciji četiri posude nužna ravnoteža masa potrebno je u sve posude stavljati istu ukupnu masu koja podrazumijeva masu kuglica i masu uzorka.

Broj kuglica određene veličine određen je tako da omjer volumena kuglica i volumena posude bude jednak u sva četiri slučaja:

$$\frac{V_K}{V_P_1} = \frac{V_K}{V_P_2} = \frac{V_K}{V_P_3} = \frac{V_K}{V_P_4} \quad (3.1.)$$

U posude su prvo stavljane kuglice, a zatim je dodan uzorak u svaku posudu tako da zbroj masa kuglica i uzorka bude jednak u svim posudama. Pregled punjenja pojedine posude planetarnog mlina prikazan je u tablici 3.2.

**Tablica 3.2.** Pregled punjenja planetarnog mlina

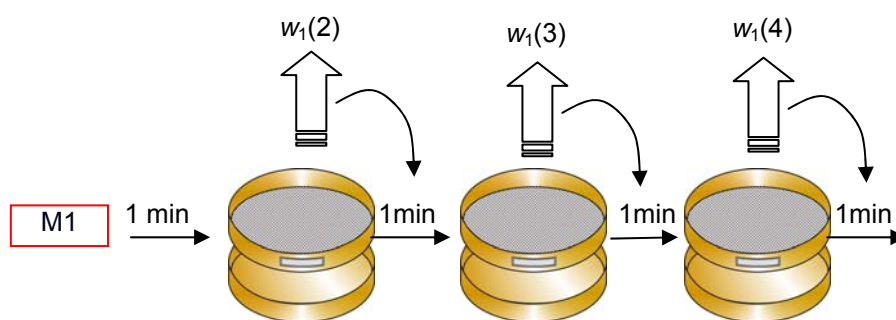
Posuda	Masa uzorka, g	Promjer tijela za usitnjavanje, mm	Broj tijela za usitnjavanje (kuglica)
1	134,2	16	40
2	148,8	25	10
3	147,3	30	6
4	204,5	33	4

Usitnjavanje je provedeno pri dva broja okretaja:

- $120 \text{ min}^{-1}$  (odgovara oznaci  $n = 3$ )
- $240 \text{ min}^{-1}$  (odgovara oznaci  $n = 5$ )

te za šest vremena usitnjavanja: 1, 2, 3, 4, 5 i 6 min

Provedba eksperimenta prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4. Shematski prikaz provedbe eksperimenta, kontinuirano

### 3.3 Određivanje raspodjele veličina čestica

Raspodjela veličina čestica nastalog produkta određena je sitenom analizom upotrebom standardiziranih ASTM sita u rasponu od 75  $\mu\text{m}$  do 2360  $\mu\text{m}$  s omjerom  $\sqrt{2}$  između veličine očice susjednih sita.

### 3.4. Određivanje specifične površine i raspodjele veličina pora

Specifična površina uzoraka prije i nakon usitnjavanja određena je snimanjem adsorpcijsko-desorpcijskih izoterma dušika. Vrijednosti specifičnih površina dobivenih ovom metodom predstavljaju ukupnu površinu grubodisperznoga sustava (uključuju i površinu pora unutar materijala).

Princip rada svih uređaja kojima se određuje specifična površina, adsorpcijsko-desorpcijska izoterma ili volumen pora adsorpcijom, zasniva se na utvrđivanju količine plina kondenzirane na površini uzorka kod nekoga ravnotežnog tlaka para. Specifična površina, volumen pora i raspodjela veličina pora određuju se na temelju odgovarajuće teorije za opisivanje podataka adsorpcije, odnosno desorpcije<sup>31-34</sup>.

Kod određivanja ukupne specifične površine i raspodjele veličina pora uzoraka BET metodom pomoću uređaja *Micromeritics ASAP 2000* (slika 3.5.) potrebno je prije same analize ukloniti vlagu i eventualne nečistoće koje mogu začepiti ili ispuniti pore. Odvagnuta količina uzorka stavi se u staklenu kivetu te se na visokoj temperaturi (400 °C) uzorak *otplinjava* uslijed djelovanja visokoga vakuuma ( $5 \cdot 10^{-3}$  mmHg).



**Slika 3.5.** Uređaj za određivanje raspodjele veličina pora, *Micromeritics-ASAP 2000*

### **3.5. Modeliranje procesa – određivanje specifične brzine loma**

Specifična brzina loma,  $S_i$ , određena je na temelju eksperimentalno dobivenih podataka metodom jednoveličinskih intervala koja podrazumijeva da se početni uzorak nalazi u određenom uskom rasponu veličina. Uzme li se u obzir izraz 2.4. te činjenica da su sve čestice prije usitnjavanja u početnom intervalu veličina  $i$ , tada je  $w_i(0) = 1$  te slijedi:

$$\ln w_i(t) = -S_i \cdot t \quad (3.2.)$$

Specifična brzina loma određuje se iz nagiba pravca dobivenog grafičkim prikazom promjene udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu. Ovakva promjena vrijedi za proces usitnjavanja koji se opisuje kinetikom procesa prvoga reda.

Ukoliko dolazi do promjene funkcije selekcije u vremenu, za opis kinetike procesa moguće je koristiti polinomnu funkciju drugoga reda (izraz 2.5.) koja logaritmiranjem, te uz uvjet  $w_i(0) = 1$  poprima oblik:

$$\ln w_1(t) = -At - Bt^2 \quad (3.3)$$

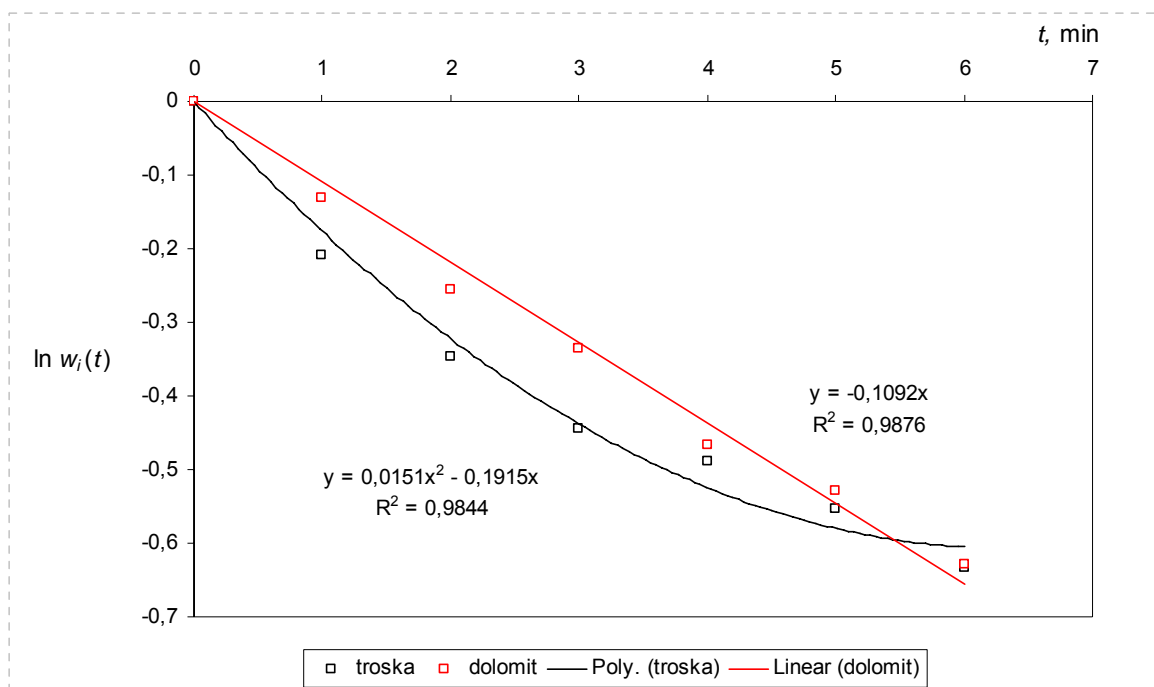
Nakon što su određeni parametri A i B, vrijednost funkcije selekcije u vremenu određena je na temelju sljedećeg izraza:

$$S_i(t) = A + 2 \cdot B \cdot t \quad (3.4.)$$

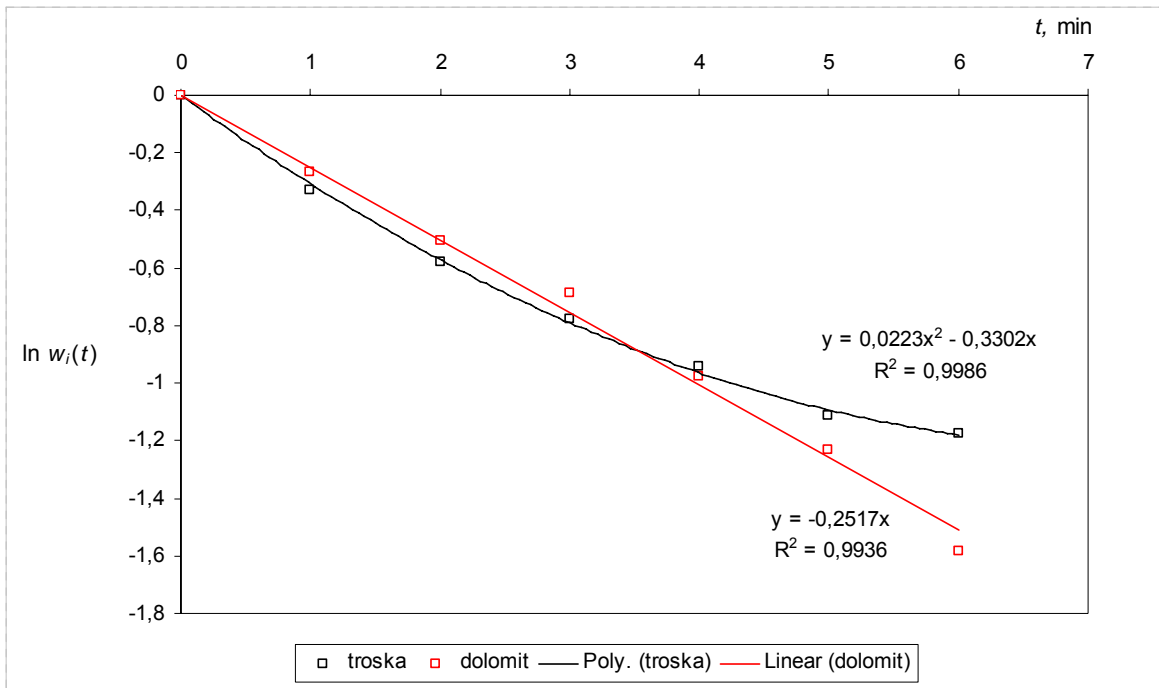
## 4. REZULTATI

### 4.1. Specifična brzina loma

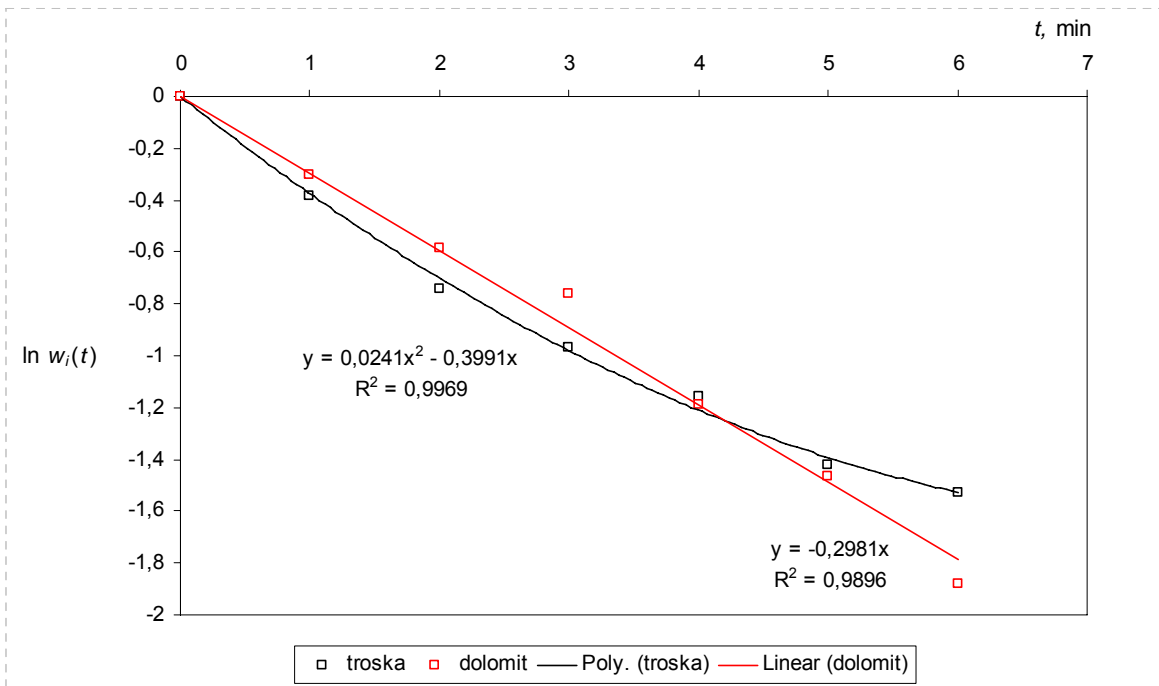
U ovom poglavlju prikazani su rezultati zabilježenih promjena udjela neusitnjenog materijala za različite eksperimentalne uvjete (slike 4.1. do 4.8.).



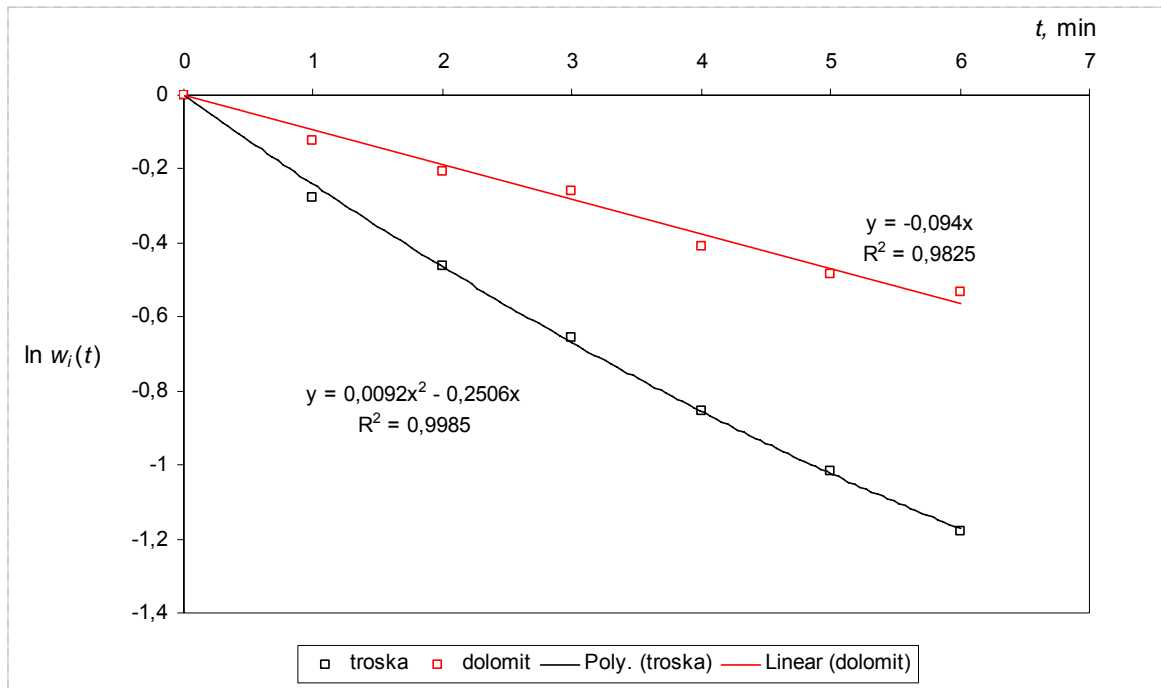
Slika 4.1. Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



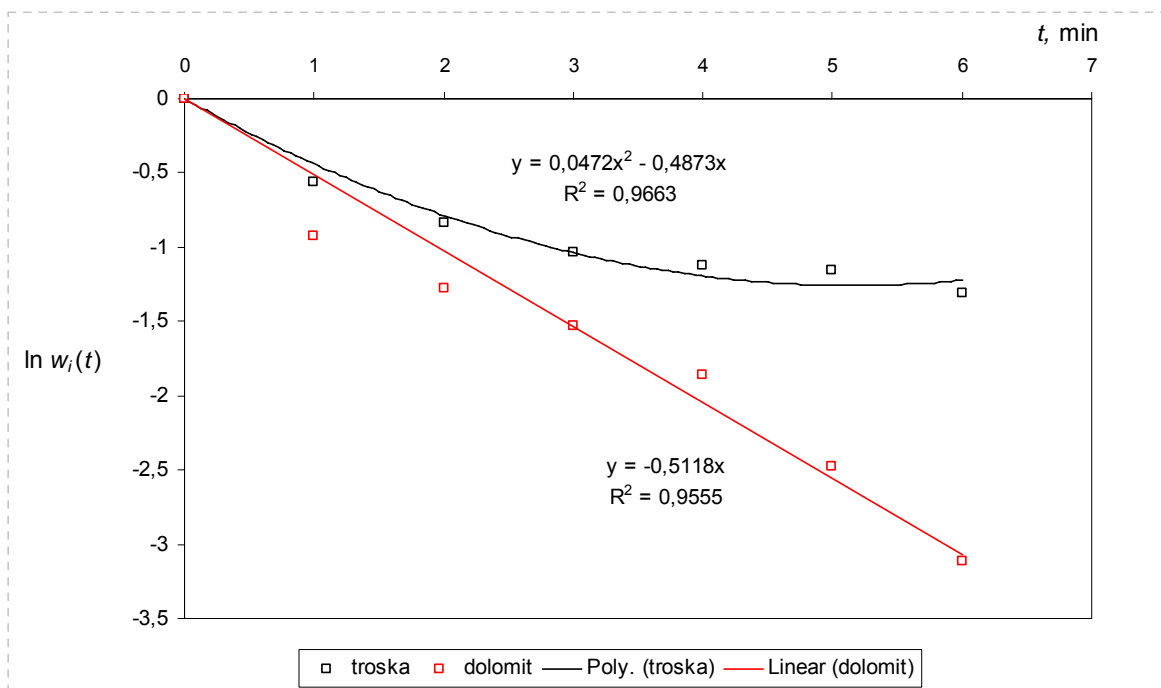
Slika 4.2. Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



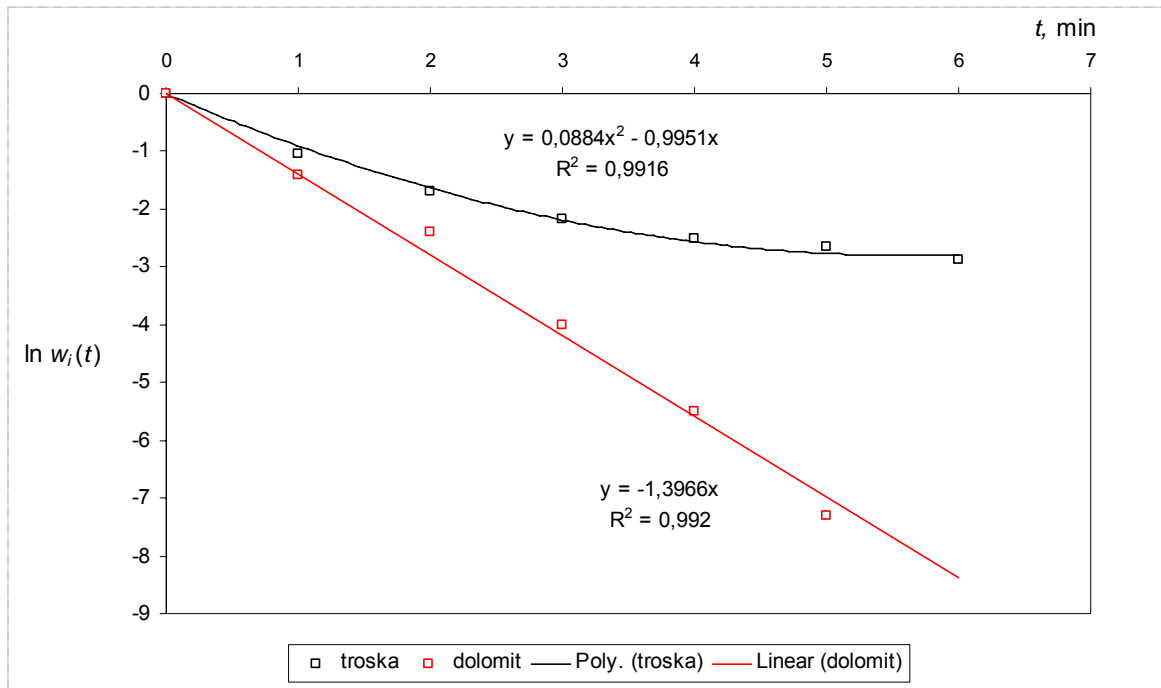
Slika 4.3. Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



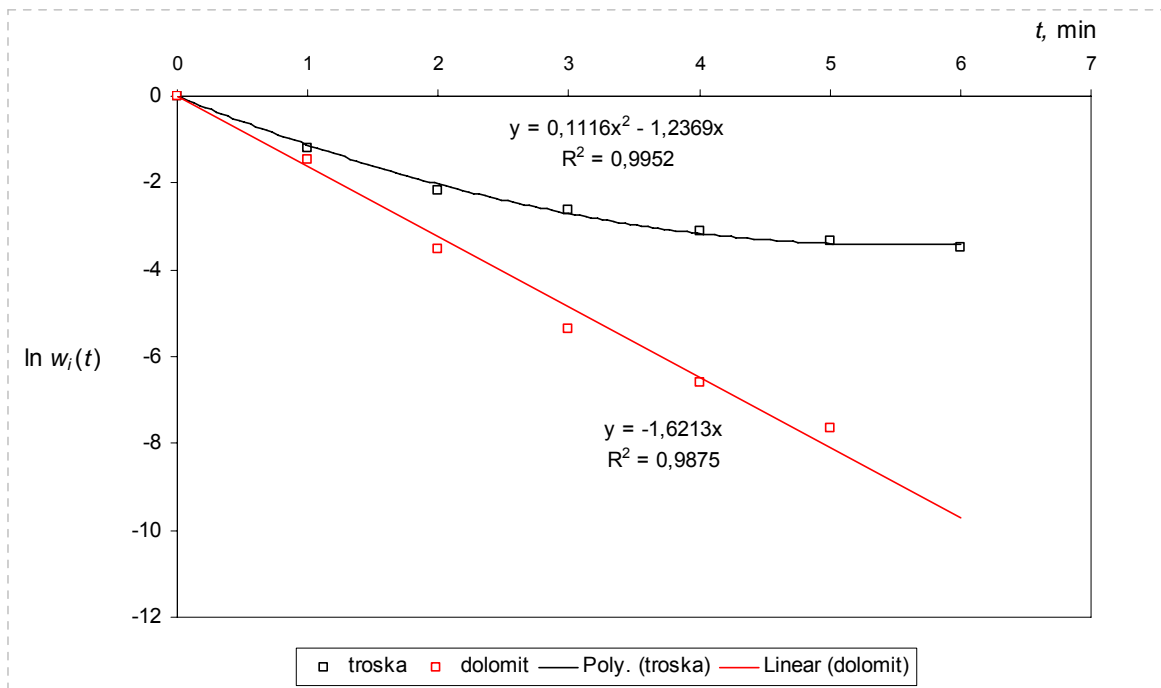
Slika 4.4. Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 33 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



Slika 4.5. Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

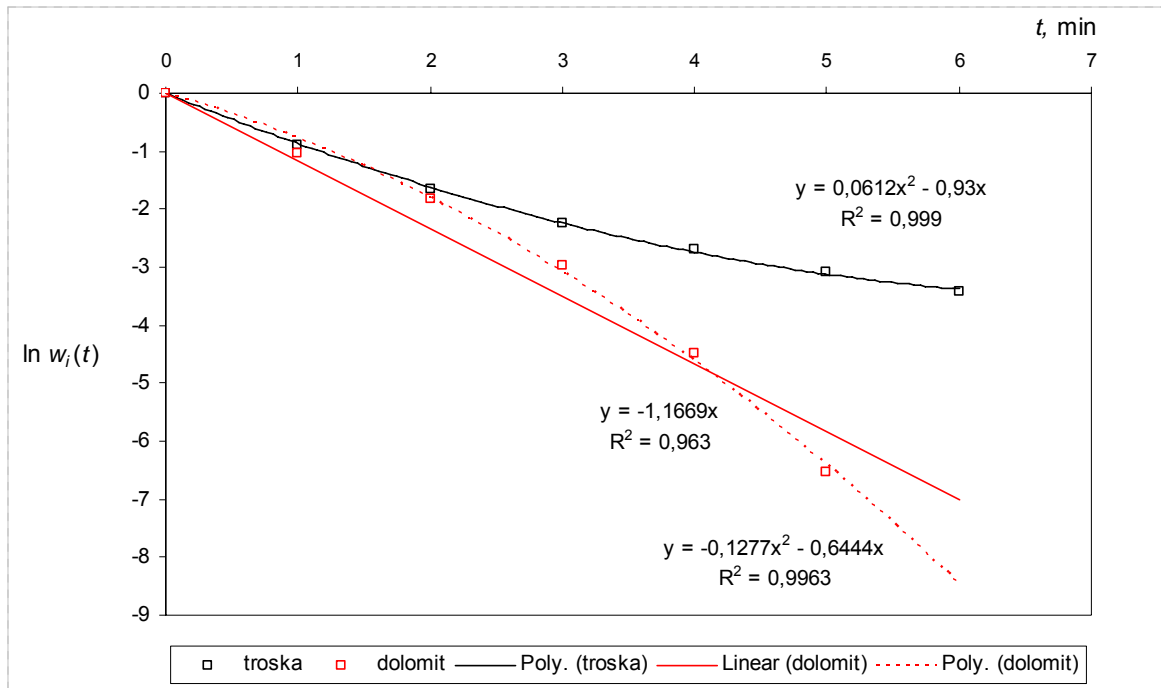


**Slika 4.6.** Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )



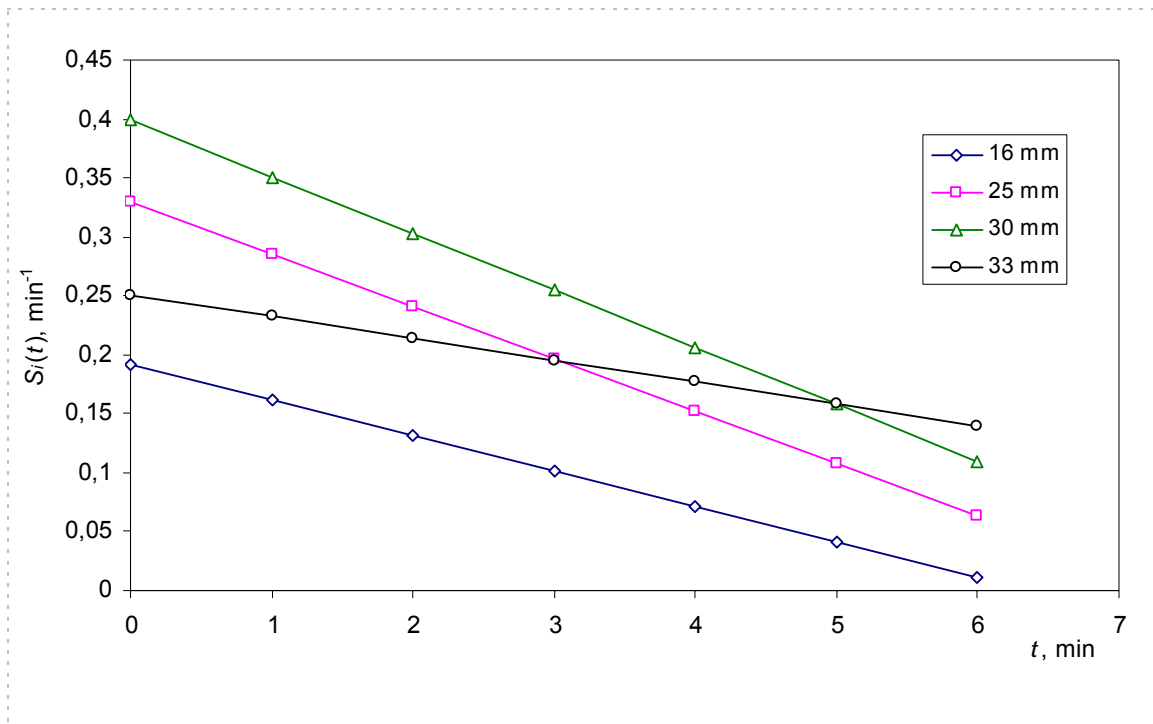
**Slika 4.7.** Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )



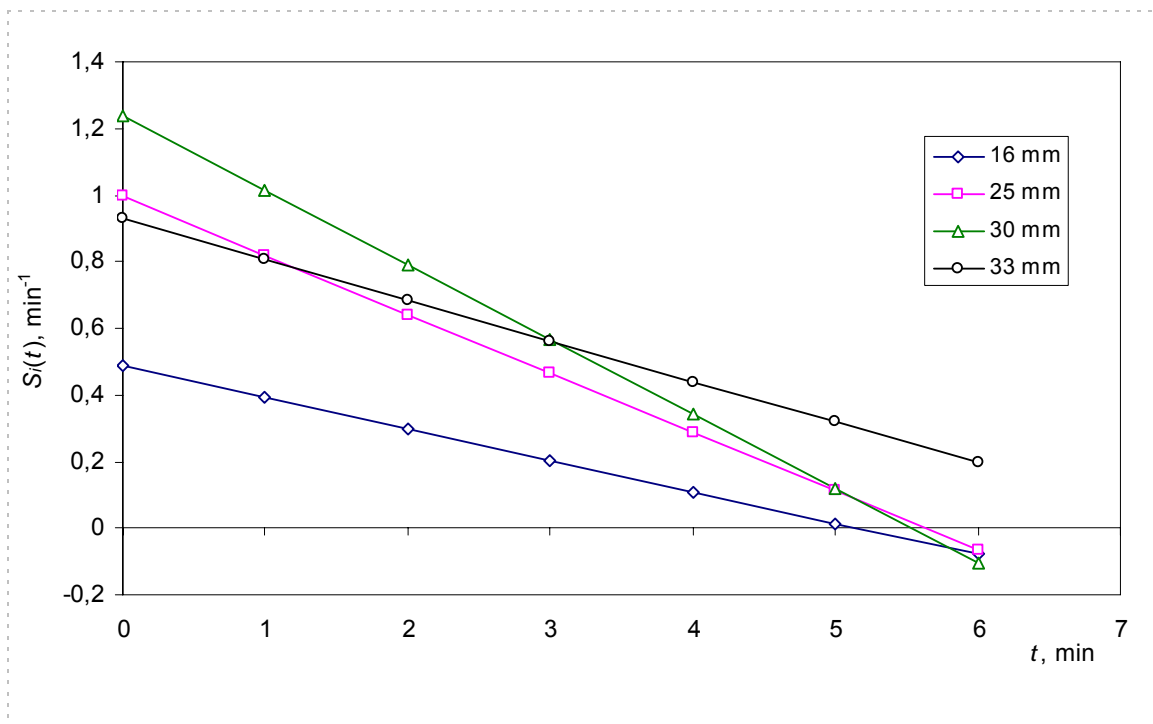


**Slika 4.8.** Promjena udjela neusitnjenog početnog intervala u vremenu; ( $d = 33 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

Ovisnost funkcije selekcije o vremenu za uzorke **troske** usitnjavane pri 120 i 240  $\text{min}^{-1}$  prikazana je slikama 4.9. i 4.10.



**Slika 4.9.** Ovisnost funkcije selekcije uzoraka troske o vremenu usitnjavanja ( $d_1 = 16 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 30 \text{ mm}$ ,  $d_4 = 33 \text{ mm}$ ;  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



**Slika 4.10.** Ovisnost funkcije selekcije uzoraka troske o vremenu usitnjavanja ( $d_1 = 16 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $d_3 = 30 \text{ mm}$ ,  $d_4 = 33 \text{ mm}$ ;  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

**Tablica 4.1.** Specifične brzine loma za uzorak dolomita

	$S_i, \text{min}^{-1}$			
	$d = 16 \text{ mm}$	$d = 25 \text{ mm}$	$d = 30 \text{ mm}$	$d = 33 \text{ mm}$
$n = 120 \text{ min}^{-1}$	0,1902	0,2517	0,2981	0,0940
$n = 240 \text{ min}^{-1}$	0,5118	1,3966	1,6216	1,1669

**Tablica 4.2.** Specifične brzine loma za uzorak troske

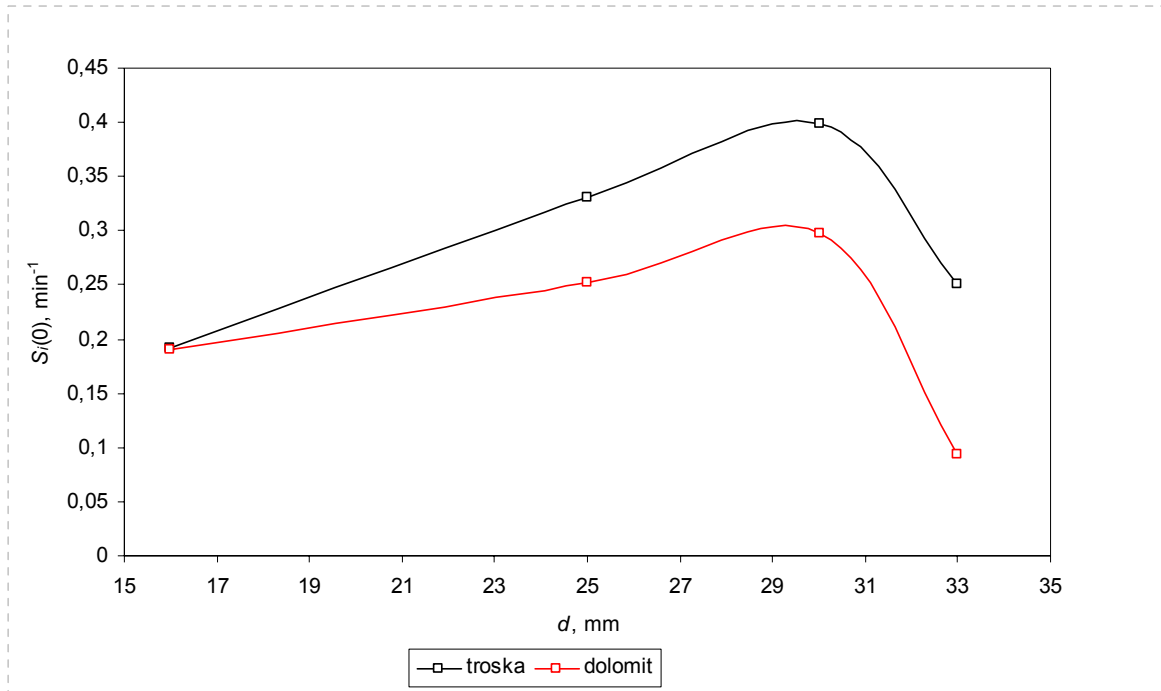
		$S_i, \text{min}^{-1}$			
		$d = 16 \text{ mm}$	$d = 25 \text{ mm}$	$d = 30 \text{ mm}$	$d = 33 \text{ mm}$
$n = 120 \text{ min}^{-1}$	$S_i(0), \text{min}^{-1}$	0,1915	0,3302	0,3991	0,2506
	$t = 1 \text{ min}$	0,1613	0,2856	0,3509	0,2322
	$t = 2 \text{ min}$	0,1311	0,241	0,3027	0,2138
	$t = 3 \text{ min}$	0,1009	0,1964	0,2545	0,1954
	$t = 4 \text{ min}$	0,0707	0,1518	0,2063	0,1770
	$t = 5 \text{ min}$	0,0405	0,1072	0,1581	0,1586
	$t = 6 \text{ min}$	0,0103	0,0626	0,1099	0,1402
$n = 240 \text{ min}^{-1}$	$S_i(0), \text{min}^{-1}$	0,4873	0,9951	1,2369	0,9300
	$t = 1 \text{ min}$	0,3929	0,8183	1,0137	0,8076
	$t = 2 \text{ min}$	0,2985	0,6415	0,7905	0,6852
	$t = 3 \text{ min}$	0,2041	0,4647	0,5673	0,5628
	$t = 4 \text{ min}$	0,1097	0,2879	0,3441	0,4404
	$t = 5 \text{ min}$	0,0153	0,1111	0,1209	0,3180
	$t = 6 \text{ min}$	-0,0791	-0,0657	-0,1023	0,1956

**Tablica 4.3.** Promjena faktora usporavanja s vremenom za uzorak troske

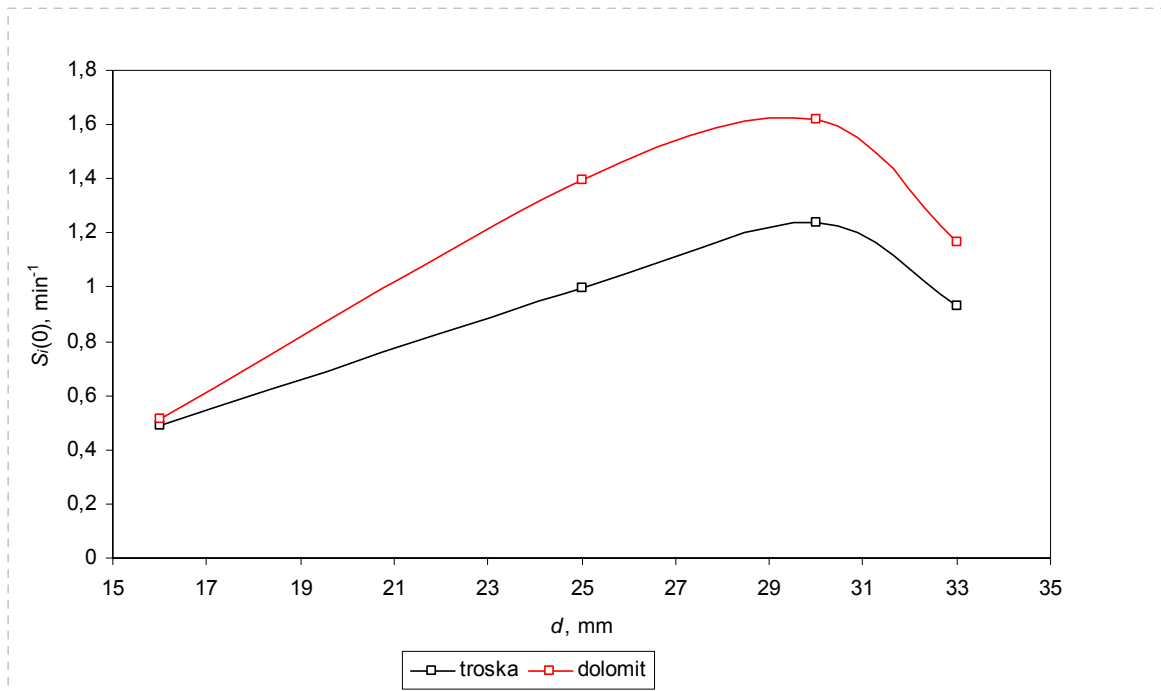
		$\kappa$			
		$d = 16 \text{ mm}$	$d = 25 \text{ mm}$	$d = 30 \text{ mm}$	$d = 33 \text{ mm}$
$n = 120 \text{ min}^{-1}$	$t = 1 \text{ min}$	0,8423	0,8649	0,8792	0,9266
	$t = 2 \text{ min}$	0,6846	0,7299	0,7585	0,8532
	$t = 3 \text{ min}$	0,5269	0,5948	0,6377	0,7797
	$t = 4 \text{ min}$	0,3692	0,4597	0,5169	0,7063
	$t = 5 \text{ min}$	0,2115	0,3247	0,3961	0,6329
	$t = 6 \text{ min}$	0,0538	0,1896	0,2754	0,5595
$n = 240 \text{ min}^{-1}$	$t = 1 \text{ min}$	0,8063	0,8223	0,8195	0,8684
	$t = 2 \text{ min}$	0,6126	0,6447	0,6391	0,7368
	$t = 3 \text{ min}$	0,4188	0,4670	0,4586	0,6052
	$t = 4 \text{ min}$	0,2251	0,2893	0,2782	0,4735
	$t = 5 \text{ min}$	0,0314	0,1116	0,0977	0,3419
	$t = 6 \text{ min}$	-0,1623	-0,0660	-0,0827	0,2103

## 4.2. Utjecaj veličine tijela za usitnjavanje na specifičnu brzinu loma

Rezultati ovisnosti specifične brzine loma o različitim promjerima tijela za usitnjavanje, za oba uzorka, prikazani su na slikama 4.11. i 4.12.



Slika 4.11. Ovisnost funkcije selekcije o promjeru tijela za usitnjavanje pri  $n = 120 \text{ omin}^{-1}$

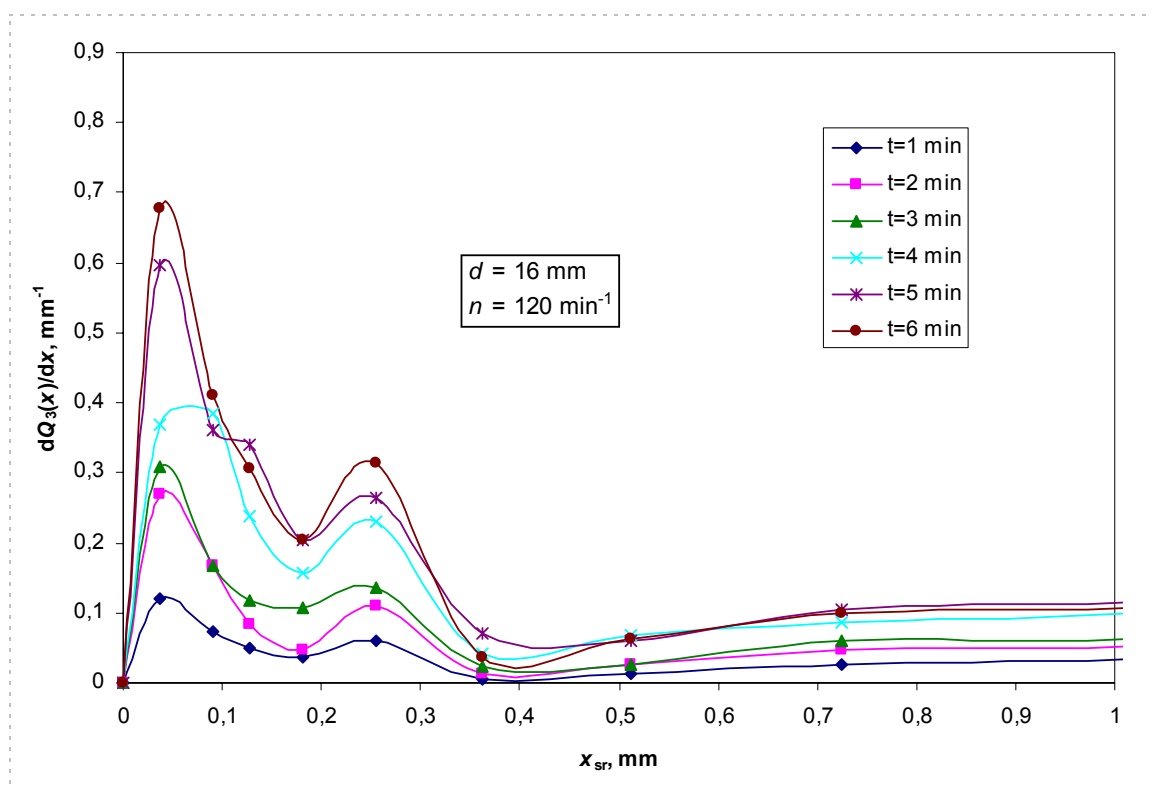


Slika 4.12. Ovisnost funkcije selekcije o promjeru tijela za usitnjavanje pri  $n = 240 \text{ omin}^{-1}$

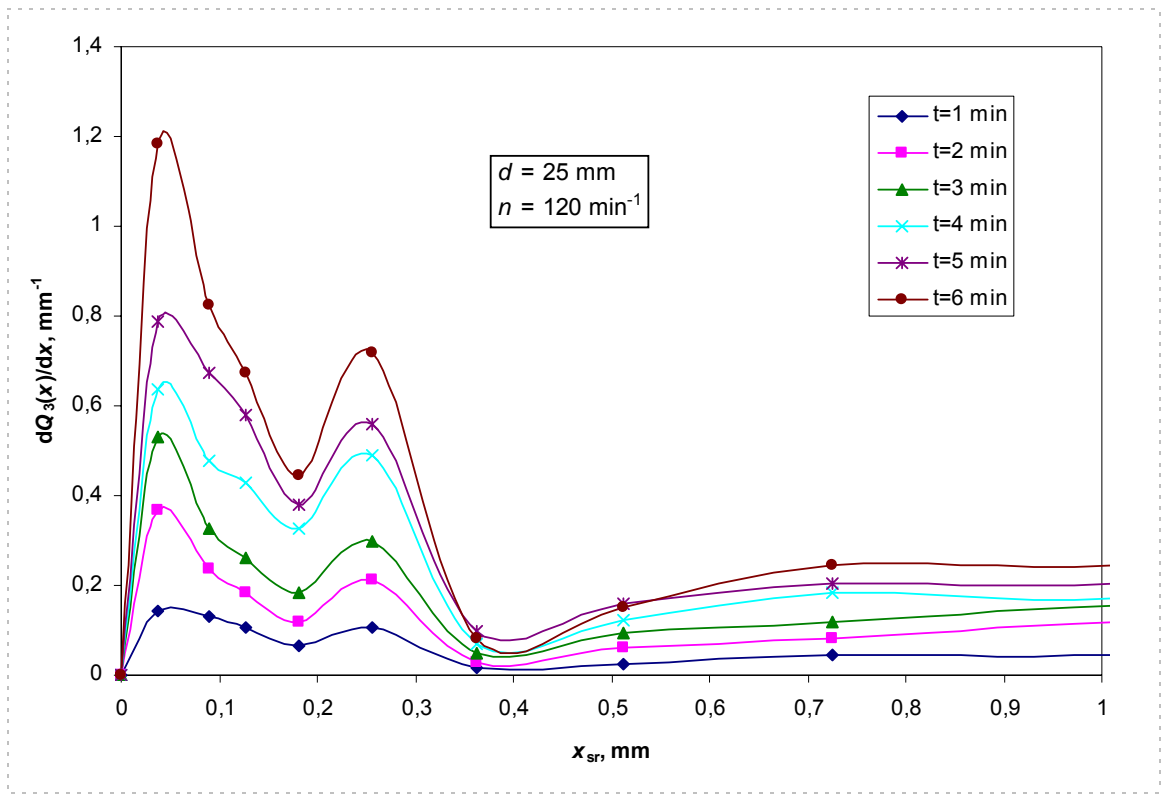
### 4.3. Raspodjela veličina čestica

Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom uz različite procesne uvjete, te usitnjavanje oba uzorka prikazana je slikama 4.13. i 4.28.

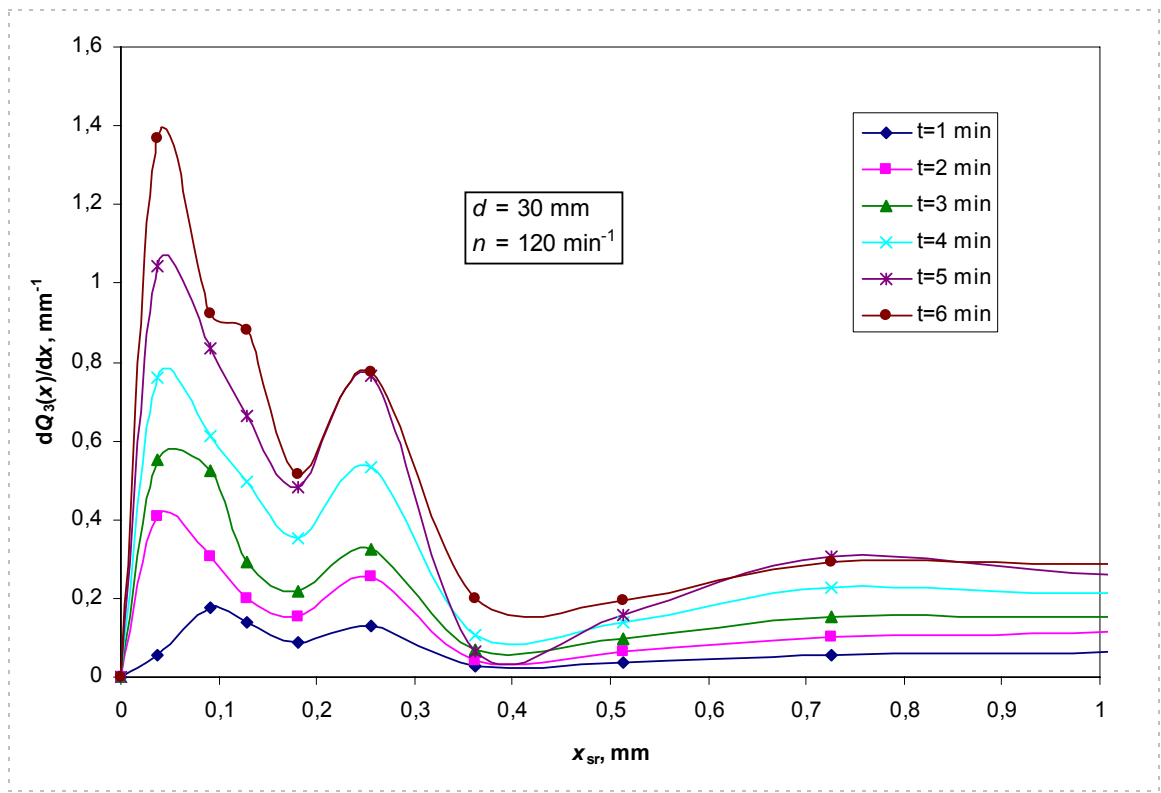
#### 4.3.1. Raspodjela veličina čestica usitnjenog uzorka dolomita



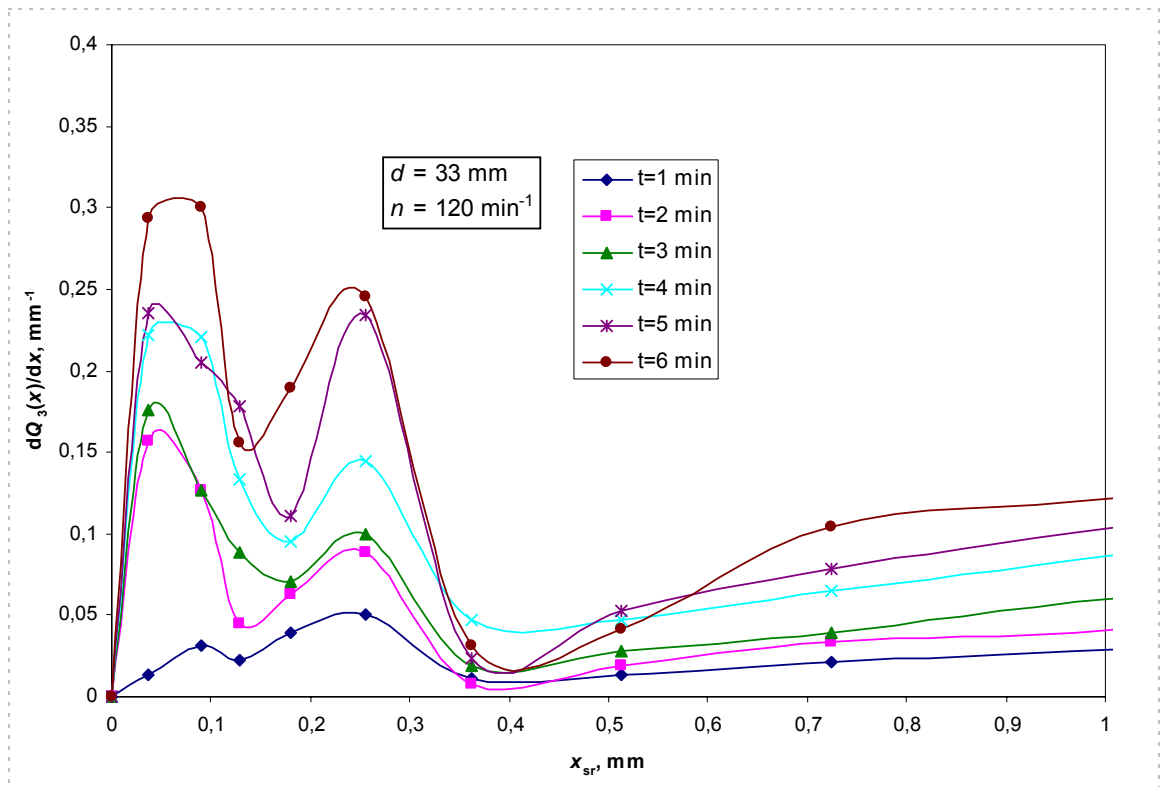
Slika 4.13. Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja ( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



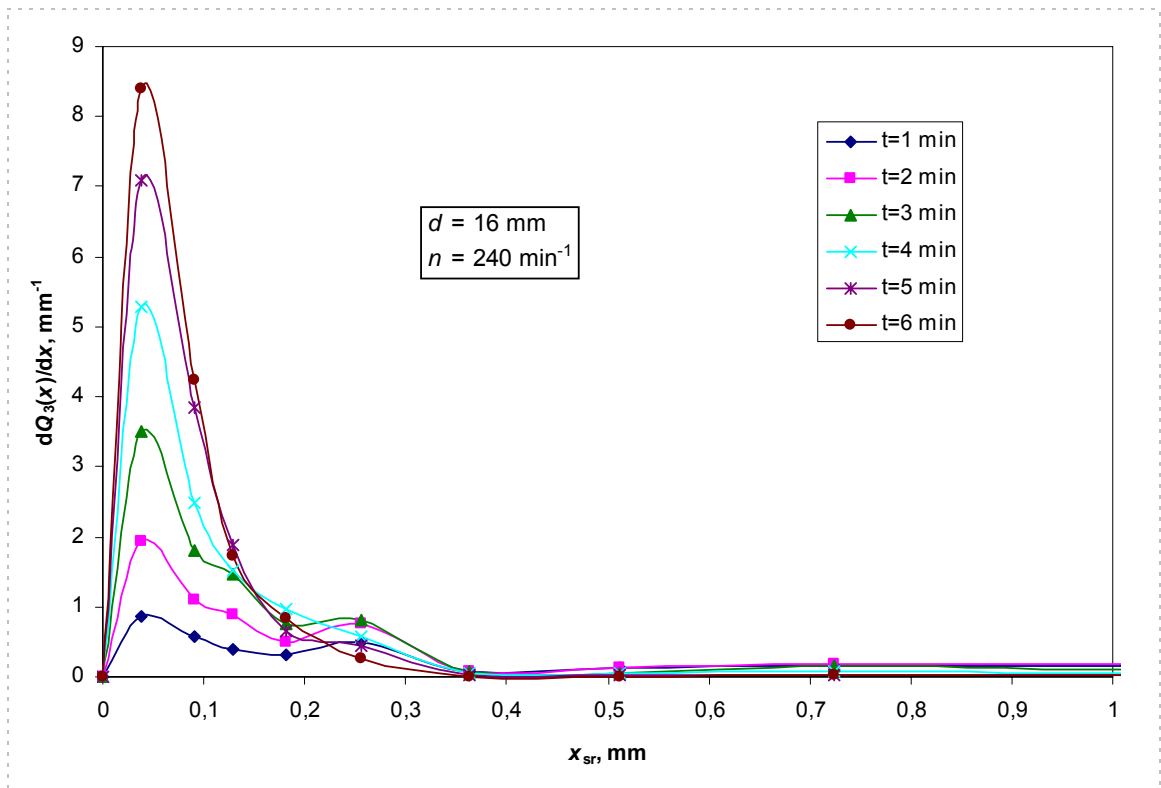
**Slika 4.14.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
 ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



**Slika 4.15.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
 ( $d = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )

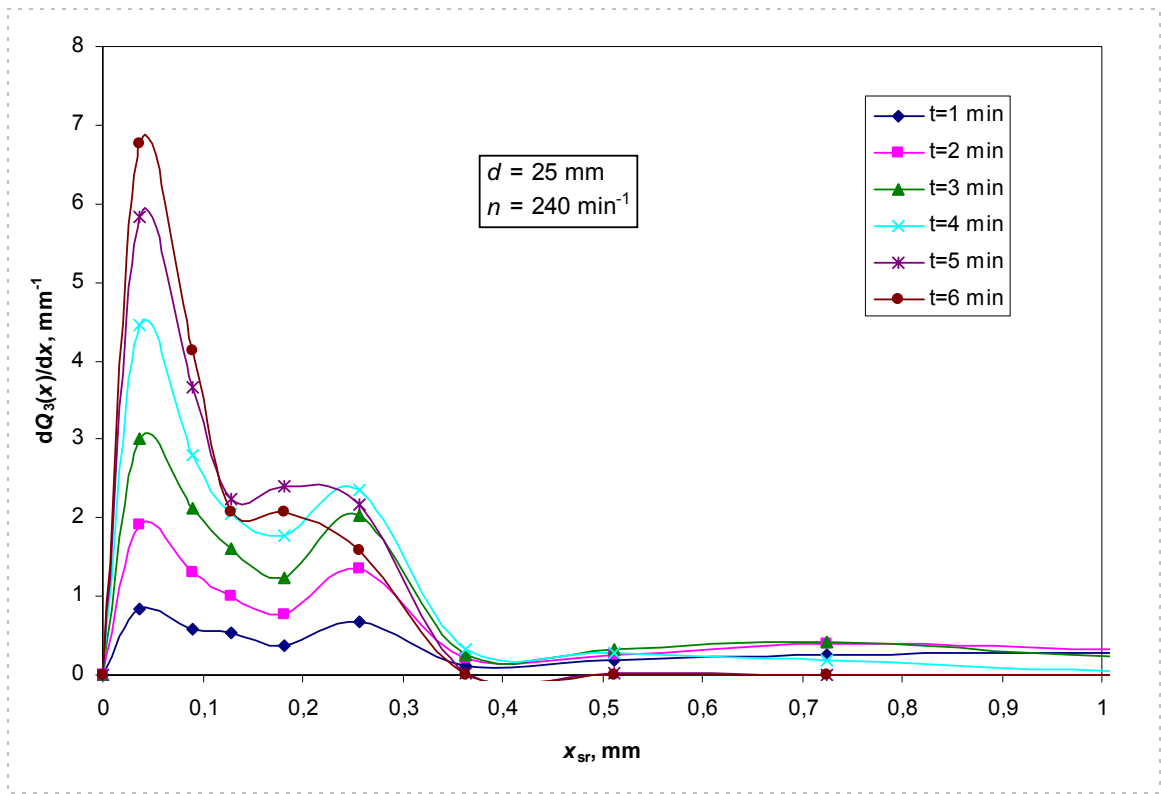


**Slika 4.16.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
( $d = 33 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )

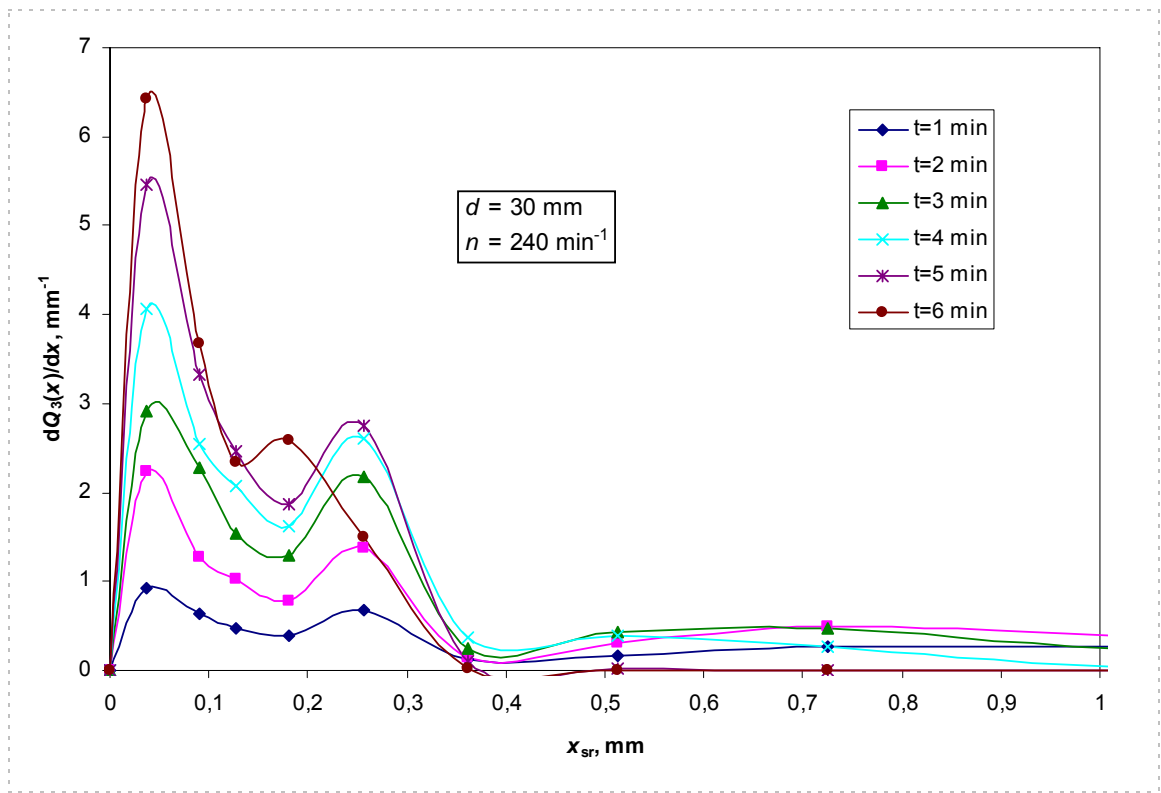


**Slika 4.17.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

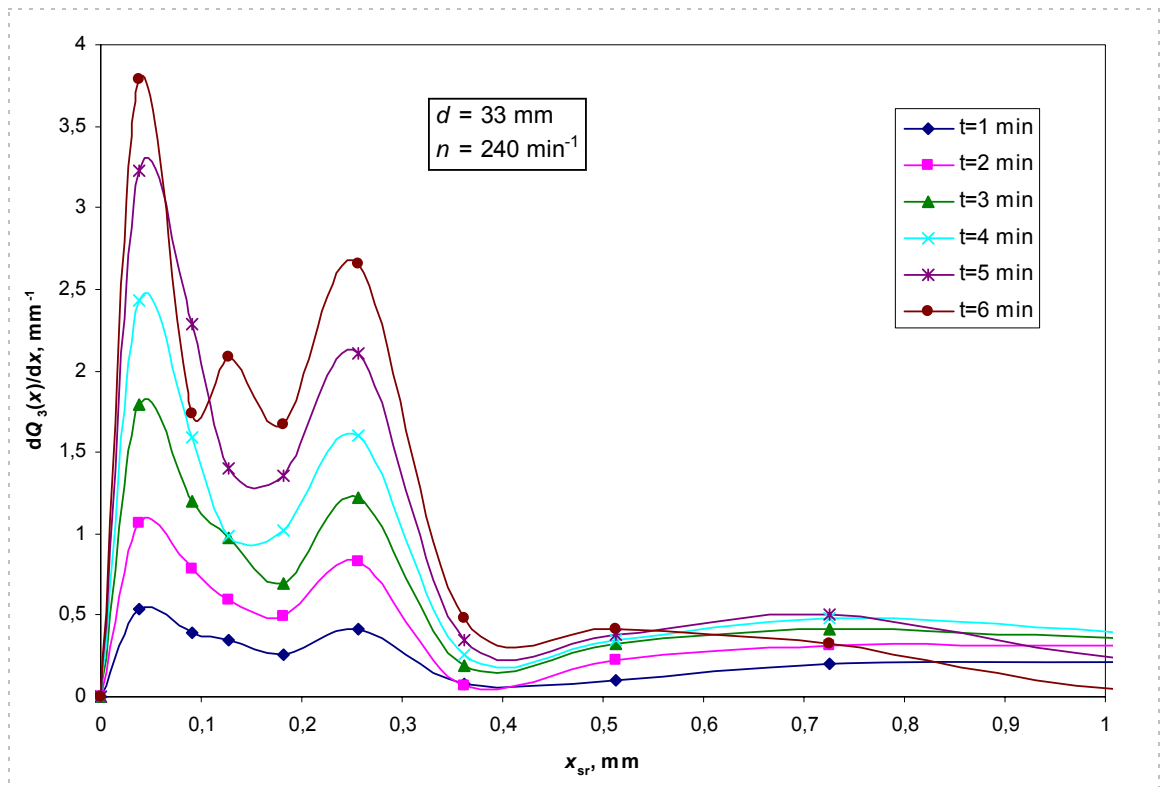




**Slika 4.18.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
 ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

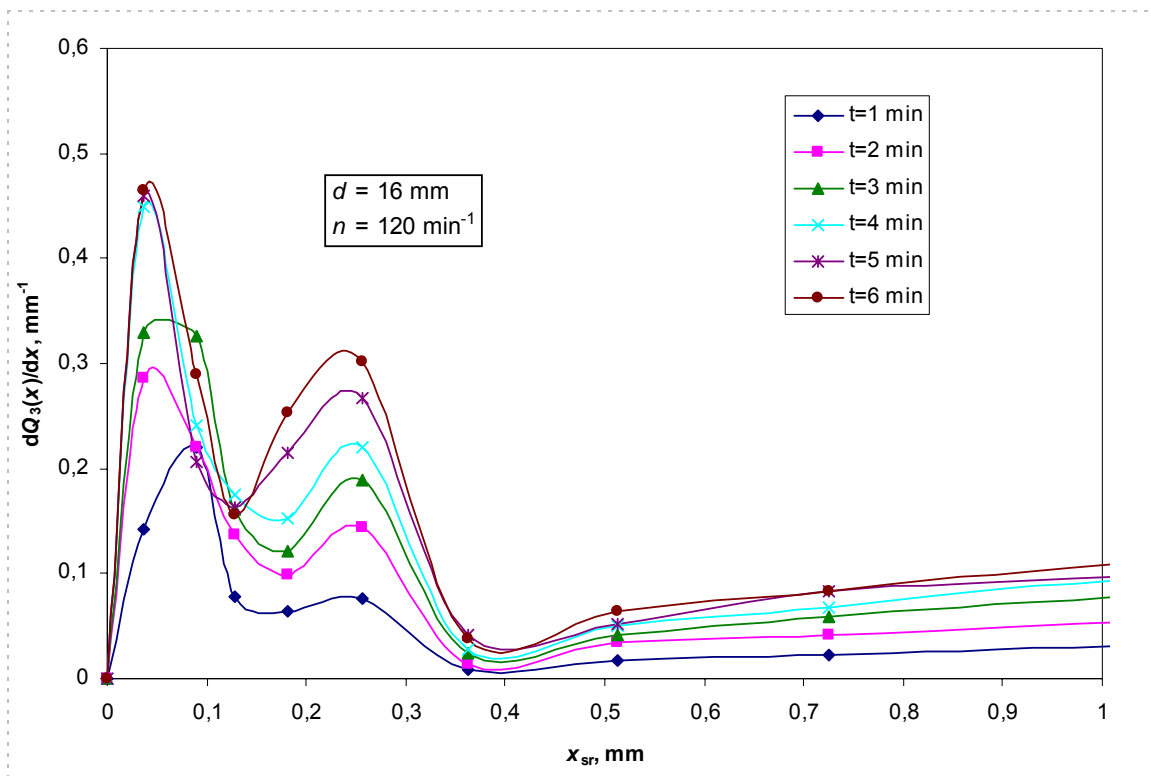


**Slika 4.19.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
 ( $d = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

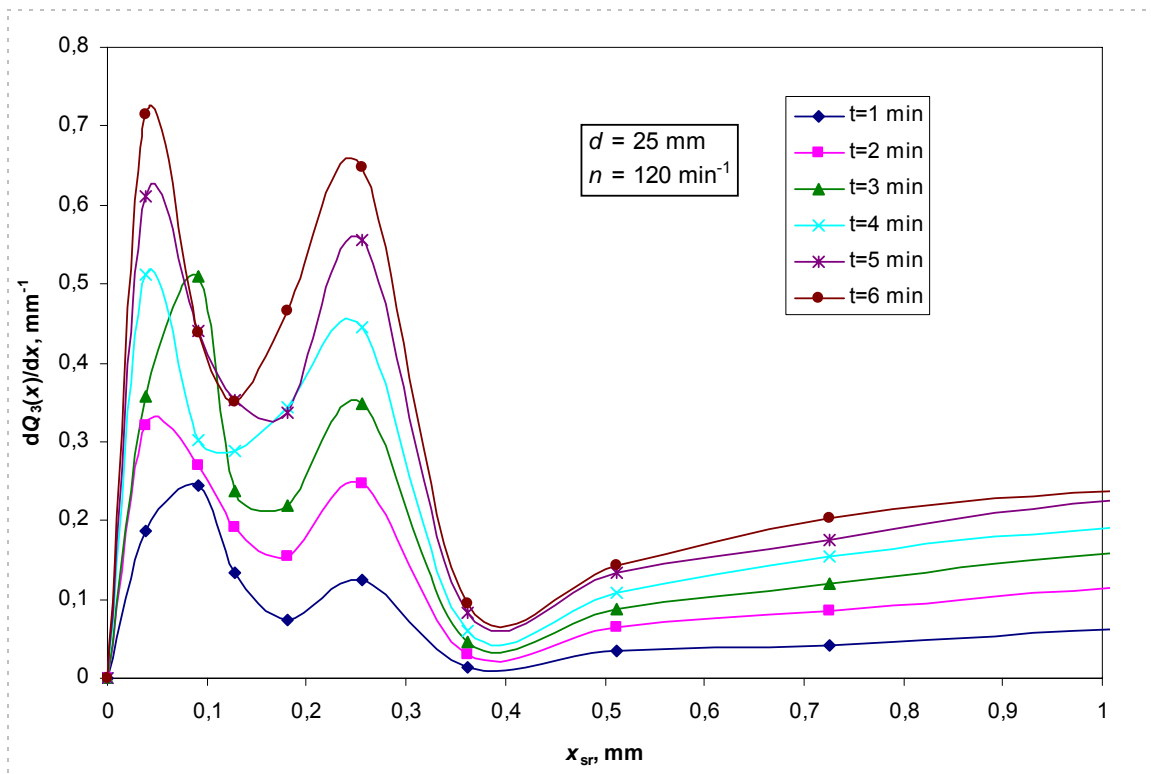


**Slika 4.20.** Promjena raspodjele veličina čestica s vremenom usitnjavanja  
 $(d = 33 \text{ mm}, n = 240 \text{ min}^{-1})$

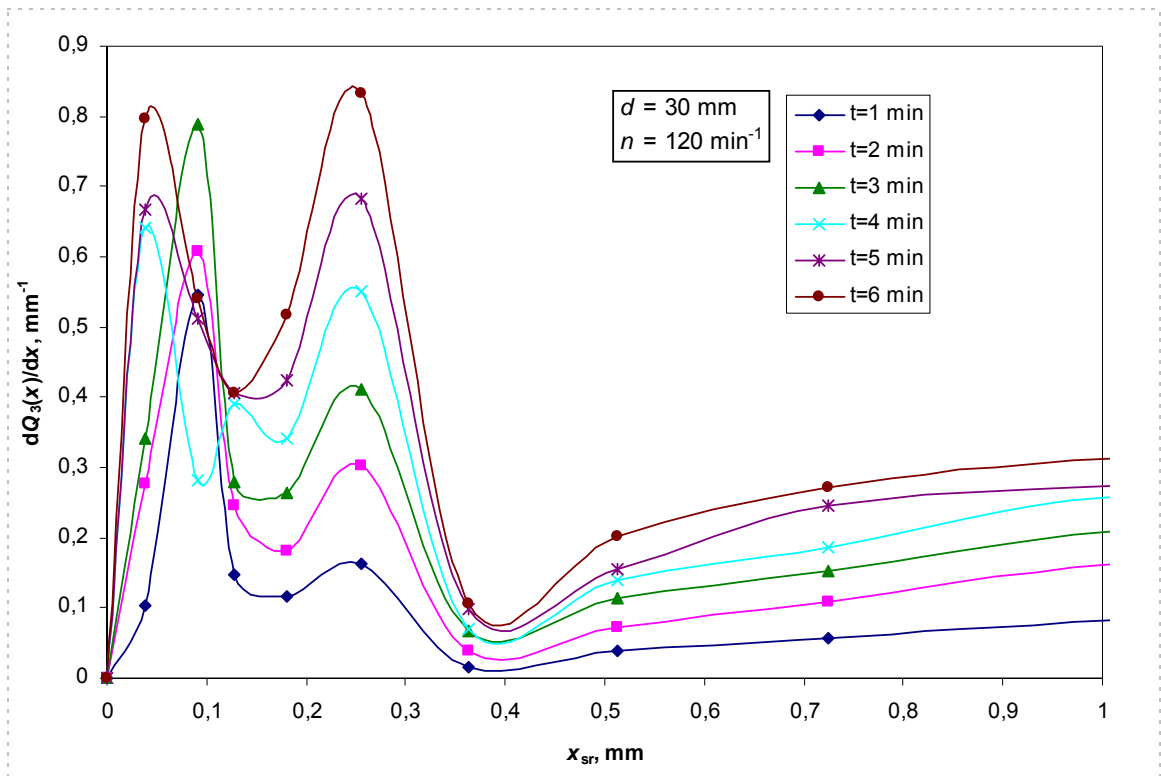
### 4.3.2. Raspodjela veličina čestica usitnjenog uzorka troske



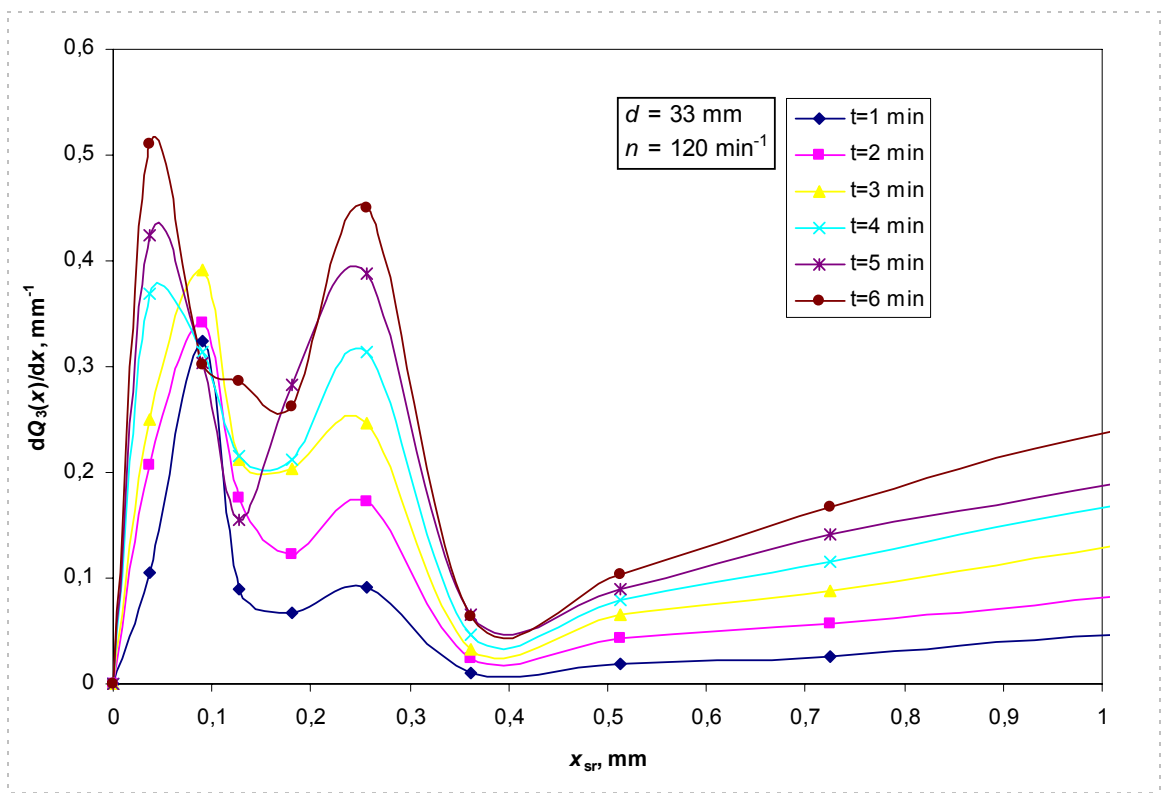
Slika 4.21. Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



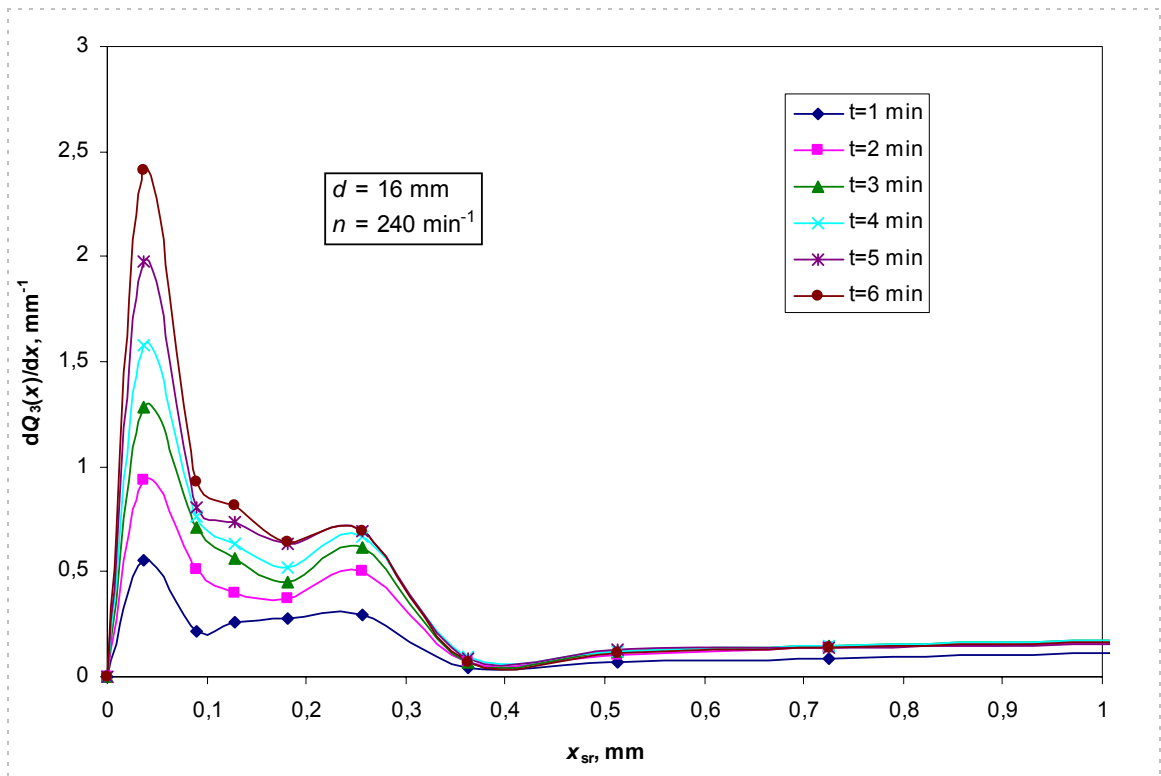
Slika 4.22. Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 120 \text{ min}^{-1}$ )



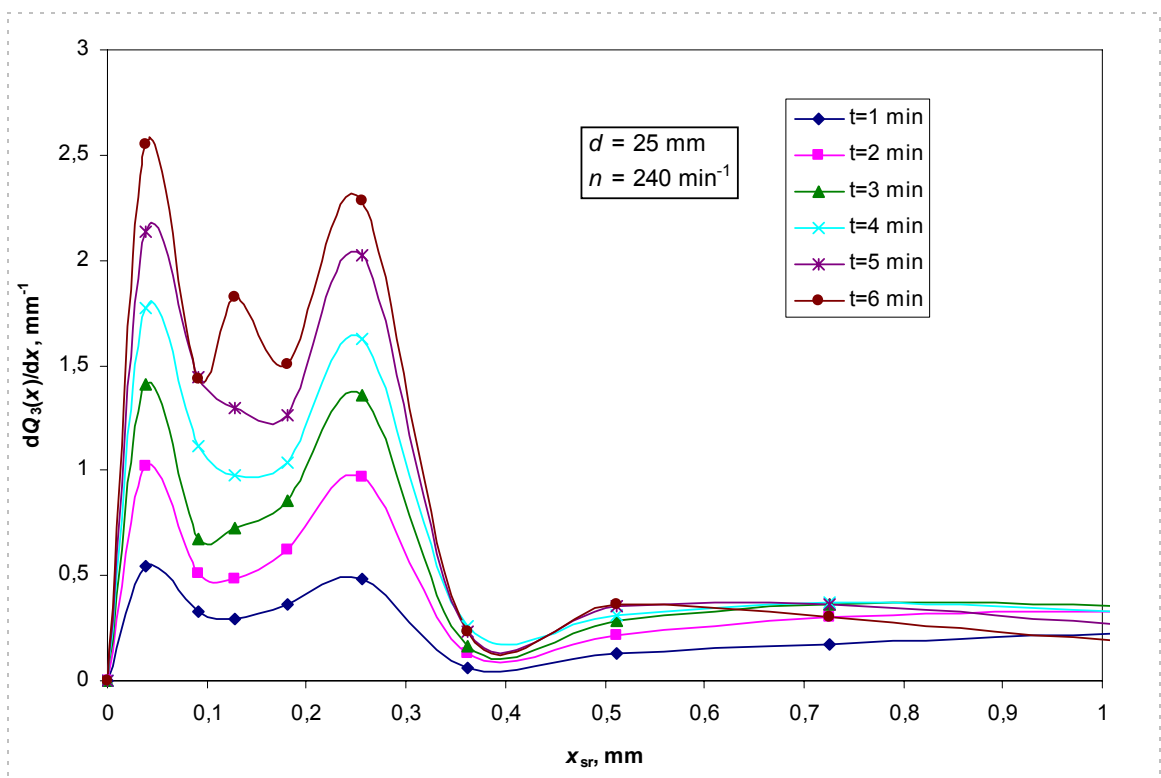
**Slika 4.23.** Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 30$  mm,  $n = 120$   $min^{-1}$ )



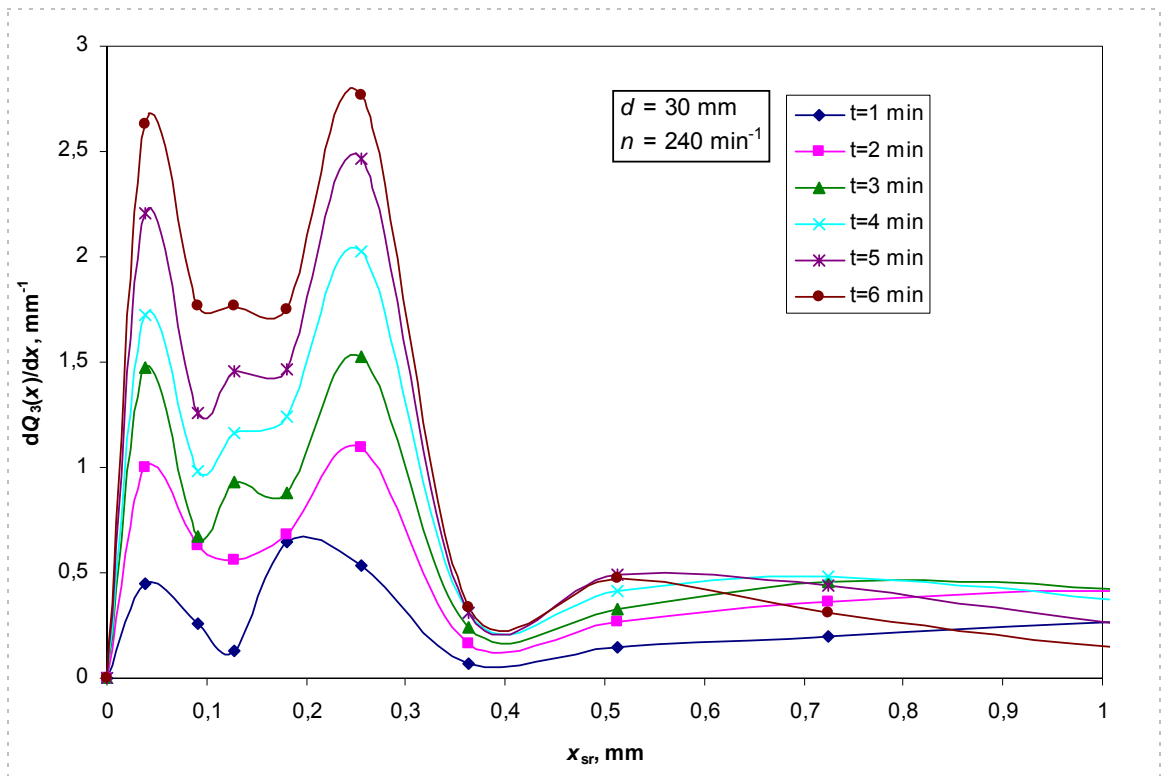
**Slika 4.24.** Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 33$  mm,  $n = 120$   $min^{-1}$ )



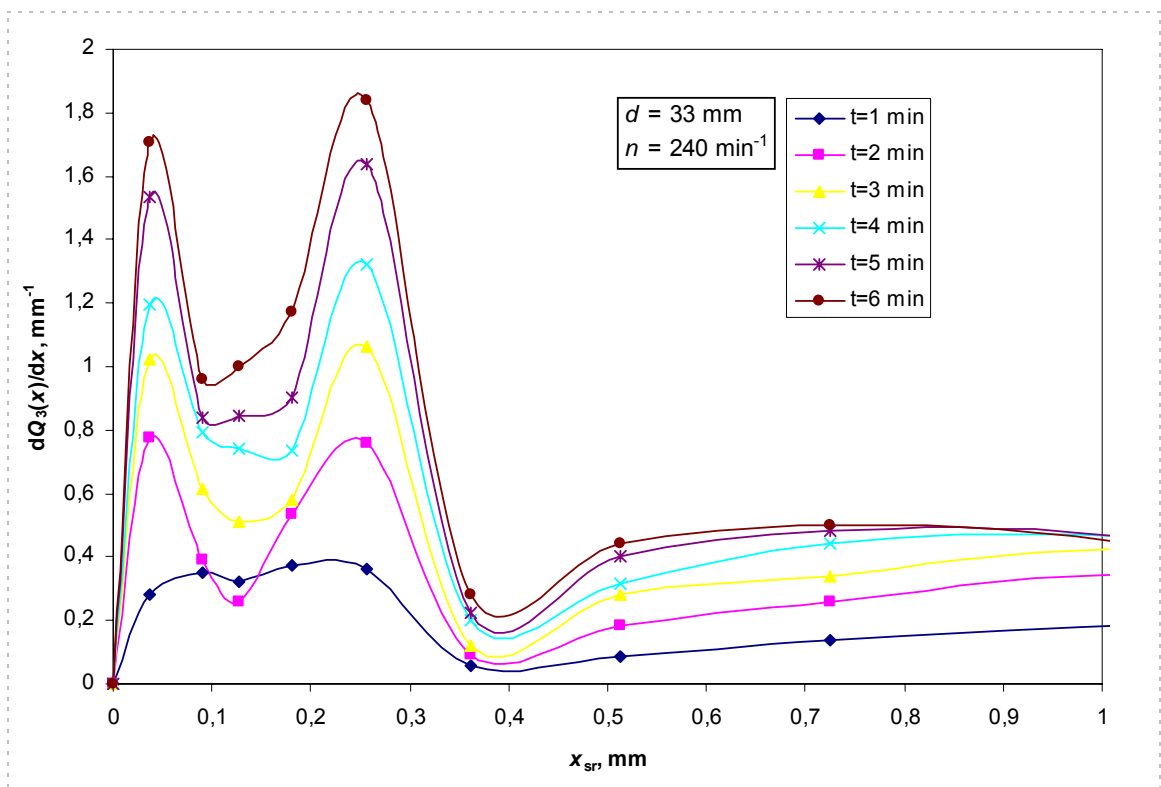
Slika 4.25. Promjena raspodjele veličina čestica uzorka troske s vremenom usitnjavanja ( $d = 16 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )



Slika 4.26. Promjena raspodjele veličina čestica uzorka troske s vremenom usitnjavanja ( $d = 25 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )



**Slika 4.27.** Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )



**Slika 4.28.** Promjena raspodjele veličina čestica uzorka **troske** s vremenom usitnjavanja ( $d = 33 \text{ mm}$ ,  $n = 240 \text{ min}^{-1}$ )

## 5. RASPRAVA

Na temelju promjene masenog udjela neusitnjenog materijala s vremenom određene su vrijednosti funkcije selekcije za početne veličinske intervale elektropećne troske i dolomita kod različitih promjera tijela za usitnjavanje, te za dva različita broja okretaja mlina. U početnoj fazi suhog usitnjavanja u kugličnom mlinu kinetika usitnjavanja opisuje se linearnim modelom. U slučaju usporavanja ili ubrzavanja procesa usitnjavanja dolazi do pojave nelinearnosti koja se može modelirati odgovarajućim izmjenama vjerojatnosti funkcije loma, uvođenjem faktora promjene.

Rezultati eksperimenata provedenih na uzorcima dolomita pokazali su da se količina neusitnjenog materijala linearno smanjuje s vremenom. Ovakva ovisnost ukazuje na to da je kinetika procesa suhog usitnjavanja dolomita u planetarnom mlinu prvoga reda.

Praćenjem promjene količine neusitnjene elektropećne troske s vremenom, uočeno je da dolazi do odstupanja od linearnosti. Naime, kinetika loma čestica početnog veličinskog intervala može odstupati od hipoteze kinetike prvoga reda, što se objašnjava postupnim povećanjem udjela sitnijih čestica uslijed čega se stupanj promjene smanjuje, a to za posljedicu ima pojavu smanjenja specifične brzine loma. Dobiveni rezultati prikazani su usporedno za sve procesne uvjete (sl. 4.1.-4.8.), a vrijednosti su dane u tablicama 4.1. i 4.2.

Budući da je kod troske uočena ovisnost funkcije selekcije o vremenu, određene su vrijednosti specifične brzine loma tijekom perioda usitnjavanja kao i faktor promjene. Izračunate vrijednosti faktora promjene kod svih procesnih uvjeta manje su od jedan što potvrđuje znatno usporavanje procesa.

Iz prikaza ovisnosti funkcije selekcije o vremenu, za uzorke troske usitnjavane pri 120 i 240 min<sup>-1</sup> (sl. 4.9. i 4.10.), može se uočiti pojava usporavanja čiji se intenzitet razlikuje za različite promjere tijela za usitnjavanje. Najmanji intenzitet usporavanja prisutan je kod usitnjavanja uzorka tijelima za usitnjavanje promjera 33 mm (sl. 4.9.) što se objašnjava činjenicom da tijela za usitnjavanje najvećeg promjera imaju najveće međuprostore u koje se čestice mogu „sakriti“ i na taj način izbjeći lom. Pretpostavi li se da do usporavanja loma dolazi zbog povećanja udjela sitnijih čestica, pri navedenim procesnim uvjetima produženo je vrijeme nastajanja „kritičnog“ udjela sitnijih čestica koji će uzrokovati usporavanje procesa. Kombinacija „skrivanja“ čestica i malog udjela sitnih čestica dovela je do smanjenog usporavanja, što za posljedicu ima veće vrijednosti srednje veličine zrna nakon usitnjavanja. Raspodjela veličina čestica prikazana slikama

4.16., 4.20., 4.24. i 4.28. potvrđuje manji udio čestica u području ispod 0,4 mm za eksperimente provedene u kuglicama (tijelima za usitnjavanje) promjera 33 mm.

Nadalje, razvidno je postojanje negativne vrijednosti specifične brzine loma (sl. 4.10.). Budući da specifična brzina loma predstavlja vjerojatnost da čestica bude odabrana za lom i slomljena na veličinu manju od donje granice intervala kojem pripada, negativne vrijednosti ukazivale bi na nedostatak fizikalnog smisla ove veličine. Postojanje negativnih vrijednosti može se tumačiti pojavom aglomeracije čestica što uzrokuje povećanje udjela čestica u početnog veličinskom intervalu. Pojava aglomeracije uočljiva je i na prikazu promjene raspodjele veličina čestica uzorka troske s vremenom usitnjavanja (slika 4.27. i 4.28.). Naime, vidljivo je da s vremenom usitnjavanja znatnije raste drugi pik bimodalne raspodjele u području oko 0,25 mm. Povećanje udjela u ovom području veličina posljedica je loma većih čestica, ali može biti uzrokovano i aglomeracijom iz područja manjih čestica. Budući da kod drugih procesnih uvjeta nije vidljiv ovakav efekt kod analize raspodjele veličina čestica, ponuđeno objašnjenje pojave aglomeracije nameće se kao moguće rješenje te uzrok pojavi negativnih vrijednosti funkcije selekcije.

Iz prikaza ovisnosti specifične brzine loma o promjeru tijela za usitnjavanje (slika 4.11. i 4.12.) uočljivo je postojanje maksimuma funkcije selekcije kod određene veličine tijela za usitnjavanje. Objašnjenje ovakve promjene pronalazi se u specifičnoj energiji udara,  $E_w$ , (jedn. 5.1.) koja ovisi o masi tijela za usitnjavanje ( $m$ ), masi uzorka koji se usitjava ( $W$ ) i relativnoj brzini međusobnih sudara tijela za usitnjavanje kao i tijela za usitnjavanje sa stijenkama mlina<sup>35</sup>.

$$E_w = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2W} \cdot m \cdot v_j^2 \quad (5.1.)$$

Naime, povećanjem promjera tijela za usitnjavanje postiže se učinkovitije usitnjavanje čestica većih veličina budući da tijela većih promjera rezultiraju sudarima većih specifičnih energija dostatnima za učinkovitiji lom većih čestica.

Također, uslijed međusobne interakcije tijela za usitnjavanje može doći do prijanjanja većih čestica koje stvarajući svojevrzni „štiti“, štite manje čestice. Taj utjecaj zaštite definiran je kao stupanj turbulencije toka u punjenju, izazvane nekim manjim česticama koje će tako biti uklonjene iz zone usitnjavanja<sup>30</sup>.

Analiza kinetike procesa usitnjavanja (tabl. 4.1. i 4.2.) upućuje na promjene specifične brzine loma sa promjenom broja okretaja mlina u smislu povećanja ovih vrijednosti. Intenzitet povećanja specifične brzine loma za trosku manji je od intenziteta povećanja za dolomit. Kod većeg broja okretaja veća je energija za usitnjavanje koja se prenosi na uzorak što uzrokuje povećanje specifične brzine loma. Manji intenzitet povećanja ovih vrijednosti za trosku pripisuje se znatno većoj tvrdoći troske u odnosu na dolomit,



odnosno činjenici da je osigurana kinetička energija nedostatna za intenzivniji lom (tablica 3.1.). Dolomit, znatno manje tvrdoće u odnosu na trosku, pri istim uvjetima će se brže slomiti. Ovakav efekt bi se naravno očekivao i pri manjem broju okretaja (slika 4.11.), međutim ovdje se pokazalo da su specifične energije loma za dolomit manje nego za trosku. To se objašnjava izuzetno velikim udjelom pora u uzorcima troske, odnosno postojanjem „defekata“ koji slabe strukturu materijala i uzrokuju smanjenje energetske praga pucanja materijala, a time i veće brzine loma unatoč većoj tvrdoći materijala.

S obzirom da dostupna literatura ne nudi podatke o rezultatima sličnih istraživanja ponašanja elektropećne troske u procesu suhog usitnjavanja u kugličnom mlinu, dobivene rezultate u ovom radu nije bilo moguće usporediti sa sličnim rezultatima ranijih istraživanja. Dobiveni rezultati mogu poslužiti kao smjernice za nastavak istraživanja u području obrade troske kao materijala nastalog pri proizvodnji čelika i njegovo prevođenje u materijal koji se s pravom može zvati sirovina koja može naći mnogostruku uporabljivost u različitim granama industrije.

## 6. ZAKLJUČAK

Praćenjem procesa suhog usitnjavanja dolomita u kugličnom mlinu utvrđena je linearna ovisnost promjene masenog udjela neusitnjenog materijala s vremenom što ukazuje da je kinetika usitnjavanja dolomita proces prvoga reda, dok je kod suhog usitnjavanja elektropećne troske uočeno odstupanje od linearnosti.

Kinetika usitnjavanja troske, opisana nelinearnim modelom, objašnjava se postupnim povećanjem udjela sitnijih čestica uslijed čega se proces usitnjavanja usporava i to za posljedicu ima manje vrijednosti specifične brzine loma.

Funkcija selekcije uvelike ovisi o promjeru tijela za usitnjavanje na što ukazuje pojava istog trenda kod svih provedenih eksperimenata, s izraženim maksimumom specifične brzine za kuglice promjera 30 mm. Pri tim je procesnim uvjetima lom čestica najučinkovitiji.

Sa povećanjem broja okretaja mlina povećava se specifična brzina loma i za dolomit i elektropećnu trosku, pri čemu je intenzitet povećanja manji za trosku, a objašnjenje leži u nedovoljnoj kinetičkoj energiji potrebnoj za lom čestice troske.

Provedena istraživanja ponašanja troske u odnosu na dolomit u procesu suhog usitnjavanja u kugličnom mlinu predstavljaju tek mali dio ukupnih istraživanja primjenjivosti elektropećne troske kao zamjene dolomita u cestogradnji.

## 7. SIMBOLI

$A$  - konstanta polinomne funkcije drugoga reda,  $s^{-1}$

$B$  - konstanta polinomne funkcije drugoga reda,  $s^{-2}$

$b_{i,j}$  - udio čestica veličine  $i$  dobivenih lomom čestica veličine  $j$  (funkcija raspodjele produkata loma)

$d$  - promjer tijela za usitnjavanje, m

$E_w$  - specifična energija udara, kWh  $t^{-1}$

$m$  - masa tijela usitnjavanje, kg

$n$  - broj okretaja,  $min^{-1}$

$Q_3$  - kumulativni udio čestica

$S_i$  - specifična brzina loma čestica veličine  $i$  (funkcija selekcije),  $s^{-1}$

$S_i(0)$  - specifična brzina loma čestica veličine  $i$  u vremenu  $t = 0$ ,  $s^{-1}$

$S_i(t)$  - specifična brzina loma čestica veličine  $i$  u vremenu usitnjavanja  $t$ ,  $s^{-1}$

$S_j$  - specifična brzina loma čestica veličine  $j$  (funkcija selekcije),  $s^{-1}$

$t$  - vrijeme, s

$V_k$  - volumen kuglica,  $m^3$

$v_j$  - relativna brzina gibanja pojedine kuglice,  $m s^{-1}$

$V_p$  - volumen posude mlina,  $m^3$

$W$  - masa uzorka, kg

$w_i(0)$  - maseni udio čestica veličine  $i$  prije usitnjavanja

$w_i(t)$  - maseni udio čestica veličine  $i$  u vremenu usitnjavanja  $t$

$w_j(t)$  - maseni udio čestica veličine  $j$  u vremenu usitnjavanja  $t$

$x_{sr}$  - srednja vrijednost veličine čestice,  $\mu m$

$\kappa$  - faktor promjene

## 8. LITERATURA

1. Nehdi, M., Ternary and quaternary cements for sustainable development, *Concrete International*, **23**, 04 (2001)35-41.
2. Tehnička enciklopedija, JLZ, Zagreb, 1979, br.6
3. <http://www.mineralco.net/dolomite/dolomite-use.php>
4. <http://www.mineralszone.com/minerals/dolomite.html>
5. British Geological Survey, Natural environment research Council, Mineral planing Factsheet, January 2006
6. Gojić, M., *Metalurgija čelika*, Izd.: Denona d.o.o., Zagreb, 2005
7. Božić, B., *Metalurgija gvožđa*, Beogradski izdavačko-grafički zavod, Beograd, 1973.
8. Kelly, T.D., Matos, G.R., Historical statistic for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Dtat Series 140, Oct. 2009.
9. *Proizvodnja nemetala i građevnog materijala*, Hrvatska gospodarska komora, Sektor za industriju, Zagreb, 2008.
10. Proctor, D.M.; Fehling, K.A.; Shay, E.C.; Wittenborn, J.L.; Green, J.J.; Avent, C.; Bigham, R. D.; Connoly, M.; Lee, B.; Shepker, T.O.; Zak, M.A.; *Physical and Chemical Characteristics of Blast Furnace, Basic Oxigen Furnace, and Electric Arc Furnace Steel Indusrtry Slags*, *Environ. Sci. Technol.* **34** (2000) 1576-1582.
11. <http://www.rmrc.unh.edu/tools/uguidelines/bfs1.asp>.
12. Kalyoncu, R. S. , *SLAG—IRON AND STEEL*, Annual Report 1997.
13. Bradaškja, B.; Triplat, J.; Dobnikar, M.; Mirtič, B. *A Mineralogical Characterization of Steel-Making Slag*, *Mater. Tehnol. Ljubljana* **38**, 3-4 (2004)205-208.
14. *SA Quarterly Association Connections*, **5**, 2(2007)1, [http://www.asa inc.org.au/Doc/ASA\\_Connections\\_Dec\\_2007.pdf](http://www.asa inc.org.au/Doc/ASA_Connections_Dec_2007.pdf).
15. Mihok, L.; Demeter, P.; Baricova, D.; Seilerova, K. *Utilization of ironmaking and steel making slags*, *Metalurgija* **45**,3, (2006)163-168.
16. <http://www.nationalslag.org/benefits.htm>.
17. Richard T. Bynum, Jr., *Insulation handbook*, McGraw-Hill Professional, NY 2001.
18. *Integrated Pollution Prevention and Control, BAT for the Production of Iron and Steel*, 2008., EC Directorate – General JRC Joint Research Centre, European IPPC Bureau
19. IISI, *World steel Annual Production 2009*. <http://www.ijsf.or.jp/en/statistics/MainCountries/index.html>.

20. Skuza, Z., Kolmasiak, C., Prusak, R., Possibilities for the Utilization of Metallurgical Slag in the Conditions of the Polish Economy, *Metalurgija* **48**, 2 (2009)125-128
21. Gupta, A., Yan, D.S., Mineral processing design and operation, Mathematical modelling in comminution, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, (2006)
22. Bilgili, E.; Yepes, J.; Scarlett, B. Formulation of a non-linear framework for population balance modeling of batch grinding: Beyond first-order kinetics, *Chem. Eng. Sci.* **61** (2006) 33-44
23. Austin, L.G., A discussion of equations for the analysis of batch grinding data, *Powder Technol.* **106** (1999) 71-77
24. Hraste, M., Mehaničko procesno inženjerstvo, Hinus, Zagreb, 2003.
25. Scarlett, B., Particle Populations – to balance or not to balance, that is the question, *Powder Technol.* **125** (2002) 1-4
26. Ipek, H., Ucbaş, Y., Yekeler, M., Hoşten, Ç., Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by Bond milling, *Ceramics Int.*, **31** (2005) 1065-1071
27. Austin, L.G., Kimpel, R.R., Luckie, P.T., The process engineering of size reduction, SME-AIME, New York, 1984.
28. Austin, L.G., Luckie, P.T., Methods for determination of breakage distribution parameters, *Powder Technol.* **5** (1971/72) 215-222
29. Austin, L.G., Bhatia, V.K., Experimental methods for grinding studies in laboratory mills, *Powder Technol.* **5** (1971/72) 261-266
30. Tangsathitkulchai, C., Acceleration of particle breakage rates in wet batch ball milling, *Powder Technol.* **124** (2002) 67-75
31. Lowell, S., Shields, J.E., Powder Surface Area and Porosity, Chapman & Hall, London, 1991.
32. Mikhail, R.S., Robens, E., Microstructure and Thermal Analysis of Solid Surfaces, John Wiley and Sons, New York, 1983.
33. Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E., *J. Am. Chem. Soc.*, **60** (1938) 309
34. Allen, T., Particle Size Measurement, Chapman and Hall Ltd, London, 1975
35. Mio, H., Kano, J., Saito, F., Kaneko, K., Optimum revolution and rotational directions and their speeds in planetary ball milling, *Int. J. Miner. Process.* **74S** (2004) S85-S92

## ŽIVOTOPIS

Rođena sam 12. travnja 1984. godine u Sisku gdje sam završila osnovnu školu. Zvanje prehrambenog tehničara stekla sam u Srednjoj školi Petrinja u Petrinji. Na Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije upisala sam se u akad. god. 2003./2004.

Tijekom akademske godine 2008./2009. sam radila kao demonstrator u Zavodu za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo. Kao vanjski suradnik sudjelovala sam u istraživačkim radovima i industrijskim projektima u području gospodarenja otpadom s posebnim naglaskom na karakterizaciji otpada i iznalaženju rješenja za njihovu uporabu u drugim granama industrije.

Imam 6 objavljenih znanstvenih radova u inozemnim časopisima i 1 stručni rad objavljen u domaćem časopisu. Bila sam sudionik na 8 domaćih i međunarodnih znanstvenih skupova u čijim zbornicima radova imam objavljena 4 znanstvena rada. Dobitnica sam Dekanove nagrade za najbolje studentske radove u akad. god. 2007./2008.

# POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

## A. ZNANSTVENA DJELATNOST

### 1. Znanstveni radovi

#### 1.1. Znanstveni radovi objavljeni u časopisima koji su zastupljeni u tercijarnim publikacijama: CC-u (Current Contents), SCI-ju (Science Citation Indeks), SCI-Expandedu

- 1.1.1. Sofilić, Tahir; Barišić, Delko; Rastovčan Mioč, Alenka; **Sofilić, Una**. Radionuclides in Steel Slag Intended for Road Construction. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. **284**, 1 (2010) 73-77, DOI 10.1007/s10967-009-0431-x.
- 1.1.2. Sofilić, Tahir; Barišić, Delko; **Sofilić, Una**. Monitoring of <sup>137</sup>Cs in Electric Arc Furnace Steel Making Process. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. **284**, 3 (2010) 615-622, DOI 10.1007/s10967-010-0513-9.
- 1.1.3. Sofilić, Tahir; Merle, Vesna; Rastovčan-Mioč, Alenka; Ćosić, Mario; **Sofilić, Una**. Steel Slag Instead Natural Aggregate in Asphalt Mixture. // Archives of metallurgy and materials, **55**, 3 (2010). (prihvaćen za objavljivanje).
- 1.1.4. Sofilić, Tahir; Mladenović, Ana; **Sofilić, Una**. Defining of EAF Steel Slag Application Possibilities in Asphalt Mixture Production. // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. **18**, 4 (2010). (prihvaćen za objavljivanje).
- 1.1.5. Matijašić, Gordana; Žižek, Krunoslav; **Sofilić, Una**; Mandić, Vanda; Skopal, Hana. Wet comminution kinetics of dolomite at laboratory scale. // *Chemical engineering and processing*. **48**, 4 (2009) 846-851.
- 1.1.6. Sofilić, Tahir; **Sofilić, Una**. Metallurgical Slag as Alternative Aggregate in Road Construction. // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. (prihvaćen za objavljivanje).

#### 1.2. Znanstveni rad recenziran s međunarodnog znanstvenog skupa

- 1.2.1. Sofilić, Tahir; Rastovčan-Mioč, Alenka; Ćosić, Mario; Merle, Vesna; Mioč, Boro; **Sofilić, Una**. EAF Steel Slag Application Possibilities in Croatian Asphalt Mixture Production 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry, 14-17 March 2010 Florence, Italy // *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, Volume 19, 2010* / Simberto Senni Buratti (ur.). Firenca, Italy : AIDIC Servizi S.r.l., 2010.109-115.
- 1.2.2. Sofilić, Tahir; Mladenović, Ana; **Sofilić, Una**. Characterization of EAF Steel Slag as Aggregate for Use in Road Construction. 4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry, 14-17 March 2010 Florence, Italy // *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, Volume 19, 2010* / Simberto Senni Buratti (ur.). Firenca, Italy: AIDIC Servizi S.r.l., 2010. 117-123.
- 1.2.3. Sofilić, Tahir; Ćosić, Mario; Mladenović, Ana; **Sofilić, Una**. Utilization of EAF Steel Slag as Alternative Aggregate in Road Construction. Proceedings Book of „Utilization of steelmaking slags with by-product recovery“ workshop, Krakow, May 10-11<sup>th</sup> 2010, Poland, Publishers: Wydawnictwo Naukowe „Akapit“, Krakow, Ed.: M. Karbowniczek; W. Slezak, pp 105-120.

### 1.3. Znanstveni rad recenziran s domaćeg znanstvenog skupa

- 1.3.1. Sofilić, Tahir; Rastovčan-Mioč, Alenka; Ćosić, Mario; Merle, Vesna; Mioč, Boro; **Sofilić, Una**. Steel Slag Application in Croatian Asphalt Mixture Production // *Conference Proceedings International Scientific Conference Management of Technology Step to Sustainable Production MOTSP 2010* / P.Ćosić, S. Dolinšek, G. Đukić, G. Barić (ur.). Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture Zagreb, Croatia ; Faculty of Management, University of Primorska, Koper, Slovenia, 2010. 1-6 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

## 4. Sudjelovanje na znanstvenim skupovima

### 4.2. Sudjelovanje na domaćim skupovima

- 4.2.1. Sofilić, Tahir; Mladenović, Ana; Matijašić, Gordana; Šipušić, Juraj; **Sofilić, Una**. Karakterizacija čeličanske troske u svrhu utvrđivanja mogućnosti njene primjene u proizvodnji asfaltne mješavine // *XXI. HRVATSKI SKUP KEMICARA I KEMIJSKIH INŽENJERA Knjiga sažetaka* / Predrag Novak, Katarina Piculjan, Sonja Smolec (ur.), Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, 2009. 346-346.
- 4.2.2. Mandić, Vanda; Skopal, Hana; **Sofilić, Una**. Određivanje specifične brzine loma čvrstih čestica u procesu diskontinuiranog usitnjavanja. // *Knjiga sažetaka VII. Susret mladih kemijskih inženjera*, Zagreb, 21. i 22. veljače 2008. // A. Sander i J. Prlić-Kardum (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, Fakultet kemijskog inženjerstva i Tehnologije, 2008.
- 4.2.3. **Sofilić, Una**; Mandić, Vanda; Skopal, Hana. Istraživanje mogućnosti korištenja neutralizacijskog mulja iz procesa kemijske pripreme čeličnih cijevi za vruće pocinčavanje u Željezari Sisak // *Knjiga sažetaka VII. Susret mladih kemijskih inženjera*, Zagreb, 21. i 22. veljače 2008. // A. Sander i J. Prlić-Kardum (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo Kemijskih inženjera i tehnologa, Fakultet kemijskog inženjerstva i Tehnologije, 2008. str. 63.
- 4.2.4. **Sofilić, Una**; Mandić, Vanda; Skopal, Hana. Prilog ispitivanju mogućnosti primjene industrijskog otpada u agrotehničkim mjerama // *Knjiga sažetaka XII. Ružičkini dani*, Vukovar, 18. i 19. rujna 2008. // S. Tomas (ur.). Vukovar: Hrvatsko Društvo Kemijskih inženjera i tehničara, Prehrambeno-tehnološki fakultet (PTF) Sveučilišta u Osijeku 2008.

## C STRUČNA DJELATNOST

### 4. Stručni rad objavljen u domaćem časopisu

- 4.1. **Sofilić, Una**; Mandić, Vanda; Skopal, Hana. Karakterizacija mulja iz procesa kemijske pripreme čeličnih cijevi za vruće pocinčavanje // *Kem.Ind.* **58**, 10 (2009) 433–440