

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Lucija Kreković

**MODELIRANJE UTJECAJA UDJELA GUME NA BRZINU DETONACIJE
EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za rudarstvo i geotehniku Rudarsko–geološko–naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Vinko Škrlec, dipl. ing. i prof. dr. sc. Mario Dobrilović, dipl. ing. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
ρ	g/cm^3	Gustoća
p_d	Pa	Tlak detonacije
v_d	m/s	Brzina detonacije
p_b	Pa	Tlak koji djeluje na stijenku bušotine
O ₂	-	Kisik
Si	-	Silicij
Al	-	Aluminij
Cl	-	Klor
Na	-	Natrij
Fe	-	Željezo
Ca	-	Kalcij
Mg	-	Magnezij
H ₂ O	-	Voda

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI.....	3
3.	EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE.....	4
4.	BRZINA DETONACIJE I TLAK NA STIJENKU MINSKE BUŠOTINE.....	7
5.	DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE.....	9
5.1	PERLIT	9
5.2.	VERMILKULIT.....	9
5.3.	STAKLENE MIKROKUGLICE.....	10
5.4.	PLASTIČNE MIKROKUGLICE.....	11
5.5.	POLISTIREN	12
5.6.	EKSPANDIRANI POLISTIREN (STIROPOR).....	12
5.7.	POLIURETANSKA PJENA.....	13
5.8.	UGLJEN U PRAHU	13
5.9.	PILJEVINA I DRVENO BRAŠNO	14
5.10.	OTPACI IZ PRERADE ŠEĆERNE TRSKE.....	15
5.11.	LJUSKE ŽITARICA I KIKIRIKIJA	15
5.12.	GRANULE CELULOZE	16
5.13.	RECIKLIRANA GUMA	16
6.	MJERENJA BRZINE DETONACIJE.....	18
6.1	RECIKLIRANA GUMA.....	18
6.2	MJERENJE BRZINE DETONACIJE.....	20
7.	ANALIZA I ZAKLJUČAK.....	25
8.	LITERATURA	28
9.	SAŽETAK.....	32
10.	SUMMARY.....	33

POPIS SLIKA

Slika 5-1. Zrnca perlita (https://iwarm-hr.techinfus.com/utepljenje/perlitovyj-uteplitel.html)... 9	9
Slika 5-2. Zrnca vermikulita (https://vitaverdeshop.si/product/vermikulit-2-5mm-100l/). 10	10
Slika 5-3. Staklene mikrokuglice (http://www.techapps.com/)..... 11	11
Slika 5-4. Plastične mikrokuglice (http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/)..... 11	11
Slika 5-5. Zrnca polistirena (https://www.stoklasa.ro/zapada-artificiala-bilute-polistiren-mini-10-g-x144716?barva=204652). 12	12
Slika 5-6. Zrnca ekspaniranog polistirena (https://nomis.hr/proizvod/stiropor/). 13	13
Slika 5-7. Poliuretanska pjena (https://hr.home-diary.net/7372306-paint-pu-foam)..... 13	13
Slika 5-8. Ugljen u prahu (https://www.njuskalo.hr/sve-ostalo/aktivni-ugljen-prahu-100g-oglas-34712582). 14	14
Slika 5-9. Drveno brašno (https://uvdarh.ru/hr/cakes/technology-of-production-of-wood-flour-on-the-technology-of-wood-flour-production.html). 14	14
Slika 5-10. Otpaci iz prerade šećerne trske (https://www.exportersindia.com/maharashtra/sugarcane-bagasse.htm). 15	15
Slika 5-11. Ljuske zobi (http://ba.underextract.com/info/how-much-beta-glucan-in-oat-bran-51957017.html). 16	16
Slika 5-12. Granule celuloze (https://www.shivainorganics.co.in/ip-bp-usp-micro-crystalline-cellulose-powder.htm). 16	16
Slika 5-13. Reciklirana guma (https://www.arcon-environmental.com.hr/hr-HR/Products/Tyre-Recycling). 17	17
Slika 6-1. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće. 18	18
Slika 6-2. Korištena reciklirana guma..... 18	18
Slika 6-3. Granulometrijski sastav gume 19	19
Slika 6-4. Elektronički sat Explomet 2..... 20	20
Slika 6-5. Fotografija emulzijskog eksploziva smanjene gustoće s dodatkom 10 % reciklirane gume. 21	21
Slika 6-6. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera Ø 23,5 mm.... 21	21
Slika 6-7. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije. 22	22
Slika 7-1. Usporedba izmjerenih i izračunatih brzina detonacije..... 26	26

POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Granoanaliza korištene reciklirane gume	19
Tablica 6-2. Brzine detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume (Hadžić, 2017).	23
Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U_v = v_d \pm 62$ (m/s). ...	23
Tablica 6-3. Srednje vrijednosti brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume.	23
Tablica 7-1. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerenih brzina detonacije s izračunatima.....	25
Tablica 7-2. Teoretska svojstva eksploziva smanjene gustoće s dodatkom gume proračunata termokemijskim računalnim kodom EXPLO05.....	27

1. UVOD

Emulzijski eksplozivi smanjene gustoće su, u osnovi, smjese emulzijske matrice i određene, povećane količine plinske faze s ulogom toplih točaka. Primjenom plinske senzibilizacije matrice granulama ekspandiranog polistirena, ovi su eksplozivi razvijani sa svrhom smanjenja vršne vrijednosti i impulsa djelujućeg tlaka plinova detonacije u miniranoj stijenskoj masi. Na taj način, kako se smanjuju i naprezanja u stijeni, tako se reducira širina zone drobljenja izvan rubnih područja minskog polja. Učinak smanjenja oštećene zone stijene kod podzemnih i površinskih miniranja je značajan, jer se posredno ostvaruju uštede, kako na troškovima izvođenja miniranja tako i na troškovima poboljšanja svojstava stijene nakon miniranja. Eksplozivi smanjene gustoće imaju i manju volumnu koncentraciju energije što omogućuje optimalan učinak za potrebno frakturiranje i fragmentiranje stijene čime se smanjuje udio izrazito sitnih frakcija odminiranog materijala u granulometrijskom sastavu. Pri tome se uočava i pozitivan utjecaj na intenzitet seizmičkog utjecaja miniranja u odnosu na uobičajene eksplozive za gospodarska miniranja putem smanjenja izazvanih brzina oscilacija stijene.

Kemijska energija, odnosno detonacijom oslobođena toplina djeluje prvotno na sredinu u kojoj se minira putem udarnog djelovanja ekspanzijom stlačenih plinova detonacije. Udarne energija pridonosi primarnom lomu stijene kod miniranja. Daljnjom ekspanzijom, plinovi ulaze u nastale i proširene pukotine, nadalje drobe i fragmentiraju stijenu te je pomiču iz prvotnog položaja što se opisuje kao sekundarno djelovanje odnosno plinsko ili potisno djelovanje. Kada plinovi u ekspanziji prodru do atmosfere, njihov se tlak izjednačuje sa iznosom atmosferskog tlaka.

Djelovanje eksplozivnog naboja na stjensku masu optimalno je u slučaju potpune iskorištenosti oslobođene energije za drobljenje stijene. U tom su slučaju, neželjeni gubici manifestirani u obliku seizmičkog djelovanja, u okolini minskog polja kao i razbacivanje materijala najmanji.

Smanjenje razine udarnoga djelovanja detoniranoga naboja, odnosno smanjenje tlaka plinovitih produkata na stijenu može se postići smanjenjem djelovanja kinetičke energije udara produkata u ekspanziji putem smanjenja gustoće eksploziva, vršnoga tlaka detonacije, impulsa djelovanja tlaka i koncentracijom, odnosno gustoćom punjenja eksploziva u bušotini.

Dodatcima, reaktivnim i inertnim, naglašavaju se ili reduciraju pojedina svojstva eksploziva sa svrhom optimalizacije djelovanja u stijeni i smanjenje potencijalno štetnih utjecaja na okolinu.

2. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI

Brzina detonacije je, po definiciji, brzina prostiranja detonacijskog vala kroz eksploziv. Neposredno iza fronte vala nalazi se zona kemijskih reakcija unutar koje se oslobađa toplina detonacija koja zagrijava visokostlačene plinovite produkte. Oni su nositelji djelovanja eksploziva u stijenskoj sredini te ekspanzijom obavljaju frakturiranje i fragmentiranje stijene.

Brzina detonacije je usko vezana s tlakom detonacije postulatima hidrodinamičke teorije detonacije. Tlak detonacije, uz volumen nastalih plinova određuje i radnu sposobnost, odnosno učinak eksploziva. Dodaci eksplozivu smanje ne gustoće imaju za svrhu, u promatranom slučaju, povećati tlak detonacije uz smanjenja iznosa brzine detonacije

Opći cilj istraživanja opisanih u radu je odrediti utjecaj dodatka reciklirane gume, na brzinu detonacije, odnosno smanjenja udarnog djelovanje detoniranog eksplozivnog naboja uz zadržavanja radne sposobnosti. Emulzijskom eksplozivu smanjene gustoće će se dodavati reciklirana guma u različitim volumnim omjerima te će se takvim smjesama izmjeriti brzina detonacije, a dobiveni rezultati će se usporediti s teoretskim podacima izračunatim pomoću termokemijskog koda EXPLO 05. Predmetni kod je korišten u režimu proračuna idealne detonacije, te će se usporediti računске i eksperimentalne vrijednosti brzina detonacija. Na taj način, kroz specifičan cilj, procijeniti će se primjenjivost tog koda, u idealnom režimu rada na neidealne eksplozive smanjene gustoće.

3. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE

Eksplozivi smanjene gustoće (engl. *Low Density Explosives*, LDE) uobičajeno imaju gustoću manju od $0,80 \text{ g/cm}^3$, a eksplozivi kojima je gustoća smanjena ispod $0,20 \text{ g/cm}^3$ nazivaju se eksplozivima jako smanjene gustoće (engl. *Ultralow Density Explosives*, ULDE) (Baranov et al, 1996).

Njih je moguće definirati kao eksplozive koji prvenstveno imaju primjenu za miniranja:

- kod kojih je potrebna ujednačena veličina zrna odminirane stijene sa smanjenjem udjela vrlo sitnih zrna (manje od 1 mm),
- za smanjenje troškova miniranja,
- za miniranja kod kojih je nužno ostvariti minimalna oštećenja iza minskog polja te smanjiti seizmički utjecaj miniranja.

Smanjenje naprezanja te oštećenja dijela stijene koja ostaje nakon miniranja, vrlo je važno kod iskopa tunela i podzemnih prostorija, prilikom iskopa za izgradnju podzemnih odlagališta radioaktivnog otpada jer se osim neposrednih troškova miniranja smanjuju i transportni troškovi manjeg volumena odminiranog materijala, troškovi ugrađenog materijala za poboljšanje nosivosti stijene te materijala potrebnog za osiguravanje nepropusnosti stijene. Osim spomenutih područja primjene, eksplozivi smanjene gustoće imaju tehnološku primjenu, npr. kod zavarivanja metala eksplozivom, oblikovanja predmeta eksplozivom, oblikovanja umjetničkih predmeta energijom eksploziva i slično (Škrlec, 2015).

Osnovno načelo izvedbe eksploziva smanjene gustoće izvodi se dodavanjem materijala koji ima značajno manju gustoću od eksploziva. Materijali koji se dodaju eksplozivima mogu se svrstati u dvije grupe:

- inertni materijali (perliti, vermakuliti, staklene mikrokuglice, plastične mikrokuglice i sl.) i
- materijali koji imaju mogućnost sagorijevanja, odnosno mogućnost sudjelovanja u kemijskoj reakciji oksidacije (polistiren, ekspanzirani polistiren, poliuretanska pjena, ugljen u prahu, piljevina i drveno brašno, otpaci proizvodnje šećera, ljuske žitarica i kikirikija, granule celuloze i sl.).

Prva istraživanja na razvoju eksploziva smanjene gustoće počela su 60-ih godina prošlog stoljeća na smanjenju gustoće ANFO-eksploziva, dodavanjem raznih materijala manje gustoće. Istraživanja su bila usmjerena na razvoj eksploziva koji bi se mogao jednostavno

pripremiti na mjestu upotrebe i koji bi bio komercijalno isplativ (Baranov et al, 1996, Rock et al, 2005).

U Norveškoj je početkom 60-ih godina prošlog stoljeća prvi put zabilježena upotreba eksploziva smanjene gustoće. Upotrijebljena je mješavina ANFO-eksploziva i piljevine u volumnom omjeru 50:50 za izvođenje miniranja (Nielsen i Heltzen, 1987). Prvi komercijalni eksploziv smanjenje gustoće na bazi ANFO i EPS bio je Isanol. (Heltzen i Kure, 1979, Nielsen i Heltzen, 1987, Rock et al, 2004).

Baranov i suradnici (1976) su prvi u tadašnjem Sovjetskom Savezu koristili ekspanzirani polistiren (EPS) za razvoj eksploziva smanjene gustoće. EPS su miješali s gospodarskim eksplozivima u različitim omjerima u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine (Baranov et al 1996).

Niz istraživača modificirao je ANFO eksploziv smanjivanjem gustoće sredstvima kao što su polistiren (Wilson i Moxon 1989), ekspanzirani polistiren (Baranov et al 1996, , Hunter et al, 1993, Sheahan i suradnici 1998, Silva 2007), piljevina (Johnson 1996, Pal Roy i Mohatny 2002,), piljevina i iskorištena mineralna ulja (Pal Roy et al, 2012), organski otpaci iz proizvodnje šećera, (Rock et al, 2005, Pal Roy et al, 2012). kuglice perlita (Forsyth suradnici 1997, Akbari Mousavi i suradnici 2004, 2005), guma (Harries i Gribble 1993), kukuruz, ugljen, pepeo (Curtis 1997), ljske pšenice (Beach i suradnici 2004), ljske riže (Rock 2004). Postignute su gustoće eksploziva do $0,15 \text{ g/cm}^3$, a zabilježene brzine detonacija kretale su se od 1800 m/s – 3500 m/s . Istraživanja su pokazala da se smanjenjem gustoće smanjuje brzina detonacije, tlak i naprezanja u stijeni, a da se povoljno djeluje na oštećenje stijene i na smanjenje seizmičkih efekata uz zadovoljavajuće drobljenje stijene.

Smanjenje gustoće primjenjivalo se i na vodene gelove i emulzijske eksplozive:

- Armstrong i Moxon (1990) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva miješajući tri vrste matrice emulzijskoga eksploziva, uz dodatak 1,5 % masenog udjela staklenih mikrokuglica, s neekspanziranim polistirenom, perlitom ili piljevinom. Mješavinama gustoća od $0,8 \text{ g/cm}^3$ do $1,05 \text{ g/cm}^3$ izmjerene su brzine detonacije od 3000 m/s do 5100 m/s .
- Jackson (1993) je smanjio gustoću vodenih gelova granulama amonij-nitrata i kuglicama EPS-a s ciljem razvoja novog eksploziva smanjene gustoće u svrhu očuvanja stabilnosti konturne površine. Eksploziv smanjene gustoće nazvao je vodeni gel male snage (engl. *Low Strength Water Gel Explosive*). Izmjerio je brzine detonacije u

rasponu od 2400 m/s do 3000 m/s za gustoće od 0,40 g/cm³ do 0,70 g/cm³ (Jackson, 1993).

- Stachura i Cumerlato (1995) su uspješno smanjili gustoću vodoplastičnom eksplozivu na 0,50 g/cm³ i koristili su ga za konturna miniranja u bušotinama Ø 270 mm (Brent i Armstrong, 1998).
- Sil'vestrov i suradnici (2010) su smanjili gustoću emulzijskih eksploziva s ciljem korištenja eksploziva smanjene gustoće za eksplozivno zavarivanje. Gustoću su smanjivali na način da povećanjem masenog udjela staklenih mikrokuglica do Smiješali su eksploziv gustoće 0,50 g/cm³, s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2100 m/s, koji su uspješno primijenili za eksplozivno zavarivanje (Sil'vestrov et al, 2010).
- Cordova i suradnici (2012) su patentirali emulzijski eksploziv smanjene gustoće izveden od emulzijske matrice senzibilizirane mjehurićima dušika s rasponom gustoća od 0,50 g/cm³ do 0,90 g/cm³ (Cordova et al, 2012).
- Silva i Orlandi (2013) su proizveli novi eksploziv smanjene gustoće koji su nazvali PANFO. Eksploziv se sastoji od ekspaniranog perlita obloženog tankim slojem amonijeva nitrata uz dodatak goriva. Gustoća takvog eksploziva je od 0,40 g/cm³ do 0,45 g/cm³, s brzinama detonacije od 1800 m/s do 2000 m/s (Silva i Orlandi, 2013).
- Singh i suradnici (2013) su gustoću emulzijskog eksploziva smanjili s inicijalnih 1,10 g/cm³ na 0,65 g/cm³ dodavanjem sredstva za smanjenje gustoće, ne navodeći koje sredstvo su koristili (Singh et al, 2013).
- Maranda i suradnici (2014) su smanjivali gustoću emulzijskih eksploziva na način da su emulzijskoj matrici dodavali različite masene udjele plastičnih mikrokuglica. Mjerili su brzinu detonacije i tlak zračnog udarnog vala (Maranda et al, 2014).
- Kumar i suradnici (2017) je koristio *Flexigel*, emulzijski eksploziv smanjene gustoće u tečnom stanju, s rasponom gustoća od 0,8 g/cm³ do 1,1 g/cm³ i pripadajućim brzinama detonacije od 2000 m/s do 4200 m/s za smanjenje prekoprofilnih miniranja i seizmičkih efekata miniranja (Kumar et al, 2017).
- Kumar i Mishra (2020) su istraživali mogućnost smanjenja seizmičkih efekata miniranja eksploziva smanjene gustoće u odnosu na emulzijski eksploziv. Koristili su eksploziv gustoće 0,8 g/cm³ te su uz smanjenje brzine detonacije izmjerili i smanjenje brzina oscilacija, u smislu seizmičkog utjecaja za 40 % (Kumar i Mishra, 2020).

4. BRZINA DETONACIJE I TLAK NA STIJENKU MINSKE BUŠOTINE

Brzina detonacije je svojstvo koje pruža informaciju o radnoj sposobnosti eksploziva, a o njenoj veličini ovisi i tlak detonacije te impuls tlaka u bušotini. Brzina detonacije određuje se prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi.14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)*.

Uopćena zavisnost tlaka detonacije o brzini detonacije i gustoći iskazana je obrascem 3-1:

$$p_d = \frac{\rho v_d^2}{(1 + \gamma_{CJ})} \quad (3-1)$$

gdje su:

p_d – tlak detonacije (Pa),

ρ – gustoća eksplozivne tvari (kg/m^3),

v_d – brzina detonacije (m/s),

γ_{CJ} – koeficijent adijabatske ekspanzije plinovitih produkata detonacije u CJ ravnini.

Koeficijent adijabatske ekspanzije zavisi od vrste eksploziva i uvjeta u kojima se detonacija odvija. Za većinu eksploziva u čvrstom stanju, gustoće od $1,00 \text{ g/cm}^3$ do $1,80 \text{ g/cm}^3$, γ_{CJ} iznosi približno 3 te obrazac 3-1 poprima oblik 3-2:

$$p_d = \frac{\rho v_d^2}{4} \quad (3-2)$$

Tlak na stijenk u minske bušotine odnosi se na tlak plinova oslobođenih detonacijom eksplozivnog punjenja u minskoj bušotini koji prelazi na stjenku minske bušotine.

Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stjenku bušotine jednak tlaku eksplozije odnosno iznosi polovicu tlaka detonacije (Persson et al. 1994, Silva 2007), a prikazan je obrascem 3-3 :

$$P_b = \frac{\rho \cdot v_d^2}{8} \quad (3-3)$$

gdje je:

P_b – tlak koji djeluje na stjenku bušotine (Pa).

Ukoliko minske bušotine nisu potpuno napunjene odnosno ukoliko se koristi eksplozivno punjenje znatno manjeg promjera u odnosu na promjer minske bušotine tada se tlak u minskoj bušotini razlikuje od tlaka eksplozije.

Iz prethodno navedenih obrazaca je vidljivo da tlak koji djeluje na stjenku bušotine, kod potpuno napunjenih minskih bušotina, te izazvana naprezanja u stijeni prvenstveno ovise o brzini detonacije eksploziva i o njegovoj gustoći.

Ovisnost brzine detonacije o gustoći eksploziva može se izraziti eksperimentalno dokazanom vezom prema obrascu 3-4 (Silva, 2007):

$$v_d = x + y \cdot \rho \quad (3-4)$$

gdje su:

x, y – eksperimentalno određene konstante za pojedinu eksplozivnu tvar.

5. DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE

U daljnjem tekstu su prikazani najčešći dodaci eksplozivima s kojima se smanjuje gustoća samih eksploziva.

5.1 PERLIT

Perlit je eruptivni aluminijsko-silikatni mineral pjenaste građe, koji se mehanički usitnjava i kratko zagrijava na temperature iznad 870 °C. Pri tome voda sadržana u mineralu prelazi u vodenu paru i napuhuje materijal te povećava njegov volumen za 15 do 20 puta. Nastali proizvod je bijeli granulat veličine zrna i do 6 mm. Pojedinačna zrna se sastoje od više ćelija, u kojima je zarobljen zrak. Svrstan je u kemijski inertne materijale s pH vrijednošću 7. Gustoća perlita je od 0,032 g/cm³ do 0,15 g/cm³. Perlit se sastoji od 47,5 % O₂, 33,8 % Si, 7,2 % Al, 3,5 % Cl, 3,4 % Na, 0,6 % Fe, 0,6 % Ca, 0,2 % Mg, 0,2 % elemenata u tragovima i 3 % H₂O u kristalnoj rešetci. Ukupni porozitet perlita je 50 % – 75 % volumena (Akbari Mousavi et al, 2005, <http://www.milosminingmuseum.gr/>).

Zrnca perlita su prikazana na slici 5-1.



Slika 5-1. Zrnca perlita (<https://iwarm-hr.techinfus.com/uteplenje/perlitovyj-uteplitel.html>).

5.2. VERMILKULIT

Vermikulit je geološki naziv za skupinu minerala Mg, Fe i Al silikata sa zeolitskom vodom koja je zatvorena između ljuskastih kristala. Kod naglog zagrijavanja na visokoj

temperaturi voda prelazi u paru koja razbije ljuskaste kristale u oblik pahulje, odnosno ekspandiraju i u unutrašnjosti pahulje sadržavaju puno slojeva zraka. Negoriv je, bez mirisa, netopljiv u vodi i ima veliku otpornost prema djelovanju kiselina i lužina što ga svrstava u kemijski inertne materijale. Gustoća vermikulita je od $0,07 \text{ g/cm}^3$ do $0,13 \text{ g/cm}^3$. Ukupni porozitet vermikulita je 70 % – 80 % volumena (<https://themajka.com/vermikulit-i-gdje-ga-nabaviti-t49.html>).

Zrnca vermikulita su prikazana na slici 5-2.



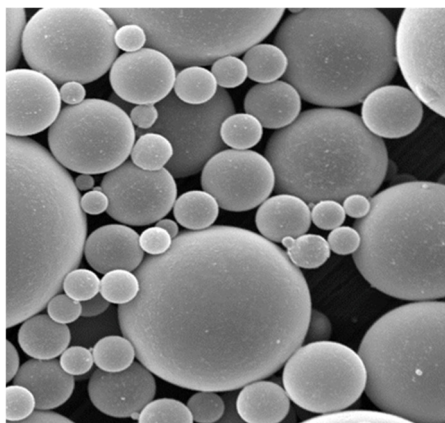
Slika 5-2. Zrnca vermikulita (<https://vitaverdeshop.si/product/vermikulit-2-5mm-100l/>).

5.3. STAKLENE MIKROKUGLICE

Staklene mikrokuglice se uobičajeno koriste kao senzibilizatori emulzijskih eksploziva, vodenih gelova i heavy-ANFO eksploziva. Promjer staklenih mikrokuglica je od $10 \mu\text{m}$ do $200 \mu\text{m}$, a debljina stjenke im je $1 \mu\text{m}$. Gustoća im je u rasponu od $0,09 \text{ g/cm}^3$ do $0,37 \text{ g/cm}^3$. (<http://www.potterseurope.org/default.asp?MIS=49>)

S obzirom na malu gustoću mikrokuglica moguće ih je koristiti kao sredstvo za smanjenje gustoće eksploziva.

Staklene mikrokuglice su prikazane na slici 5-3.



Slika 5-3. Staklene mikrokuglice (<http://www.techapps.com/>).

5.4. PLASTIČNE MIKROKUGLICE

Plastične mikrokuglice nastaju dovođenjem topline plinu koji ekspandira u jako malim sferama obloženim ljuskom od polimera. Prilikom ekspanzije plina dolazi do povećanja volumena kuglica do 40 puta u odnosu na početni volumen. Krajnja veličina takvih ekspanziranih plastičnih mikrokuglica je oko 90 μm , a gustoća u rasutom stanju 0,03 g/cm^3 (Silva 2007).

Plastične mikrokuglice su prikazane na slici 5-4.

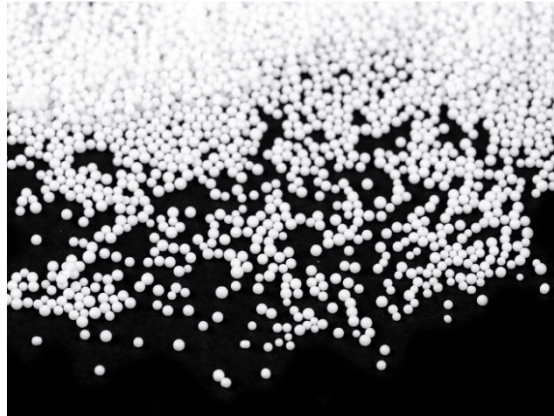


Slika 5-4. Plastične mikrokuglice
(http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/).

5.5. POLISTIREN

Polistiren je aromatski plastomer izrađen od monomera stirena. Polistiren je proziran, amorfan i staklu sličan materijal. Gustoća polistirena je od $0,02 \text{ g/cm}^3$ do $0,003 \text{ g/cm}^3$ (Vidović 2011).

Zrnca polistirena prikazana su na slici 5-5.



Slika 5-5. Zrnca polistirena (<https://www.stoklasa.ro/zapada-artificiala-bilute-polistiren-mini-10-g-x144716?barva=204652>).

5.6. EKSPANDIRANI POLISTIREN (STIROPOR)

Zrnca ekspaniranog polistirena se proizvode u reaktorima tehnologijom suspenzijske polimerizacije dodavanjem vode, stirena, pentana i ostalih dodataka pri temperaturi od približno $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Kapljice stirena suspendirane u vodenoj fazi na kraju polimerizacije prelaze u zrnca ekspanirajućeg polistirena raznih granulacija. Zrnca ekspaniraju povećavajući svoj volumen za 30 do 50 puta, a gustoća se smanji s oko $0,60 \text{ g/m}^3$ na $0,01 \text{ g/m}^3$ do $0,03 \text{ g/m}^3$.

Zrnca idu na sušenje te se nakon toga prebacuju u velike otvorene prozračne silose u kojima se stabiliziraju 12 h do 24 h. Vakuum se u zrnima mora izjednačiti s atmosferskim tlakom, a kondenzirana voda i zaostali pentan difundiraju iz zrnaca (Vidović 2011).

Zrnca ekspaniranog polistirena prikazana su na slici 5-6.



Slika 5-6. Zrnca ekspaniranog polistirena (<https://nomis.hr/proizvod/stiropor/>).

5.7. POLIURETANSKA PJENA

Poliuretanska pjena je materijal koji se prvenstveno koristi za termoizolaciju. Dobiva se ekspaniranjem poliuretana ili poliizocianurata. Odlikuje se velikom mehaničkom čvrstoćom, odnosno ima veliku otpornost na tlačna naprezanja, savijanje i kidanje. Otporna je na kiseline i lužine, ima malu apsorpciju vode (1,3 % u 28 dana). Gustoća poliuretanske pjene je od 0,019 g/cm³ do 0,040 g/cm³ (<http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog>).

Poliuretanska pjena je prikazana na slici 5-7.



Slika 5-7. Poliuretanska pjena (<https://hr.home-diary.net/7372306-paint-pu-foam>).

5.8. UGLJEN U PRAHU

Nastaje prilikom manipulacije ugljenom, prvenstveno rudarenjem. Veličine čestica ugljenog praha iznose od 0,1 μm do 1 mm, iako prevladavaju veličine od 20 μm do 50 μm.

Gustoća ugljenog praha je od $0,27 \text{ g/cm}^3$ do $0,50 \text{ g/cm}^3$, ovisno o veličini čestica i vrsti ugljena (http://hr.swewe.com/word_show.htm/?80015_1&Ugljen).

Ugljen u prahu je prikazan na slici 5-8.



Slika 5-8. Ugljen u prahu (<https://www.njuskalo.hr/sve-ostalo/aktivni-ugljen-prahu-100g-oglas-34712582>).

5.9. PILJEVINA I DRVENO BRAŠNO

Nastaje prilikom obrade raznih drvenih materijala. Gustoća piljevine koja se koristi za smanjenje gustoće eksploziva iznosi od $0,10 \text{ g/cm}^3$ do $0,35 \text{ g/cm}^3$ (Rock et al, 2005).

Drveno brašno je prikazano na slici 5-9.



Slika 5-9. Drveno brašno (<https://uvdarh.ru/hr/cakes/technology-of-production-of-wood-flour-on-the-technology-of-wood-flour-production.html>).

5.10. OTPACI IZ PRERADE ŠEĆERNE TRSKE

Otpaci iz prerade šećerne trske (engl. *Bagasse*) nastaju prilikom proizvodnje šećera. Prerodom 10 t šećerne trske dobije se približno 3 t otpadaka. Gustoća otpadaka iznosi od 0,12 g/cm³ do 0,18 g/cm³ (<http://www.sugartech.co.za/>).

Otpaci iz prerade šećerne trske su prikazani na slici 5-10.



Slika 5-10. Otpaci iz prerade šećerne trske

(<https://www.exportersindia.com/maharashtra/sugarcane-bagasse.htm>).

5.11. LJUSKE ŽITARICA I KIKIRIKIJA

Organskog su podrijetla i dobivaju se uzgojem žitarica i kikirikija na poljoprivrednim dobrima. Neki od najčešće korištenih materijala imaju sljedeću gustoću:

- ljuške zobi – $\rho = 0,128 \text{ g/cm}^3$,
- ljuške soje – $\rho = 0,40 \text{ g/cm}^3$ i
- ljuške pšenice – $\rho = 0,50 \text{ g/cm}^3$ (http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm).

Ljuške zobi su prikazani na slici 5-11.



Slika 5-11. Ljuske zobi (<http://ba.underextract.com/info/how-much-beta-glucan-in-oat-bran-51957017.html>).

5.12. GRANULE CELULOZE

Granule celuloze su čvrsti produkti nastali recikliranjem celuloze. Lagane su i imaju veliku sposobnost upijanja, čak 500 % više od glinenih materijala. Nasipna gustoća granula celuloze se nalazi u rasponu od $0,16 \text{ g/cm}^3$ do $0,29 \text{ g/cm}^3$ (Silva 2007).

Granule celuloze su prikazane na slici 5-12.



Slika 5-12. Granule celuloze (<https://www.shivainorganics.co.in/ip-bp-usp-micro-crystalline-cellulose-powder.htm>).

5.13. RECIKLIRANA GUMA

Guma je mehanički čvrst, žilav i izvanredno elastičan polimerni materijal dobiven vulkanizacijom kaučuka. Sirovina za proizvodnju gume prirodni je ili sintetski kaučuk, koji zbog svojih nepovezanih lančastih makromolekula zagrijavanjem postaje mekan i ljepljiv, a na

nižim temperaturama tvrd i lomljiv. Dodatkom prikladnih tvari, ponajprije sumpora, makromolekularni se lanci međusobno povezuju u procesu vulkanizacije. Tako se dobiva guma, materijal velike elastičnosti, savitljivosti i žilavosti te dobre vlačne čvrstoće i otpornosti prema abraziji i bubrenju, koji ta svojstva za-država i na niskim temperaturama, a zagrijavanjem ne omekša. Guma je materijal najšire tehničke primjene. Od nje se izrađuje na tisuće najrazličitijih artikala (od obuće, prostirača, brtvi, dijelova uređaja i cijevi do sanitarne robe i dječjih igračaka), a najveći je dio proizvedene gume (70% svjetske proizvodnje) sadržan u pneumaticima i zračnicama za automobilska i druga vozila (<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=23771>).

Reciklirana guma je prikazana na slici 5-13.

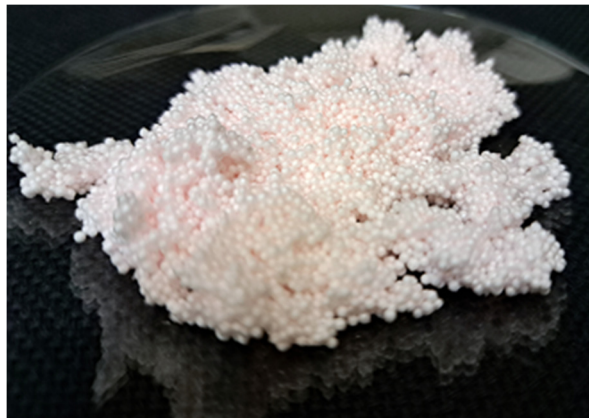


Slika 5-13. Reciklirana guma (<https://www.arcon-environmental.com.hr/hr-HR/Products/Tyre-Recycling>).

6. MJERENJA BRZINE DETONACIJE

Za ispitivanja je korištena emulzijska matrica senzibilizirana ekspaniranim polistirenom (EPS) u volumnom omjeru 40:60 pri čemu prvi broj predstavlja postotak volumena eksploziva, a drugi broj postotak volumena EPS-a. Takvom eksplozivu je dodavana reciklirana guma u različitim volumnim omjerima te je mjerena brzina detonacije kako bi se odredio utjecaj udjela reciklirane gume na brzinu detonacije.

Korišteni emulzijski eksploziv smanjene gustoće prikazan je na slici 6-1.



Slika 6-1. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće.

6.1 RECIKLIRANA GUMA

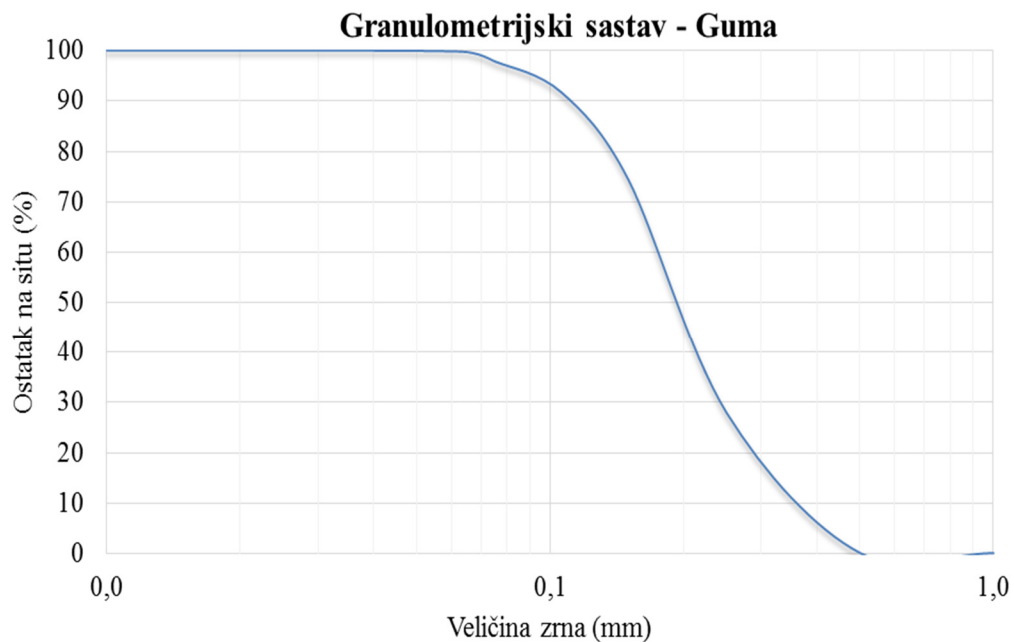
Za ova ispitivanja korištena je guma koja se dobiva recikliranjem automobilskih guma. Korištena guma je prikazana na slici 6-2. U tablici 5-1. prikazane su pojedine klase, mase i postoci ostataka na pojedinim sitima, a dijagram granoanalize na slici 6-3.



Slika 6-2. Korištena reciklirana guma

Tablica 6-1. Granoanaliza korištene reciklirane gume

Klasa	Masa, (g)	Masa, (%)
+1,0	0,13	0,03
1,0/0,5	138,65	27,81
0,5/0,25	231,64	46,46
0,25/0,15	86,26	17,30
0,15/0,106	30,68	6,15
0,106/0,75	9,70	1,95
0,075/0,063	1,06	0,21
-0,063	0,42	0,08
Σ	498,54	100

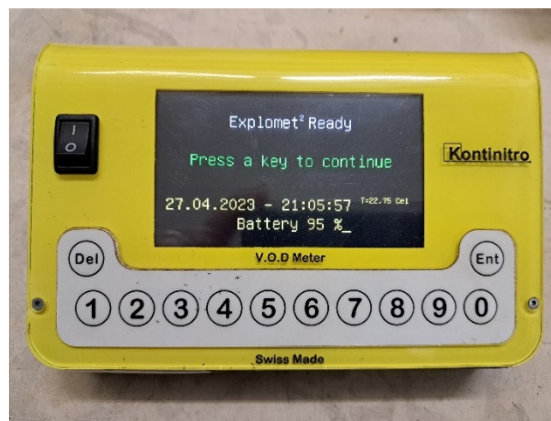


Slika 6-3. Granulometrijski sastav gume

Gustoća korištene reciklirane gume određena je eksperimentalno u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u skladu s normom *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. Dio 14: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)* i ona iznosi 0,466 g/cm³.

6.2 MJERENJE BRZINE DETONACIJE

Brzine detonacije eksplozivnog punjenja mjerene su elektrooptičkom metodom elektroničkim satom "Explomet 2". Uređaj bilježi trenutak pojave svjetlosnog signala koji se svjetlovodima dovodi kronometru. Svjetlovodi se postavljaju na poznatoj međusobnoj udaljenosti iz koje se proračunava brzina detonacije eksploziva za izmjereni vremenski interval. Najveća brzina koju uređaj može mjeriti je 15.000 m/s, vremenski interval između 0,01 μ s do 10,7 s, s točnosti od $\pm 0,01 \mu$ s. Fotografija Explometa – Fo je prikazana na slici 6-4.



Slika 6-4. Elektronički sat Explomet 2.

Izmjerena je brzina detonacije na uzorcima u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 23,5 mm i duljine 150 mm. Brzina detonacije eksplozivnog punjenja u čeličnim cijevima mjerena je na 1 segmentu s 2 osjetila međusobnih udaljenosti od 50 mm. Svi uzorci su bili inicirani na jednak način, električnim detonatorom. Izmjerena je brzina detonacije na 18 uzoraka od čega su 3 uzorka bila emulzijski eksploziv smanjene gustoće koji je korišten kao referentni te 15 uzoraka s recikliranom gumom, za svaki dodatak reciklirane gume po 3 uzorka s različitim volumnim udjelima. Volumni udjeli reciklirane gume su bili 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % i 12 %. Kod udjela od 12 % reciklirane gume nije došlo do detonacije eksplozivne smjese te nije izmjerena brzina detonacije.

Na slici 6-5 prikazana je fotografija emulzijskog eksploziva smanjene gustoće s dodatkom 10 % reciklirane gume.



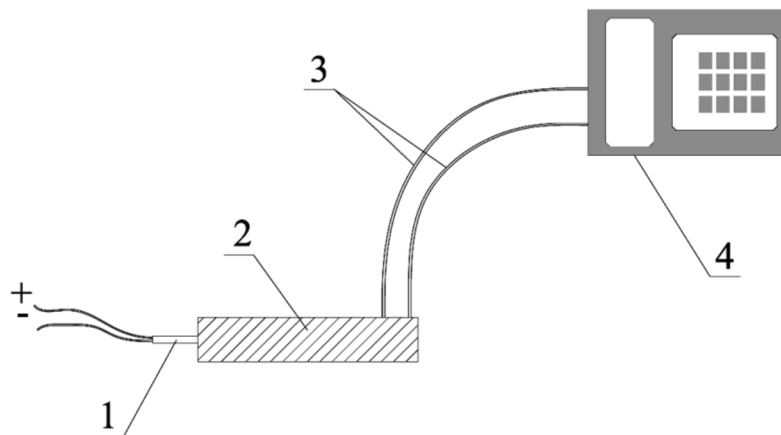
Slika 6-5. Fotografija emulzijskog eksploziva smanjene gustoće s dodatkom 10 % reciklirane gume.

Na slici 6-6 prikazana je fotografija mjernog postava određivanja brzine detonacije u čeličnim cijevima unutarnjeg promjera \varnothing 23,5 mm.



Slika 6-6. Fotografija mjernog postava u čeličnoj cijevi unutarnjeg promjera \varnothing 23,5 mm.

Shematski prikaz određivanja brzine detonacije prikazan je na slici 6-7.



Kazalo:

- 1 – električni detonator,
- 2 – čelična cijev s eksplozivnom tvari,
- 3 – osjetila (svjetlovodi) i
- 4 – elektronički sat.

Slika 6-7. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije.

Izmjerene vrijednosti brzine detonacije dane su u tablici 6-2, a srednje vrijednosti izmjerenih brzina detonacije dane su u tablici 6-3.

Tablica 6-2. Brzine detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume (Hadžić, 2017).

Omjer eksploziv/guma	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Izmjerena brzina detonacije, v_d (m/s)
100:0	0,409	2494
		2506
		2454
98:2	0,411	2037
		1929
		2045
96:4	0,416	2138
		2273
		2137
94:6	0,423	2417
		2432
		2398
98:2	0,425	2288
		2100
		1990
90:10	0,445	1541
		1669
		1900
88:12	0,468	-
		-
		-

Mjerna nesigurnost prilikom određivanja brzine detonacije je iznosila $U_v = v_d \pm 62$ (m/s).

Tablica 6-3. Srednje vrijednosti brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume.

Omjer eksploziv/guma	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Izmjerena brzina detonacije, v_{dsred} (m/s)
100:0	0,409	2485
98:2	0,411	2004
96:4	0,416	2183
94:6	0,423	2416
98:2	0,425	2126
90:10	0,445	1704
88:12	0,468	-

Izmjerene vrijednosti brzina detonacije su uspoređene s teoretskim vrijednostima izračunatima upotrebom termokemijskog računalnog koda EXPLO5.

EXPLO5 je termokemijski računalni kod koji izračunava detonacijske parametre (npr. brzinu detonacije, tlak, energiju, krajnju temperaturu zagrijavanja itd.) te izgaranje (npr. specifični impuls, sila, tlak itd.) energetskih materijala. Proračun parametara detonacije temelji se na modelu stacionarnog stanja kemijske ravnoteže detonacije. Ravnotežni sastav produkata detonacije i izgaranja izračunava se primjenom modificirane Whiteove, Johnsonove i Dantzigove jednadžbe minimalizacije slobodne energije. Program koristi Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) i Exp-6 EOS jednadžbe stanja za plinovite produkte detonacije, jednadžbe stanja i virijalne jednadžbe plinovitih produkata izgaranja idealnog plina i Murnaghanovu jednadžbu stanja za kondenzirane produkte (Sućeska, 2018).

7. ANALIZA I ZAKLJUČAK

Stabilna brzina detonacije izmjerena je sa smjesama emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om i recikliranom gumom u volumnim omjerima 98:2, 96:4, 94:6, 92:8 i 90:10. Sa smjesom volumnog omjera 88/12 nije izmjerena stabilna brzina detonacije.

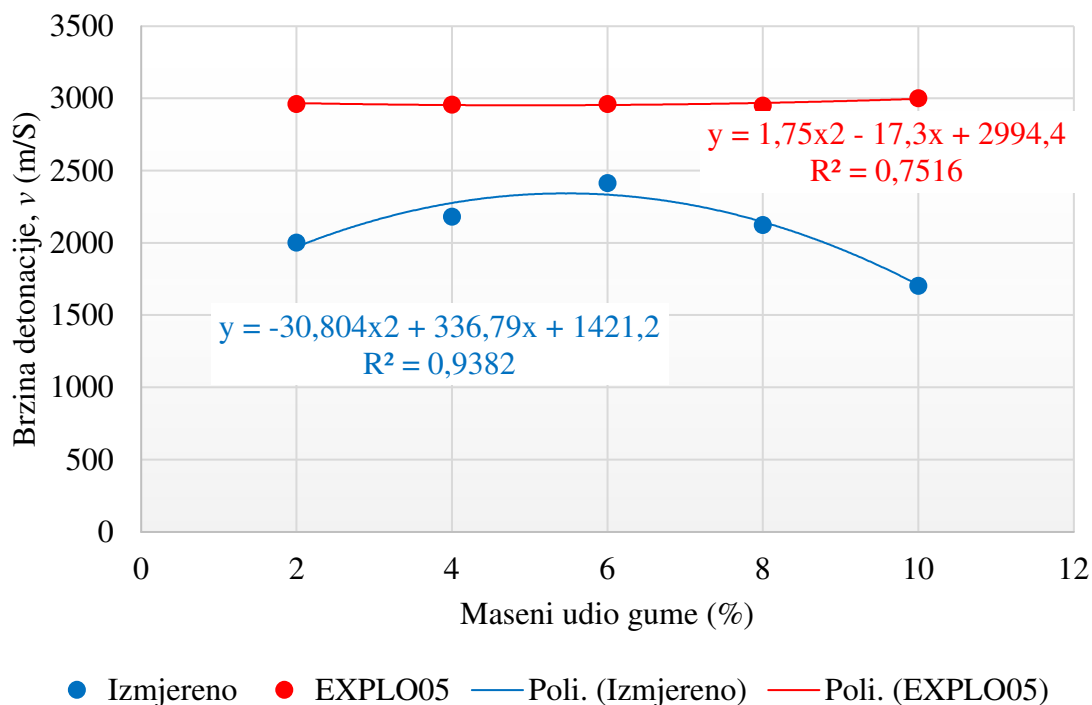
Može se zaključiti da je moguća izvedba emulzijskog eksploziva s dodatcima reciklirane gume od 2 %, 4 %, 6 %, 8 % i 10 %.

Usporedba izmjerenih brzina detonacije s izračunatim pomoću termokemijskog računalnog koda EXPL05 je prikazana dijagramom na slici 7-1., i u tablici 7-1.

Tablica 7-1. Usporedba srednjih vrijednosti izmjerenih brzina detonacije s izračunatima.

Omjer eksploziv / guma	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm³)	Izmjerena brzina detonacije, v_1 (m/s)	Izračunata brzina detonacije, v_2 (m/s)	Apsolutna razlika izmjerene i izračunate brzine detonacije (m/s)
100:0	0,409	2485	2976	491
98:2	0,411	2004	2963	959
96:4	0,416	2183	2958	775
94:6	0,423	2416	2962	546
98:2	0,425	2126	2952	826
90:10	0,445	1704	3003	1299
88:12	0,468	-	3067	-

Za rezultate mjerenja brzine detonacije i za brzine detonacije dobivene proračunom napravljena je regresijska analiza s masenim udjelima reciklirane gume. Za regresijsku analizu korištena je regresija polinomom drugog stupnja jer pokazuje najbolju zavisnost i za izmjerene (koeficijent determinacije $R^2 = 0,9382$ odnosno 93,82 %) i za izračunate vrijednosti (koeficijent determinacije $R^2 = 0,7516$ odnosno 75,16 %).



Slika 7-1. Usporedba izmjerenih i izračunatih brzina detonacije.

Iz podataka u tablici 7-1 i s dijagrama na slici 7-1 vidljivo je da eksplozivna smjesa emulzijske matrike senzibilizirane EPS-om uz dodatak reciklirane gume u omjeru 94/6 pripadajuće gustoće od $0,423 \text{ g/cm}^3$ i srednje vrijednosti brzine detonacije od 2416 m/s predstavlja optimalnu smjesu.

Provedena ispitivanja dio su širih istraživanja mogućnosti izvedbe i primjene eksploziva smanjene gustoće. Unutar njih se ispituje utjecaj različitih dodataka na detonacijska svojstva osnovne mješavine emulzijske matrike i ekspaniranog polistirena.

Dodaci pojedinih komponenata imaju za cilj s jedne strane dodatno smanjiti gustoću osnovnog eksploziva, smanjiti brzinu detonacije i tlak detonacije uz zadržavanje pouzdanog postizanja stabilne detonacije. S druge strane, prilikom probnih miniranja pokazala se potreba, nasuprot, povećanja gustoće eksplozivne smjese zbog omogućavanja jednostavnijeg gravitacijskog punjenje u duboke minske bušotine. Dodaci za postizanje navedenih oprečnih zahtjeva traže se među komponenata koje sudjeluju u kemijskim detonacijskim reakcijama te u dodacima koji su u kemijskom smislu inertni. Prethodno izvedena ispitivanja ukazala su mljevenu recikliranu gumu u smislu perspektivnosti. Eksperimentalni podaci su prošireni primjenom računalnog koda te su određene teoretske brzine detonacije, tlakovi i topline detonacije. Povećanjem udjela gume u osnovnoj mješavini, prema rezultatima termokemijskog

koda povećava brzinu detonacije i tlak detonacije te smanjuje toplinu i temperaturu detonacije. Rezultati su dani u tablici 7-2.

Tablica 7-2. Teoretska svojstva eksploziva smanjene gustoće s dodatkom gume proračunata termokemijskim računalnim kodom EXPLO05.

Matrica	EPS	Guma	Gustoća, ρ (g/cm ³)	Tlak, p (GPa)	Brzina detonacije, v (m/s)	Temperatura, T (K)	Q_v (kJ/kg)
96,45	3,55	0,00	0,409	1,154	2976	2092	2494
94,52	3,48	2,00	0,411	1,135	2963	1959	2292
92,59	3,41	4,00	0,416	1,137	2958	1870	2171
90,66	3,34	6,00	0,423	1,149	2962	1811	2104
88,73	3,27	8,00	0,425	1,141	2952	1765	2057
86,80	3,20	10,00	0,445	1,22	3003	1735	2038
84,87	3,13	12,00	0,468	1,318	3067	1709	2027

Obzirom na mali prirast brzine i te nešto veći prirast tlaka detonacije uz povećanje gustoće dodatkom većeg udjela gume, može se zaključiti da te mješavine zadovoljavaju kriterije radne sposobnosti ocjenjene posredno kroz tlak i brzinu detonacije. Usporedbom s mjerenim podacima brzina detonacije vidljiv je značajan odmak mjerenih vrijednosti brzina detonacije kao i oblik krivulje zavisnosti. Te razlike proizlaze iz razlika neidealnog detonacijskog procesa promatrane mješavine uz usporedbu s vrijednostima dobivenim primjenom modela u termokemijskom kodu. Zavisnost mjerenih brzina o udjelu gume pokazuje maksimum kod približno 6 % gume, dok kod daje gotovo linearnu ovisnost.

Obzirom na ranije analizirane rezultate brzina detonacije eksploziva smanjene gustoće uočene su različite vrste nepodudarnosti rezultata brzina detonacije primjenom termokemijskog koda i mjerenih vrijednosti. Rezultati idealnih modelskih rezultata mogu se uzimati orijentaciono dok zavisnosti ovise o specifičnim svojstvima pojedinih smjesa uvjetovanih vrstama dodataka. Iznaženje točnijih modela predstavlja potrebu za daljnja istraživanja odnosno podešavanja parametara postojećih modela.

Predmetna smjesa eksploziva smanjene gustoće s recikliranom mljevenom gumom u odnosu na osnovnu smjesu pokazuje se mogućim poboljšanjem za miniranja s dubokim minkim bušotinama, posebice vezano na povećanje brzine i tlaka detonacije te i kroz mogućnost korištenja reciklirane gume odnosno na taj način, njezino zbrinjavanje.

8. LITERATURA

1. BARANOV, E.G., VEDIN, A.T., BONDARENKO, I.F., 1996. Mining and Industrial Applications of Low – Density Explosives. A.A.Balkema.
2. ŠKRLEC, V. 2015. Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja, doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, pp 205
3. ROCK, J., MAURER, A., PEREIRA, N., 2005. Coming of Age for Low-Density Explosives. Proceedings of the 2005 Coal Operators' Conference, 175–179.
4. NIELSEN, K., HELTZEN, A.M., 1987. Recent Norwegian Experience with Polystyrene Diluted ANFO (ISANOL). 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 231–238.
5. HELTZEN, A.M., KURE, K., 1980. Blasting with ANFO/polystyrene mixtures. Proceedings of the 6th Conference of Explosives and Blasting Techniques (ISEE), 105–116.
6. ROCK, J., 2004. Improving Blasting Outcomes Using SoftLOAD Low-Density Explosives. EXPLO 2004 Conference, Perth, Western Australia, 153–158.
7. WILSON, M.J., MOXON, N.T., 1989. Development of a low shock energy ammonium nitrate based explosive. 2nd Conference on Large Open Pit Mining, 39–43.
8. HUNTER, C., FEDAK, K., TODOESCHUCK, J.P., 1993. Development of Low Density Explosives with Wall Control Applications. Annual Conference of International Society of Explosive Engineering, 549–554.
9. SHEAHAN, R.M., BEATTIE, T.A., 1998. Effect of Explosive Type on Fines Generation in Blasting. Proceedings of Explo 98, Australia. pp # 41.
10. SILVA, G.C.O., 2007. Development, Characterization and Application of a Reactive Bulking Agent for Wall Control. PhD Thesis. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
11. JOHNSON, R.J., 1996. 'SANFO' 'The missing link' in explosives technology, in Proceedings ISEE Annual Conference 1996, pp 242-252 (The International Society of Explosives Engineers: Cleveland).
12. PAL ROY, P., MOHANTY, B., 2002. A study on the usage of sawdust in ANFO, Proc. 7th Int. Conf. on 'Rock fragmentation by blasting (FRAGBLAST'7)', Beijing, China,

- August, China Society of Engineering Blasting and Chinese Society of Mechanics, 73-77.
13. PAL ROY, P., SAWMLIANA, C., SINGH, R.K., CHAKUNDE, V.K., 2012. Effective blasting using mixture of ammonium nitrate, fuel oil, sawdust and used oil at limestone mine. *Mining Technology*, 121(1), 46–51.
<https://doi.org/10.1179/1743286311Y.0000000017>
 14. FORSYTH, W., DEEN, J., STERK, P., 1997. Assessment of Perimeter Blasting at Homestake Mine. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques*. ISEE. pp# 437
 15. AKBARI MOUSAVI, A.A., BURLEY, S.J., AL-HASSANI, S.T.S., 2004. Simulation of explosive welding with ANFO mixtures. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 29(3), 188–196. <https://doi.org/10.1002/prop.200400042>
 16. AKBARI MOUSAVI, A.A., BURLEY, S.J., AL-HASSANI, S.T.S., 2005. Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives. In *International Journal of Impact Engineering* (Vol. 31, Issue 6, pp. 719–734). <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.03.003>
 17. HARRIES, G., GRIBBLE, D.P., 1993. The development of a low shock energy explosive - ANRUB. *Rock Fragmentation by Blasting*, 379–386.
 18. CURTIS, M.E., 1997. Regulating the Velocity of ANFO Utilizing Blends of Non-explosive Materials. *13th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research*, 47–54.
 19. BEACH, F., GRIBBLE, D., LITTLEFAIR, M., ROUNDELY, R., TESTROW, I., WIGGIN, M., 2004. BlastLite - The Practical Low-Density Solution. *EXPLO 2004 Conference*, 147–151.
 20. ARMSTRONG, L.W., MOXON, N.T., 1990. Low Shock Energy Emulsion Based Wet Hole Explosives. *3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, 45–53.
 21. JACKSON, M.M., 1993. Low Strength Water Gel Explosive. *Proceedings 19th Conference on Explosives and Blasting Techniques (ISEE)*, 493–499.
 22. STACHURA, V.J., CUMERLATO, C.L., 1995. Highwall Damage Control Using Pre-Splitting with Low-Density Explosives. *21st Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, 187–197.
 23. SIL`VESTROV, V.V., PLASTININ, A.V., RAFEICHIK, S.I., GULEVITCH, M.A., PAI, V.V., 2010. Explosive welding using the emulsion explosives. *Xth International*

- Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations (EPNM-2010). June 7 – 11, 2010, Bechichi, Montenegro.
24. PEREZ CORDOVA, P.F., CARDENAS LOPEZ, L.A., 2012. Low density emulsion explosive. United States Patent no.: US 8,187,397 B2.
 25. SILVA, G.C.O., ORLANDI, C.P., 2012. PANFO-A novel low-density dry bulk explosive. In Performance of Explosives and New Developments, 81–90, CRC Press.
 26. SINGH, A.K., PINGUA, B.M.P., NABIULLAH, M.K., PANDA, M.K., AKHTAR, S., 2013. Study and performance of low density emulsion explosive. Performance of Explosives and New Developments, 75–79.
 27. MARANDA, A., DROBYSZ, B., PASZULA, J., 2014. Research on detonation parameters of low density emulsion explosives modified by microballoons. Chemik, 68(1), 17–22.
 28. KUMAR, S., 2017. Implementation of Flexigel™ Bulk System: A case study of West Bokaro Colliery, Tata Steel Limited. 7th Asian Mining Congress, 283–290.
 29. KUMAR, S., KUMAR MISHRA, A., 2020. Reduction of blast-induced ground vibration and utilization of explosive energy using low-density explosives for environmentally sensitive areas. Arabian Journal of Geosciences, 13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05645-8>
 30. PERSSON, P.A., HOLMBERG, R., LEE, J., 1994. Rock blasting and explosives engineering, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press.
 31. VIDOVIĆ, E. 2011. Aromatski ugljikovodici. Skripta. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu.
 32. HADŽIĆ, E. 2017. Eksplozivne smjese s dodatkom reciklirane gume. Završni rad, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
 33. SUĆESKA M. 2018. EXPLO5 User's Guide, OZM Research s.r.o., Hrochův Týnec. 2018.

NORME:

1. HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2004. HRN EN 13631-14:2004: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2004)
2. HRVATSKI ZAVOD ZA NORME. 2003. HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. Dio 14: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)

WWW IZVODI:

1. PERLIT: <http://www.milosminingmuseum.gr/>
2. ZRNCA PERLITA: <https://iwarm-hr.techinfus.com/uteplenje/perlitovyj-uteplitel.html>
3. VERMIKULIT: <https://themajka.com/vermikulit-i-gdje-ga-nabaviti-t49.html>
4. ZRNCA VERMIKULITA: <https://vitaverdeshop.si/product/vermikulit-2-5mm-100l/>
5. STAKLENE MIKROKUGLICE 1: <http://www.potterseurope.org/default.asp?MIS=49>
6. STAKLENE MIKROKUGLICE 2: <http://www.techapps.com/>
7. PLASTIČNE MIKROKUGLICE:
http://www.akzonobel.com/expancel/knowledge_center/downloads/
8. ZRNCA POLISTIRENA: <https://www.stoklasa.ro/zapada-artificiala-bilute-polistiren-mini-10-g-x144716?barva=204652>
9. ZRNCA EKSPANDIRANOG POLISTIRENA: <https://nomis.hr/proizvod/stiropor/>
10. POLIURETANSKA PJENA 1: <http://www.oriolik.hr/index.php?cid=3&page=catalog>
11. POLIURETANSKA PJENA 1: <https://hr.home-diary.net/7372306-paint-pu-foam>
12. UGLJEN U PRAHU 1: http://hr.swewe.com/word_show.htm/?80015_1&Ugljen
13. UGLJEN U PRAHU 2: <https://www.njuskalo.hr/sve-ostalo/aktivni-ugljen-prahu-100g-oglas-34712582>
14. DRVENO BRAŠNO: <https://uvdarh.ru/hr/cakes/technology-of-production-of-wood-flour-on-the-technology-of-wood-flour-production.html>
15. BAGASSE 1: <http://www.sugartech.co.za/>
16. BAGASSE 2: <https://www.exportersindia.com/maharashtra/sugarcane-bagasse.htm>
17. LJUSKE ŽITARICA I KIKIRIKIJA: http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm
18. LJUSKE ZOBI: <http://ba.underextract.com/info/how-much-beta-glucan-in-oat-bran-51957017.html>
19. GRANULE CELULOZE: <https://www.shivainorganics.co.in/ip-bp-usp-micro-crystalline-cellulose-powder.htm>
20. RECIKLIRANA GUMA 1: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=23771>
21. RECIKLIRANA GUMA 2: <https://www.arcon-environmental.com.hr/hr-HR/Products/Tyre-Recycling>
22. ALUMINIJ: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>

9. SAŽETAK

MODELIRANJE UTJECAJA UDJELA GUME NA BRZINU DETONACIJE EKSPLOZIVA SMANJENE GUSTOĆE

Eksplozivi smanjene gustoće su eksplozivne smjese dobivene dodavanjem plinske faze, odnosno dodavanjem sastojaka vrlo male gustoće. Pri tome im se smanjuju vrijednosti pojedinih detonacijskih parametara uz zadržavanje dovoljne radne sposobnosti potrebne za miniranje stijena. Brzina detonacije je veličina koja daje posrednu informaciju o radnoj sposobnosti eksploziva a moguće je precizno mjeriti dostupnim metodama i uređajima. Računalni termokemijski kodovi omogućavaju modeliranje detonacijskih parametara bazirano na kemijskom sastavu eksplozivi i postavkama hidrodinamičkog opisa detonacijskog procesa. Ispitivanja opisana u rada odredila su utjecaj udjela dodatka reciklirane mljevene gume eksplozivu smanjene gustoće na bazi emulzijske matrice i ekspaniranog polisteirena. Mjerene brine detonacije uspoređene su s vrijednostima računatim primjenom termokemijskog koda čime je ocijenjena primjenjivost koda u slučaju navedenih eksplozivnih smjesa.

Autor: Lucija Kreković

Ključne riječi: eksplozivi smanjene gustoće, brzina detonacije, reciklirana gume, termokemijski kod

10. SUMMARY

MODELING OF THE EFFECT OF RUBBER CONTENT ON THE DETONATION VELOCITY OF LOW-DENSITY EXPLOSIVES

Low-density explosives are explosive mixtures obtained by adding a gas phase, that is by adding ingredients with very low density. Thereby, the values of individual detonation parameters are reducing with keeping enough work capability which is needed for rock blasting. Detonation velocity is quantity that provides information about work capacity of explosive and it can be precisely measured with available methods and devices. Computer thermochemical codes enable the modelling of detonation parameters based on chemical composition of explosive and the setting of hydrodynamic description of detonation process. The tests described in this paper determined the influence of the proportion of additives of recycled ground rubber to the low-density explosive based on emulsion matrix and expanded polystyrene. The measured detonation velocities were compared with the values calculated using the thermochemical code which evaluated the applicability of the code in the case of mentioned explosive mixtures.

Author: Lucija Kreković

Key words: low-density explosives, velocity of detonation, recycled rubber, thermochemical code