Dodaci eksplozivima smanjene gustoće

Kreković, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:934753

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prijediplomski studij rudarstva

DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE

Završni rad

Lucija Kreković

R4523

Zagreb, 2024.

KLASA: 602-01/24-01/31
URBROJ: 251-70-11-24-2
U Zagrebu, 14.02.24

Lucija Kreković, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/31, URBROJ: 251-70-11-24-1 od 12.02.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Prof.dr.sc. Mario Dobrilović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljicu Dr. sc. Ivana Dobrilović.

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Suvoditeljica

(potpis)

Dr. sc. Ivana Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje Pašić

(titula, ime i prezime)

Zahvaljujem :

Svojem mentoru prof.dr.sc. Mariu Dobriloviću, dipl.ing. na prenesenom znanju kao i velikoj pomoći u izradi ovoga završnog rada.

Svojoj ko-mentorici dr.sc. Ivani Dobrilović na savjetima i pomoći oko laboratorijskih miješanja smjesa.

Profesoru izv.prof.dr.sc. Vinku Škrlecu ,dipl.ing na beskonačnom strpljenju i razumijevanju prilikom rješavanja prepreka kod ispitivanja.

Svojoj obitelji, prijateljima i Tomislavu na ljubavi i podršci.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE

Lucija Kreković

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Eksplozivi smanjene gustoće su smjese eksploziva s određenim dodacima kako bi im se smanjila gustoća. Dodavanjem različitih materijala se mijenjaju fizikalna svojstva eksploziva poput povećanja volumena ili smanjenja osjetljivosti na trenje i udare. Prilikom ispitivanja takvih eksploziva najviše se obraća pažnja na brzinu detonacije koja je usko povezana s tlakom detonacije kao i brizantošću. U ovom radu su se dodavali staklo, vapno, sijeno, piljevina, papir i plastika.

Ključne riječi: eksplozivi smanjene gustoće, brzina detonacije
Završni rad sadrži: 21 stranicu, 3 tablice, 14 slika, 0 priloga, i 23 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF

Pomagao pri izradi/komentor: Dr. sc. Ivana Dobrilović, poslijedoktorand RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF

Datum obrane: 08.07.2024., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE 2

3. BRZINA DETONACIJE 3

4. DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE 5

4.1 STAKLO 5

4.2 VAPNO 6

4.3 PILJEVINA 7

4.4 PAPIR 8

4.5 SIJENO 9

4.6 OTPADNA PLASTIKA 10

5. MJERENJA BRZINE DETONACIJE 12

6. ANALIZA I ZAKLJUČAK 14

6.1 MLJEVENO STAKLO 14

6.2 HIDRATIZIRANO VAPNO 14

6.3 PILJEVINA 14

6.4 MLJEVENI PAPIR 16

6.5 MLJEVENO SIJENO 18

6.6 OTPADNA PLASTIKA 19

7. LITERATURA 20

POPIS SLIKA

Slika 4-1. Mljeveno staklo 5
Slika 4-2. Vapneni ciklus 6
Slika 4-3. Vapnenac u prahu 6
Slika 4-3. Mljeveno drvo 7
Slika 4-4. Isjeckan papir 8
Slika 4-5. Sijeno 9
Slika 4-6. Vrste plastike 11
Slika 5-1. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće. 12
Slika 5-2. Elektronički sat Explomet 2 12
Slika 5-3. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije. 13
Slika 6-1. Smjesa LDE i piljevine 15
Slika 6-2. Ovisnost brzine detonacije o gustoći 15
Slika 6-3. Zavisnost brzine detonacije o gustoći 16
Slika 6-4. Zavisnost brzine detonacije o udjelu papira 17

POPIS TABLICA

Tablica 6-1. Izračunate vrijednosti brzina eksplozija 15
Tablica 6-2. Brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak mljevenog papira 16
Tablica 6-3. Srednje vrijednosti brzina detonacija 18

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p_d	Pa	Tlak detonacije
ρ	(kg/m^3)	Gustoća
v_d	(m/s)	Brzina detonacije

1. UVOD

Eksplozivi su stabilni kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno kemijski se razlažu u vrlo kratkom vremenskom periodu oslobađajući znatnu količinu plinova i topline (Krsnik 1989).

Prva podjela eksploziva je na kemijske eksplozive i kemijske proizvode za neeksplozivne namjene. Zatim slijedi podjela kemijskih eksploziva na propelante, pirotehničke smjese te jake eksplozive. Dok u konačnici jake eksplozive su dijelimo na primarne, sekundarne i tercijarne.

Primarni eksplozivi su eksplozivi koji su vrlo osjetljivi na temperaturu, trenje i udar te prilikom vanjskog impulsa detoniraju zbog čega su dobili naziv inicijalni eksplozivi.

Sekundarni ili brizantni eksplozivi su eksplozivi čija je primjena u gospodarskom miniranju i vojnoj industriji te ih odlikuje velika brzina detonacije i veća gustoća. Dijelimo ih na monomolekularne eksplozive i smjese kao što su praškaste smjese, želatinozne smjese, emulzije te vodoplastične smjese.

Emulzijski eksplozivi su smjese emulzijske matrice i plinske faze. Plinska faza nam predstavlja ulogu toplih točaka i koriste se granule ekspandiranog polistirena. Eksplozivi smanjene gustoće imaju manju volumnu koncentraciju energije koja nam je bitna za sprječavanje vrlo sitnih frakcija odminiranog materijala. Dodavanjem inertnih ili reaktivnih materijala pokušava se optimizirati djelovanje eksploziva, kao i smanjiti troškove.

2. EKSPLOZIVI SMANJENE GUSTOĆE

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

Ovakve eksplozive koristimo kada trebamo ostvariti minimalna oštećenja oko minskog polja, minimizirati seizmičku posljedicu miniranja, kada nam je granulometrijski sastav potreban tako da imamo ujednačene veličine zrna te kod smanjenja troškova.

Smanjenje naprezanja i 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).

Princip izvedbe eksploziva smanjene gustoće je to da se dodaju materijali koji imaju znatno manju gustoću od eksploziva i mogu se razvrstati u dvije skupine :

1. aktivni – materijali s mogućnošću gorenja (polistiren, piljevina, sijeno, papir, drveno brašno i sl.)
2. inertni – materijali koji nisu podložni fizički, kemijskim ili biološkim promjenama (staklene i plastične mikrokuglice, staklo, perlit i sl.)

3. BRZINA DETONACIJE

Brzina detonacije je ključna značajka eksploziva koja određuje koliko brzo će se materijal razlagati i oslobađati energiju tijekom eksplozivne reakcije. To je brzina širenja i stvaranja vala kroz eksploziv koji dalje rezultira oslobađanjem energije u obliku topline, zvuka, tlaka i svjetlosti.

Mjeri se u metrima po sekundi te se razlikuje s obzirom na vrste eksploziva radi njihovih različitih kemijskih sastava. Također, brzina detonacije ima ključnu ulogu pri određivanju brizantnosti eksploziva. Osim njezinih ključnih stavaka, usko je povezana s tlakom detonacije koji određuje radnu sposobnost eksploziva.

Obrazac zavisnosti tlaka detonacije o brzini detonacije prikazujemo:

$$p_d = \frac{\rho v_{\mathrm{d}}^2}{(1+\gamma_{\mathrm{CJ}})} \tag{3-1}$$

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 plinovitih produkata ovisi o uvjetima detonacije i vrsti eksploziva, međutim za eksplozive gustoća od 1,00 g/cm^3 do 1,80 g/cm^3 γ_{CJ} iznosi približno 3 i obrazac (3-1) se mijenja :

$$p_{\mathrm{d}} = \frac{\rho v_{\mathrm{d}}^2}{4} \tag{3-2}$$

Za potpuno napunjene minske bušotine pokazalo se da je tlak koji djeluje na stijenku bušotine jednak tlaku eksplozije odnosno iznosi polovicu tlaka detonacije (Persson et al. 1994, Silva 2007), pa imamo :

$$P_{\mathrm{b}} = \frac{\rho \cdot v_{\mathrm{d}}^2}{8} \tag{3-3}$$

gdje je:

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

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

$$v_d = x + y \cdot \rho \tag{3-4}$$

gdje su:

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

4. DODACI EKSPLOZIVIMA SMANJENE GUSTOĆE

U ovome radu će se koristiti inertni materijali : mljeveno staklo i hidratizirano vapno, te aktivni materijali : piljevina, mljeveni papir, mljeveno sijeno i otpadna plastika.

4.1 STAKLO

Osnovne sirovine za proizvodnju stakla su kvarcni pijesak (silicijev dioksid SiO_2), soda (natrijev karbonat Na_2CO_3) i vapnenac (kalcijev oksid CaO). Staklo se proizvodi tako da se sirovine tope na visokim temperaturama te se brzo hlade kako bi se formirala čvrsta masa.

Staklo ima veliko područje upotrebe. Najčešće ga dijelimo na četiri vrste :

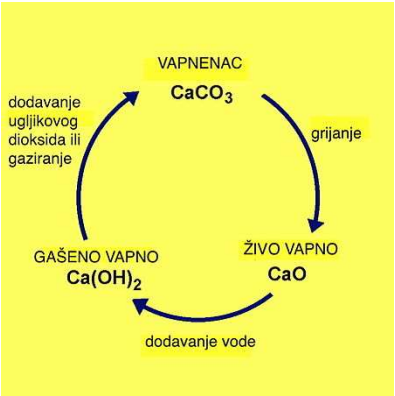
- Obično staklo se koristi za izradu prozora, ogledala ili posuđa
- Kristalno staklo ima veliki indeks loma svjetlosti te se koristi za izradu leća i kristalnog posuđa
- Vatrostalno staklo nije osjetljivo na promjene temperature te se rabi u kemijskom laboratoriju
- Kvarcno staklo je otporno na velike promjene temperature i propušta ultraljubičasto zračenje. Koristimo ga za izradu kemijskog pribora i kvarcnih svjetiljki.

Mljeveno staklo prikazano je na slici 4-1.

Slika 4-1. Mljeveno staklo

4.2 VAPNO

Vapno je materijal koji najviše služi u građevinarstvu obično za lijepljenje. Sastoji se od kalcijevih oksida i hidroksida. Dobiva se iz vapnenca koji se prilikom zagrijavanja pretvara u živo vapno. Živo vapno ili kalcijev oksid je bezbojan, inertan i ima vrlo visoko talište i vrelište. Prilikom dodavanja većih količina vode dolazi do stvaranja takozvanog gašenog vapna. Tijekom reakcije dolazi do oslobađanja toplinske energije te vapno povećava svoj volumen. Drugi naziv za gašeno vapno je kalcijev hidroksid. Dodavanjem minimalnih količina vode u živo vapno dobiva se hidratizirano vapno. Hidratizirano vapno je fini bijeli prah te mu kemijska formula glasi $Ca(OH)_2$. Na slici 4-2 je prikazan ciklus dobivanja živog i gašenog vapna.



Slika 4-2. Vapneni ciklus

Na slici 4-3 prikazan je vapnenac u prahu.

Slika 4-3. Vapnenac u prahu

4.3 PILJEVINA

Nastaje kao produkt usitnjavanja drvne građe. Iako se smatra kao nusproizvodom drvne industrije može se koristiti i kao sirovina u industriji drvne plastike, u građevini za proizvodnju iverica, kao bio gorivo u obliku briketa ili peleta te u poljoprivredi za zadržavanje vlage. Gustoća piljevine koja se koristi za smanjenje gustoće eksploziva iznosi od 0,10 g/cm^3 do 0,35 g/cm^3 (Rock et al, 2005).

Obzirom o vrsti drva možemo ju podijeliti na piljevinu tvrdog i mekog drva. Većina tvrdih drva su listopadna stabla-javor, divlji kesten, breza, grab, bukva, hrast, itd.. Ovo drveće odlikuje se većom gustoćom i kompaktnijom strukturom što h čini tvrđima, čvršćima i otpornijima na savijanje. Piljevina tvrdog drva često je čvršća i teža sa dužim vlaknima i finije strukture. Koristi se u proizvodnji visokokvalitetnog namještaja i podova. S druge strane, piljevina mekog drva je svjetlija, lakša i mekša obzirom da su meka drva fleksibilnija s manjom gustoćom i ravnomjernijom strukturom. U meka drva spadaju četinari-jela, cedar, čempres, bor, smreka, itd.. Meka drva se koriste za građevinske materijale, izradu paleta ili piljevina kao supstrat za uzgoj biljaka.

Na slici 4-3 je prikazano mljeveno drvo.

Slika 4-3. Mljeveno drvo

4.4 PAPIR

Osnovna sirovina za dobivanje papira su celulozna vlakna koja se najčešće dobivaju iz drva. Celuloza je ugljikohidrat koja je u obliku vrlo čvrstih vlakana koji su netopljivi u vodi. Kemijskim procesima se obrađuje usitnjena sirovina te se nakon prokuhavanja mehanički obrađuje mljevenjem. Najčešća drva za dobivanje celuloze su bor, smreka, jela, topola, bukva i breza. Izuzev drva za proizvodnju papira se koriste lan, konoplja, pamuk, juta, stari papir i otpadni tekstil. Neka od najvažnijih svojstva koja papir mora sadržavati su čvrstoća, trajnost, elastičnost, optička svojstva, gustoća i glatkoća. Težina papira iznosi 8-200 g/m^2.

Na slici 4-4 je prikazan isjeckan papir.

Slika 4-4. Isjeckan papir

4.5 SIJENO

Sijeno se dobiva košnjom biljaka kada su na vrhuncu rasta na prirodnim ili umjetnim livadama. Nakon košnje materijal se suši kako bi se očuvao njegov nutritivni sadržaj. Sijeno sadržava veliku količinu vlakana koja pomaže pri probavi, također sadržava i vitamine, minerale i proteine potrebne za razvoj i rast domaćih životinja. Sijeno je lako dostupan i isplativ način prehrane životinja za poljoprivrednike. S obzirom na to kako se nakon sušenja može i pohraniti, sijeno se može koristiti tijekom cijele godine.

Na slici 4-5 je prikazano sijeno.

Slika 4-5. Sijeno

4.6 OTPADNA PLASTIKA

Plastika kao materijal može biti dobivena prirodno i sintetički. Najčešća plastika u upotrebi je dobivena polimerizacijom, kemijskim procesom gdje se polimeri spajaju u duge lance molekula što omogućuje lako oblikovanje. Nakon polimerizacije slijedi dodavanje aditiva ili boja zatim obrada i oblikovanje i na kraju hlađenje i završna obrada. Glavne sirovine za dobivanje plastike su sirova nafta i prirodni plin.

Iako plastika ima niz prednosti ispred drugih materijala kao što je pogodna za višekratnu upotrebu, lagana, lako se prilagođava, veliki je problem njezina razgradnja koja iznosi 100-1000 godina. Obzirom na globalni rast industrije upotreba plastike se povećala, ali i njen otpad. Najčešća otpadna plastika koja se može reciklirati je PET, PE-HD, PVC, PE-LD, PP, PS.

- PET

Polietilen-tereftalat je umjetno stvoreno poliestersko vlakno. Ova vrsta plastike je namijenjena za jednokratnu upotrebu obzirom da postoji mogućnost ispuštanja teških metala i bakterijske kontaminacije. U ovu vrstu plastike spadaju boce za pića, tekstil, fotografski film, plakati. PET plastika se može reciklirati neograničen broj puta.

- PE-HD

Polietilen visoke gustoće je najsigurnija vrsta plastike koja se najčešće reciklira. Izdržljiva je plastika te je pogodna za višekratnu upotrebu obzirom da ne ispušta kemikalije. Od ove plastike se izrađuju boce za ulje i mlijeko, igračke, pakiranja za tekući deterdžent i kante za otpad.

- PVC

Polivinil klorid je vrsta plastike koja se vrlo rijetko reciklira zbog njene toksičnosti iako je dugotrajan materijal. Neki od proizvoda su kablovi, boce, građevinski materijal, a nakon recikliranja upotrebljava se u obliku ograda, cijevi ili boca koje se ne koriste u prehrani.

- PE-LD

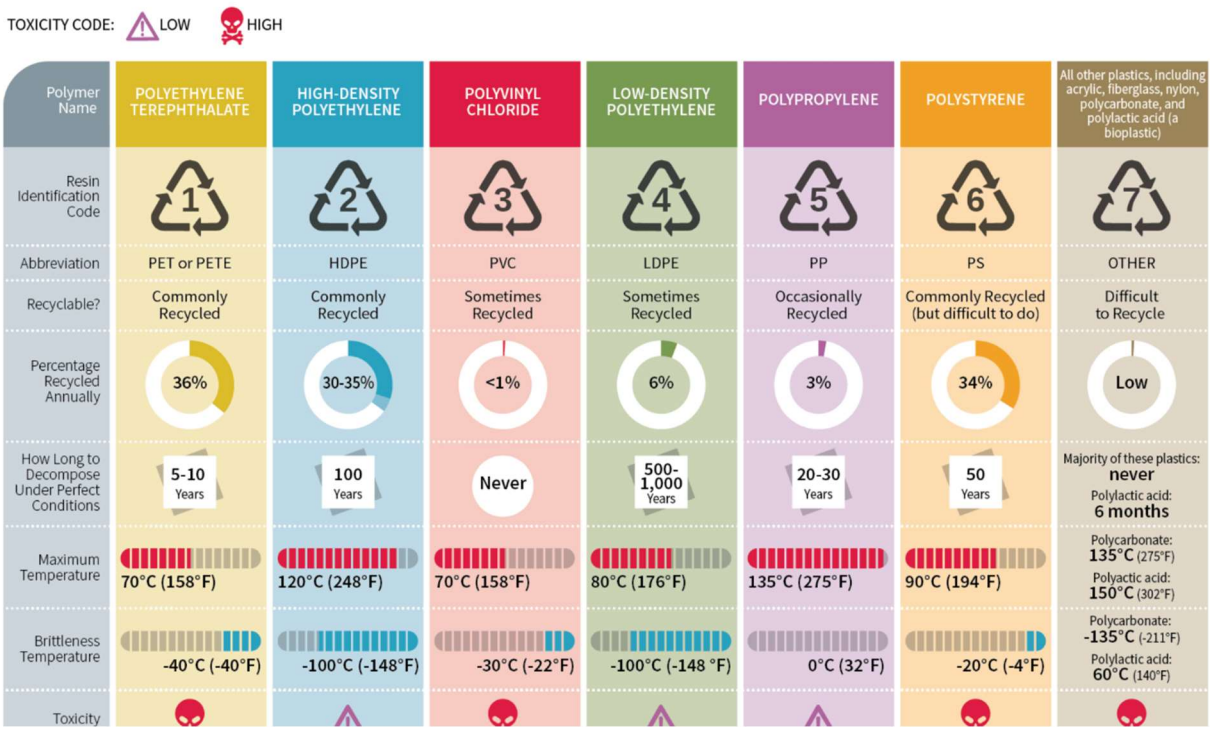
Polistiren niske gustoće je sigurna plastika sa dobrom izdržljivosti i fleksibilnosti. Koristi se u proizvodnji vrećica za kruh, namještaja ili plastičnih boca. Poslije recikliranja služi za izradu vrećica za hranu, posuda, kontejnera i boca.

- PP

Polipropilen je plastika koja je otporna na toplinu, te je lagana i čvrsta. Najčešće se rade čašice za jogut, jednokratne pelene i čepovi od plastičnih boca. Iako ima dobre mehaničke osobine, ova vrsta plastike se jako malo reciklira.

- PS

Polistiren je najčešće korištena vrsta plastike koja se nastoji smanjiti. Koristi se za proizvodnju jednokratnih plastičnih predmeta kao što su šalice za kavu, pribor za jelo ili kutije za hranu.



Slika 4-6. Vrste plastike

5. MJERENJA BRZINE DETONACIJE

U ovome radu korištena je emulzijska matrica senzibilizirana ekspandiranim polistirenom u volumnom omjeru 40:60 (volumen eksploziva : volumen EPS-a). Toj smjesi su dodavani inertni i aktivni materijali (staklo, vapno, piljevina, papir i sijeno) te su se mjerile brzine detonacije kako bi se uspostavio utjecaj dodataka na eksploziv smanjene gustoće.

Korišteni emulzijski eksploziv smanjene gustoće prikazan je na slici 5-1.

Slika 5-1. Emulzijski eksploziv smanjene gustoće.

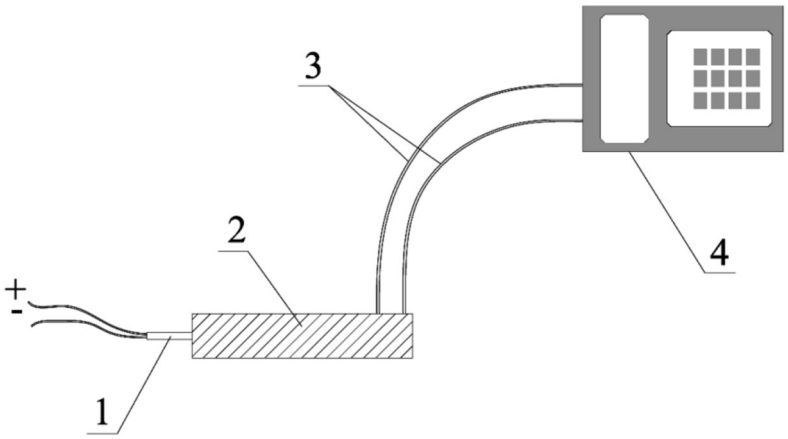
Brzine detonacija prethodno zamiješanih eksplozivnih smjesa smo mjerili pomoću elektrooptičke metode. Elektronički sat „Eksplomet 2“ bilježi pojavu svjetlosnog signala pomoću svjetlovoda i kronometra.

Elektronički sat je prikazan na slici 5-2.

Slika 5-2. Elektronički sat Explomet 2.

Za proračun brzine detonacije eksploziva u određenom vremenskom intervalu svjetlovode treba postaviti na točno određene udaljenosti. Nakon iniciranja eksplozivne smjese koja se nalazi u čeličnoj cijevi poznate duljine i promjera uređaj mjeri vrijeme koje je potrebno detonacijskom valu da prijeđe udaljenost između dvije točke, tj. između dva svjetlovoda. S obzirom na već poznate informacije o duljini puta i vremenu prolaska vala računa se brzina prolaska detonacijskog vala tj. brzina detonacije.

Shematski prikaz određivanja brzine detonacije prikazan je na slici 5-3.



Kazalo:

1 – električni detonator,

2 – čelična cijev s eksplozivnom tvari,

3 – osjetila (svjetlovodi) i

4 – elektronički sat.

Slika 5-3. Shematski prikaz određivanja brzine detonacije.

6. ANALIZA I ZAKLJUČAK

6.1 MLJEVENO STAKLO

Pri korištenju stakla kao inertnog materijala za povećanje gustoće prvenstveno je potrebno provesti učinkovito drobljenje. Nakon što se pronađe efikasan način drobljenja stakla određenog granulometrijskog sastava, daljnja ispitivanja će se moći odraditi.

6.2 HIDRATIZIRANO VAPNO

Prilikom kontakta između hidratiziranog vapna i eksploziva smanjene gustoće dolazi do kemijske reakcije koja oslobađa veliku količinu topline i plinova. S obzirom na takvu intenzivnu kemijsku reakciju hidratiziranog vapna s osnovnom smjesom LDE nije bilo moguće nastaviti daljnja mjerenja.

6.3 PILJEVINA

Piljevina se može koristiti kao dodatak zbog svojih svojstava apsorpcije i disperzije te ima mogućnost poboljšati stabilnost i kontrolu same eksplozivne reakcije. Izuzev toga, može utjecati i na brzinu i karakteristike detonacije.

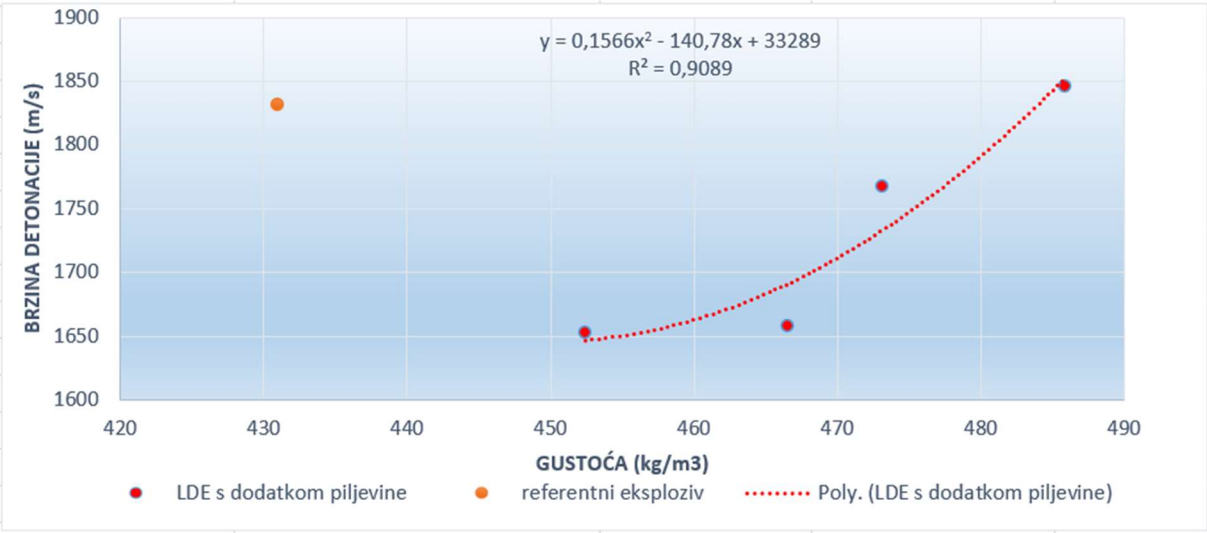
Eksplozivnoj smjesi je dodavana piljevina masenih koncentracija 2%, 5%, 10% i 20%. Granulometrijski sastav iznosi 1 milimetar. Smjesa je prikazana na slici 6-1. U tablici 6-1 su prikazane vrijednosti brzina detonacija ovisno o masenim koncentracijama.

Slika 6-1. Smjesa LDE i piljevine

Tablica 6-1. Izračunate vrijednosti brzina eksplozija

MASENI UDIO PILJEVINE(%)	MASA EKSPLOZIVA	GUSTOĆA (kg/m3)	BRZINA DETONACIJE (m/s)
2	0,01879	452	1653
5	0,01928	467	1658
10	0,02291	473	1767
20	0,02173	486	1846

Na slici 6-2 je prikazan graf ovisnosti brzine detonacije o gustoći.



Slika 6-2. Ovisnost brzine detonacije o gustoći

Iz priloženog grafa na slici 6-2 može se očitati kako je smjesa sa piljevinom masenog udjela od 20% dala najveću brzinu detonacije od 1846 m/s koja je približno ista kao i kod referentnog eksploziva koja iznosi 1831 m/s što ju čini najoptimalnijom smjesom. Također, zaključujemo iz grafa da brzina detonacije jednolično raste sukladno gustoći LDE s dodatkom piljevine.

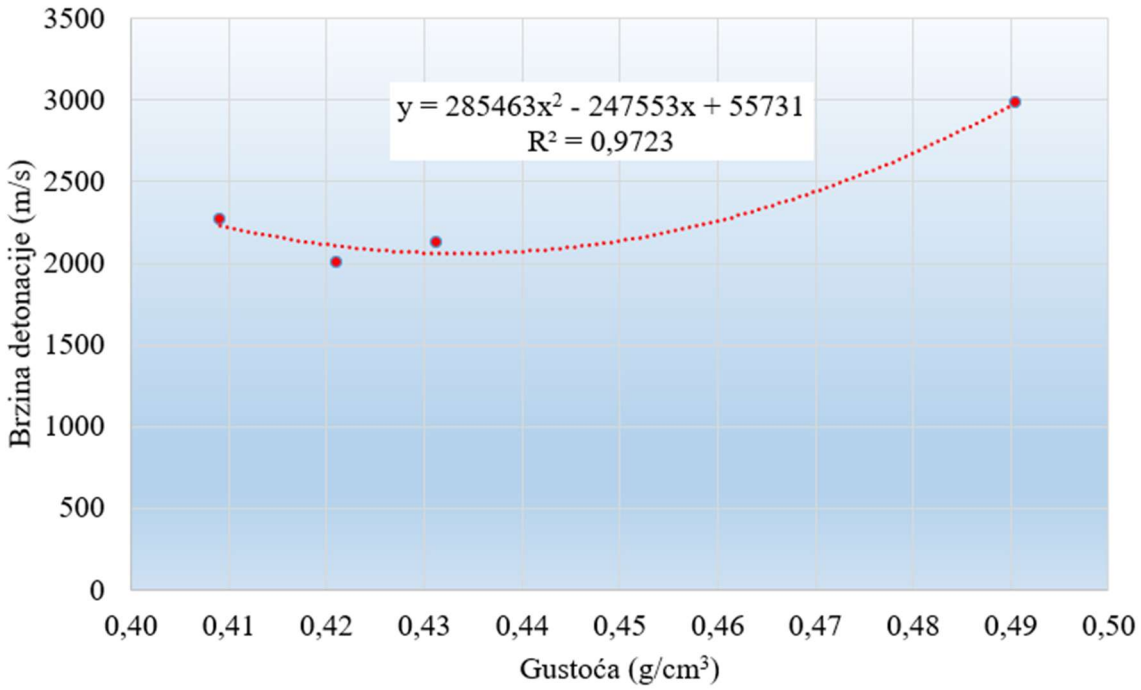
6.4 MLJEVENI PAPIR

Eksplozivnoj smjesi matrice i ekspandiranog polistirena dodavan je mljeveni papir te su se mjerile brzine detonacije na uređaju Explomet-2 što je prikazano u tablici 6-2.

Tablica 6-2. Brzina detonacije emulzijske matrice senzibilizirane EPS-om uz dodatak mljevenog papira

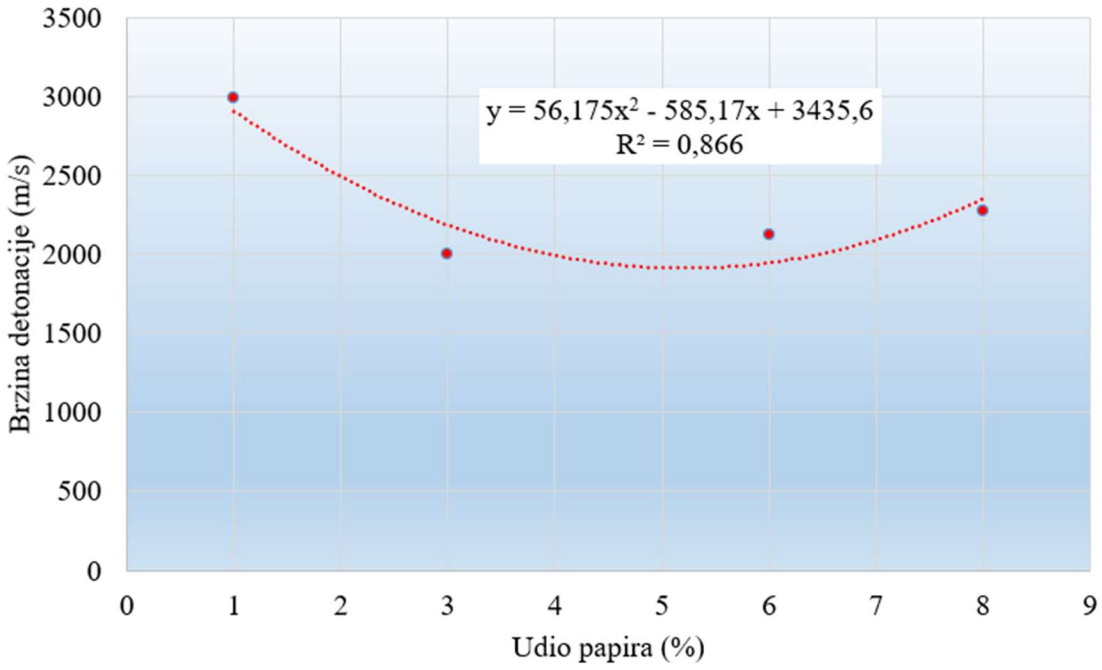
Vrsta eksplozivne tvari	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm^3)	Srednja vrijednost gustoće, ρ_{sred} (g/cm^3)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Srednja vrijednost mase, m_{sred} (g)	Izmjereno vrijeme između prvog i drugog osjetila, t (μs)	Stvarna brzina detonacije između prvog i drugog osjetila, v (m/s)	Srednja vrijednost brzine detonacije, v_{sred} (m/s)
MEPS3466	**0,489**	0,49	21,42	21,52	10,6	**2895**	**2984**
MEPS3466	**0,492**		21,61		10,0	**3073**	
MEPS3466+papir mljeveni (99/1 mas)	**0,428**	0,42	18,87	18,66	13,4	**2201**	**2005**
MEPS3466+papir mljeveni (99/1 mas)	**0,417**		18,58		15,8	**1921**	
MEPS3466+papir mljeveni (99/1 mas)	**0,418**		18,54		16,1	**1893**	
MEPS3466+papir mljeveni (99/2 mas)	**0,430**	0,43	19,05	18,92	14,1	**2097**	**2128**
MEPS3466+papir mljeveni (99/2 mas)	**0,433**		18,79		13,9	**2158**	
MEPS3466+papir mljeveni (96/4 mas)	**0,415**	0,41	18,20	18,06	12,9	**2318**	**2272**
MEPS3466+papir mljeveni (96/4 mas)	**0,403**		17,91		13,5	**2226**	

Brzina detonacije naglo raste povećanjem gustoće od 0,43 g/cm^3 i dostiže najveću brzinu detonacije na 0,49 g/cm^3 gotovo 3000 m/s dok gustoće manje vrijednosti imaju prilično sličnu vrijednost brzine oko 2100 m/s. Možemo zaključiti da parametar gustoće utječe na brzinu detonacije te da proporcionalno rastu što je prikazano na slici 6-3.



Slika 6-3. Zavisnost brzine detonacije o gustoći

Udio papira u većem postotku negativno utječe na brzinu detonacije te nakon 30% udjela pa nadalje varira brzinom 2100-2300 m/s. Na slici 6-4 je grafički prikazana brzina detonacije ovisna o udjelu papira.



Slika 6-4. Zavisnost brzine detonacije o udjelu papira

6.5 MLJEVENO SIJENO

Nakon mljevenja sijeno je raspodijeljeno na četiri veličine čestica : +0,5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,15 mm i -0,5 mm. Eksplozivnoj smjesi dodavani su određeni volumni udjeli pojedinih frakcija mljevenog sijena.

Srednja vrijednosti izmjerenih brzina detonacija prikazane su u tablici 6-3.

Tablica 6-3. Srednje vrijednosti brzina detonacija

Vrsta eksploziva	Omjer	Gustoća, ρ (g/cm^3)	Brzina detonacije, $v_{1'}$ (m/s)
ANFO+M	80:20	0,897	2438
M+EPS	60:40	0,461	2373
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,5/0,25 mm)	95:5	0,455	2547
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,5/0,25 mm)	90:10	0,430	2059
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,25/0,15 mm)	95:5	0,469	2123
(M + EPS 40/60) + Sijeno (0,25/0,15 mm)	90:10	0,408	1968

Zaključujemo da većim udjelom sijena smanjujemo brzinu detonacije te se dodatno smanjuje brzina ako su granulati sijena manji (0,15 mm).

Iako ispitivanja sa staklom, vapnom i piljevinom nisu bila u mogućnosti za provođenje, iz tablica 6-1 i 6-3 može se očitati kako dodavanje raznih materijala utječe na brzinu detonacije. Iz tablice 6-3 je vidljivo da je smjesa s dodatkom 10% papira najoptimalnija obzirom da je dala brzinu detonacije od 2005 m/s, dok je iz tablice 6.5-1 vidljivo da je najmanju brzinu postigla smjesa s 10% udjela sijena.

6.6 OTPADNA PLASTIKA

Dodatak otpadne plastike eksplozivima smanjene gustoće ima potencijalnih prednosti. Plastika može poslužiti kao gorivo za dodatnu energiju u eksploziji koja povećava brzinu detonacije i snagu eksploziva. Velika prednost je iskorištavanje otpada u vidu smanjenja troškova nabave prirodnih resursa i materijala te smanjenja količine plastičnog otpada na odlagalištima. Prilikom korištenja plastike trebalo bi provesti stroge sigurnosne standarde radi sigurnosti ljudi i okoliša. Nakon ispitivanja o nuspojavama dodavanja plastike eksplozivima smanjene gustoće daljnja ispitivanja su perspektivna.

Ova ispitivanja su dio širih istraživanja koja će se nastaviti provoditi. Ciljevi ovih ispitivanja izuzev smanjenja gustoće eksploziva su smanjenje tlaka i brzine detonacije uz uvjet da detonacija postigne stabilnost.

7. LITERATURA

BARANOV, E.G., VEDIN, A.T., BONDARENKO, I.F., 1996. Mining and Industrial Applications of Low – Density Explosives. A.A.Balkema

HADŽIĆ, E. 2017. Eksplozivne smjese s dodatkom reciklirane gume. Završni rad, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

HIDRATIZIRANO VAPNO, URL: https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63878 (24.07.2023.)

KRSNIK, J., 1989. Miniranje, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

KVARC, URL : https://hr.wikipedia.org/wiki/Kvarc (24.07.2023.)

MLJEVENO DRVO, URL: https://uvdarh.ru/hr/cakes/technology-of-production-of-wood-flour-on-the-technology-of-wood-flour-production.html (09.08.2023.)

PAPIR, URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Papir (24.07.2023.)

PAPIR, URL: https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=46541 (24.07.2023.)

PERSSON, P.A., HOLMBERG. R., LEE, J., 1994. Rock blasting and explosives engineering, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press

PILJEVINA, URL: https://proleksis.lzmk.hr/55759/ (24.07.2023.)

PLASTIKA, URL: https://koprivnica.hr/wp-content/uploads/2019/02/Vrste-plastike-i-kako-se-reciklira.pdf (09.08.2023.)

PLASTIKA, URL: https://rcco.hr/plastika/ (09.08.2023.)

ROCK, J., MAURER, A., PEREIRA, N., 2005. Coming of Age for Low-Density Explosives. Proceedings of the 2005 Coal Operators' Conference, 175–179.

SIJENO, URL: https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=55910 (24.07.2023.)

SILICIJEV DIOKSID, URL : https://hr.wikipedia.org/wiki/Silicijev_dioksid (24.07.2023.)

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

SUĆESKA, M. 2018. EXPLO5 User's Guide, OZM Research s.r.o., Hrochův Týnec. 2018.

TVRDO I MEKO DRVO, URL: https://hr.spot-the-difference.info/difference-between-hardwood (09.08.2023.)

VAPNENI CIKLUS, URL : https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Vapneni_ciklus.jpg (09.08.2023.)

VIDOVIĆ, E. 2011. Aromatski ugljikovodici. Skripta. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu.

VRSTE PLASTIKA, URL: https://www.plasticbusters.org/resources/tag/PS (09.08.2023.)

VUČKOVIĆ, R. 2021. Posebne kategorije otpada-plastični otpad. Završni rad, Veleučilište u Karlovcu

ZEČIĆ, L. 2015. Emulzijski i ANFO eksplozivi s dodatkom organskog otpada, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet

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)