

Eksplozivi s mikročesticama

Žbulj, Matko

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:953490>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

EKSPLOZIVI S MIKROČESTICAMA
Diplomski rad

Matko Žbulj
R-178

Zagreb, 2019.

EKSPLOZIVI S MIKROČESTICAMA

MATKO ŽBULJ

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Dodavanjem naizgled inertnog sastojka, kao što su mikro-metarske čestice aluminija u smjesu eksploziva, proučavana je ovisnost čestica aluminija na brzinu eksplozije ANFO-eksploziva. Tri različite frakcije, -20 μm , 63/45 μm i 90/75 μm , aluminijskog praha miješane su, u omjerima od 1% do 5% masenog postotka eksploziva, te su rezultati ispitivanja prikazani u ovom radu. Mješavine ispitivanih eksploziva su uspoređivane sa referentnim ANFO-eksplozivom, te sa mješavinom istog postotka aluminijskog praha, frakcije niže od ispitivane. Povećanje brzine eksplozije pojavilo se kod svih mješavina, a prema vizualnom pregledu krhotina ispitnih cijevi može se reći da se povećala i razorna sposobnost eksploziva.

Ključne riječi: ANFO, mikro, aluminij, brzina eksplozije

Diplomski rad sadrži: 34 stranice, 5 tablica, 25 slika i 10 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

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

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Datum obrane: 20. rujna 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

EXPLOSIVES WITH MICRO PARTICLES

MATKO ŽBULJ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining and Geotechnical Engineering,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

By adding inert components like micro particles of aluminium to a mixture of explosive material, it was possible to change some parameters of an explosive, like velocity of explosion (VoE). Three particle sizes were chosen for this study, a fraction with particles smaller than 20 μm , a fraction with particle sizes between 45 μm – 63 μm and a fraction with particle sizes between 75 μm – 90 μm . Weight ratio of 1% to a maximum of 5% of aluminium was blended with the ANFO-explosive. The performance of these mixtures was assessed by measuring the VoE and comparing with a reference explosive (ANFO blend) and with a mixture with the same weight ratio of aluminium but smaller fraction. The micro size aluminium increased the VoE of all the mixtures tested. After a visual inspection of the debris of the tested steel tubes it can be said that there was an increase in pressure and heat of the detonation.

Keywords: ANFO, micro, aluminium, VoE

Thesis contains: 34 pages, 5 tables, 25 figures and 10 references.

Original in: Croatian

Archived at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD

Technical support and assistance: Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

Reviewers: Associate Professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD
Assistant Professor Vječislav Bohanek, PhD

Date of defence: September 20, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	I
POPIS SLIKA	II
POPIS ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA I KORIŠTENIH OZNAKA	III
1. UVOD.....	1
2. UTJECAJ ALUMINIJA NA RAD EKSPLOZIJE.....	2
2.1. Eksplozivi	2
2.2. Aluminij.....	2
2.3. Eksplozivi sa dodatkom aluminija.....	3
3. ISPITIVANJE UTJECAJA METALNIH ČESTICA NA BRZINU DETONACIJE....	4
3.1. Miješanje ANFO-eksploziva	4
3.2. Priprema aluminijskog praha	5
3.3. Priprema ispitnih uzoraka	6
3.4. Provedba ispitivanja.....	7
4. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA	12
4.1. Analiza rezultata	16
4.1.1. Mješavina s frakcijom -20 µm.....	16
4.1.2. Mješavina s frakcijom 63/45 µm	20
4.1.3. Mješavina s frakcijom 90/75 µm.....	25
4.1.4. Usporedba rezultata mjerenja za sve mješavine	30
5. ZAKLJUČAK.....	33
6. LITERATURA	34

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Rezultati sijanja	6
Tablica 4-1. Prikaz rezultata referentnog ANFO-eksploziva	12
Tablica 4-2.. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije -20 μm	13
Tablica 4-3. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije 63/45 μm	14
Tablica 4-4. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije 90/75 μm	15

POPIS SLIKA

Slika 3-1. Pakiranje korištenog granuliranog amonijeva nitrata	4
Slika 3-2. Treskalica s postavljenim sitima	5
Slika 3-3. Granulometrijski sastav korištenog aluminija.....	6
Slika 3-4. Skica cijevi za otpucavanje	7
Slika 3-5. Cijev sa spojenim osjetilima i detonatorom.....	8
Slika 3-6. Elektronički sat Explomet-Fo-2000.	9
Slika 3-7. Shematski prikaz mjerenja brzine detonacije	10
Slika 3-8. ANFO sa dodatkom frakcije -20 μm	11
Slika 4-2. Krhotine cijevi broj 13 (-20 μm , 2%)	18
Slika 4-3. Krhotine cijevi broj 16 (-20 μm , 3%)	18
Slika 4-4. Krhotine cijevi broj 22 (-20 μm , 4%)	19
Slika 4-5. Krhotine cijevi broj 28 (-20 μm , 5%)	19
Slika 4-6. Grafikon srednjih vrijednosti brzina eksplozije mješavine 63/45 μm	22
Slika 4-7. Krhotine cijevi broj 33 (63/45 μm , 1%).....	22
Slika 4-8. Krhotine cijevi broj 38 (63/45 μm , 2%).....	23
Slika 4-9. Krhotine cijevi broj 41 (63/45 μm , 3%).....	23
Slika 4-10. Krhotine cijevi broj 47 (63/45 μm , 4%).....	24
Slika 4-11. Krhotine cijevi broj 52 (63/45 μm , 5%).....	24
Slika 4-12. Grafikon srednjih vrijednosti brzina eksplozije mješavine 90/75 μm	28
Slika 4-13. Krhotine cijevi broj 56 (90/75 μm , 1%).....	28
Slika 4-14. Krhotine cijevi broj 61 (90/75 μm , 2%).....	29
Slika 4-15. Krhotine cijevi broj 73 (90/75 μm , 4%).....	29
Slika 4-16. Krhotine cijevi broj 76 (90/75 μm , 5%).....	30
Slika 4-17. Usporedba rezultata postotnog povećanja brzine detonacije/eksplozije kod pojedinih mješavina.....	31

POPIS ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA I KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
l	m, mm, μm , nm	duljina
m	g	masa
$N_{\%v}$	%	postotno povećanje brzine detonacije/eksplozije
n	%	udio
ρ	g/cm^3	gustoća
t	s, μs	vrijeme
v	m/s	brzina
V	L, mL	volumen

Oznaka	Opis
Al	aluminij
AN	amonijev nitrat
ANFO	engl. <i>ammonium nitrate/fuel oil</i>
HMX	homociklonit, oktogen
RDX	ciklonit, heksogen
TNT	trinitrotoluen

1. UVOD

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

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetske materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije. Djelovanjem udarnih valova i ekspanzirajućih plinova one se u obliku mehaničkog rada troše na drobljenje, pomicanje i odlamanje stijenske mase.

Dodavanjem različitih, naizgled inertnih sastojaka kao što su mikro-metarske čestice aluminijske u smjesu eksploziva mijenjaju se primarna svojstva eksploziva.

Aluminijske čestice se u eksplozivima koriste kako bi poboljšale udarni val, povećale energiju mjehura kod podvodnih eksploziva, povisile temperaturu detonacije i proizvele zapaljive efekte (Keshavarz, 2005).

Dodavanjem čestica aluminijske ANFO-eksplozivu nastoji se poboljšati njegova primarna svojstva odnosno povećati brzinu detonacije i količinu oslobođene energije koju je moguće iskoristiti za razlamanje stijenske mase.

Za poboljšanje svojstava ANFO-eksploziva koristiti će se aluminijski prah različitih veličina čestica i dodavati će se eksplozivu u različitim masenim omjerima.

2. UTJECAJ ALUMINIJA NA RAD EKSPLOZIJE

Pregledom literature pojašnjen je pojam eksploziva, elementa aluminijske te utjecaj aluminijske na rad eksplozije.

2.1. Eksplozivi

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).

Pod pojmom eksploziv podrazumijeva se materijal koji pod utjecajem egzotermne kemijske reakcije prelazi u produkte raspadanja koji imaju znatno veći volumen od početnoga. Energija oslobođena kemijskom reakcijom pojavljuje se kao toplinska i kao potencijalna energija produkata raspadanja (Ester, 2005).

Rudarski (gospodarski, civilni, privredni) eksplozivi su energetski materijali koji eksplozivnom pretvorbom mijenjaju potencijalnu kemijsku energiju u kinetičku energiju udarnih valova i energiju ekspanzije plinovitih produkata kemijske reakcije (Škrlec, 2015).

Brzinom detonacije se smatraju brzine egzotermnih kemijskih reakcija eksplozivnih tvari koje su veće od 2000 m/s, a sporije reakcije se nazivaju brzinom eksplozije.

2.2. Aluminij

Aluminij u periodnom sustavu elemenata nosi simbol Al. Atomski odnosno redni broj mu iznosi 13, a atomska masa mu iznosi 26,982. To je srebrnasto – bijela krutina poznata po svojoj izrazitoj električnoj i toplinskoj vodljivosti. Relativno je male gustoće ($2,7 \text{ g/cm}^3$), nije toksičan, ima veliku otpornost na koroziju, paramagnetičan je te se lako tali, lijeva i strojno obrađuje. Zbog vrlo dobrih fizikalnih i mehaničkih svojstava koristi se u proizvodnji konzervi, folija, kuhinjskih pomagala, prozorskih okvira i dijelova za zrakoplove (RSC, 2019).

2.3. Eksplozivi sa dodatkom aluminija

Prema pregledu dostupne literature, velika većina autora koristila je druge vrste eksploziva za slična ispitivanja. Korišteni su TNT, RDX i HMX, vrlo jaki brizantni eksplozivi. Brousseau i dr. (2002) koristili su više vrsta aluminijskih prahova. Korišteni su „Alex“ veličine 100 nm – 200 nm, „Valimet H-2“ veličine 2 μm, „Valimet H-15“ veličine 12 μm i MDX-75 veličine 21 μm. Koristili su i četiri vrste eksploziva. TNT je miješan u omjerima od 10%, 20% i 30% različitih veličina aluminijskog praha, ANFO je miješan s 10% različitih veličina aluminijskog praha, a plastično-vezani eksplozivi, na bazi HMX-a te RDX-a, su miješani sa 10% i 20% Alex praha i Valimet-a H-15. Zaključili su da nano-čestice aluminija nisu povisile brzinu detonacije kod plastično-vezanih eksploziva s inertnim vezivom, a brzina detonacije kod plastičnih eksploziva sa aktivnim vezivom snizila se kada su mikro-čestice aluminija zamijenjene Alex-prahom. Kod ANFO-eksploziva sa 10% Alex praha, također se snizila brzina detonacije, ali se povećala toplina eksplozije. Povećanje brzine detonacije i povećanje topline detonacije dogodilo se samo kod mješavina sa TNT-om. Naveli su da nisu uočili povećanje udarnog vala kod korištenja nano-čestica aluminija te da je čak uočeno i smanjenje udarnog vala kod plastično-vezanih eksploziva s inertnim vezivom.

Zhou i dr. (2017) su koristili TNT i frakcije aluminija veličine 50 nm, 100 nm, 1,5 μm i 9,79 μm. Zaključili su da, kod detonacije, nano-čestice aluminija reagiraju ranije i brže nego mikro-čestice aluminija, a prema Chapman-Jouguetovoj teoriji uočili su da veće tlakove plinskih produkata proizvode mješavine s dodatkom nano-čestica te da mikro-čestice nemaju velik utjecaj na detonaciju. Vrijednosti tlakova prikazane su kao: TNT/Al (50 nm) > TNT/Al (100 nm) > TNT/Al (1,50 μm) ≈ TNT/Al (9,79 μm). U prvih 0,82 μs detonacije, tlak kod mješavina sa dodatkom nano-čestica bio je viši nego kod mješavina sa mikro-česticama zbog čega su zaključili da mješavine sa nano-česticama imaju slabiji gubitak detonacijskog tlaka kroz propagiranje eksplozije.

Na ovim primjerima može se vidjeti da je različiti pristup sličnoj temi, dao dva različita zaključka. Za potrebe ovog rada korištene su mješavine aluminija mikrometarskih dimenzija iako je prvi plan bio korištenje nano-čestica.

3. ISPITIVANJE UTJECAJA METALNIH ČESTICA NA BRZINU DETONACIJE

Sve pripremne radnje i ispitivanja obavljena su u Laboratoriju za eksplozive na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Pripremne radnje obuhvaćale su miješanje ANFO-eksploziva, sijanje aluminijskog praha i priprema cijevi za otpucavanje. Prema Keshavarzu (2005) na brzinu eksplozije/detonacije mješavine eksploziva s aluminijem utječe sastav aluminijske, bilanca kisika, toplinski kapacitet aluminijske i gustoća mješavine.

3.1. Miješanje ANFO-eksploziva

Granulirani porozni amonijev nitrat, prikazan na slici 3-1., miješan je u volumnom omjeru 94,5% sa 5,5% dizel goriva. Smjesa eksploziva rađena je odjednom za svih 80 punjenja da se osigura konzistentna smjesa kroz ispitivanja. Smjesa od 5 L sadržavala je 4725 mL granuliranog amonijeva nitrata i 275 mL dizel goriva, što je osiguralo maksimalnih 62,5 g eksploziva po punjenju cijevi. Smjesa je miješana laboratorijskom miješalicom sa pripadajućim alatom.



Slika 3-1. Pakiranje korištenog granuliranog amonijeva nitrata

3.2. Priprema aluminijskog praha

Za sisanje aluminijskog praha korištena je elektromagnetska treskalica za sita te sita veličine 125 μm , 90 μm , 75 μm , 63 μm , 45 μm , 38 μm i 20 μm . Na treskalicu su postavljena sita po veličini te je u prvo sito (125 μm) stavljeno oko 150 g aluminijskog praha. Sita su poklopljena pripadajućim poklopcem te je set sita pričvršćen za bazu treskalice maticama (slika 3-2.).



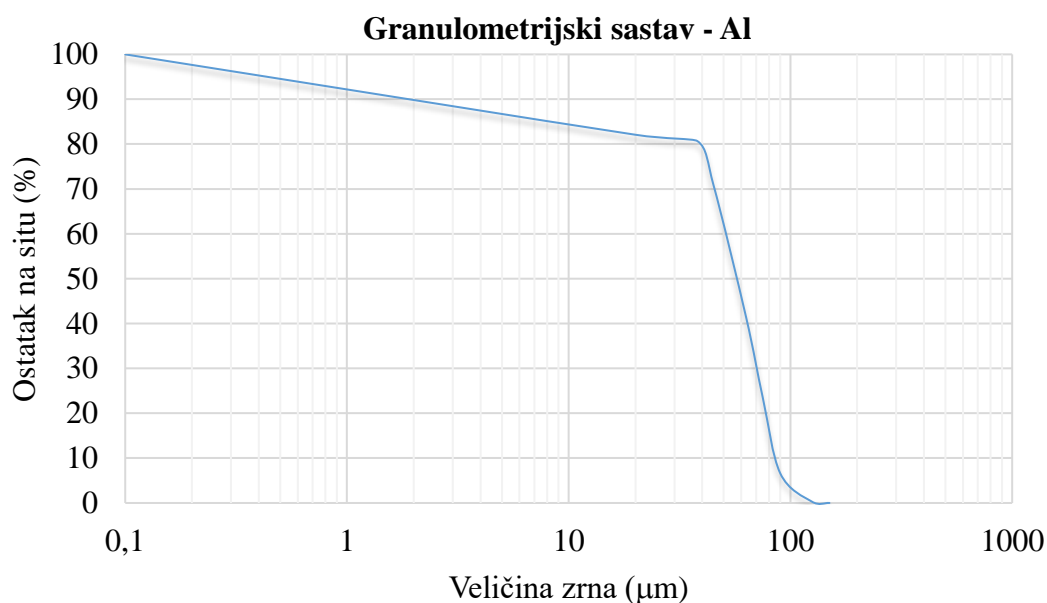
Slika 3-2. Treskalica s postavljenim sitima

Treskalica je uključena na automatski režim rada u trajanju 15 minuta te je nakon isteka vremena skinuto svako sito pojedinačno i ispražnjeno u zasebne staklene čaše označene određenom frakcijom sisanja. Masa ostatka na pojedinom situ dana je u tablici 3-1., a granulometrijski sastav vidljiv je na slici 3-3.

Sisanje je rađeno u dobro ventiliranoj prostoriji sa zaštitnom vrećom preko treskalice da bi se smanjilo širenje oblaka aluminijskog praha. Od dobivenih raspona frakcija izabrane su frakcije -20 μm , 63/45 μm i frakcija 90/75 μm . Tri izabrane frakcije umiješane su u ANFO-eksploziv u masenim omjerima od 1% – 5%. Za svaki maseni postotak punjeno je 5 cijevi.

Tablica 3-1. Rezultati sisanja

Al		
Klasa	Masa, (g)	Masa, (%)
+125	0,29	0,30
125/90	6,13	6,29
90/75	16,52	16,95
75/63	17,56	18,01
63/45	28,54	29,28
45/38	9,61	9,86
38/20	1,36	1,40
-20	17,47	17,92
Σ	97,48	100,00

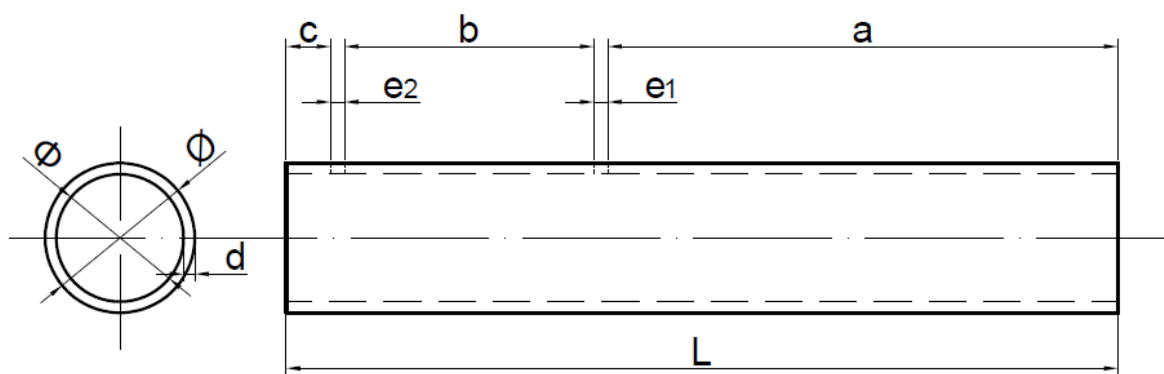


Slika 3-3. Granulometrijski sastav korištenog aluminija

3.3. Priprema ispitnih uzoraka

Čelične cijevi, prosječnog promjera 20 mm, rezane su na prosječnu duljinu od oko 150 mm nakon čega su u njima izbušena dva otvora za optičke kablove (osjetila). Zahtjevi norme *HRN EN 13631-14:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2003)* primijenjeni su kao osnova za mjerenje brzine eksplozije. Otvor za prvo osjetilo postavljen je na 75 mm od početka cijevi, a drugi otvor osjetila bušen je na udaljenosti od 50 mm od prvog.

Tako pripremljenoj cijevi mjerene su sve dimenzije (slika 3-4.) pomičnim mjerilom, cijev je numerirana te su otvori za osjetila i donji kraj cijevi zalijepljeni izolacijskom trakom kako bi se cijev mogla napuniti mješavinom eksploziva. Svakoj cijevi izmjerena je masa prije i nakon punjenja. Nakon punjenja vrh cijevi je također zalijepljen izolacijskom trakom da bi se lakše rukovalo uzorkom.



Legenda:

\emptyset vanjski promjer cijevi	L duljina cijevi	a udaljenost prvog osjetila od početka cijevi
Φ unutarnji promjer cijevi	e_1 promjer prvog osjetila	b udaljenost između osjetila
d debljina stijenke	e_2 promjer drugog osjetila	c udaljenost drugog osjetila do kraja cijevi

Slika 3-4. Skica cijevi za otpucavanje

3.4. Provedba ispitivanja

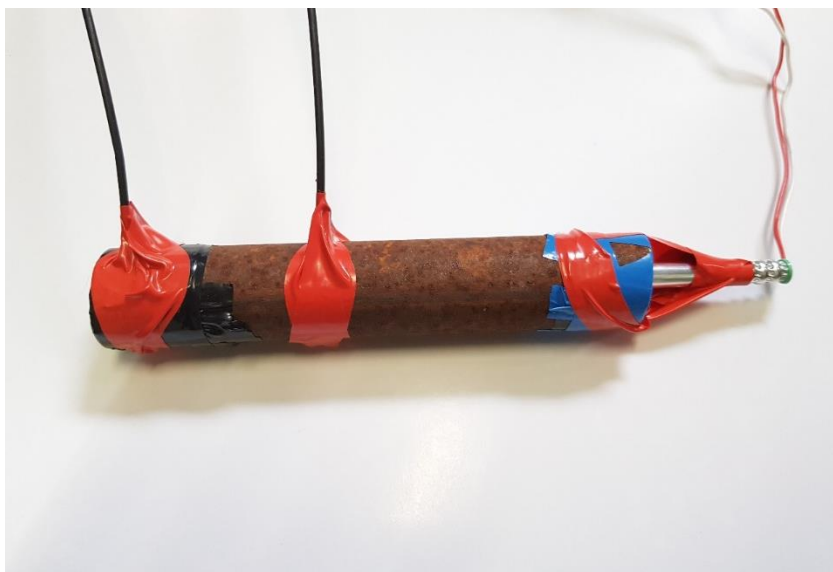
Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, akreditiranom prema normi *HRN EN ISO/IEC 17025:2007*.

Gustoća korištenih eksploziva je određena eksperimentalno prema zahtjevima norme *HRN EN 13631-13:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu – Jaki eksplozivi – 13. dio: Određivanje gustoće (EN 13631-13:2003)*. Za određivanje gustoće ANFO-eksploziva primjenjuje se postupak određivanja gustoće tečnih eksploziva. Tečnim eksplozivima se smatraju oni eksplozivi koji se nalaze u obliku čvrstih zrnaca, u tekućem stanju ili u obliku paste, odnosno u obliku koji omogućuje pretakanje homogene neprekinute mase između posuda, bez prisile (HRN EN 13631-13, 2003).

Prema normi, gustoća eksplozivne tvari mjerena je za svaku eksplozivnu tvar 5 puta. Volumen od 25 mL mjereno je menzutom i vagano da bi se dobile vrijednosti potrebne za računanje gustoće.

Za svih 80 mješavina eksploziva određena je brzina eksplozije u komori za ispitivanje eksplozivnih tvari Laboratorija za eksplozive. Za ispitni uzorak trebalo je

pričvrstiti osjetila i detonator. Prije umetanja osjetila u pripadajući otvor na cijevi, vrh osjetila je obložen izolacijskom trakom kako bi se spriječilo prijevremeno osvjjetljenje osjetila i greška u mjerenju zbog poroznosti ANFO-eksploziva. Osjetila su osigurana na mjestu s izolacijskom trakom. Za sustav iniciranja odabrani su trenutni električni detonatori i dinamo-električna mašina za paljenje. Pripremljena cijev prikazana je na slici 3-5.



Slika 3-5. Cijev sa spojenim osjetilima i detonatorom

Brzina eksplozije ANFO-eksploziva mjerena je elektro-optičkom metodom pomoću elektroničkog sata Explomet-Fo-2000.

Uređaj ima mogućnost mjerenja brzine eksplozije/detonacije na pet segmenata pomoću šest osjetila. Metodom se mjeri vrijeme koje je potrebno fronti detonacijskoga vala da prijeđe udaljenost između dvije mjerne točke. Uređaj dobiva podatke pomoću optičkih kablova, tj. svjetlovoda koji provode svjetlost koju proizvede detonacijska fronta u trenutku kada probije zaštitnu ovojnicu optičkog kabela. Na osnovi izmjerena vremena i poznate udaljenosti, koja se ručno unosi u uređaj, izračunava se brzina. Točnost mjerenja vremena iznosi $\pm 0,1 \mu\text{s}$ na ukupno trajanje do 10 000 μs (Dobrilović, 2008).

Unijeta udaljenost iznosila je 50 mm zbog pojednostavljenja mjerenja. Udaljenosti između osjetila razlikovale su se ovisno o rednom broju cijevi pa je napravljena korekcija brzine eksplozije obzirom na stvarnu udaljenost između osjetila prema formuli 3-1.

$$v_1 = \frac{b_1}{t_1} * 1000 \quad (3-1.)$$

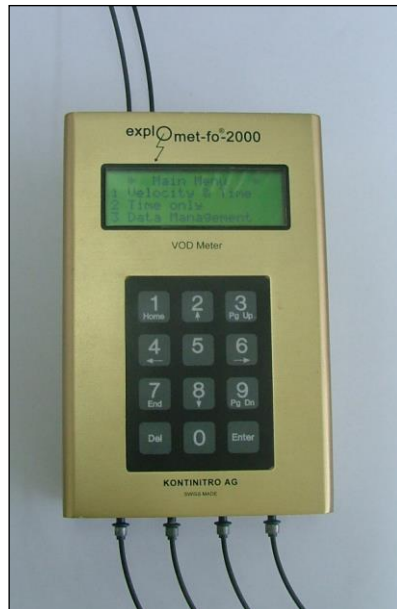
gdje je:

v_1 – stvarna brzina eksplozije (m/s),

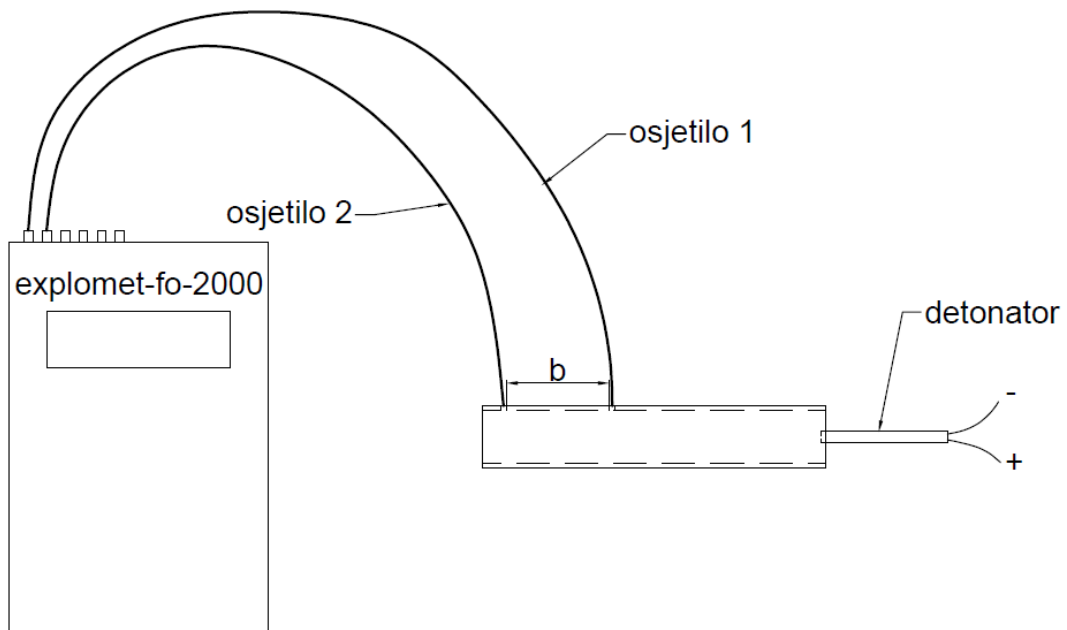
b_1 – stvarna udaljenosti između osjetila (mm),

t_1 – izmjereno vrijeme između osjetila (μ s).

Na slici 3-6. prikazan je elektronički sat Explomet-Fo-2000, a prikaz mjerenja brzine eksplozije može se vidjeti na slici 3-7. pri čemu b predstavlja udaljenost između dva osjetila.



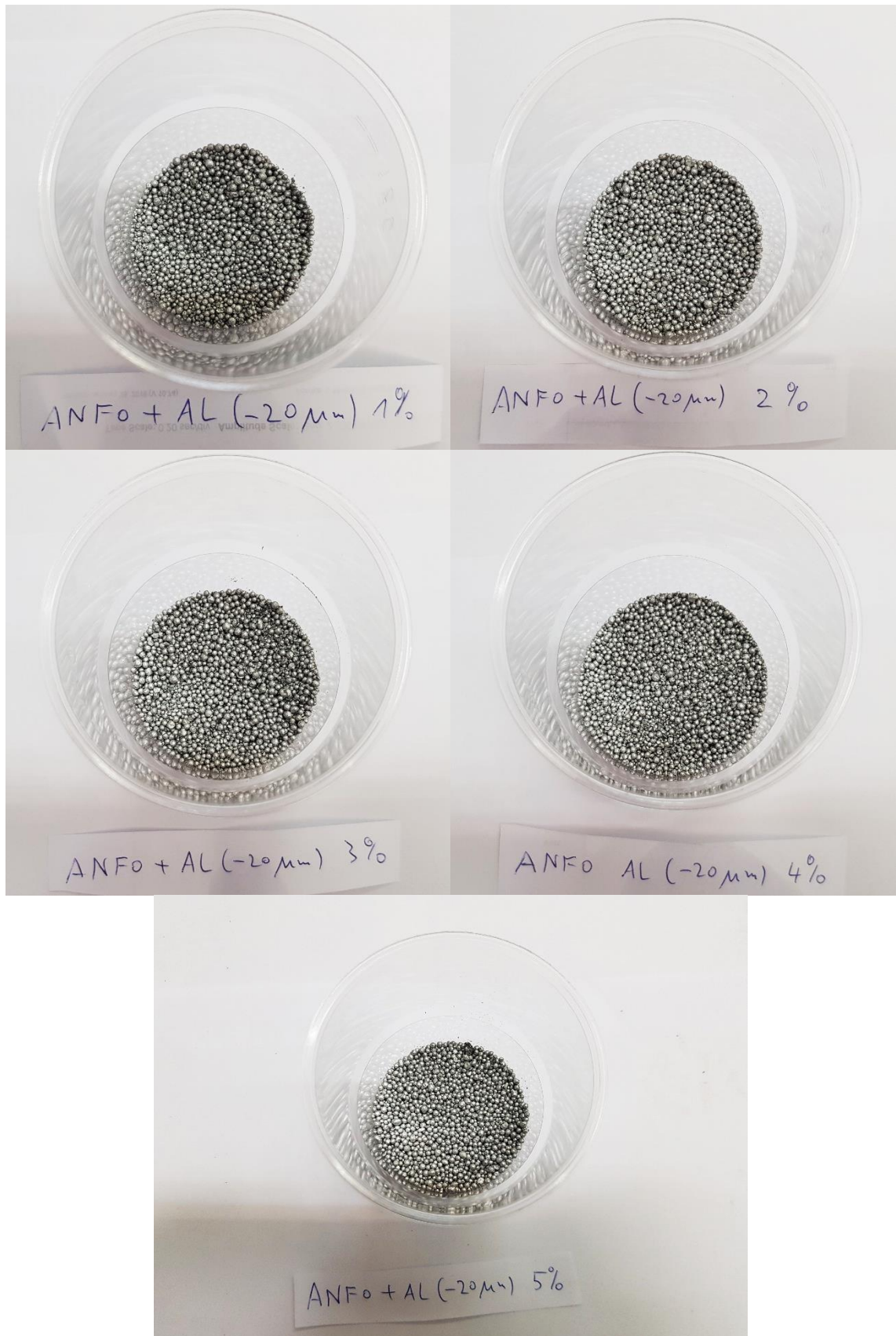
Slika 3-6. Elektronički sat Explomet-Fo-2000.



Slika 3-7. Shematski prikaz mjerenja brzine detonacije

Da bi se zadovoljila norma *HRN EN 13631-14:2003: Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije (EN 13631-14:2003)* potrebno je napraviti 3 ispitivanja brzine eksplozije. Za potrebe ovog rada napravljeno je 5 ispitivanja da bi se bolje uprosječili rezultati.

Na slici 3-5. je vidljivo da je ANFO skoro u potpunosti zamiješan sa sitnim aluminijskim prahom, odnosno, u mješavini se ne vide čestice aluminijskog praha.



Slika 3-8. ANFO sa dodatkom frakcije -20 μm

4. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

Kao referentni eksploziv korišten je ANFO bez dodatka aluminijskog praha te su rezultati određivanja brzine eksplozije prikazani u tablici 4-1. Masa eksplozivne tvari varira od cijevi do cijevi zbog različitih duljina ispitnih cijevi.

Tablica 4-1. Prikaz rezultata referentnog ANFO-eksploziva

Cijev br.	Vrsta eksplozivne tvari	Gustoća eksplozivne tvari, ρ (g/cm ³)	Masa eksplozivne tvari, m_{ET} (g)	Izmjereno vrijeme između osjetila, t_1 (μ s)	Brzina eksplozije između osjetila, v_1 (m/s)
1.	ANFO	0,820	52,40	34,3	1322
2.	ANFO	0,820	53,70	53,5	843
3.	ANFO	0,821	54,95	44,2	1016
4.	ANFO	0,819	48,50	43,0	1046
5.	ANFO	0,822	49,49	34,6	1309
Srednje vrijednosti		0,820	51,81	41,9	1107

Iz ovih 5 ispitivanja vidljivo je da brzine eksplozije čistog ANFO-eksploziva nisu ujednačene zbog ne-idealne eksplozije. Razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti je čak 479 m/s. Nakon provedenog referentnog mjerenja, eksploziv je pomiješan sa česticama aluminijskog praha veličine -20 μ m, pri čemu je omjer aluminija povećavan za 1% od 1% do 5% masenog postotka eksploziva.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 4-2., 4-3. i 4-4. Kod cijevi pod rednim brojevima 29. i 45. došlo je do neuspješnog mjerenja pa su rezultati zanemareni.

Tablica 4-2.. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije -20 μm

Cijev br.	Vrsta eksplozivne tvari	Stvarna brzina eksplozije između osjetila, v_1 (m/s)	Razlika između maksimalne i minimalne brzine eksplozije (m/s)	Srednja vrijednost brzine eksplozije, v_{SR} (m/s)	Postotna razlika u odnosu na
6.	ANFO+Al (-20 μm) 1 %	972	332	1141	ANFO: 3,1
7.	ANFO+Al (-20 μm) 1 %	1249			
8.	ANFO+Al (-20 μm) 1 %	1304			
9.	ANFO+Al (-20 μm) 1 %	1120			
10.	ANFO+Al (-20 μm) 1 %	1060			
11.	ANFO+Al (-20 μm) 2 %	1393	391	1212	ANFO: 9,4
12.	ANFO+Al (-20 μm) 2 %	1002			
13.	ANFO+Al (-20 μm) 2 %	1209			
14.	ANFO+Al (-20 μm) 2 %	1193			
15.	ANFO+Al (-20 μm) 2 %	1263			
16.	ANFO+Al (-20 μm) 3 %	1205	117	1156	ANFO: 4,4
17.	ANFO+Al (-20 μm) 3 %	1191			
18.	ANFO+Al (-20 μm) 3 %	1151			
19.	ANFO+Al (-20 μm) 3 %	1087			
20.	ANFO+Al (-20 μm) 3 %	1148			
21.	ANFO+Al (-20 μm) 4 %	1223	116	1231	ANFO: 11,1
22.	ANFO+Al (-20 μm) 4 %	1197			
23.	ANFO+Al (-20 μm) 4 %	1313			
24.	ANFO+Al (-20 μm) 4 %	1219			
25.	ANFO+Al (-20 μm) 4 %	1202			
26.	ANFO+Al (-20 μm) 5 %	1179	331	1189	ANFO: 7,4
27.	ANFO+Al (-20 μm) 5 %	1247			
28.	ANFO+Al (-20 μm) 5 %	1330			
29.	ANFO+Al (-20 μm) 5 %	-			
30.	ANFO+Al (-20 μm) 5 %	999			

Tablica 4-3. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije 63/45 μm

Cijev br.	Vrsta eksplozivne tvari	Stvarna brzina eksplozije između osjetila, v_1 (m/s)	Razlika između maksimalne i minimalne brzine eksplozije (m/s)	Srednja vrijednost brzine eksplozije, v_{SR} (m/s)	Postotna razlika u odnosu na
31.	ANFO+Al (63/45 μm) 1 %	1077	235	1167	ANFO: 5,4 -20 μm : 2,3
32.	ANFO+Al (63/45 μm) 1 %	1129			
33.	ANFO+Al (63/45 μm) 1 %	1138			
34.	ANFO+Al (63/45 μm) 1 %	1180			
35.	ANFO+Al (63/45 μm) 1 %	1312			
36.	ANFO+Al (63/45 μm) 2 %	1310	167	1275	ANFO: 15,2 -20 μm : 5,2
37.	ANFO+Al (63/45 μm) 2 %	1315			
38.	ANFO+Al (63/45 μm) 2 %	1307			
39.	ANFO+Al (63/45 μm) 2 %	1296			
40.	ANFO+Al (63/45 μm) 2 %	1148			
41.	ANFO+Al (63/45 μm) 3 %	1253	220	1404	ANFO: 26,8 -20 μm : 21,5
42.	ANFO+Al (63/45 μm) 3 %	1441			
43.	ANFO+Al (63/45 μm) 3 %	1451			
44.	ANFO+Al (63/45 μm) 3 %	1473			
45.	ANFO+Al (63/45 μm) 3 %	-			
46.	ANFO+Al (63/45 μm) 4 %	1707	274	1597	ANFO: 44,2 -20 μm : 29,7
47.	ANFO+Al (63/45 μm) 4 %	1433			
48.	ANFO+Al (63/45 μm) 4 %	1599			
49.	ANFO+Al (63/45 μm) 4 %	1638			
50.	ANFO+Al (63/45 μm) 4 %	1606			
51.	ANFO+Al (63/45 μm) 5 %	1609	259	1659	ANFO: 49,9 -20 μm : 39,6
52.	ANFO+Al (63/45 μm) 5 %	1646			
53.	ANFO+Al (63/45 μm) 5 %	1547			
54.	ANFO+Al (63/45 μm) 5 %	1806			
55.	ANFO+Al (63/45 μm) 5 %	1688			

Tablica 4-4. Prikaz rezultata ANFO-eksploziva sa dodatkom frakcije 90/75 μm

Cijev br.	Vrsta eksplozivne tvari	Stvarna brzina eksplozije između osjetila, v_1 (m/s)	Razlika između maksimalne i minimalne brzine eksplozije (m/s)	Srednja vrijednost brzine eksplozije, v_{SR} (m/s)	Postotna razlika u odnosu na
56.	ANFO+Al (90/75 μm) 1 %	1117	143	1119	ANFO: 1,1 -20 μm : -1,9 63/45: -4,1
57.	ANFO+Al (90/75 μm) 1 %	1067			
58.	ANFO+Al (90/75 μm) 1 %	1047			
59.	ANFO+Al (90/75 μm) 1 %	1173			
60.	ANFO+Al (90/75 μm) 1 %	1190			
61.	ANFO+Al (90/75 μm) 2 %	1381	101	1382	ANFO: 24,8 -20 μm : 14,1 60/45: 8,4
62.	ANFO+Al (90/75 μm) 2 %	1412			
63.	ANFO+Al (90/75 μm) 2 %	1326			
64.	ANFO+Al (90/75 μm) 2 %	1365			
65.	ANFO+Al (90/75 μm) 2 %	1427			
66.	ANFO+Al (90/75 μm) 3 %	1603	239	1711	ANFO: 54,5 -20 μm : 48,0 63/45: 21,8
67.	ANFO+Al (90/75 μm) 3 %	1694			
68.	ANFO+Al (90/75 μm) 3 %	1637			
69.	ANFO+Al (90/75 μm) 3 %	1779			
70.	ANFO+Al (90/75 μm) 3 %	1842			
71.	ANFO+Al (90/75 μm) 4 %	1478	145	1586	ANFO: 43,4 -20 μm : 28,9 63/45: -0,6
72.	ANFO+Al (90/75 μm) 4 %	1618			
73.	ANFO+Al (90/75 μm) 4 %	1590			
74.	ANFO+Al (90/75 μm) 4 %	1623			
75.	ANFO+Al (90/75 μm) 4 %	1623			
76.	ANFO+Al (90/75 μm) 5 %	1801	96	1762	ANFO: 59,2 -20 μm : 66,5 63/45: 6,2
77.	ANFO+Al (90/75 μm) 5 %	1705			
78.	ANFO+Al (90/75 μm) 5 %	1775			
79.	ANFO+Al (90/75 μm) 5 %	1785			
80.	ANFO+Al (90/75 μm) 5 %	1746			

4.1. Analiza rezultata

Rezultati su sistematizirani u tablice, obrađeni i prikazani grafički, a krhotine ispitnih cijevi su fotografirane i priložene rezultatima.

4.1.1. Mješavina s frakcijom -20 μm

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva, iniciranog električnim detonatorom, iznosi 1107 m/s.

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm iznosi 1141 m/s i prosječno je viša za 3,1% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 1,5%, a raspon brzina eksplozije iznosi 332 m/s što je za 147 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv.

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm iznosi 1212 m/s i prosječno je viša za 9,4% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 2,0%, a raspon brzina eksplozije iznosi 391 m/s što je za 88 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv i 59 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

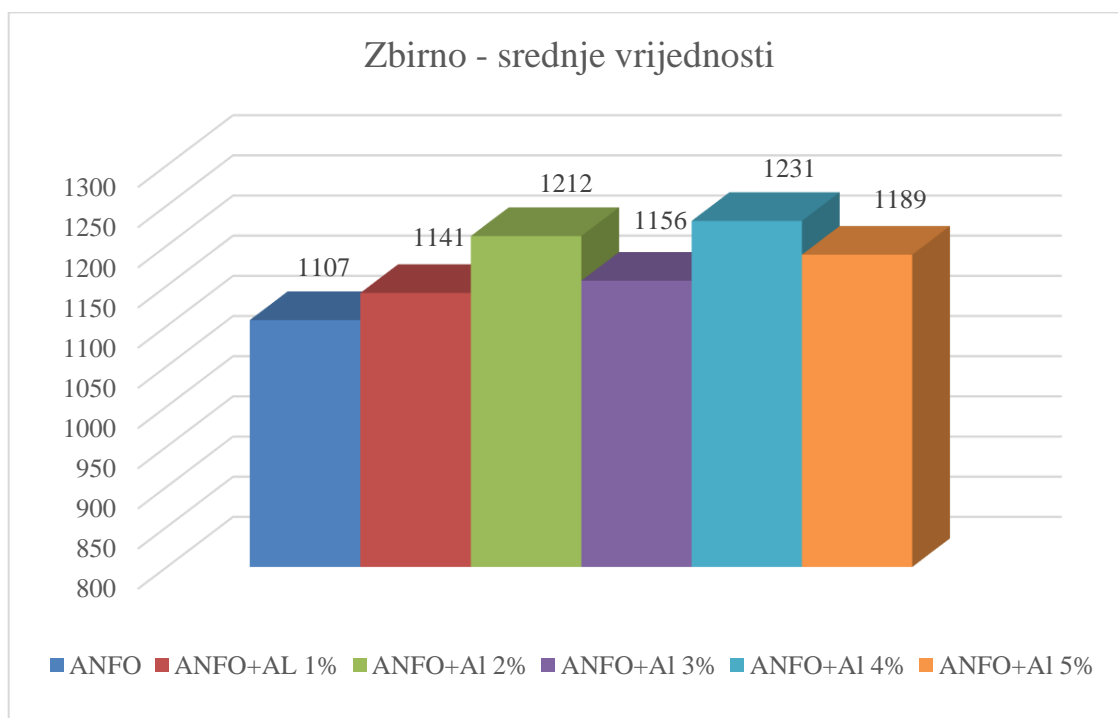
Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm iznosi 1156 m/s i prosječno je viša za 4,4% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 3,5%, a raspon brzina eksplozije iznosi 117 m/s što je za 362 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 215 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 274 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm iznosi 1231 m/s i prosječno je viša za 11,1% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 4,6%, a raspon brzina eksplozije iznosi 116 m/s što je za 363 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 216 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm , 275 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 1 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm iznosi 1189 m/s i prosječno je viša za 7,4% u odnosu na čisti ANFO-

eksploziv (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 6,1%, a raspon brzina eksplozije iznosi 331 m/s što je za 148 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 1 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm , 60 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm , 214 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 215 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

Krhotine, jednog od uzorka iz setova cijevi, fotografirane su nakon otpucavanja (slike 4-2. do 4-5.). Na sljedećim slikama se jasno vide krhotine sve manjih dimenzija u odnosu na povećanje postotka aluminijskog praha u eksplozivnoj mješavini (u gornjem lijevom kutu nalazi se redni broj ispitnog uzorka). S obzirom na povećanje udjela sitnijih krhotina i smanjenje udjela krupnijih krhotina ispitnih cijevi s povećanjem udjela aluminijskog praha može se zaključiti da dolazi do povećanja oslobođene energije koja se u obliku rada utroši na bolje razlamanje ispitnih cijevi.



Slika 4-1. Grafikon srednjih vrijednosti brzina eksplozije mješavine -20 μm



Slika 4-2. Krhotine cijevi broj 13 (-20 μm , 2%)



Slika 4-3. Krhotine cijevi broj 16 (-20 μm , 3%)



Slika 4-4. Krhotine cijevi broj 22 (-20 μm , 4%)



Slika 4-5. Krhotine cijevi broj 28 (-20 μm , 5%)

4.1.2. Mješavina s frakcijom 63/45 μm

Rezultati ispitivanja mješavine eksploziva sa dodatkom frakcije 63/45 μm prikazani su u tablici 4-3. Mješavine su uspoređivane sa referentnim ANFO-eksplozivom i mješavinom niže frakcije ali istog udjela aluminijskog prašaka.

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva, iniciranog električnim detonatorom, iznosi 1107 m/s.

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm iznosi 1167 m/s i prosječno je viša za 5,4% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i viša za 2,3% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 2,7% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i za 1,2% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 235 m/s što je za 244 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv i 97 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 2% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm iznosi 1275 m/s i prosječno je viša za 15,2% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i viša za 5,2% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 2,9% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i za 0,9% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 167 m/s što je za 312 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 68 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm i 224 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 3% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm iznosi 1404 m/s i prosječno je viša za 26,8% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i viša za 21,5% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 3,6% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i za 0,2% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 220 m/s što je za 259 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 15 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm , 53 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog prašaka frakcije 63/45 μm i 103 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog prašaka frakcije -20 μm .

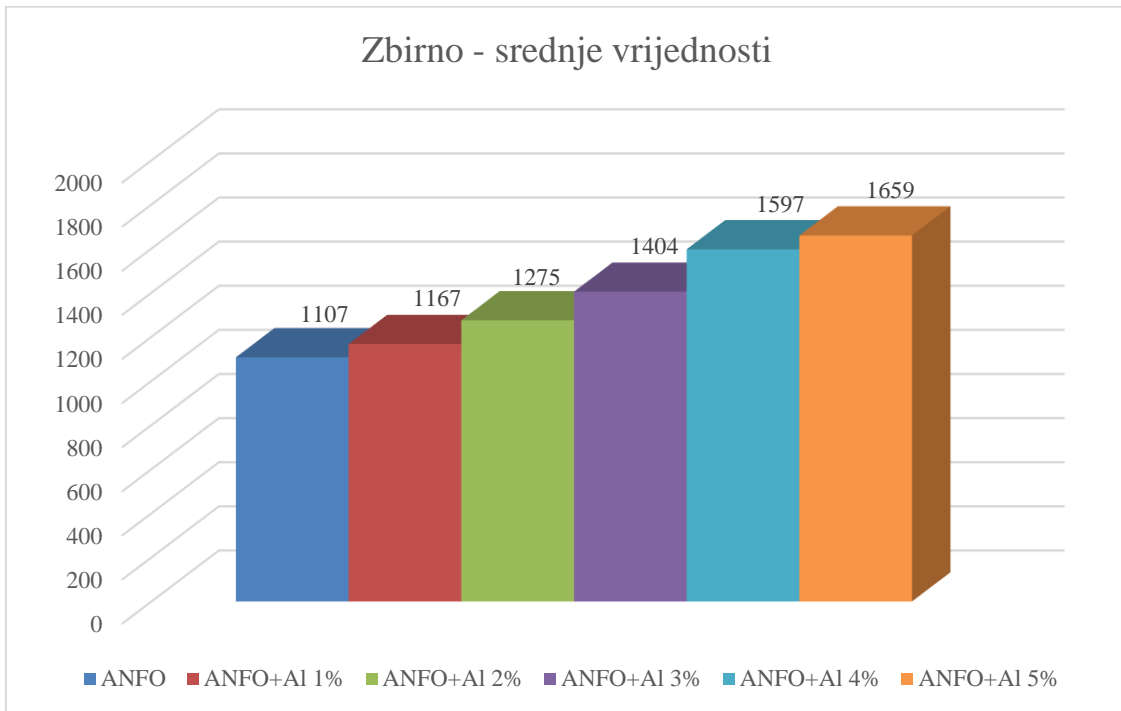
Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm iznosi 1597 m/s i prosječno je viša za 44,2% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i viša za 29,7% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 4,6% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i smanjila za 0,1% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 274 m/s što je za 205 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 39 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm , 107 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm , 54 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm i 158 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm iznosi 1659 m/s i prosječno je viša za 49,9% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i viša za 39,6% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 5,7% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv i smanjila za 0,3% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 259 m/s što je za 220 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 24 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm , 92 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm , 39 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm , 15 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm i 72 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm .

Ispitni uzorak broj 54 imao je najveću stvarnu brzinu eksplozije u iznosu od 1806 m/s. Na slici 4-6. prikazana je usporedba srednje vrijednosti brzina eksplozije smjese ANFO-a i mješavina ANFO-a sa različitim postotcima frakcije 63/45 μm .

Krhotine, jednog od uzorka iz setova cijevi, fotografirane su nakon otpucavanja (slike 4-7. do 4-11.). Na sljedećim slikama se jasno vide krhotine sve manjih dimenzija u odnosu na povećanje postotka aluminijskog praha u eksplozivnoj mješavini (u gornjem lijevom kutu nalazi se redni broj ispitnog uzorka). S obzirom na povećanje udjela sitnijih krhotina i smanjenje udjela krupnijih krhotina ispitnih cijevi s povećanjem udjela

alumijskog praha može se zaključiti da dolazi do povećanja oslobođene energije koja se u obliku rada utroši na bolje razlamanje ispitnih cijevi.



Slika 4-6. Grafikon srednjih vrijednosti brzina eksplozije mješavine 63/45 μm



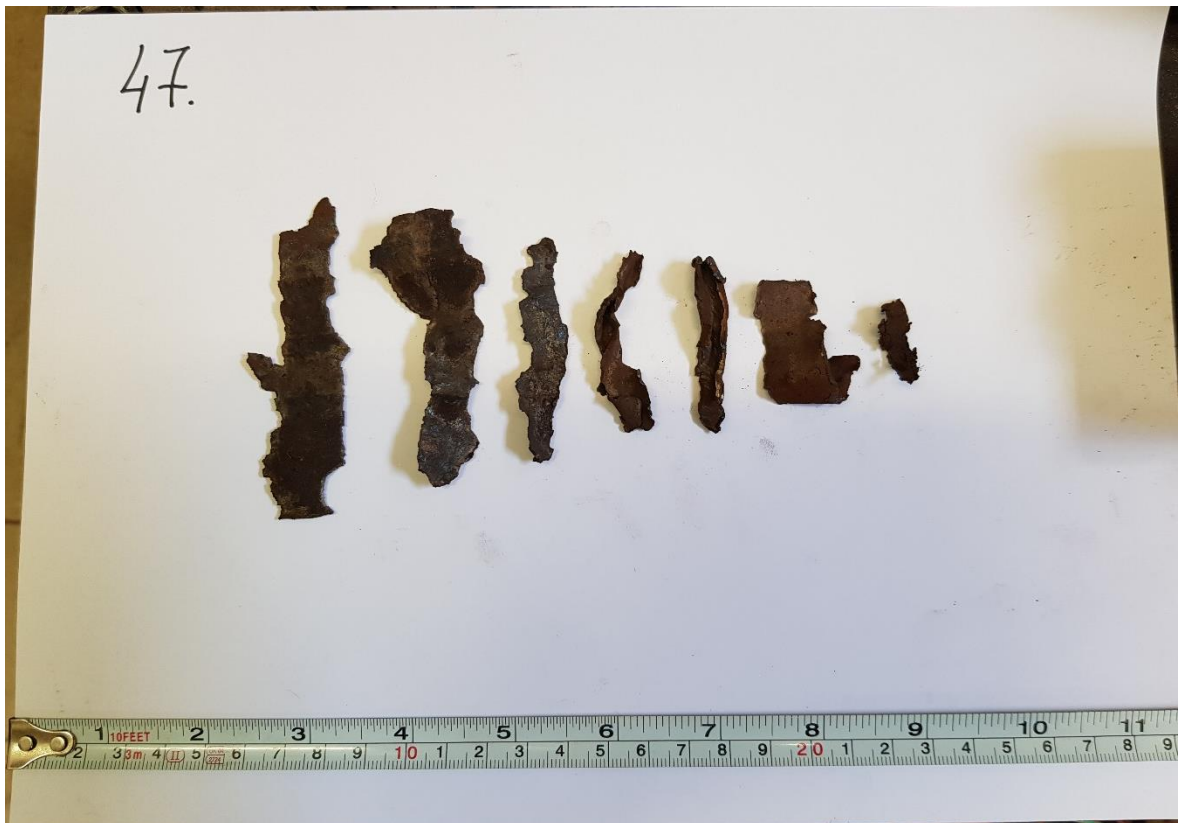
Slika 4-7. Krhotine cijevi broj 33 (63/45 μm , 1%)



Slika 4-8. Krhotine cijevi broj 38 (63/45 μm , 2%)



Slika 4-9. Krhotine cijevi broj 41 (63/45 μm , 3%)



Slika 4-10. Krhotine cijevi broj 47 (63/45 μm , 4%)



Slika 4-11. Krhotine cijevi broj 52 (63/45 μm , 5%)

4.1.3. Mješavina s frakcijom 90/75 μm

Rezultati ispitivanja mješavine eksploziva prikazani su u tablici 4-4. Mješavine su također uspoređivane sa referentnim ANFO-eksplozivom, frakcijom -20 μm i frakcijom 63/45 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva, iniciranog električnim detonatorom, iznosi 1107 m/s.

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm iznosi 1119 m/s i prosječno je viša za 1,1% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, niža za 1,9% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm i niža za 4,1% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 3,7% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, za 2,1% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm i za 0,9% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 143 m/s što je za 336 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 189 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 92 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm iznosi 1382 m/s i prosječno je viša za 24,8% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, viša za 14,1% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm i viša za 8,4% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 4,4% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, za 2,3% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije -20 μm i za 1,4% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 101 m/s što je za 378 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 42 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 231 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 134 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm iznosi 1711 m/s i prosječno je viša za 54,5% u odnosu na čisti

ANFO-eksploziv, viša za 48,0% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm i viša za 21,8% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 4,7% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, za 1,2% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm i za 1,0% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 239 m/s što je za 240 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 96 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 138 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 122 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 19 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm .

Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm iznosi 1586 m/s i prosječno je viša za 43,3% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, viša za 28,9% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm i manja za 0,6 % u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 5,2% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, za 0,5% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm i za 0,6% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 145 m/s što je za 334 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 2 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 44 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 94 m/s niže u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 29 m/s više u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 129 m/s niže u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm .

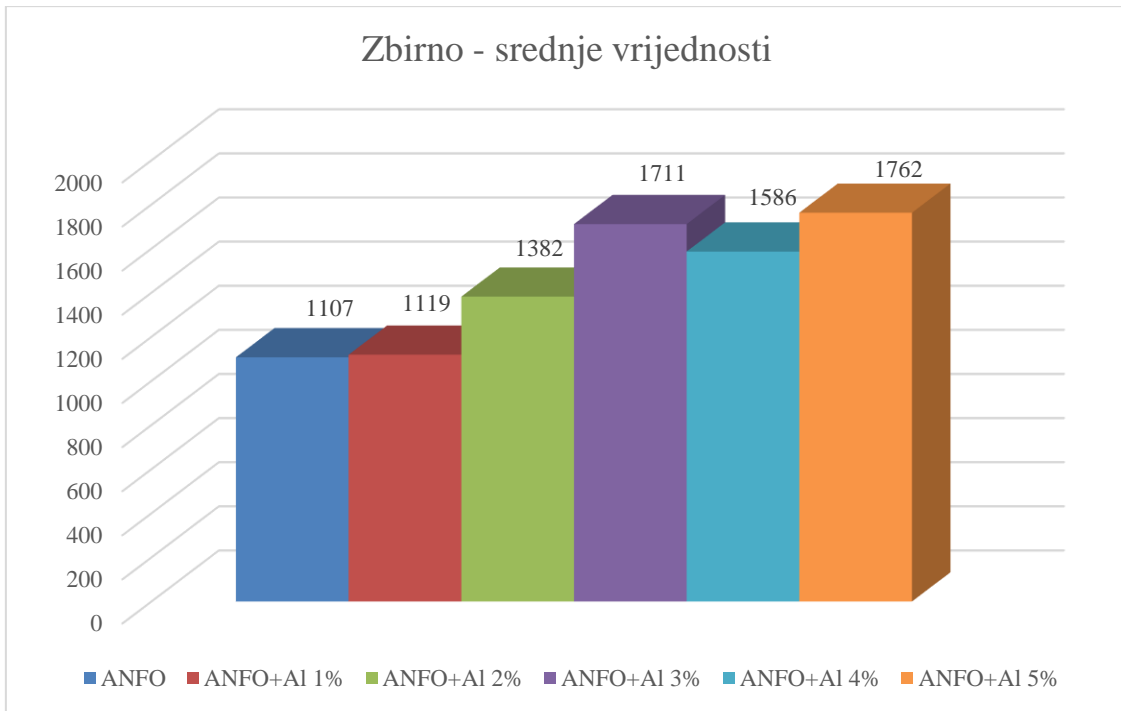
Srednja vrijednost brzine eksplozije ANFO-eksploziva s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm iznosi 1762 m/s i prosječno je viša za 59,2% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, viša za 48,3% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm i viša za 6,2 % u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm (tablica 4-2.). Gustoća mješavine povećala se za 5,5% u odnosu na čisti ANFO-eksploziv, te se smanjila za 0,4% u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm i za 0,2% u

odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm . Raspon brzina eksplozije iznosi 96 m/s što je za 383 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv, 47 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 1% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 5 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 2% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 143 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 3% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 49 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 4% aluminijskog praha frakcije 90/75 μm , 235 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije -20 μm i 163 m/s manje u odnosu na ANFO-eksploziv s dodatkom 5% aluminijskog praha frakcije 63/45 μm .

Iako je najveća brzina eksplozije dobivena kod frakcije 63/45 μm , mješavina sa 5% udjela aluminijskog praha imala je najuži raspon rezultata brzine detonacije (96 m/s) te sukladno tome najveću srednju brzinu eksplozije od 1762 m/s.

Na grafičkom prilogu 4-12. prikazana je usporedba srednje vrijednosti brzina eksplozije smjese ANFO-a i mješavina ANFO-a sa različitim postotcima frakcije 90/75 μm .

Krhotine, jednog od uzorka iz setova cijevi, fotografirane su nakon otpucavanja (slike 4-13. do 4-16.). Na sljedećim slikama se jasno vide krhotine sve manjih dimenzija u odnosu na povećanje postotka aluminijskog praha u eksplozivnoj mješavini (u gornjem lijevom kutu nalazi se redni broj ispitnog uzorka). S obzirom na povećanje udjela sitnijih krhotina i smanjenje udjela krupnijih krhotina ispitnih cijevi s povećanjem udjela aluminijskog praha može se zaključiti da dolazi do povećanja oslobođene energije koja se u obliku rada utroši na bolje razlamanje ispitnih cijevi.



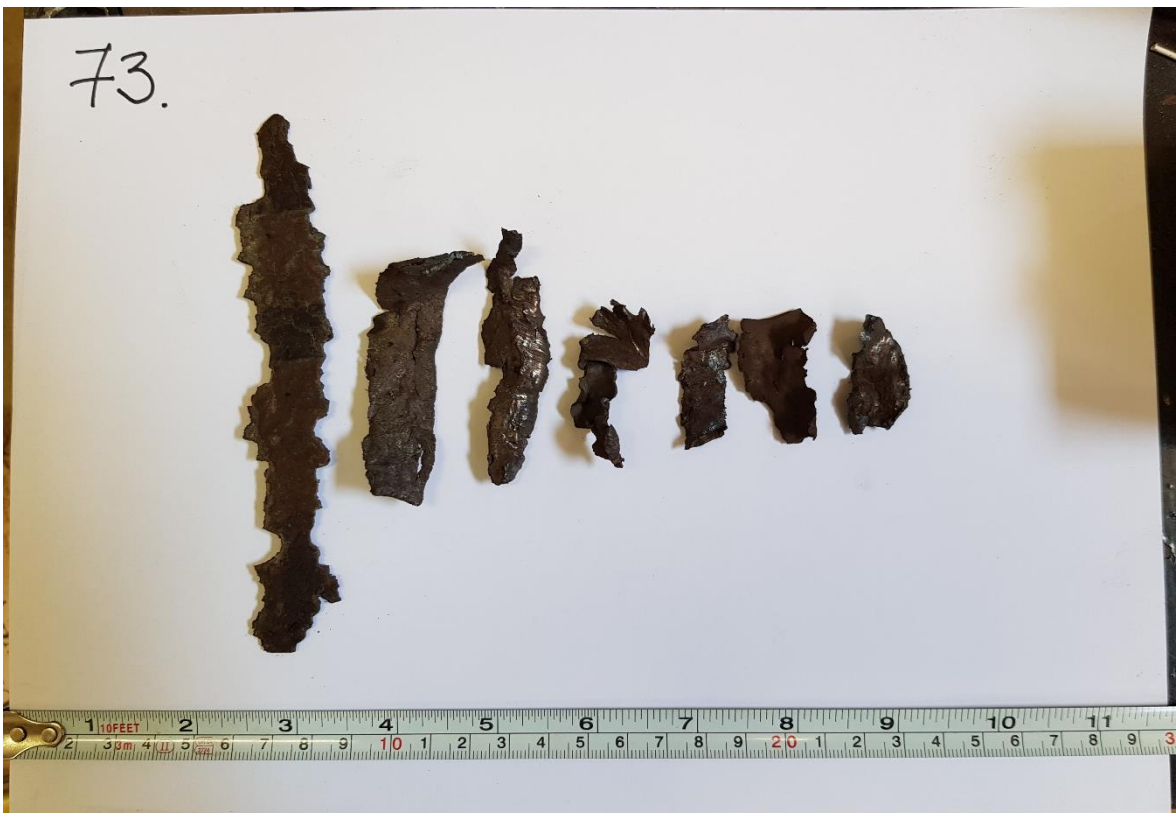
Slika 4-12. Grafikon srednjih vrijednosti brzina eksplozije mješavine 90/75 μm



Slika 4-13. Krhotine cijevi broj 56 (90/75 μm , 1%)



Slika 4-14. Krhotine cijevi broj 61 (90/75 μm , 2%)



Slika 4-15. Krhotine cijevi broj 73 (90/75 μm , 4%)



Slika 4-16. Krhotine cijevi broj 76 (90/75 µm, 5%)

4.1.4. Usporedba rezultata mjerenja za sve mješavine

Na slici 4-17. je prikazana usporedba rezultata postotnog povećanja brzine detonacije/eksplozije kod pojedinih mješavina u odnosu na ANFO-eksploziv i pojedine mješavine.

Za rezultate mjerenja brzine detonacije/eksplozije odnosno za postotno povećanje napravljena je regresijska analiza s udjelom aluminijskog praha kod pojedinih mješavina. Za regresijsku analizu korištena je linearna regresija.

Iz podataka na slici 4-17. je vidljivo da su najveća postotna povećanja brzina detonacije/eksplozije ostvarena kod mješavina s frakcijom 63/45 µm i to u odnosu na ANFO-eksploziv i na frakcije -20 µm.

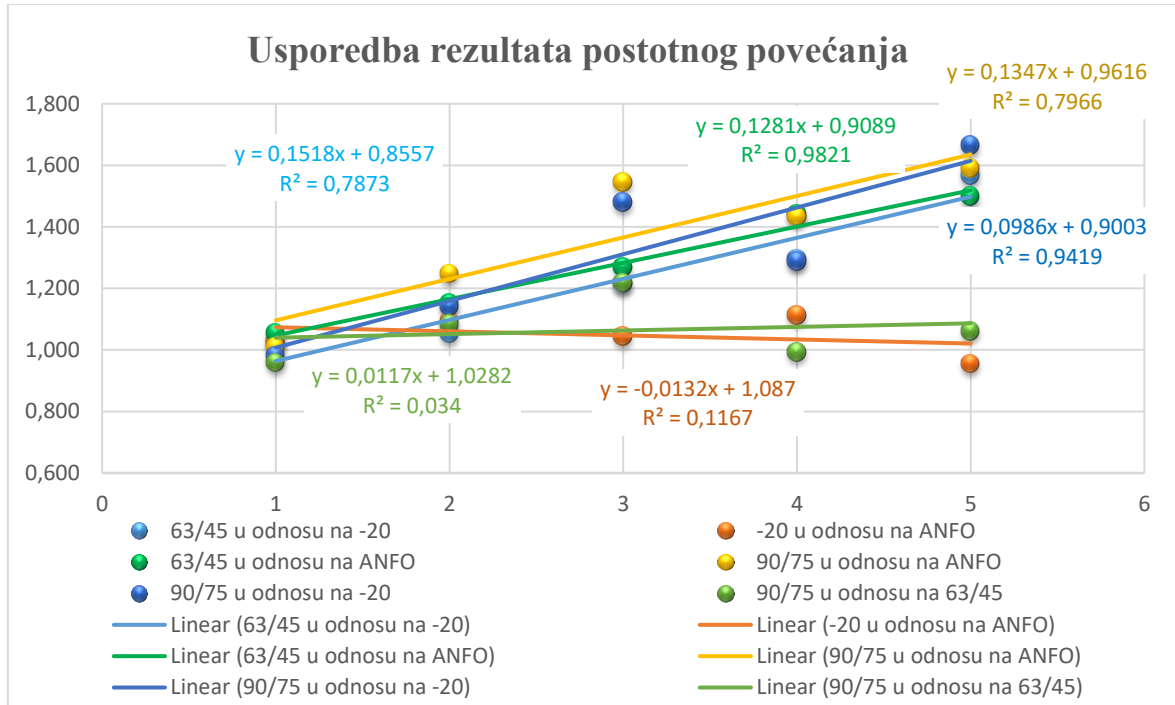
Iz dijagrama na slici 4-17. je vidljivo da se zavisnost postotnog povećanja brzine detonacije/eksplozije kod frakcije 63/45 µm u odnosu na ANFO-eksploziv može izračunati prema izrazu 4-1. uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9821$ odnosno 98,21%:

$$N_{\%v} = 0,9098 + 0,1281 * n_{ANFO} \quad (4-1.)$$

gdje je:

$N_{\%v}$ – postotno povećanje brzine detonacije/eksplozije (%),

n_{ANFO} – referentni rezultat (100%).



Slika 4-17. Usporedba rezultata postotnog povećanja brzine detonacije/eksplozije kod pojedinih mješavina

Iz dijagrama na slici 4-17. je vidljivo da se zavisnost postotnog povećanja brzine detonacije/eksplozije kod frakcije 63/45 μm od udjela aluminijskog praha može izračunati prema izrazu 4-2. uz koeficijent determinacije $R^2 = 0,9419$ odnosno 94,91%:

$$N_{\%v} = 0,9003 + 0,0986 * n_{Al} \quad (4-2.)$$

gdje je:

$N_{\%v}$ – postotno povećanje brzine detonacije/eksplozije (%),

n_{Al} – udio aluminijskog praha (%).

Ostale frakcije (90/75 μm i -20 μm), iako pokazuju određeno povećanje brzine detonacije/eksplozije, imaju puno manju zavisnost od udjela aluminijskog praha odnosno imaju puno veće rasipanje u postotnom povećanju brzina detonacije/eksplozije.

Frakcija 90/75 μm je pokazala najmanje rasipanje rezultata mjerenja brzine detonacije/eksplozije, srednja vrijednost rasipanja rezultata mjerenja iznosi 145 m/s, dok frakcija 63/45 μm ima nešto veće rasipanje u odnosu na frakciju 90/75 μm , srednja vrijednost rasipanja rezultata mjerenja iznosi 231 m/s. Razlika u rasipanju rezultata mjerenja između tih dviju frakcija iznosi 86 m/s. S obzirom na velika rasipanja rezultata mjerenja kod preostale frakcije (-20 μm), srednja vrijednost rasipanja rezultata mjerenja iznosi 258 m/s, i kod ANFO eksploziva, srednja vrijednost rasipanja rezultata mjerenja iznosi 479 m/s, može se kazati da frakcije 63/45 μm i 90/75 μm postižu stabilniju brzinu detonacije/eksplozije.

Iz svega navedenog može se zaključiti da je frakcija 63/45 μm optimalna za miješanje s ANFO-eksplozivom.

5. ZAKLJUČAK

Prosječna brzina eksplozije ANFO-eksploziva dobivena u ovom istraživanju iznosila je 1107 m/s s velikim rasipanjem rezultata mjerenja od 479 m/s što se može objasniti neidealnošću detonacije ANFO-eksploziva.

Dodavanjem različitih frakcija aluminijskog praha u različitim masenim postocima (1% - 5%), srednja brzina eksplozije povećana je za minimalnih 1,1% kod frakcije 90/75 μm na 1119 m/s te za maksimalnih 59,2% kod frakcije 90/75 μm na 1762 m/s.

Provedena ispitivanja pokazala su da se dodavanjem mikro-metarskih čestica aluminijskog praha povećava brzina detonacije/eksplozije kod većine mješavina te se smanjuje mogući raspon brzina eksplozije, odnosno dolazi do ustaljivanja brzine detonacije/eksplozije.

Povećanjem udjela aluminijskog praha povećala se i brzina detonacije/eksplozije, a prema pregledu krhotina ispitnih cijevi nakon otpucavanja, vidljivo je povećanje udjela sitnijih krhotina te se može zaključiti da je oslobođena dodatna energija s dodatkom aluminijskog praha.

Ispitane su samo mješavine sa dodatkom aluminijskog praha od 1% do 5% pri čemu nije došlo do smanjivanja brzine eksplozije. Za daljnje ispitivanja potrebno je postupno povećavati udio aluminijskog praha do granice dok brzina eksplozije/detonacije ne počne padati. Na taj način bi se mogao obrediti optimalan omjer aluminijskih čestica u eksplozivu.

6. LITERATURA

BROUSSEAU, P., DORSETT, H. E., CLIFF, M. D., ANDERSON, C. J. 2002. Detonation properties of explosives containing nanometric aluminum powder. Proceedings of the 12th international detonation symposium. str. 11-21

DOBRILOVIĆ, M., 2008. Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju elektroničkog detonatora. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ESTER, Z., 2005. Miniranje I. – Eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME, 2003. HRN EN 13631-13:2003. Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 13. dio: Određivanje gustoće

HRVATSKI ZAVOD ZA NORME, 2003. HRN EN 13631-14:2003. Eksplozivi za civilnu uporabu. Jaki eksplozivi. 14. dio: Određivanje brzine detonacije

KESHAVARZ, M. H., 2005. New method for predicting detonation velocities of aluminized explosives. Combustion and Flame, 2005/142, str. 303-307.

KRSNIK, J., 1989. Miniranje. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ŠKRLEC, V., 2015. Analiza primjenjivosti eksploziva smanjene gustoće za gospodarska miniranja. Doktorska disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ZHOU, Z., CHEN, J., YUAN, H., NIE, J., 2017. Effects of aluminum particle size on the detonation pressure of TNT/Al. Propellants Explosives Pyrotechnics, 42, str. 1-10

INTERNET IZVORI:

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY (RSC), 2019. Periodic Table: Aluminium, URL: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium> (31.8.2019.)