

Izrada 3D modela strukture emulzijskih eksploziva

Šušković Mustafa, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:169:608641>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-26**



Repository / Repozitorij:

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



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

IZDRADA 3D MODELA STRUKTURE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA

Završni rad

Lucija Šušković Mustafa

R-4181

Zagreb, 2020.

IZRADA 3D MODELA STRUKTURE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA

LUCIJA ŠUŠKOVIĆ MUSTAFA

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

Sažetak

Eksplozivi su materijali koji se primjenjuju u rudarstvu i u vojnom području, te u nizu različitih tehnika i različitih primjena poput vatrometa. U radu je prikazana općenita podjela eksploziva iz koje je izdvojen emulzijski eksploziv. Prikazana je struktura emulzijskih eksploziva te je opisan je postupak izrade 3D modela strukture emulzijskih eksploziva u programu „AutoCad“ te je model isprintan na 3D printeru.

Ključne riječi: eksploziv, emulzijski eksploziv, AutoCAD

Završni rad sadrži: 29 stranica, 5 tablica, 28 slika i 7 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF

Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF

SADRŽAJ

POPIS TABLICA	III
POPIS SLIKA	IV
1. UVOD	1
2. EKSPLOZIVI	2
2.1 Primarni eksplozivi	4
2.2 Sekundarni eksplozivi	4
2.2.1 Monomolekularni eksplozivi	4
2.2.2 Eksplozivne smjese	5
2.3 Minersko – tehničke značajke eksploziva.....	7
2.3.1. Brzina detonacije	7
2.3.2. Brizantnost eksploziva	7
2.3.3. Radna sposobnost eksploziva.....	8
2.3.4. Volumen plinova i specifični tlak eksplozije	9
2.3.5. Tlak detonacije	9
2.3.6. Kritična masa i promjer	11
2.3.7. Gustoća eksploziva	11
2.3.8. Temperatura eksplozije	11
2.3.9. Uravnoteženost kisika	11
2.3.10. Osjetljivost na udar.....	12
2.3.11. Prijenos detonacije	13
3. EMULZIJSKI EKSPLOZIVI	13
3.1 Sastav emulzijskih eksploziva	13
3.2 Rudarsko – tehnička svojstva emulzijskih eksploziva	14
4. IZRADA 3 D MODELA STRUKTURE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA	16
4.1 Amonijev nitrat, NH_4NO_3	16
4.2 Metilen, CH_2	17
4.3 Natrijev nitrat, NaNO_3	17
4.4 Ugljikov dioksid, CO_2	18
4.5 Voda, H_2O	19
4.6 Silicijev dioksid, SiO_2	21
4.7 Dušik, N_2	21
4.8 Natrijev karbonat, Na_2CO_3	22
4.9 Kisik, O_2	23
4.10 Dušikov monoksid, NO	24

4.11 Silicij, Si	24
4.12. 3D printer CraftBOT XL	25
5. ZAKLJUČAK.....	28
6. LITERATURA	29

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005).....	6
Tablica 4-1. Tehničke značajke 3D printera (CraftBot, 2017).....	25
Tablica 4-2. Dimenzije printera (CraftBot, 2017).....	26
Tablica 4-3. Temperaturne značajke (CraftBot, 2017).....	26
Tablica 4-4. Značajke programske podrške (CraftBot, 2017).....	26

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih sredstava (Bohanek, 2013).....	2
Slika 2-2. Proces detonacije (Dobrilović, 2008).....	3
Slika 2-3. ANFO eksploziv.....	6
Slika 2-4. Princip Hessove probe (Krsnik, 1989).....	8
Slika 2-5. Trauzlova proba (Krsnik, 1989).....	8
Slika 2-6. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović, 2008).....	9
Slika 2-7. BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar.....	12
Slika 3-1. Odnos veličine dispergirane faze emulzije i plinske faze (vruće točke).....	14
Slika 3-2. Emulzijska matrica.....	15
Slika 4-1. Strukturna formula amonijeva nitrata (Wikipedia, 2020.).....	16
Slika 4-2. 3D model amonijeva nitrata izrađen u AutoCAD programu.....	16
Slika 4-3. Strukturna formula metilena (Wikipedia, 2020).....	17
Slika 4-4. 3D model metilena izrađen u programu AutoCAD.....	17
Slika 4-5. Strukturna formula natrijeva nitrata (Wikipedia, 2021).....	18
Slika 4-6. 3D model natrijeva nitrata izrađen u programu AutoCAD.....	18
Slika 4-7. Strukturna formula ugljikovog dioksida (Wikipedia, 2020).....	19
Slika 4-8. 3D model ugljikovog dioksida izrađen u programu AutoCAD.....	19
Slika 4-9. Strukturna formula vode (Wikipedia, 2020).....	20
Slika 4-10. 3D model vode izrađen u programu AutoCAD.....	20
Slika 4-11. 3D model silicijevog dioksida izrađen u programu AutoCAD.....	21
Slika 4-12. 3D model dušika izrađen u programu AutoCAD.....	22
Slika 4-13. Strukturna formula natrijevog karbonata (Wikipedia, 2021).....	22
Slika 4-14. 3D model natrijevog karbonata izrađen u programu AutoCAD.....	23
Slika 4-15. 3D model kisika izrađen u programu AutoCAD.....	23
Slika 4-16. 3D model dušikovog monoksika izrađen u programu AutoCAD.....	24
Slika 4-17. 3D model silicija izrađen u programu AutoCAD.....	24
Slika 4-18. 3D model amonijevog nitrata pripremljen za ispis.....	25
Slika 4-19. Molekula ugljikovog dioksida tijekom 3D ispisa.....	27

1. UVOD

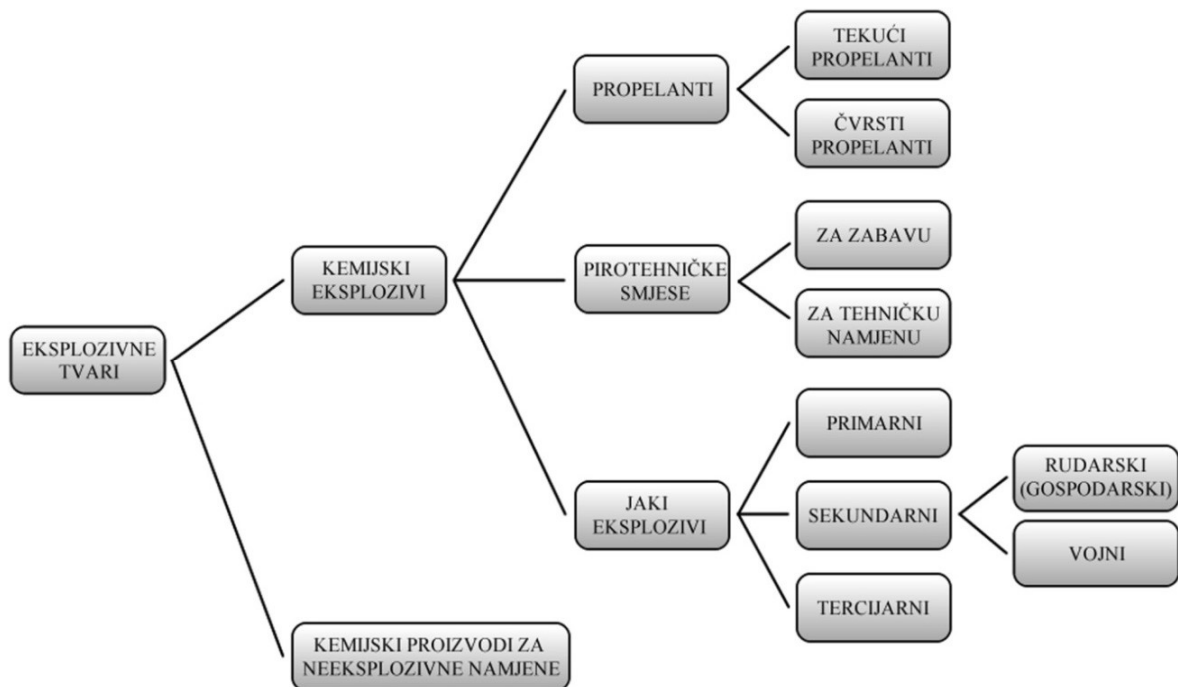
Razvojem novih eksploziva tipa mješavina amonijeva nitrata i mineralnog ulja (ANFO) i emulzijskih eksploziva (ulja u vodi) te razvojem raznih tehnika za izradu bušotina, u rudarskoj struci je došlo do pojednostavljenja izvođenja radova kao i do povećanja sigurnosti na radu i smanjenja troškova. Razvoj eksploziva pratio je i razvoj primjerenih inicijalnih sustava. Iz tog razloga dolazi i do zahtijevanja za novim znanjima jer nove vrste eksploziva nisu kompatibilne s nekim klasičnim metodama iniciranja pa često dolazi do neuspjelih miniranja.

U radu su prikazane osnove o emulzijskim eksplozivima te njihov sastav i struktura pojedinih molekula koje sudjeluju u kemijskoj reakciji raspada emulzijskog eksploziva. Detaljno je prikazana i sama izrada 3D modela strukture emulzijskih eksploziva. Izradi 3D modela emulzijskih eksploziva pristupilo se u svrhu izvođenja nastave iz kolegija Miniranje I.

2. EKSPLOZIVI

Eksplozivi su stabilni kemijski spojevi ili smjese koji imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog impulsa određene jakosti detoniraju, odnosno kemijski se razlažu, pritom razvijajući znatnu količinu topline i plinova (Krsnik, 1989).

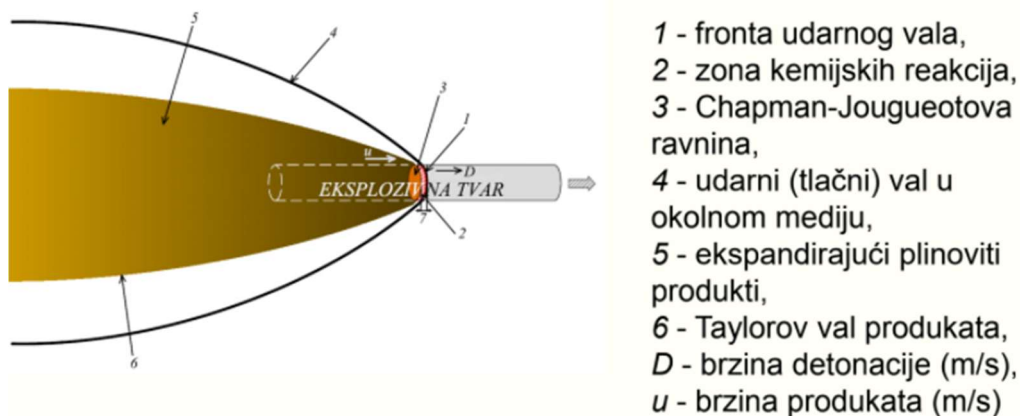
Eksploziv je energetski materijal koji ima primjenu u dva glavna područja : vojnom i civilnom, odnosno gospodarskom. Civilna primjena je vrlo široka te podrazumijeva miniranje u rudarstvu i građevinarstvu, eksploataciju nafte i plina, geološke istražne radove, svemirsku tehnologiju, strojarstvo, automobilsku industriju, poljoprivredu, filmsku umjetnost, pirotehniku itd. Svrha eksploziva jest prelazak potencijalne energije, koja se oslobađa prilikom eksplozije, u koristan rad. U kontekstu rudarstva koristan rad je najčešće drobljenje stijenske mase, tj. miniranje, a učinkovitost eksploziva se promatra omjerom mase iskorištenog eksploziva i volumena razdrobljene stijene. U procesu miniranja, eksploziv se pojavljuje u obliku valjkastih punjena – patrona, ili u rasutom stanju (Ester 2005). Opća podjela eksplozivnih sredstava prikazana je na slici 2-1.



Slika 2-1. Opća podjela eksplozivnih sredstava (Bohanek, 2013).

Eksplodija je fizikalni proces do kojeg dolazi zbog posljedica prirodnog djelovanja ili ljudskih aktivnost. Prema Baumu (Baum et al., 1975) eksplozija je proces vrlo brze fizičke ili kemijske pretvorbe sustava uz prijelaz njegove potencijalne energije u mehanički rad. Izvršeni rad eksplozije je rezultat nagle ekspanzije plinova i para.

Eksplodija se može odvijati na dva načina: kao sagorijevanje i kao detonacija. Potrebno je razlikovati sagorijevanje, odnosno oksidaciju koja koristi kisik iz atmosfere, od sagorijevanje eksplozivnih tvari, odnosno deflagraciju bez prisutnosti kisika iz atmosfere, u zatvorenom prostoru. Zbog toga eksplozivi mogu sagorijevati, sagorijevati eksplozivno (deflagirati) i detonirati (Dobrilović, 2008). Na slici 2-2. prikazan je proces detonacije.



Slika 2-2. Proces detonacije (Dobrilović, 2008).

Postoje mnoge podjele eksploziva kao što su :

- Podjela prema namjeni (gospodarski, vojni i pirotehnički)
- Podjela prema kemijskom sastavu (eksplozivi senzibilirani nitroderivatima, eksplozivi senzibilirani neeksplozivnim sastojcima...)
- Podjela prema konzistenciji (praškasti, vodoplastični, emulzije, plastični, rasuti...)
- Podjela prema brizantnosti
- Podjela prema osjetljivosti i dr.

Najprihvatljivija je podjela na primarne, sekundarne i tercijarne eksplozive (Ester, 2005).

2.1 Primarni eksplozivi

Svi primarni eksplozivi imaju zajedničku osobinu velike osjetljivosti na trenje, porast temperature i udar te pod djelovanjem određenih vanjskih impulsa detoniraju. Iz tog se razloga rabe za inicijalno punjenje rudarskih kapica te električnih i neelektričnih detonatora. Primjeri primarnih eksploziva su: olovni azid, živin fulminat, srebrni azid, olovni stifnat i diamidintofenol (Ester, 2005).

2.2 Sekundarni eksplozivi

Ovoj skupini pripadaju svi eksplozivi koji se koriste u gospodarstvu, manje su gustoće i velike energije eksplozije. Svjetski trend u uporabi eksploziva jest zamjena monomolekularnih eksploziva sa eksplozivnim smjesama zbog sigurnosti u proizvodnji, primjeni i transportu. Monomolekularni eksplozivi su osjetljiviji na trenje, udar i porast temperature u odnosu na eksplozivne smjese pa se koriste za vojne svrhe, dok se u gospodarstvu upotrebljavaju za senzibilizaciju eksplozivnih smjesa i pri proizvodnji inicijalnih sredstava (Ester, 2005).

2.2.1 Monomolekularni eksplozivi

Monomolekularni eksplozivi se u gospodarstvu koriste kao senzibilizatori u proizvodnji eksplozivnih smjesa : Želatiniziranih, praškastih i vodoplastičnih eksploziva, za brizantno punjenje rudarskih kapica i detonatora, kao osnovno punjene neelektričnih cjevčica neelektričnog sustava iniciranja i detonirajućih štapina. Primjeri monomolekularnih eksploziva su: Trinitrotoluol TNT (senzibilizacija eksplozivnih smjesa i izrada pojačnika), Pentrit (osnovno eksplozivno punjenje svih detonirajućih štapina i kao brizantno punjenje rudarskih kapica), Heksogen RDX (osnovno eksplozivno punjenje neelektričnih cjevčica i kao brizantno punjenje rudarskih kapica i ostalih vrsta detonatora), Nitroglicerina NG (pomiješan s nitroglikolom se koristi kao osnova za proizvodnju želatinoznih eksploziva) (Ester, 2005).

2.2.2 Eksplozivne smjese

Eksplozivne smjese su najčešći oblik eksploziva koji se koristi u gospodarstvu. Razlikuju se dvije osnovne vrste smjesa:

- Eksplozivne smjese senzibilizirane nitroderivatima (monomolekularnim sekundarnim eksplozivima)
- Eksplozivne smjese bez nitroderivata (u sastavu nemaju niti jednu eksplozivnu tvar) (Ester, 2005).

2.2.2.1 Eksplozivne smjese senzibilizirane nitroderivatima

Eksplozivne smjese koje su senzibilizirane nitroderivatima odnosno monomolekularnim sekundarnim eksplozivima se dijele na:

- Eksplozivne praškaste smjese senzibilizirane nitroderivatima, npr. Amonal, Amoneks, Permonex i Polonit.
- Eksplozivne želatinozne smjese senzibilizirane nitroderivatima, npr. Gelamon, Perunit, Gelatin Donarit, Danubit, Goma 2ECO i Austrogel.
- Eksplozivne vodoplatične i gel smjese senzibilizirane nitroderivatima, npr. Kamex i Riogel (Ester, 2005).

2.2.2.2 Eksplozivne smjese senzibilizirane neeksplozivnim sastojcima

Ova skupina smjesa zastupljena je eksplozivima sigurnim za rukovanje koji u ukupnoj masi eksploziva potrošenih u gospodarstvu čine više od 80%.

Eksplozivne smjese koje su senzibilizirane neeksplozivnim sastojcima dijele se na :

- Smjese nitrata i goriva (eksplozivi tipa ANFO) koji se proizvode kao mješavina AN granula i goriva (koriste se u rasutom stanju) i kao mješavina drobljenog AN goriva (postoji mogućnost patroniranja). Na slici 2-3. je prikazan ANFO eksploziv.
- Smjese nitrata i goriva (emulzijski eksplozivi tipa voda u ulju) (Ester, 2005).



Slika 2-3. ANFO eksploziv.

Tablica 2-1. Karakteristike AN za gnojivo i AN za eksplozive (Ester, 2005)

Svojstvo	AN za umjetno gnojivo	AN za eksplozive
Inertna stjenka (glina ili drugi kemijski antikoagulator)	3% - 5%	0,5% - 1%
Tvrdoća	Velika	mala
Forma	Kristalna	porozna
Distribucija goriva	po površini	kroz granule
Minimalni promjer za detonaciju na otvorenom	228 mm	64 mm
Brzina detonacije u cijevi \varnothing 100 mm	1,829 m/s	3,353 m/s

2.3 Minersko – tehničke značajke eksploziva

Minersko – tehničke značajke odabranog eksploziva moraju biti u skladu s fizikalno – mehaničkim svojstvima stijene koju se minira. Ukupna učinkovitost i primjena eksploziva u određenoj sredini ovisi o tome kolika se energija oslobađa prilikom detonacije eksplozivnog punjenja i koliki mehanički rad ta energija i produkti reakcije ostvaruju na okolni materijal. Minersko – tehničke značajke opisuju navedenu sposobnost pojedinih gospodarskih eksploziva.

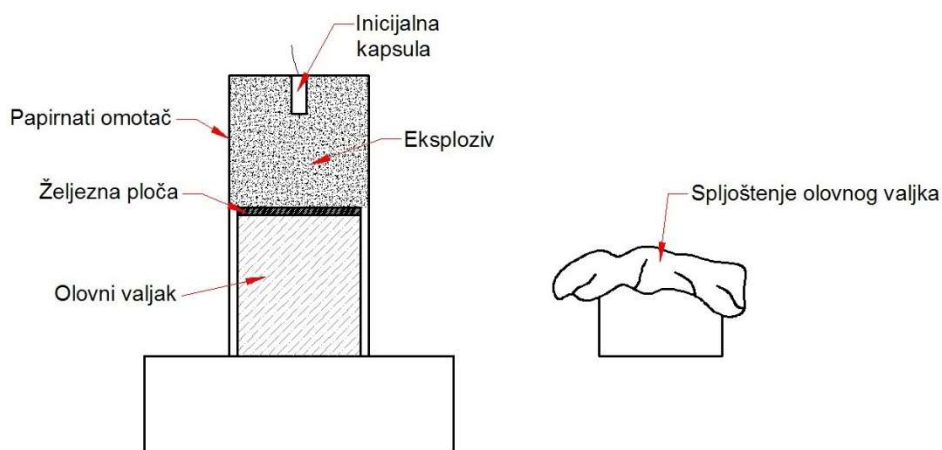
2.3.1. Brzina detonacije

Brzina detonacije je brzina napredovanja detonacijskog udarnog vala od mjesta iniciranja kroz eksplozivni naboj. Na veličinu detonacijske brzine utječu gustoća i promjer patrone eksploziva, vlaga i način iniciranja eksploziva. Brzina detonacijskog vala (detonacijska brzina) za danu eksplozivnu tvar ne ovisi o vanjskim čimbenicima (tlak temperatura, itd.). Brzina detonacije eksploziva ovisi o:

- gustoći punjenja,
- kritičnom promjeru eksplozivnog punjenja,
- snazi inicijalnog impulsa dovedenog eksplozivnoj tvari.

2.3.2. Brizantnost eksploziva

Razorna snaga odnosno brizantnost eksploziva ovisi o brzini detonacije. Kod mnogih brizantnih eksploziva povećanjem gustoće povećava se i brzina detonacije pa samim time i razorna snaga eksploziva. Brizantnost eksploziva određuje se pomoću više metoda od kojih je jedna Hessova proba. Na olovnom valjku promjera 40 mm i visine 50 mm postavlja se tanki čelični cilindar s 50 g eksploziva koji se dovodi do detonacije rudarskom kopicom br.8. Uslijed detonacije olovni valjci se spljošte. Veličina spljoštenosti izražena u mm je mjerilo brizantnosti eksploziva na osnovi koje se može orijentacijski odabrati vrsta eksploziva za miniranje određene vrste stijena. Princip Hessove probe je prikazan na slici 2-4.

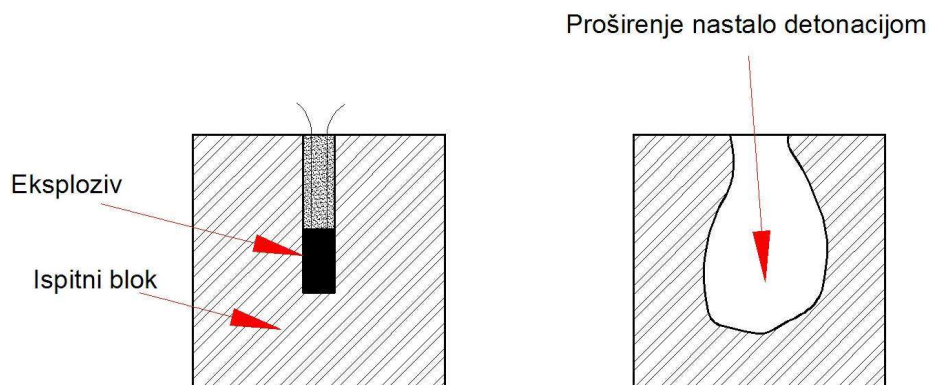


Slika 2-4. Princip Hessove probe (Krsnik 1989).

2.3.3. Radna sposobnost eksploziva

Radna sposobnost eksploziva određuje se pomoću Trauzlove probe u olovnom cilindru promjera 200 mm i visine 200 mm, u sredini kojeg se nalazi bušotina promjera 25 mm, dubine 125 mm.

Na dnu bušotine otpucava se 10 g eksploziva za ispitivanje zajedno s trenutnim električnim detonatorom. Ostatak bušotine ispuni se sitnim suhim pijeskom. Detonacijom eksploziva bušotina se proširi. Iznos volumena proširenja je mjera radne sposobnosti eksploziva. Uspoređivanjem rezultata mjerenja različitih eksploziva može se postaviti relativni odnos radnih sposobnosti kao mjera oslobođene snage prilikom detonacije u jednakim uvjetima. Princip Trauzlove probe je prikazan na slici 2-5.



Slika 2-5. Trauzlova proba (Krsnik 1989).

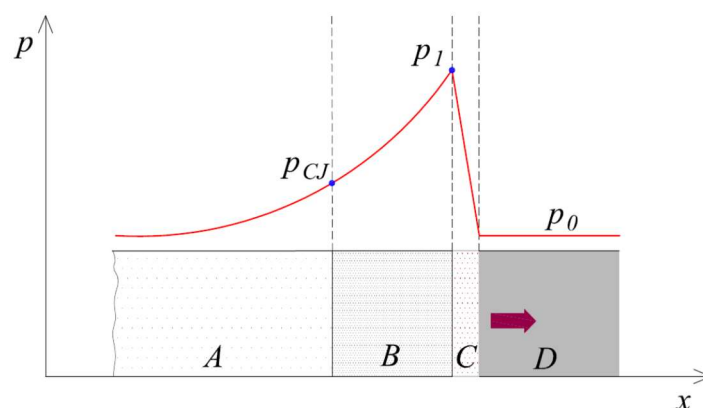
2.3.4. Volumen plinova i specifični tlak eksplozije

Pri detonaciji eksploziva razvijaju se plinovi čija količina ovisi o vrsti eksploziva. Volumen plinova koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva izražava se u dm^3 , a mjeri se kod temperature $0\text{ }^\circ\text{C}$ i tlaka 1 bar. Najveći tlak koji nastaje pri detonaciji 1 kg eksploziva u zatvorenom prostoru volumena 1 dm^3 naziva se specifični tlak i izražava se u barima. Specifični tlak može se izračunati na osnovi volumena plinova i temperature eksplozije.

Tlak nastalih plinova ovisi o količini razvijenih plinova, temperaturi eksplozije i volumena u kojem je izvedena eksplozija. Kod brizantnih eksploziva tlak plinova može doseći i nekoliko tisuća bara.

2.3.5. Tlak detonacije

Prilikom detonacije u eksplozivnom materijalu ispred fronte kemijskih reakcija nalazi se fronta udarnog vala, zona visokostlačenog eksplozivnog materijala na tlak reda veličina nekoliko stotina kilobara, pripremljenog za reakciju. Izreagirani produkti detonacije odnosno plinovi nalaze se u volumenu koji je gotovo identičan polaznom volumenu tvari, a toplina je već oslobođena pa su produkti zagrijani na visoke temperature i nalaze se pod visokim tlakom. Budući da su pod visokim tlakom, prilikom ekspanzije oslobađaju energiju i prate frontu udarnog vala koji napreduje i kroz eksplozivnu tvar i kroz okolinu, odnosno zrak ili stijenu, ovisno o tome u kojem se mediju detonacija zbiva. Produkti detonacije slijede Taylorovu distribuciju gustoća i brzina, a fronta im je omeđena Taylorovim valom. Slika 2-6. prikazuje raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović 2008).



Slika 2-6. Raspored tlakova prilikom detonacije u eksplozivu (Dobrilović 2008).

Kazalo:

A – produkti detonacije,

B – zona kemijskih reakcija,

C – fronta udarnog vala

D – neporemećeni eksploziv,

P – tlak (bar, Pa),

x – duljina (m),

p_{CJ} – tlak u CJ točki (bar, Pa),

p_1 – vršni tlak udarne adijabate (von Neumanov vrh) (bar, Pa),

p_0 – tlak okoline (bar, Pa).

Tlak u bušotini je tlak na stjenke bušotine koje formiraju ekspandirajući plinovi. U ovisnosti je sa tlakom detonacije i gustoćom punjenja bušotine. Ako je stjenska masa ispucala tlak u bušotini može biti vrlo mali zbog širenja ekspandirajućih plinova u pukotine, ali u normalnim uvjetima tlak bušotine iznosi 50 % do 60 % detonacijskog tlaka (Gokhale 2011).

2.3.6. Kritična masa i promjer

Kritična masa eksploziva je minimalna masa eksploziva koja se može dovesti do potpune detonacije, a preko kritične mase određuje se kritični promjer patrone eksploziva kod kojeg je moguća detonacija.

2.3.7. Gustoća eksploziva

Gustoća eksploziva je odnos mase eksploziva i njegovog volumena. Povećanjem gustoće eksploziva raste detonacijska brzina i tlak detonacijskog udarnog vala. Na uspješnost miniranja bitno utječe odnos mase eksploziva i volumena minske bušotine.

2.3.8. Temperatura eksplozije

Temperatura prilikom reakcije detonacije uz konstantan volumen teoretski iznosi od 1000 °C do 6000 °C. Pošto se eksplozivi koriste u minskim bušotinama ta temperatura je niža zbog hlađenja okolnih stijena prilikom dodira.

2.3.9. Uravnoteženost kisika

Ravnoteža, balans ili bilanca kisika kemijsko je svojstvo eksploziva koje određuje vrstu nastalih plinova detonacije. Pod bilancom (uravnoteženosti) podrazumijeva se odnos količine kisika koju sadrži eksploziv i količine kisika koja je potrebna za potpuno sagorijevanje odnosno oksidaciju svih gorivih tvari u sastavu eksploziva. Pri tome ugljik se spaja s kisikom u ugljični dioksid i ugljični monoksid, vodik s kisikom daje vodu a dušik s kisikom dušične plinove. Uz nedostatak kisika u strukturi eksploziva, nakon detonacije razvijaju se otrovni plinovi: CO_x i NO_x .

Ako količina kisika nakon eksplozije ostaje u suvišku onda je bilanca kisika pozitivna, a u suprotnom slučaju je negativna. Ako ne nastane ni višak ni manjak kisika, bilanca kisika je uravnotežena. Svi privredni eksplozivi moraju imati malo pozitivnu ili uravnoteženu bilancu kisika.

Bilanca kisika ima veliki utjecaj na razvijanje otrovnih plinova i na radni efekt miniranja. Pri uravnoteženoj bilanci kisika oslobađa se maksimalna količina energije eksplozivnog punjenja. Kod negativne bilance kisika oslobađa se manja količina energije zbog

nepotpunog sagorijevanja gorivih tvari u eksplozivu. Pri jače pozitivnoj bilanci kisika dio potencijalne energije eksplozivnog punjenja potroši se na endotermalne reakcije pri stvaranju otrovnih dušikovih oksida.

2.3.10. Osjetljivost na udar

Osjetljivost eksploziva na udar ovisi o kemijskom sastavu i mora biti unutar određene granice radi sigurnosti pri rukovanju, transportu i upotrebi. Za privredna miniranja primjenjuju se sigurnosni eksplozivi koji su neosjetljivi ili vrlo malo osjetljivi na udar i trenje.

Osjetljivost na udar ispituje se po Kastu ili prema BAM metodi. Kastvova metoda sastoji se u slobodnom padu utega od 2 kg na kastov aparat u kojem se nalazi eksploziv. Mjerilo osjetljivosti je visina u cm s koje se 6 puta spušta uteg od 20 kg, a da pritom niti jednom ne dođe do detonacije. Osjetljivost na udar prema BAM metodi ispituje se padom utega različite mase s različite visine, pri čemu se kinetička energija udara postepeno povećava. Osjetljivost na udar je onaj najveći iznos mase i visine pri kojemu još ne dolazi iniciranja eksploziva. Na slici 3-7. prikazan je BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar.



Slika 2-7. BAM uređaj za određivanje osjetljivosti eksploziva na udar.

2.3.11. Prijenos detonacije

Prijenos detonacije definira se kroz sposobnost iniciranja između dvije u pravcu postavljene patrone sa zračnim razmakom između njih. Ukoliko eksploziv prema deklaraciji proizvođača može stabilnu detonaciju razviti samo u zatvorenom prostoru, bušotini, ispitivanje prijenosa detonacije obavlja se na patronama s međusobnim razmakom u čeličnim cijevima. Patrone eksploziva trebaju biti slobodno ovješene u zraku. Razmaci između patrona povećavaju se u koracima ukoliko je na početnom razmaku došlo do prijenosa detonacije. U početnoj fazi ispitivanja koraci mogu biti veći, a pri kraju iznose 1 cm. Ispitivanje ne mora početi od kontakta dvije nego se preporučuje proizvođačem deklariran razmak. Veličina prijenosa detonacije je onaj najveći razmak D (D_{\max}) pri kojemu je u tri ispitivanja tri puta došlo do prijenosa detonacije.

3. EMULZIJSKI EKSPLOZIVI

Emulzijski eksplozivi ujedinjuju dva važna svojstva, a to su velika sigurnost pri rukovanju i visoka detonacijska svojstva. Emulzijski eksplozivi su tip emulzija vode u ulju (V/U) u kojem su kapljice oksidansa (dispergirana faza) suspendirane u kontinuiranoj fazi koju čine uljne supstancije, a koje sadrže raspršene staklene mikrokuglice ili neki drugi porozni materijal (Ester, 2005).

3.1 Sastav emulzijskih eksploziva

Emulzijski su eksplozivi mješavina dviju otopina. Uljna faza (gorivo) je kontinuirana, dok je vodena faza (otopina anorganskih soli) dispergirana. Radi osigurana stabilnosti sustava dodaje se 1-3% emulgatora čiji HLB (hidrofilno-lipofilni balans) iznosi od 3 do 7.

Komponente:

- Dispergirana faza- osnova emulzije sastavljena od zagrijanog oksidansa otopljenog u vodi. Čini 90-95% mase emulzijskog eksploziva. Primjeri oksidansa su amonijev nitrat, natrijev nitrat, kalcijev nitrat, perklorat itd.

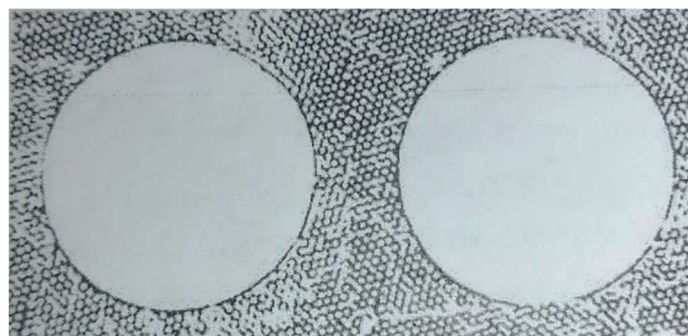
- Kontinuirana faza- svaki naftni produkt s prikladnim viskozitetom se može koristiti kao gorivo u emulzijskom eksplozivu uz uvjet da tvori stabilnu emulziju (V/U) i da tvori emulzijski sastav dovoljno gust da omogući tečnost pri određenim temperaturama. Čine 5 do 10% mase emulzijskog eksploziva. Primjeri goriva su dizelsko ulje, parafinsko ulje, strojno ulje, sintetski vosak, pčelinji vosak, masti itd.
- Emulgatori tipa voda u ulju s HLB-om čija je vrijednost između 3 i 7. Emulgatori su aktivne tvari koje smanjuju površinsku napetost između dispergirane i kontinuirane faze i osiguravaju stabilnost emulzije. Primjeri su D-sorbitan monooleat, xylitol monooleat, mješavina estera itd.

Miješanjem ovih komponenti dobije se stabilna emulzijska matrica sa slijedećim svojstvima:

- točka očvršćenja ispod -20°C
- gustoća od $1,2 \text{ g/cm}^3$ do $1,4 \text{ g/cm}^3$
- viskoznost oko $0,004 \text{ Nsm}^2$

Ovakva emulzijska matrica nema eksplozivna svojstva pa se mora stabilizirati sa tvarima koje predstavljaju tzv. vruće točke. Takvi materijali su zrna koja su ispunjena plinom i predstavljaju plinsku fazu (Ester, 2005). Slika 3-1. prikazuje odnos dispergirane i plinske faze.

- Plinska faza- senzibilizatori i regulatori gustoće. Primjeri su stakleni mikrobalonci, perliti, filiti, zrna amonijeva nitrata, plinifikacija itd.



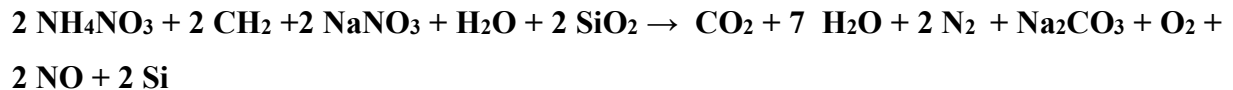
Slika 3-1. Odnos veličine dispergirane faze emulzije i plinske faze (vruće točke).

3.2 Rudarsko – tehnička svojstva emulzijskih eksploziva

S obzirom na to da matrica ne sadržava niti jedan sastojak koji je eksplozivan, stupanj sigurnosti je izuzetno visok. Tek prilikom dodavanja plinske faze koja inicira kemijsku reakciju

pod djelovanjem udarnog vala dobivamo emulzijski eksploziv različitih razina osjetljivosti. Dodatkom plinske faze reguliraju se gustoća i detonacijska svojstva eksploziva. Kontaktna površina kod emulzijskih eksploziva neusporedivo je veća i pravilno raspoređena u odnosu na vodoplastične eksplozive(Ester, 2005).

Osnovni proces raspada emulzijskog eksploziva prikazan je reakcijom:



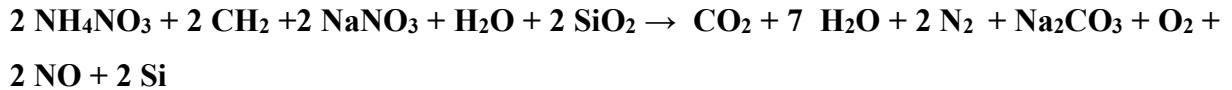
Emulzije se izrađuju u nekoliko kategorija, ovisno o osjetljivosti na iniciranje i viskozitet. U praksi je uobičajeno da se u bušotine većih promjera (100-240 mm) emulzija upumpava iz specijalnog vozila dok se za male promjere koriste patronirani emulzijski eksplozivi koji su pojačano senzibilizirani i osjetljiviji na iniciranje rudarskom kopicom br. 8. Nepravilno iniciranje dovodi do oštećenja strukture emulzije i time do velikog gubitka energije. Preporuka je korištenje električnog ili neelektričnog sustava za paljenje mina jer će korištenje detonirajućeg štapina dovest do oštećenja dijela eksplozivnog punjenja, a neće pokrenuti reakciju (Ester, 2005).



Slika 3-2. Emulzijska matrica

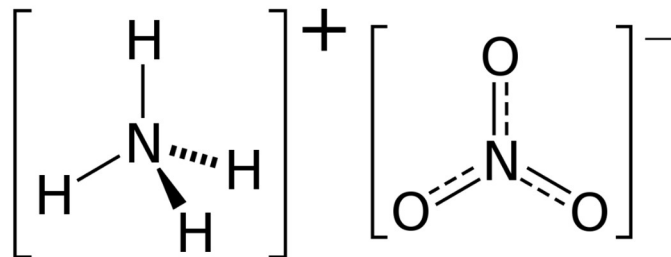
4. IZRADA 3 D MODELA STRUKTURE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA

Za izradu 3D modela strukture emulzijskog eksploziva korišten je program AutoCAD i 3D printer CraftBOT XL. Model je izrađen prema reakciji osnovnog procesa raspada emulzijskog eksploziva:

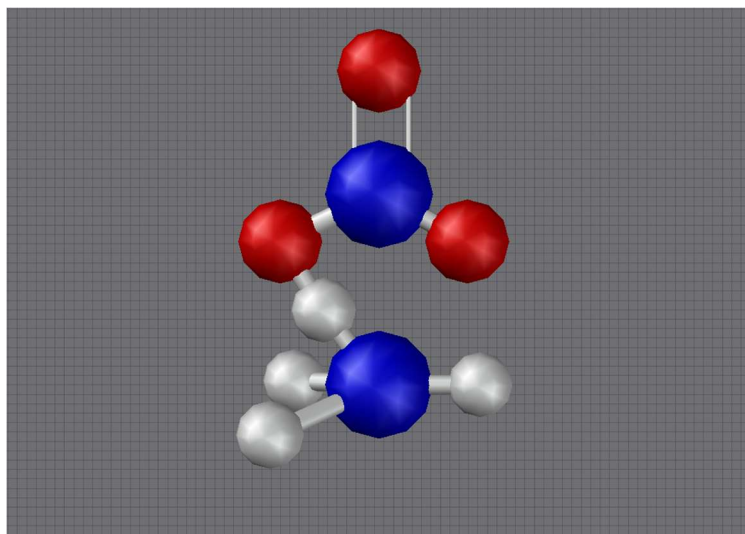


4.1 Amonijev nitrat, NH_4NO_3

Amonijev nitrat je amonijeva sol dušične kiseline koja je bijeli prah ili prozirni kristal. Koristi se kao umjetno gnojivo i kao oksidans u emulzijskim eksplozivima.



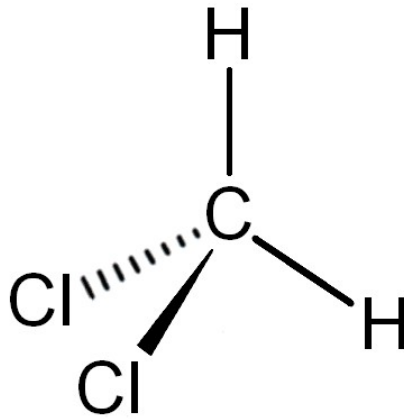
Slika 4-1. Strukturna formula amonijeva nitrata (Wikipedia, 2020.)



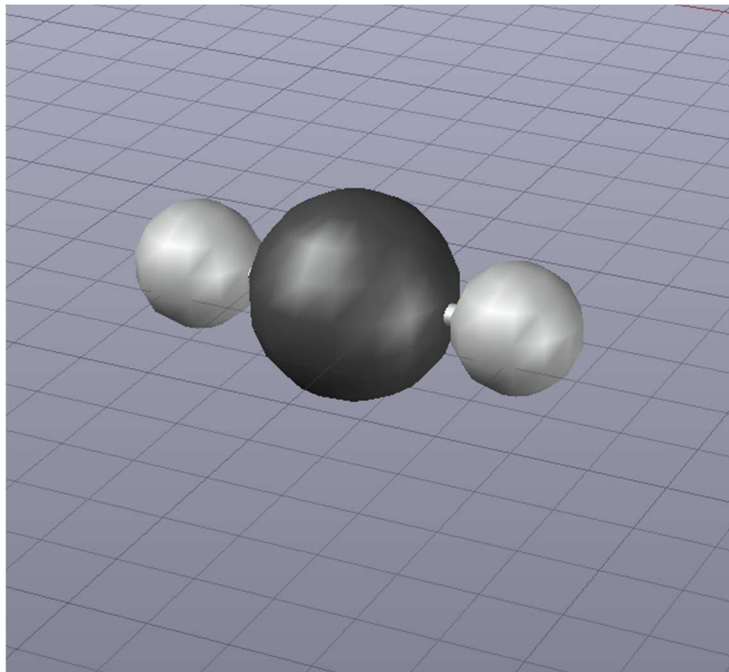
Slika 4-2. 3D model amonijeva nitrata izrađen u AutoCAD programu

4.2 Metilen, CH₂

Metilen je funkcionalna grupa koja je dobila naziv prema metanu kada sva ugljikova valentna elektrona ne formiraju vezu.



Slika 4-3. Strukturna formula metilena (Wikipedia, 2020).

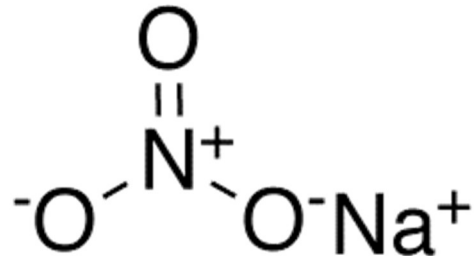


Slika 4-4. 3D model metilena izrađen u programu AutoCAD

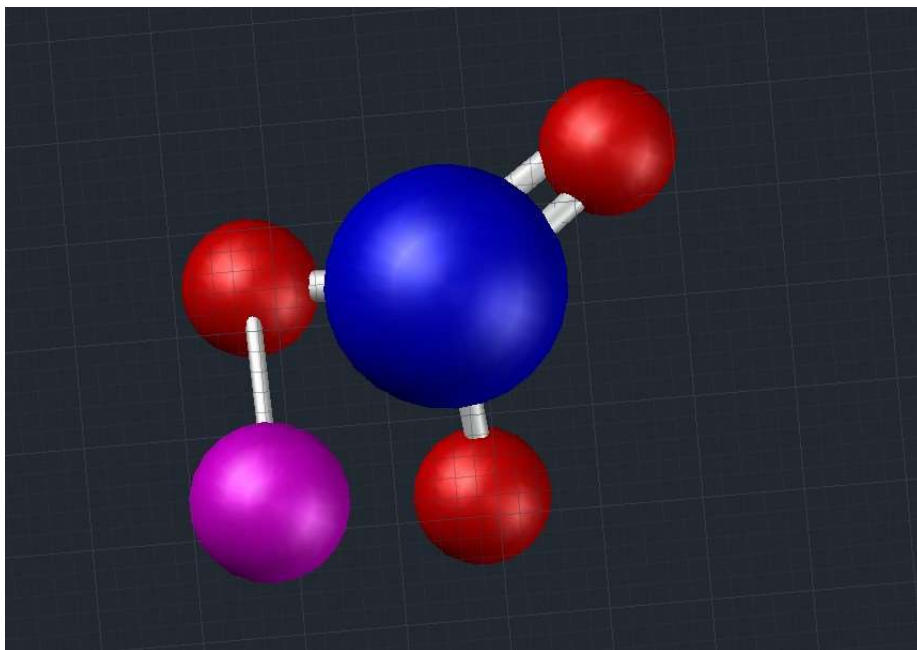
4.3 Natrijev nitrat, NaNO₃

Natrijev nitrat je sol lako topiva u vodi koja se nalazi u prirodi, a najveća se nalazišta nalaze u Čileu stoga se ponekad naziva i 'čileanska salitra'. Osim što se otapa u vodi, dobro se topi i u glicerolu te je higroskopan kristal koji kristalizira u kockaste romboedre. Do raspada dolazi

zagrijavanjem te u smjesama daje karakterističnu žutu boju. Laboratorijski se dobiva otapanjem natrijevog hidroksida u dušičnoj kiselini. Koristi se u dobivanju stakla, crnog baruta, emajla te kao sredstvo za oksidaciju i konzerviranje (Hrvatska enciklopedija, 2021).



Slika 4-5. Strukturna formula natrijeva nitrata (Wikipedia, 2021).



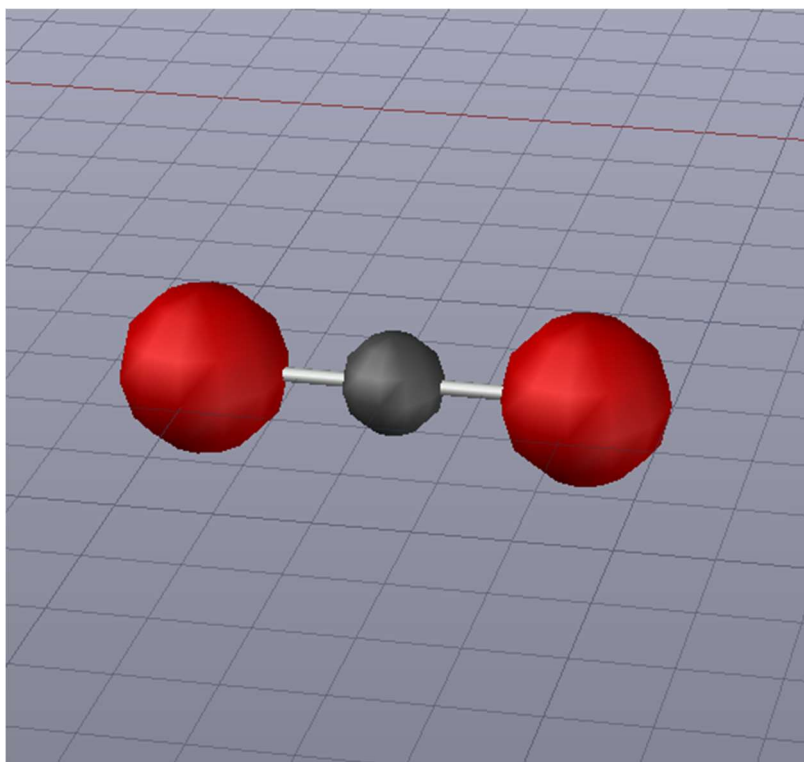
Slika 4-6. 3D model natrijeva nitrata izrađen u programu AutoCAD

4.4 Ugljikov dioksid, CO₂

Ugljikov dioksid je kemijski spoj sastavljen od dva atoma kisika kovalentno vezan na jedan atom ugljika. Ugljikov dioksid se stvara staničnim disanjem i izgaranjem. Kod standardnog tlaka i temperature, gustoća ugljičnog dioksida je oko 1,98 kg/m³, oko 1,5 puta je gušći od zraka. Molekule ugljičnog dioksida (O=C=O) tvore dvije dvostruke kovalentne veze i imaju linijski oblik. Nema električni dipol, i kada oksidira i otpušta elektrone, srednje je kemijski reaktivan i nezapaljiv, ali podržava gorenje metala kao što je magnezij (Wikipedia, 2020).



Slika 4-7. Strukturna formula ugljikovog dioksida (Wikipedia, 2020).

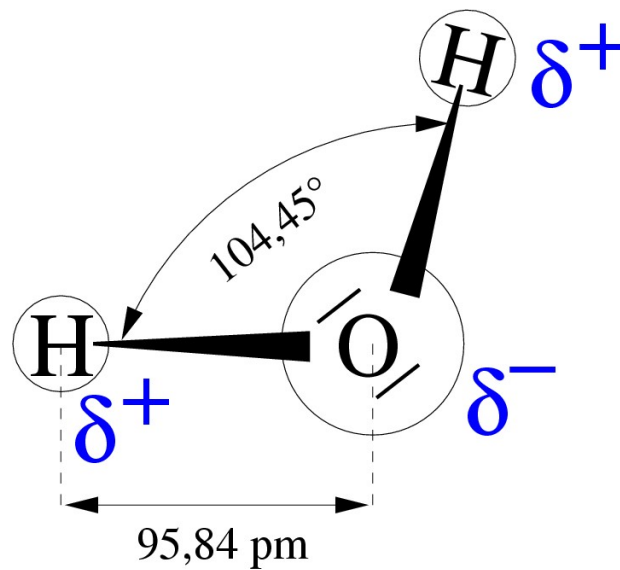


Slika 4-8. 3D model ugljikovog dioksida izrađen u programu AutoCAD.

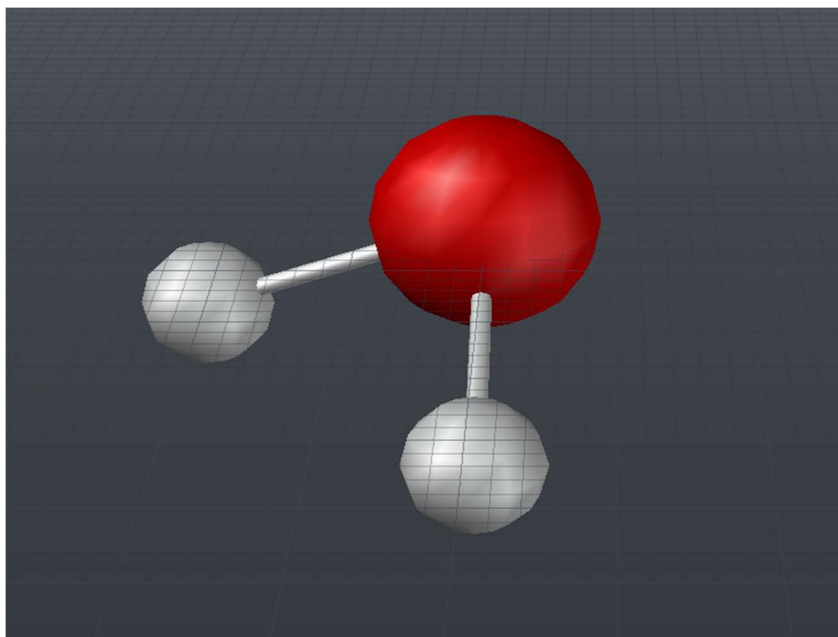
4.5 Voda, H₂O

Voda, vodikov oksid, H₂O, najvažniji kemijski spoj na Zemlji bez kojega život u postojećem obliku nije moguć. Voda je bitan sastojak živih organizama, zauzima više od dvije trećine Zemljine površine. Pod utjecajem Sunčeva zračenja površinska voda neprekidno se isparuje u atmosferu, gdje se kondenzira i u obliku oborina (kiša, snijeg, tuča, rosa, inje, magla) vraća na Zemlju. Pri atmosferskom tlaku i temperaturi između 0 C (kada se ledi) i 100°C (kada vrije) čista (destilirana) voda bezbojna je tekućina (kapljevina) bez mirisa i okusa. Gustoća vode najveća je na 3,98 C, pa je led manje gustoće od tekuće vode i na njoj pliva, a njegov volumen veći je za 9% od volumena jednake mase tekuće vode. Jedinствена fizikalna i kemijska svojstva

vode posljedica su kemijske i prostorne građe njezinih molekula. Zbog značajne razlike u elektronegativnosti vodikova i kisikova atoma, zbog dvaju slobodnih, nepodijeljenih elektronskih parova na kisikovu atomu, te činjenice da dvije kovalentne veze između kisikova i vodikovih atoma zatvaraju kut od $104,5^\circ$, molekula vode razmjerno je jaki dipol. Zbog toga molekule vode i u tekućem i u čvrstom stanju grade nakupine molekula, međusobno povezane vodikovim vezama. U tekućoj su vodi te nakupine nestabilne i nasumične, a u ledu one tvore pravilnu tetraedarsku strukturu, pri čem tetraedri grade heksagonske kanale (Hrvatska enciklopedija, 2020).



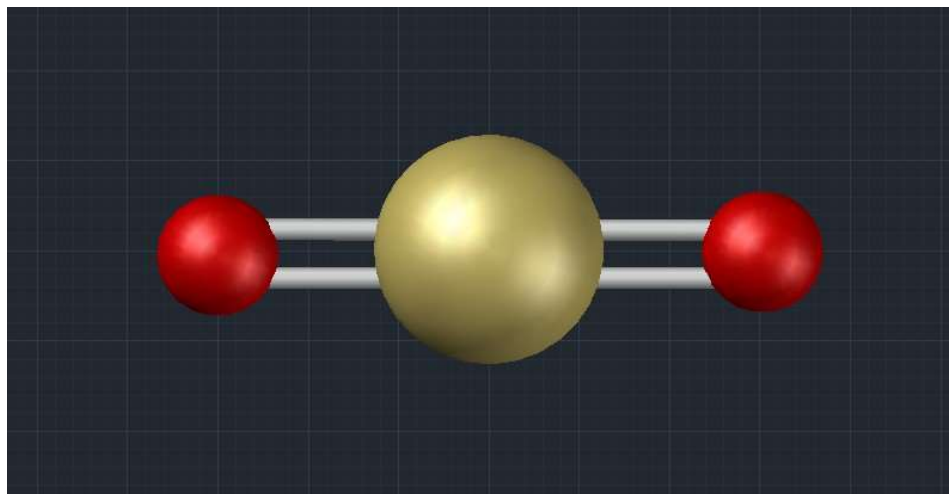
Slika 4-9. Strukturna formula vode (Wikipedia, 2020).



Slika 4-10. 3D model vode izrađen u programu AutoCAD.

4.6 Silicijev dioksid, SiO₂

Silicijev dioksid je kemijski spoj koji se u prirodi pojavljuje kao pijesak ili kvarc te je od davnina poznat po svojoj tvrdoći. Kemijski je inertan spoj koji nije topiv. Najvažniji mineral je kvarc jer je izrazito tvrd i piezoelektričan stoga se koristi u proizvodnji stakla i keramike.

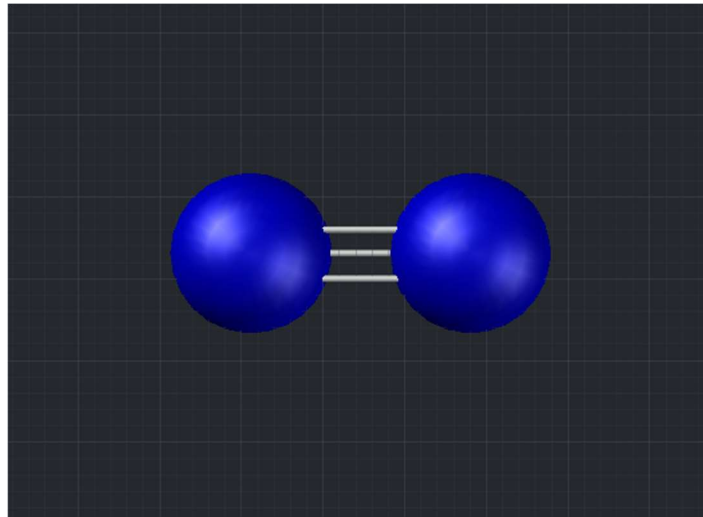


Slika 4-11. 3D model strukture silicijevog dioksida izrađen u programu AutoCAD

4.7 Dušik, N₂

Dušik je bezbojni plin bez mirisa i okusa, nešto lakši od zraka, slabo topljiv u vodi. U prirodi se u slobodnom, elementarnom stanju pojavljuje pretežno (99%) kao sastojak zraka (4/5 obujma zraka je dušik), a u mnogo manjem udjelu u vulkanskim plinovima, mineralnim vodama i dr. Vezan u spojevima dolazi u prirodi u obliku nitrata, nitrita i amonijevih soli, zatim u mnogim organskim spojevima, osobito u životinjskim i biljnim bjelančevinama. Dosta se teško izravno spaja s drugim elementima, ne gori i ne podržava gorenje, iako se u pogodnim uvjetima može spajati s kisikom, vodikom i nekim metalima. Izravna sinteza amonijaka od sastavnih elemenata (dušik i vodik) tehnički je najvažniji način dobivanja dušikovih spojeva od slobodnog dušika iz atmosfere. Drugi su načini vezanja atmosferskog dušika proizvodnja kalcijeva cijanamida i oksidacija dušika u električnom luku. Čisti se dušik tehnički dobiva prema Lindeovu postupku, frakcijskom destilacijom ukapljenoga zraka na temelju razlika u vrelištima ukapljenoga kisika (−183°C) i dušika (−195,8°C). Plinoviti dušik upotrebljava se kao sirovina za sintezu amonijaka, kao zaštitni, inertni plin pri kemijskim reakcijama i zavarivanju

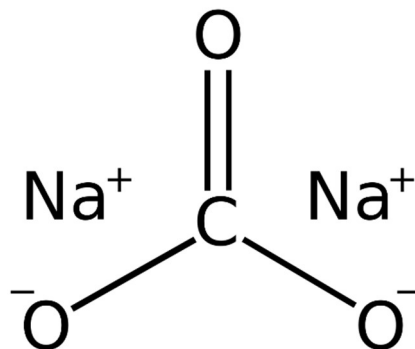
te za dobivanje dušikovih oksida, a ukapljeni dušik služi kao rashladno sredstvo. Od anorganskih dušikovih spojeva najvažniji su amonijak i dušična kiselina i njezine soli (nitrati), a zatim nitridi nekih elemenata zbog visokog tališta i velike tvrdoće, azidi teških metala kao eksplozivi, hidrazin, N_2H_4 , koji služi kao raketno gorivo, te dušikovi oksidi (Hrvatska enciklopedija, 2020).



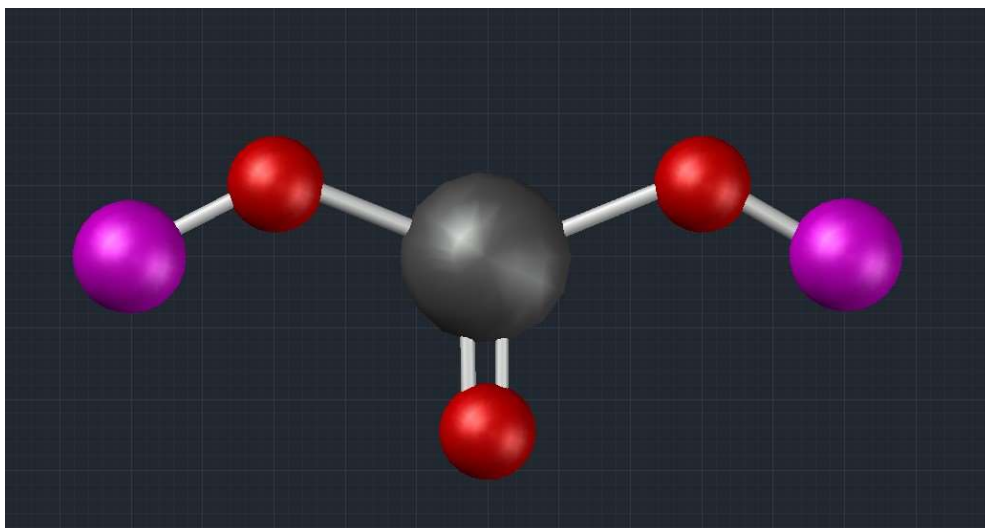
Slika 4-12. 3D model dušika izrađen u programu AutoCAD.

4.8 Natrijev karbonat, Na_2CO_3

Natrijev karbonat je bijeli kristal koji je topiv u vodi te je ta otopina izuzetno lužnata. Izuzetno je važna sirovina u industriji stakla, tekstila, papira, detrdženata i dr.



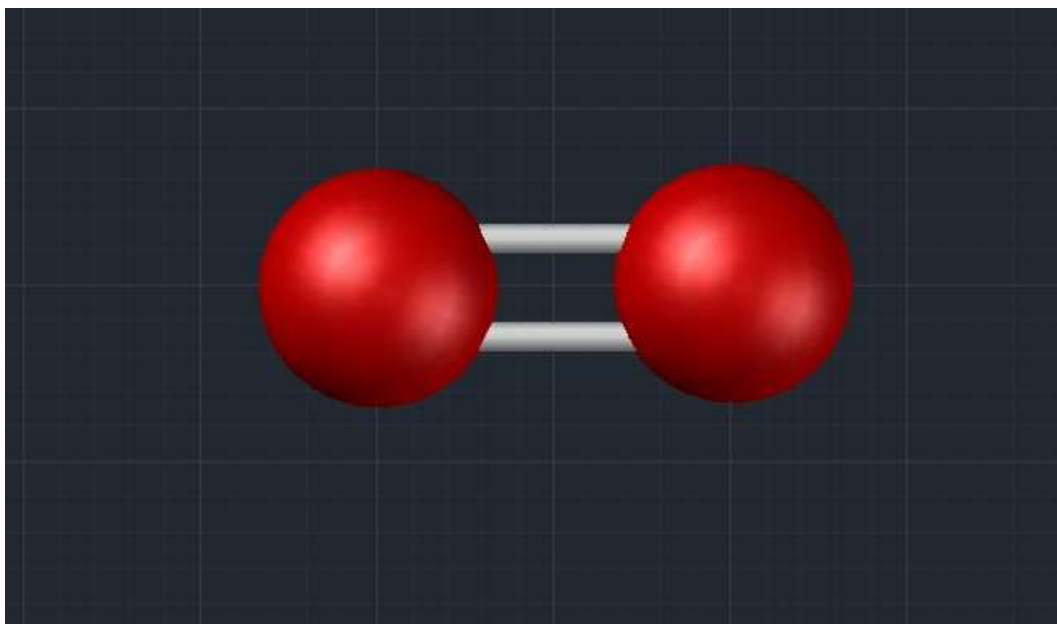
Slika 4-13. Strukturna formula natrijevog karbonata (Wikipedia, 2021).



Slika 4-14. 3D model natrijeva karbonata izrađen u programu AutoCAD

4.9 Kisik, O₂

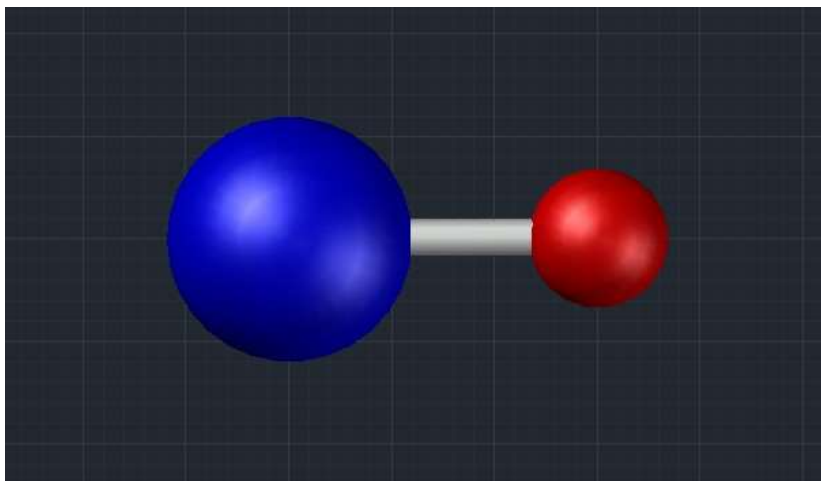
Kisik je najrašireniji kemijski element koji se nalazi u prirodi te je najvažniji element u svim organizmima. Rabi se u metalurgiji, autogenom rezanju i zavarivanju, industriji, medicini i dr. Spojevi kisika nazivaju se oksidi, Kisik se pojavljuje u dvije alotropske modifikacije, O₂ i O₃ (Hrvatska enciklopedija, 2021).



Slika 4-15. 3D model strukture kisika izrađen u programu AutoCAD

4.10 Dušikov monoksid, NO

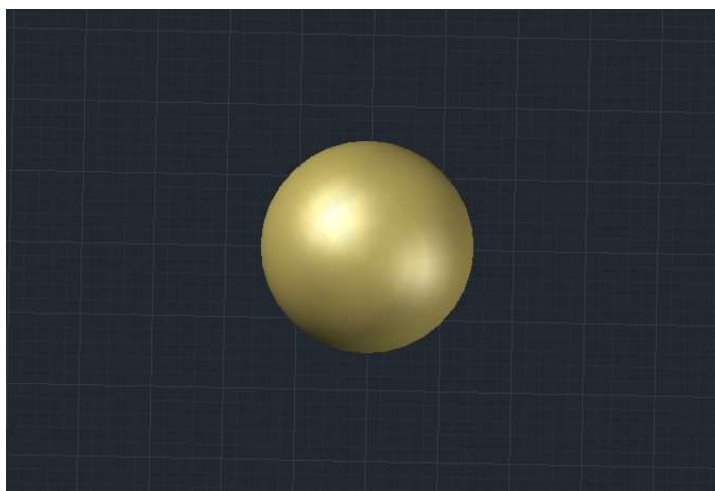
Dušikov monoksid je izuzetno otrovan, bezbojan plin koji na zraku oksidira u dušikov dioksid. Iako opasan, od izuzetne je važnosti u ljudskom tijelu jer sudjeluje u svim sustavima našeg organizma.



Slika 4-16. 3D model strukture dušikovog monoksida izrađen u programu AutoCAD

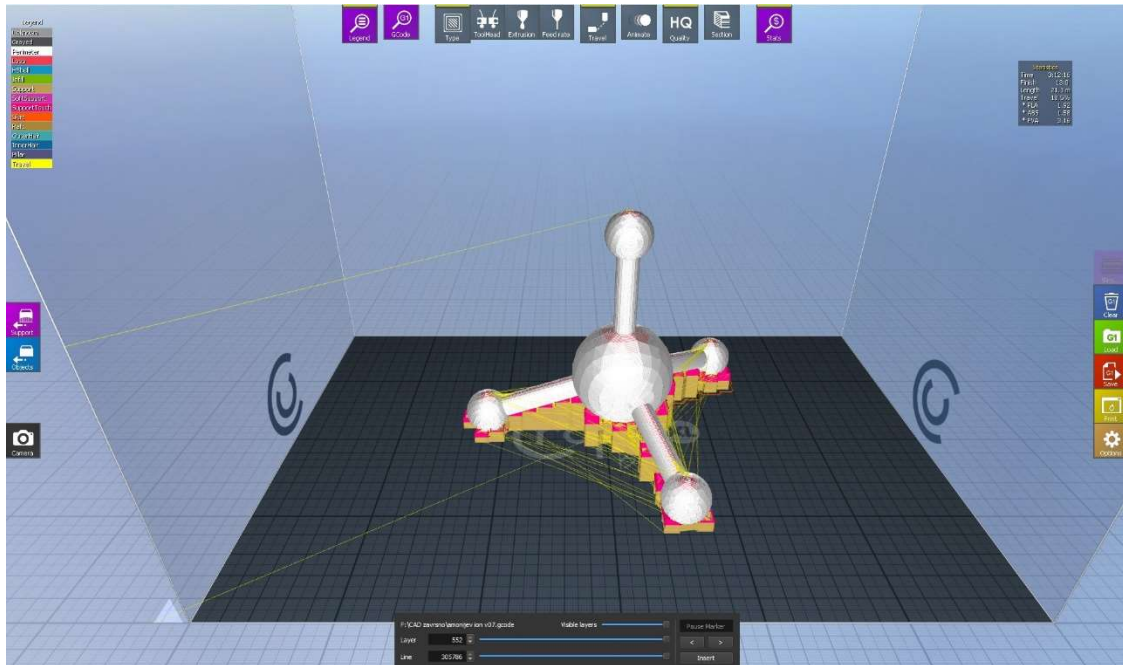
4.11 Silicij, Si

Silicije je kemijski element koje se u prirodi ne nalazi u elementarnom stanju, nego u obliku kvarca i drugih silikata, a dobivanje elementarnog silicija je izuzetno složeno. Drugi je najzastupljenij element u Zemljinoj kori te je sastojak gotovo svih stijena, minerala i pijesaka. Slabo je reaktivan te je odličan poluvodič (Hrvatska enciklopedija, 2021).



Slika 4-17. 3D model molekule silicija izrađen u programu AutoCAD

Nakon izrade 3D modela u AutoCAD-u pristupilo se ispisu modela na 3D printeru CraftBOT XL. Na slici 4-18 je prikazan 3D model amonijevog nitrata pripremljen za ispis na 3D printeru.



Slika 0-58. 3D model amonijevog nitrata pripremljen za ispis.

4.12. 3D printer CraftBOT XL

Za ispis 3D modela će se koristiti 3D printer CraftBOOT XL. U tablici 4-1. prikazane su tehničke značajke 3D printera CraftBOOT XL.

Tablica 2-1. Tehničke značajke 3D printera (CraftBot, 2017)

Tehnologija ispisa	Izrada fuziranih filamenata (FFF)
Volumen izgradnje	25 cm × 20 cm × 20 cm
Razlučivost sloja	50 mikrometara (sa 0,25 mm mlaznice)
Preciznost položaja	X, Y: 4 μm Z: 2 μm
Promjer niti	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm

Brzina ispisa	50 mm/s – 200 mm/s
---------------	--------------------

U tablici 4-2. prikazane su dimenzije printera.

Tablica 3-2. Dimenzije printera (CraftBot, 2017)

Dimenzije okvira	X: 41 cm Y: 36 cm Z: 38 cm
Sa svim dijelovima	X: 41 cm Y: 46 cm Z: 46 cm
Kutija za otpremu	X: 50 cm Y: 45 cm Z: 48 cm
Masa	14,5 kg
Težina dostave	18,5 kg

U tablici 4-3. prikazane su temperaturne značajke.

Tablica 4-3. Temperaturne značajke (CraftBot, 2017)

Sobna temperatura	15 °C – 32 °C
Temperatura skladištenja	0 °C – 32 °C
Radna temperatura mlaznice	180 °C – 260 °C
Radna temperatura grijane radne ploče	50°C – 110 °C

U tablici 4-4. prikazane su značajke programske podrške.

Tablica 5-4. Značajke programske podrške (CraftBot, 2017)

Programski paket	CraftWare
Vrste datoteke	OBJ/STL/CWPRJ
Podupire	Windows 7 i noviji

Na slici 4-19. je prikazana molekula ugljikovog dioksida tijekom 3D ispisa na 3D printeru CraftBOOT XL:



Slika 0-69. Molekula ugljikovog dioksida tijekom 3D ispisa.

5. ZAKLJUČAK

Modeli svih molekula koje sudjeluju u kemijskoj reakciji raspada emulzijskih eksploziva (NH_4NO_3 , CH_2 , H_2O , CO_2 i N_2) su izrađeni u AutoCAD programu te su zatim isprintani na 3D printeru CraftBOT XL

Svrha izrade 3D modela strukture emulzijskih eksploziva je mogućnost njihovog korištenja u nastavi.

6. LITERATURA

BOHANEK, V. 2013. *Model nastajanja i analiza djelovanja kumulativnoga procesa linerarnih eksplozivnih naboja*, Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

DOBRILOVIĆ, M. 2008. *Raspoloživa energija tlačnog udarnog vala udarne cjevčice i njezina primjena u iniciranju električnog detonatora*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

ESTER, Z., 2005. *Miniranje I.: eksplozivne tvari, svojstva i metode ispitivanja*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

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

PATNAIK, P. 2002. *Handbook of Inorganic Chemicals*. McGraw-Hill, URL:<https://fitk.iainambon.ac.id/tadrisipa/wp-content/uploads/sites/6/2020/10/HANDBOOK-OF-INORGANIC-CHEMICAL.pdf> (6.9.2021)

HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, MREŽNO IZDANJE, 2021. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=63000> (6.9.2021.)

HRVATSKA TEHNIČKA ENCIKLOPEDIJA, MREŽNO IZDANJE, 2021. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, URL: <https://tehnika.lzmk.hr/voda/> (6.9.2021.)



KLASA: 602-04/21-01/23
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

Lucija Šušković Mustafa, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/23, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 16.02.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

IZDRADA 3D MODELA STRUKTURE EMULZIJSKIH EKSPLOZIVA

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)