Eksperimentalno istraživanje učinkovitosti inertizacije eksplozivnih atmosfera

Mačković, Mario

Professional thesis / Završni specijalistički

2012

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:925107

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UČINKOVITOSTI INERTIZACIJE EKSPLOZIVNIH ATMOSFERA

ZAVRŠNI RAD

Mario Mačković, mag.ing.mech.

Zagreb, listopad 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UČINKOVITOSTI INERTIZACIJE EKSPLOZIVNIH ATMOSFERA

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nikola Šakić **Mario Mačković,** mag.ing.mech.

Zagreb, listopad 2012.

PODACI ZA BIBILIOGRAFSKU KARTICU

UDK:

Ključne riječi:	Inertizacija, ispitivanje, analiza, prašina, eksplozija
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	STROJARSTVO
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Mentor rada:	Prof. dr. sc. Nikola Šakić, dipl.ing.
Broj stranica:	112
Broj slika:	97
Broj tablica:	15
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	31
Datum obrane:	
Povjerenstvo:	**Dr. sc. Nedeljko Štefanić**, red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – predsjednik povjerenstva
	Dr. sc. Nikola Šakić, red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – mentor
	Dr. sc. Igor Zorić, izv. prof. Rudarsko geološko naftnog fakulteta u Zagrebu – član povjerenstva
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Poslijediplomski specijalistički studij
Područje: Industrijsko inženjerstvo i menadžment

Zagreb, 17.06.2011.

Zadatak za završni rad

Kandidat: *Mario Mačković, mag.ing.mech.*

Naslov zadatka: Eksperimentalno istraživanje učinkovitosti inertizacije eksplozivnih atmosfera

Opis:

U postrojenjima u kojima se koristi zapaljiva prašina (ugljen, metalne prašine, aluminijska prašina, brašno, šećer...) ne može se uvijek isključiti nastanak eksplozije prašine. Stoga treba poduzeti odgovarajuće mjere da se eksplozija potpuno onemogući, a ako to nije moguće potrebno je djelovati protiv njezinog razarajućeg djelovanja. Razvojem proizvodne tehnologije, sve je češća pojava da se u specifičnim procesima unutar procesne opreme i instalacija, i u normalnom radu, ubacuju inertne tvari u svrhu izbjegavanja pojave eksplozivne atmosfere. Ponekad tehnologiju normalna rada prati unutarnja pojava zapaljive tvari tako da uz postojanje uzročnika paljenja inertizacija čini vrlo učinkovitu mjeru sprečavanja eksplozije. Problem koji se javlja u postrojenjima koji koriste praškaste tvari u svom proizvodnom procesu, bilo da ih koriste kao gorivu tvar (cementare) ili kao supstancu u proizvodnji (farmaceutska i prehrambena industrija ...) je pojava različitih koncentracija i granulacija prašine te je zbog tih problema inertizacija jedna od djelotvornijih metoda zaštite od eksplozije. Sama inertizacija podrazumijeva smanjenje koncentracije kisika ispod granične koncentracije, a to se postiže dodavanjem inertnih plinova, primjerice CO_2 i N_2. Kako bi se takav sustav inertizacije mogao projektirati neophodno je poznavati eksplozivne karakteristike prašina u procesu. Eksplozivne karakteristike prašina mogu se odrediti jedino eksperimentalno (laboratorijska ispitivanja).

U radu treba:

- Razraditi teoretske osnove sustava inertizacije
- Provesti laboratorijska ispitivanja prema projektiranom pokusu pri konstantnom tlaku i temperaturi
- Analizirati dobivene rezultate nekim od računalnih programa
- Na osnovu dobivenih rezultata i analize potrebno je dati prijedlog optimizacije sustava inertizacije

Zadatak zadan: 12.07.2011.

Rad predan:

Mentor:	predsjednik Odbora za poslijediplomske studije:	Voditelj područja:
Dr.sc. Nikola Šakić, red. prof.	Dr.sc. Jurica Sorić, red.prof.	Dr.sc. Nedeljko Štefanić, red.prof.

Z A H V A L A

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Nikoli Šakiću na podršci, savjetima i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem predsjedniku povjerenstva za ocjenu i obranu prof. dr. sc. Nedjeljku Štefaniću, te prof. dr. sc. Igoru Zoriću na konstruktivnim primjedbama i savjetima.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Snežani Mičević i prof. dr. sc. Jeleni Marković s Rudarsko-geološko-građevinskog fakulteta iz Tuzle, bez čije pomoći ovaj rad nebi bilo moguće izraditi.

Želim se zahvaliti svim djelatnicima u tvrci u kojoj radim «Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom», a posebno djelatnicima laboratorija ExLAB-a koji su mi davali podstrek za nastavak i brže dovršenje ovog rada.

Na kraju, najveće hvala mojim najmilijima supruzi Maji, i djeci Marku i Mateju na njihovoj bezuvjetnoj potpori, pomoći, razumijevanju i ljubavi koju su mi davali tijekom cijelog mog studija. Bez njih sve ovo nebi imalo smisla.

U Zagrebu, listopad 2012.

Mario Mačković

S A D R Ž A J

Predgovor..... IX

Sažetak..... X

***Summary*..... XI**

Ključne riječi..... XIII

***Keywords*..... XIII**

Popis oznaka i kratica..... XIV

Popis slika..... XVI

Popis tablica..... XX

1.UVOD..... 1

1.1 Opis problema i cilj istraistraživanja..... 2

2. PRAŠINE I NJIHOVE KARAKTERISTIKE..... 4

2.1 Prašine i njihova podjela..... 4

2.2 Karakterisitike i metode ispitivanja prašina..... 6

2.2.1 Temperatura tinjanja sloja prašine..... **6**

2.2.2 Temperatura paljenja oblaka prašine..... **9**

2.2.3 Minimalna energija paljenja oblaka prašine..... **11**

2.2.4 Specifični otpor prašine..... **12**

2.2.5 Eksplozivne karakteristike prašine..... **13**

2.2.5.1 Najveći tlak eksplozije oblaka prašine, p_{max}..... **13**

2.2.5.2 Najveća brzina porasta tlaka eksplozije $(dp/dt)_{max}$ oblaka prašine..... **15**

2.2.5.3 Donja granica eksplozivnosti DGE oblaka prašine..... **16**

2.2.5.4 Granična koncentracija kisika GKK u oblaku prašine... **16**

2.3 Eksplozija prašine..... 19

2.4 Klasifikacija prostora i zone opasnosti..... 31

2.5 Uzročnici paljenja..... 33

3. INERTIZACIJA..... 36

3.1 Načini ostvarivanja inertizacije..... 38

3.2 Razređivanje eksplozivne prašine neeksplozivnom..... 41

3.3 Inertni plinovi..... 41

3.4 Dobava, distribucija i kontrola inertnih plinova..... 43

3.5 Utjecaj radnih parametara procesa..... 45

3.6 Primjeri korištenja i proračun inertizacije u industriji..... 47

3.6.1 Primjena sustava inertizacije u farmaceutskoj industriji..... **47**

3.6.2 Primjer korištenja inertizacije kod punjenja/pražnjenja silosa..... **51**

3.6.3 Primjena sustava inertizacije kod mljevenja..... **53**

3.6.4 Primjer proračuna inertizacije..... **55**

4. EKSPERIMENTALNI RAD..... 59

4.1 Projektiranje pokusa..... 59

4.1.1 Veličine u pokusu..... **64**

4.2 Vrsta prašine i inertni plinovi..... 66

4.3 Opis ispitne metode i eksperimenta..... 67

4.4 Cilj ispitivanja..... 72

5. PROVEDBA ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA 73

5.1 Rezultati ispitivanja i statistička analiza..... 71

5.2 Rezultati ispitivanja kod inertizacije eksplozivne smjese dušikom (N_2)..... 71

5.3 Rezultati ispitivanja kod inertizacije eksplozivne smjese ugljičnim dioksidom (CO_2)..... 81

5.4 Statistička analiza eksperimentalnih podataka..... 87

5.4.1 Utvrđivanje značajki utjecajnih faktora analizom varijance (ANOVA)..... **87**

5.4.1.1 Analiza po izlaznoj varijabli p_{max}..... **89**

5.4.1.2 Analiza po izlaznoj varijabli $(dp/dt)_{max}$..... **92**

5.4.1.3 Analiza po izlaznoj varijabli t_1..... **96**

5.4.2 Regresijaka analiza (nelinearna procjena)..... **98**

5.4.2.1 Regresijska analiza podataka ispitivanja eksplozivne smjese inertizirane dušikom..... **98**

5.4.2.2 Regresijska analiza podataka ispitivanja eksplozivne smjese inertizirane ugljičnim dioksidom..... **101**

5.5 Komentar dobivenih rezultata..... 103

6. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOG DALJNJEG ISTRAŽIVANJA..... 107

7. LITERATURA..... 110

Kratki životopis..... XXI

Short biography..... XXII

P R E D G O V O R

Ispitivanje eksplozivnih karakteristika zapaljivih prašina područje je rada autora u laboratoriju Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, ExLAB. Potencijalnoj opasnosti koju uzrokuju plinovi poklanja se veća pažnja nego opasnosti koju uzrokuju prašine. Prašine, naime, često bivaju opasnije nego plinovi i nerijetko uzrokuju velike štete. Vrlo često se karakteristike prašine preuzimaju iz literature, te ti podaci nisu uvijek dostatni i točni.

Upravo radi toga, osmišljena je mogućnost da se ispita jedan slučaj koji se pojavljuje u praksi, a to je inertizacija eksplozivnih atmosfera u kojima se pojavljuju prašine.

U ovom radu odabrana je prašina ugljena iz razloga što je bila relativno lako dobavljiva i kao takva ne igra najvažniju ulogu u ovom istraživanju. Naime, moglo se raditi o bilo kojoj vrsti prašine koja se pojavljuje u nekom tehnološkom procesu, primjerice drvena prašina, «farmaceutske» prašine i sl.

Ispitivanja su provedena u skladu s hrvatskim normama niza HRN EN 14034 i to metodom koja podrazumijeva korištenje ispitne posude u obliku kugle volumena 20 dm^3. Cilj ovog rada bio je uvidjeti kako pojedina inertna tvar (plinovi N_2 i CO_2) djeluju na pojavu eksplozije u ovisnosti o koncentraciji raspršene prašine u ispitnoj posudi.

Tijekom provedbe ispitivanja postojala su ograničenja u smislu broja raspoloživih kemijskih pripala koje se koriste prilikom paljenja eksplozivne smjese i raspoloživog vremena koje je bilo potrebno za izradu pokusa. Zbog navedenih ograničenja nije se izvodilo ponavljanje ispitivanja ispitnih točaka, što naravno, doprinosi određenoj grešci tijekom analize dobivenih rezultata.

Unatoč prije navedenim ograničenjima, dobiveni su rezultati koji dokazuju kako se razvija sama eksplozija i kakav to učinak inertne tvari imaju na istu, odnosno pokazuju gdje je granica kada se eksplozija više ne može razviti.

Sa gledišta tehnološkog procesa, takav točan podatak može imati za posljedicu znatne uštede tijekom samog procesa. Naime, nije jednako da li u nekoj smjesi smije biti 12 % ili 7 %, kisika jer sam postotak ima utjecaja na cijenu same inertizacije te na brzinu odvijanja tehnološkog procesa.

S A Ž E T A K

Danas se u raznim industrijama koriste razne vrste prašina. Prašine se mogu pojaviti kao sirovina, gotov proizvod ili kao otpad. U svakom slučaju, potrebno je pažljivo i sigurno rukovanje praškastim materijalima. Generalno se može reći da su prašine svi oni materijali čija granulacija ne prelazi veličinu od 500 μm.

U svim granama industrije gdje se koriste praškasti materijali (prehrambena, farmaceutska, petrokemijska, drvna, prerada metala,...) ne može se uvijek isključiti nastanak eksplozije prašina. Da bi se eksplozija prašine dogodila mora se poklopiti niz uvjeta što nije nemoguće. Obveza vlasnika postrojenja je da ima sigurno postrojenje u smislu sigurnosti ljudi i okoliša. Prašine su vrlo opasne i iz razloga što je svijest o njihovoj opasnosti vrlo niska jer se ne smatraju toliko opasnima kao plinovi. Međutim, praksa to opovrgava.

Jedna od metoda sprječavanja eksplozije eksplozivne smjese prašina je inertizacija. Inertizacija je postupak smanjivanja koncentracije kisika u eksplozivnoj smjesi. Pitanje je do koje granice % kisika je potrebno ići i s kojim je sredstvom to najbolje i najbrže postići. Odgovor na to pitanje daje eksperimentalno istraživanje. Cilj ovoga rada je upravo istražiti utjecaj dva inertna plina na pojavu eksplozije ugljene prašine. Za inertnu tvar uzeti su plinovi CO_2 i N_2. Eksperimentalni dio rada je izrađen u zatvorenoj posudi volumena 20 dm^3 na prašini visokokvalitetnog ugljena, granulacije manje od 75 μm. Za paljenje uzvitlane smjese prašine i zraka korištene su dvije kemijske pripale, a svaka je imala energiju od 5 kJ. Određene su tri koncentracije ugljene prašine na kojima se provodilo ispitivanje i to 250 gm^{-3}, 500 gm^{-3} i 750 gm^{-3}. Najprije se odredio najveći tlak eksplozije bez smanjivanja koncentracije kisika, odnosno u smjesi zraka i prašine za svaku koncentraciju. Nakon toga krenulo se u reduciranje postotka kisika u smjesi u koracima od 2 % pa sve do granice od 12 % kisika. Ukupno je napravljeno 30 eksplozija te su se snimale krivulje tlaka eksplozije, mjerilo se vrijeme potrebno za paljenje smjese i određivala se brzina porasta tlaka (brizanca). Istraživanjem su obuhvaćeni učinci dva inertna plina na najveći tlak eksplozije pojedine smjese. Na temelju rezultata provedena je analiza i dobivene su krivulje kretanja tlakova eksplozije u ovisnosti o koncentraciji prašine i kisika u smjesi. Zbog pojave plinova izgaranja u pojedinim slučajevima došlo je do povećanja tlakova eksplozija čak i kod relativno malih postotaka kisika, odnosno tlak eksplozije je veći od tlaka eksplozije u uvjetima s 21 % kisika. Upravo ta činjenica pokazuje da se kod projektiranja zaštitnih mjera moraju u obzir uzeti svi parametri pojedinog procesa, a najvažnije od svega je vrlo dobro poznavanje karakteristika samih medija koji se pojavljuju u procesu.

S U M M A R Y

Different types of dust are used in a variety of industries today. This industrial dust can be categorized as raw material, finished product, or waste. It is certainly necessary to carefully and safely handle dust-like materials. In general, it can be said that dust is any material with a granulation that does not exceed 500 μm in size.

In all branches of industry where dust-like materials are used (food, pharmaceutical, petrochemical, wood processing, metal processing…), dust explosions cannot be excluded. In order for a dust explosion to occur a series of conditions must be created, which is not impossible. The obligation of the plant owner is to ensure plant safety with regard to personnel and the environment. Dust is very dangerous, and the awareness of its hazards is very low because dust is not considered to be as dangerous as gases. However, practical experience contradicts this.

One method of preventing explosions of dust mixtures is inertization. Inertization is the process of reducing oxygen concentrations in explosive mixtures. The question is, which percentage of oxygen concentration should be achieved, and by which means could this be accomplished in the best and quickest way possible. The answers to these questions are provided by experimental research.

The objective of this paper is to research the effect of two inert gases in an explosion of coal dust. CO_2 and N_2 are used as the inert substance. The experiment is performed in a sealed container of 20 dm^3 in volume with the dust of high quality coal, with a granulation size of 71 μm. Ignition of the dispersed dust and air mixture is achieved with two chemical igniters, each with 5 kJ energy. Tests are performed on three different concentrations of coal dust: 250 gm^{-3}, 500 gm^{-3} and 750 gm^{-3}. Before everything the maximum explosion pressure without reduction of oxygen content was determined (in the mixture of air and dust for each concentration). After that reduction began of the oxygen percentage in the mixture in steps of 2 %, right up to the limit of 12 % oxygen. A total of 30 explosions were created and the explosion pressure curve was recorded. The time needed to ignite the mixture was measured and the maximum increase in pressure per time was determined. The effects of two inert gases on the maximum explosion pressure were observed through research. Analyses were performed based on these results, yielding curves of the movement of explosion pressures depending on the concentrations of dust and oxygen in the mixtures. Because of the occurrence of combustion gases in certain cases, there was an increase in explosion pressures even with relatively low percentages of oxygen (explosion

pressures greater than those in conditions with 21 % oxygen). This fact indicates that when designing protection measures all the parameters of each process must be taken into consideration, and most important is extensive knowledge of the characteristics of the substances that occur in the process.

K L J U Č N E R I J E Č I

- Inertizacija
- Ispitivanje
- Analiza
- Prašina
- Eksplozija

K E Y W O R D S

- Inertisation
- Testing
- Analize
- Dust
- Explosion

POPIS OZNAKA I KRATICA

$(dp/dt)_{max}$ – najveći porast tlaka u vremenu-**brizanca**, bar s^{-1}

brìzant|**an** *prid.* < *odr.* –tnï > koji naglo izgara i izaziva brzu eksploziju (o barutu); razoran, uništavajući △ ~ ***na granata*** *vojn.* topnička tempirna granata koja se rasprskava u zraku; ~ ***ni učinak*** *vojn.* oblik destruktivnog učinka detonacije koji se manifestira kidanjem, drobljenjem i probijanjem obloge što je u neposrednom dodiru s eksplozivnim punjenjem ◊ *fr.* brisant (*Izvor*: Hrvatski enciklopedijski rječnik, *Izdavač*: Novi liber, Zagreb 2002.)

c – koncentracija prašine, g m^{-3}

C_1 – početna koncentracija kisika, %

C_f – konačna koncentracija kisika, %

C_n – koncentracija kisika nakon ispiranja, %

G – brzina protoka kisika, m^3/h

K – efikasnost miješanja

K_{St} – brzina porasta tlaka eksplozije, bar m s^{-1}

n – broj ciklusa ispiranja

N – broj izmjene zraka

P_1 – donji tlak ispiranja, bar

P_2 – gornji tlak ispiranja, bar

Pd – podtlak pod kojim se nalazi ispitna posuda, bar

Pex – najveći nadtlak u ispitnoj posudi, bar

p_{max} – najveći tlak eksplozije, bar

Q_A – volumni protok prašine A, m^3/h

Q_{N2} – ukupni protok dušika, m^3/h

Q_{O2} – ukupni protok kisika, m^3/h

Q_{UN2} – zahtjevani protok kisika, m^3/h

Q_{zrak} – ukupni protok zraka, m^3/h

t_1 – vrijeme paljenja eksplozivne smjese,ms

t_2 – vrijeme proteklo od inicijacije eksplozije do točke najvećeg porasta tlaka u vremenu $(dp/dt)_{max}$, ms

t_d – vrijeme zadržavanja, ms

t_{DGK} – vrijeme za postizanje donje granične koncentracije, h

t_r – vrijeme pražnjenja spremnika uzorka prašine, ms

V – volumen, m^3

V_{O2} – volumni protok kisika, m^3/h

V_{N2} – volumni protok dušika, m^3/h

ANOVA – Analysis of Variance

ATEX – Atmosphères Explosibles

CEN – Comité Européen de Normalisation

DGE – Donja granica eksplozivnosti

DGK – Donja granična koncentracija

DGKK – Donja granična koncentracija kisika

GGE – Gornja granica eksplozivnosti

GGKK – Gornja granična koncentracija kisika

LEL – Lower Explosive Limit

LOC – Lower Oxygen Concentration

M – medijan

MAOC – Maximum Allowable Oxygen Concentration

MIE – Minimu Ignition Energy

MIT – Minimum Ignition Temperature of dust layer

MOC – Maximum Oxygen Content

NDKK – Najveća dopuštena koncentracija kisika

PIZ – Primarni izvor zaprašivanja

SIZ – Sekundarni izvor zaprašivanja

TIZ – Trajni izvor zaprašivanja

UEL – Upper Explosive Limit

x_i – nezavisne varijable

y_i – mjerene varijable

z_s – utjecajni faktori

w_k – uvjeti ispitivanja

P O P I S S L I K A

Slike	Opis	Stranica
Slika 2.1	**Uređaj za ispitivanje najniže temperature tinjanja**	**7**
Slika 2.2	**Početak tinjanja drvene prašine**	**8**
Slika 2.3	**Izgorena drvena prašina**	**8**
Slika 2.4	**Temperatura tinjanja u ovisnosti o debljini sloja prašine**	**9**
Slika 2.5	**«Godbert-Greenwaldova» peć**	**10**
Slika 2.6	**Izlaz plamena tijekom zapaljenja oblaka prašine**	**10**
Slika 2.7	**Uređaj za ispitivanje minimalne energije paljenja oblaka prašine**	**11**
Slika 2.8	**Zapaljeni uzorak prašine tijekom ispitivanja**	**12**
Slika 2.9	**Uređaj za ispitivanje specifičnog otpora prašine**	**13**
Slika 2.10	**Određivanje najvećeg tlaka eksplozije p_{max}**	**14**
Slika 2.11	**Određivanje najvećeg porasta tlaka eksplozije u jedinici vremena $(dp/dt)_{max}$ - brizanca**	**15**
Slika 2.12	**Prikaz početka raspršivanja uzorka prašine u kotlu volumena 1 m^3**	**17**
Slika 2.13	**Potpuno raspršivanje uzorka prašine u kotlu volumena 1 m^3**	**17**
Slika 2.14	**Prikaz ispitne kugle volumena 20 dm^3**	**18**
Slika 2.15	**Posljedica eksplozije prašine polietilena u «West Pharmaceutical Services, Inc» Kinston, North Carolina**	**19**
Slika 2.16	**Prikaz potrebnih uvjeta za eksploziju prašine**	**20**
Slika 2.17	**Eksplozija prašine aluminija u Hayers Lemmerz International, Huntington, Indiana, October 29, 2003**	**21**
Slika 2.18	**Gorenje ovisno o veličini čestica**	**22**
Slika 2.19	**Kvalitativni prikaz odnosa koncentracije prašine, temperature i energije**	**25**
Slika 2.20	**Raspodjela eksplozija i požara prema vrsti zapaljive prašine**	**26**
Slika 2.21	**Raspodjela eksplozija i požara zapaljivih prašina prema grani industrije**	**26**
Slika 2.22	**Primjer klasifikacije prostora nekog postrojenja-zapaljive prašine**	**33**
Slika 3.1	**Tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu procesa**	**40**

Slika 3.2	**Utjecaj temperature na najveću dozvoljenu koncentraciju kisika**	**46**
Slika 3.3	**Utjecaj tlaka na inertiziranje smeđeg ugljena**	**46**
Slika 3.4	**Jednostavan sustav inertizacije sustava mljevenja**	**49**
Slika 3.5	**Sklop za dobavu inertnog plina s provjerom protoka**	**50**
Slika 3.6	**Prijenosni sistem inertizacije mlina s kontrolom koncentracije kisika**	**51**
Slika 3.7	**Inertizacija sustava silosa**	**52**
Slika 3.8	**Inertizacija sustava mljevenja**	**54**
Slika 4.1	**Trokut eksplozivnosti**	**60**
Slika 4.2	**Prikaz grafa porasta tlaka eksplozije i brizance u ovisnosti o koncentraciji prašine**	**61**
Slika 4.3	**Prikaz grafa porasta tlaka eksplozije i brizance u ovisnosti o koncentraciji prašine od 250 g/m^3, 500 g/m^3 i 750 g/m^3**	**61**
Slika 4.4	**Prikaz područja (točaka) ispitivanja**	**61**
Slika 4.5	**Utjecaj koncentracije kisika na tlak eksplozije**	**62**
Slika 4.6	**Utjecaj koncentracije kisika na brizancu**	**63**
Slika 4.7	**Utjecaj koncentracije kisika na tlak eksplozije smeđeg ugljena**	**64**
Slika 4.8	**Prikaz faktora koji djeluju na sustav te izlazne veličine**	**65**
Slika 4.9	**Shematski prikaz ispitne linije**	**68**
Slika 4.10	**Ispitna posuda (kugla, volumena 20 dm^3) sa spremnikom za uzorak prašine**	**69**
Slika 4.11	**Tipičan graf tlaka eksplozije u ispitnom uređaju**	**69**
Slika 4.12	**Ispitna oprema**	**70**
Slika 4.13	**Mlaznica za raspršivanje uzorka prašine unutar ispitne komore**	**71**
Slika 4.14	**Prikaz ispitne komore neposredno prije i tijekom eksplozije**	**71**
Slika 5.1	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)**	**75**
Slika 5.2	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)**	**75**
Slika 5.3	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)**	**75**
Slika 5.4	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 19 % O_2**	**75**
Slika 5.5	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 19 % O_2**	**75**
Slika 5.6	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 19 % O_2**	**75**

Slika 5.7	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 17 % O_2**	**76**
Slika 5.8	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 17 % O_2**	**76**
Slika 5.9	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 17 % O_2**	**76**
Slika 5.10	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 15 % O_2**	**76**
Slika 5.11	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 15 % O_2**	**76**
Slika 5.12	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 15 % O_2**	**76**
Slika 5.13	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 12 % O_2**	**77**
Slika 5.14	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 12 % O_2**	**77**
Slika 5.15	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 12 % O_2**	**77**
Slika 5.16	**Tendencija kretanja najvećih tlakova u smjesi inertiziranoj dušikom**	**78**
Slika 5.17	**Tendencija vrijednosti brizance u atmosferi inertiziranoj dušikom**	**78**
Slika 5.18	**Tendencija vrijednosti vremena paljenja u odnosu na volumni udio kisika u smjesi**	**79**
Slika 5.19	**Prikaz računske vrijednosti Kst u ovisnosti o volumnom udjelu kisika u smjesi**	**80**
Slika 5.20	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 19 % O_2**	**82**
Slika 5.21	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 19 % O_2**	**82**
Slika 5.22	**Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 19 % O_2**	**82**
Slika 5.23	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 17 % O_2**	**82**
Slika 5.24	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 17 % O_2**	**83**
Slika 5.25	**Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 17 % O_2**	**83**
Slika 5.26	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 15 % O_2**	**83**
Slika 5.27	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 15 % O_2**	**83**
Slika 5.28	**Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 15 % O_2**	**83**
Slika 5.29	**Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 12 % O_2**	**83**
Slika 5.30	**Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 12 % O_2**	**84**
Slika 5.31	**Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 12 % O_2**	**84**
Slika 5.32	**Tendencija kretanja najvećih tlakova u smjesi inertiziranoj ugljičnim dioksidom**	**84**
Slika 5.33	**Tendencija vrijednosti brizance u atmosferi inertiziranoj ugljičnim dioksidom**	**85**

Slika 5.34 **Tendencija vrijednosti vremena paljenja u odnosu na volumni udio kisika u smjesi** **85**

Slika 5.35 **Prikaz računske vrijednosti K_{St} u ovisnosti o volumnom udjelu kisika u smjesi** **86**

Slika 5.36 **Prikaz utjecaja koncentracije prašine na tlak eksplozije** **90**

Slika 5.37 **Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na tlakove eksplozija** **91**

Slika 5.38 **Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na tlakove eksplozija** **92**

Slika 5.39 **Prikaz utjecaja koncentracije prašine na brizancu** **93**

Slika 5.40 **Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na brizancu** **94**

Slika 5.41 **Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na brizancu** **95**

Slika 5.42 **Prikaz utjecaja koncentracije prašine na vrijeme paljenja eksplozivne smjese** **96**

Slika 5.43 **Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na vrijeme paljenja eksplozivne smjese** **97**

Slika 5.44 **Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na vrijeme paljena eksplozivne smjese** **97**

Slika 5.45 **Regresijska krivulja tlakova kod inertizacije dušikom** **99**

Slika 5.46 **Grafički prikaz normalnosti ostatka regresijske krivulje p_{max} kod inertizacije dušikom** **100**

Slika 5.47 **Regresijska krivulja tlakova kod inertizacije ugljičnim dioksidom** **101**

Slika 5.48 **Grafički prikaz normalnosti ostatka regresijske krivulje p_{max} kod inertizacije ugljičnim dioksidom** **102**

Slika 6.1 **Usporedba vrijednosti K_{St}-a u ovisnosti o inertnom plinu** **108**

POPIS TABLICA

Tablica	Opis	Stranica
2.1	**Podjela zapaljivih prašina prema HRN EN 60079-0**	**5**
2.2	**Podjela prašina na osnovu eksplozivnih karakteristika**	**5**
2.3	**Karakteristike nekih prašina**	**18**
2.4	**Prikaz sigurnosnih mjera i bitnih karakteristika prašine**	**30**
2.5	**Određivanje zona opasnosti ovisno o izvorima ispuštanja**	**32**
2.6	**Primjeri određivanja zona opasnosti u prostorima uz prisustvo zapaljivih prašina**	**32**
3.1	**Prikaz prednosti i mana inertnih plinova**	**42**
4.1	**Imedijatna analiza prašine**	**66**
5.1	**Eksplozivne karakteristike ugljene prašine u sustavu inertiziranom dušikom**	**74**
5.2	**Eksplozivne karakteristike ugljene prašine u sustavu inertiziranom ugljičnim dioksidom**	**81**
5.3	**Rezultati ispitivanja**	**88**
5.4	**Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu p_{max}**	**89**
5.5	**Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu $(dp/dt)_{max}$**	**87**
5.6	**Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu t_1**	**90**
5.7	**Svojstva inertnih plinova C_p, C_v i λ**	**104**

1. UVOD

U gotovo svim granama industrije danas se koriste sve više raznih praškastih medija, koji su u većini slučajeva zapaljivi i eksplozivni te kao takvi predstavljaju potencijalnu opasnost. Svjedoci smo industrijske eksploatacije svih vrsta sirovina koje se koriste ili za preradu ili kao gorivo, te je stoga potrebno razmotriti sve sigurnosne mjere kako ne bi došlo do havarije u pogledu ljudskih žrtava, ekološke katastrofe te razaranja samog postrojenja. Da bi smo uspjeli izbjeći bilo kakve havarije, potrebno je projektirati dovoljno sigurna postrojenja a to podrazumijeva ugradnju adekvatne opreme i efikasnog zaštitnog sustava.
Inertizacija čini jednu od mjera koje se poduzimaju kako bi se izbjegla pojava eksplozivne atmosfere ili kako bi se vjerojatnost njene pojave svela na, što je moguće, nižu razinu, stoga se ubraja u mjere sprečavanja eksplozije [1] ili primarnu protueksplozijsku zaštitu.

Razvojem proizvodne tehnologije, sve je češća pojava da se u specifičnim procesima unutar procesne opreme i instalacija, i u normalnom radu, ubacuju inertne tvari u svrhu izbjegavanja pojave eksplozivne atmosfere. Ponekad tehnologiju normalna rada prati unutarnja pojava zapaljive tvari tako da, uz postojanje uzročnika paljenja, inertizacija čini vrlo učinkovitu mjeru sprečavanja eksplozije.

Kako bi kao mjera sprečavanja eksplozije, inertizacija bila učinkovita potrebno je poznavati fizikalne parametre prašina u tehnološkom procesu. Učinkovitost spomenute mjere sprečavanja eksplozije nadasve ovisi o vrsti prašine, granulaciji prašine, vrsti inertne tvari i samom postrojenju. Za potrebe projektiranja sustava inertizacije eksplozivne atmosfere, u ovom slučaju eksplozivne atmosfere prašina, potrebno je provesti niz ispitivanja kojima se određuju određeni eksplozivni parametri same prašine. U nekim postrojenjima nije dovoljan samo jedan zaštitni sustav već se kombiniraju dva ili više, pa se primjerice može kombinirati inertizacija i protueksplozijske zaštitne membrane koje imaju zadatak da, ukoliko se i eksplozija dogodi, višak tlaka ispuste u okolinu bez razaranja samog postrojenja.

1.1 Opis problema i cilj istraživanja

Eksplozije prašine nisu rijedak slučaj, a osim toga riječ je o vrlo kompleksnom i teško predvidljivom događaju. Rukovanje prašinama kao sirovinom, otpadom ili kao konačnim proizvodom u pogonima gdje se nalaze uzročnici paljenja predstavlja veliki rizik od paljenja, odnosno eksplozije prašina. Eksplozija prašine je vrlo brza i burna kemijska reakcija koja se odvija u 100 milisekundi ili manje te praktički nema vremena da ljudi pravodobno reagiraju, kako je to u slučaju požara. Ovdje je potrebno skrenuti pozornost i na opasnost od sekundarnih eksplozija. Naime, tijekom prve inicijalne eksplozije uzvitla se prašina koja je nataložena unutar postrojenja (na uređajima, cjevovodima, konstrukciji...) te tako nastali oblak prašine eksplodira te se javlja niz sukcesivnih eksplozija koje prestaju tek kada sva prašina izgori odnosno eksplodira.

Kako je već prije bilo rečeno, u skoro svim industrijama koriste se zapaljive prašine ili kao gorivo, ili kao sirovina ili je to krajnji proizvod, a opasnost od eksplozije prašina vrlo je teško izbjeći u raznim procesima odnosno rukovanju s prašinom. Mnogi materijali fine granulacije, kao npr. ugljen, drvo, škrob, šećer, guma, plastika, neki metali, farmaceutski proizvodi, mogu eksplodirati jednom kada su raspršeni u zraku kao oblak u koncentracijama koje su unutar granica eksplozivnosti, iznad donje granice eksplozivnosti (DGE), a ispod gornje granice eksplozivnost (GGE).
Pod rukovanjem se smatra skladištenje, obrada, transport, pakiranje i sl. Za rukovanje takvim praškastim materijalom koriste se razna postrojenja i uređaji koji mogu imati uzročnik paljenja, primjerice: silosi, transportne trake, zračni transport, mlinovi, cikloni, filteri i sl. te postoji opasnost od eksplozije prašina. Da bi se to izbjeglo potrebno je primijeniti neke od zaštitnih mjera.
Problem koji se javlja u prethodno navedenim postrojenjima je pojava različitih koncentracija i granulacija prašine te je zbog tih problema inertizacija jedna od djelotvornijih metoda zaštite od eksplozije.

Sam postupak inertizacije podrazumijeva smanjenje koncentracije kisika ispod granične koncentracije tijekom cijelog procesa proizvodnje, transporta i sl., a to se postiže dodavanjem inertnih plinova, vodene pare ili nezapaljivih prašina. Međutim, izbor inertne tvari ovisi o samoj prašini jer učinkovitost inertne tvari nije jednaka za sve vrste prašina.

Da bi se sustav inertizacije pravilno mogao projektirati i dimenzionirati potrebno je vrlo dobro poznavati postrojenje, sam proces te naravno eksplozivne karakteristike prašina u procesu. Eksplozivne karakteristike prašina određuju se eksperimentalno, laboratorijskim ispitivanjima i to prema normama: HRN EN 14034-1 [2], HRN EN 14034 -2 [3], HRN EN 14034-3 [4], HRN EN 14034 -4 [5].

Kako je već prije bilo rečeno, inertne tvari nemaju jednak efekt odnosno nisu jednako učinkovite u sprječavanju razvoja eksplozije.

Cilj ovoga rada je istražiti učinkovitost inertizacije eksplozivne atmosfere prašina s inertnim plinovima ugljičnim-dioksidom (CO_2) i dušikom (N_2). Za potrebe ovog ispitivanja koristi se visoko kvalitetna ugljena prašina granulacije manje od 75 μm. Kako bi se odredila učinkovitost pojedinog inertnog plina, potrebno je prašinu ugljena raspršiti u ispitnom uređaju zajedno sa inertnim plinom te izazvati paljenje tako nastale smjese. Na osnovu niza ispitivanja sa različitim koncentracijama ugljene prašine (c, g/m^3) i različitim volumnim udjelima kisika u smjesi, odnosno različitim volumnim udjelima inertnih plinova odrediti će se učinkovitost prije spomenutih inertnih plinova.

2. PRAŠINE I NJIHOVE KARAKTERISTIKE

U protueksplozijskoj zaštiti koriste se određene normirane metode ispitivanja prašina pomoću kojih se određuju karakteristike prašina. Laboratorijski dobivene karakteristike prašina omogućavaju podjele prašina u određene skupine. Karakteristike određuju samu prašinu u smislu da li je električki vodljiva, da li je eksplozivna, da li tinja, koja je temperatura paljenja oblaka prašine, koja je minimalna energija paljenja itd. Prethodno nabrojane karakteristike su vrlo važne u smislu odabira opreme, zaštitnih sustava i same klasifikacije prostora.

2.1 Prašine i njihova podjela

Što su zapaljive prašine? Prema normi HRN EN 60079-0 [6] «Prašine su fino podijeljene čvrste čestice, nazivne veličine 500 μm ili manje, koje mogu biti raspršene u zraku i koje se talože uslijed vlastite težine, mogu gorjeti ili tinjati uz prisustvo zraka te mogu formirati eksplozivnu smjesu sa zrakom kod atmosferskog tlaka i normalne temperature (uključujući prašinu i pijesak prema ISO 4225).»
U literaturi se može naći mnogo podjela prašina, a to ovisi o problematici koja se obrađuje. Svako industrijsko područje (prehrambena industrija, farmaceutska industrija...) na osnovu spoznaja ima svoju podjelu praškastih materijala.
U protueksplozijskoj zaštiti koristi se nekoliko podjela prašina prema njihovim važnim eksplozivnim i zapaljivim karakteristikama.
U osnovi, zapaljive prašine mogu se svrstati u tri glavne skupine [7]:

1. Organske prašine
2. Anorganske prašine
3. Mješovite prašine

Ad 1. Organske prašine dijele se na:

a) Prirodne prašine
   - prašine u prehrambenoj industriji (žitarice, šećer,...)
   - prašina u preradi drva
   - ugljena prašina
   - ostale prirodne prašine

b) Kemijsko - tehnološke prašine
   - prašine u proizvodnji i preradi plastičnih masa, smola i gume (polimeri)
   - prašine u farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji te u proizvodnji pesticida
   - ostale kemijsko-tehnološke prašine

Ad 2. Anorganske prašine dijele se na:

a) Metalne (čisti metali te razne legure)

b) Ostale anorganske prašine (karbidi, nitrati, oksidi,….)

Ad 3. Smjese raznih prašina, odnose se na različite prašine koje su miješane u raznim omjerima kao npr.: kalcij karbonat/grafit, aluminij/poliester….

Podjela zapaljivih prašina prema HRN EN 60079-0 [6] odnosi se na karakteristike koje se laboratorijski ispituju, a navedene su u tablici 2.1:

Tablica 2.1 *Podjela zapaljivih prašina prema HRN EN 60079-0* [6]

Podjela zapaljive prašine u skupine	
IIIA	Zapaljiva vlakanca i pahulje (čestice > 500 μm)
IIIB	Nevodljive prašine
IIIC	Vodljive prašine

Zapaljiva vlakanca i pahulje su čvrste čestice, nazivne veličine veće od 500 μm koje mogu biti raspršene u zraku i koje se talože uslijed vlastite težine.

Nevodljive prašine su zapaljive prašine čiji je specifični električki otpor veći od 10^3 Ωm.

Vodljive prašine su zapaljive prašine čiji je specifični električki otpor jednak ili manji od 10^3 Ωm.

Sljedeća podjela zapaljivih prašina rađena je na bazi eksplozivnosti, odnosno jačini eksplozije koju može proizvesti smjesa prašine i zraka u zatvorenoj posudi. Navedena podjela prikazana je u tablici 2.2.

Tablica 2.2 *Podjela prašina na osnovu eksplozivnih karakteristika* [7] [8]

Razred eksplozivnosti prašine	**Kst (Bar m s^{-1})**	**Karakteristike**
St 0	0	Nema eksplozije
St 1	0 ÷ 200	Slaba eksplozija
St 2	200 ÷ 300	Jaka eksplozija
St 3	> 300	Vrlo jaka eksplozija

Nadalje, u svrhu podjela prašina prema eksplozivnosti koristi se i sljedeće podjela [8]:

- **Grupa A –** prašine koje se mogu zapaliti i koje podržavaju širenje plamena
- **Grupa B -** prašine koje ne podržavaju širenje plamena

2.2 Karakteristike i metode ispitivanja prašina

Prije spomenute podjele prašina temelje se na karakteristikama koje su dobivene laboratorijskim ispitivanjima prašina. Laboratorijska ispitivanja koja se moraju provesti da bi se odredile karakteristike zapaljivih (eksplozivnih) prašina dana su u nastavku. Tako dobivene karakteristike zapaljivih prašina koriste se u svrhu projektiranja industrijskih postrojenja te potrebnih zaštitnih sustava koji se ugrađuju na industrijska postrojenja. Zaštitni sustavi imaju ulogu zaštite djelatnika, okoliša te samog industrijskog postrojenja. Problem eksplozivnih prašina u postrojenjima je vrlo kompleksan i traži selektivan pristup pri rješavanju. Upravo zbog svoje nehomogenosti, koncentracije te samih fizikalno-kemijskih značajki svaku prašinu potrebno je ispitati poznatim metodama kako bi doznali njezine karakteristike te kako bi se znali ponašati kada su prašine prisutne da li kao gotov proizvod, sirovina ili nusprodukt. Postoje literaturni podaci u kojima su navedene eksplozivne karakteristike za određene prašine, međutim ti podaci nerijetko se razlikuju od stvarnih podataka zbog raznih razloga, primjerice, zbog sadržaja vlage, granulacije, volatila i sl. Zbog tih razloga najbolji put zaštite od eksplozija prašina tj. prvi korak, je provođenje ispitivanja na stvarnom uzorku i dobivanje relevantnih podataka za ispitani uzorak stvarne prašine koja se nalazi u postrojenju.

2.2.1 Temperatura tinjanja sloja prašine [9]

Minimalna temperatura paljenja sloja prašine (engl. *Minimum Ignition Temperature of dust layer*, *MIT*) je najniža temperatura kod koje se sloj prašine zapali na vrućoj površini. U literaturi se obično ta temperatura naziva temperaturom tinjanja sloja prašine. Taj podatak je vrlo važan za ocjenu ograničavanja temperature površina u postrojenjima gdje se nalaze zapaljive prašine odnosno za procjenu rizika paljenja kod postrojenja gdje postoji mogućnost akumulacije tj. taloženja prašine.

Ispitivanje se provodi korištenjem uređaja koji se sastoji od električki grijane ploče promjera 200 mm i debljine 20 mm na koju se stavlja obruč promjera 100 mm i visine 5 mm, termopara te regulatora s monitorom (slike 2.1 i 2.2). Unutar obruča se stavlja uzorak prašine. Ploča mora tijekom ispitivanja održavati konstantnu temperaturu te razlika

temperatura pojedinih točaka na samoj ploči ne smije prijeći ±5K. Temperatura unutar sloja prašine mjeri se termoparom. Najniža temperatura ploče kod koje se dogodi nagli porast temperature unutar sloja prašine naziva se temperatura tinjanja, a rezultat je izgorena prašina (slika 2.3).



Legenda:

1- Držač termopara s utegom
2- Termopar za mjerenje površinske temperature ploče
3- Termopar za mjerenje temperature u sloju prašine
4- Grijača ploča
5- Regulator temperature s monitorom

Slika 2.1 Uređaj za ispitivanje najniže temperature tinjanja [12]



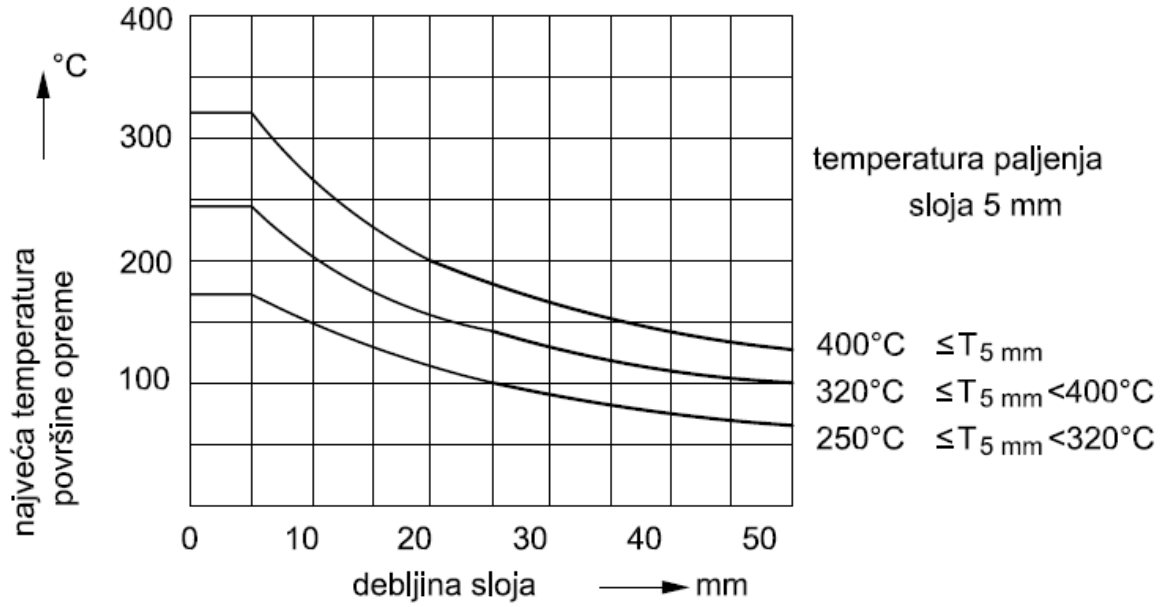
Slika 2.2 Početak tinjanja drvene prašine [12]



Slika 2.3 Izgorena drvena prašina [12]

U ovisnosti o vrsti postrojenja, na uređajima se mogu nataložiti slojevi prašina veće debljine (od 5 mm pa sve do 50 mm). U tim slučajevima najviša dopuštena temperatura površine uređaja mora biti snižena. Na slici 2.4 prikazani su primjeri smanjenja najviše dopuštene površinske temperature uređaja koji rade u prisutnosti prašine čija je najniža temperatura tinjanja 5 mm sloja jednaka ili viša od 250 ^{o}C, u omjeru na povećanje debljine sloja. U praškastom materijalu koji se skladišti u silosima ili na nekoj hrpi u dugom vremenskom periodu može se dogoditi spontano paljenje kao rezultat spore egzotermne reakcije s kisikom ili biološke reakcije. Opasnost od nataložene prašine je u tome što se unutar takvih slojeva mogu stvoriti «tinjajuća gnijezda» koja u slučaju uzvitlavanja prašine uslijed tehnoloških procesa i/ili protoka zraka postaju djelotvorni uzročnici paljenja,

odnosno zapale oblak prašine. Nakon inicijalne, primarne, eksplozije redovito dolazi do podizanja oblaka prašine iz nataloženih slojeva te do puno razornijih sekundarnih eksplozija, koje vrlo često zahvaćaju čitave objekte i dovode do njihovog potpunog uništenja.



Slika 2.4 Temperatura tinjanja u ovisnosti o debljini sloja prašine [27]

2.2.2 Temperatura paljenja oblaka prašine [9]

Minimalna temperatura paljenja oblaka prašine (engl. *Minimum Ignition Temperature of a dust cloud*) opisuje ponašanje paljenja smjese prašine i zraka na vrućoj površini. Minimalna temperatura paljenja je najniža temperatura kod koje se najzapaljivija smjesa prašine i zraka (oblak prašine) može zapaliti. Obično je temperatura paljenja oblaka viša od temperature paljenja sloja prašine.

Ispitivanje se provodi korištenjem uređaja koji se sastoji od spremnika zraka pod tlakom, spremnika za uzorak prašine peći te regulatorom temperature. Peć se u literaturi naziva još i Godbert-Greenwaldova peć [8] (slika 2.5). Otvaranjem ventila stlačeni zrak se (do max. 0,5 bar) upuhuje u spremnik s uzorkom prašine te tako nastali oblak ulazi u prije zagrijanu peć. Postupak se ponavlja dok se ne odredi najniža temperatura paljenja oblaka prašine. Slika 2.6 prikazuje paljenje oblaka prašine prilikom ispitivanja.



Legenda:

1- Spremnik prašine

2- Peć

3- Spremnik zraka s manometrom

4- Regulator temperature s monitorom

Slika 2.5 «Godbert-Greenwaldova» peć [12]



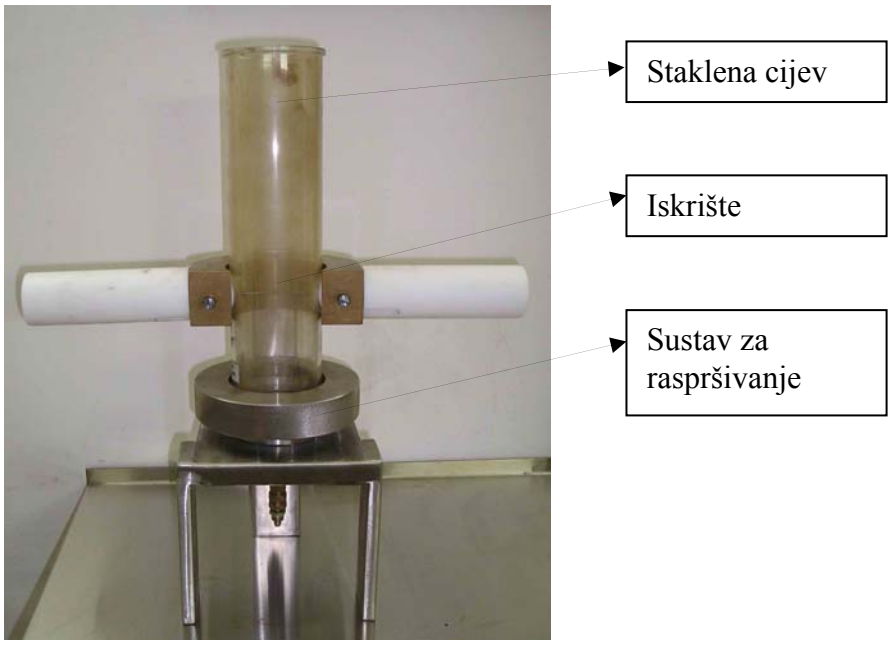
Slika 2.6 Izlaz plamena tijekom zapaljenja oblaka prašine [12]

2.2.3 Minimalna energija paljenja oblaka prašine [10]

Minimalna energija paljena oblaka prašine (engl. *Minimum Ignition Energy*, *MIE*) je definirana kao najmanje potrebna količina električne energije pohranjene u kondenzatorima koja pri pražnjenju preko iskrišta može zapaliti stvorenu smjesu prašine i zraka.

Ispitivanje se provodi korištenjem uređaja koji se sastoji od iskrišta, spremnika stlačenog zraka, staklene cijevi, kondenzatora te sustava za raspršivanje (slika 2.7).

Rezultati ispitivanja, posebno vrijedi za ovo ispitivanje, mnogo ovise o fizikalnim i kemijskim svojstvima samog uzorka te o samom uređaju za ispitivanje. Naime, u normi je navedeno nekoliko strujnih krugova za generiranje same iskre, što pridonosi razlici u samim rezultatima. Zbog tih razlika vrijednosti za minimalne energije paljenja oblaka prašina navodi se kao par vrijednosti. Niža vrijednost određuje energiju na kojoj se paljenje nije dogodilo. Viša vrijednost određuje energiju kod koje smjesa prašine i zraka može biti zapaljena. U usporedbi s eksplozivnim plinskim smjesama, za paljenje smjesa prašina sa zrakom u pravilu su potrebne bitno više energije. Kod plinova se, tako, radi o energijama reda veličine μJ, a kod prašina o energijama reda veličine mJ. Novija istraživanja upućuju na to da se navedeni odnosi ne mogu uzeti općenito valjanim, tj. da postoje fino usitnjene vrste prašina čije su minimalne energije paljenja istog reda veličine ili čak niže nego za plinske smjese. Slika 2.8 prikazuje zapaljenje smjese zraka i prašine u staklenoj cijevi.



Slika 2.7 Uređaj za ispitivanje minimalne energija paljenja oblaka prašine [12]

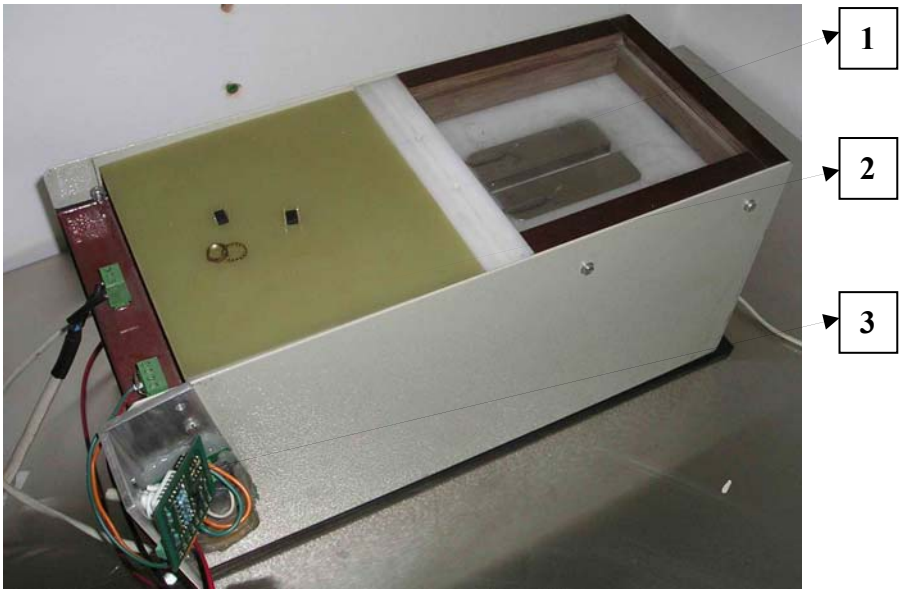


Slika 2.8 Zapaljeni uzorak prašine tijekom ispitivanja [12]

2.2.4 Specifični otpor prašine [11]

Za sigurnost postrojenja specifični otpor prašine ima dvojako značenje. Prvo, mogućnost akumuliranja elektrostatskog naboja u tehnološkim procesima, što je veći električni otpor same prašine. Drugo, mogućnost prodora prašine unutar električne i elektroničke opreme izaziva kratki spoj i oprema je podložnija kvarovima. Obje mogućnosti mogu dovesti do stvaranja učinkovitog izvora paljenja [13]. Prašina se smatra vodljivom ukoliko je specifični električni otpor manji od 10^3 Ωm.

Ispitivanje se provodi korištenjem izvora istosmjernog napona od 110 VDC do 2000 VDC (slika 2.9), ispitne ćelije u koju se stavlja uzorak prašine te sklopa za upravljanje i mjerenje. Pomoću određenih matematičkih formula u koju se unose vrijednosti ispitnog napona, pada napona na ćeliji i geometrijskih odnosa same ćelije izračunava se specifični otpor uzorka prašine.



Legenda:

1- Ispitna ćelija

2- Izvor istosmjernog napona

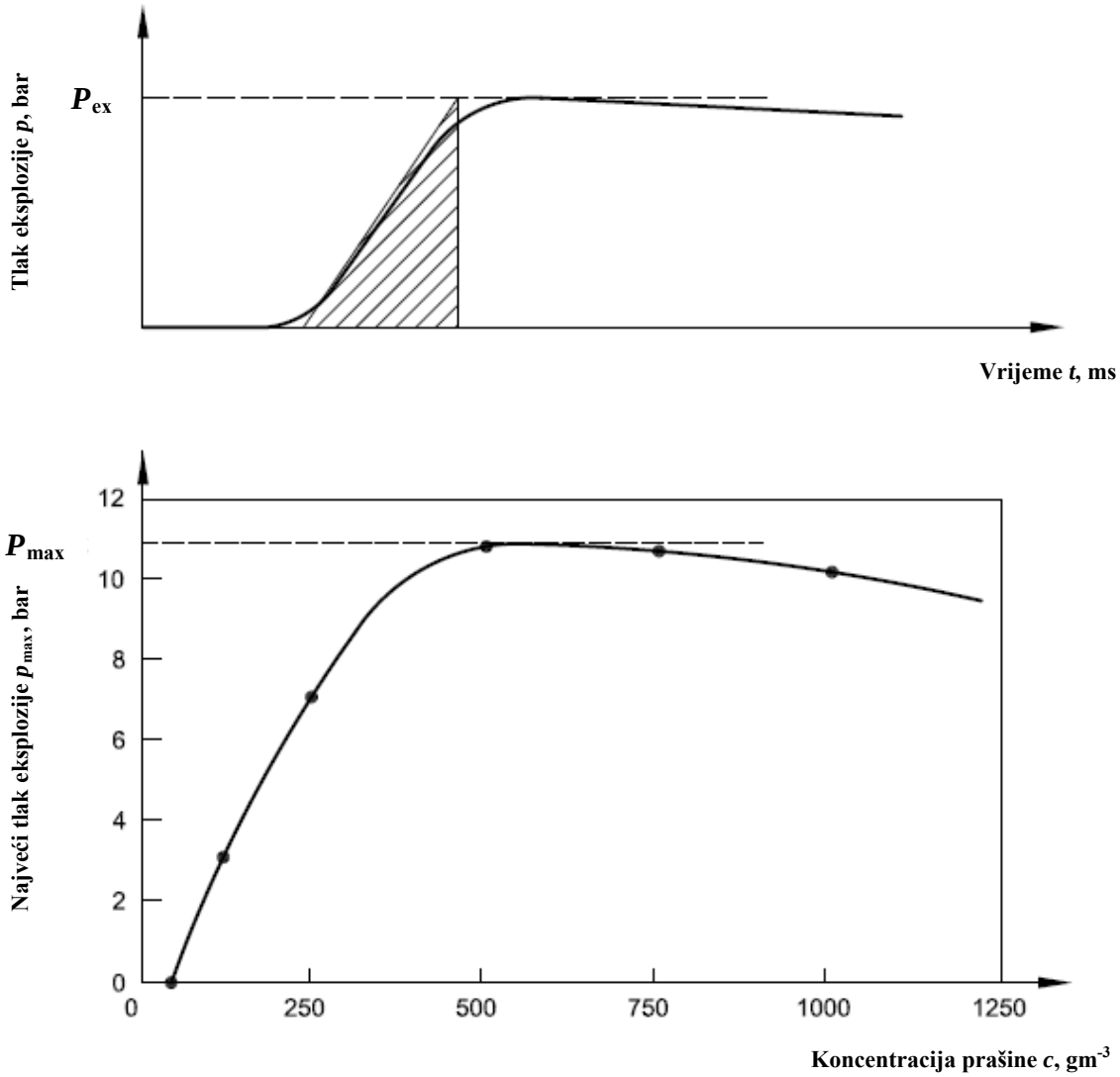
3- Sklop za upravljanje i mjerenje

Slika 2.9 Uređaj za ispitivanje specifičnog otpora prašine [12]

2.2.5 Eksplozivne karakteristike prašine

2.2.5.1 Najveći tlak eksplozije oblaka prašine, p_{max} [2]

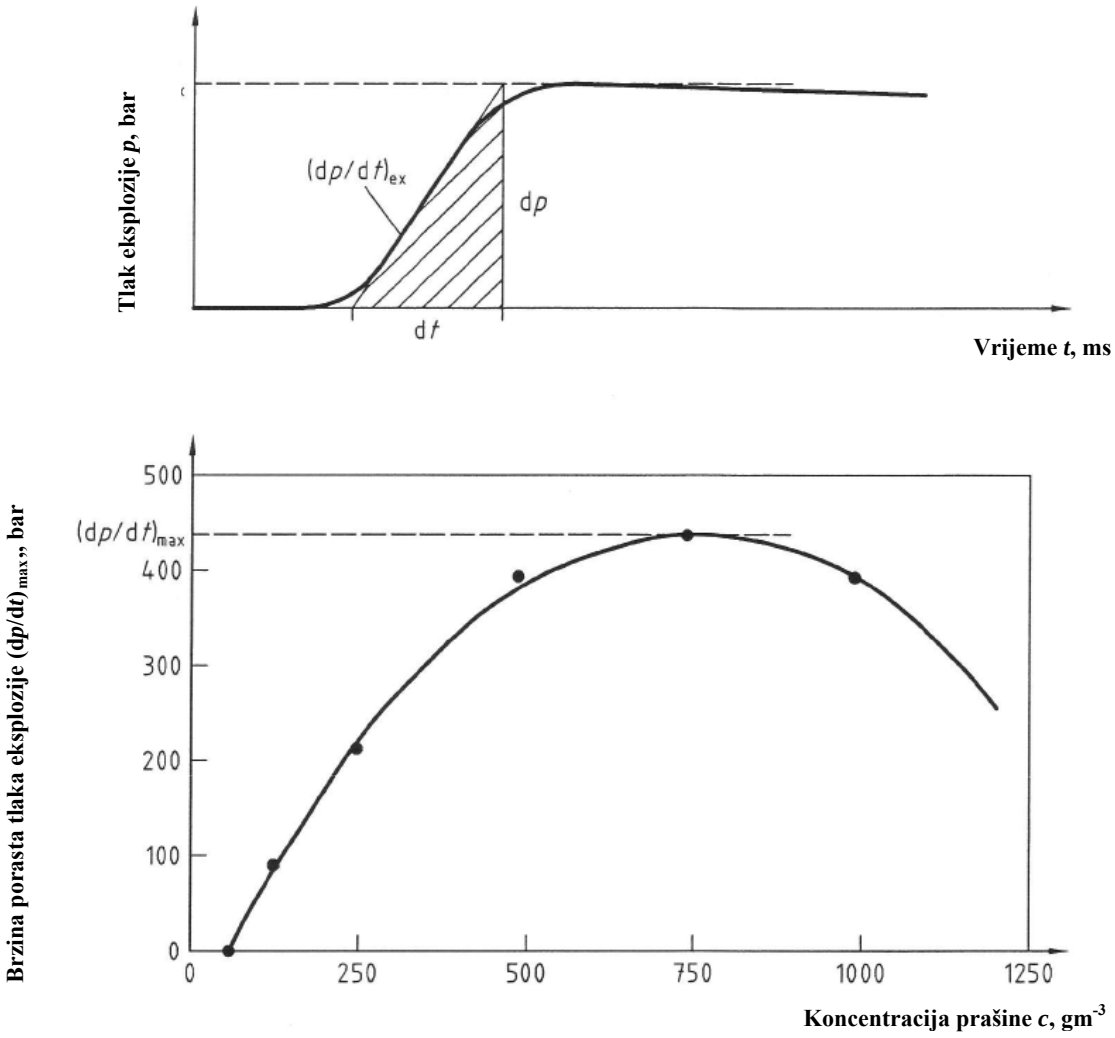
Najveći tlak eksplozije $\boldsymbol{p_{max}}$ je tlak koji se razvije tijekom eksplozije stehiometrijske smjese prašine i zraka u zatvorenom volumenu pri definiranim ispitnim i atmosferskim uvjetima. Na gornjem dijelu slike 2.10 prikazan je izgled krivulje tlaka eksplozije neke prašine dok je na donjem dijagramu prikazan je najveći tlak eksplozije (p_{max}) neke prašine u ovisnosti o raznim koncentracijama prašine.



Slika 2.10 Određivanje najvećeg tlaka eksplozije p_{max}

2.2.5.2 Najveća brzina porasta tlaka eksplozije $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$ oblaka prašine [3]

Najveća brzina porasta tlaka eksplozije $\boldsymbol{(dp/dt)_{max}}$ oblaka prašine je najveći nagib na krivulji tlak/vrijeme tijekom eksplozije, odnosno, to je prva derivacija krivulje vrijeme/tlak (slika 2.11), jednom riječi, ta fizikalna veličina naziva se brizanca [3]. A može se reći i da je to najveća vrijednost prirasta tlaka u jedinici vremena u zatvorenom volumenu tijekom eksplozije neke koncentracije prašine koja je raspršena u zraku [8]. Na slici 2.11 gornja krivulja prikazuje porast tlaka u jedinici vremena, dok doljnja krivulja prikazuje brzinu porasta tlaka eksplozije (brizancu) u ovisnosti o koncentraciji prašine, a time se ujedno i određuje $\boldsymbol{(dp/dt)_{max}}$ u ovisnosti o koncentraciji prašine.



Slika 2.11 Određivanje najveće brzine porasta tlaka eksplozije u jedinici vremena $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$ - brizanca

2.2.5.3 Donja granica eksplozivnosti *DGE* oblaka prašine [4]

Donja granica eksplozivnosti *DGE* oblaka prašine je najmanja koncentracija zapaljive prašine u smjesi s zrakom kod koje je moguća eksplozija.

2.2.5.4 Granična koncentracija kisika *GKK* u oblaku prašine [5]

Granična koncentracija kisika je najveća koncentracija kisika u smjesi zapaljive prašine, zraka i inertnog plina, kod koje više nije moguća pojava eksplozije pri unaprijed definiranim ispitnim uvjetima.

Dodatne definicije:

$\boldsymbol{K_{St}}$ – vrijednost koja je specifična za prašine, karakteristika prašine koja ovisi o volumenu i koja se računa koristeći jednadžbu kubičnog zakona (1). Ona je numerički jednaka vrijednosti najvećem porastu tlaka eksplozije $(dp/dt)_{max}$ koja je dobivena u ispitnom kotlu volumena 1 m^3 [2].

Kubični zakon:

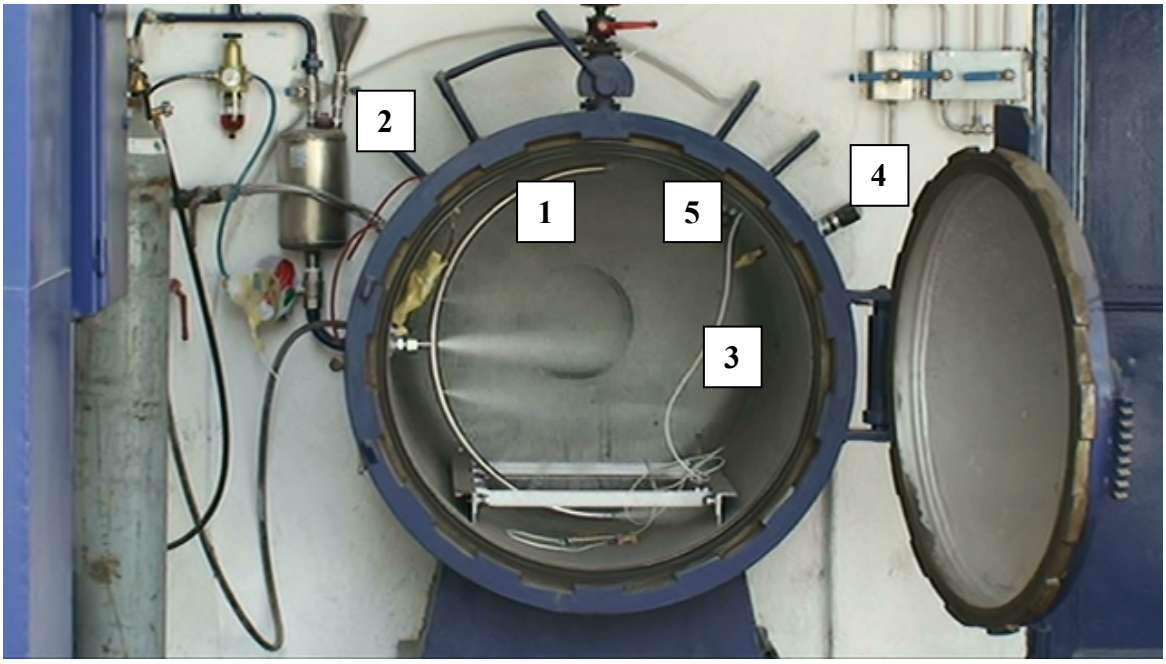
$$\left(dp/dt\right)_{\max} \cdot V^{1/3} = const. = K_{St} = K_{\max}\ bar\ m\ s^{-1} \quad (1)$$

GGE – Gornja granica eksplozivnosti. Snaga eksplozije se povećava što je veća koncentracija, ali samo dok ta koncentracije ne pređe u zasićenje. Stehiometrijska smjesa je teoretski iznos količine prašine pomiješane sa dostupnim kisikom iz zraka kod koje dođe do potpunog sagorijevanja uz pojavu najvećeg tlaka eksplozije. Povećanjem koncentracije prašine obično dolazi do smanjivanja snage eksplozije. Gornja granica eksplozivnosti (engl. *Upper Explosion Limit, UEL*) – koncentracije iznad ove granice ne mogu uzrokovati eksploziju. Gornja granica eksplozivnosti nije definirana tako čvrsto kao što je donja granica, te su potrebna dodatna ispitivanja.
Gore navedene eksplozivne karakteristike prašina određuju se prema normama [2], [3], [4], [5] te postoje dvije ispitne aparature:

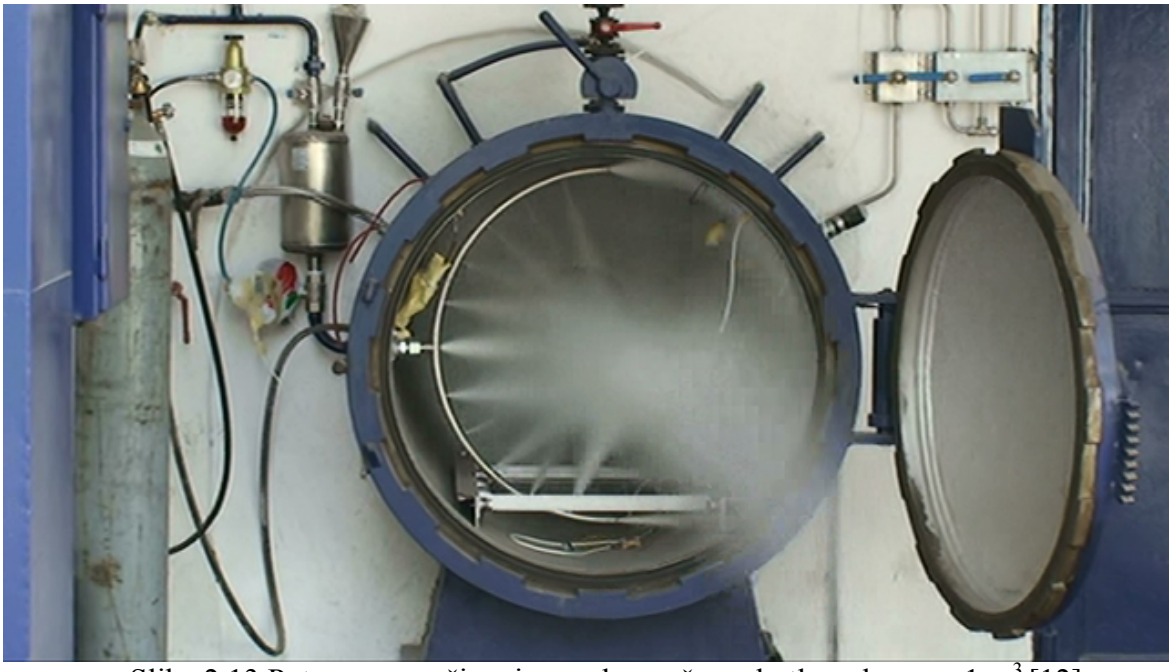
a) kotao volumena 1 m^3, omjer cilindričnog kotla mora biti 1:1 ±10% (slike 2.12 i 2.13)
b) kugla, volumena 0,02 m^3 (20 dm^3) (slika 2.14)

I jedan i drugi ispitni volumen (ispitna komora) se sastoje se od 5 glavnih dijelova (slike 2.12 i 2.14):

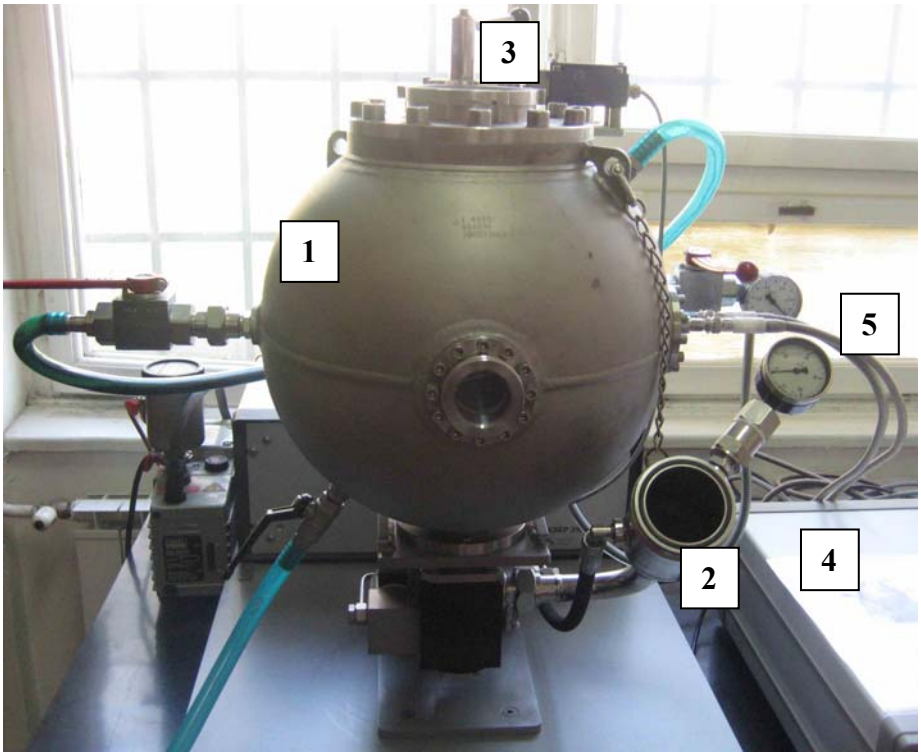
1. sustav za raspršivanje prašine (unutar ispitne komore)
2. spremnik uzorka prašine
3. izvor paljenja
4. kontrolna jedinica
5. sustav za mjerenje tlaka



Slika 2.12 Prikaz početka raspršivanja uzorka prašine u kotlu volumena 1 m^3 [12]



Slika 2.13 Potpuno raspršivanje uzorka prašne u kotlu volumena 1 m^3 [12]



Slika 2.14 Prikaz ispitne kugle volumena 20 litara [14]

U sljedećoj tablici navedeno je nekoliko primjera fizikalnih parametara nekih prašina [8], te se može zaključiti da je aluminijska prašina vrlo opasna u pogledu navedenih parametara u tablici 2.3.

Tablica 2.3 *Karakteristike nekih prašina*

Tip prašine	Min. energija mJ	Temp. paljenja oblaka °C	Temp. tinjanja °C	Najveći tlak eksplozije bar	K_{St} bar m /s	DGE g / m^3	GKK Vol. %
Lignit	**30**	**390**	**180**	**11,0**	**151**	**60**	**12**
Aluminij	**15**	**550**	**740**	**13,0**	**750**	**60**	**5**
Ugljen	**60**	**610**	**170**	**9,8**	**114**	**15**	**14**
Celuloza	**80**	**480**	**270**	**11,0**	**125**	**30**	**9**
Drvo	**40**	**470**	**260**	**10,2**	**142**	**60**	**10**
Pšenično brašno	**50**	**380**	**360**	**9,8**	**70**	**125**	**11**
Pamučna vlakna	**1920**	**560**	**350**	**8,2**	**24**	**100**	**-**
Obrano mlijeko	**50**	**490**	**200**	**9,8**	**125**	**60**	**-**
Šećer	**30**	**370**	**400**	**9,5**	**138**	**60**	**-**
Magnezij	**80**	**450**	**240**	**18,5**	**508**	**30**	**-**
Cink	**9600**	**690**	**540**	**7,8**	**93**	**250**	**-**

2.3 Eksplozija prašina

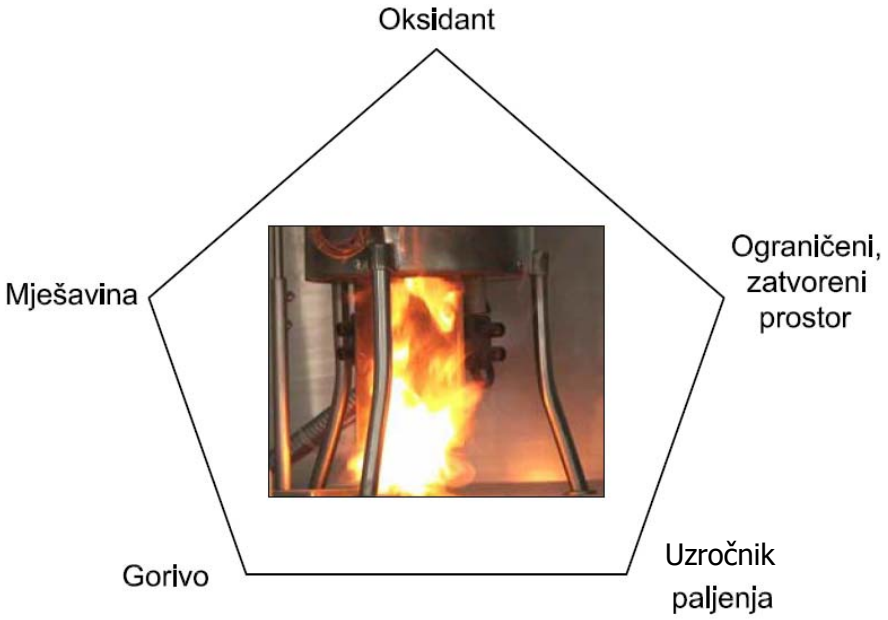
Dvije europske direktive "ATEX 95" (94/9/EC) koja je kod nas prihvaćena kao «*Pravilnik o opremi i zaštitnim sustavima namijenjenim za uporabu u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom»* "NN 34/2010" i "ATEX 137" (1999/92/EC) koja je kod nas prihvaćena kao «*Pravilnik o najmanjim zahtjevima sigurnosti i zaštite zdravlja radnika»* "NN 39/06" definiraju eksplozivne atmosfere kao: "Eksplozivne atmosfere su smjese zraka i zapaljivih medija u obliku plina, pare, maglice ili prašine pod atmosferskim uvjetima, u kojima nakon inicijalnog paljenja nastaje izgaranje do nezapaljivog ostatka".
Koncept same eksplozije nije jednoznačan. U različitim literaturnim podacima uglavnom se može naći podjela u dvije kategorije. Prva kategorija odnosi se na zvuk, odnosno buku koja se javlja prilikom naglog oslobađanja tlačnog vala ili tlaka zraka nastalog od eksplozije. Druga kategorija se odnosi na sam tlačni val bilo da je nastao zbog naglog oslobađanja kemijske ili mehaničke energije. Druga spomenuta definicija eksplozije je mjerodavna za eksplozije nastale zbog naglog oslobađanja kemijske energije što uključuje eksplozije plinova, para, maglica, prašina i eksploziva. Obično se daje veliki značaj upravo oslobađanju kemijske energije te se sama eksplozija prema tome i definira. Na osnovu toga definicija glasi: "Eksplozija je egzotermni kemijski proces koji, kad se pojavi kod konstantnog volumena, daje nagli i značajan porast tlaka" [13].



Slika 2.15 Posljedica eksplozije prašine polietilena u "West Pharmaceutical Services, Inc" Kinston, North Carolina [15]

Unatoč usmjerenom istraživanju uzroka i aktivnoj primjeni dobivenih spoznaja u mnogim industrijskim granama dolazi sve češće do eksplozija prašine (slika 2.15). Djelovanje tih eksplozija je razorno, a kreće se od materijalne štete izražene u milijunima eura do povreda osoba sa smrtnim ishodom. Stalno rastući broj eksplozija prašine je posljedica sve veće industrijalizacije. Dok se u proteklom stoljeću govorilo samo o malom broju takovih nezgoda, danas je već registrirano oko 300 eksplozija prašine godišnje [16]. Ovaj visoki broj tim je začuđujući kada se zna koje pretpostavke moraju biti ispunjene za nastanak eksplozije (slika 2.16) [8]:

1. zapaljiva prašina
2. pogodna granulacija koja dozvoljava širenje plamena
3. smjesa prašine i zraka mora biti unutar granica eksplozivnosti
4. prašina mora biti u kontaktu sa uzročnikom paljenja dovoljne energije da izazove paljenje
5. dovoljna količina kisika



Slika 2.16 Prikaz potrebnih uvjeta za eksploziju prašine

Sve ove okolnosti moraju se sastati istovremeno, dakle u isto vrijeme i na istom mjestu. Ova podudarnost se u normalnim pogonskim uvjetima u pravilu ne očekuje. Međutim, kod

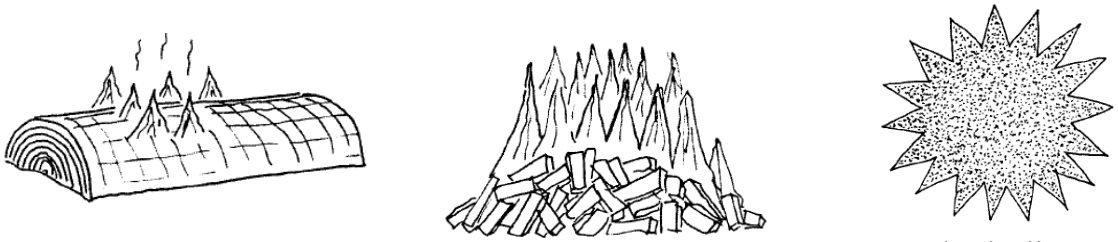
pojedinih pogonskih stanja, kao npr. kod pokretanja i zaustavljanja postrojenja (slika 2.17), kao i kod odstupanja od normalnog odvijanja pogona postoji mogućnost da se svi preduvjeti za nastanak eksplozije poklope.



Slika 2.17 Eksplozija prašine aluminija u Hayers Lemmerz International, Huntington, Indiana, October 29, 2003 [15]

Pojavu eksplozije prašina najjednostavnije je objasniti pojavama iz svakodnevnog života. Općenito, svi mediji mogu gorjeti u smjesi sa zrakom, a kojom će brzinom i snagom gorjeti ovisi o vrsti i veličini čestica samog medija. Slika 2.18 daje prikaz kako jedan veći komad drveta, kad se zapali, polako gori i oslobađa toplinu duži period. Kad je drvo usitnjeno na manje komade, odnosno s povećanjem ukupne površine koja je u dodiru sa zrakom brzina izgaranja se povećava, ujedno to znači da je lakše upaliti manje komade drveta. Ukoliko bismo nastavili smanjivati veličinu komada drveta, te ih pretvorili u prah, s promjerom čestice manjim od 0,1 mm, koje se zadržavaju u dovoljno velikom volumenu zraka dajući dovoljno mjesta pojedinoj čestici za neograničeno gorenje, brzina izgaranja biti će vrlo velika, a energija potrebna za paljenje takve smjese biti će vrlo mala. Takva oksidacija oblaka prašine naziva se eksplozijom prašine. Općenito se može reći, da će eksplozija biti to snažnija što su čestice prašine sitnije. U pravilu, vrijednost tlaka eksplozije to je veća što su čestice praha sitnije, te što je sadržaj vlage u prašini manji.

Ukoliko se takva eksplozija dogodi unutar procesne opreme ili u prostorijama, tlak u tako djelomičnom ili potpuno zatvorenom "eksplozivnom prostoru" može naglo narasti i uzrokovati velika razaranja samog postrojenja koja mogu biti opasna i po zdravlje i život ljudi.



Sporo gorenje
Trupac drveta

Brzo gorenje
Iscjepano drvo

Eksplozija
Drvena prašina

Slika 2.18 Gorenje ovisno o veličini čestica [7]

Opasnost i jačina eksplozije prašina ovisi od nekoliko parametara koji opisuju same prašine i okolinu u kojoj je prašina raspršena [8]:

- **Prašina** – Prašine variraju u svojoj eksplozivnosti i jačini koju može generirati takva eksplozija. Jačina eksplozije može biti izmjerena pomoću standardnih ispitnih metoda, pomoću dva parametra, a to su maksimalni tlak eksplozije koji može biti ostvaren, te najveća brzina porasta tlaka eksplozije. To je bitan podatak u smislu konstruiranja odnosno projektiranja zaštitnih mjera, međutim, potrebno je voditi računa i o slučajevima kada je brzina porasta tlaka tj. brizanca relativno spora ali se može razviti visoki tlak koji može uzrokovati velika razaranja i štetu. Takvu pojavu uzrokuje ugljen i metan. Usporedbe radi, ugljen je manje eksplozivan od aspirina i puno manje od prašine aluminija. Ugljen je organskog uglavnom biljnog, a u manjoj mjeri životinjskog porijekla. Ugljen nije jednostavna i homogena masa, nego složena i heterogena tvorevina te se sastoji od različitih ugljikovih i drugih spojeva. Organski spojevi su gorivi dio, a mineralne primjese i voda (vlaga) negorivi dio ugljena koji mu smanjuje toplinsku vrijednost. Ugljik je glavni sastavni element i nosilac toplinske vrijednosti ugljena. U ugljenu se također nalaze i hlapljive tvari koje se izdvajaju prilikom suhe destilacije. Prvo se pojavljuje vodena para, zatim izdvajanje molekule vode, ugljičnog monoksida, ugljičnog dioksida i metana.

- **Sastav prašine** - Neke prašine, ugljen je tipičan primjer za to, nisu homogene. Nehomogenosti ovise o mjestu iskopa i kao takve su izvor velike opasnosti. Nehomogenost može utjecati na razliku u temperaturi paljenja pojedinih ugljena i preko 100 ^{o}C, što je vrlo velika razlika. Ugljen je specifičan iz razloga što može sadržavati mnogo hlapljivih tvari što ga čini eksplozivnijim. Neki antraciti nisu eksplozivni jer sadrže vrlo malo hlapljivih tvari.

- **Veličina čestice i njihova raspodjela** (slika 2.18 i 2.19) - Veličina zrnaca prašine također ima veliki utjecaj na eksplozivnost. Što su čestice finije to je veća ukupna površina prašine te je zbog tog razloga i veća vjerojatnost da se takav oblak prašine zapali i eksplodira jer je potrebna manja inicijalna energija (npr. toplinska energija, energija iskre, ultrazvuk, elektromagnetska zračenja…).

- **Koncentracija prašine** (slika 2.19) - Koncentracija prašine unutar smjese također ima veliki utjecaj na jačinu eksplozije. Ako je koncentracija prašine ispod donje granice eksplozivnosti (engl. *Lower Explosion Limit, LEL*), obično je to 10-100 g/m^3, do eksplozije ne može doći. Snaga eksplozije se povećava što je veća koncentracija, ali samo dok ta koncentracije ne pređe u zasićenje kada se više ne može dogoditi eksplozija.

- **Sadržaj vlage** - Porastom sadržaja vlage unutar prašine smanjuje se eksplozivnost prašine zbog toga što vlaga "oduzima" veću količinu energije, zato, jer voda ima veći toplinski kapacitet, te je potrebno više energije da vlaga ispari.

- **Stanje okoline** (temperatura i tlak) - povišenje temperature okoline rezultira smanjivanjem tlaka eksplozije unutar kućišta, dok na brzinu širenja tlaka eksplozije ima mali utjecaj. Povećanje tlaka okoline ima za posljedicu povećanje maksimalnog tlaka i povećanje brzine širenja pojave.

- **Turbulencija oblaka prašine** - Da bi se prašina uopće uzvitlala potrebno je postojanje strujanja zraka ili nekog drugog medija koji uzrokuje vitlanje. Postojanje malih razina turbulencije nema nekih većih utjecaja na snagu eksplozije, dok kod većih turbulencija eksplozija će se puno brže širiti, a razorna snaga će također biti veća.

- **Prisutnost zapaljivih plinova** - Veliki problem je također i prisustvo zapaljivih plinova koji u smjesi sa prašinama tvore tzv. hibridne smjese koje su vrlo opasne te i iz razloga što njihovi fizikalni parametri nisu egzaktno određeni niti poznati.

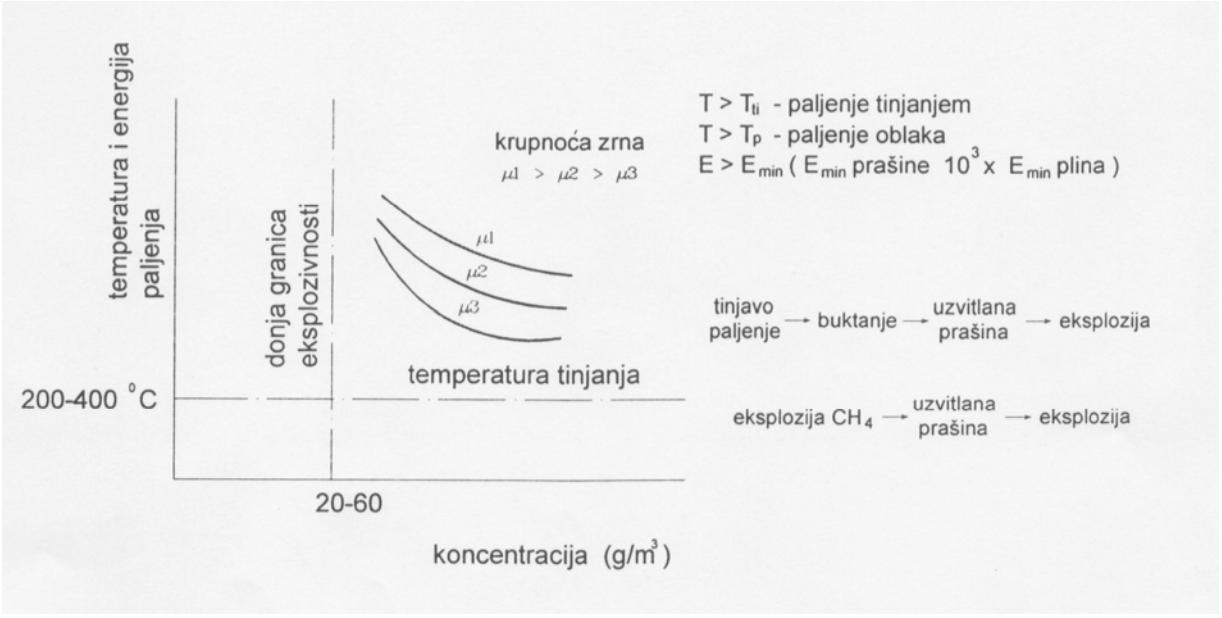
- **Omjer posude** - jačina eksplozije prašina – određuje brzina porasta tlaka – ovisi o veličini posude. Tlak raste sporije u većim posudama, međutim potencijalna moć razaranja biti će veća jer je povećan razmjer same eksplozije (kubični zakon).

  Za širenje plamena postoje dva srazmjerno jednostavna slučaja [17]:
  - Širenje plamena u kvadratičnim posudama
  - Širenje plamena u cijevima

Kod sfernog širenja plamena, koje je kod smjesa prašine i zraka u praksi uvijek turbulentno, brzina plamena ostaje mala u odnosu na brzinu zvuka, tako da u zatvorenoj posudi ne dolazi do lokalnih razlika tlakova. Konačni tlak može pritom dostići vrijednosti koje su 8 do 12 puta veće od početnog tlaka.
U cjevovodima se brzina širenja plamena ubrzava sa rastućom duljinom cijevi. Kod nekih prašina, prije svega kod onih sa srednjim i visokim K_{St} – vrijednostima, može nakon zaletne površine doći do detonacijskih pojava, kod kojih frontalni plamen napreduje nadzvučnom brzinom. Tlak na stijenku cijevi može pritom mjestimično i povremeno dostići oko 30-torostuku vrijednost od početnog tlaka. Na završnim prirubnicama i koljenima cjevovoda mogu nastati i veće vrijednosti, jer se na tim mjestima eksplozivna smjesa predkomprimira prije nailaska frontalnog plamena.
Procesna oprema i uređaji koje nalazimo u praksi predstavljaju raznolike kombinacije posuda i cijevi, npr.:

- Silosi, uređaji i postrojenja za mljevenje i sušenje s naknadno spojenim izdvajačima prašine
- Usisne naprave s priključenim uređajima za oporabu prašine
- Kombinacija posuda za skladištenje, miješanje i punjenje s cjevovodima.

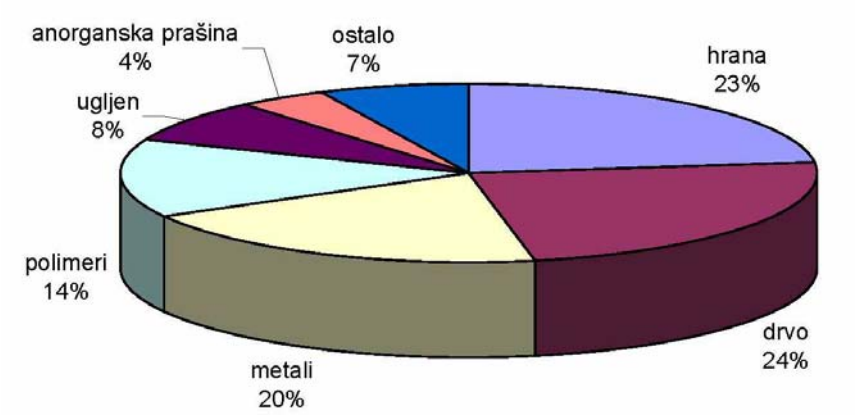
Eksplozija prašine, koja se u jednoj takovoj kombinaciji rasprostire od jedne posude do druge, može se u ovoj drugoj odvijati snažnije i s većim razvojem tlaka nego eksplozija prašine u samo jednoj posudi.



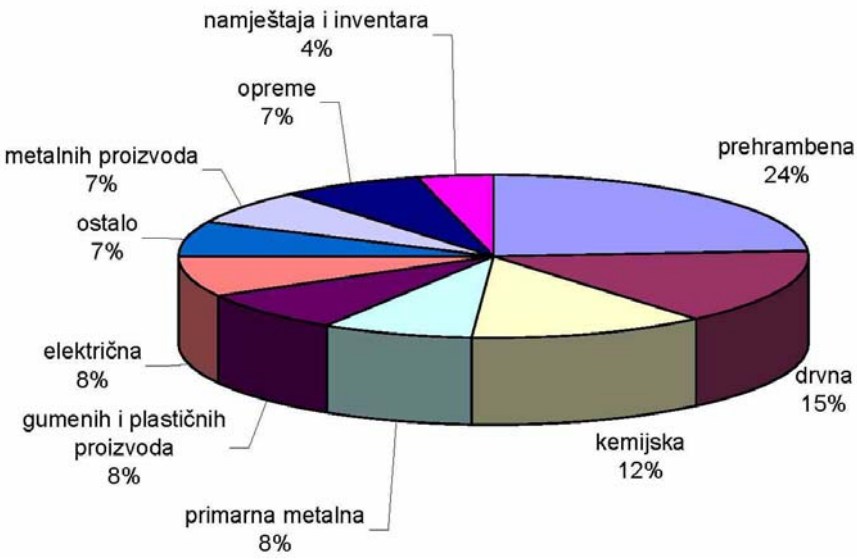
Slika 2.19. Kvalitativni prikaz odnosa koncentracije prašine, temperature i energije

Nažalost, iz dana u dan u svijetu se događaju razorne eksplozije uzrokovane eksplozijom zapaljivih prašina koje često zahvaćaju čitave objekte i dovode do njihova potpunog uništenja, nerijetko i uz ljudske žrtve.

Od velikog broja statističkih podataka vezanih uz požare i eksplozije zapaljivih prašina na sljedećim su slikama prikazane statističke vrijednosti za SAD u periodu od 1980. do 2005. godine prema vrsti zapaljive prašine (slika 2.20) i grani industrije (slika 2.21). Ovdje je potrebno reći da statistički podaci u pravilu objedinjuju nastanak požara i pojavu eksplozije te nema zasebnih statističkih podataka u smislu koliko je bilo eksplozija a koliko požara. Nadalje, u statističke podatke nije uključena, naročito opasna, manipulacija žitom i rudnici ugljena (za što se provode posebne statistike), kao i transport te druge neproizvodne grane (npr. zdravstvo, vojska, istraživački centri i sl.). Obuhvaćeno je sveukupno 281 požar i eksplozija sa 119 poginulih i 718 ozlijeđenih osoba. Zanimljivo je da je oprema za sakupljanje prašine uključena u preko 40 % incidenata, dok se također brojni požari i eksplozije javljaju kod opreme za brušenje, u silosima, miješalicama, filterima te ciklonima.



Slika 2.20. Raspodjela eksplozija i požara prema vrsti zapaljive prašine [23]



Slika 2.21 Raspodjela eksplozija i požara zapaljivih prašina prema grani industrije [23]

Svugdje gdje se u tehničkim postrojenjima nagomilava ili prerađuje zapaljiva prašina postoji opasnost od eksplozije prašine, ali zavisno od primijenjene procesne tehnike i uređaja vjerojatnost nastanka eksplozije često je vrlo različita. Zbog toga valja svaki puta rizik eksplozije procjenjivati zavisno od svakog pojedinog postrojenja, a kod poremećaja zavisno od odvijanja određenog procesa. Kod ovog je neophodno poznavati dvije stvari: kao prvo, to je podatak o strukturi/ustrojstvu i načinu djelovanja postrojenja, a kao drugo to je bogato poznavanje eksplozijskih karakteristika medija u procesu o čemu je bilo govora prije. Na karakteristične veličine između ostalog utječe i sastav veličina zrna, stupanj turbulencije, izlazni tlak, temperatura, udjeli gorivih plinova ili para u prašini, sadržaj

vlage u prašini. Uz pomoć gore navedenih karakterističnih veličina za požar i eksploziju i uz uvažavanje okolnosti koji su drugačiji za svako pojedino postrojenje, moguće je tada diskutirati o načinu odnosno vrsti i obimu mjera za zaštitu od eksplozije koje je potrebno provesti.

Zaštita od eksplozije može se provoditi pomoću dviju mjera, koje se obično provode alternativno. Razlikujemo preventivne mjere za zaštitu koje sprečavaju nastanak eksplozije, te konstrukcijske mjere koje djeluju protiv razarajućeg djelovanja eksplozije.

Prema smjernicama za zaštitu od eksplozije, mjere se mogu podijeliti u dvije kategorije [1][8]:

1. Preventivne mjere za sprječavanje eksplozija

Do eksplozije prašine dolazi samo u slučaju kada je riječ o gorivoj prašini, ako ta prašina lebdi, ako je njezina koncentracija u oblaku prašine unutar eksplozivnog područja, ako ima dovoljno sredstva za oksidaciju (kisik iz zraka), te ako djeluje određeni uzročnik paljenja. Mjere za preventivnu zaštitu od eksplozije provode se tako da se dosljedno isključi barem jedan od navedenih preduvjeta, kako ne bi moglo doći do eksplozije prašine.

Izbjegavanje zapaljivih materijala

Najjednostavniji način sprječavanja eksplozija prašina sastoji se u tome, da se goriva prašina jednostavno zamjeni negorivom, što u pravilu nije moguće sprovesti. Rijetko postoji mogućnost, da se goriva prašina tako pomiješa sa negorivim materijama (inertnim), kako nastala smjesa ne bi više bila eksplozivna.

Ograničenje koncentracije

Svaka smjesa prašine i zraka je eksplozivna samo unutar određenog područja koncentracije. Granične vrijednosti ovog područja označavamo kao donju i gornju granicu eksplozivnosti. Koncentracije lebdeće prašine u pravilu se ne mogu ograničiti tako da uvijek budu izvan eksplozivnog područja. Također treba uzeti u obzir uzajamno djelovanje između nataložene i uskovitlane prašine. Zbog nehomogenosti raspodjele prašine mjestimice mogu nastajati eksplozivne koncentracije prašine. Iz tog razloga, granice eksplozivnosti prašine nemaju isto sigurnosno-tehničko značenje kao kod smjese plina i zraka. Posebno se veliko značenje pridaje sprječavanju taloženja prašine unutar i izvan postrojenja jer bi inače koncentracija npr. uslijed uskovitlavanja već

nataložene prašine bila podvrgnuta stalnim promjenama, čime bi bilo onemogućeno egzaktno ograničenje koncentracije.

Inertizacija

Inertizacija spada u preventivne mjere za sprječavanje eksplozije. Ta preventivna mjera sastoji se od inertizacije procesnog područja ugroženog eksplozijom. Dodavanjem inertnih plinova, npr ugljičnog dioksida ili dušika, udio kisika u smjesi prašine i zraka toliko se reducira da više ne postoji mogućnost eksplozije. Karakteristična veličina o kojoj treba voditi računa kod ove mjere zaštite je granična koncentracija kisika koja zavisi od smjese prašine i zraka te od inertnog plina. Granična koncentracija kisika, što predstavlja veličinu specifičnu za svaki materijal i svaki inertni plin, mora biti poznata za predmetnu prašinu, ili se mora odrediti eksperimentalno. Iz granične koncentracije kisika, oduzimanjem obično 2 vol.% dobije se maksimalna dozvoljena koncentracija kisika. Za veliki broj organskih prašina, ako se ne postigne maksimalna dozvoljena koncentracija kisika od 8 vol.%, ne postoji više ni opasnost od eksplozije. Iznimka su metalne prašine, kod kojih se treba pridržavati još nižih vrijednosti za kisik. Maksimalna dozvoljena vrijednost koncentracija kisika ne smije se prekoračiti u tako zaštićenom postrojenju ne samo za normalno odvijanje pogona, već i za startanje i zaustavljanje, te u slučajevima poremećaja.

Izbjegavanje uzročnika paljenja

Pored primjene drugih sigurnosnih tehnika općenito valja težiti za izbjegavanjem uzročnika paljenja. Pritom je posebno kod kompleksno izgrađenih postrojenja teško ustanoviti sve moguće uzročnike paljenja, kako bi se oni mogli isključiti. Putem odgovarajućih pogonskih uputstava i u suradnji sa zaštitom na radu sa sigurnošću se mogu spriječiti mogućnosti paljenja uslijed pušenja, zavarivanja, brušenja, otvorenom vatrom. Procjena uzročnika paljenja koja nastaju zbog procesne tehnike i u pogonu nije tako jednostavna, npr. opasnosti uslijed taloženja prašine, električne iskre, rotacijskih strojeva, mehaničke iskre, zagrijavanje uslijed trenja, vruće površine, a isto tako vrlo je teško procijeniti i kritična temperaturna stanja.

2. Konstrukcijske mjere zaštite za sprječavanje opasnih djelovanja eksplozija

Konstrukcijske mjere zaštite potrebne su uvijek kada se u nekom postrojenju ne može spriječiti nastanak smjese prašine i zraka i/ili se zbog prirode postupka ne mogu ili se nedovoljno sigurno mogu spriječiti ove smjese, pa se zbog toga ne mogu realizirati preventivne mjere zaštite. Zbog toga, kod primjene konstrukcijskih mjera zaštite, svi ugroženi dijelovi postrojenja moraju biti izrađeni tako da budu otporni na eksploziju, kako bi se oduprli eksplozivnom tlaku u slučaju eksplozije.

Kod konstrukcijskih mjera zaštite razlikujemo aktivne i pasivne sustave.

Aktivni sustavi su sustavi koji se sastoje od jednog ili više nadzornih dijelova (razni osjetnici) i od samog zaštitnog dijela. Takvi sustavi su:

- potiskivanje eksplozije (postrojenje je projektirano za reducirani tlak eksplozije)
- odvajanje eksplozije (norma HRN EN 15089)
- suzbijanje eksplozije (norma HRN EN 14373)

Pasivni sustavi su sustavi kod kojih eksplozija djeluje neposredno, odnosno bez prijenosnog dijela.

Takvi sustavi su:

- konstrukcija koja je otporna na eksploziju (norma HRN EN 14460)
- rasterećenje eksplozivnog tlaka (norma HRN EN 14491, norma HRN EN 14797)

U tablici 2.4 dan je prikaz sigurnosnih mjera i bitnih karakteristika prašina koje je nužno poznavati kako bi se mogle projektirati adekvatne sigurnosne mjere, odnosno zaštitni sustavi koji će biti djelotvorni.

Tablica 2.4 *Prikaz sigurnosnih mjera i bitnih karakteristika prašina*

Sigurnosna mjera	Karakteristika prašine koja se mora uzeti u obzir
PREVENTIVNE MJERE (Primarna zaštita)	
Izbjegavanje zapaljivih materijala	Najveći tlak eksplozije, donja granična koncentracija kisika, donja i gornja granica eksplozivnosti, granična koncentracija kisika, temperatura tinjanja, temperatura paljenja oblaka prašine, min. energija paljenja, specifični otpor
Ograničenje koncentracije	
Inertizacija	
KONSTRUKCIJSKE MJERE	
Konstrukcija otporna na eksplozijski i tlačni udar	Najveći tlak eksplozije
Odvajanje eksplozije	Najveći tlak eksplozije, najveća brizanca
Rasterećenje eksplozivnog tlaka	
Suzbijanje eksplozije	Najveći tlak eksplozije, najveća brizanca, temperatura paljenja oblaka prašine

Primjeri potencijalnih mjesta eksplozije prašina u industriji [8]:

- mlinovi
- pneumatski transport
- vijčani transport (transportni vijci)
- remenski transport (transportne trake)
- dizala
- sušači
- skladištenje sirovina
- filteri
- cikloni
- ....

2.4 Klasifikacija prostora i zone opasnosti

Kod provedbe postupka klasifikacije prostora neophodno je poznavanje svojstva svih praškastih tvari koje se koriste u tehnološkom procesu postrojenja. Upravo prije navedena svojstva prašine (zapaljivost, električna vodljivost, p_{max}, $(dp/dt)_{max}$, K_{St}...) daju odgovor da li je potrebno ili nije provođenje klasifikacije prostora .
Smjernice za klasifikaciju prostora u kojima se pojavljuju zapaljive prašine dane su u normi HRN EN 60079-10-2 [18]. Temeljni parametri klasifikacije prema normi su:

- učestalost i trajanje oblaka prašine,
- mogućnost taloženja prašine,
- istovremenost jedne i druge pojave

Isto tako klasifikacija prostora temelji se na informacijama o izvorima ispuštanja zapaljivih prašina. Izvori zapaljivih prašina su mjesta njihovog nastajanja, a u određenim slučajevima, i mjesta ispuštanja u prostor. Sukladno učestalosti nastajanja i trajanju oblaka uzvitlane prašine razlikujemo tri izvora zaprašivanja i to:

- trajni izvor zaprašivanja (TIZ)
- primarni izvor zaprašivanja (PIZ)
- sekundarni izvor zaprašivanja (SIZ)

Slijedom toga, industrijska postrojenja u kojima se pojavljuju zapaljive prašine klasificiraju se u tri zone opasnosti:

Zona 20 - Prostor u kojem je eksplozivna atmosfera u obliku oblaka gorive prašine u zraku, nazočna trajno ili u dugim periodima ili učestalo.

Zona 21 - Prostor u kojem je povremeno pojavljivanje eksplozivne atmosfere u obliku oblaka gorive prašine u zraku, vjerojatno u normalnom radu.

Zona 22 - Prostor u kojem pojavljivanje eksplozivne atmosfere u obliku oblaka gorive prašine u zraku nije vjerojatno u normalnom radu, no ukoliko se dogodi, trajat će samo kratko.

Zone opasnosti određuju se u ovisnosti o izvorima zaprašivanja i taloženju opasnih slojeva prašine [19]. U tablici 2.5 prikazano je određivanje zona opasnosti ovisno o izvorima ispuštanja.

Tablica 2.5 *Određivanje zona opasnosti ovisno o izvorima ispuštanja* [19].

Izvori ispuštanja	**Oblaci uzvitlane prašine**	**Slojevi prašine kontrolirane debljine, uzvitlani**	
		često	**rijetko**
TIZ	20	21	22
PIZ	21	21	22
SIZ	22	21	22

Sukladno debljini sloja, prašine razlikujemo kao izvore zaprašivanja i to [19]:

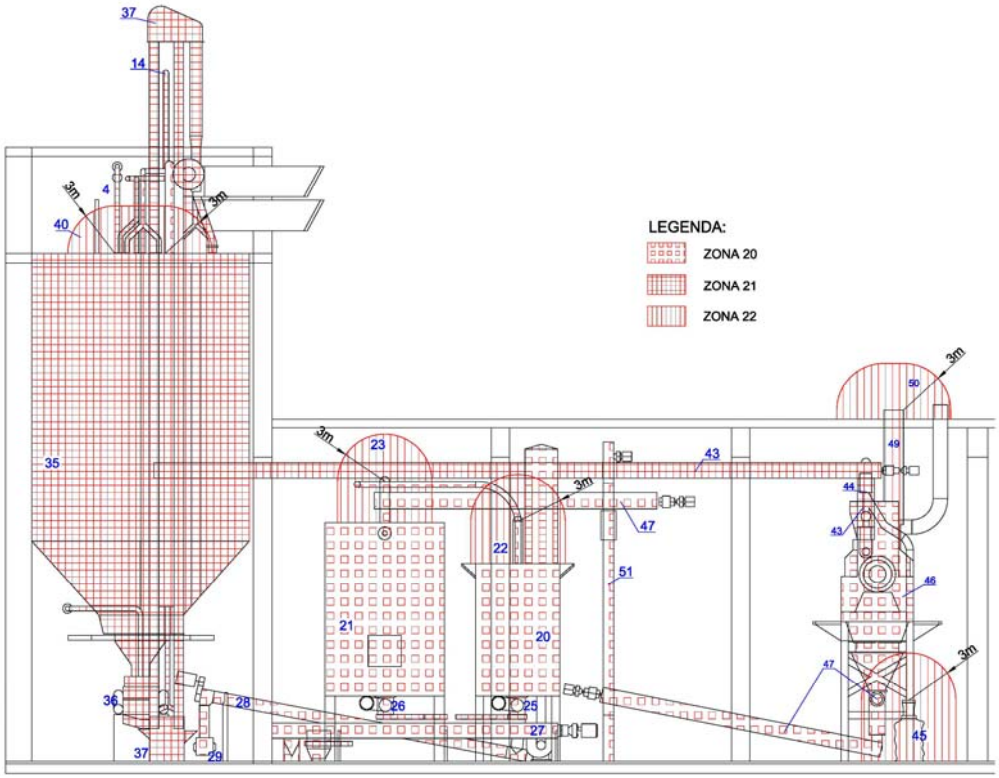
- nekontrolirane debljine slojeva TIZ,
- kontrolirane debljine slojeva veće od 1 mm ali ne preko dopuštene TIZ/PIZ
- prema označenoj temperaturi na opremi, uz mogućnost uzvitlavanja PIZ,
- nataložene slojeve debljine do 1 mm uz mogućnost uzvitlavanja, i veće od 1 mm, ali kontrolirane, ako uzvitlavanje nije za očekivati u normalnom radu SIZ.

Na temelju prije navedenih kriterija parametara klasifikacije prostora u tablici 2.6 dani su primjeri određivanja zona opasnosti.

Tablica 2.6 *Primjeri određivanja zona opasnosti u prostorima uz prisustvo zapaljivih prašina* [19].

Zona	**Prostori tehnologije sa zapaljivom prašinom**
20	Zatvoreni sustavi transporta, silosi, lijevci, cikloni, filteri, miješalice, mlinovi, sušare, oprema za punjenje vreća, zatvoreni prostori s nekontroliranom debljinom sloja, i sl.
21	Prostori oko otvora zatvorenih prostora zone 20 koji se otvaraju za vrijeme rada, prostori punjenja i pražnjenja vreća, transportnih traka (nezatvorenih), uzimanje uzoraka, istovar i utovar kamiona, utovar i istovar transportnih traka, silosi za privremenu uporabu, prostori s nataloženom prašinom koja se tehnološkim postupkom može uzvitlati, prostori oko zone 20 s vrlo sitnom strukturom, i sl. ako nisu poduzete mjere protiv stvaranja oblaka.
22	Okolina oduška filtera, otvora prostora zona koji se rijetko otvaraju, pneumatskog transporta s pretlakom, sigurnosnih vrata i poklopaca (oduška eksplozije); skladištenje vreća ili posuda; prostori zona 21 s odsisnom ventilacijom koja otežava pojavu opasnog oblaka, prostori s kontroliranim taloženjem prašine.

Na slici 2.22 prikazan je primjer klasifikacije nekog postrojenja te način grafičkog prikaza zona opasnosti koje se nalaze na postrojenju.



Slika 2.22 Primjer klasifikacije prostora nekog postrojenja – zapaljive prašine [20]

2.5 Uzročnici paljenja

Eksplozija prašina ne može se očekivati ukoliko nema efektivnog uzročnika paljenja. Izbjegavanje ili eliminacija potencijalnog uzročnika paljenja je važan korak u prevenciji eksplozija prašina. Važan korak u projektiranju postrojenja ima upravo identifikacija svih mogućih potencijalnih uzročnika paljenja.

Zrak kao medij neophodan za gorenje uvijek je prisutan te na taj čimbenik možemo utjecati samo tako da smanjimo koncentraciju kisika u zraku na sigurnu razinu. Na zapaljiv medij, u ovom slučaju prašina, možemo utjecati samo tako da upoznamo njegova fizikalna svojstva. U današnjim tehnološkim operacijama ne možemo u potpunosti ukloniti sva tri čimbenika pa pomoću ispitivanja uzročno posljedičnih veza između ta tri uvjeta za paljenje eksplozivne atmosfere možemo odrediti fizikalna svojstva, a samim time i mjere sigurnosti.

Prema HRN EN 1127-1 [1] i [8] uzročnici paljenja koji mogu zapaliti eksplozivnu smjesu prašina i zraka su:

1. **Vruće površine** - Sposobnost vruće površine da izazove paljenje, ovisi o tipu i koncentraciji određene tvari u smjesi sa zrakom. Ova sposobnost postaje veća s povišenjem temperature i povećanjem površine. Vruće površine su izrazito opasne kod pojava taloženja zapaljive prašine.

2. **Plamen i vrući plinovi** (uključujući vruće čestice) – Plamen nastaje kao produkt kemijske reakcije odnosno oksidacije i pritom dolazi do oslobađanja energije. Temperatura plamena može doseći i do nekoliko tisuća stupnjeva Celzijusa. Vrući plinovi nastaju kao produkt gorenja ili su produkt zagrijavanja za potrebe nekog procesa. Ako je eksplozivna atmosfera nazočna unutar, kao i izvan opreme, zaštitnih sustava i komponenti ili u obližnjim dijelovima instalacija, te ako se paljenje dogodi na jednom od ovih mjesta, plamen se može proširiti do ostalih mjesta kroz otvore kao što su ventilacijske cijevi.

3. **Mehanički generirane iskre** - Kao rezultat procesa trenja, udara ili abrazije kao što je brušenje, čestice se mogu odvojiti od krutih gradiva i postati vruće zahvaljujući energiji koja je korištena u procesu odvajanja. Ukoliko se te čestice sastoje od oksidirajućih tvari, npr. željeza ili čelika, one mogu proći oksidacijski proces, postižući tako još više temperature. Ove čestice (iskre) mogu zapaliti gorive plinove i pare i neke smjese prašine i zraka (posebno smjese metalne prašine i zraka). U nataloženim prašinama, iskre mogu uzrokovati tinjanje koje može biti uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere.

4. **Statički elektricitet** - Pražnjenje nabijenih, izoliranih dijelova može lako dovesti do zapaljivih iskri. Dodiri pražnjenja mogu zapaliti gotovo sve eksplozivne plinske i parne atmosfere te paljenje eksplozivne atmosfere prašine i zraka s ekstremno niskom najmanjom energijom paljenja, dodirnim pražnjenjima.

5. **Adijabatska kompresija i udarni valovi** - U slučaju adijabatske ili blizu adijabatske kompresije i udarnih valova, može doći do tako visokih temperatura da se mogu zapaliti eksplozivne atmosfere (i nataložena prašina). Povišenje temperature ovisi uglavnom o kompresijskom omjeru.

6. **Egzotermne reakcije uključujući samozapaljenje prašina** - Egzotermne reakcije mogu djelovati kao uzročnik paljenja kada brzina stvaranja topline prelazi brzinu odvođenja topline prema okolini. Mnoge kemijske reakcije su egzotermne. Da li će reakcija dostići visoku temperaturu, ovisi, među ostalim parametrima, o omjeru volumena i površine reaktivnog sustava, temperaturi okoline i vremenu trajanja. Ove visoke temperature mogu dovesti do paljenja eksplozivnih atmosfera a također do iniciranja tinjanja i/ili gorenja. Ovakve reakcije uključuju piroforne tvari sa zrakom, alkane metale s vodom, samozapaljenje gorivih prašina, samozagrijavanje prehrambenih tvari inicirane biološkim procesima, razgradnju organskih peroksida ili reakcije polimerizacije.

7. **Električne iskre –** Električna energija iz mreže ili baterije mogu izazvati iskrenje s dovoljnom energijom da zapali prašinu. Sva oprema koja se nalazi u potencijalno opasnim praškastim atmosferama mora biti u prahotijesnoj izvedi (adekvatna IP zaštita). Sve električne instalacije moraju biti tako izvedene da ne mogu prouzročiti iskrenje.

3. INERTIZACIJA

Inertizacija je jedna od mjera koje se poduzimaju kako bi se izbjegla pojava eksplozivne atmosfere ili kako bi se vjerojatnost njene pojave svela na što je moguće nižu razinu i stoga se ubraja u mjere sprečavanja eksplozije ili primarnu protueksplozijsku zaštitu.
Pojam inertizacije podrazumijeva mjere koje se poduzimaju za izbjegavanje eksplozivne atmosfere razrjeđivanjem zapaljive tvari i kisika u atmosferi kemijski inertnim tvarima.

Inertizacija se ostvaruje dodavanjem inertne tvari u smjesu zapaljive tvari i zraka, kako bi se spriječila pojava eksplozivne atmosfere. Za njezino ostvarenje mogu se rabiti plinovi (npr. dušik, ugljični dioksid, plemeniti plinovi, dimni plinovi), vodena para ili inertne praškaste tvari.

Inertizacija može biti:

1) **djelomična** i
2) **potpuna.**

Ad 1) Djelomična se inertizacija temelji na smanjenju koncentracije kisika u eksplozivnoj atmosferi, tako da ista više nije eksplozivna (npr. <15 % O_2). Nakon povećanja količine kisika ili zraka (npr. pri izlasku na otvoren prostor) smjesa može opet postati eksplozivna.

Ključnu vrijednost za djelomičnu inertizaciju predstavlja *granična koncentracija kisika (GKK) (*engl. *Limiting Oxygen concentration, LOC)*. Pod tim se pojmom podrazumijeva najviša koncentracija kisika kod koje samostalno širenje plamena, odnosno eksplozije, više nije moguće. Ta vrijednost ovisi prvenstveno o zapaljivoj i inertnoj tvari, ali i o temperaturi i tlaku.

Granična koncentracija kisika predstavlja karakteristiku isključivo dane kombinacije zapaljive tvari i inertnog plina. Za njeno određivanje mogu poslužiti eksperimentalni podaci dobiveni ispitivanjem u mjerodavnim laboratorijima prema HRN EN 14756 za plinove i pare, odnosno HRN EN 14034-4 [5] za prašine.

Od tog pojma valja razlikovati *najvišu dopuštenu koncentraciju kisika (*engl. *Maximum Allowable Oxygen Concentration, MAOC)* koja proizlazi iz granične koncentracije kisika. Sigurnosni odmak između granične koncentracije kisika i najviše dopuštene koncentracije

kisika treba utvrditi uzimajući u obzir lokalna i vremenska odstupanja koncentracije kisika uvjetovana procesom i mogućim smetnjama te vremenskim rasponom za učinkovitost aktivnih mjera zaštite, odnosno funkcija u nuždi.
Dakle, djelomična inertizacija znači dodavanje inertne tvari kako bi se snizila koncentracija kisika ispod granične koncentracije.

Ad 2) Kod potpune inertizacije odnos udjela inertnog plina prema udjelu zapaljive tvari toliko je velik da ni nakon dodatka količine zraka po želji smjesa nije eksplozivna. Zapaljiva tvar ne može tvoriti eksplozivnu atmosferu u bilo kojem omjeru miješanja sa zrakom.

Potpuna će se inertizacija koristiti u praksi samo kod eksplozivne atmosfere sa zapaljivim plinovima i parama, dok ista nije prikladna za primjenu kod zapaljivih prašina, budući da je koncentracija oblaka zapaljivih praškastih tvari najčešće vrlo promjenjiva.

Inertizacija plinovima može se primijeniti isključivo u unutrašnjosti opreme i instalacija, gdje je moguće osigurati prilično malu količinu miješanja s okolnom atmosferom. Od posebne je važnosti voditi računa o hermetičkom zatvaranju prema okolnoj atmosferi. Oprema u kojoj se koristi takva primarna mjera sprečavanja eksplozije je:

- Procesna oprema: zatvoreni reaktori, mikseri, mlinovi, sušači, peći, filteri, sita, cikloni, kolektori prašina;
- Oprema za skladištenje (pohranjivanje): lijevci i silosi
- Konvejeri i dizala: pneumatski konvejeri, pužni konvejeri, dizala sa posudama

Inertizacija se obično koristi za prašine koje mogu stvoriti visoke tlakove eksplozije te veće brizance (K_{St}> 400 bar m s^{-1}), isto tako se koristi i na mjestima gdje se pojavljuju pare otapala. Najčešće se koristi u procesima mljevenja i sušenja. Sustavi inertizacije moraju biti opremljeni opremom koja mjeri parametre procesa inertizacije, razinu kisika, protok inertne tvari, tlak, temperaturu.

3.1 Načini ostvarivanja inertizacije

Načini ostvarenja inertizacije uvelike se razlikuju. Postoje brojna ograničenja u pristupu, ovisno o vrsti zapaljivih tvari na koje se ista primjenjuje (zapaljivi plinovi i pare, zapaljive prašine, smjese različitih zapaljivih tvari i hibridnih smjesa te maglice zapaljivih tekućina).

Primjerice, pri inertizaciji vodenom parom valja voditi računa o utjecaju kondenzacije, ne samo zato što može izostati vodena para kao inertna tvar, već i stoga što spomenuto može dovesti i do pojave neželjenog podtlaka (vakuuma). Radi toga jedino se vodena para tlaka većeg od 3 bara može koristiti kao inertna tvar. Također, valja voditi računa i o kemijskim reakcijama s vodenom parom, kao i mikrobiološkim utjecajima.

Osim toga, pri određenim uvjetima mogu se generirati piroforne tvari, npr. kod skladištenja naftnih proizvoda koji sadrže sumpor i sl.

Načela inertizacije eksplozivne atmosfere prvenstveno se odnose na zapaljive plinove i pare, dok kod ostalih zapaljivih tvari postoje još brojnija specifična ograničenja.

Eksplozivne atmosfere prašine i zraka mogu se inertizirati i dodavanjem prikladne inertne prašine. Za postizanje inertnih uvjeta obično je potrebno više od 50 % masenog udjela inertne prašine.

Pri odabiru inertnih tvari kod zapaljivih prašina također valja voditi računa da iste ne reagiraju sa zapaljivim tvarima. Primjerice, prilikom drobljenja lakih metala u inertnoj atmosferi, npr. prašine aluminija reagiraju s ugljičnim dioksidom. Također, smjesa od 95% vapnenca i 5 % kamenog ugljena može stvoriti jake egzotermne reakcije i sl.

Kod smjesa različitih zapaljivih tvari, uključujući i hibridne smjese, komponenta s najnižom graničnom koncentracijom kisika bit će mjerodavna, pa će se njena vrijednost granične koncentracije kisika uzeti u obzir pri određivanju najveće dopuštene koncentracije kisika, ukoliko mjerenja nisu pokazala drugačije.

Budući da maglice kapljevina mogu biti zapaljive znatno ispod točke plamišta pripadajućih kapljevina, iste bi se trebale smatrati zapaljivima na svim temperaturama, a granične koncentracije kisika za maglice trebale bi se smatrati nalik onima za pare pripadajućih kapljevina.
Prema načinu ostvarenja pojava eksplozivnih atmosfera može se izbjeći inertizacijom primjenom sljedećih metoda:

• ***Inertizacija oscilacijom pretlaka*** – smanjenje koncentracije kisika u zatvorenom sustavu tlačenjem inertnog plina i ponovnim rasterećenjem na atmosferski tlak. Postupak se ponavlja dok se ne ostvari željena koncentracija kisika. Ova je metoda prikladna za sustave koji se smiju tlačiti.

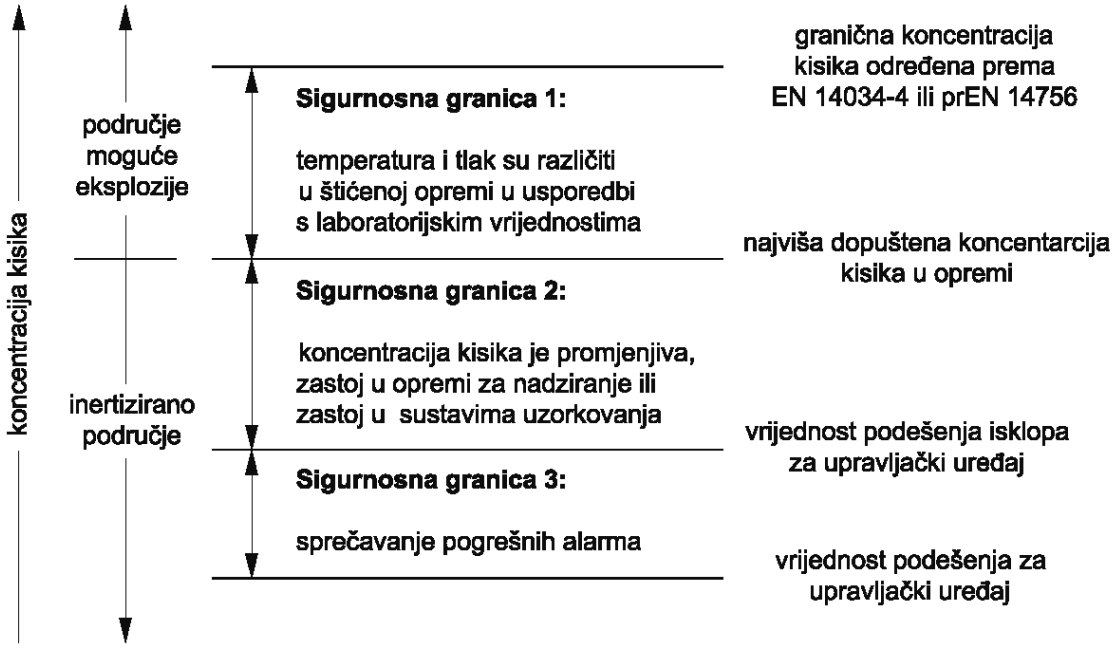
• ***Inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma)*** – smanjenje koncentracije kisika u zatvorenom sustavu stvaranjem podtlaka i vraćanjem na atmosferski tlak ulaskom inertnog plina. Postupak se također ponavlja dok se ne ostvari željena koncentracija kisika. Ova je metoda prikladna za sustave koji mogu izdržati podtlak (vakuum), ali ne i pretlak, kao npr. staklene posude.

• ***Inertizacija protokom*** – punjenje inertnim plinom na jednom, uz istodobno ispuštanje plina na drugom mjestu udaljenom od mjesta punjenja. Podrazumijeva zamjenu kisika kontinuiranim protokom inertnog plina u sustavu koji se ispuhuje, najčešće u okolnu atmosferu. Ova je metoda prikladna za sustave koji ne mogu izdržati bilo unutarnji bilo vanjski tlak. Kod dugih tankih posuda ili cjevovoda, inertizacija oscilacijom pretlaka ili podtlaka može biti nedjelotvorna uslijed oskudnog miješanja ukoliko se plin puni i izbacuje iz istog dijela, dok bi inertizacija protokom ovdje bila primjenjiva.

• ***Inertizacija istisnom zamjenom*** – zamjena zraka inertnim plinom bitno drukčije gustoće. Ova je metoda uobičajeno prikladna isključivo za posebne okolnosti gdje su velike razlike u gustoći i gdje nema značajnijeg miješanja.

• ***Zadržavanje inertnih uvjeta*** – tijekom čitavog procesa, primjerenim nadziranjem, valja osiguravati da najviša dopuštena koncentracija kisika ne bude premašena. To se može ostvariti računskim metodama (npr. na temelju izračuna koji su dani u HRN CEN/TR

15281 za svaku od metoda inertizacije, neizravnim praćenjem procesa itd.), ili neposrednim mjerenjem udjela kisika, gdje se svaki gubitak inertne tvari treba nadomjestiti. Na slici 3.1 [21] dan je tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu djelotvornosti inertizacije.



Slika 3.1 Tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu procesa

U procesima s primarnom zaštitom od eksplozije inertizacijom potrebno je odrediti sigurnosne granice sustavu koji nadzire koncentraciju kisika u eksplozivnoj smjesi. Sukladno tome postoje tri sigurnosne granice. Sigurnosna granica 3 je granica kisika koja se postavlja na upravljački uređaj koji kontrolira koncentraciju kisika i održava istu konstantnom. Sigurnosna granica 2 je granica kisika koja daje signal upravljačkoj jedinici da cijeli proces isključi. Sigurnosna granica 1 je najviša dopuštena koncentracija kisika (NDKK) u opremi te ukoliko se prijeđe, cijeli proces se odmah zaustavlja. Svaka sigurnosna granica ima određenu toleranciju, kako bi se izbjegle štete od pogrešnog očitanja stvarne koncentracije. Veličina tolerancije ovisi o načinu ostvarivanja inertizacije.
U HRN CEN/TR 15281 [21] pozornost je dana dobavi inertnog plina te odabiru sustava inertizacije, a posebno sa stajališta njegove pouzdanosti, npr. sustavima nadziranja i kontrole (za što su dane i normativne reference), na što valja obratiti osobitu pozornost prilikom provedbe postupka procjene rizika.

Pri provedbi postupka inertizacije potrebno je poduzeti mjere zaštite radnika, odnosno spriječiti gušenje radnika zbog nedostatka kisika uslijed moguće pojave inertnih plinova u okolnoj atmosferi (npr. predvidjeti ulaznu dozvolu s opisom sigurnosnih mjera za zaštitu radnika, udovoljiti ventilacijskim zahtjevima, provoditi analize sastava zraka, osigurati aparat za disanje i sl.).

Iako nema status norme, budući da prilikom svoga nastajanja nije dobio opći konsenzus, prijedlog tehničkog izvješća HRN CEN/TR 15281 [21] od velike je pomoći pri provedbi postupka inertizacije, ali je svakako neophodno u primjeni spomenuta dokumenta voditi računa o brojnim ograničenjima te uvažiti normativne reference na koje se isti poziva.

3.2 Razrjeđivanje eksplozivne prašine neeksplozivnom

Dodavanjem inertne prašine u smjesu eksplozivne prašine i zraka ta smjesa postaje neeksplozivna. Neke su od inertnih praškastih tvari kalcijev karbonat, amonijev fosfat, natrij-hidrogen karbonat, kamena prašina, kalcij sulfat, itd.
Takvi materijali mogu djelovati kao tvari koje hlade ili onemogućuju širenje plamena. Količine inertnih prašina određuju se prema prije spomenutim ispitivanjima. Izuzev rudnika, gdje se puno primjenjuje, inertiziranje s inertnim prašinama rijetko se primjenjuje zbog potrebnih velikih količina te zbog kontaminacije samog procesa.

3.3 Inertni plinovi [8] [21]

Inertni plinovi koji se obično koriste su: dušik, ugljični dioksid, plemeniti plinovi (argon, helij), dimni plinovi i vodena para. Izbor inertnog plina ovisi o mnogo faktora uključujući i sljedeće:

- Cijena;
- Dostupnost;
- Pouzdanost opskrbe;
- Mogućnost kontaminacije (reakcije) prašine s inertnim plinom:
- Volumenska učinkovitost u smanjivanju eksplozije;

U tablici 3.1 sažeto su prikazane prednosti i mane pojedinih inertnih plinova.

Tablica 3.1 *Prikaz prednosti i mana inertnih plinova*

Plin	Prednosti	Mane
Ugljični dioksid	Moguće ga je proizvesti odmah na pogonu iz generatora inertnog plina, ponekad je produkt procesa kao otpadni plin. Učinkovitost-veća razina kisika (udio po volumenu) je dopuštena u usporedbi s dušikom. Umjerena cijena.	Neke metalne prašine burno reagiraju s ugljičnim dioksidom (kao npr. aluminij). Protok ugljičnog dioksida može generirati značajno elektrostatsko nabijanje.
Dušik	Dostupan u komprimiranoj ili kriogenoj formi, u nekim procesima pojavljuje se kao otpadni plin, mogućnost dobijanja iz zraka odmah na mjestu korištenja. Umjerena cijena.	Manje je učinkovit od ugljičnog dioksida. Neke metalne prašine reagiraju s dušikom (kao npr. magnezij) kod visokih temperatura.
Dimni plinovi	Obično su to otpadni plinovi koji su rezultat sagorijevanja u određenim procesima. Cijena je vrlo pristupačna	Zahtijevaju dodatnu opremu za hlađenja, uklanjanje kontaminiranih tvari, kontrolu ili uklanjanje zapaljivih para i uklanjanje užarenih čestica. Mogu reagirati s prašinama. Skladištenje dimnih plinova nije praktično pa zahtijevane količine ponekad nisu dostupne, kao npr. tijekom gašenja peći.
Plemeniti plinovi (argon ili helij)	Nije vjerojatno da kontaminira proizvod i da reagira s njim.	Vrlo skupi.
Vodena para	Može biti generirana u procesu.	Može se dogoditi da neće biti dostupna tijekom startanja ili gašenja. Nije kompatibilna s mnogo proizvoda. Kondenzira se padom temperature što vodi u gubitak inertne atmosfere a može doći i do podtlaka. Može biti korištena samo para čiji je tlak veći od 3 bara. Postoji rizik od povećanja mase, kemijskih reakcija i mikrobiološke aktivnosti.

3.4 Dobava, distribucija i kontrola inertnih plinova

Za efikasnu inertizaciju sustava moraju se zadovoljiti neki uvjeti opskrbe kako bi sustav bio inertiziran. Prvi važan uvjet je minimalni protok te postoje dva kriterija za određivanje istog:

- prvi je u svezi normalnih radnih uvjeta i odgovara pražnjenju produkta sustava. Volumen tog produkta mora biti zamijenjen inertnim plinom čiji je minimalni protok jednak protoku pražnjenja produkta,
- drugi nije u svezi s normalnim radom postrojenja (normalni radni uvjeti) ali odgovara atmosferskom «disanju» sustava jer se temperatura i/ili atmosferski tlak podložni promjenama. Tlak u sustavu može biti reduciran na vrijednost ispod atmosferskog tlaka i tu razliku potrebno je kompenzirati povećanom opskrbom inertnog plina.

Oba kriterija je potrebno razmotriti istovremeno, te je potrebno odrediti najveći protok inertnog plina. Protok mora biti takav da održava uvjete inertizacije kroz cijeli proces te mora biti kontroliran kod radne temperature i tlaka.
Drugi uvjet je relativna homogenost atmosfere unutar sustava koja se mora inertizirati: koncentracija inertnog plina u toj atmosferi mora biti dovoljno visoka svugdje u sustavu i stoga koncentracija kisika mora biti dovoljno niska. To ovisi o:

- metodi inertiziranja
- mjestu ulaza inertnog plina u sustav
- mjestu oduška u atmosferu
- tlaku i temperaturi inertnog plina na ulaznom mjestu
- brzini inertnog plina prilikom ulaza u sustav

Sve te značajke moraju biti tako određene da inertni plin dođe u najudaljenije dijelove sustava. Nakon izbora parametara, učinkovitost inertiziranja mora biti provjerena mjerenjem koncentracije kisika u sustavu i to na mjestu koje je najudaljenije od ulaza inertnog plina u sustav.
Nadzor i kontrolni sustav inertizacije je vrlo važan za uspostavljanje i održavanje inertne atmosfere. Sustav nadzora i kontrole koji mjeri stvarnu, odnosno trenutnu razinu kisika

naziva se direktnim sustavom, a sustavi kod kojih nema mjerenja trenutne razine kisika nazivaju se indirektnim sustavima, odnosno, sustavima kod kojih se donosi zaključak na temelju povremenih kontrola tj. mjerenja drugih parametara. U ovisnosti koji se sustav koristi valja napraviti analizu povezanosti koncentracije kisika i kontrolnih parametara. Potrebno je definirati sigurnosne granice varijabli koje se kontroliraju, a to mogu biti protok, tlak ili koncentracija kisika.

Zadaća inertiziranja procesa je osigurati da se koncentracija kisika ne poveća do one točke kada je atmosfera unutar procesne opreme postane eksplozivna (zapaljiva). To zahtjeva mjerenje koncentracije kisika i održavanje istog ispod najveće dopuštene granične koncentracije kisika (NDKK) koja je potrebna za gorenje čak i tijekom fluktuacije razine kisika tijekom rada postrojenja. Dakle, normalna radna koncentracija kisika mora biti ispod vrijednosti podešenja za upravljački uređaj. Općenito postoje četiri koncentracije kisika na koje je potrebno obratiti pažnju (slika 3.1):

- granična koncentracija kisika (*GKK*), dobivena laboratorijskim ispitivanjima prema nizu normi HRN EN 14034
- najveća dopuštena koncentracija kisika u opremi (*NDKK*), (engl. *Maximum Allowable Oxygen Concentration in the equipment, MAOC*)
- vrijednost podešenja isklopa za upravljački uređaj
- vrijednost podešenja za upravljački uređaj

Kako je prije bilo rečeno, postoji nekoliko metoda za određivanje da li je sustav inertiziran ili ne. Postoji direktno i trenutno mjerenje stvarne koncentracije kisika konstantno koristeći osjetnik kisika i metode kod koje nema trenutnog i direktnog mjerenja, ali je koncentracija kisika određena ili mjerenjem u različitim vremenskim intervalima ili je određena proračunom.

Kod stalnog mjerenja kisika, mjerenje koncentracije kisika potrebno je provoditi u nekoliko točaka kako bi to mjerenje bilo reprezentativno. Problemi koji se javljaju kod osjetnika kisika je potrebna kalibracija u određenim vremenskim intervalima, te može doći do kontaminacije s fluidom koji se nalazi u sustavu pa samim time ima i kraći vijek trajanja. Prednost takvog mjerenja je mogućnost direktnog mjerenja kritičnih parametara i mogućnost direktne kontrole, optimiranje potrošnje inertnog plina, detektiranje curenja i smetnji u samom procesu inertiziranja.

Indirektne metode zahtijevaju temeljitu analizu procesa, odnosno, postrojenja i svih poremećaja kako bi se osigurala adekvatna inertizirana atmosfera cijelo vrijeme jer nema konstantnog praćenja razine kisika. Postoje nekoliko indirektnih metoda. Prva od njih je periodično mjerenje kisika koja se sastoji od uzimanja uzoraka u točno određenim vremenskim razmacima. Obično se koristi za kalibraciju i potvrđivanje metode ispiranja kako bi se dosegnula tražena razina kisika te se koristi zajedno s ostalim metodama kao npr. mjerenje protoka i tlaka. Uzorkovanje se obično izvodi ručno i to prijenosnim analizatorom kisika (slika 3.5).

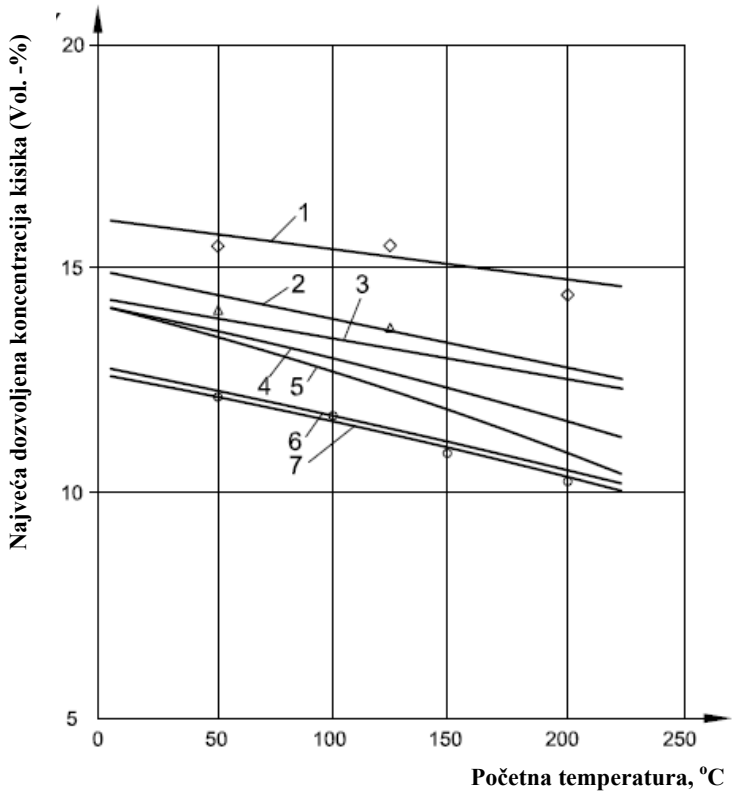
Sekvencijalno mjerenje razine kisika koje se izvodi jednim analizatorom kisika na više različitih mjesta na opremi. Problem koji se može pojaviti kod ovakvog mjerenja je vremensko kašnjenje, pa u procesima gdje se očekuju nagle promjene razine kisika ovakav način mjerenja nije dobar.

Metoda kontrolom tlaka, bazira se na mjerenju tlaka i broja oscilacija. Regulacijom tlaka je potrebno omogućiti postizanje najvećeg i najmanjeg tlaka za svaku kompletnu oscilaciju.

Metoda kontrolom protoka bazira se na kontroli, praćenju i održavanju minimalnog protoka koji je potreban za postizanje inertne atmosfere sve dok traje potreba za inertizacijom.

3.5 Utjecaj radnih parametara procesa

Radni parametri procesa imaju utjecaj na inertizaciju, a na koji način djeluju na sustav inertizacije prikazano je na slikama 3.2 i 3.3. S porastom temperature u procesu smanjuje se najveća dozvoljena granična koncentracija kisika (slika 3.2). Isto tako, porast inicijalnog tlaka može voditi u smanjivanje najveće dozvoljene granične koncentracije kisika. Primjerice, porast inicijalnog tlaka s 1 na 4 bara rezultira smanjivanjem najveće dozvoljene granične koncentracije kisika za 1 Vol.-%max. (slika 3.3). Zaključak je da se porastom parametara procesa (tlak i temperatura) povećava potreba za inertnim plinom kako bi se održala inertna atmosfera jer se kod tih parametara NDKK smanjio.



1 – Prah obranog mlijeka, M=65 µm

2 – Bitumenski ugljen, M=19 µm

3 – Dugo goreći ugljen, M=19 µm

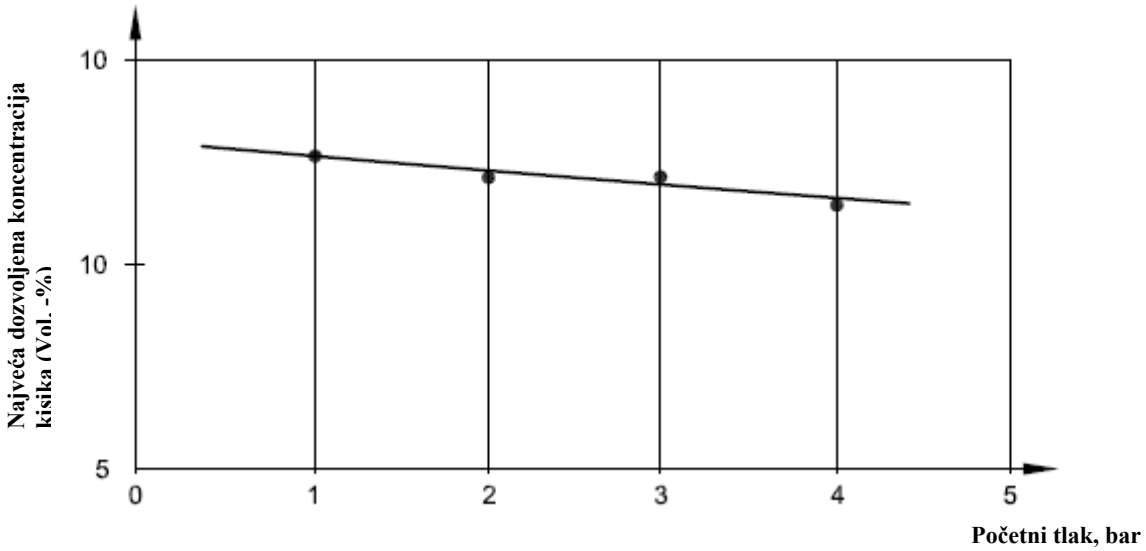
4 – Treset, M=65 µm

5 – Drvena prašina bukve, M=59 µm

6 – Medij za geliranje, M=43 µm

7 – Smeđi ugljen, M=52 µm

Slika 3.2 Utjecaj temperature na najveću dozvoljenu koncentraciju kisika [21]



Slika 3.3 Utjecaj tlaka na inertiziranje smeđeg ugljena [21]

Granična koncentracija kisika određena je ispitivanjem pod određenom temperaturom i tlakom, a ako se proces odvija na različitim temperaturama i tlakovima nego što je bilo prilikom određivanja GKK-a potrebno je odrediti sigurnosnu granicu (najveća dopuštena koncentracija kisika) ili odrediti GKK kod stvarnih parametara procesa. Slijedom gore

navedenog, parametri procesa imaju važnu ulogu u efikasnosti sustava inertizacije, te samim time moraju biti dobro definirani i pod nadzorom.

3.6 Primjeri korištenja i proračun inertizacije u industriji

3.6.1 Primjena sustava inertizacije u farmaceutskoj industriji [24]

U farmaceutskoj industriji se pojavljuju mnoge praškaste supstance koje su vrlo eksplozivne. Nekontrolirano rukovanje takvim prašinama unutar procesa može prouzročiti generiranje elektrostatske iskre koja može zapaliti smjesu prašine i zraka te prouzročiti eksploziju. Inertizacija u spomenutoj grani industrije ima važniju ulogu u sprečavanju eksplozije iz razloga što je najvažniji dio procesa mljevenje i miješanje prašina. Tijekom procesa mljevenja gotovo je nemoguće izbjeći potencijalni uzročnik paljenja kao ni reducirati koncentraciju prašine. Cijena sustava inertizacije je niža od drugih metoda zaštite, primjerice: opreme koja je otporna na tlak eksplozije, sustava za rasterećenje tlaka ili sustava ugušivanja eksplozije. Granična koncentracija kisika ovisi o vrsti prašine i korištenom inertnom plinu. Kako bi se odredio ispravan način zaštite procesa potrebno je provesti prije spomenuta ispitivanja.

Primjeri drugih zaštitnih mjera:

- Zadržavanje eksplozije: cijelo postrojenje mora izdržati najveći tlak eksplozije p_{max}
- Odvajanje eksplozije: pojedine komponente postrojenja (npr.: mlin, ventilator) moraju biti odvojeni u slučaju eksplozije s brzo djelujućim protueksplozijskim ventilima.
- Sustavi suzbijanja eksplozije: u ranoj fazi nastanka eksplozije u proces se pušta usporivači eksplozije
- Sustavi rasterećenja (protueksplozijske membrane i odušak eksplozije): otpuštanje tlaka eksplozije u okoliš
- Inertizacija: inertizacija cijelog procesa

Kod sustava suzbijanja eksplozije koristi se voda, soda bikarbona, fosfati koji se upuhuju u sustav kada se povećava tlak u sustavu. Za odušak eksplozije se obično koristi velika

stacionarna oprema koja mora biti smještena blizu vanjskog zida. U farmaceutskoj industriji prethodne dvije sigurnosne mjere ne zadovoljavaju potrebe, te za razmatranje ostaju metode zadržavanje eksplozije, odvajanje eksplozije i inertizacija.

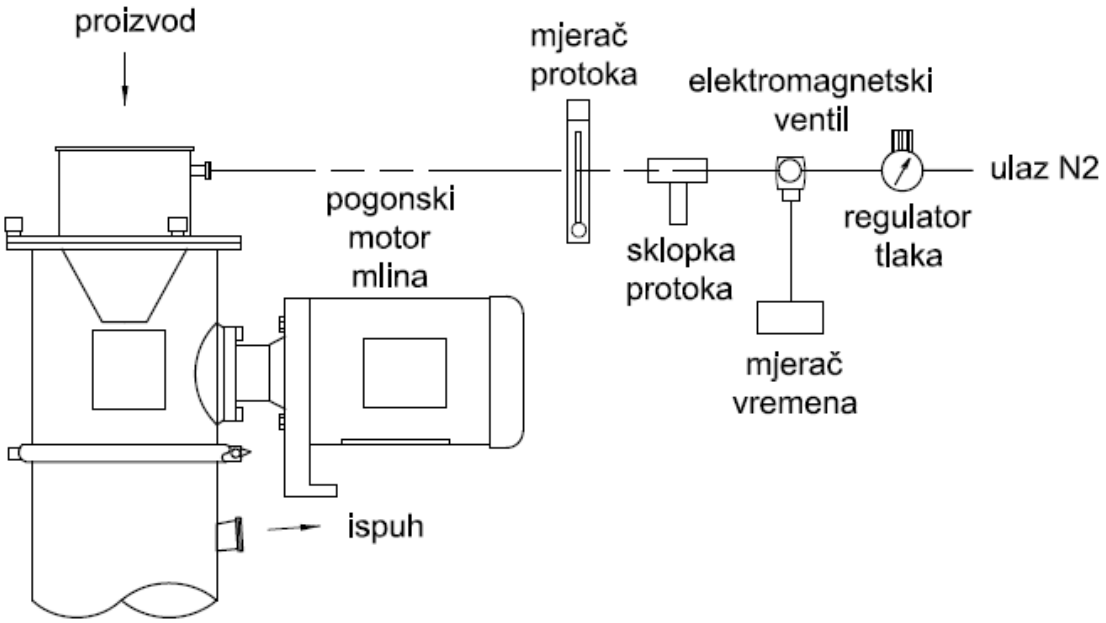
Za potrebe inertizacije mlina u farmaceutskoj industriji dušik približno stoji 5 $/h[24] što je prosječna vrijednost, jer to ovisi o cijelom sustavu te o vrsti prašine koja se koristi u procesu.

Koju sigurnosnu mjeru zaštite od eksplozije će se primijeniti ovisi o analizi troškova, (kapitalnih i operativnih). U ovom slučaju (mlinovi u farmaceutskoj industriji) sustavi zadržavanja eksplozije obično su skuplji, oprema je teža i velika te samim time i vrlo skupa za održavanje, a isti problemi javljaju se i kod sustava odvajanja eksplozije. Može se zaključiti da kapitalni troškovi sustava inertizacije imaju bolji efekt troška nego prije navedeni sustavi. Međutim, neki praškasti materijali mogu generirati kisik tijekom procesa te time sam sustav inertizacije nije praktičan, efikasan niti ekonomski isplativ.

Kod inertiziranja mlinova važnu ulogu ima odabir samog sustava procesa inertizacije, pa tako se najčešće koriste sljedeći sustavi:

1. Jednostavan sistem
2. Inertizacija mlina s kontrolom kisika

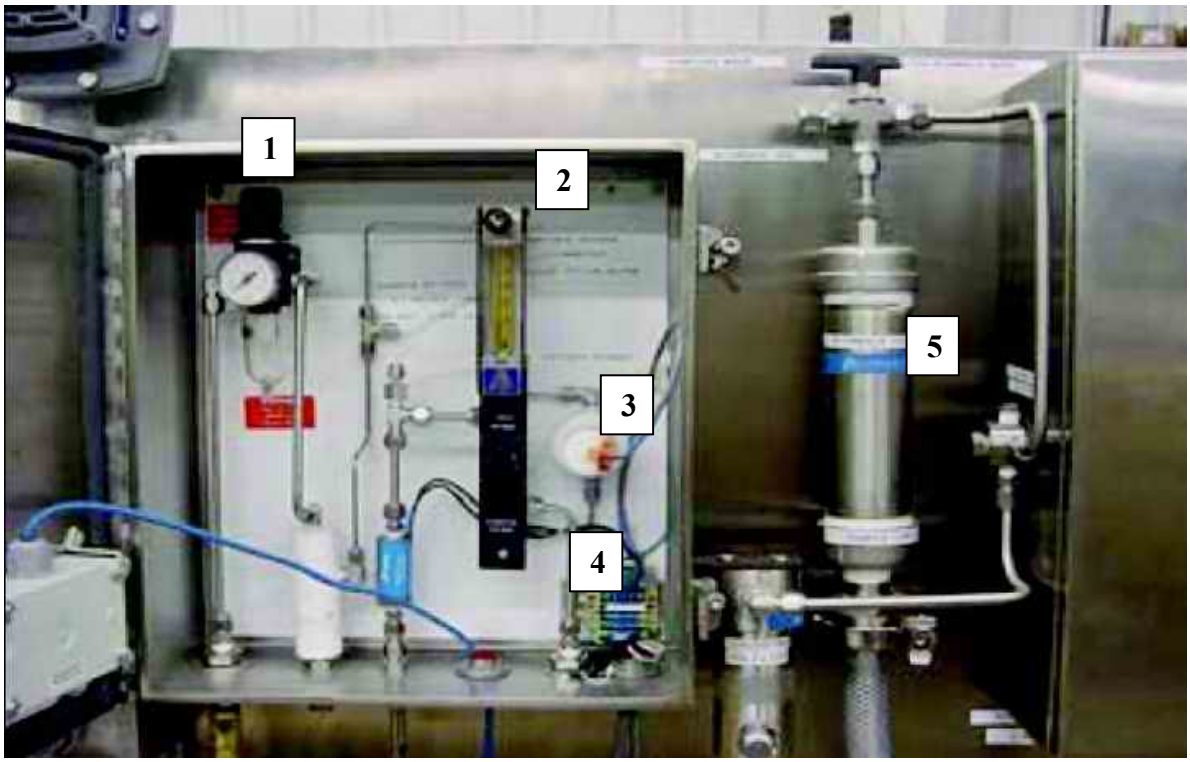
Jednostavan sistem sastoji se od priključaka za inertni plin na gornjoj strani opreme, te plin prolazi kroz opremu i izlazi na drugoj strani (inertizacija protokom). Ulazni dio inertnog plina (obično je to N_2 ili CO_2) opremljen je regulatorom tlaka, elektromagnetskim ventilom, mjeračem protoka i sklopkom protoka (slika 3.4). Ako protok inertnog plina padne ispod minimalnog zahtijevanog protoka, oprema, odnosno mlin se zaustavlja. Mlin se ispire inertnim plinom prije i tijekom procesa mljevenja. Jedan takav sklop prikazan je na slici 3.5. Jednostavnim proračunom može se izračunati vrijeme ispiranja te protok inertnog plina potrebnog za razrjeđivanje kisika unutar mlina prije njegovog pokretanja. Navedeno rješenje je dobro i u većini slučajeva zadovoljava sigurnosne aspekte, međutim, u ovom slučaju nema konstantnog niti periodičnog mjerenja koncentracije kisika u mlinu.



Slika 3.4 Jednostavan sustav inertizacije sustava mljevenja

Sustav inertiziranja mlina s kontrolom koncentracije kisika je najčešće korišteno rješenje. Takav sustav kontrolira sadržaj kisika u smjesi inertnog plina i zraka te sadržaj inertnog plina koji je uveden u sustav. Uzorci smjese uzimaju se konstantno. Venturi-jeva cijev povuče uzorak iz mlina kroz filtere. Tako filtriran uzorak prolazi kroz osjetnik kisika koji šalje električni signal (4-20 mA) analizatoru kisika. Analizator kisika električni signal pretvara u odgovarajuću koncentraciju kisika izraženu u postocima (slika 3.6).

U ovom sustavu postoje dvije granične vrijednosti koje se podese na uređaju: razina upozorenja i razina alarma. Razina alarma je najviša dopuštena koncentracija kisika (engl. *Maximum Oxygen Content*, *MOC*) dok je razina upozorenja obično namještena za oko 2 % niže od razine alarma. Ako se koncentracija kisika poveća iznad namještene «razine upozorenja» protok inertnog plina poveća se toliko da se razina kisika u smjesi vrati na željenu razinu. U slučaju da kisik dostigne razinu alarma tada će se oglasiti zvučni signal te će se mlin isključiti. Inertni plin nastavlja ispirati mlin sve dok operater ne isključi dotok plina. Ako se kao inertni plin koristi dušik ispuh (izlaz inertnog plina) ne smije biti u istoj prostoriji gdje se nalazi inertizirani proces jer može doći do gušenja operatera. Naime, obično se uz takve procese nalaze ljudi koji upravljaju cijelim procesom, pa bi dušik koji dolazi iz sustava, mogao uzrokovati snižavanje postotka kisika u zraku te time ugroziti život operaterima. Neki sustavi imaju povratni vod, tako da se inertni plin vraća u sustav i ponovo se koristi.



Legenda:

1 – regulator tlaka

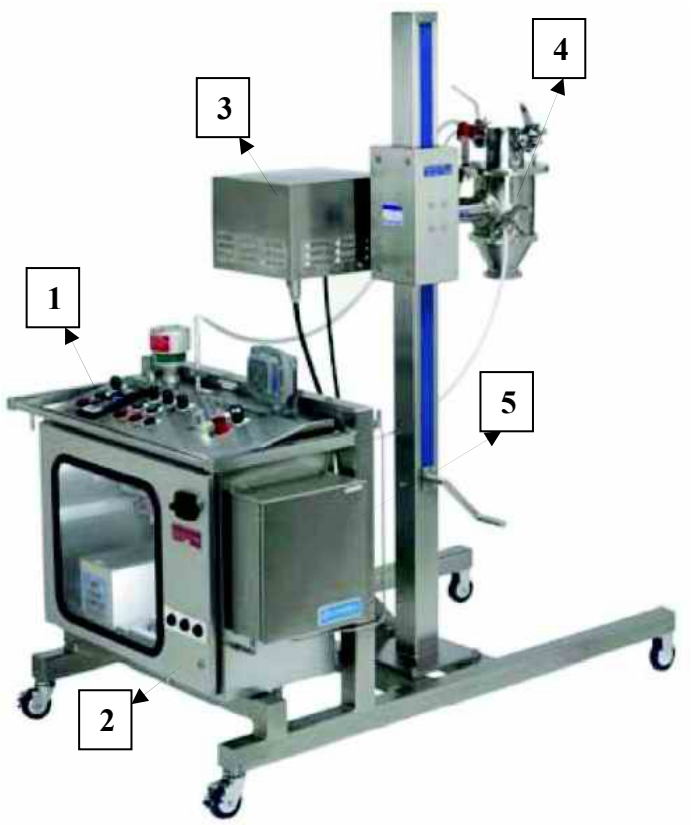
2 – mjerač protoka sa sklopkom

3 – mjerač vremena

4 – elektromagnetski ventil

5 – spremnik inertnog plina

Slika 3.5 Sklop za dobavu inertnog plina s provjerom protoka



Legenda:

1 – kontrolna i upravljačka jedinica

2 – spremnik

3 – crpka

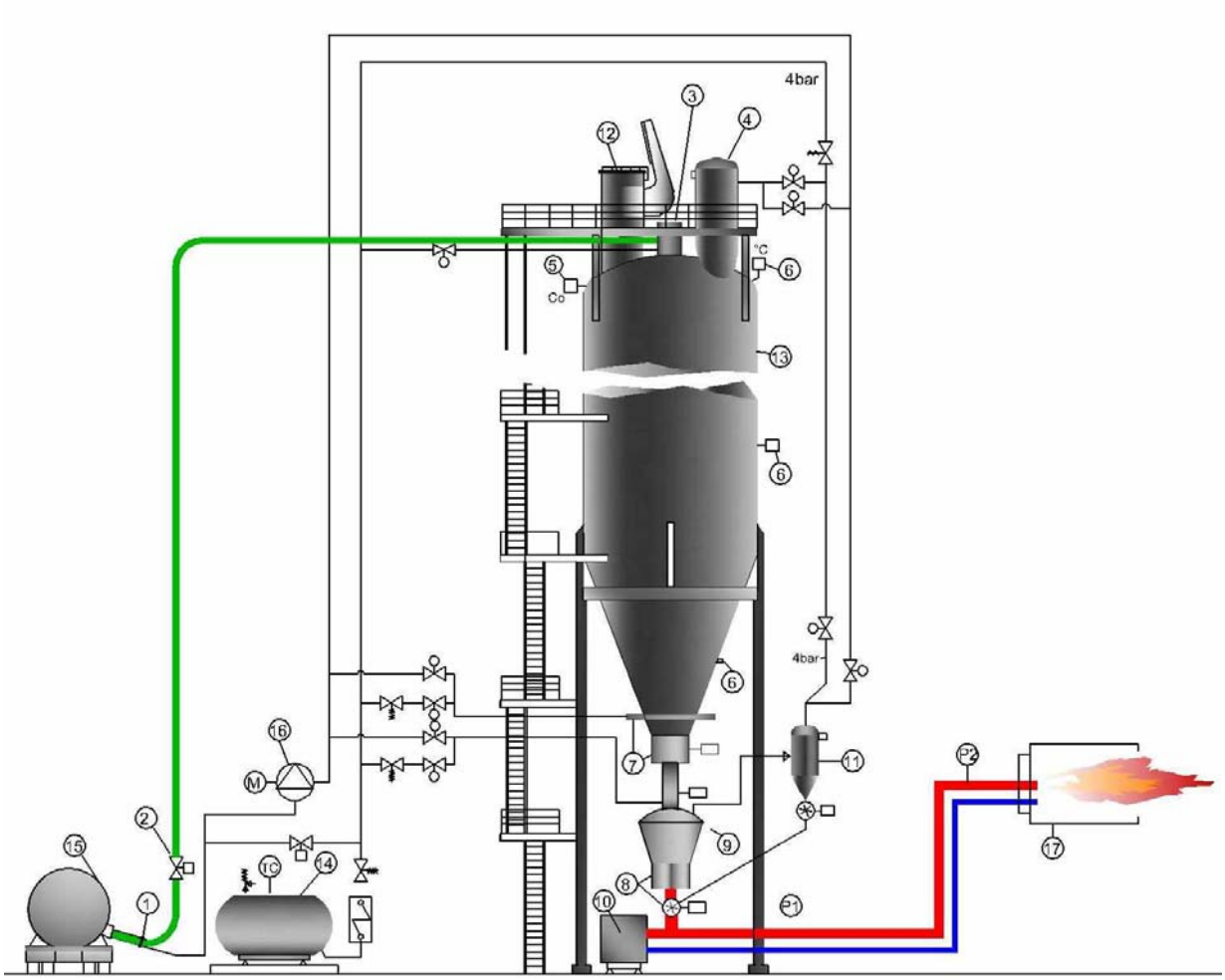
4 – spoj sa sustavom mlina

5 – analizator kisika

Slika 3.6 Prijenosni sistem inertizacije mlina s kontrolom koncentracije kisika

3.6.2 Primjer korištenja inertizacije kod punjenja/pražnjenja silosa [23]

Ovaj primjer prikazuje zaštitu silosa ugljene prašine prilikom punjenja i pražnjenja (slika 3.7). U ovom slučaju ugljena prašina se doprema cisternama koje se prazne pomoću cijevi. Cisterna se prije pražnjenja mora staviti pod pretlak do max. 2,0 bara i to ili s dušikom ili ugljičnim dioksidom (inertizira se). Prašina u struji inertnog plina dolazi do kućišta za upuhivanje. Osjetnik razine popunjenosti mjeri trenutnu razinu popunjenosti silosa, dok osjetnici za mjerenje ugljičnog monoksida te osjetnici temperature, raspoređeni su na različitim mjestima silosa kako bi kontinuirano pratili koncentraciju ugljičnog monoksida i temperaturu u silosu. U slučaju povećanja koncentracije razine ugljičnog monoksida i/ili temperature automatski se inicira inertizacija cijelog postrojenja.



Slika 3.7 Inertizacija sustava silosa

Dijelovi postrojenja.

1 spojka za punjenje
2 zaporni zasun
3 kućište za upuhivanja
4 filter na spremniku
5 mjerenje CO
6 mjerenje temperature
7 popuštanje
8 doziranje
9 kontrola težine
10 puhalo
11 filter za zrak koji se propušta
12 protueksplozijska zaklopka
13 spremnik (silos)
14 spremnik s CO_2
15 cisterna
16 kompresor
17 plamenik (peć)

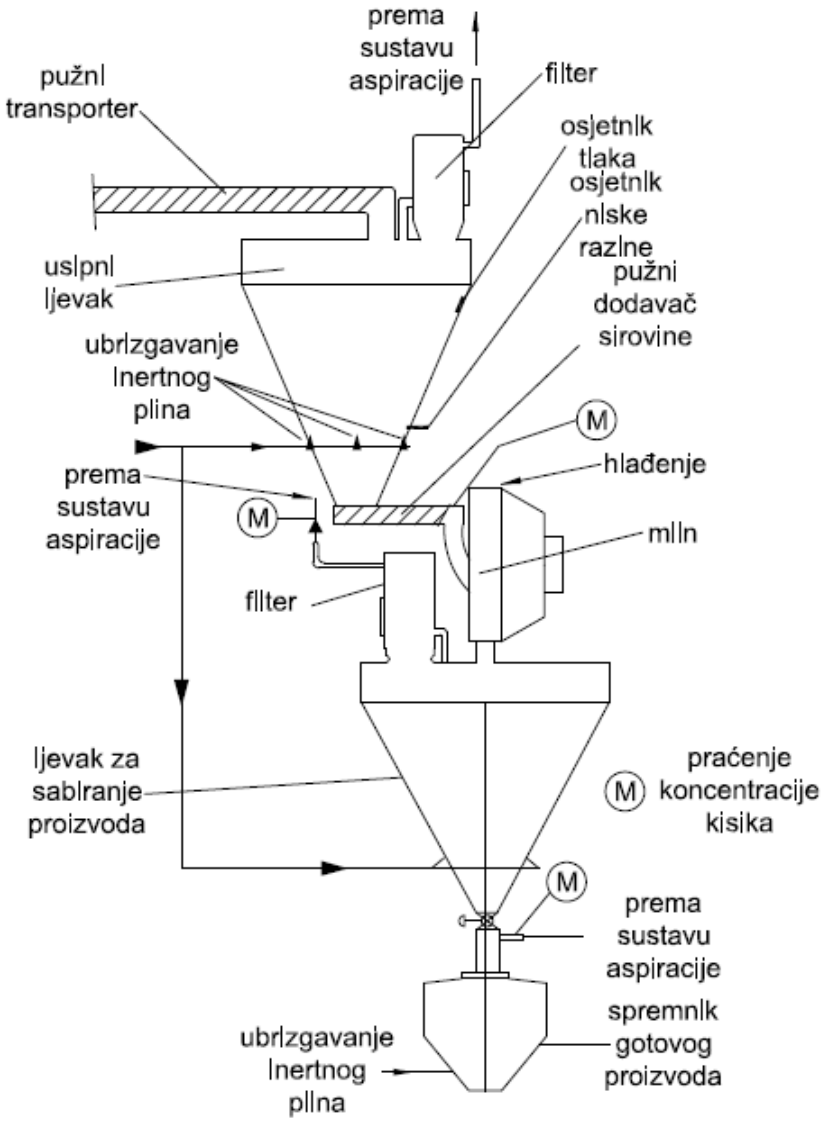
Navedeno postrojenje dodatno je opremljeno protueksplozijskom zaklopkom koje će u slučaju naglog porasta tlaka unutar silosa višak tlaka ispustiti u okolinu.

3.6.3 Primjer inertiziranja sustava mljevenja [8]

Materijal za obradu prenosi se do lijevka pomoću pužnog transportera, dok pužni dodavač (dobava sirovine) kontrolira pražnjenje lijevka u mlin na način da je mlin konstantno pun materijala. Samljeveni materijal se skuplja u lijevku za proizvod te nakon toga tako sakupljeni gotovi proizvod puni spremnik. Takav jedan proces prikazan je na slici 3.8.

Na samom postrojenju ugrađen je sustav za inertizaciju, konstruiran tako da održava koncentraciju kisika u mlinu, lijevku proizvoda i u spremniku gotovog proizvoda ispod donje granične koncentracije (DGKK). Inertni plin direktno ulazi u dobavni lijevak, lijevak za sabiranje proizvoda i u spremnik. Koncentracija kisika se konstantno prati u mlinu, na izlazu gotovog proizvoda, na izlazu iz filtera i na ulasku u spremnik. Bilo koje povećanje koncentracije kisika na ova četiri mjesta odmah uzrokuje automatsko iskjučivanje mlina. Praćenje koncentracije kisika odvija se i prilikom početnog ispiranja. Postrojenje može početi s radom samo kada je koncentracija kisika u cijelom postrojenju ispod tražene granice. Pužni dodavač ne radi ako razina materijala u dobavnom lijevku padne ispod osjetnika razine.

Materijal koji ulazi u lijevak materijala sadrži značajne količine zraka u šupljinama između čestica. Upuhivanje inertnog plina s donje strane lijevka materijala ima najbolju učinkovitost uklanjanja zraka jer inertni plin struji prema gore kroz materijal u lijevku.



Slika 3.8 Inertizacija sustava mljevenja

3.6.4 Primjer proračuna inertizacije [8]

Tri eksplozivna praškasta materijala se miješaju u posudi volumena 5 m^3. Radni tlak u posudi je 2,0 bar. Najveći dopušteni tlak u posudi smije biti 5,0 bar.

Materijal	Nasipna gustoća kg/m^3	Brzina dobave kg/h	DGK % V/V
A	400	600	10,1
B	500	500	15,9
C	625	450	5,0

Inertni plin je dušik, tlaka 3,0 bar. Pretpostavka je da je zrak 50 % volumena u dobavi prašine. Nasipna gustoća predstavlja omjer mase i ukupnog volumena nasutog materijala.

1. Izračunati broj potrebnih ispiranja kako bi se postigla zahtijevana koncentracija dušika u mješaču (mikseru) pretpostavljajući da je efikasnost miješanja 0,5.

Najgori slučaj donje granične koncentracije kisika ima prašina C (DGK je 5,0 %), ciljana vrijednost je 5,0 – 2,0 = 3,0 %. Svaki praškasti materijal u miješalicu ulazi zasebno, te će u nekim periodima biti visoke koncentracije svake prašine.
Posuda je dizajnirana za tlak od 2 bara, što nije i dobavni tlak inertnog plina, te se za gornji tlak ispiranja uzima dobavni tlak inertnog plina koji iznosi 3,0 bar.

$$C_n = C_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^n \quad ili \tag{2}$$

$$n = \frac{\log_e\left(\frac{C_n}{C_1}\right)}{\log_e\left(\frac{P_1}{P_2}\right)} \cdot \frac{1}{K} \tag{3}$$

gdje je:

C_n = koncentracija O_2 nakon n ispiranja

C_1 = početna koncentracija O_2 (% v/v)

P_1 = donji tlak ispiranja (apsolutno)

P_2 = gornji tlak ispiranja (apsolutno)

n = broj ciklusa ispiranja

K= efikasnost miješanja

$$n = \frac{\log_e\left(\frac{3,0}{21,0}\right)}{\log_e\left(\frac{1,0}{3,0}\right)} \cdot \frac{1}{0,5} = 3,5 \Rightarrow 4 \; potrebna \; su \; 4 \; ciklusa \; ispiranja$$

2. Izračunati protok dušika koji je potreban da se koncentracija kisika održi na razini od 3% po volumenu tijekom punjenja prašine B.

Pretpostavka je da je mješač (mikser) već ispod navedene vrijednosti slijedom inicijalne sekvence ispiranja i 50 % volumnog protoka je zrak:

Brzina punjenja prašine B = 500 kg/h

Nasipna gustoća = 500 kg/m^3

Volumni protok prašine = 1,0 m^3/h

Volumni protok zraka = 0,5 m^3/h

Volumni protok kisika - V_{O2} = 0,21 x 0,5 = 0,105 m^3/h

Volumni protok dušika - V_{N2} = 0,79 x 0,5 = 0,395 m^3/h

Koncentracija kisika – C_1 = 3,0 %

Ako je brzina punjenja kisika 0,105 m^3/h i predstavlja 3,0 % koncentraciju kisika, tada je ukupni protok dan sa sljedećom jednadžbom:

$$Q_{O2} = \frac{V_{O2} \cdot 100\%}{C_1} = \frac{0,105 \cdot 100}{3,0} = 3,5 \; m^3 / h \qquad (4)$$

ukupni protok dušika dan je sljedećom jednadžbom:

$$Q_{N2} = Q_{O2} - V_{O2} = 3{,}5 - 0{,}105 = 3{,}395\ m^3 / h \tag{5}$$

stoga, zahtijevani protok dušika dan je sljedećom jednadžbom:

$$Q_{UN2} = Q_{N2} - V_{N2} = 3{,}395 - 0{,}395 = 3\ m^3 / h \Rightarrow zahtjevani\ protok \tag{6}$$

3. Pretpostavimo da je dobava dušika u kvaru, koliko je vremena potrebno da se formira eksplozivna koncentracija prašine A tijekom punjenja?
Porast kisika izračunava se prema sljedećim jednadžbama:

$$\log_e\left(1 - \left(\left(C_f - C_1\right)Q - 100\,G\right)\right) = -KN \tag{7}$$

i

$$vrijeme = \frac{volumen\ posude}{brzina\ zraka} \cdot N \tag{8}$$

gdje je:
C_f = konačna koncentracija O_2 (%)
C_1 = početna koncentracija O_2 (%)
G = brzina protoka O_2 (m^3/h) [0,21 x protok zraka]
Q = protok zraka (m^3/h)
N = broj izmjene zraka
K= efikasnost miješanja
Pretpostavka: K = 1,0
najgori slučaj DGK = 5,0 % v/v te iz toga proizlazi da je C_f = 5,0 %
ciljana vrijednost DGK = 5,0 – 2,0 = 3,0 % v/v te iz toga proizlazi da je C_1 = 3,0%
$Q_A - volumni\ protok\ prašine\ A$

$$Q_A = \frac{Brzina\ dobave\ prašine\ A}{Nasipna\ gustoću\ prašine\ A} = \frac{600}{400} = 1{,}5\ m^3 / h \tag{9}$$

Pretpostavka da je 50 % volumena u dobavi prašine zrak, pa slijedi

$$Q_{zrak} = Q_A \cdot 0{,}5 = 0{,}75\ m^3 / h \tag{10}$$

Protok kisika:

$$G = 0{,}75 \cdot 0{,}21 = 0{,}1575\ m^3 / h \tag{11}$$

Iz toga proizlazi: G u (7)

$$\log_e \cdot \left(1 - \frac{(5{,}0 - 3) \cdot (0{,}75)}{(100 \cdot 0{,}1575)}\right) = -1{,}0 \cdot N$$

te proizlazi iz (7):

N = 0,10

Potrebno vrijeme da se postigne DGK: N, G, Q_{zrak} i volumen posude u (8)

$$t_{DGK} = \frac{5 \cdot 0{,}1}{0{,}75} = 0{,}67 sati$$

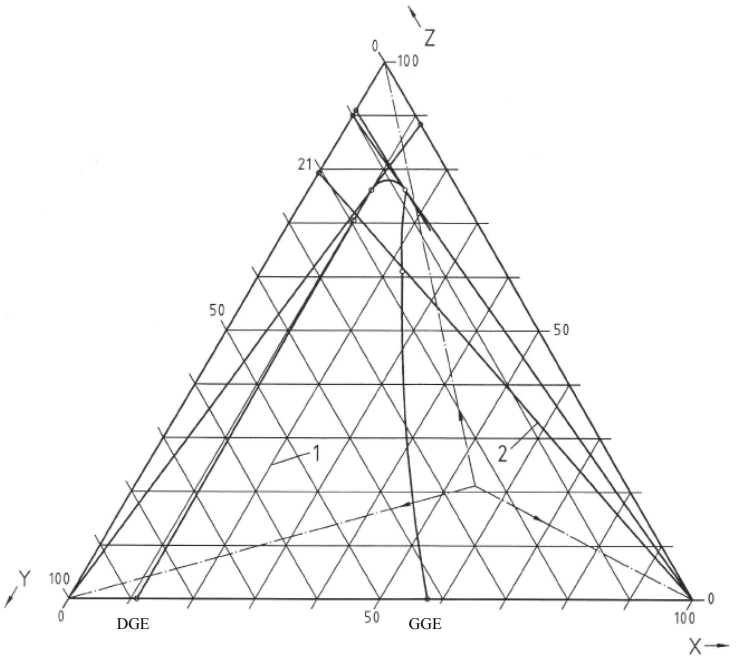
4. EKSPERIMENTALNI RAD

4.1 Projektiranje pokusa

Kako bi se dobili vjerodostojni rezultati potrebno je dobro projektirati sam pokus. Za projektiranje pokusa važno je voditi računa o:

- vrsti prašine
- inertnim plinovima
- metodi ispitivanja
- okolišnim uvjetima

U slučaju kada se projektira pokus sa smjesom plinova (inertizacija eksplozivne plinske atmosfere) može se koristiti trokut koncentracija pojedinih plinova koji se nalaze u smjesi (slika 4.1). Svi sudionici u smjesi mogu biti u granicama od 0 do 100 % koncentracije neovisno o ukupnom volumenu. Postavljanjem određenih granica, u trokutu eksplozivnosti, može se dobiti ograničeno područje koje valja ispitati. Kod smjese plinova je nešto jednostavnije planiranje pokusa iz razloga što se povećanjem jednog sudionika smanjuje na uštrb drugih i uvijek imamo konstantu od 100 % smjese [28]. Međutim, to nije slučaj kod smjesa prašina, zraka i inertnog plina. Razlog je taj što imamo dva agregatna stanja, plin i čvrsto stanje prašine. Znači, čestice prašine imaju svoj oblik i masu koliko god ona bila mala. U ovom primjeru ispitujemo s različitom koncentracijom prašine i nema konstantne veličine osim ispitnog volumena. Masa se uvijek mijenja te sudionike ne možemo suprotstaviti u trokut eksplozivnosti dok se kod plinova gleda volumni udio nekog plina u smjesi. To praktički znači, da ne možemo smatrati da ako smanjimo masu ugljena u smjesi da će se povećati udio inertnog plina. Naime, zanimljiva koncentracija prašine koja se ispituje je između 250 g/m^3 i 750 g/m^3, koncentracija kisika između 12 % i 21 % dok koncentracija inertnog plina direktno ovisi o željenoj koncentraciji kisika. Kao što je prije bilo rečeno, imamo dva agregatna stanja i pitanje je što je to 100% smjese u ovom slučaju. Ograničenje je i u tome što je ispitni volumen konstantan a koncentracija ugljene prašine izražena je u g/m^3 dok je koncentracija inertnog plina i kisika izražena u volumnim udjelima u postocima bez obzira na veličinu ispitnog volumena.



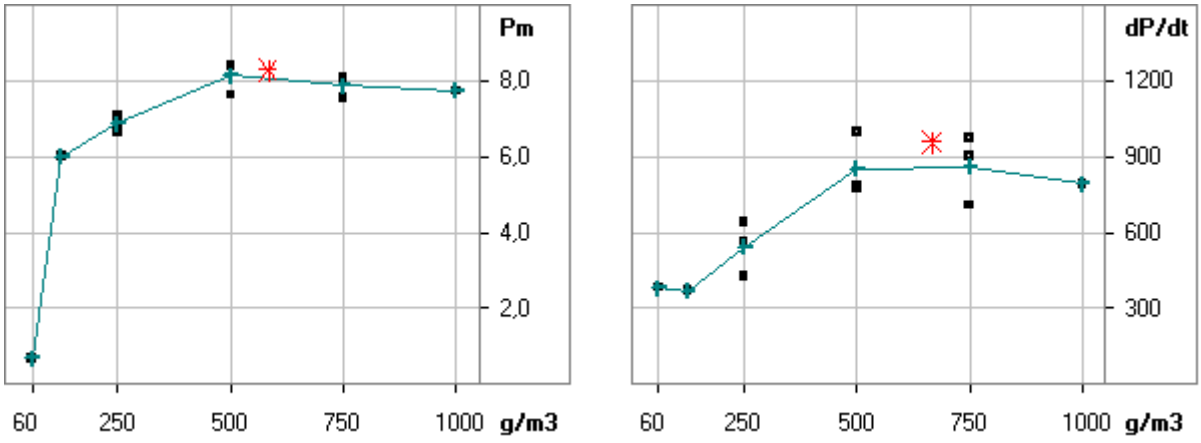
X – gorivo
Y – Kisik
Z – inertni plin
1 – raspon ekplozivnosti
2 – smjesa: gorivo-zrak

Slika 4.1 Trokut eksplozivnosti

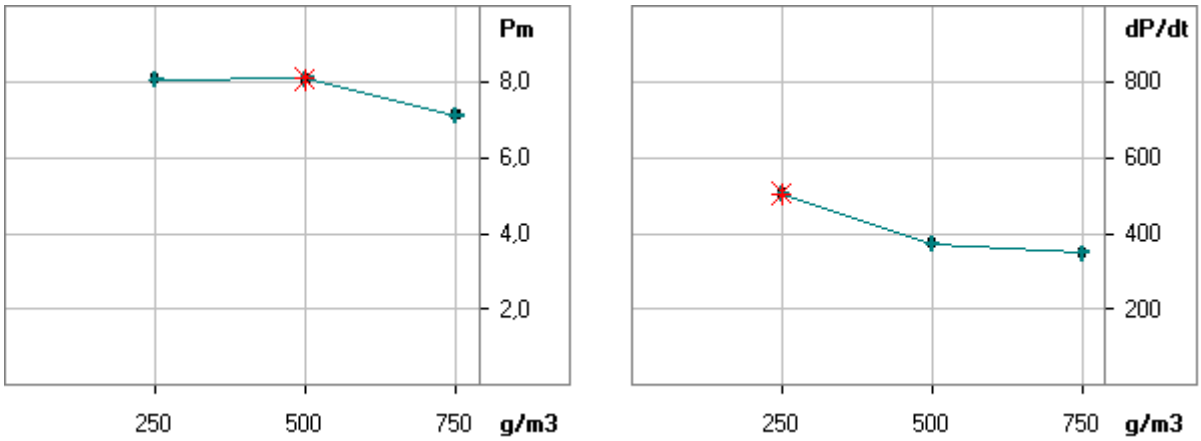
Za ovaj rad ispitane su sljedeće koncentracije prašina:

1) 250 g/m^3
2) 500 g/m^3
3) 750 g/m^3

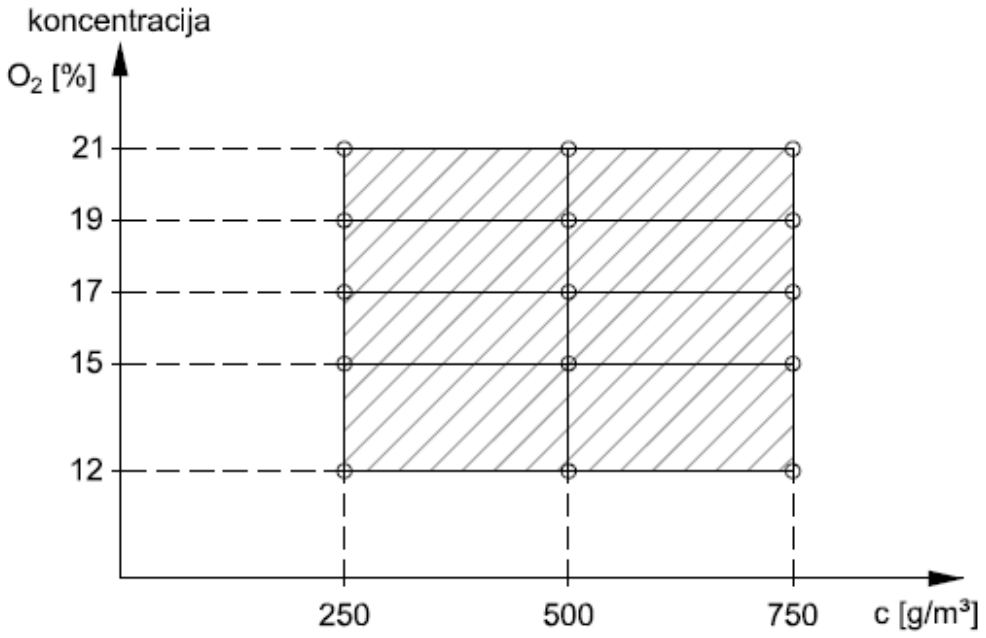
Navedene koncentracije prašine odabrane su iskustveno, naime, u unutar te tri koncentracije prašine ugljena stvaraju se najveći tlakovi eksplozija p_{max}. Na slici 4.2 prikazani su grafovi porasta tlaka i dp/dt u ovisnosti o koncentraciji neke prašine, odnosno prikazuje cjelokupno ispitivanje p_{max} i $(dp/dt)_{max}$. Naime, da bi se odredio p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ potrebno je početi ispitivanje s malim koncentracijama prašine te postepeno koncentraciju povećavati što prikazuje slika 4.2. Na slici 4.2 prikazani su dijagrami za p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ koji nisu dobiveni ispitivanjem ugljene prašine koja je navedena u ovom radu i ova slika služi za ilustraciju ispitne metode. Takav postupak ispitivanja određen je nizom normi [2] [3] [4] [5] i iziskuje mnogo vremena. U ovom radu se nije koristila cjelokupna metoda ispitivanja upravo zbog trajanja samog pokusa te bi bilo potrebno izvoditi puno više eksplozija. Upravo zbog tih razloga, koristile su se prije navedene koncentracije ugljene prašine koje osiguravaju da je najveći tlak eksplozije u granicama od 250 g/m^3 do 750 g/m^3 što je i prikazano grafovima na slici 4.3. Slika 4.3 prikazuje određivanje najvećeg tlaka eksplozije i brizance „skraćenom“ metodom ispitivanja predmetne ugljene prašine.



Slika 4.2 Prikaz grafa porasta tlaka eksplozije i brizance u ovisnosti o koncentraciji prašine



Slika 4.3 Prikaz grafa porasta tlaka eksplozije i brizance u ovisnosti o koncentraciji prašine ugljena od 250 g/m^3, 500 g/m^3 i 750 g/m^3

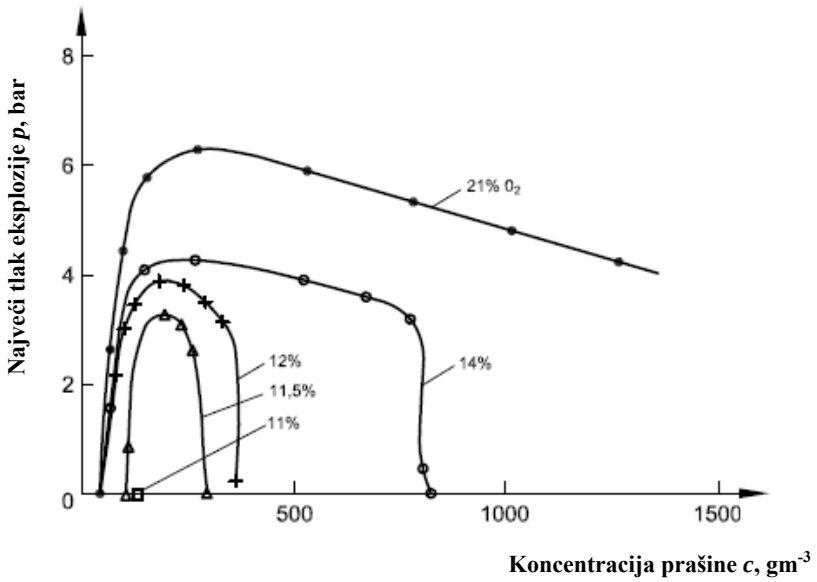


Slika 4.4 Prikaz područja (točaka) ispitivanja

Ispitna smjesa sastoji se od sljedećih sudionika (slika 4.4):

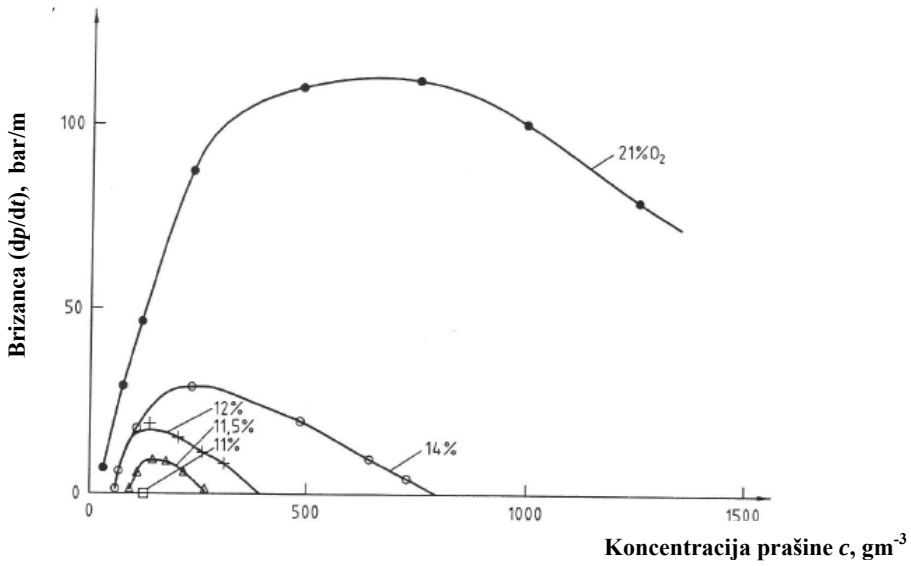
- ugljena prašina (granulacije ≤ 75 μm)
- zraka (21 % , 19 %, 17 %, 15 % i 12 % kisika)
- inertni plin

Slike 4.5, 4.6 i 4.7 prikazuju načelne dijagrame za određene fizikalne veličine i nisu rezultat predmetnog pokusa, već služe za bolje objašnjenje provedenog pokusa.



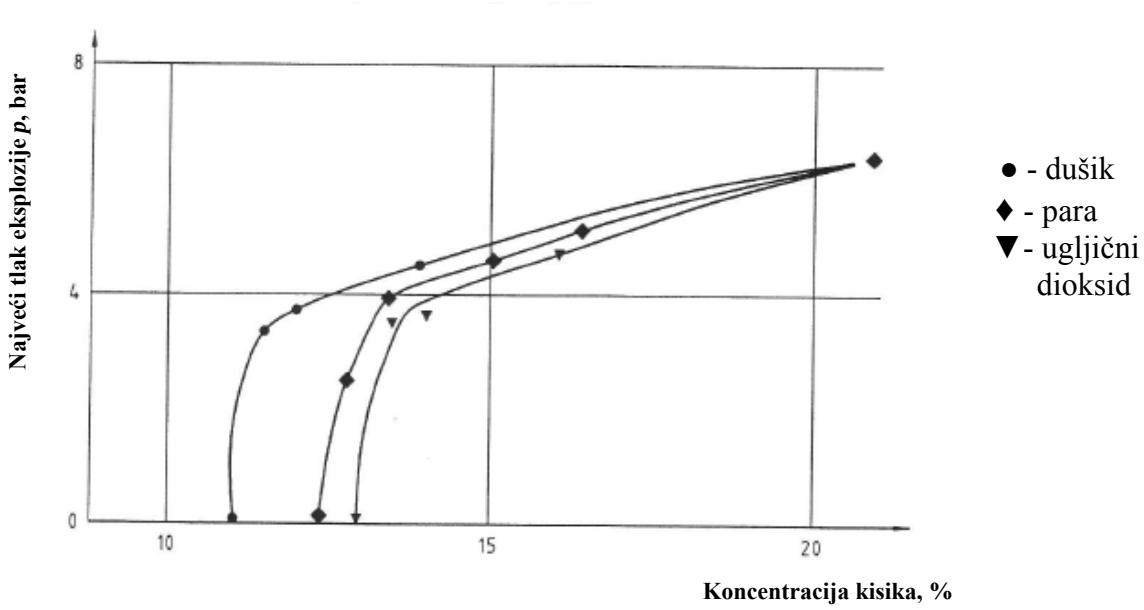
Slika 4.5 Utjecaj koncentracije kisika na tlak eksplozije

Slika 4.5 prikazuje smanjivanje najvećeg tlaka eksplozije u ovisnosti o koncentraciji kisika u smjesi i koncentraciji prašine. Prema dijagramu može se zaključiti da smanjivanjem koncentracije kisika u smjesi pada i tlak eksplozije. Slika 4.6 prikazuje smanjivanje vrijednosti $(dp/dt)_{max}$ u ovisnosti o koncentraciji kisika.



Slika 4.6 Utjecaj koncentracije kisika na brizancu

Općenito se može reći da se vrijednosti p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ smanjuju odnosno padaju kako se i smanjuje koncentracija kisika. Sa sigurnošću možemo utvrditi da se kod 0 % kisika eksplozija neće dogoditi. Međutim, možda nije potrebno provoditi cjelokupnu inertizaciju jer troškovi time rastu, već je potrebno pronaći granicu kod koje ta eksplozija ne može prouzročiti štetu. Isto tako nije nevažno kojim se inertnim sredstvom izvodi inertizacija. To ovisi o samom procesu te o vrsti prašine. Slika 4.7 prikazuje utjecaj vrste inertne tvari na smanjivanje tlaka eksplozije kod smeđeg ugljena. U ovom slučaju ugljični dioksid se pokazao kao bolja inertna tvar od ostalih. Tlak eksplozije eksplozivne smjese brže pada, odnosno ugljični dioksid bolje uguši eksploziju na istoj koncentraciji kisika od drugih navedenih inertnih tvari.



Slika 4.7 Utjecaj koncentracije kisika na tlak eksplozije smeđeg ugljena

4.1.1 Veličine u pokusu

Mjere se sljedeći parametri $\mathbf{y_j}$ (izlazne veličine iz sustava):

- najveći tlak u ovisnosti o koncentraciji prašine i inertnog plina (p_{max})
- najveća brizanca o koncentraciji prašine i inertnog plina $(dp/dt)_{max}$
- vrijeme paljenja t_1

Iz gore izmjerenih parametara izračunat će se:

- konstanta eksplozivnosti K_{Stmax} u ovisnosti o p_{max} za pojedinu smjesu

Konstanta eksplozivnosti izračunava se iz Kubičnog zakona prema jednadžbi (1).

Gore navedeni parametri mjeriti će se za svaki odabrani postotak kisika. Na slikama 4.5 i 4.6 prikazano je da se smanjivanjem koncentracije kisika smanjuju i tlakovi eksplozije te brizanca no međutim to ne mora biti tako. Snižavanje tlakova eksplozije prvenstveno ovisi o samoj prašini i inertiziranoj atmosferi. U zatvorenom sustavu može se dogoditi da se tlak eksplozije i poveća jer može doći do kemijske reakcije s inertnim plinom te nastanak plinova izgaranja koji na kraju uzrokuju povećanje a ne snižavanje tlaka. To ide u prilog činjenici da su prašine vrlo opasne te je potrebno provesti sva ispitivanja kako bi se provjerila učinkovitost primijenjenog zaštitnog sustava.

Ispituje se $\mathbf{x_i}$ (nezavisne varijable): smjesa koja se sastoji od:

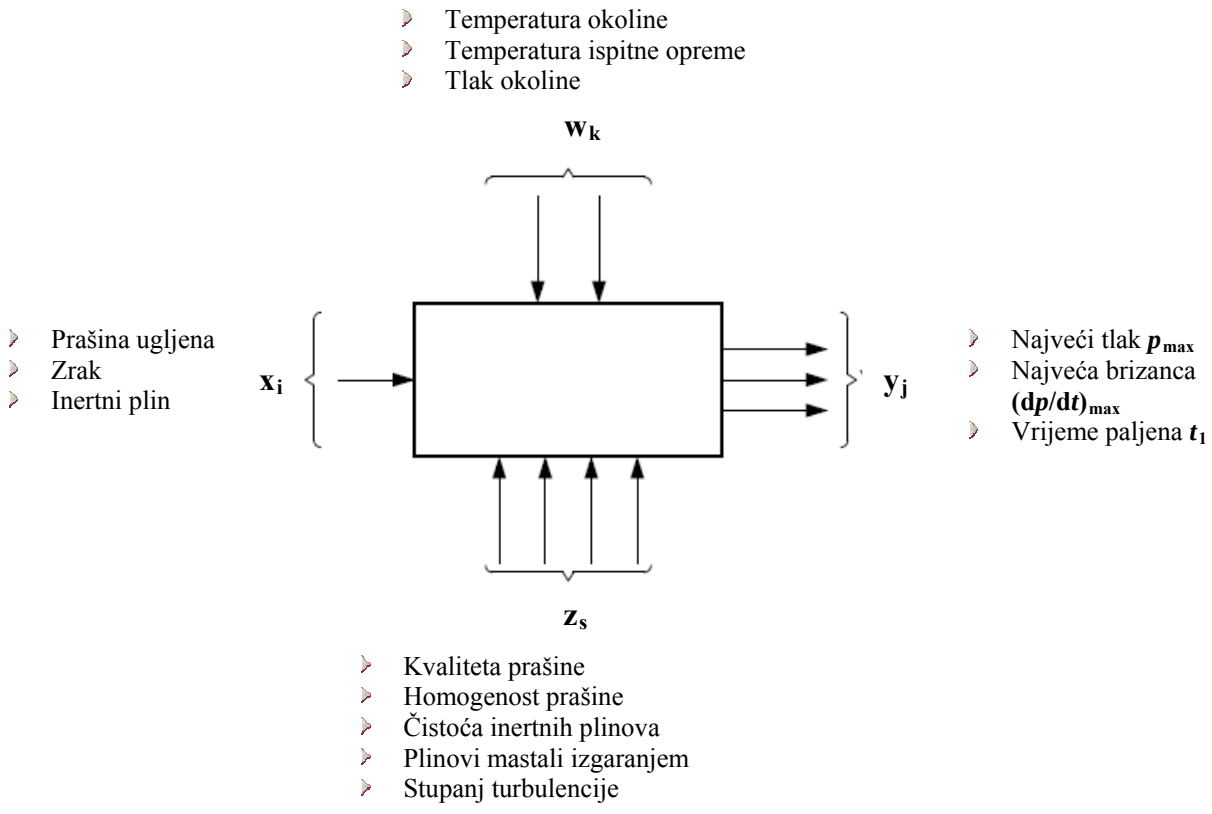
- ugljene prašine (koncentracije 250 g/m^3, 500 g/m^3 i 750 g/m^3)
- zraka (21 % kisika)
- inertnog plina (za osiguravanje 19 % kisika, 17 % kisika, 15 % kisika i 12 % kisika u smjesi)

Donja granična koncentracija kisika (12 %) odabrana je iz razloga što se prema literaturnim podacima kao donja granična koncentracija kisika, za prašinu ugljena, obično navodi koncentraciju u granicama od 16,5 % do 14 % kisika.

Utjecajni faktori $\mathbf{z_s}$:

- kvaliteta prašine
- homogenost prašine
- čistoća inertnih plinova
- plinovi nastali izgaranjem
- stupanj turbulencije

Uvjeti ispitivanja $\mathbf{w_k}$ za svaki pokus su konstantni (temperatura okoline i tlak okoline). Temperatura okoline je 22 ^{o}C, temperatura ispitne opreme (kugla volumena 20 dm^3) se drži konstantno na 20 ^{o}C dok je tlak okoline 1000 Pa.



Slika 4.8 Prikaz faktora koji djeluju na sustav te izlazne veličine

Na ispitivanje učinkovitosti inertizacije utječe nekoliko bitnih parametara:

- vrsta prašine (granulacija, vlaga, volatili ...)
- inertni plinovi
- izvor paljenja (kemijske pripale)
- stupanj turbulencije oblaka prašine
- plinovi koji nastaju tijekom izgaranja
- početni tlak
- početna temperatura

Prašina je definirana sa svojim svojstvima kao što su granulacija, vlaga, volatili ...i sl. Generalno govoreći, što je granulacija veća i više vlage to je potrebna i veća energija paljenja prašine. S druge strane, što je više postotaka volatila to će biti snažnija eksplozija. Inertni plinovi su važna komponenta inertizacije i vrlo je važno uvidjeti utjecaj odnosno reakciju same prašine i plina. Može se dogoditi kemijska reakcija koja će povećati sam tlak eksplozije. Plinovi koji nastaju tijekom izgaranja imaju veliki utjecaj na učinkovitost same inertizacije jer oni isto tako mogu reagirati sa samom prašinom. Stupanj turbulencije, izvor paljenja, početni tlak i temperatura osigurani su samom metodom odnosno laboratorijskom aparaturom koja je opisana u poglavlju 4.3.

4.2 Vrsta prašine i inertni plinovi

Za potrebe ovog ispitivanja uzeta je prašina iz Rudnika mrkog ugljena Breza, BiH. Prema tablici 4.1, prašina ugljena je vrlo kvalitetna što se može zaključiti prema postotku gorive materije, volatila i C_{fix}. Za ovo ispitivanje uzeta je pretpostavka da je ispitni uzorak homogen te da je jednak tijekom cijelog ispitivanja.

Tablica 4.1 *Imedijatna analiza prašine*

Granulacija ispitnog uzorka	**Ukupna vlaga**	**Pepeo**	**Ukupne negorive materije**	**Gorive materije**	**Isparljive materije**	**Isparljivo bez vlage**	**Volatilne materije**	**Koksni ostatak**	**C_{fix}**
≤ 75 μm	Maseni udio (% m/m)								
	9,01	10,02	19,03	80,97	32,28	23,27	39,87	58,71	48,69

Inertni plinovi koji se koriste u ovom radu su dušik (N_2) i ugljični dioksid (CO_2). Ta dva plina odabrana su iz razloga što su to najčešći plinovi koji se koriste u industriji upravo za potrebe inertizacije te su dostupni na tržištu. Smjese plinova koje se koriste u ovom radu bile su unaprijed pripremljene i stlačene u boce volumena 10 dm^3 pod 150 bar.

4.3 Opis ispitne metode i eksperimenta

Ispitivanja eksplozivnih karakteristika prašine:

- p_{max},
- K_{St},
- dp/dt,
- vrijeme paljenja t_1

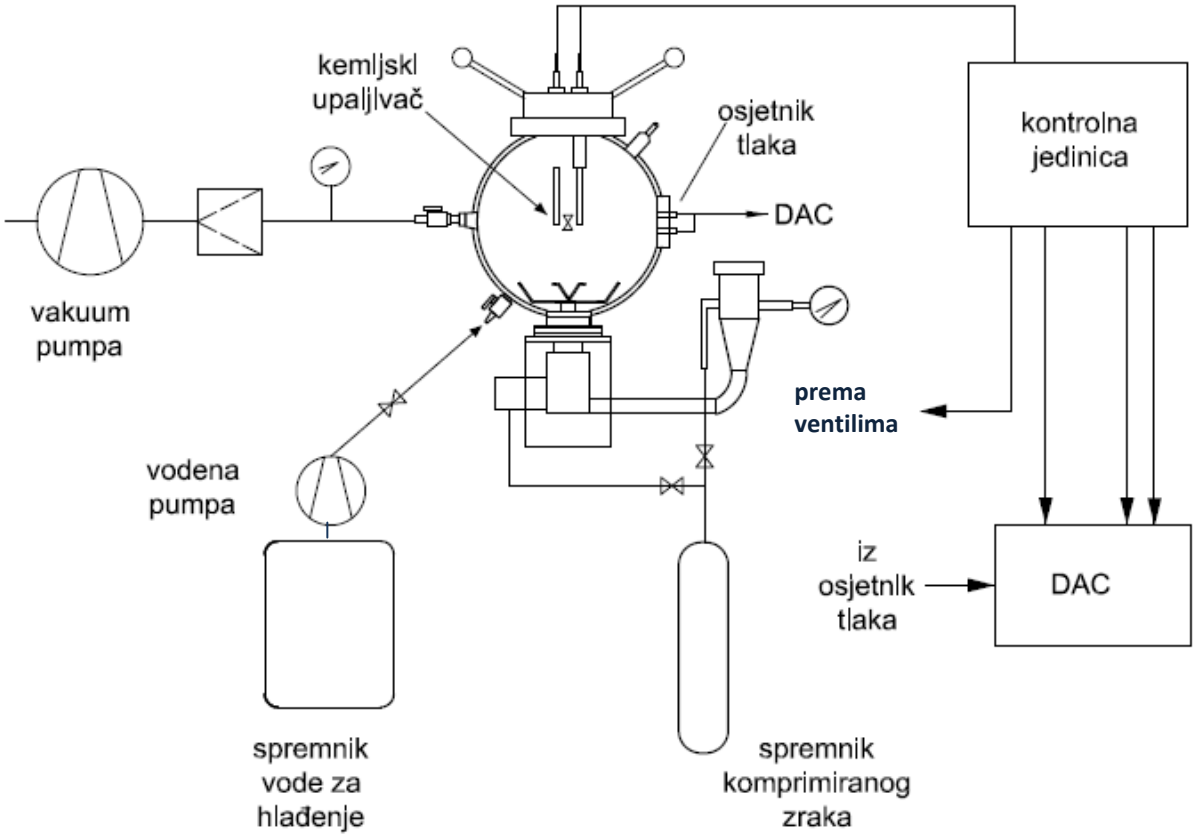
provode se u zatvorenom volumenu, prema nizu normi HRN EN 14034 [2] [3] [4] [5]. Rezultati ispitivanja ovise o nekoliko parametara: vrsti prašine (kemijski sastav...), granulaciji prašine, početnom tlaku i temperaturi, stupnju turbulencije u oblaku prašine te o volumenu ispitne komore. U gore navedenoj normi navedene su dvije ispitne metode tj. dva ispitna volumena:

1. Volumen 1 m^3
2. Volumen 0,02 m^3 (20 dm^3)

U ovom radu koristiti će se metoda 2 odnosno ispitni volumen od 20 dm^3 (slika 4.10).
Vezu između ispitnih volumena daje sljedeća jednadžba:

$$(dp/dt)_{max} \times V^{1/3} = K_{St} \quad (1)$$

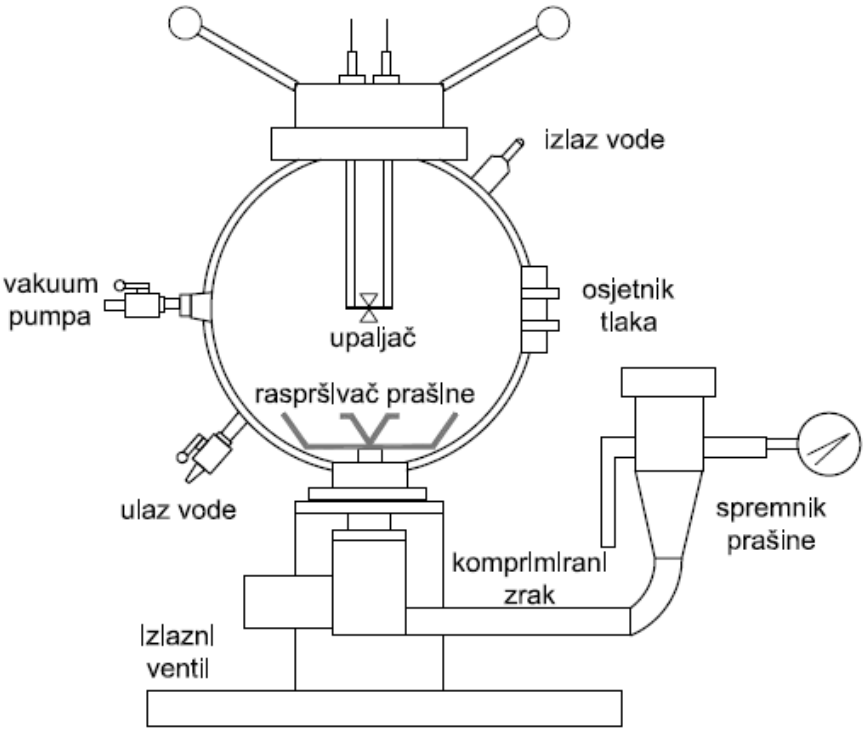
Shematski prikaz ispitne linije dan je na slici 4.9. Ispitna linija sastoji se od posude za izgaranje (ispitna posuda) u obliku kugle (volumen 20 dm^3) izrađene od nehrđajućeg čelika, spremnika za uzorak prašine koji je spojen brzim ventilom s posudom za izgaranje, parom elektroda koje drže kemijske pripale u centru komore za izgaranje i dva osjetnika tlaka koji su smješteni u ravnini unutrašnje stijenke (komore) kugle. Oko komore (s vanjske strane) je plašt te između tog plašta i komore protječe voda temperature 20 ^oC kako bi se omogućili jednaki početni uvjeti za svako ispitivanje.



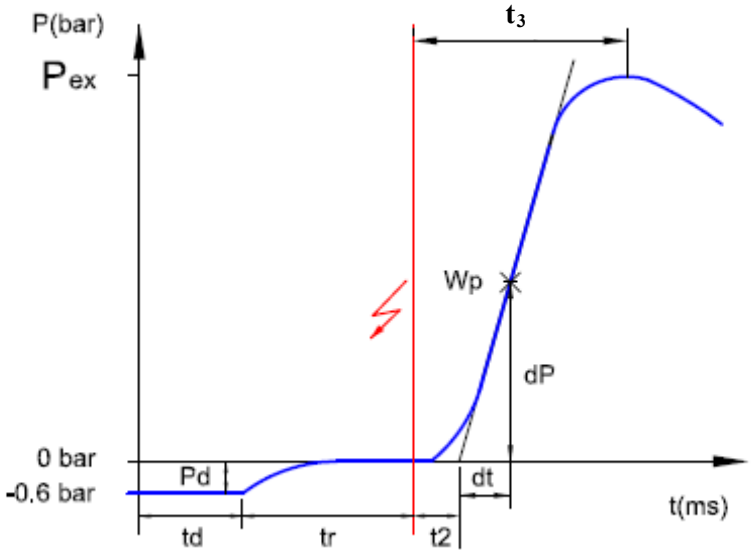
Slika 4.9 Shematski prikaz ispitne linije

U spremnik prašine volumena 0,6 litara (slika 4.10) se stavi određena količina uzorka prašine te se kemijske pripale spoje na elektrode. Nakon spajanje pripala, ispitna komora se zatvori a spremnik uzorka prašine se stavi pod tlak od 20 bara pomoću plina (smjesa zraka i inertnog plina) koji je komprimiran u boci. U spremniku prašine je 21 bar apsolutno. Komora se ispere plinom iz boce (smjesa zraka i inertnog plina) te se stavlja na podtlak od 0,6 bar. Ispitna komora se stavlja pod podtlak iz razloga da se utjecaj okolnog tlaka (≈1 bar) u spremniku svede na najmanju moguću mjeru. Ispitivanje započinje s otvaranjem brzodjelujućeg izlaznog ventila a kratak val smjese inertnog plina i zraka raspršI uzorak prašine pomoću mlaznice (raspršivača) (slika 4.13) u komoru. Nakon 90 ms ventil se zatvara i nakon sljedećih 10 ms upaljači (pripale) se aktiviraju kako bi zapalili oblak prašine. Tako nastali tlak eksplozije (slika 4.11) zabilježe senzori tlaka koji informaciju preko AD/DA pretvornika prenesu u računalo. Nastalu eksploziju može se optički vidjeti preko stakla na ispitnoj komori (slika 4.14). Nakon provedenog ispitivanja ispitna komora i spremnik uzorka prašine se otvore i očiste. Postupak ispitivanja se ponavlja za svaku izabranu koncentraciju prašine i inertnog plina. Za pripalu eksplozivne

smjese koriste se dva kemijska upaljača, svaki energije po 5 kJ. Upaljači se aktiviraju električnim putem.



Slika 4.10 Ispitna posuda (kugla, volumena 20 litara) sa spremnikom za uzorak prašine



Slika 4.11 Tipičan graf tlaka eksplozije u ispitnom uređaju

Pex – najveći nadtlak

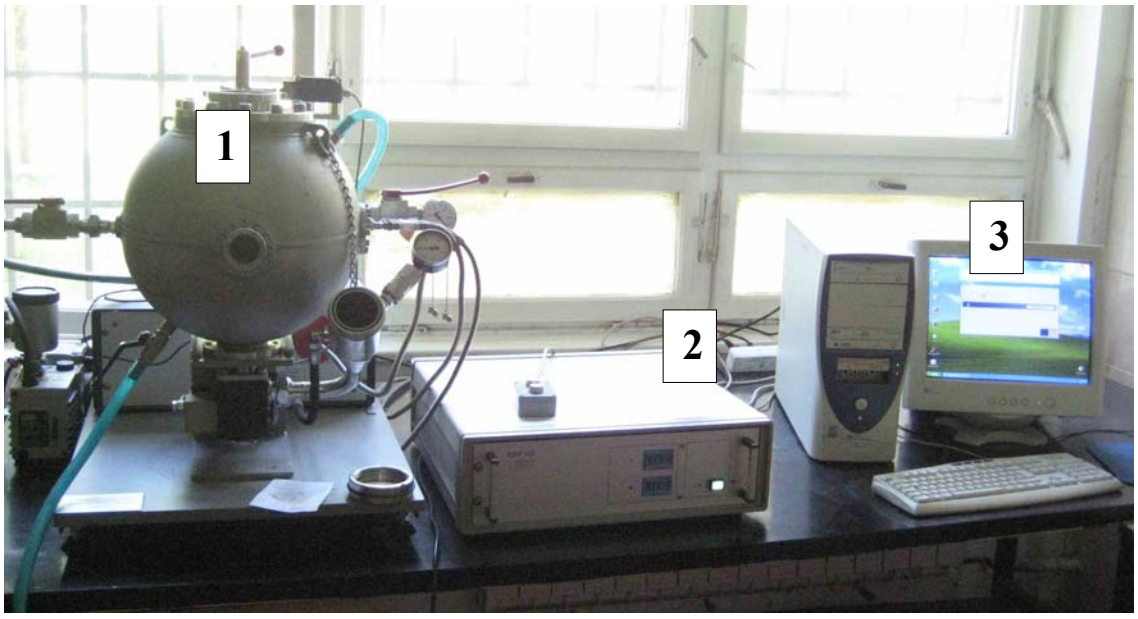
Pd – podtlak pod kojim se nalazi ispitna posuda

td – vrijeme zadržavanja

tr – vrijeme pražnjenja spremnika uzorka prašine (60±5 ms)

t_2 – vrijeme proteklo od inicijacije eksplozije do točke najvećeg porasta tlaka u vremenu $(dp/dt)_{max}$, ms

t_3 – vrijeme proteklo od inicijacije eksplozije do postizanja p_{max}



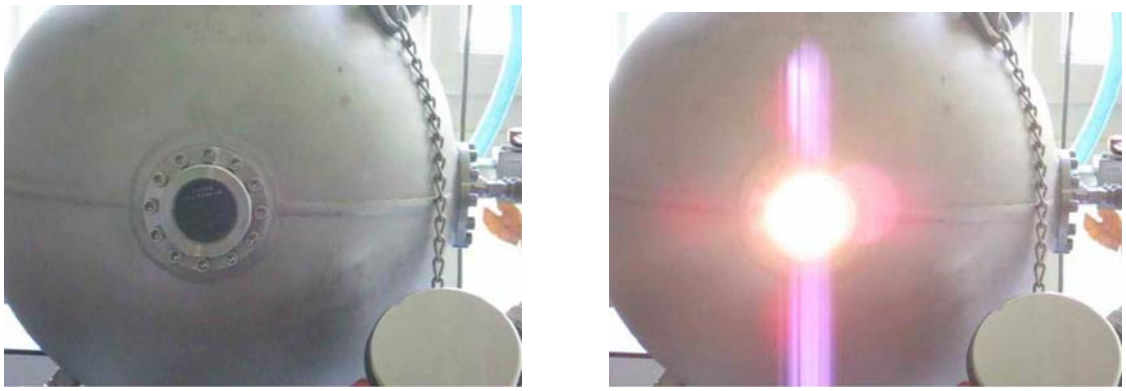
Slika 4.12 Ispitna oprema [14]

Slika 4.12 prikazuje ispitnu opremu na kojoj je ispitivanje rađeno te se sastoji od:

1- Ispitna posuda (Volumen 20 dm^3) sa svom opremom (davači tlaka, kemijski upaljači, vakuum crpka...)
2- Upravljačka jedinica
3- Računalo sa softwareom



Slika 4.13 Mlaznica za raspršivanje uzorka prašine unutar ispitne komore



Slika 4.14 Prikaz ispitne komore neposredno prije i tijekom eksplozije

Osim što se eksplozija može detektirati osjetnicima tlaka isto tako moguće je i vizualno detektirati pojavu paljenja odnosno eksplozije eksplozivne smjese što i pokazuje slika 4.14. Početni uvjeti svakog ispitivanja su jednaki (tlak, temperatura, prašina, turbulencija), a ti parametri osigurani su samom ispitnom metodom i opisanim ispitnim uređajem.

4.4 Cilj ispitivanja

Cilj ispitivanja je ispitati kretanje najvećeg tlaka eksplozije eksplozivne smjese (prašina + zrak) p_{max} prilikom inertizacije inertnim plinovima CO_2 i N_2. Odnosno, vidjeti kako se smanjuju najveći tlakovi u ovisnosti koncentraciji ugljene prašine i koncentraciji kisika u eksplozivnoj smjesi. Na osnovu dobivenih krivulja tlaka eksplozije vidjeti će se i ponašanje varijable dp/dt i t_1 (vrijeme paljenja eksplozivne smjese). Važno je isto tako kod kojeg postotka kisika se dogodi eksplozija i koji je tada najveći tlak eksplozije. Svrha ovog ispitivanja je ustanoviti koje je sredstvo za inertizaciju učinkovitije u smislu razvoja eksplozije. Sama inertizacija nekog sustava (mljevenje, filtriranje, transport, skladištenje...) ima svrhu držati koncentraciju kisika u eksplozivnoj smjesi ispod donje granične koncentracije kisika koja je potrebna da bi se eksplozija uopće mogla razviti.

5. PROVEDBA ANALIZE REZULTATA ISPITIVANJA

5.1 Rezultati ispitivanja i statistička analiza

Cilj ispitivanje je utvrditi kakav utjecaj ima vrsta inertne tvari na postizanje najvećeg tlaka eksplozije, odnosno ispitivanje učinkovitosti inertne tvari u ovisnosti o koncentraciji iste te kako inertni plin ima utjecaj na vrijeme zapaljenja eksplozivne atmosfere. Potrebno je dobivene rezultate najvećih tlakova za pojedine koncentracije prašina i postotka kisika u smjesi odnosno korištenog inertnog plina aproksimirati krivuljom i pokazati tendenciju kretanja tlakova eksplozije.

Redoslijed izvođenja samih pokusa nije izvođen po slučajnom rasporedu zbog tehnoloških ograničenja već kako je prikazano u tablicama 5.1 i 5.2.
Podaci dobiveni eksperimentalnim radom s ispitnim sustavom statistički su analizirani za potrebe ovog rada, primjenom statističkog programa „Statistica 10.0 “ [30]

5.2 Rezultati ispitivanja kod inertizacije eksplozivne smjese dušikom (N_2)

Za određivanje najvećeg tlaka eksplozije eksplozivne smjese potrebno je ispitati smjesu koja se sastoji od ugljene prašine i zraka (21 % O_2). Ispitivanja su se radila s tri koncentracije prašina kako je navedeno u tablici ispod. U tablica 5.1 dani su rezultati ispitivanja smjese se zrakom te inertizirane smjese s inertnim plinom dušikom (N_2).

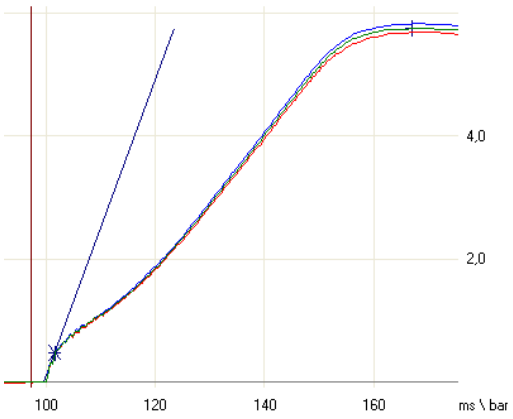
Tablica 5.1 *Eksplozivne karakteristike ugljene prašine u sustavu inertiziranom dušikom*

Koncentracija g/m^3	**p_{max} (bar)**	**dp/dt (bar/s)**	**t_1 (ms)**	**K_{st} (m·bar/s)**
1. Smjesa ugljena prašina – zrak 21 % O_2				
250	7,9	680	28	177
500	7,7	622	29	
750	7,8	556	36	
2. Smjesa ugljena prašina – 19 % O_2, 81 % N_2				
250	7,1	444	35	121
500	7,1	406	37	
750	7,5	372	52	
3. Smjesa ugljena prašina – 17 % O_2, 83 % N_2				
250	7,4	224	75	132
500	6,5	480	26	
750	7,9	487	34	
4. Smjesa ugljena prašina – 15 % O_2, 85 % N_2				
250	8,1	373	54	137
500	7,1	349	37	
750	8,1	506	47	
5. Smjesa ugljena prašina – 12 % O_2, 88 % N_2				
250	5,8	241	69	75
500	5,6	215	54	
750	4,8	278	68	

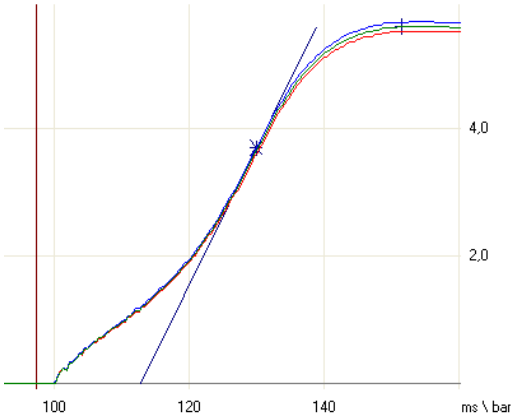
Prema navedenim rezultatima u tablici 5.1 može se zamijetiti da tlak eksplozije ne pada značajno s padom koncentracije kisika u smjesi izuzev kod smjese s 12 % kisika. Najveći tlak eksplozije očekivan je u smjesi prašina-zrak, međutim najveći tlak postignut je u smjesi ugljena prašina-15 % O_2 kod koncentracije prašine od 750 g/m^3 što nije očekivano. Također, iz rezultata se može vidjeti da se najveći porast tlaka u vremenu $(dp/dt)_{max}$ (brizanca) ne pojavljuje uvijek na jednakoj koncentraciji prašine kao najveći tlak eksplozije p_{max}.

Slike 5.1 do 5.15 prikazuju razvoj tlaka u ispitnoj opremi (volumen od 20 dm^3), a rezultati ispitivanja dani su tablici 5.1. Ovdje je potrebno napomenuti da se na sljedećim slikama zbog programa koji se koristi za ispitivanje, prikaz mjerne jedinice i dobivenih vrijednosti za tlak, ne prikazuju s lijeve strane ordinate već s desne. Na apscisi je prikazano vrijeme trajanja tlaka eksplozije izraženo u milisekundama.

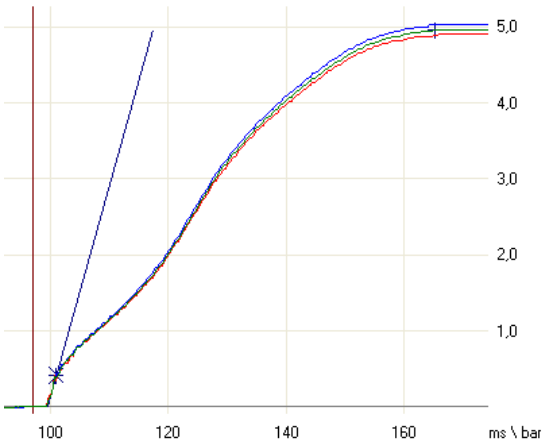
Grafički prikaz najvećih tlakova eksplozija (p_{max}) kod inertizacije eksplozivne smjese dušikom (N_2):



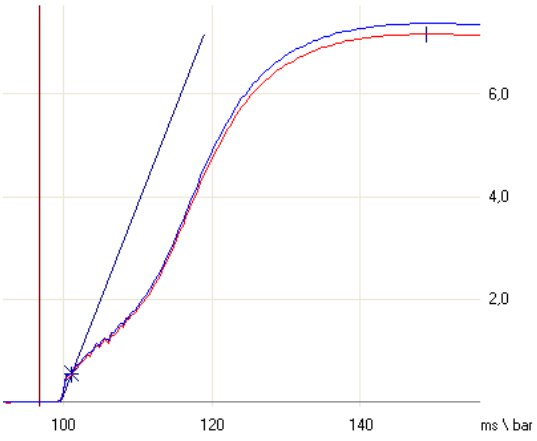
Slika 5.1. Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)



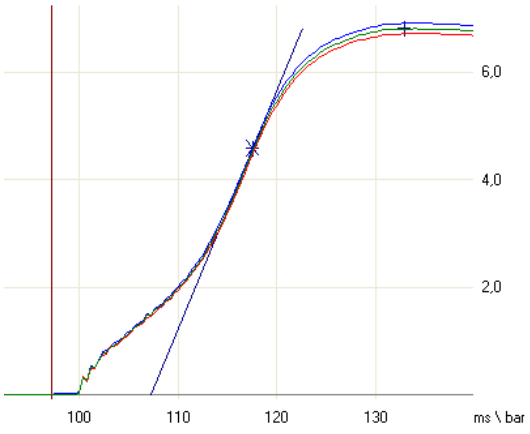
Slika 5.2. Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)



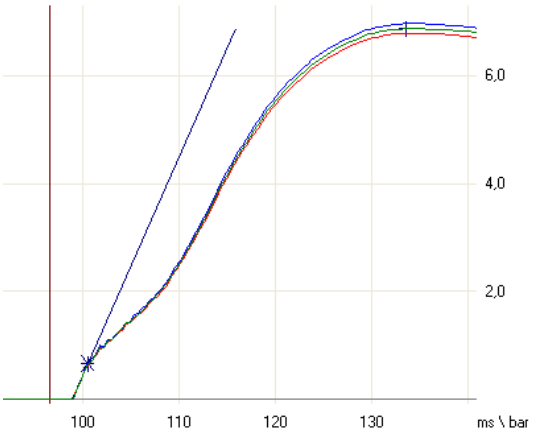
Slika 5.3. Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 21 % O_2 (zrak)



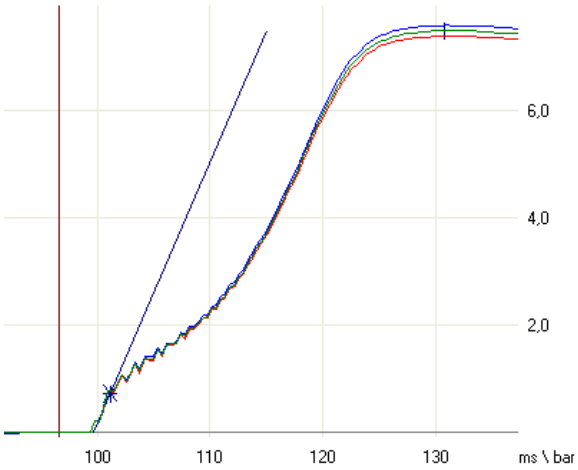
Slika 5.4. Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 19 % O_2



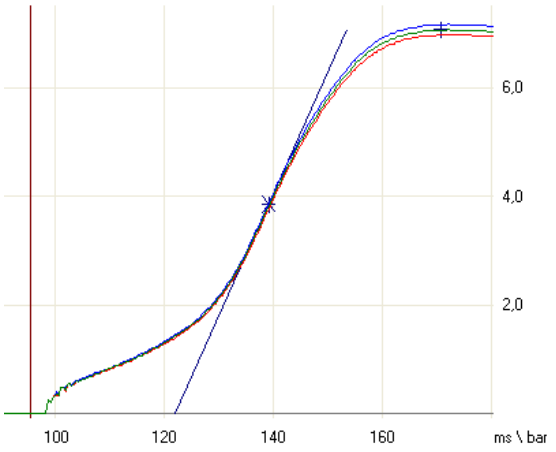
Slika 5.5. Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 19 % O_2



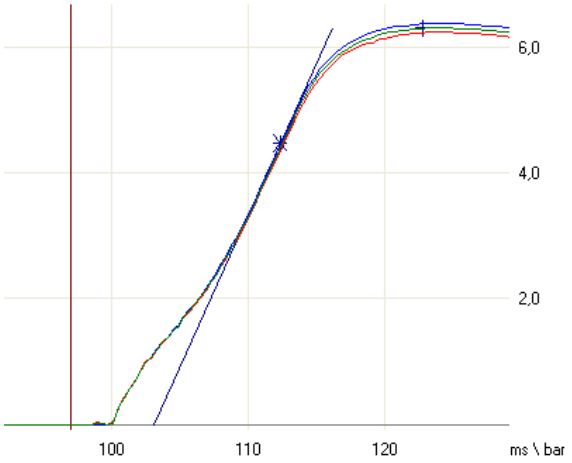
Slika 5.6. Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 19 % O_2



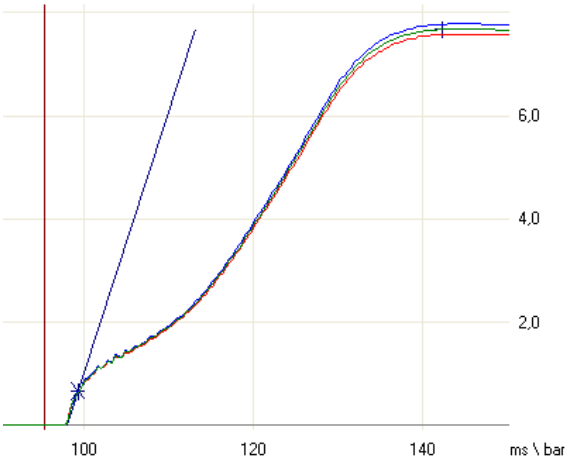
Slika 5.7. Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 17 % O_2



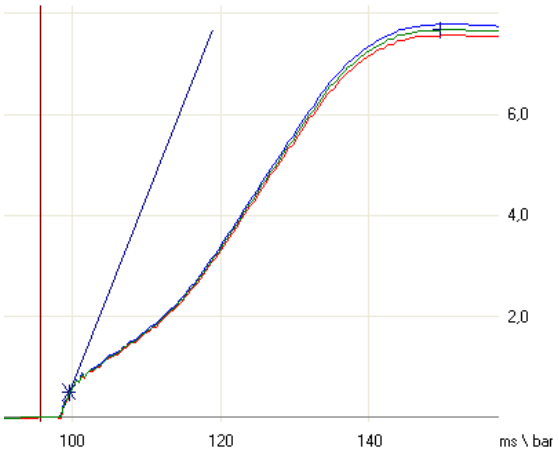
Slika 5.8. Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 17 % O_2



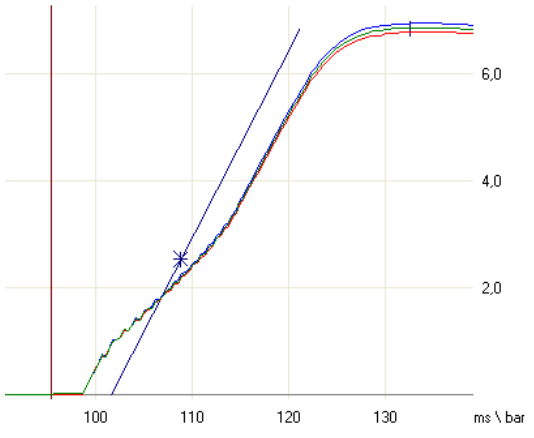
Slika 5.9. Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 17 % O_2



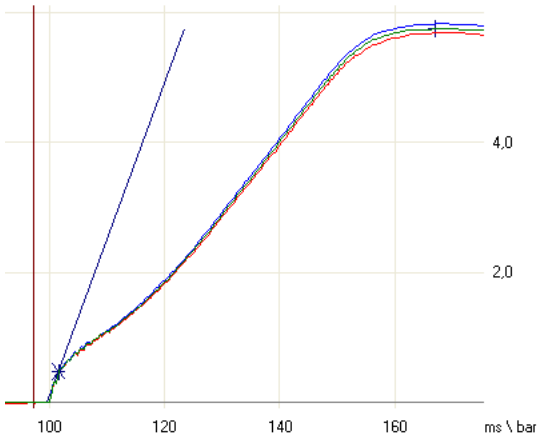
Slika 5.10. Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 15 % O_2



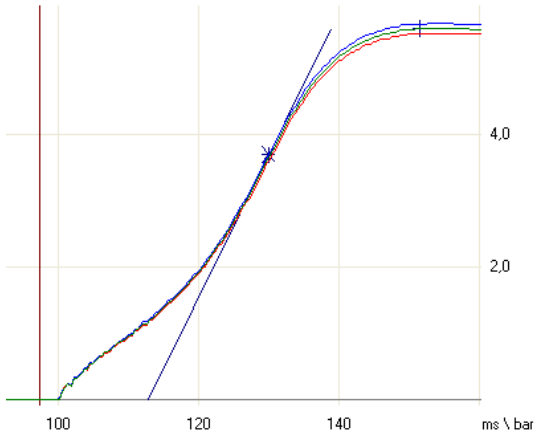
Slika 5.11. Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 15 % O_2



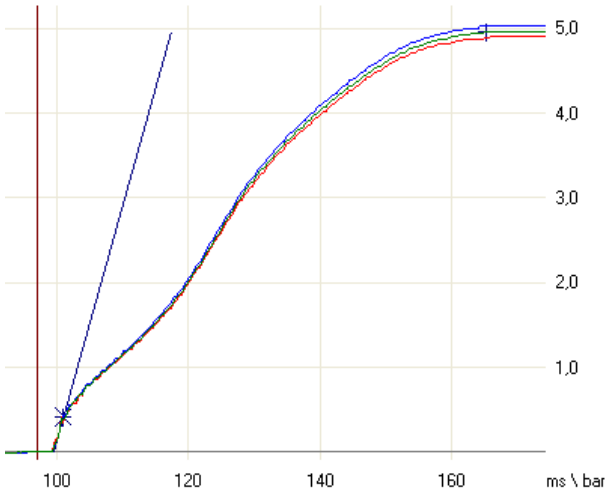
Slika 5.12. Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 15 % O_2



Slika 5.13. Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 12 % O_2

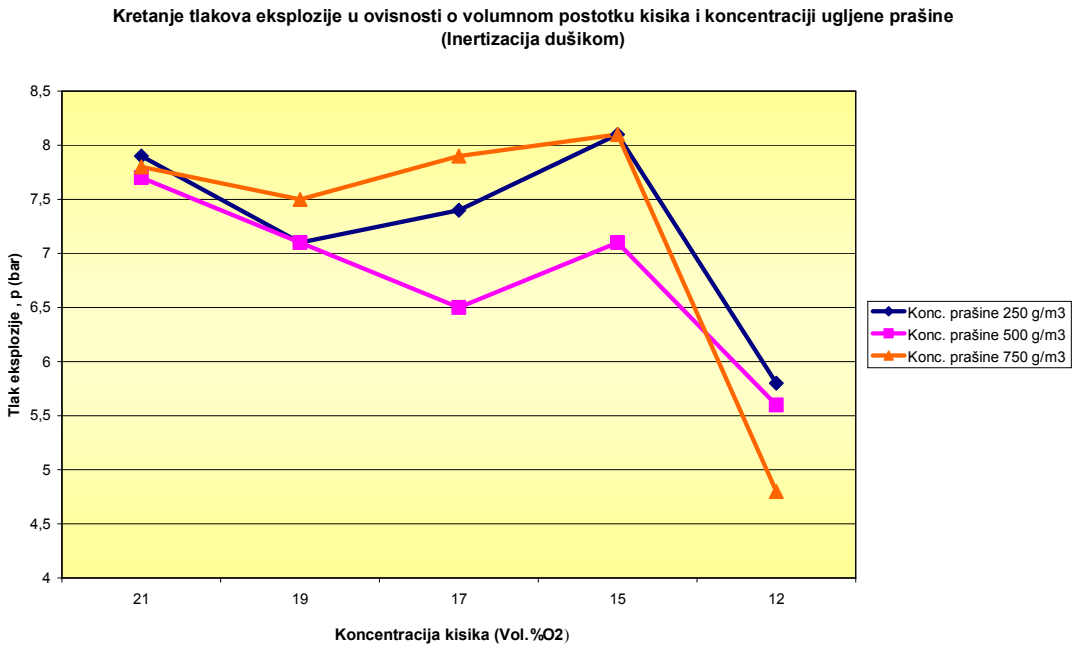


Slika 5.14. Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 12 % O_2



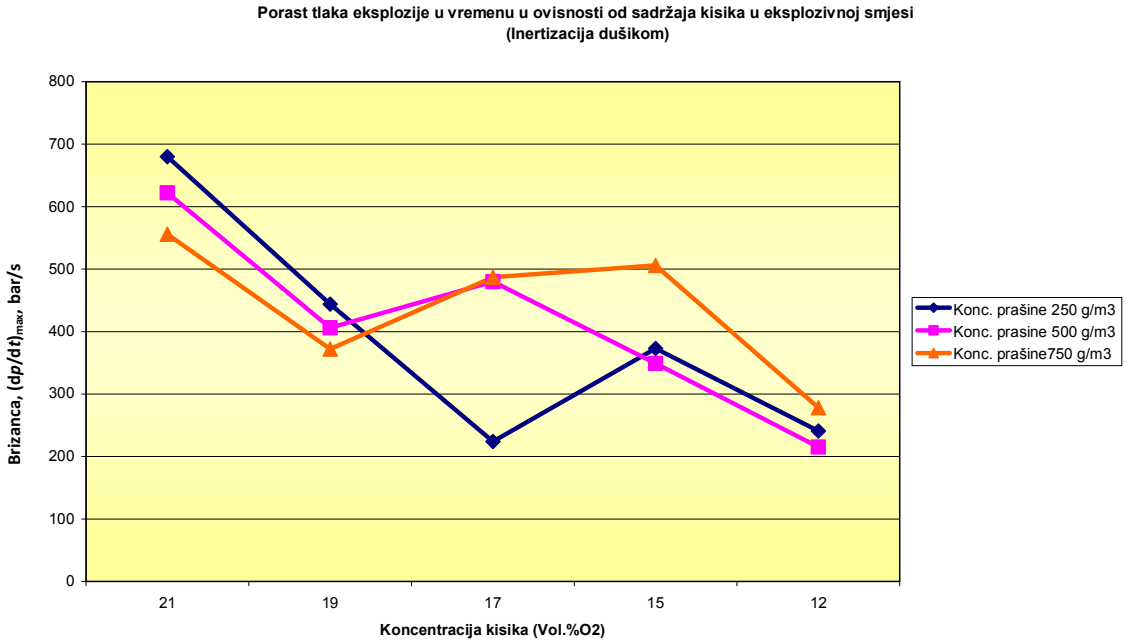
Slika 5.15. Koncentracija prašine c= 750 g/m^3, 12 % O_2

Slika 5.16 grafički opisuje tendenciju kretanja najvećih tlakova eksplozije u određenoj smjesi. Kod 15 % O_2 dogodio se porast najvećeg tlaka u odnosu na smjesu prašina-zrak (21 % O_2) te je to mogući indikator da se u određenom trenutku dogodila kemijska reakcija koja je uzrokovala povećanje a ne smanjenje tlaka eksplozije što bi bilo i za očekivati s navedenim postotkom kisika (volumnim udjelom u smjesi).

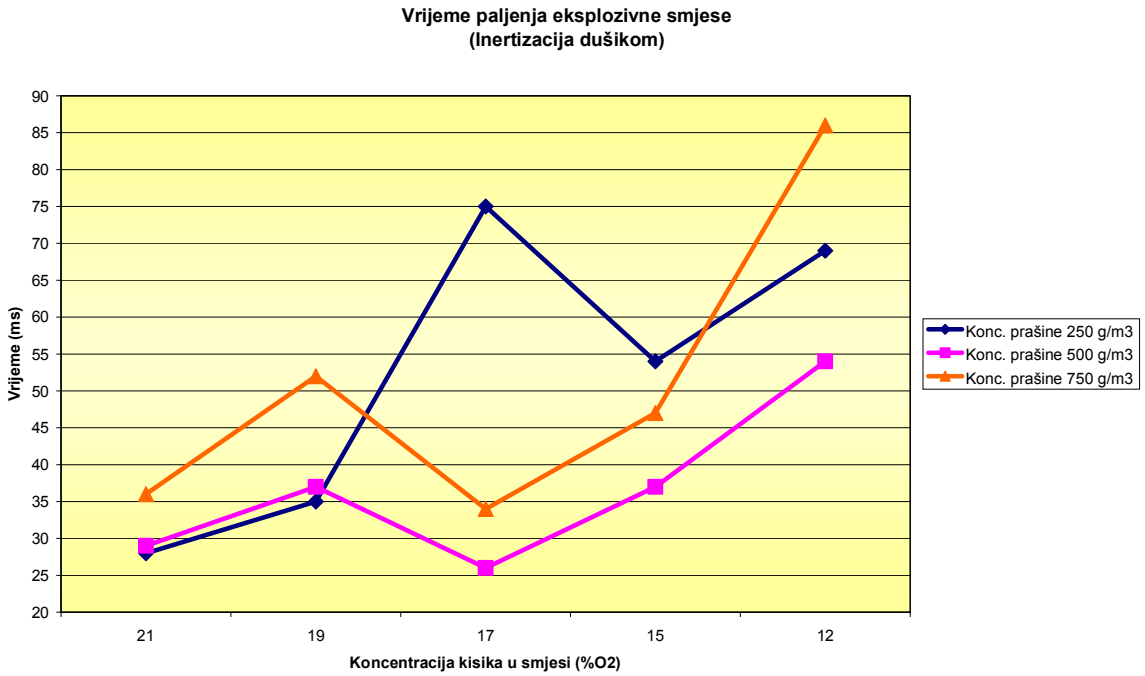


Slika 5.16 Tendencija kretanja najvećih tlakova u smjesi inertiziranoj dušikom

Slika 5.17 prikazuje općenito tendenciju smanjivanja vrijednosti $(dp/dt)_{max}$ po pojedinim smjesama. Kod 19 % O_2 došlo je do pada ali u sljedećim točkama došlo je do blagog porasta osim kod koncentracije prašine od 250 g/m^3. Općenito se može zaključiti da se brizanca $(dp/dt)_{max}$ smanjuje s padom koncentracije kisika u smjesi, međutim postoje točke naglog rasta vrijednosti $(dp/dt)_{max}$ što se može objasniti kemijskim reakcijama tijekom same eksplozije.

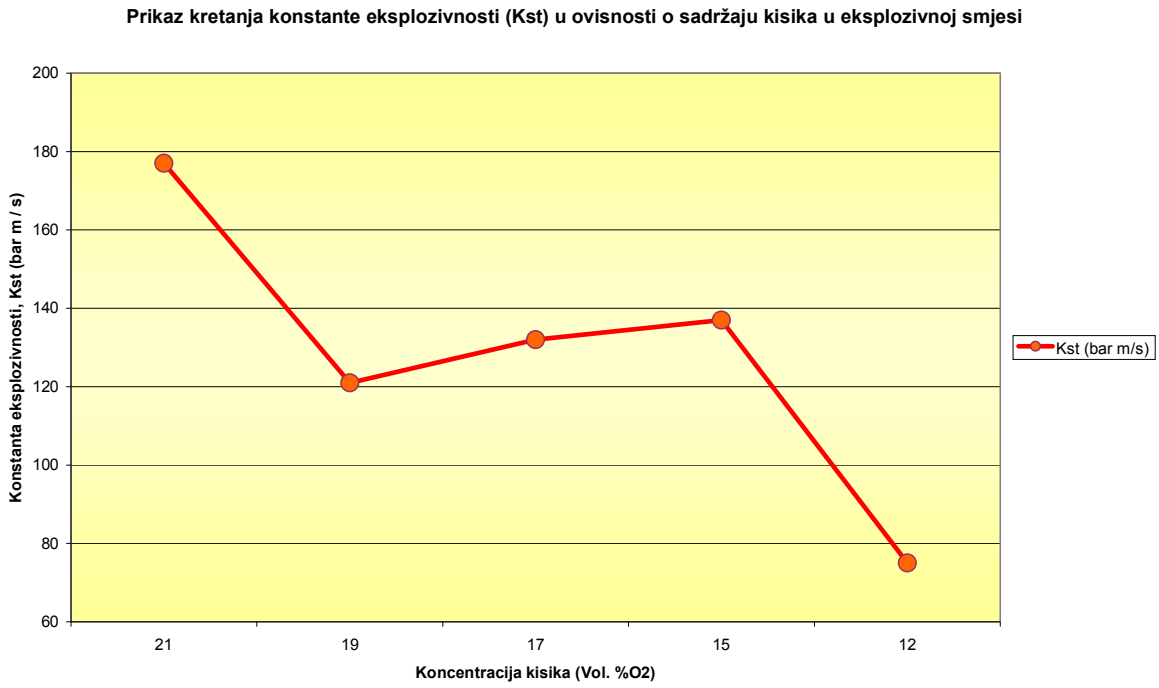


Slika 5.17 Tendencija brizance u atmosferi inertiziranoj dušikom



Slika 5.18 Tendencija vrijednosti vremena paljenja u odnosu na volumni udio kisika u smjesi

Vrijeme paljenja eksplozivne smjese t_1 najkraće je kod 17 % O_2 i to kod koncentracije prašine od 500 g/m^3 i 750 g/m^3 čak ispod vrijednosti t_1 koja je dobivena u smjesi s zrakom dok kod koncentracije prašina od 250 g/m^3 vrijednost t_1 značajno je produljena. Što je bilo i očekivano, najveća vrijednost t_1 je kod 12 % O_2 kod svih koncentracija prašina kao što i prikazuje slika 5.18.



Slika 5.19 Prikaz računske vrijednosti K_{St} u ovisnosti o volumnom udjelu kisika u smjesi

Slika 5.19 prikazuje računsku vrijednost K_{St} i njegovu karakteristiku u ovisnosti o volumnoj koncentraciji kisika. Prema navedenoj slici karakteristika nije linearna. Kao što je i bilo za očekivati, najveći iznos K_{St} -a je kod smjese ugljene prašine i zraka. Kod smjese s 19 % kisika dogodio se značajan pad vrijednosti K_{St}-a, međutim kod 17 % odnosno 15 % kisika vrijednost K_{St} -a je blago porasla u odnosu na smjesu s 19 % kisika. Značajan pad vrijednosti K_{St} -a, a koji je u jedno i najmanji dogodio se kod smjese s 12 % kisika.

5.3 Rezultati ispitivanja kod inertizacije ugljičnim dioksidom (CO_2)

U tablici 5.2 dani su rezultati ispitivanja kod inertizacije eksplozivne smjese s ugljičnim dioksidom. Najveći tlakovi eksplozije eksplozivne smjese s zrakom dobiveni su u prethodnom ispitivanju te su ovdje samo navedeni. Kao i u prethodnom ispitivanju, ispitivanja su se radila za tri različite koncentracije prašina.

Tablica 5.2. *Eksplozivne karakteristike ugljene prašine u sustavu inertiziranom ugljičnim dioksidom*

Koncentracija g/m^3	**p_{max} (bar)**	**dp/dt (bar/s)**	**t_1 (ms)**	**K_{St} (m·bar/s)**
1. Smjesa ugljena prašina – zrak 21 % O_2				
250	7,9	680	28	177
500	7,7	622	29	
750	7,8	556	36	
2. Smjesa ugljena prašina - 19 % O_2, 9,5 % CO_2, 71,5 % N_2				
250	8,6	518	38	141
500	8,2	469	33	
750	8,8	511	44	
3. Smjesa ugljena prašina - 17 % O_2, 19 % CO_2, 64 % N_2				
250	6,7	401	43	148
500	5,8	547	30	
750	6,6	501	39	
4. Smjesa ugljena prašina - 15 % O_2, 29 % CO_2, 56 % N_2				
250	5,0	358	92	97
500	5,7	356	57	
750	6,1	294	122	
5. Smjesa ugljena prašina - 12 % O_2, 43 % CO_2, 45 % N_2				
250	nema eksplozije			80
500	4,7	295	226	
750	4,3	202	84	

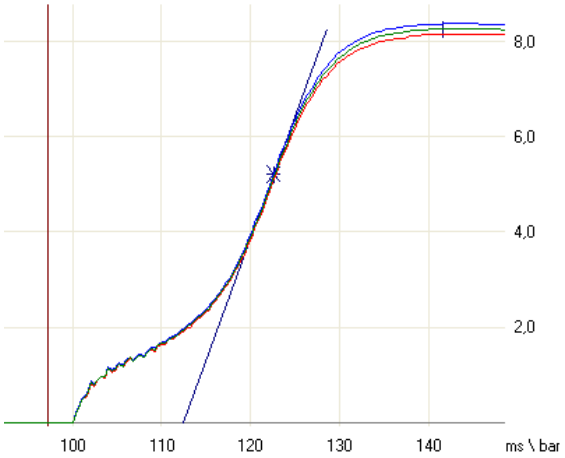
Najveći tlak eksplozije kod 19 % kisika postignut je kod koncentracije ugljene prašine 750 g/m^3, najveći tlak eksplozije kod 17 % kisika postignut je kod koncentracije ugljene prašine 250 g/m^3, kod koncentracije kisika od 15 % najveći tlak eksplozije postignut je kod koncentracije ugljene prašine od 750 g/m^3 dok je kod koncentracije kisika od 12 % najveći tlak eksplozije postignut kod koncentracije ugljene prašine od 500 g/m^3. Kod slučaja kod kojeg je u smjesi 12 % kisika i koncentracije ugljene prašine od 250 g/m^3 nije došlo do eksplozije (slika 5.29). Isto tako možemo zamijetiti da se najveća vrijednost $(dp/dt)_{max}$ pojavljuje neovisno o najvećem postignutom tlaku eksplozije i koncentraciji ugljene

prašine. Najmanje vrijeme paljenja t_1 pojavljuje se neovisno od pojave najvećeg tlaka eksplozije (p_{max}) i brizance $(dp/dt)_{max}$.

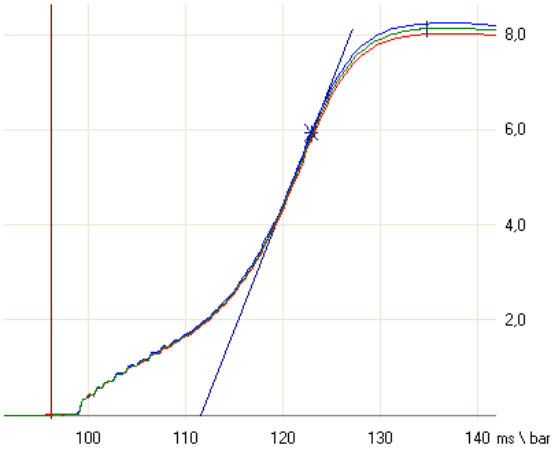
Na slikama od 5.20 do 5.31 prikazan je razvoj tlaka u ispitnoj opremi (volumen od 20 dm^3), a rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.2.

Grafički prikaz najvećih tlakova eksplozija (p_{max}) kod inertizacije eksplozivne smjese ugljičnim dioksidom (CO_2):

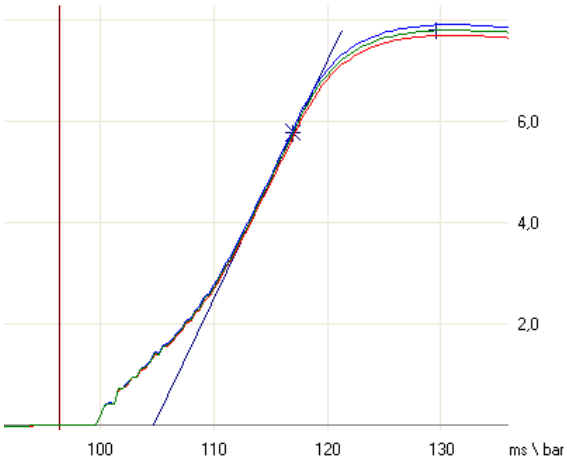
Tlakovi eksplozija (p_{max}) kod normalnog zraka (21 % O_2) prikazani su na slikama 5.1, 5.2 i 5.3.



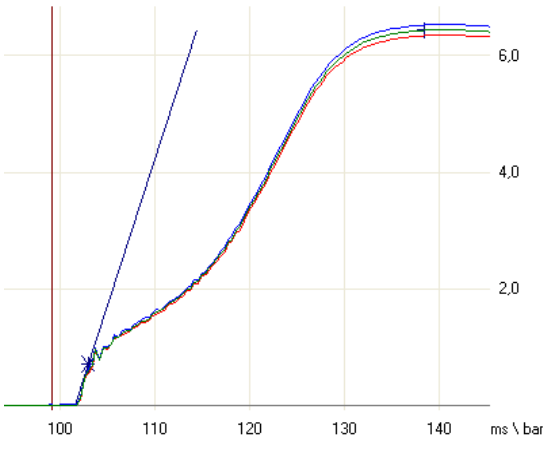
Slika 5.20 Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 19 % O_2



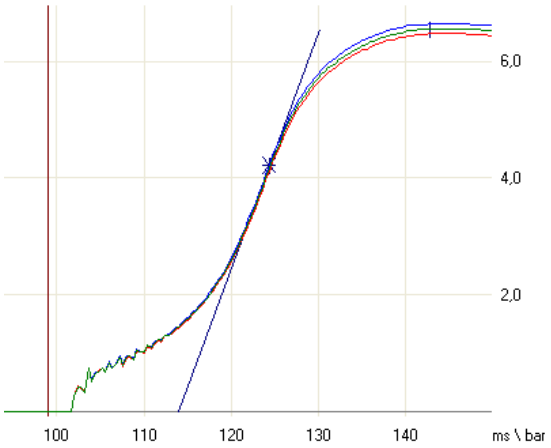
Slika 5.21 Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 19 % O_2



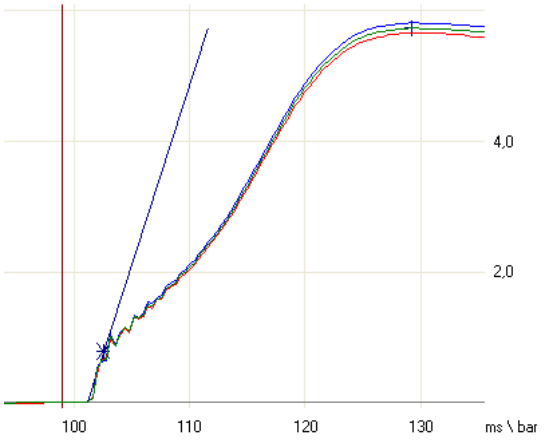
Slika 5.22 Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 19 % O_2



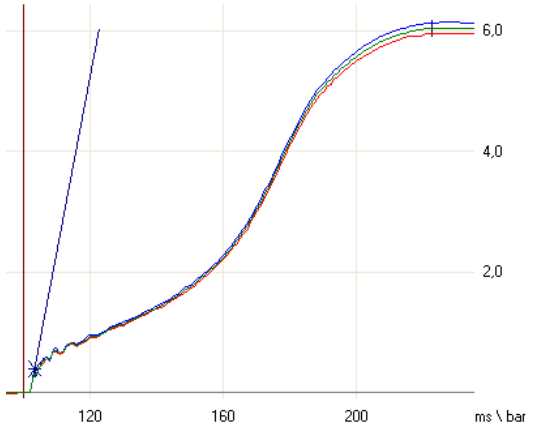
Slika 5.23 Koncentracija prašine c= 250g/m^3, 17 % O_2



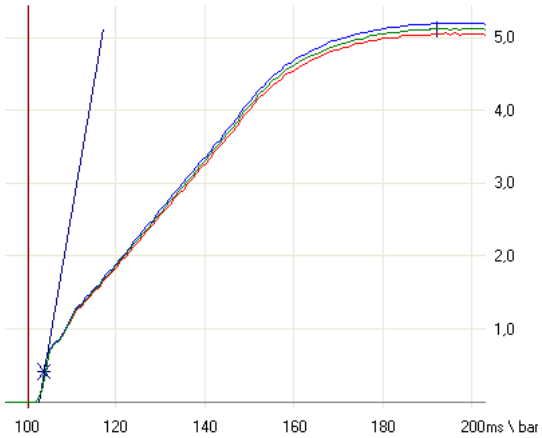
Slika 5.24 Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 17 % O_2



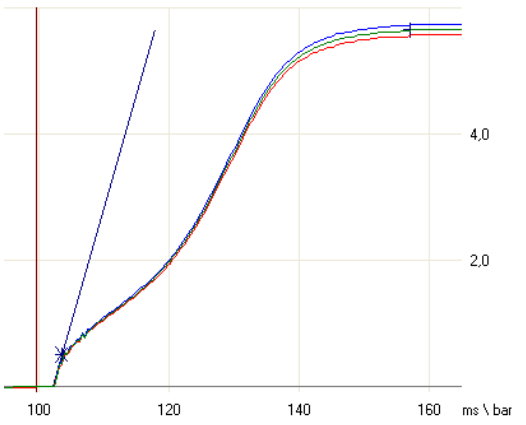
Slika 5.25 Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 17 % O_2



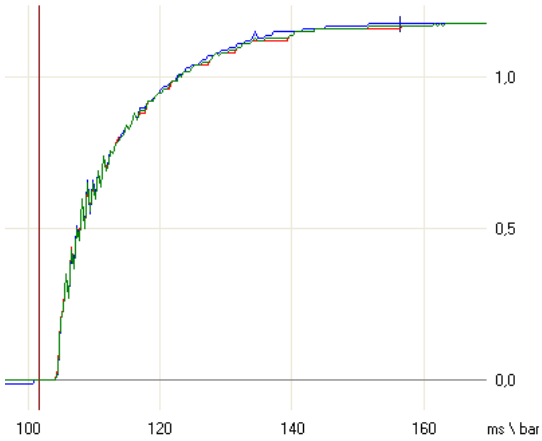
Slika 5.26 Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 15 % O_2



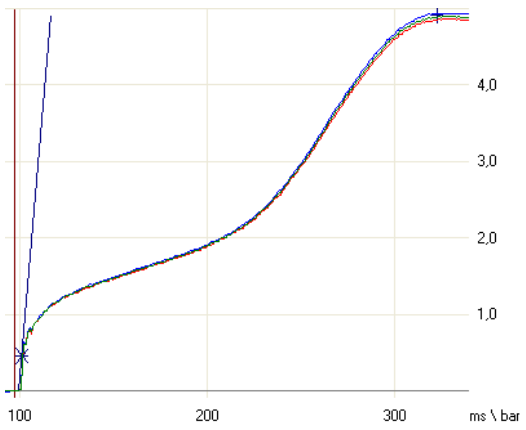
Slika 5.27 Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 15 % O_2



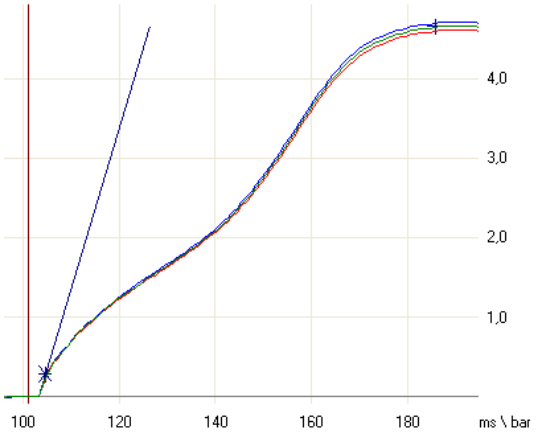
Slika 5.28 Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 15 % O_2



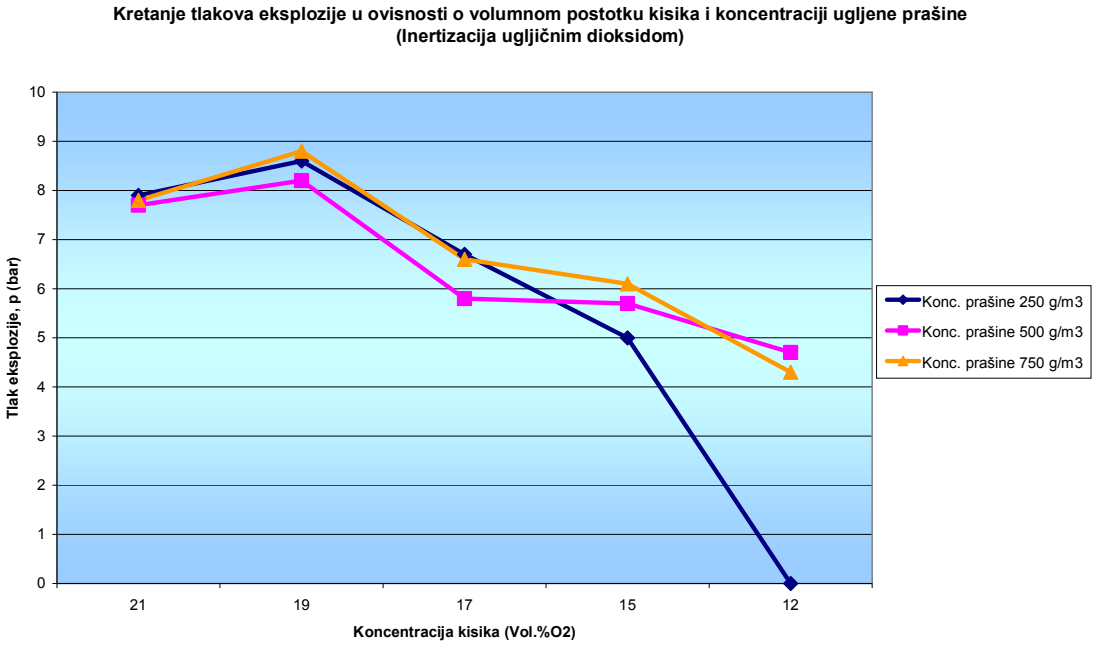
Slika 5.29 Koncentracija prašine c= 250 g/m^3, 12 % O_2



Slika 5.30 Koncentracija prašine c= 500 g/m^3, 12 % O_2



Slika 5.31 Koncentracija prašine c=750 g/m^3, 12 % O_2

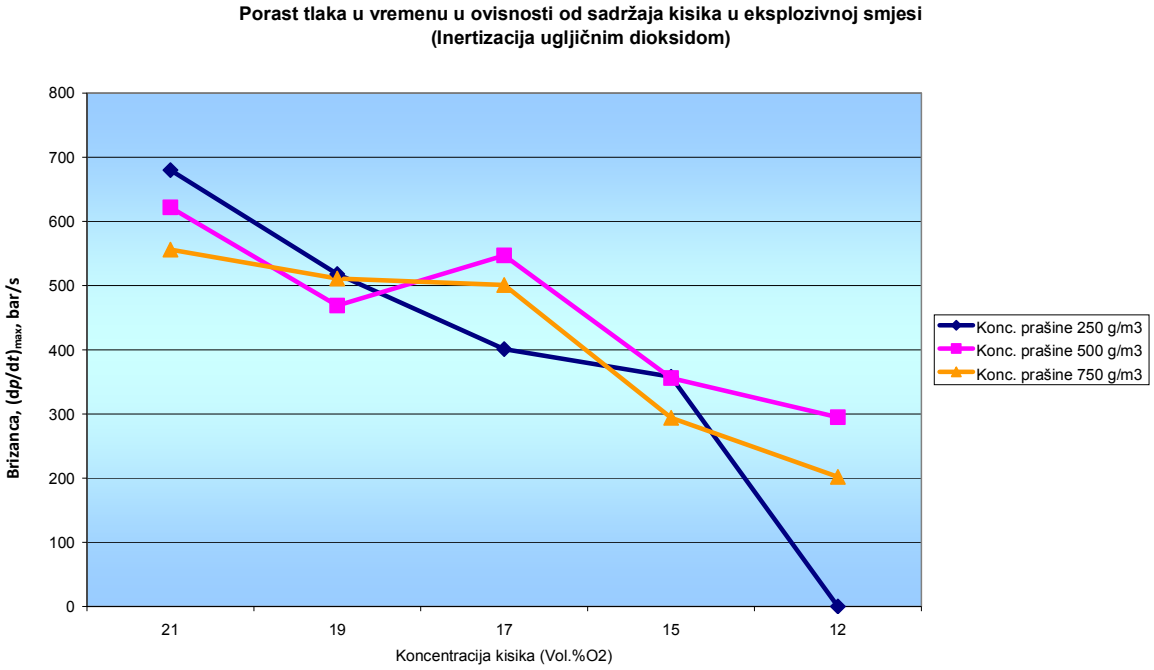


Slika 5.32 Tendencija kretanja najvećih tlakova u smjesi inertiziranoj ugljičnim dioksidom

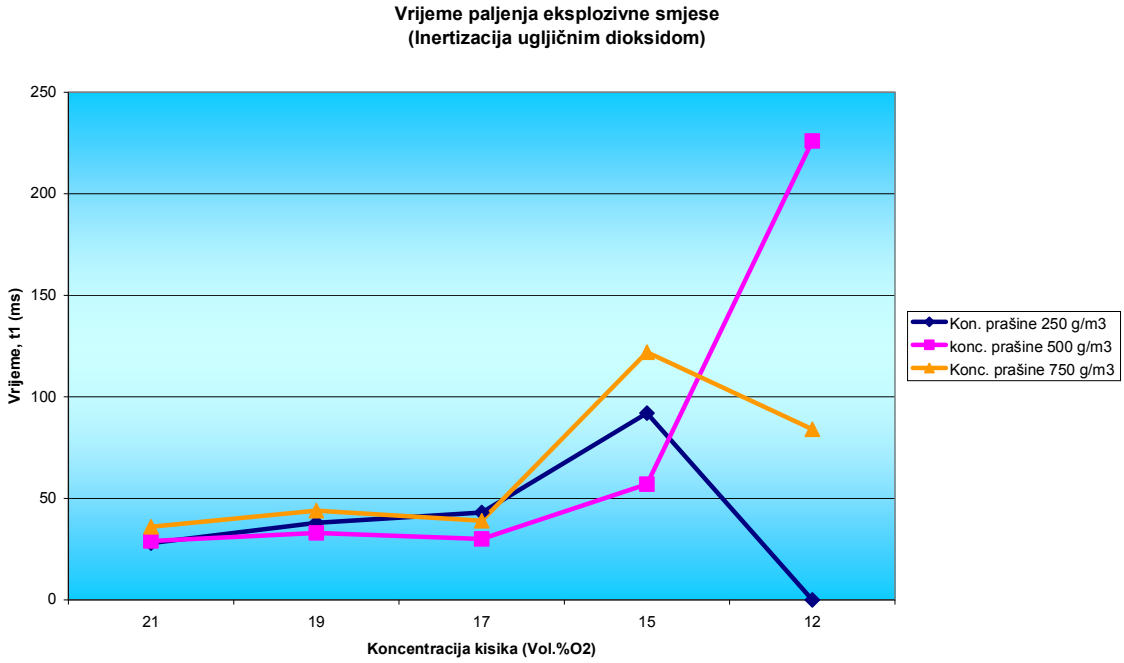
Slika 5.32 grafički opisuje tendenciju kretanja najvećih tlakova eksplozije u određenoj smjesi. Kod 19 % O_2 dogodio se porast najvećeg tlaka u odnosu na smjesu prašina-zrak (21 % O_2) te je to mogući indikator da se u određenom trenutku dogodila kemijska reakcija koja je uzrokovala povećanje a ne smanjenje tlaka eksplozije što bi bilo i za očekivati s navedenim postotkom kisika. Kod 12 % kisika dobili su se i najmanji tlakovi eksplozije a kod koncentracije prašine od 250 g/m^3 eksplozija smjese se nije niti dogodila.

Slika 5.33 prikazuje općenito tendenciju smanjivanja vrijednosti $(dp/dt)_{max}$ po pojedinim smjesama. Kod 17 % O_2 došlo je do blagog porasta vrijednosti osim kod koncentracije prašine od 250 g/m^3. Općenito se može zaključiti da vrijednost porasta tlaka u vremenu $(dp/dt)_{max}$ se smanjuje s padom koncentracije kisika u smjesi, te da ima pojedinih

povećanja vrijednosti u ovisnosti o koncentraciji prašine u smjesi. Posljedično, kada nam je p_{max} jednak nuli (eksplozija se nije dogodila) tada je i vrijednost $(dp/dt)_{max}$ jednaka nuli što je slučaj kod koncentracije ugljene prašine od 250 g/m^3 i koncentracije kisika od 12 % (slika 5.29).

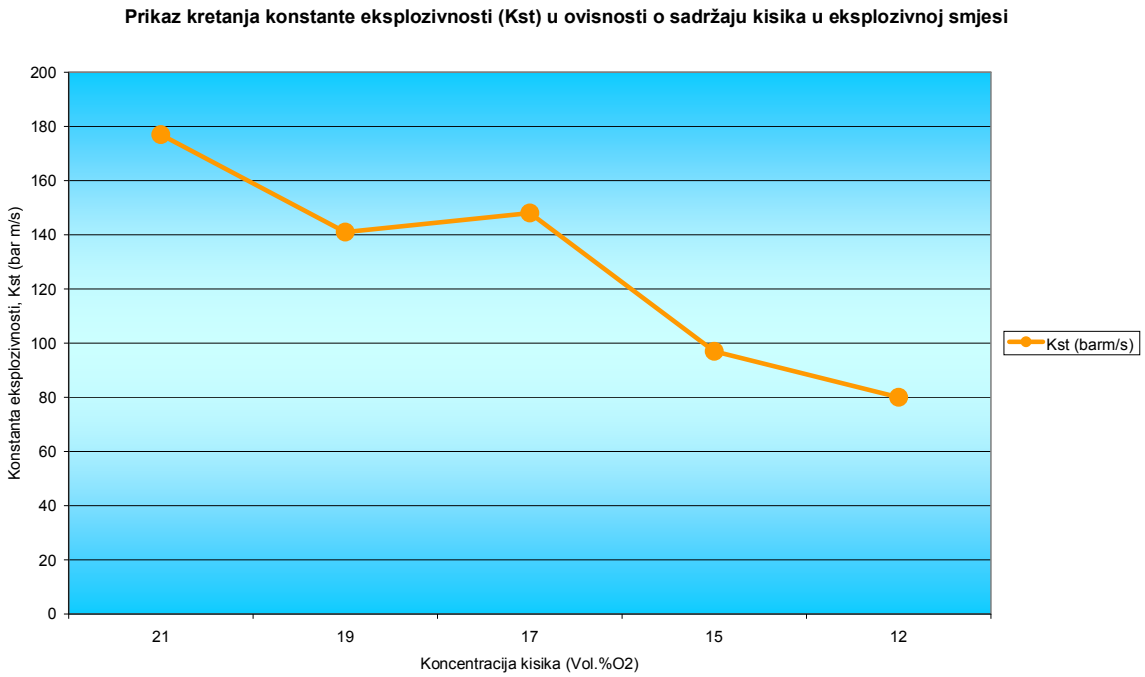


Slika 5.33 Tendencija vrijednosti brizance u atmosferi inertiziranoj ugljičnim dioksidom



Slika 5.34 Tendencija vrijednosti vremena paljenja u odnosu na volumni udio kisika u smjesi

Vrijeme paljenja eksplozivne smjese t_1 ne postoji, odnosno jednako je nuli, kod 12 % O_2 i to kod koncentracije prašine od 250 g/m^3 jer se eksplozija nije niti dogodila. Najdulje vrijeme paljenja eksplozivne smjese kod koje je došlo do eksplozije je kod 12 % kisika i koncentracije ugljene prašine od 500 g/m^3 što i prikazuje slika 5.34.



Slika 5.35 Prikaz računske vrijednosti K_{St} u ovisnosti o volumnom udjelu kisika u smjesi

Slika 5.35 prikazuje računsku vrijednost K_{St} i njegovu karakteristiku u ovisnosti o volumnoj koncentraciji kisika. Kao što je i bilo očekivano, najveći iznos K_{St} -a je kod smjese ugljene prašine i zraka. Kod smjese s 19 % kisika dogodio se pad vrijednosti K_{St} -a, međutim kod 17 % kisika vrijednost K_{St} -a je blago porasla u odnosu na smjesu s 19 % kisika. Značajan pad vrijednosti K_{St} -a, a koji je u jedno i najmanji dogodio se kod smjese s 12 % kisika.

5.4 Statistička analiza eksperimentalnih podataka

5.4.1 Utvrđivanje značajki utjecajnih faktora analizom varijance (ANOVA)

Za potpuno rješenje problema analize učinkovitosti sustava inertizacije potrebno je odrediti međusobni utjecaj varijabli.

Izlazne varijable (mjerenje):

- p_{max} (najveći tlak eksplozije pojedine smjese, bar)
- t_1 (vrijeme paljenja eksplozivne smjese, ms)
- $(dp/dt)_{max}$ (najveći porast tlaka u vremenu, bar/s)

Indirektna vrijednost koja se izračunava iz izlaznih varijabli:

- K_{St} (konstanta eksplozivnosti, bar m /s)

Nezavisne varijable (faktori):

- c (koncentracija prašine, g/m^3)
- volumni udio kisika u eksplozivnoj smjesi (Vol%)
- volumni udio sredstva za inertizaciju (ugljični dioksid CO_2, dušik N_2)

U tablici 5.3 prikazani su svi rezultati dobiveni ispitivanjem te su to ujedno i ulazni podaci potrebni za analizu u računalnom programu „Statistic-a 10.0“. Prema navedenoj tablici imamo četiri najveća tlaka u rasponu od 8,1 bar do 8,8 bar. Kod inertizacije eksplozivne smjese s ugljičnim dioksidom i to kod 19 % kisika pojavili su se najveći tlakovi redom: 8,2 bar; 8,6 bar i 8,8 bar.

Tablica 5.3 *Rezulati ispitivanja*

R.br. ispit.	Koncentracija Ugljene prašine g/m^3	Udio kisika Vol. %	Sredstvo za inertizaciju	p_{max} bar	t_1 ms	dp/dt bar/s
1	250	21	N_2	7,9	28	680
2	500	21	N_2	7,7	29	622
3	750	21	N_2	7,8	36	556
4	250	19	N_2	7,1	35	444
5	500	19	N_2	7,1	37	406
6	750	19	N_2	7,5	52	372
7	250	17	N_2	7,4	75	224
8	500	17	N_2	6,5	26	480
9	750	17	N_2	7,9	34	487
10	250	15	N_2	8,1	54	373
11	500	15	N_2	7,1	37	349
12	750	15	N_2	8,1	47	506
13	250	12	N_2	5,8	69	241
14	500	12	N_2	5,6	54	215
15	750	12	N_2	4,8	68	278
16	250	21	CO_2	7,9	28	680
17	500	21	CO_2	7,7	29	622
18	750	21	CO_2	7,8	36	556
19	250	19	CO_2	8,6	38	518
20	500	19	CO_2	8,2	33	469
21	750	19	CO_2	8,8	44	511
22	250	17	CO_2	6,7	43	401
23	500	17	CO_2	5,8	30	547
24	750	17	CO_2	6,6	39	501
25	250	15	CO_2	5	92	358
26	500	15	CO_2	5,7	57	356
27	750	15	CO_2	6,1	122	294
28	250	12	CO_2	0	0	0
29	500	12	CO_2	4,7	226	295
30	750	12	CO_2	4,3	84	202

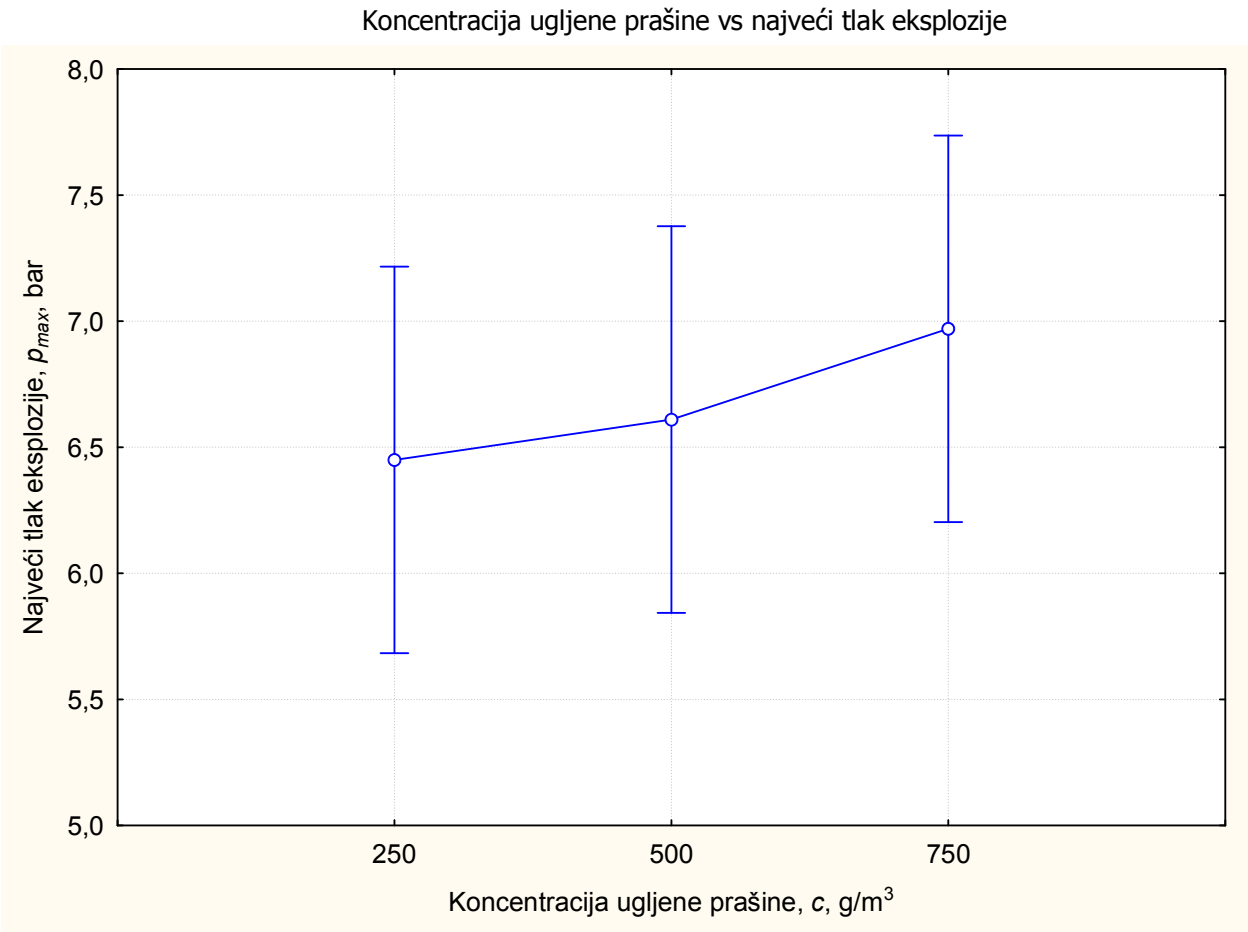
5.4.1.1 Analiza po izlaznoj varijabli p_{max}

U tablici 5.4 prikazani su rezulati analize utjecaja koncentracije ugljene prašine, volumnog udjela kisika te sredstva za inertizaciju na varijablu p_{max} (najveći tlak eksplozije smjese ugljene prašine, zraka i inertnog plina).

Tablica 5.4 *Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu* p_{max}

Izvor varijacije	**Analiza po izlaznoj varijabli p_{max}**				
	Stupnjevi slobode	**Suma kvadrata odstupanja**	**Srednji kvadrat odstupanja**	**F-vrijednost**	**p-vrijednost**
Koncentracija	2	1,032	0,516	0,479	0,625453
Udio kisika	4	48,409	12,102	11,245	0,000040
Sredstvo za inertizaciju	1	4,408	4,408	4,096	0,055299
Pogreška	22	23,678	1,076		
Ukupno	29	77,527			

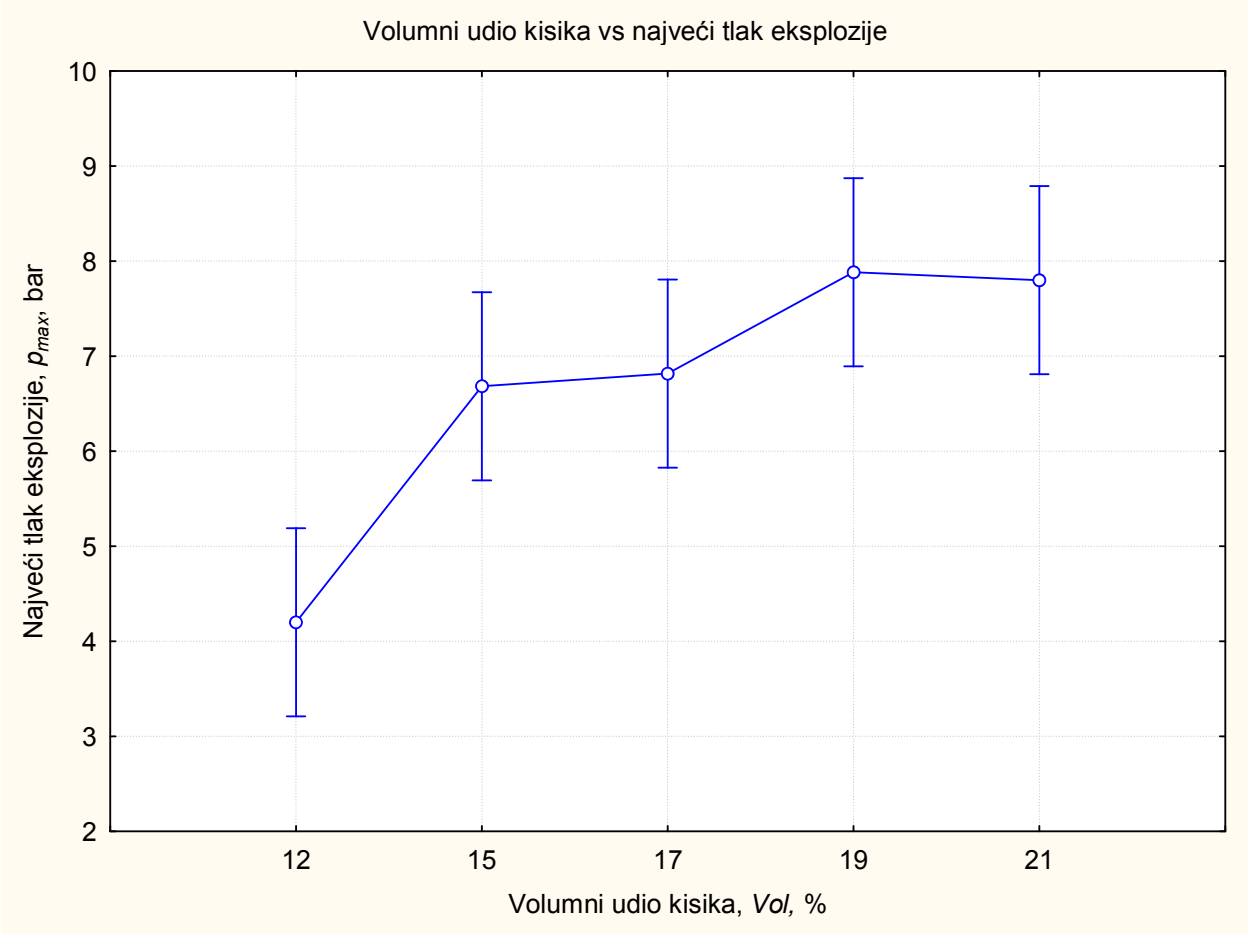
Prema rezultatima analize, na varijablu p_{max} (najveći tlak eksplozije) koncentracija ugljene prašine u smjesi nema značajan utjecaj (p = 0,625453) što je bilo i za očekivati jer su se ispitivale koncentracije ugljene prašine koje daju najveće tlakove eksplozije (ispitivane su tri koncentracije ugljene prašine). Prema slici 5.36 razlika između najmanjeg i najvećeg tlaka eksplozije u ovisnosti o koncentraciji ugljene prašine je pola bara.



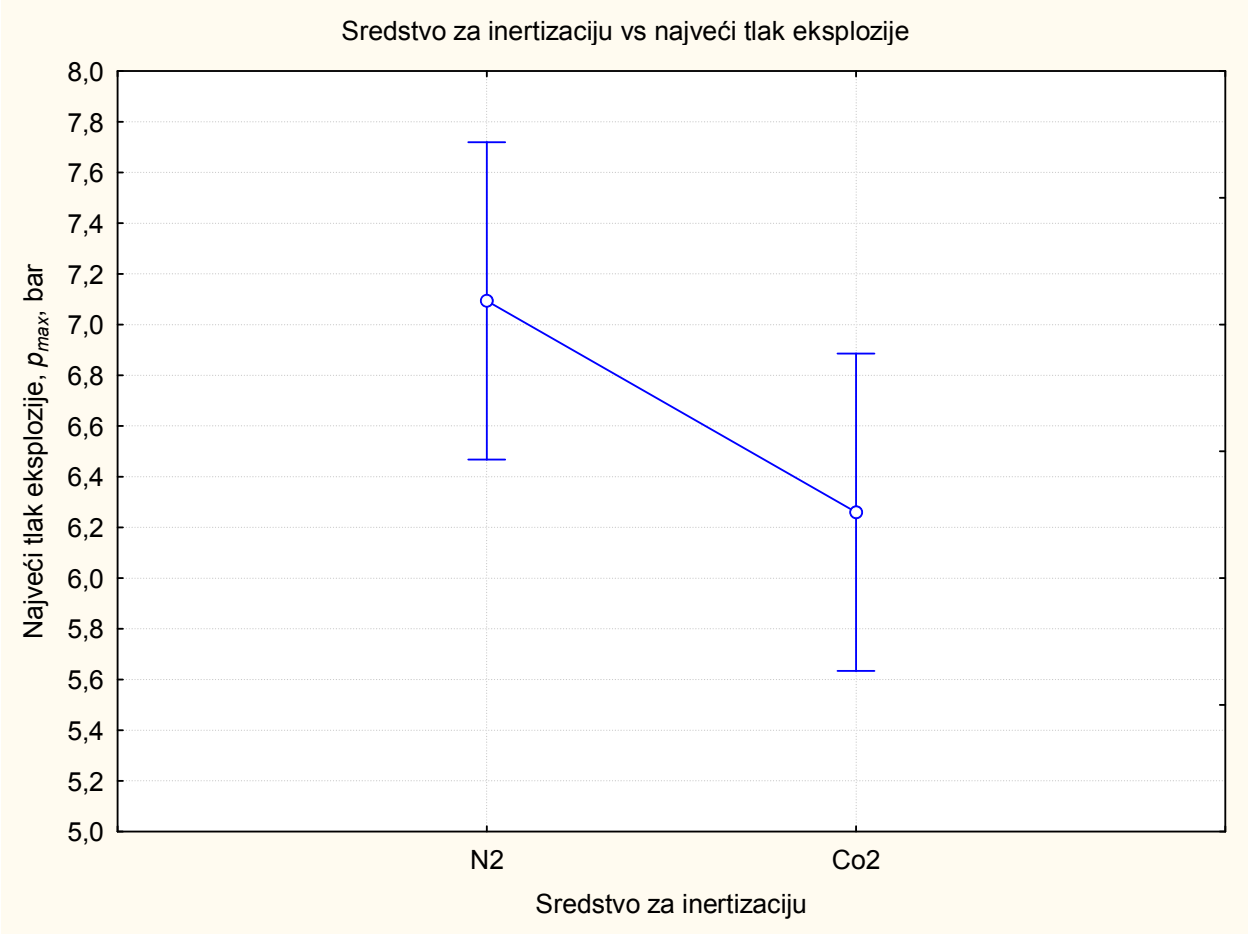
Slika 5.36 Prikaz utjecaja koncentracije prašine na tlak eksplozije

Udio kisika u smjesi ima značajan utjecaj na p_{max} što je i za očekivati jer je iznos volumnog udjela kisika jedan od uvjeta da bi se eksplozija dogodila i postigla p_{max}. Prema slici 5.37 najmanji tlak eksplozije dogodio se kod 12 % kisika, dok su razlike između p_{max} kod 21 % kisika i 19 % kisika te između 17 % kisika i 15 % kisika vrlo male.

Sredstvo za inertizaciju (inertni plinovi CO_2 i N_2) je na granici značajnosti (p = 0,055299). Prema slici 5.38 u ovom slučaju, odnosno na smanjivanje tlaka eksplozije p_{max} najbolje djeluje inertni plin, ugljični dioksid (CO_2). Kod inertizacije s inertnim plinom ugljičnim dioksidom možemo očekivati manje tlakove eksplozija, naravno, pod uvjetima koji su bili tijekom ovog ispitivanja, ali tek kod koncentracija kisika koje su ispod 19 %.



Slika 5.37 Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na tlakove eksplozija



Slika 5.38 Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na tlakove eksplozija

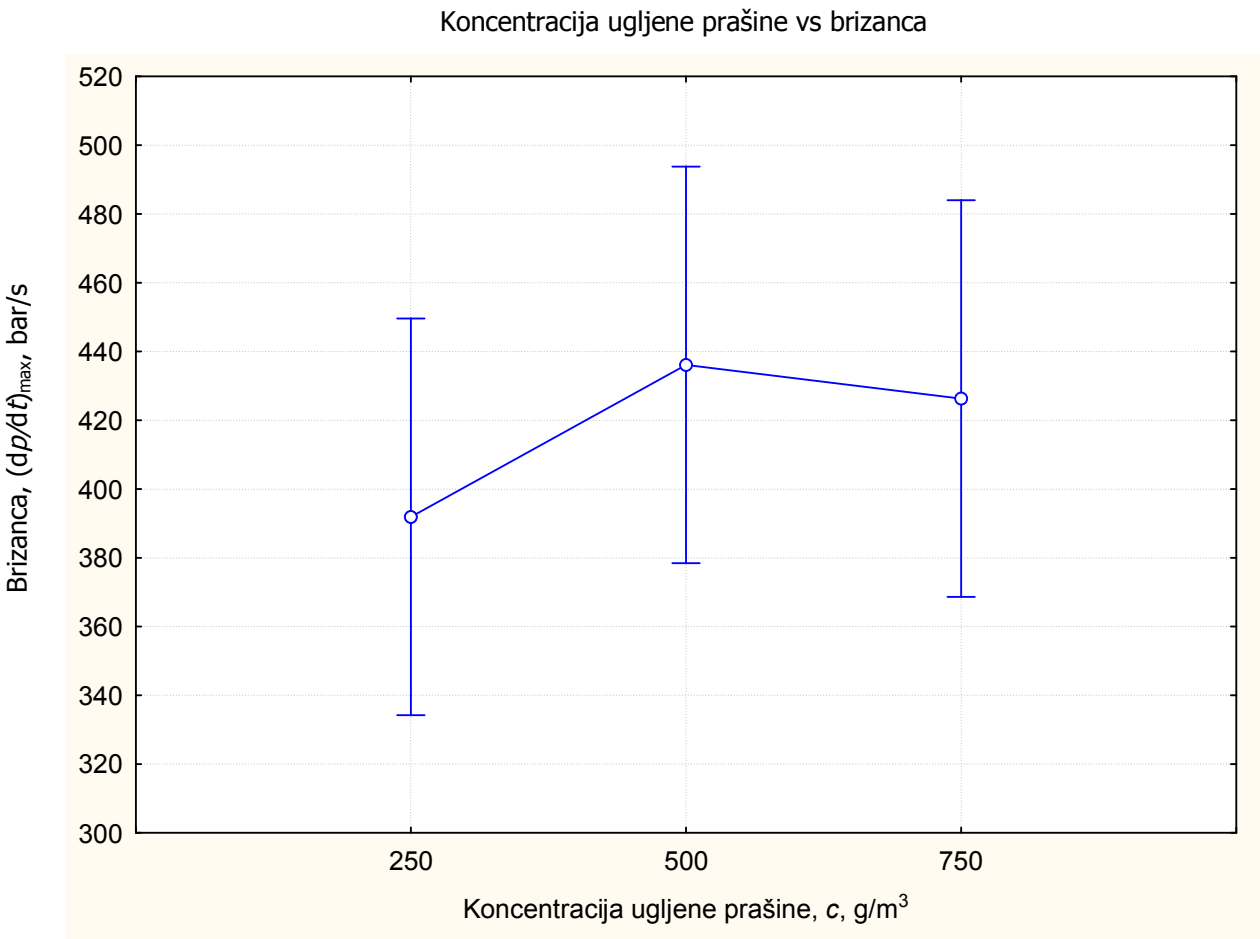
5.4.1.2 Analiza po izlaznoj varijabli $(dp/dt)_{max}$

U tablici 5.5 prikazani su rezulati analize utjecaja koncentracije ugljene prašine, volumnog udjela kisika te sredstva za inertizaciju na varijablu $(dp/dt)_{max}$ (najveću brizancu eksplozije smjese ugljene prašine, zraka i inertnog plina).

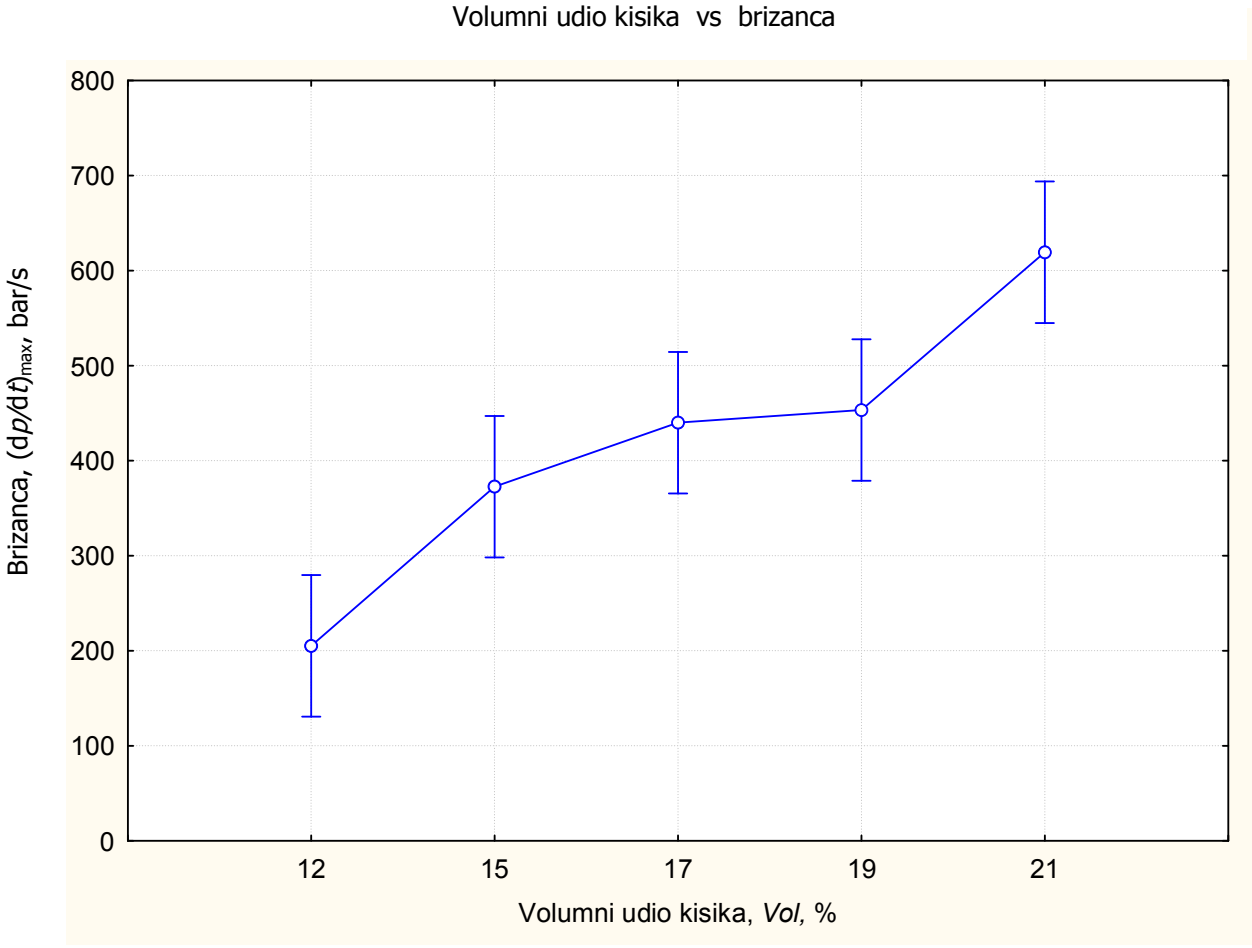
Tablica 5.5 *Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu* $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{max}$

Izvor varijacije	**Analiza po izlaznoj varijabli** $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{max}$				
	Stupnjevi slobode	**Suma kvadrata odstupanja**	**Srednji kvadrat**	**F-vrijednost**	**p-vrijednost**
Koncentracija	2	10777	5388	0,6967	0,508890
Udio kisika	4	537724	134431	17,3814	0,000001
Sredstvo za inertizaciju	1	198	198	0,0256	0,874455
Pogreška	22	170152	7734		
Ukupno	29	718851			

Koncentracija ugljene prašine nema značajan utjecaj na varijablu $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{max}$ što se može vidjeti iz slike 5.39 i gornje tablice (p = 0,508890). Najmanja brizanca je kod koncentracije ugljene prašine od 250 g/m^3.

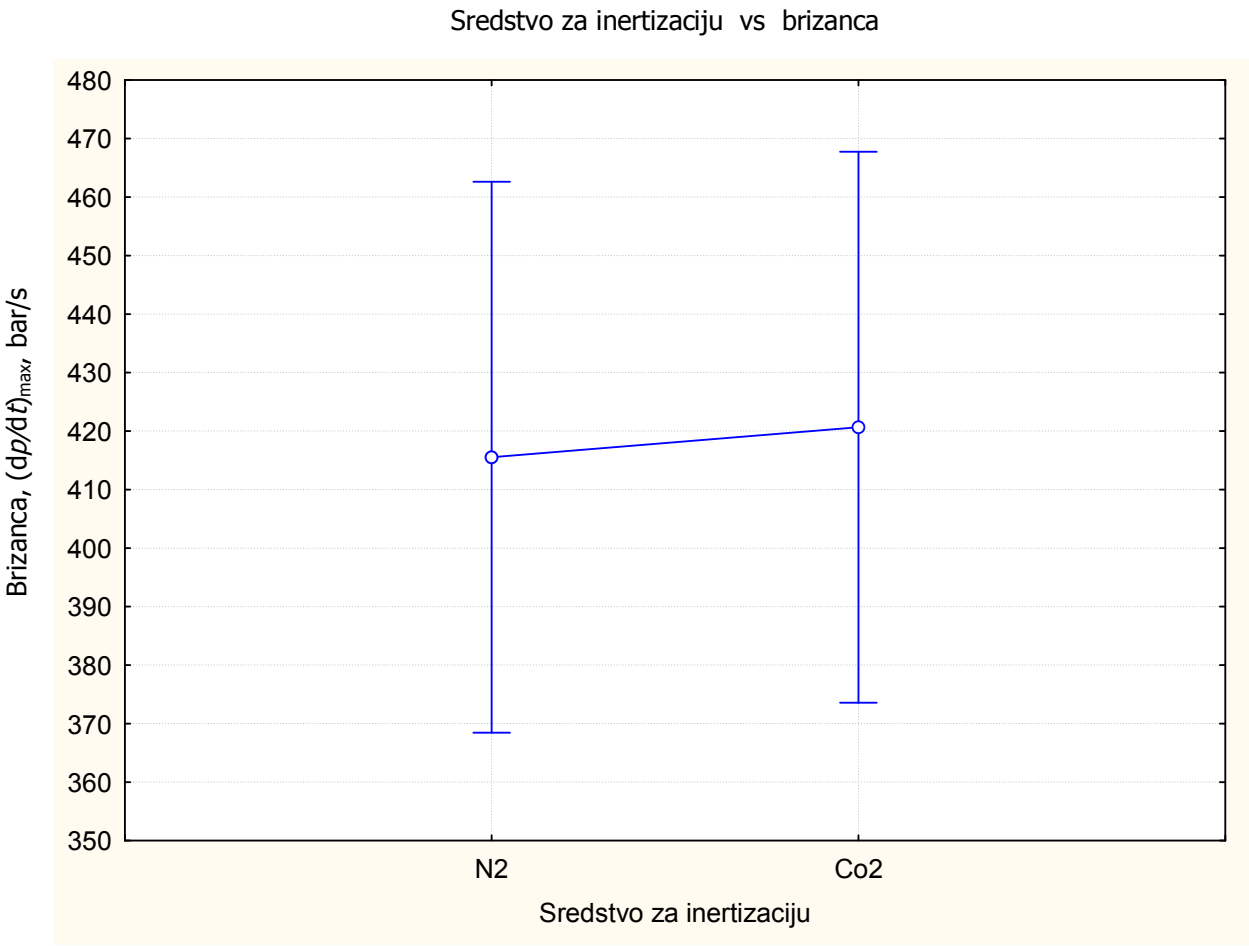


Slika 5.39 Prikaz utjecaja koncentracije prašine na brizancu



5.40 Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na brizancu

Sredstvo za inertizaciju isto tako nema značajan utjecaj na varijablu $(dp/dt)_{max}$ kao što se može vidjeti iz slike 5.41 i tablice 5.5 ($p = 0{,}874455$). Udio kisika u smjesi ima značajan utjecaj na $(dp/dt)_{max}$ ($p << 0{,}05$) što je i bilo za očekivati jer je brizanca direktno povezana s postignutim tlakovima eksplozije. Ako udio kisika ima utjecaja na postizanje tlaka eksplozije, neosporno je da će imati i utjecaj na brizancu. Padom koncentracije kisika u smjesi sve je teže postići eksploziju.



Slika 5.41 Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na brizancu

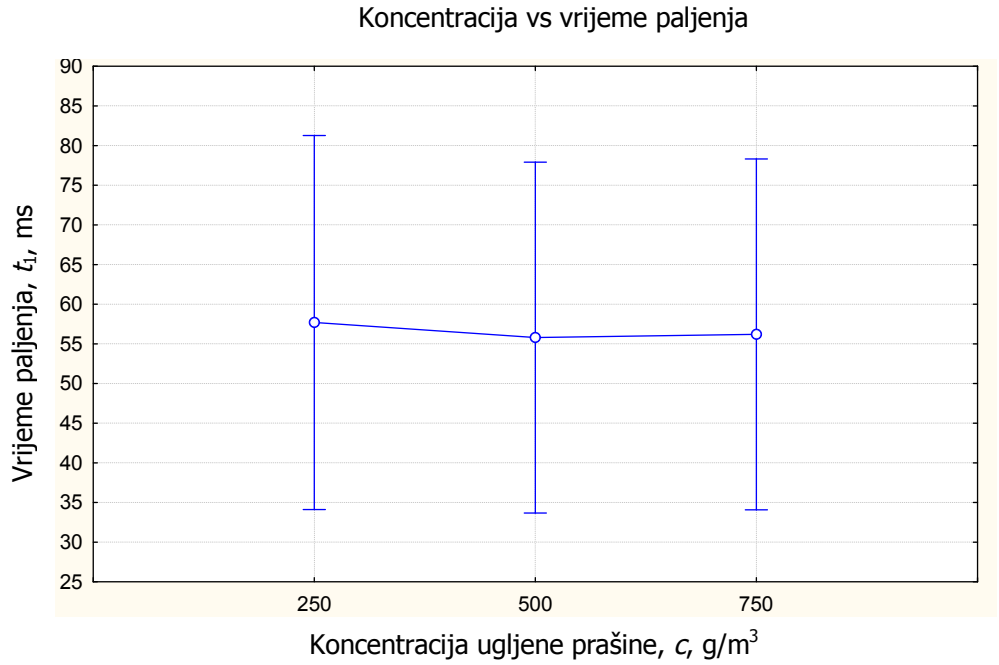
5.4.1.3 Analiza po izlaznoj varijabli t_1

U tablici 5.6 prikazani su rezulati analize utjecaja koncentracije ugljene prašine, volumnog udjela kisika te sredstva za inertizaciju na varijablu t_1 (vrijeme paljenja eksplozivne smjese).

Tablica 5.6 *Prikaz utjecaja ostalih varijabli na varijablu* t_1

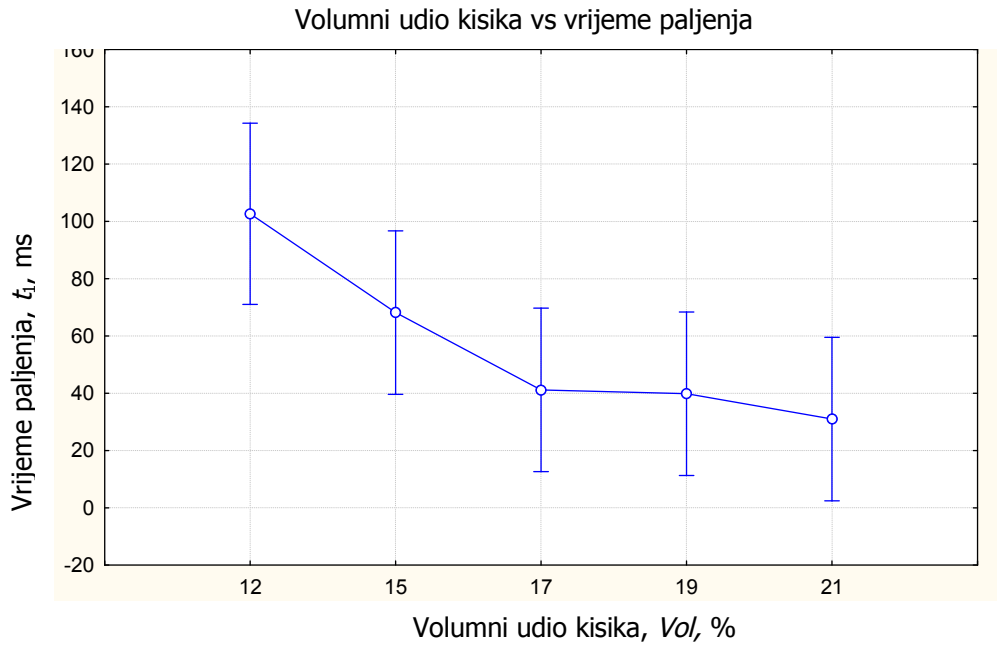
Izvor varijacije	**Analiza po izlaznoj varijabli t_1**				
	Stupnjevi slobode	**Suma kvadrata odstupanja**	**Srednji kvadrat**	**F-vrijednost**	**p-vrijednost**
Koncentracija	2	18,37	9,18	0,00812	0,991915
Udio kisika	4	18127,82	4531,96	4,00772	0,014366
Sredstvo za inertizaciju	1	3577,22	3577,22	3,16342	0,089787
Pogreška	21	23746,93	1130,81		
Ukupno	28	44559,17			

Koncentracija ugljene prašine nema nikakav utjecaj na vrijeme paljenja eksplozivne smjese (p = 0,991915). To znači da nije bitno da li je koncentracija 250 g/m^3, 500 g/m^3 ili 750 g/m^3 iz razloga što su odabrane koncentracije optimalne tj. jer se u tom rasponu koncentracija ugljene prašine nalazi i p_{max} što i prikazuje slika 5.42.

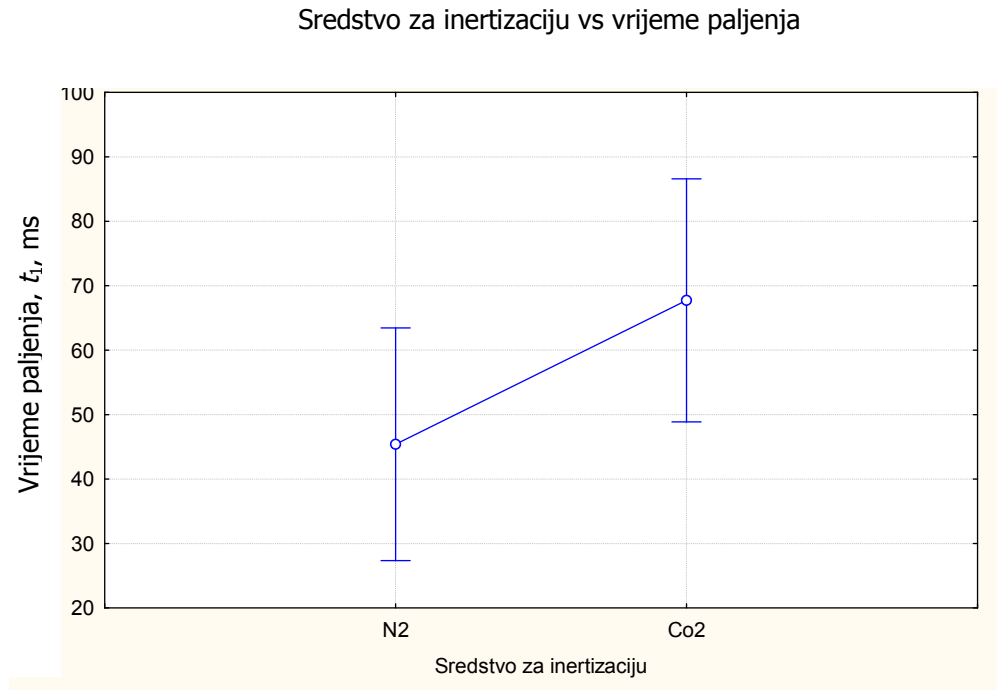


Slika 5.42 Prikaz utjecaja koncentracije prašine na vrijeme paljenja eksplozivne smjese

Volumni udio kisika ima vrlo veliki utjecaj na vrijeme paljenja eksplozivne smjese kao što prikazuje i slika 5.43 što je bilo i za očekivati jer s padom volumnog udjela kisika u smjesi potrebno je i veće vrijeme za prijenos energije s kemijskih pripala na okolnu atmosferu- vrijeme oksidacije traje dulje.



Slika 5.43 Prikaz utjecaja volumnog udjela kisika na vrijeme paljenja eksplozivne smjese



Slika 5.44 Prikaz utjecaja sredstva za inertizaciju na vrijeme paljena eksplozivne smjese

Sredstvo za inertizaciju ima utjecaj na vrijeme paljenja t_1 što je i prikazano na slici 5.44 (p = 0,089787). Prema tome rezultatu može se zaključiti da je kod inertizacije ugljičnim dioksidom potrebno dulje vrijeme da se eksplozivna smjesa zapali, odnosno, ugljični dioksid je bolje sredstvo za inertizaciju. U jednom slučaju, prema tablici 5.3, kada je sredstvo za inertizaciju bio CO_2 eksplozija se nije niti dogodila, što kod dušika to nije bio slučaj.

5.4.2 Regresijska analiza (nelinearna procjena)

Ulazni podaci za regresijsku analizu su vrijednosti najvećih tlakova eksplozija koji su snimljeni tijekom eksperimenata. Tlakovi su dobiveni u eksplozivnim smjesama koje su inertizirane inertnim plinovima dušikom (N_2) i ugljičnim dioksidom (CO_2).

5.4.2.1 Regresijska analiza podataka ispitivanja eksplozivne smjese inertizirane dušikom

Regresijom se dobiva sljedeća jednadžba koja opisuje krivulju najvećih tlakova eksplozije (p_{max}) kod inertizacije s dušikom:

$$y = -0{,}01466\,x^2 + 0{,}677599\,x \qquad (12)$$

gdje je:

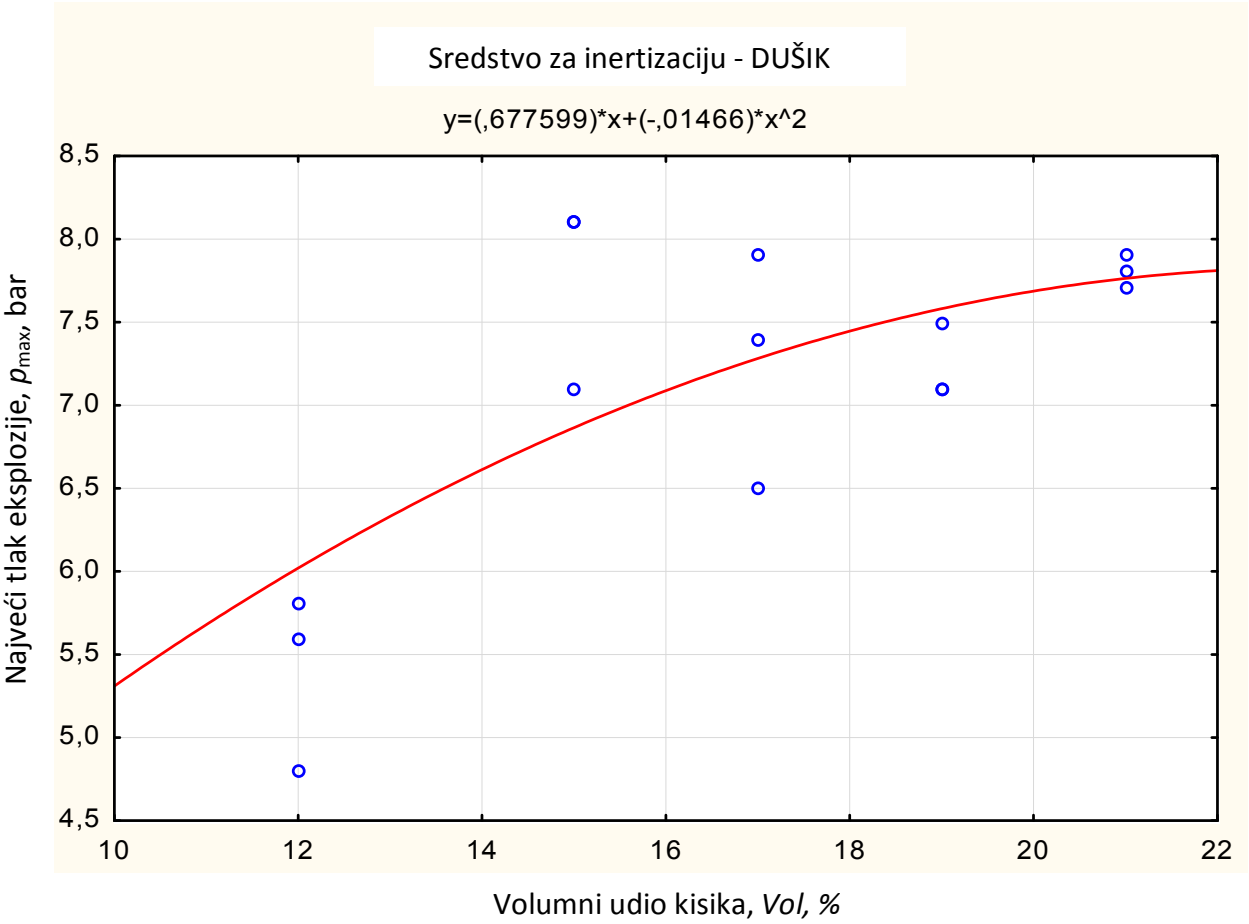
y – vrijednost tlaka eksplozije, bar

x – volumni udio kisika, Vol (%)

Najboljom mogućom regresijskom analizom dobivena je krivulja, kroz vrijednosti najvećih tlakova dobivenih kao rezultat pokusa te je prikazana na slici 5.45.

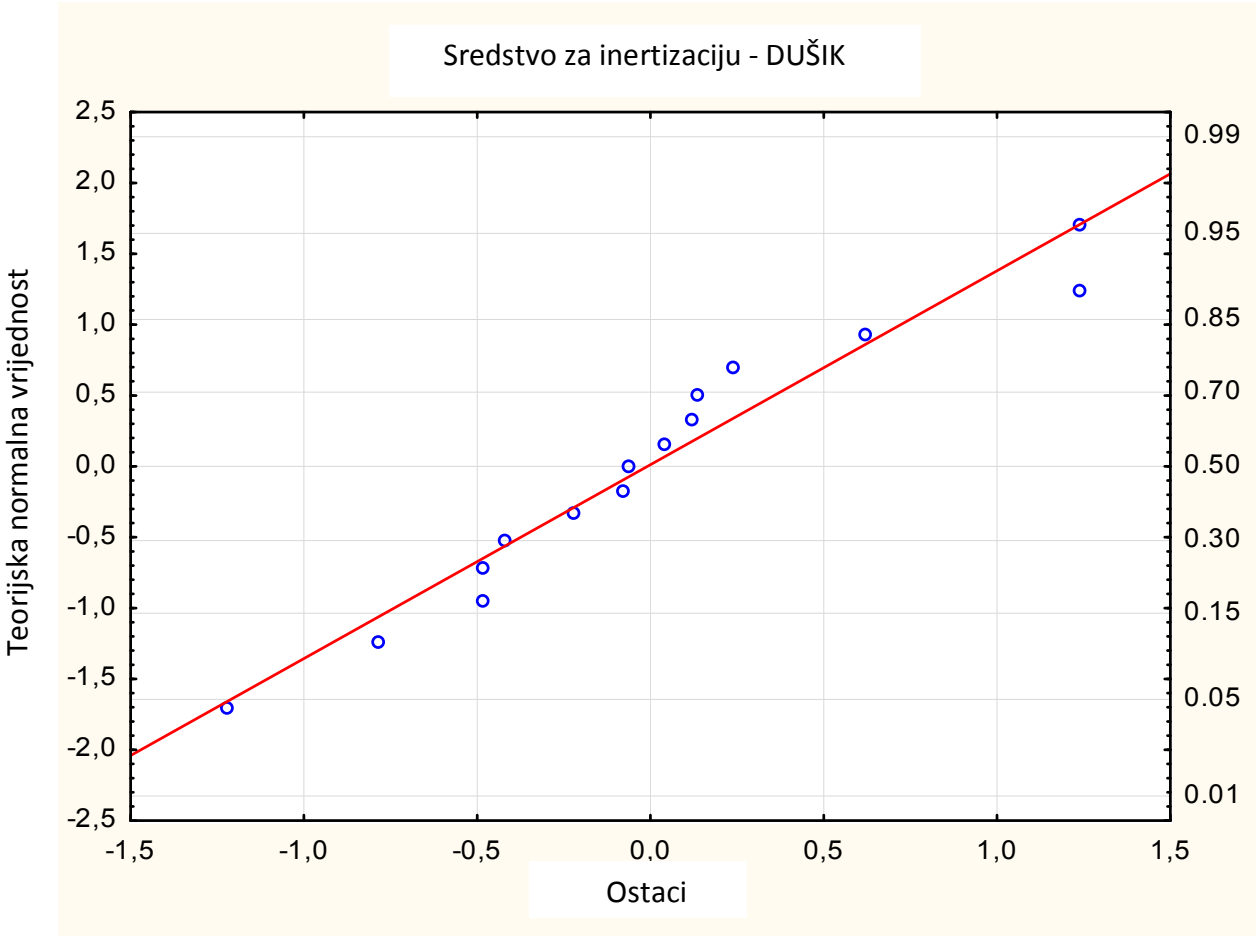
Značajnost regresijskih koeficijenata:

- koeficijent uz x^2: -0,01466 je značajan (p = 0,0016)
- koeficijent uz x: 0,677599 je vrlo značajan (p < 0,0001)



Slika 5.45 Regresijska krivulja tlakova kod inertizacije s dušikom

Grafički prikaz normalne vrijednosti ostatka predstavlja omjer stvarnih vrijednosti izmjerenih u pokusu i onih koje bi odgovarale podacima po normalnoj razdiobi (slika 5.46). Kako su točke mjerenja relativno ravnomjerno raspoređene oko pravca može se smatrati da podaci odgovaraju normalnoj razdiobi [29].



Slika 5.46 Grafički prikaz normalnosti ostatka regresijske krivulje p_{max} kod inertizacije dušikom

5.4.2.2 Regresijska analiza podataka ispitivanja eksplozivne smjese inertizirane ugljičnim dioksidom

Regresijom se dobiva sljedeća jednadžba koja opisuje krivulju najvećih tlakova eksplozije (p_{max}) kod inertizacije s ugljičnim dioksidom:

$$y = 0{,}392469\,x \tag{13}$$

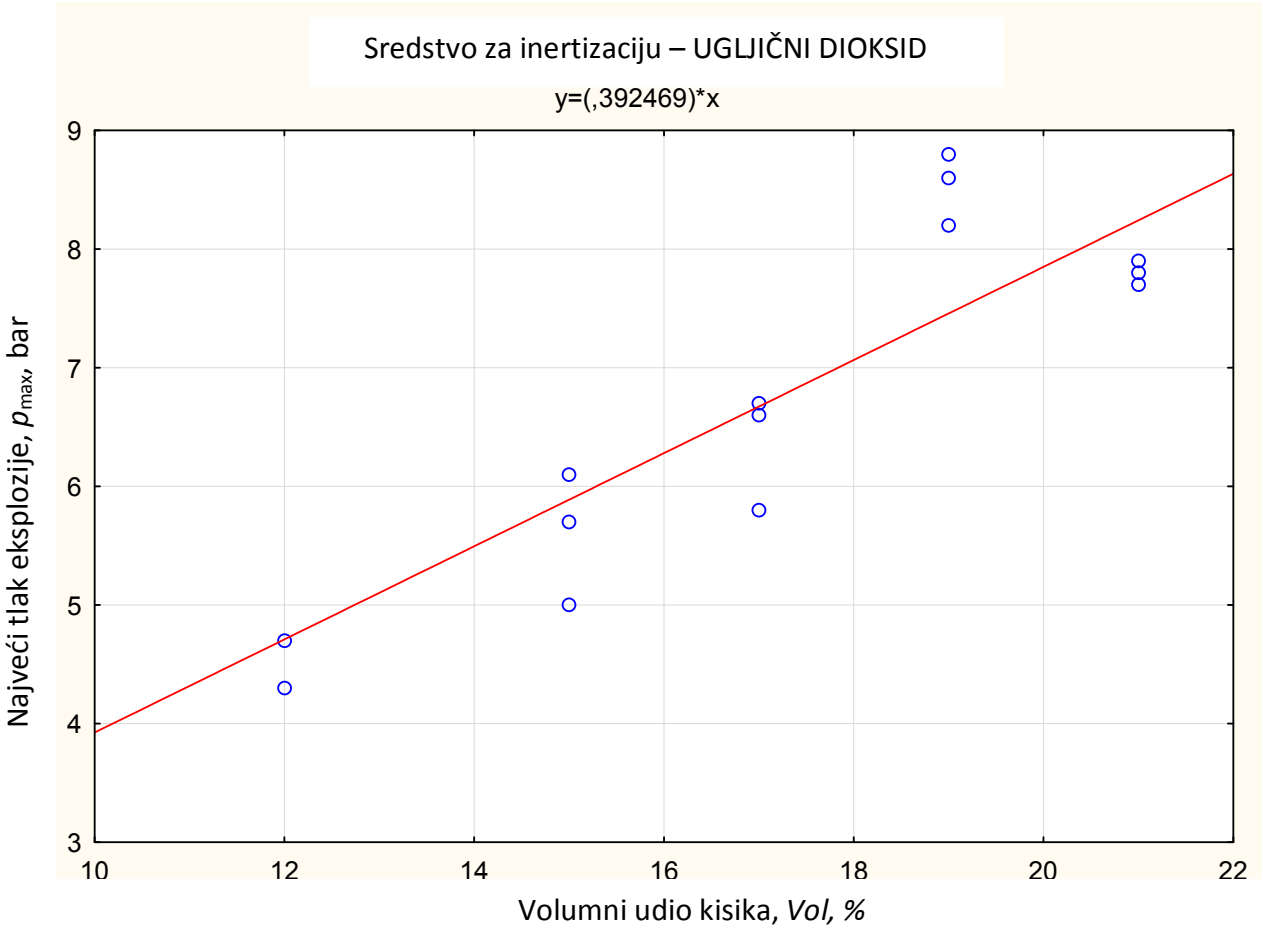
gdje je:

y – vrijednost tlaka eksplozije, bar

x – volumni udio kisika, Vol (%)

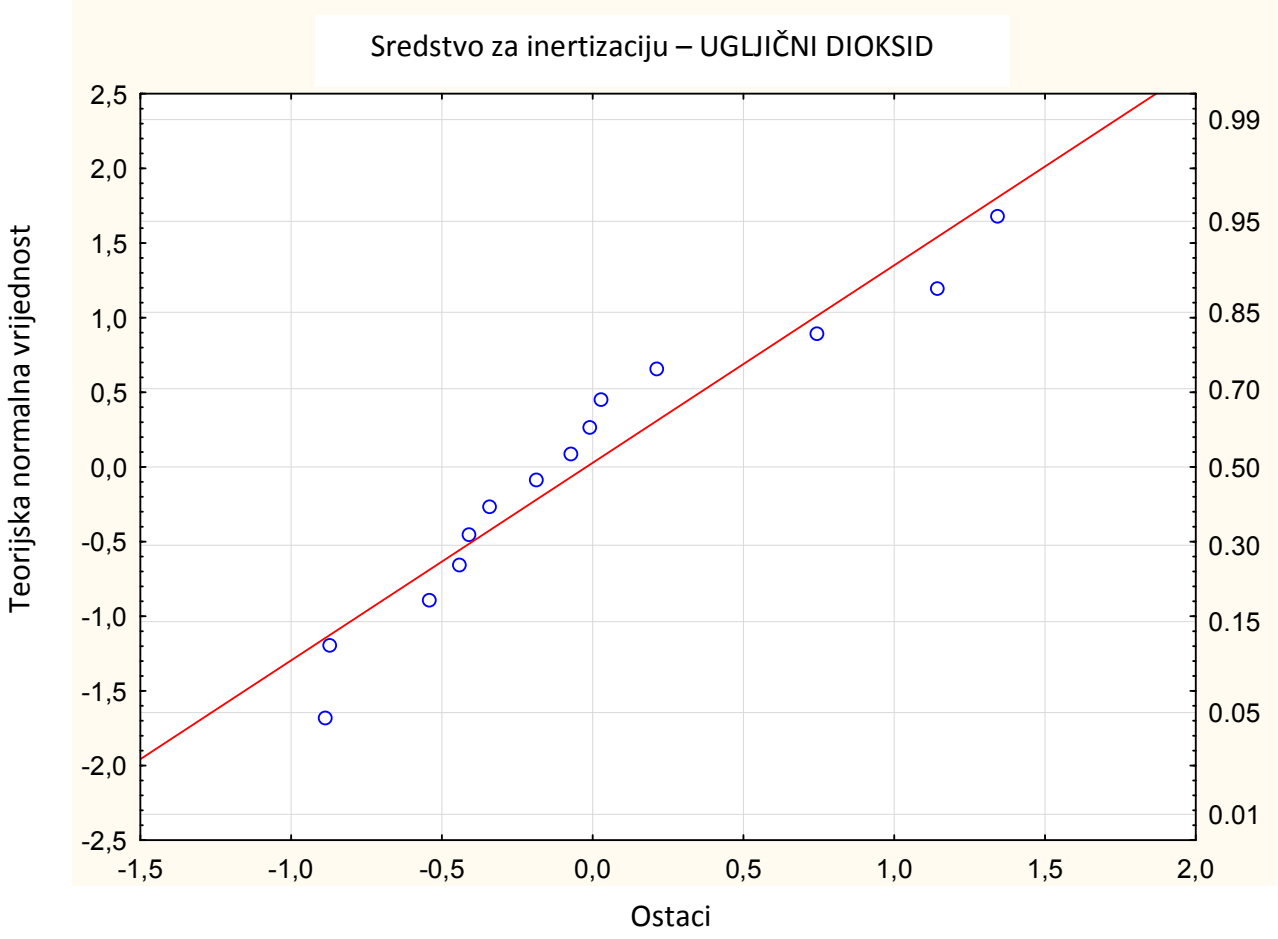
Najboljom mogućom regresijskom analizom dobivena je krivulja, kroz vrijednosti najvećih tlakova dobivenih kao rezultat pokusa te je prikazana na slici 5.47.

Značajnost regresijskog koeficijenta uz x: 0,392469 je vrlo značajan ($p < 0{,}0001$).



Slika 5.47 Regresijska krivulja tlakova kod inertizacije s ugljičnim dioksidom

Grafički prikaz normalne vrijednosti ostatka predstavlja omjer stvarnih vrijednosti izmjerenih u pokusu i onih koje bi odgovarale podacima po normalnoj razdiobi (slika 5.48). Kako su točke mjerenja relativno ravnomjerno raspoređene oko pravca može se smatrati da podaci odgovaraju normalnoj razdiobi [29].



Slika 5.48 Grafički prikaz normalnosti ostatka regresijske krivulje p_{max} kod inertizacije ugljičnim dioksid

5.5 Komentar dobivenih rezultata

Na osnovu rezultata ispitivanja utjecaja sadržaja inertnih plinova na tlak eksplozije može se zaključiti da je samo kod koncentracije prašine od 250 g/m^3 došlo do prekida eksplozije ugljene prašine i to kod volumnog udjela ugljičnog dioksida (CO_2) od 12 %. Za koncentracije ugljene prašine iznad ove vrijednosti učinkovitost sredstava za inertizaciju (N_2 i CO_2) nije potpuna što rezultira s nemogućnošću prekida eksplozije eksplozivne smjese. Statističkom obradom rezultata generalno je utvrđen padajući trend tlaka eksplozije u funkciji volumnog udjela kisika u eksplozivnoj smjesi. Ovakav trend tlaka eksplozije utvrđen je za oba inertna sredstva. Analizom je isto tako utvrđeno da je učinkovitost CO_2 na prekid eksplozije znatno veća od N_2. Ovakav učinak CO_2 u spriječavanju razvoja eksplozije može se objasniti kinetičkom teorijom plinova, prema kojoj je bitan odnos masa molekula plinova u promatranom prostoru.

Tijekom paljenja i eksplozije ugljene prašine, uz snažano inicijalno paljenje koje predaje dovoljnu energiju za aktivaciju molekula, izdvajaju se produkti pirolize ugljena, koji se najvećim dijelom sastoje od zapaljivih plinova alifatskog (H_2, CO, C_nH_{2n+n}, C_nH_{2n}, C_nH_{2n-2}) i aromatskog reda (C_6H_6 – benzen i homolozi benzena). Ova bogata plinska smjesa u zatvorenom prostoru u toku eksplozije, reagira sa kisikom i daje plinovite oksidne spojeve, čija količina zavisi od koncentracije kisika. Što je niža koncentracija kisika, manja je količina nastalih oksidnih spojeva, a veća količina neizreagiranih plinovitih produkata pirolize ugljene prašine.

Početak paljenja i razvoj eksplozije izaziva sudare aktiviranih molekula unutar konstantanog volumena. Svaki sudar izaziva oslobođenje kinetičke energije, koja dovodi do povišenja tlaka i temperature.

U uvjetima kada se u zatvorenom volumenu osim zraka nalazi i određena količina inertnih plinova, čitav proces eksplozije poprima nešto drugačiji tijek od uobičajenog procesa koji se odvija bez dodatka sredstva za inertizaciju. Karakteristika inertnih plinova, kojima se inertizira eksplozivna smjesa, u odnosu na veličinu molarnih toplinskih kapaciteta (pri konstantnom tlaku- C_p i konstantnom volumenu- C_v) prikazan je u tablici 5.7.

Tablica 5.7 *Svojstva inertnih plinova C_p, C_v i λ*

Inertni plin	C_p	C_v	$\lambda = C_p / C_v$
N_2	29,13	20,80	1,40
CO_2	35,46	28,05	1,26

Iz kinetičke teorije plinova proizlazi da se molarna kinetička energija čestica plina može iskazati jednadžbom $E_{k,m}$ = 3/2 RT. Prema vrijednostima molarnih toplinskih kapaciteta uočava se da višeatomski plinovi imaju veću vrijednost molarnih toplinskih kapaciteta i to pri konstantnom tlaku - C_p i pri konstantnom volumenu - C_v. Budući da ove fizičke veličine zavise od broja stupnjeva slobode koje molekula plina ima, očigledno je da je za CO_2 ova veličina veća u odnosu na dvoatomski dušik. Konkretno to znači da se izdvojena toplina kemijske reakcije troši na povećanje ukupne kinetičke energije molekula, koju čine energije translatornog, rotacijskog i vibracijskog kretanja cjelokupne molekule. Osim toga, znatan utjecaj na povećanje E_k imaju oscilacije ili gibanja atoma unutar molekule duž linija kemijskih veza koje ih spajaju (valencijske vibracije). Što je molekula složenije građe to je povećanje E_k veće, tako da će kod dominantnog prisustva CO_2 ova energija biti veća, nego kod prisustva samo dvoatomske molekule dušika (inertizacija N_2). Vrijednost molarne topline jednaka je promijeni unutrašnje energije kod konstantnog volumena. Kod visokih temperatura vrijednost molarne topline pri konstantnom volumenu C_v može porasti i do 7/2R. Stoga, zbog složene građe molekula CO_2 i veće promjene molarne topline ovog plina u odnosu na ostale plinove unutar zatvorenog sustava, dolazi do «apsorbcije» topline kemijske reakcije, što rezultira značajnim smanjenjem tlaka eksplozije u odnosu na ostala sredstva za inertizaciju pod uvjetima V=const; $p_1/T_1 = p_2/T_1$. Osim toga u cjelokupnom vrlo složenom sustavu u kemijskom pogledu, unutar konstantnog volumena dolazi do niza kemijskih reakcija koje su u pravilu oksidno-redukcijskog karaktera. Kod veće koncentracije kisika favorizirane su reakcije oksidacije. Budući da je proces eksplozije praćen znatnim povišenjem temperature, dolazi sukladno Le Chaterier-ovom principu do pomicanja kemijske ravnoteže u smjeru nastajanja ne samo egzotermnih nego i endotermnih reakcija. Dominantna reakcija endotermnog tipa koja se dešava nakon reakcija oksidacije kisika sa produktima pirolize u ispitnom uređaju je reakcija redukcije CO_2 do CO: $C_{(s)} + CO_{2(g)} = 2CO_{(g)} \Delta H_r^{o}{}_{(798K)}$ = 169,5 kJ/mol. Za odvijanje ove reakcije također se troši dio energije.

Budući da su svi uvjeti izvođenja eksperimenta konstantni ovom prilikom se u razmatranje ne uzima sastav pirolizom izdvojenih plinova, niti produkti eksplozije. Pritom se misli na plinove koji izgaraju i čija količina ovisi od sadržaja kisika i koncentracije prašine kao i na one koji nisu izgorjeli jer je kisik potrošen.

Kod svih koncentracija kiska (% O_2) odnosno smjesa koje su inertizirane dušikom (N_2), a posebno kod koncentracije 15 % kisika (najveći tlak eksplozije) dolazi do razlaganja molekula dušika na atomski dušik, budući da je reakcija endotermna. Što je količina dušika veća, veća je i količina nastalih atoma dušika. Količina topline koju apsorbira 1 mol molekularnog dušika za razlaganje iznosi 946 kJ/mol, koliko iznosi energija kemijske veze, dok je primjerice, za nastajanje dušik monoksida (NO) potrebna je količina topline od 90 kJ/mol-u, a dušik(IV)oksid (N_2O_4) 9,2 kJ/mol-u. Sve navedene reakcije su endotermne odnosno pri njihovom odvijanju apsorbira se toplina. Toplina se za ove endotermne kemijske reakcije obezbjeđuje od topline koja se oslobađa pri eksploziji produkata pirolize koja se dešava u prvoj fazi eksplozije. U zavisnosti od kemijskog sastava ugljena, koji je opet u funkciji starosti ugljena, sastav plinskih piroličkih produkata je raznovrstan i najčešće predstavlja smjesu alifatskih i aromatskih ugljikovodika, koji su u pravilu zapaljivi. Njihova oksidacija odnosno gorenje ovisi o sadržaju kisika. Što je sadržaj kisika manji, bez obzira koliko i koje vrste ugljikovodika nastane u procesu piroloze, oni sagorijevaju onoliko koliko ima kisika u zraku. To sagorijevanje se manifestira parametrom dp/dt (porast tlaka u vremenu).

Uslijed velike reaktivnosti nastalog atomskog dušika dolazi do reakcije istog sa kisikom koji se nalazi u plinskoj smjesi i nastanka većih količina smjese dušikovih oksida, kao npr. N_2O, N_2O_4, N_2O_3, NO_2, N_2O_5, koji povećavaju tlak plinske smjese u odnosu na isti kada je koncentracija dušika u plinskoj smjesi niža. Naravno, svi nastali plinovi su nezapaljivi ili slabo zapaljivi, kao primjerice NO, koji može višak O_2 dali N_2O_4, te oni i ne mogu utjecati na parametar dp/dt, koji je u pravilu niži radi smanjene količine kisika. Kada je drugačiji odnos između kisika i inertnog plina dušika posljedica je ili da ima manjak kisika za sagorijevanje i kemijsku reakciju te nastajanje dušikovih oksida ili je sadržaj dušika manji pa ne može nastati tolika količina dušikovih oksida da bitno utječu na povećanje tlaka eksplozije.

U slučaju kada dolazi do povećanja tlaka eksplozije eksplozivne smjese koja je inertizirana s ugljičnim dioksidom (CO_2) i koncentracija kisika 19 % može se primijeniti isto objašnjenje, budući da se iste stvari dešavaju i s dušikom (preko 70 % dušika u smjesi) ali prisustvo CO_2 dodatno povećava količinu nastalih plinova jer i sam CO_2 reagira sa

ugljikom iz ugljena ili nastalim C_{fix} iz koksa te daje prema reakciji dvije molekule ugljik(II)-oksida(CO): $CO_{2(g)} + C_{(s)} = 2CO_{(g)}$, koje povećavaju tlak eksplozije. Zbog smanjenog sadržaja kisika nastali CO ne može dodatno sagorjeti do CO_2 te kao takav ne utječe na parametar d*p*/d*t*.

Regresijskom analizom dobivene su krivulje praktički na bazi samo pet točaka (jedno ispitivanje-jedna koncentracija prašine), odnosno sve zajedno petnaest točaka (tri koncentracije prašina i pet različitih volumnih udjela kisika). Za statističku obradu podataka je potrebno najmanje devet točaka, a uputno je potrebno izvršiti i ponavljanje pokusa što ovdje nije slučaj te iz tog razloga postoji mogućnost određenih odstupanja. Generalno se može zaključiti, da je analizom iako malog broja točaka ipak ukazan trend učinaka inertizacijskog sredstva dušika i ugljičnog dioksida u eksplozivnoj smjesi.

6. ZAKLJUČAK I PRIJEDLOG DALJNJEG ISTRAŽIVANJA

Vrlo je teško dati neki generalni prijedlog optimizacije sustava inertizacije. Inertizacija u slučaju eksplozivnih prašina ima za cilj smanjiti udio kisika u eksplozivnoj smjesi što je jedan od pet preduvijeta za eksploziju prašine (slika 2.16).

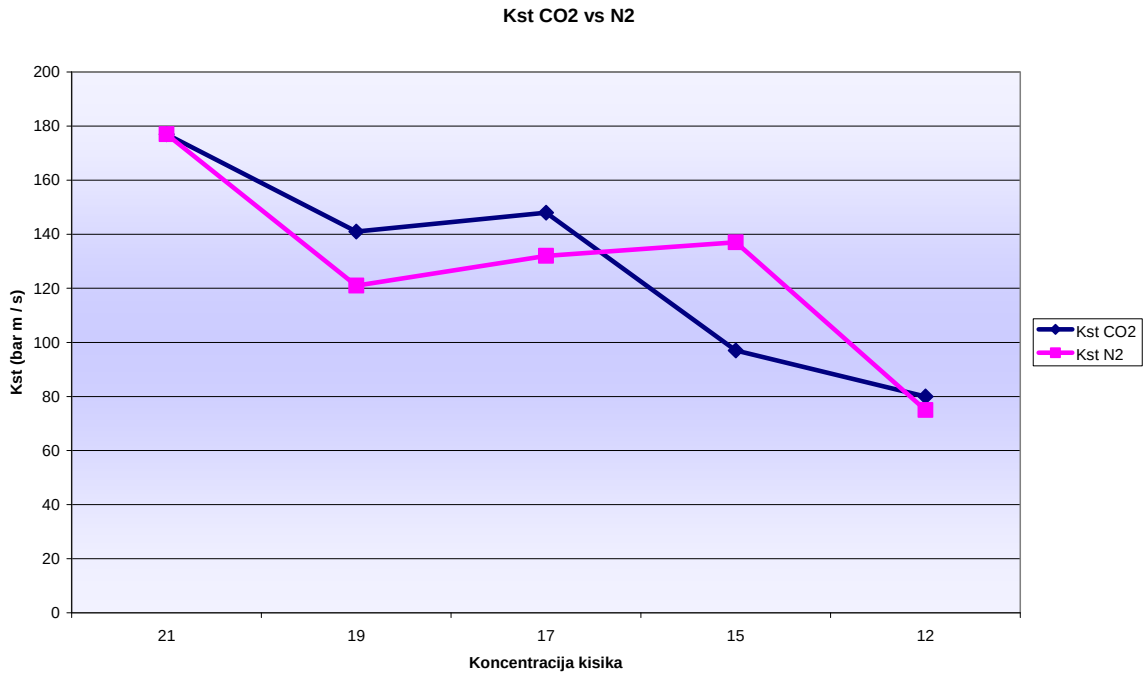
Naravno, možemo odmah reći da kod 100% -tne inertizacije odnosno kod 0% kisika, eksplozije sigurno neće biti. Međutim, poznato je da potpuna inertizacija nije baš pogodna u procesima, a ponekad nije ni moguća pa se postavlja pitanje do koje je granice potrebno ići sa snižavanjem volumnog udjela kisika u eksplozivnoj smjesi. Isto tako pitanje je i koje se koncentracije zapaljive prašine pojavljuju u procesu te koje je sredstvo za inertizaciju pogodno za primijenu. Najpouzdaniji način traženja odgovora na prije navedena pitanja je provođenje svih potrebnih laboratorijskih ispitivanja za svaku prašinu. Generalno govoreći, postoje nekoliko problema kada su u pitanju prašine:

- granulacija
- vlaga
- turbulencija
- donja granica eksplozivnosti
- eksplozivni parametri prašine (p_{max}, $(dp/dt)_{max}$)
- koncentracija

Na ono što u većini slučajeva ne možemo utjecati je koncentracija prašine u nekom procesu. Koncentracija prašine uvijek može varirati kroz cijeli proces, odnosno, nije konstantna. Zbog specifičnosti problematike samih prašina uputno je provesti sva potrebna ispitivanja prašina u procesu. Sva potrebna ispitivanja koja opisuju prašine u smislu eksplozivnosti navedena su u poglavlju 2 ovog rada. Isto tako potrebno je vrlo dobro poznavanje samog procesa da nebi došlo do dodatnog stvaranja kisika kao što je to slučaj u nekim farmaceutskim procesima.

Najopasnija mjesta za eksploziju prašina su presipna mjesta [31]. Prilikom punjenja sustava prašinom najjednostavnije i najbrže rješenje je ručno usipavanje, međutim to je ujedno i najopasnije. Za inertizaciju takvog procesa potrebno je usip automatizirati. Međutim, to zasigurno poskupljuje i usporava sam proces. Poskupljuje iz razloga što je potrebno koristiti odgovarajuću opremu, primjerice dodavače, zaporne ventile, analizatore kisika i sl. Usporavanja procesa odnosi se na neko vrijeme da se postigne željeni volumni udio kisika u smjesi, odnosno onaj postotak kisika kod kojeg neće doći do eksplozije. Proces se usporava i iz razloga što je inertizirane uvijete potrebno uvijek nanovo postizati.

Kako bi se smanjilo vrijeme postizanja inertne atmosfere potrebno je iznaći najbolje rješenje. U tom procesu je važan i inertni plin koji se koristi, odnosno koji ima najbolju učinkovitost. Pravilnim odabirom inertne tvari, sam proces inertiziranja značajno se može skratiti a da učinkovitost neće biti narušena. Ovim radom pokazano je da vrijednost K_{St} – a pada kako se smanjuje postotak kisika u smjesi. Međutim, isto tako prema slici 6.1 možemo vidjeti da nije isto da li se koristi dušik ili ugljični dioksid kao inertna tvar. U eksplozivnoj smjesi s 15 % volumnog udjela kisika došlo je do porasta vrijednosti K_{St}-a kada se eksplozivna smjesa inertizirala s dušikom i to u granicama koncentracije prašina od 250 g/m^3, 500 g/m^3 i 750 g/m^3. Očigledno je tijekom izgaranja došlo do pojave određenih plinova izgaranja koji povećavaju tlak eksplozije. Taj podatak je vrlo važan jer pokazuje da sama spoznaja da je u eksplozivnoj smjesi smanjen postotak kisika neukazuje na činjenicu da se neće dogoditi eksplozija.



Slika 6.1 Usporedba vrijednosti K_{St}-a u ovisnosti o inertnom plinu

Iz toga proizlazi da je neophodno analizirati sve parametre prašina i samog procesa te da nije svejedno koji inertni plin se koristi. Ovdje potrebno napomenuti da niti jedna prašina nije ista te da svaka od njih ima svoje parametre koje je potrebno uzeti u obzir.

Obično se u postrojenjima gdje se nalaze prašine uz inertizaciju koriste i dodatne mjere zaštite, kao primjerice rasteretne membrane, ugušivanje, oprema otporna na tlak eksplozije i sl. iz tog razloga važan je i podatak t_1 – vrijeme paljenja eksplozivne smjese. Ukoliko se i

dogodi eksplozija prašine u uvjetima smanjenog volumnog udjela kisika, taj tlak neće postići svoju najveću vrijednost jer će u određenom trenutku proraditi i druge zaštitne mjere, primjerice rasteretna membrana koja će višak tlaka ispustiti u okolinu ili će proraditi sustav za ugušivanje. Upravo podatak t_1 daje informaciju koliko brzo neki zaštitni sustav mora reagirati kako bi spriječio veća razaranja odnosno nagli porast tlaka u nekom sustavu. Na kraju možemo zaključiti da je problematika prašina u procesima kompleksan problem koji zahtjeva punu pažnju prilikom rješavanja istog.

Zbog važnosti ovog područja bilo bi neophodno i potpuno opravdano nastaviti s istraživanjima utjecaja inertnih plinova na razvoj odnosno nemogućnost razvoja eksplozije eksplozivnih smjesa prašina. Cijeli taj problem je problem smjesa koji je zorno prikazan na slici 4.1 Trokut eksplozivnosti. Smjer prema kojem bi nastavak ovog istraživanja trebao ići je smjer prema pokusima sa smjesama koji su vrlo dobro opisani u knjizi od J. Cornell «Experiment with mixtures» [28]. Na osnovu dodatnih proučavanja i ispitivanja potrebno bi bilo razmotriti mogućnost numeričke i grafičke optimizacije inertizacije za atmosfere u kojima se pojavljuju prašine. Budući se radi o parametru koji je vrlo promjenljiv i ovisi o više utjecajnih faktora, potrebno je pokloniti dodatnu pozornost utjecajnim faktorima prilikom ispitivanja sadržaja kisika u eksplozivnoj atmosferi prašina. Isto tako, bilo bi uputno istražiti učinkovitost inertih plinova (N_2 i CO_2) i kod nekih drugih vrsta prašina te bi se na takvoj usporedbi moglo bolje razmotriti koliko ima utjecaja i taj faktor na učinkovitost same inertizacije.

7. LITERATURA

[1] HRN EN 1127-1:2008 Eksplozivne atmosfere -- Sprječavanje i zaštita od eksplozije -- 1. dio: Osnovna načela i metodologija (EN 1127-1:2007)

[2] HRN EN 14034-1:2011 Određivanje eksplozivnih karakteristika za oblake prašina -- 1. dio: Određivanje najvećeg tlaka eksplozije p_{max} oblaka prašine (EN 14034-1:2004+A1:2011)

[3] HRN EN 14034-2:2011 Određivanje eksplozivnih karakteristika za oblake prašina -- 2. dio: Određivanje najvećeg nazivnog porasta tlaka eksplozije $(dp/dt)_{max}$ oblaka prašine (EN 14034-2:2006+A1:2011)

[4] HRN EN 14034-3:2011 Određivanje eksplozivnih karakteristika za oblake prašina -- 3. dio: Određivanje donje granice eksplozivnosti DGE oblaka prašine (EN 14034-3:2006+A1:2011)

[5] HRN EN 14034-4:2011 Određivanje eksplozivnih karakteristika za oblake prašina -- 4. dio: Određivanje graničnih koncentracija kisika u oblacima prašine (EN 14034-4:2004+A1:2011)

[6] HRN EN 60079-0:2009 Eksplozivne atmosfere -- 0. dio: Oprema -- Opći zahtjevi (IEC 60079-0:2007; EN 60079-0:2009)

[7] Beck, H., Glienke, N., Möhlmann, C., HVBG, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, BIA-Report Combustion and explosion characteristic of dusts, November,1997

[8] Barton, J., Dust explosion-prevention and protection-a practical guide, Institution of Chemical Engineers (IChemE); 2002

[9] HRN IEC 61241-2-1:1997 Električni uređaji za uporabu u zapaljivoj prašini -- 2. dio: Metode ispitivanja -- 1. odjeljak: Metoda određivanja najmanje temperature paljenja prašine (IEC 61241-2-1:1994)

[10] HRN IEC 61241-2-3:1997 Električni uređaji za uporabu u zapaljivoj prašini -- 2. dio: Metode ispitivanja -- 3. odjeljak: Metoda određivanja najmanje energije paljenja smjese zraka i prašine (IEC 61241-2-3:1994)

[11] HRN EN 61241-2-2:2007 Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini -- 2. dio: Metode ispitivanja -- 2. odjeljak: Metoda određivanja električnog otpora prašine u slojevima (IEC 61241-2-2:1993+Corr.:1994; EN 61241-2-2:1995)

[12] Slike uređaja iz laboratorija Ex-Agencije, Zagreb

[13] Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries; 3th edition, Gulf Professional publishing, Elsevier Science, 2003

[14] Slike uređaja s Rudarsko-geološko-građevinskog fakulteta u Tuzli, BiH

[15] "INVESTIGATION REPORT" Combustible dust hazard study, U.S.Chemical Safety and Hazard Investigation Board, November 2006

[16] Mačković, M., Fizikalni pokazatelji zapaljivih (eksplozivnih) prašina, Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, Ex-Bilten 2006. Vol. 34, br.2

[17] VDI 3673, Pressure venting of dust explosions, November 2002 VDI-RICHTLINIEN

[18] HRN EN 60079-10-2:2009 Eksplozivne atmosfere -- Dio 10-2: Klasifikacija ugroženih prostora -- Eksplozivne atmosfere prašina (IEC 60079-10-2:2009; EN 60079-10-2:2009)

[19] Marinović, J. J. N., Oprema i instalacije za eksplozivnu atmosferu, Zagreb, 2010.

[20] Deškin, J., Klasifikacija prostora – zapaljive prašine, Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, Ex-Bilten 2009. Vol. 38, br.1-2

[21] HRN CEN/TR 15281:2007 Uputa za suzbijanje eksplozije inertizacijom (CEN/TR 15281:2006)

[22] Deškin, J., Inertizacija, Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom, Ex-Bilten 2006. Vol. 34, br.1

[23] "Combustible Dust Hazard Study", Investigation Report Report No. 2006-H-1, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, November 2006.

[24] Ruby Jacobson, P. Eng. "Inert Miling Systems" PHARMACEUTICAL ENGINEERING, The Official Journal of ISPE May/June 2005, Vol.25 No.3

[25] Prospekt tvrtke AJO – Stahlbau GmbH & Co. KG, www.ajotec.de

[26] A. Denkevitts, S. Dorofeev: Dust Exaplosion Experiments, Measurement of Explosion Indices of Tungsten Dusts and Graphite- tungsten Dust Mixtures, Institut für Kern- und Energietechnik Programm Kernfusion, svibanj 2004]

[27] HRN EN 61241-10:2007 Električni uređaji za upotrebu u zapaljivoj prašini -- 10. dio: Razredba prostora gdje se zapaljiva prašina nalazi ili se može nalaziti (IEC 61241-10:2004; EN 61241-10:2004)

[28] Cornell, John., Experiments with Mixtures: Design, Models and the Analysis of Mixture Data; 3thrd edition, A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, INC, 2002

[29] Cajner, H., Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa, doktorski rad, Sveučilište u zagrebu, Fakultet strojarstava I brodogradnje, Zagreb, 2011

[30] Statistica 10.0 – programski paket

[31] Glor, M., A Synopsis of Explosion Hazards During the Transfer of Powders into Flammable Solvents and Explosion Preventative Measures, Pharmaceutical engineering, The Official Magazine of ISPE, January/February 2010, Vol. 30 No. 1

KRATKI ŽIVOTOPIS

Mario Mačković rođen je 15. kolovoza 1977. u Zagrebu, gdje je završio osnovnu i srednju školu "Ruđer Bošković", smjer strojarstvo. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja, 1996. upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Na Katedri za strojarsku automatiku Zavod za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava, diplomira u travnju 2004., kod mentora prof. dr. sc. Joška Petrića, s radom "Regulacija laboratorijskog modela loptice na gredi".

Tijekom studija radi kao demonstrator hidraulike i pneumatike u Festovom laboratoriju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

Kao apsolvent zapošljava se u "Indel uslugama" na programiranju i održavanju CNC strojeva, gdje radi osam mjeseci, nakon čega se u rujnu 2004. zapošljava u Agenciji za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom (Ex-Agenciji) Vlade Republike Hrvatske.

Akademske 2006/2007 upisuje poslijediplomski specijalistički studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment.

U Ex-Agenciji radi na mjestu voditelja laboratorija, ExLAB, te na mjestu voditelja Odjela za certifikaciju eksplozivnih tvari.

Uža specijalnost mu je ispitivanje eksplozivnih karakteristika zapaljivih prašina i plinova, ispitivanje i certificiranje sigurnosnih sustava i neelektrične opreme. Bavi se i certifikacijom eksplozivnih tvari.

Član je tehničkog odbora TO E70 "Stupnjevi zaštite kućištem" i TO 511 "Eksplozivi za civilnu uporabu". Tijekom svoga rada objavljuje niz stručnih članaka u Biltenu Ex-Agencije koji obrađuju problematiku ispitivanja zapaljivih prašina i plinova, IP zaštite, sigurnosnih sustava te certifikacije eksplozivnih tvari i sudjeluje na nekoliko međunarodnih konferencija. Jedan je od autora Priručnika Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom "Ex-oprema i zaštitni sustavi".

Redovni je izlagač na "PEX-seminaru" iz protueksplozijske zaštite u organizaciji Rudarsko geološko nafntog fakuteta u Zagrebu, s temom: „Odabir zaštitnih sustava na osnovu karakteristika zapaljivih medija", te na seminarima u organizaciji Ex-Agencije. Aktivno se služi engleskim jezikom. Oženjen je i otac dvoje djece.

BRIEF BIOGRAPHY

Mario Mačković was born on August 15, 1977 in Zagreb, where he attended "Ruđer Bošković" high school, majoring in mechanical engineering. After graduating high school in 1996, he enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Ship Building at the University of Zagreb. In April of 2004 he graduated from the College of Mechanical Automation, Department of Robotics and Automation of Production Systems under the mentorship of Prof. Joško Petrić, PhD. The topic of his thesis was "The Regulation of Laboratory Models of Ball on the beam".

Throughout his studies Mario worked as a student assistant in hydraulics and pneumatics at the FESTO laboratory at the Faculty of Electrical Engineering and Computing.

As an intern Mario worked at "Indel Services", programming and maintaining CNC equipment, where he was employed for eight months. In September of 2004 he began employment with the Agency for Explosive Atmosphere Hazardous Areas (Ex-Agency) of the Government of Croatia.

In 2006 Mario enrolled in the graduate program at the Faculty of Mechanical Engineering and Ship Building, as a major in Industrial Engineering and Management.

He works at Ex-Agency as head of the Laboratory, Ex-LAB, and as head of the Department of Explosive Materials Certification.

Mario's specialty is testing the explosive characteristics of combustible dust and gases, testing and certification of safety systems and non-electrical equipment. He also works on certification of explosive materials. He is a member of technical committee TO E70 "Degress of protection provided by enclosure"and TO 511 "Explosive for civil use". Mario has written a series of expert papers for Ex-Agency's Bulletin journal, which examine the issues of testing explosive dust and gases, IP protection, safety systems and certification of explosive materials. He has also participated in several international conferences. Mario is one of the authors of Ex-Agency's manual, "Ex-equipment and Protection Systems."

Mario is a regular lecturer at explosion protection seminars (PEX-seminar) under the topic: "Selection of protection systems based on the characteristics of flammable substances," and at seminars organized by Ex-Agency. He is proficient in English and married with two children.