Inertizacija

Žilić, Ivo

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:291794

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

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







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

INERTIZACIJA

Diplomski rad

Ivo Žilić

N-188

Zagreb, 2017.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

INERTIZACIJA

IVO ŽILIĆ

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Sažetak

Jedna od dvije mjere za ostvarenje primarne protueksplozijske zaštite je inertizacija. U ograničenom prostoru se dodaje inertna tvar u mješavinu zapaljivog medija i zraka čime se smanjuje udjel kisika u mješavini što omogućava postizanje djelomične ili potpune inertizacije čime se onemogućuje nastanak lančanog gorenja – eksplozije. U radu su objašnjene fizikalne osnove inertizacije, načini određivanja graničnih parametara inertizacije te načini ostvarivanja sa primjerima.

Diplomski rad sadrži: 44 stranica, 17 slika, 5 tablica, 12 referenci.
Jezik izvornika: Hrvatski

Voditelj: Dr. sc. Dalibor Kuhinek
Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Dalibor Kuhinek, docent RGNF-a
2. Dr.sc. Zdenko Krištafor, redovni profesor RGNF-a
3. Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, izvanredna profesorica RGNF-a

Datum obrane:17.02.2017. Rudarsko geološko naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

INERTISATION

IVO ŽILIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

One of the two measures for achieving primary explosion protection is inertisation. In a confined space, an inert substance is added to a mixture of air and flammable medium, reducing the percentage of oxygen in the mixture, which enables it to reach partial or complete inertisation preventing combustion - explosion. This thesis explains the physical basics of inertisation, methods of determining the parameter limits of inertisation and the ways of achieving using with examples.

Thesis contains: 44 pages, 17 figures, 5 tables, 12 references.
Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Dalibor Kuhinek, PhD
Reviewers: 1. Assistant Professor Dalibor Kuhinek, PhD
2. Full Professor Zdenko Krištofor, PhD
3. Associate Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD

Date of defense: February 17th, 2017 Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

POPIS TABLICA: ..... **I**

POPIS SLIKA: ..... **II**

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA ..... **III**

1. UVOD **1**

2. EKSPLOZIJA **2**

2.1. Primarna protueksplozijska zaštita 3

2.2. Granice eksplozivnosti 5

2.3. Područje eksplozivnosti 6

2.4. Granična koncentracija kisika 9

2.5. Određivanje graničnih koncentracija zraka (GKZ) zapaljivih plinova i para 11

2.5.1. Kratka metoda 12

2.5.2. Produžena metoda 14

2.5.3. Metoda Roslowski-Brandt 15

2.5.4. Metoda Krause 15

2.5.5. Metoda Razus 16

3. INERTIZACIJA **17**

3.1. Ostvarivanje inertizacije dodavanjem inertnih plinova 20

3.2. Metode ostvarivanja inertizacije 21

3.2.1. Inertizacija oscilacijom pretlaka 22

3.2.2. Inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma) 24

3.2.3. Inertizacija protokom 27

3.2.4. Inertizacija istisnom zamjenom 28

3.3. Zadržavanje inertnih uvjeta 28

3.4. Utjecaj radnih parametara procesa na inertizaciju 30

4. INERTIZACIJA U INDUSTRIJI **32**

4.1. Inertizacija spremnika nafte 32

4.2. Inertizacija plinovoda 33

4.3. Inertizacija u farmaceutskoj industiji 33

4.3.1. Jednostavan sustav 35

4.3.2. Inertizacija mlina s kontrolom kisika 36

4.4. Inertizacija silosa 38
4.5. Inertizacija sustava mljevenja 39
5. PRIMJERI PRORAČUNA 41
5.1. Primjer inertizacije oscilacijom predtlaka 41
5.2. Primjer inertizacije protokom 41
6. ZAKLJUČAK 42
7. LITERATURA 44

POPIS TABLICA:

Tablica 2-1. Fizikalni odnosi brzine širenja plamena i postignuti tlakovi. 2
Tablica 3-1. Granične vrijednosti inertizacije zapaljivih plinova i para pri 1 bar prema „Chemasafe“. 19
Tablica 3-2. Granična koncentracija kisika za inertizaciju zapaljivih prašina prema „Chemsafe“. 20
Tablica 3-3. Tipične vrijednosti porasta tlaka za sustave oscilacijom podtlaka. 25
Tablica 3-4. Vrijednosti k = Cp / Cv za neke inertne plinove. 26

POPIS SLIKA:

Slika 2-1. Obujamske granice eksplozivnosti. 6
Slika 2-2. Područje eksplozivnosti u kartezijskom koordinatnom sustavu. 7
Slika 2-3. Trokutasti dijagram komponenata smjese 8
Slika 2-4. Trokutasti dijagram granične koncentracije kisika (GKK) 10
Slika 2-5. Kratka metoda 13
Slika 2-6. Produžena metoda 14
Slika 3-1. Načini inetizacije 18
Slika 3-2. Tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu procesa 29
Slika 3-3. Utjecaj temperature na najveću dozvoljenu koncentraciju kisika 30
Slika 3-4. Utjecaj tlaka na inertiziranje smeđeg ugljena 31
Slika 4-1. Inertizacija spremnika nafte protokom 32
Slika 4-2. Inertizacije i čišćenja plinovoda 33
Slika 4-3. Jednostavan sustav inertizacije sustava mljevenja 35
Slika 4-4. Sklop za dobavu inertnog plina s provjerom protoka 36
Slika 4-5. Prijenosni sustav inertizacije mlina s kontrolom koncentracije kisika 37
Slika 4-6. Inertizacija sustava silosa 39
Slika 4-7. Inertizacija sustava mljevenja 40

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA:

C_f –	konačna koncentracija kisika,	% vol.
C_i -	koncentracija kisika u inertnom plinu,	% vol.
C_n –	koncentracija kisika nakon ispiranja,	% vol.
C_o -	početna koncentracija kisika,	% vol.
F-	zaštitni faktor za čišćenje,	-
K –	koncentracija,	% vol.
M -	molarna masa	g/mol
n –	broj ciklusa ispiranja,	-
n_{O2} -	molarna koncentracija kisika	--
P_1 –	donji tlak ispiranja,	MPa
P_2 –	gornji tlak ispiranja,	MPa
R -	omjer gornjeg i donjeg tlaka,	-
Q –	protok medija,	m^3/h
T –	vrijeme propuhivanja,	h
V –	volumen,	m^3
V_{Medij} –	volumen medija,	m^3
V_{Zrak} -	volumen zraka,	m^3
w -	maseni udio,	% vol.

1. UVOD

U ovom diplomskom radu bit će objašnjena inertizacija, jedna od mjera sprečavanja nastanka eksplozije. Rad donosi osvrt na nastajanje eksplozije, te sprečavanje njenog nastajanja. Metode koje se koriste pri inertizaciji bit će pojašnjene, te njihove primjene u industrijski granama. Na kraju ovog diplomskog rada su primjeri proračuna inertizacije.

Inertizacija je jedna od mjera protueksplozijske zaštite koja podrazumijeva sprečavanje stvaranja eksplozivne atmosfere tj. na način da se mješavini medija i zraka dodaje treća inertna tvar čime se smanjuje koncentracija kisika u mješavini i time onemogućava ekspolozija. Eksplozivne atmosfere mogu nastati iz smjesa radnih medija koji nastaju u raznim industrijskim procesima, a to su najčešće smjese zraka i zapaljivih plinova, tekućina ili zapaljivih prašina. Inertizacija se ubraja u mjere sprečavanja eksplozije ili primarnu protueksplozijsku zaštitu.

2. EKSPLOZIJA

Zapaljivi medij, definiran je kao materijal u obliku plina, pare, tekućine, krute tvari ili njihovih mješavina koji u određenom omjeru sa zrakom tvori eksplozivnu smjesu. Eksplozivna atmosfera je smjesa zapaljivog medija, u bilo kojem obliku, i zraka pod atmosferskim uvjetima u kojoj se nakon početnog paljenja, izgaranje širi na ostatak smjese. U toj reakciji dolazi do spajanja zapaljivog medija i kisika iz zraka i oslobađa se određena količina topline. Nakon što se eksplozivna smjesa zapali i nastane lančana reakcija gorenja zbog svog brizantnog razvoja lančana reakcija prelazi u eksploziju, a u određenim okolnostima može doći do vrlo brizantne lančane reakcije gorenja gdje dolazi do detonacije. Ako prilikom gorenja materijala, koje mogu stvoriti eksplozivnu smjesu, ne dođe do lančane reakcije takav proces naziva se buktanje. Kad se sve navedene procese fizikalno predstavi brzinom širenja plamena i postignutim tlakovima dobiju se odnosi koji su navedeni u Tablici 2-1. Pod atmosferskim uvjetima podrazumijevaju se uvjeti tlaka od 0,85 do 1,1 bara i temperature od -20 °C do +40 °C (Marinović, 2005).

Tablica 2-1. Fizikalni odnosi brzine širenja plamena i postignuti tlakovi (Marinović, 2010)

Proces gorenja	**Brzina plamena (m/s)**	**Tlak (MPa)**
BUKTANJE	do 2	-
EKSPLOZIJA	2 do 30	0,4-1,0
DETONACIJA	1000 do 4000	1,0-6

Iz tablice 2-1 se može vidjeti da se proces buktanja događa kod brzine širenja plamena manje od 2 m/s bez postignutog tlaka, proces eksplozije događa kod brzine širenja plamena od 2 m/s do 30 m/s te pri tom procesu nastaje tlak između 0,4 MPa i 1,0 MPa i proces detonacije gdje brzina širenja plamena doseže od 1000 m/s do 4000 m/s te pri tome nastaje tlak od 1,0 MPa do 6 MPa.

Nastanak eksplozije može prouzročiti ozbiljne ozljede ljudi ili oštećenja imovine, treba razviti i implementirati odgovarajuće sigurnosne mjere. To mora uključiti sve aspekte protueksplozijske zaštite koji su podijeljeni u (Rumbak, 2012):

a) primarnu protueksplozijsku zaštitu,
b) sekundarnu protueksplozijsku zaštitu,
c) tercijarnu protueksplozijsku zaštita.

2.1. Primarna protueksplozijska zaštita

Pod pojmom primarna protueksplozijska zaštita podrazumijeva se sprečavanja nastajanja i širenja eksplozivne atmosfere. Primarna protueksplozijska zaštita se postiže:

a) održavanjem koncentracije smjese zapaljivog medija i zraka ispod 10 % donje granice eksplozivnosti (DGE),
b) inertizacijom tj. smanjenjem udjela kisika u smjesi zapaljivog plina i zraka ispod granične koncentracije kisika (GKK).

Održavanje koncentracije smjese zapaljivog medija i zraka ispod 10 % donje granice eksplozivnosti (DGE) postiže se ograničavanjem izvora ispuštanja i ventilacijom. Temeljni parametri ograničenje izvora ispuštanja su učestalost i trajanje izvora ispuštanja, a razlikuju se (Marinović, 2010):

a) trajni izvor (T) - koji trajno, često ili dulje vrijeme unose i zadržavaju u prostoru zapaljive plinove ili pare zapaljivih tekućina,
b) primarni izvor (P) - koji povremeno kod normalnog rada sadrže ili ispuštaju zapaljivi medij u okolni prostor, a povremena prisutnost zapaljivog medija predviđena je tehnološkim procesom ili rukovanjem, ili očekivanim kvarom, ali ih nije moguće izbjeći primijenjenom tehnologijom,
c) sekundarni izvor (S) - koji samo pod nenormalnim okolnostima, u slučaju kvara ili poremećaja tehnološkog procesa, ispuštaju zapaljive plinove ili pare zapaljivih tekućina u okolni prostor, ali vrlo rijetko i kratko traju.

Ventilacija može biti:

- prirodna ventilacija,
- umjetna ventilacija ili usis izvora zračenja.

Prirodna ventilacija kao izmjena zraka u tehničkim specifikacijama nije definirana. U protueksplozijskoj zaštiti prirodno prozračivanje dolazi u obzir, samo ako postoje sigurna jamstva da je izmjena zraka dovoljna za sprečavanje nastajanja eksplozije. Idealno prirodno prozračivanje u prostorijama se postiže ako su otvori za prozračivanje u prostoriji dijagonalno nasuprotni. Pomoću ventilacije se postiže smanjenje vjerojatnosti stvaranja eksplozivne atmosfere čime se ograničava područje u kojem može nastati eksplozivna atmosfera. Učinkovito prozračivanje mora biti konstruirano, prije svega ovisi o maksimalnom intenzitetu i učestalosti izvora i karakteristikama zapaljivih plinova, tekućina ili prašina. (www.gasbehaelter.de, 2004)

Inertizacija podrazumijeva postizanje inertnosti postojeće smjese zapaljivog medija i zraka. Bitna je identifikacija zapaljivog medija koji se nalazi u eksplozivnoj smjesi. Ako je sastav smjese poznat, onda se mogu provesti eksperimentalna ispitivanja koja bi dovela do saznanja koja od metoda protueksplozijske zaštite je za određeni zapaljivi medij najprikladnija. Ispitivanjem se mogu odrediti karakteristike određenog zapaljivog medija, primjerice granice eksplozivnosti. Glavna zadaća odabrane metode je održavanje koncentracije zapaljivog medija i zraka ispod donje granice eksplozivnosti (DGE).

Kada se govori o smanjenju udjela kisika ispod granične koncentracije kisika (GKK) u kojoj eksplozivna smjesa neće moći izazvati proces eksplozije, najčešće se radi o smjesi zapaljivog plina, inertnog plina i zraka kod jedne određene početne temperature i određenog početnog tlaka. Ova karakteristika postaje u praksi sve važnije, jer je relativno lako održavati i pratiti koncentraciju kisika (O_2) u zraku.

Sekundarna protueksplozijska zaštita podrazumijeva sve metode i vrste protueksplozijske zaštite na temelju kojih se izrađuju uređaji koji u određenim uvjetima ne čine uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere u okolini.

Tercijarna protueksplozijska zaštita se primjenjuje kada mjere primarne i sekundarne protueksplozijske zaštite nisu dovoljne. Nije moguće u svim slučajevima smanjiti opasnost od eksplozije i svesti je na potrebnu razinu samo odabirom odgovarajuće metode. Potrebno je primijeniti dodatne mjere za zaštitu od eksplozije, koje imaju svrhu kontrolirati učinke eksplozije i sprečavanje ozljeda radnog osoblja.

2.2. Granice eksplozivnosti

Ako u eksplozivnoj smjesi postoji ravnoteža između zapaljivog medija i raspoloživog kisika doći će do potpunog izgaranja i neće ostati niti zapaljivog medija niti raspoloživog kisika. Takva se smjesa naziva stehiometrijska smjesa. U stehiometrijskoj smjesi proces eksplozije je najintenzivniji s maksimalno postignutim učincima eksplozije.

Ako prilikom procesa eksplozije sav zapaljivi medij izgori, a ostane višak raspoloživog kisika, takva se eksplozivna smjesa naziva siromašnom smjesom. U obrnutom slučaju kada u procesu eksplozije sav raspoloživi kisik izgori, a ostane viška zapaljivog medija, takva smjesa se naziva bogata smjesa.

Koncentracija zapaljivog medija u smjesi sa zrakom računa se izrazom (2-1) (Kuhinek, 2016):

$$K = \frac{V_{Medij}}{V_{Medij}+V_{Zrak}} \ , \tag{2-1}$$

gdje je:

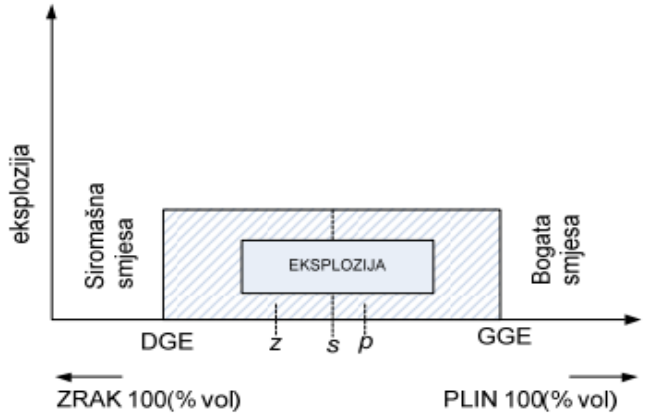
K – koncentracija zapaljivog medija, % (vol.),

V_{Medij} – obujam medija, m^3,

V_{Zrak} – obujam zraka, m^3.

Omjer zapaljivog medija i raspoloživog kisika mora biti unutar određenih granica gdje dolazi do paljenja eksplozivne smjese. Iznad i ispod tih granica neće doći do eksplozije zbog premale ili prevelike koncentracije kisika odnosno zapaljivog medija. Koncentracije unutar kojih se može dobiti eksplozija su (Marinović, 2005):

- Donja granica eksplozivnosti (DGE) je najveći postotak obujamskog odnosa eksplozivnog plina u smjesi plina i zraka ispod stehiometrijske koncentracije kod kojega još ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja,
- Gornja granica eksplozivnosti (GGE) je najmanji postotak iznad stehiometrijske koncentracije kod kojega još ne dolazi do eksplozije nakon inicijalnog paljenja.



Slika 2-1. Obujamske granice eksplozivnosti (Marinović, 2005)

Slika 2-1 prikazuje nekoliko karakterističnih koncentracija zapaljivih plinova. Točke z, p i s su (Marinović, 2005):

z – koncentracija minimalne energije paljenja,

p – koncentracija maksimalnog tlaka eksplozije,

s – stehiometrijska smjesa (izgaranje bez ostatka zapaljivog medija i kisika).

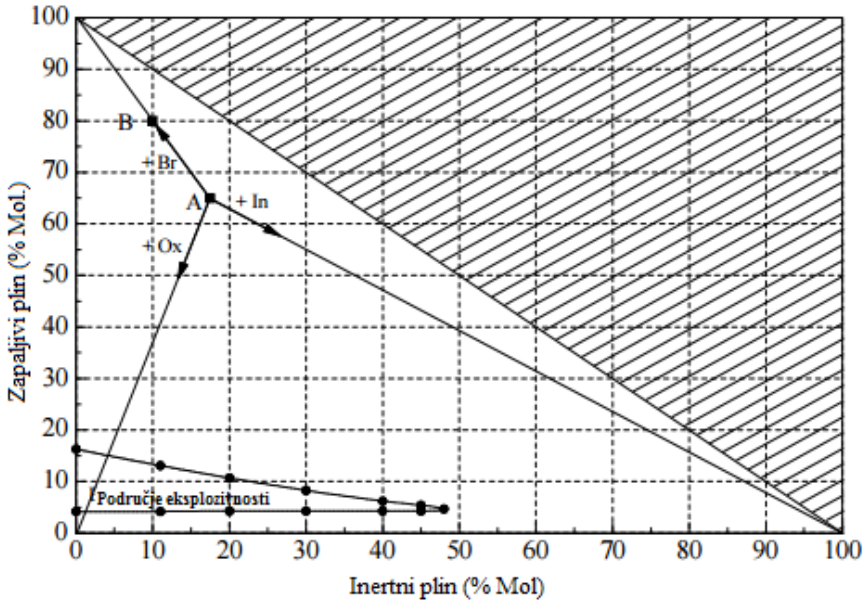
Granice eksplozivnosti su uvijek iskazane uz atmosferski tlak od 1013 hPa (mbar) i pri temperaturi od 20 °C. Uvjeti mogu biti specifični, pri čemu granične vrijednosti smjese u primjeni ne vrijede, npr. povećani tlakovi za gornju granicu eksplozivnosti kod svih plinova.

Za inicijalno paljenje uzročnik paljenja mora imati dovoljnu energiju i temperaturu paljenja, tj. energija paljenja mora biti iznad minimalne energije paljenja eksplozivne smjese i temperaturu iznad najmanje temperature paljenja te iste eksplozivne smjese. Pri tom pod pojmom minimalne energije odnosno temperature smatra se da je to ona energija odnosno temperatura koja pouzdano pali eksplozivnu smjesu (Marinović, 2005).

2.3. Područje eksplozivnosti

U europskoj normi EN 1127-1 iz 1997. godine definirani su različiti pojmovi protueksplozijske zaštite. Najvažniji pojmovi te norme su granice eksplozivnosti tj. donja i gornja granica eksplozivnosti. Granice eksplozivnosti su definirane za eksplozivne smjese čije su komponente zapaljivi medij i kisik (O_2), odnosno zrak. U praksi može se dogoditi tro-komponentna smjesa plinova koje se sastoje od zapaljivog medija, inertnog medija i kisika (O_2). U tom smislu granice eksplozivnosti treba proširiti na područje eksplozivnosti.

Svaka komponenta te tro-komponente smjese ima svoju graničnu liniju eksplozivnosti, a zajedno čine područje eksplozivnosti. Na graničnoj liniji eksplozivnosti postoji točka u kojoj je udio inertnog medija, u toj eksplozivnoj smjesi, maksimalan i ta se točka naziva reverzna točka. Zahvaljujući definiranoj reverznoj točki definirane su i granične linije eksplozivnosti, tako da se gornja granična linija eksplozivnosti nalazi od gornje granice eksplozivnosti do reverzne točke, a donja granična linija eksplozivnosti nalazi od donje granice eksplozivnosti do reverzne točke (Fuß, 2004). Područje eksplozivnosti u kartezijskom koordinatnom sustavu prikazano je na slici 2-2.



Slika 2-2. Područje eksplozivnosti u kartezijskom koordinatnom sustavu (Fuß, 2004)

Slika 2-2 prikazuje dijagram tipičnog područja eksplozivnosti u kartezijskom koordinatnom sustavu. Na osi apscisa nalazi se molarni udio inertnog plina u rasponu od 0 % do 100 %, a na osi ordinata molarni udio zapaljivog plina u rasponu od 0 % do 100% smjese. Šrafirano područje na slici predstavlja područje nemogućih mješavina jer je zbroj svih molarnih komponenti veći od 100 %. Nedostatak ove metode je što se udio kisika (O_2) u smjesi ne može direktno očitati nego se mora matematički dobiti i to izrazom (2-2):

$$X_{Kisika} = 100 - X_{Zapaljivi\ medij} - X_{Inertni\ medij}\ , \qquad (2\text{-}2)$$

gdje je:

X_{Kisika} – predstavlja koncentraciju kisika u smjesi, % vol.,

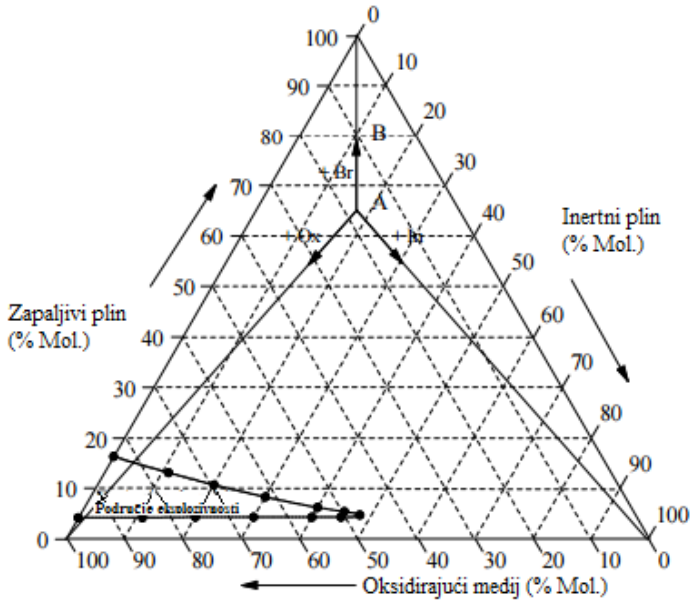
$X_{\text{Zapaljiv medij}}$ – predstavlja koncentraciju zapaljivog medija, % vol.,

$X_{\text{Inertni medij}}$ – predstavlja koncentraciju inertnog medija, % vol.

U dijagramu na slici 2-2 područje eksplozivnosti je između molarne koncentracije inetnog medija od 0 % do 49 % i zapaljivog medija od 5 % do 18 %.

Ako se u protueksplozijskoj zaštiti zrak koristi kao oksidirajući medij, tada on predstavlja jednu pseudo-komponentu. Zrak se sastoji od dušika (N_2), kisika (O_2), plemenitih plinova i ugljikovog dioksida (CO_2). Kod izrade dijagrama za tro-komponenti sastav smjese zapaljivog medija, zraka i inertnog medija treba uzeti u obzir udio dušika (N_2) u zraku i pridodati ga koncentraciji inertnog medija smjese.

Osim dijagrama područja eksplozivnosti u kartezijskom dijagramu, tro-komponentni sastav smjese se može prikazati i u trokutastim koordinatama jednakostraničnog trokuta. Primjer takvog dijagrama tro-komponentnog sastava prikazan je na slici 2-3. Prednost primjene tog dijagrama je u tome što se iz njega izravno mogu očitati sve molarne vrijednosti tvari komponenata smjese. Sve strane dijagrama predstavljaju binarne smjese plinova, a vrhovi trokuta su čiste tvari. Bazu jednakostraničnog trokuta čini oksidirajući medij prikazan u molarnom udjelu od 0 % do 100 %, a krakovi trokuta čine zapaljivi medij i inertni medij također prikazani u molarnim udjelima od 0 % do 100 %.



Slika 2-3. Trokutasti dijagram komponenata smjese (Fuß, 2004)

Na dijagramu na slici 2-3 područje eksplozivnosti je između molarnih koncentracija zapaljivog medija od 5 % do 18 %, inertnog medija od 0 % do 49 %, te oksidirajućeg medija 48 % do 100 %.

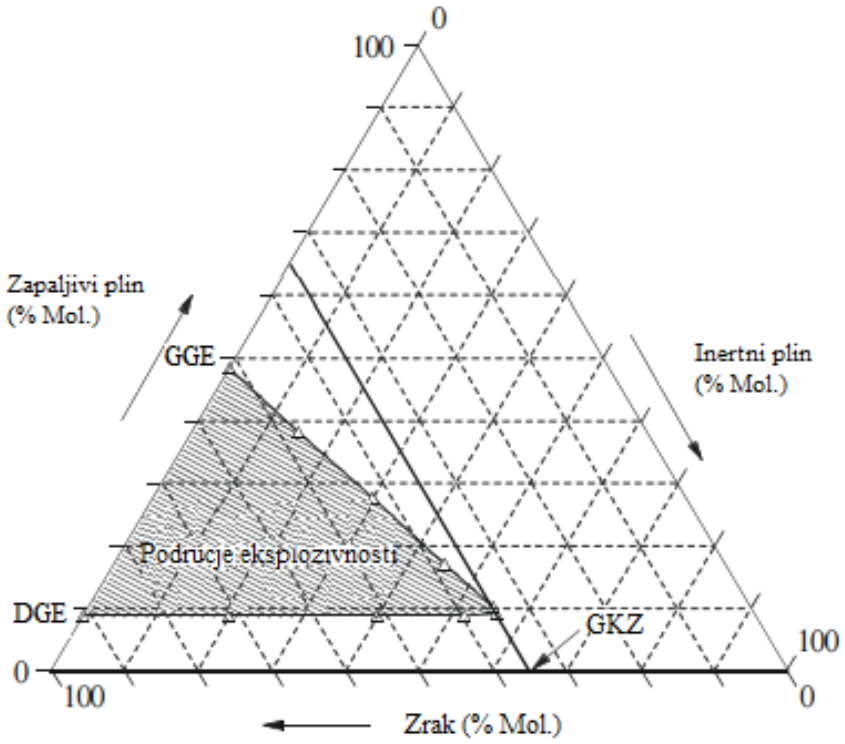
2.4. Granična koncentracija kisika

U već spomenutoj normi EN 1127-1 granična koncentracija kisika, GKK (engl. *limiting oxygen concentration*, LOC) definirana je kao „maksimalno koncentracija kisika u smjesi zapaljivog medija sa zrakom i inertnim plinom pri kojoj neće doći do eksplozije, definirani pod određenim laboratorijskim uvjetima“ (Fuß, 2004). U laboratorijskim uvjetima se koncentracija kisika lako može mjeriti pomoću detektora kisika. Slika 2-4 prikazuje trokutasti dijagram granične koncentracije kisika. Bazna stranica trokutastog dijagrama je molarna koncentracija zraka u vrijednosti od 0 % do 100 %, a ostale stranice čine molarnu koncentraciju zapaljivog medija, odnosno inertnog plina u vrijednosti od 0 % do 100 %. Ako se iz područja eksplozivnosti smjese povuče paralela s osi inertnog plina dobije se linija na dijagrama koja je nazvana GKZ. GKZ (engl. *limiting air concentration*, LAC) definirana je kao granična koncentracija zraka.

Relacijom (2-3) iz granične koncentracije zraka (GKZ) može se izračunati graničnu koncentracija kisika smjese (GKK):

$$GKK = 0{,}209 \times GKZ, \tag{2-3}$$

Promatrajući spomenuti relaciju koeficijent 0,209 predstavlja udio kisika u zraku izražen decimalnim brojem.



Slika 2-4. Trokutasti dijagram granične koncentracije kisika (GKK) (Fuß, 2004)

Nasuprot tome, granična koncentracija kisika (GKK) ne može otkriti koji način inertizacije je najprikladniji. Problem ove metode je u tome što može nastati djelomična inertizacija i pod uvjetom da je koncentracija kisika stalno ispod granične koncentracije kisika. Primjerice, prilikom nekakvog kvara ili propuštanja u sustav može ući određena količina zraka, koja će stvoriti eksplozivnu atmosferu.

Metoda održavanja kisika ispod granične koncentracije kisika je jedna od metoda protueksplozijske zaštite, ali za razliku od određivanja granica eksplozivnosti ovaj parametar nema nikakvu posebnu eksperimentalnu metodu određivanja.

U engleskoj literaturi pojam granična koncentracija nije ujednačena. Značenje granične koncentracije kisika (GKK) nije primijenjeno samo kod plinova i zapaljivih para, već i kod zapaljivih prašina. Takva se definicija služeno vodi u Europskom odboru za normizaciju, CEN (engl. *European Committee for Standardization*). Problem nastaje što se u literaturi za graničnu koncentraciju kisika mogu pronaći različiti pojmovi (npr. najveća dopuštena koncentracija kisika, najveći sigurnosni postotak kisika i minimalna koncentracija kisika) koji mogu stvoriti pomutnju.

2.5. Određivanje graničnih koncentracija zraka (GKZ) zapaljivih plinova i para

Do stupanja na snagu europske norme EN 14756:2006 nije postojao standardizirani postupak određivanja granične koncentracije zraka (GKZ) zapaljivih plinova i para. Prethodno je prepušteno ispitivaču pronaći prikladan način utvrđivanja iste. Jedino što je bilo normirano bilo je određivanje granica eksplozivnosti (EN 1839).

Budući da, granična koncentracija zraka (GKZ) predstavlja važan parametar protueksplozijske zaštite inertizacijom, napravljena je europska norma koja vrijedi za svaku zemlju Europske Unije. Norma je izglasana 2005. godine i nosi naziv EN 14756.

U normi su zapaljivi plinovi i pare u smjesama izraženi molarnim udjelima (% Mol). Za razliku od norme za određivanje granica eksplozivnosti zapaljivih plinova i para (DIN 51649-1) u kojoj su odnosi zapaljivih plinova i para izraženi volumnim udjelima (% Vol.), odlučeno je da bi fizikalno-kemijska svojstva smjesa bila bolje opisana ako bi sastav bio izražen u molarnim udjelima.

Za sve zapaljive medije prvo se određuje donja i gornja granica eksplozivnosti u zraku, ako je ona nepoznata. Ovdje se upotrebljava europska norma za određivanje granica eksplozivnosti plinova i para EN 1839. Ukoliko je poznat sastav zapaljivog medija, tad se stehiometrijskom linijom određuje stehiometrijska granica eksplozivnosti. Ako stehiometrijska linija nije poznata, tada se stehiometrijska granica eksplozivnosti određuje izrazom (2-4):

$$X_{zapaljivi\ medij} = 1{,}2\ X_{zapaljivi\ medij,DGE}, \qquad (2\text{-}4)$$

gdje:

X_{zm} - stehiometrijska linija smjese, (% vol.),

$X_{zm,DGE}$ - molarni udio zapaljivog medija pri donjoj granici eksplozivnosti (DGE), (% vol.) .

U izrazu 2-4 dolazi do variranja udjela inertnog plina i zraka. U početnom razmatranju pretpostavlja se udio inetnog plina od 50 % mol. Prvi korak sadrži 5 % mol inertnog plina. Stehiometrijska granica se mora odrediti pri koraku od 0,5 % mol inertnog plina. Na taj način se određuje granični molarni udio zraka smjese i označava se sa $x_{zrak,granica}$.

Određivanje granične koncentracije zraka (GKZ) se dijeli na dvije metode (CEN/TC, 2005):

- Kratka metoda (engl. *short procedure*),
- Proširena metoda (engl. *extended procedure*).

U kratkoj metodi razmatra se dio eksplozivnog područja s najvišim udjelom inertnog plina, dok se u proširenoj metodi razmatra cjelokupno područje eksplozivnosti. Kriterij koji se postupak primjenjuje proizlazi iz odnosa graničnog molarnog udjela zraka ($X_{zrak,granica}$) i gornje granice eksplozivnosti (GGE). Kratka metoda se koristi ako je brojčana vrijednost gornje granice eksplozivnosti (GGE) ne prelazi 80%, a proširena metoda se koristi u suprotnom (CEN/TC, 2005):

- $GGE \leq 0{,}8\ (100 - x_{zrak,\ granica}) \rightarrow$ kratka metoda,
- $GGE > 0{,}8\ (100 - x_{zrak,\ granica}) \rightarrow$ proširena metoda.

Za većinu ispitnih plinova se može primjeniti kratka, jer je u većini slučajeva dio eksplozivnog područja s najvišim udjelom inertnog plina relevantan. Samo kod jako širokog eksplozivnog područja, kao npr. smjesa zapaljivih plinova s vodikom ili plinskih smjesa goriva, potrebno je ispitati cjelokupno područje eksplozivnosti. U tom slučaju se ne može isključiti mogućnost, da se granična koncentracija kisika (GKK) nalazi uzduž gornje granice eksplozivnosti (GGE) ili čak s njom podudara.

Budući da, su najčešće smjese zapaljivog medija i zraka, potrebno je odrediti udio kisika u smjesi za obje navedene metode, koji se dobije izrazom (2-3).

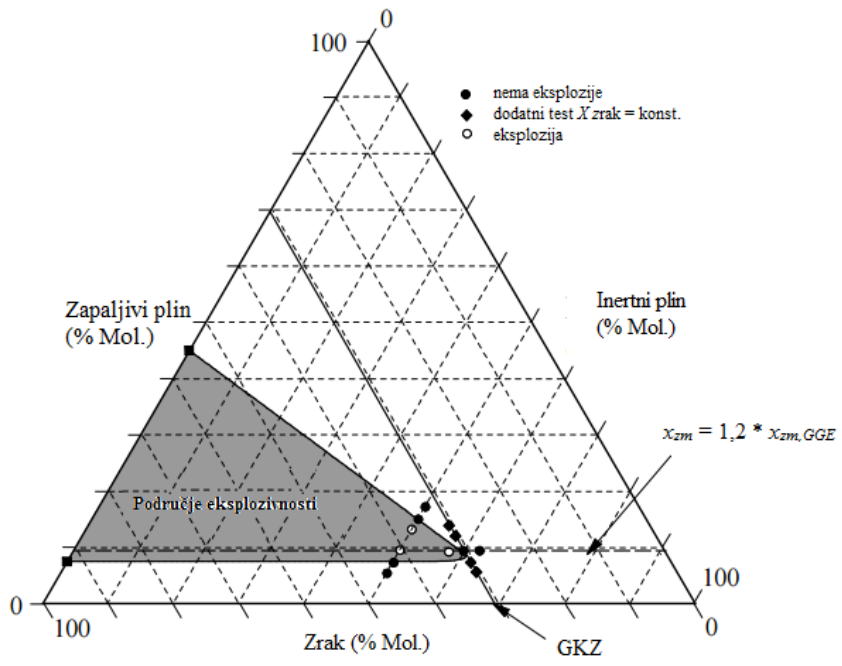
Granična koncentracija kisika se provjerava pomoću analizatora kisika. Dobivena vrijednost ne smije imati veće odstupanje od ± 0,2 % mol od izračunanog GKK-a.

2.5.1. Kratka metoda

Polazeći od utvrđene stehiometrijske granice eksplozivnosti ili granice konstantnog udjela zapaljivog medija od $x_{zm} = 1{,}2 \times x_{zm,GGE}$ odrede se četiri točke, te se izvode kontrolirani eksperimenti pri konstantnom udjelu zraka. Dvije od njih se dobiju pri višem udjelu zapaljivog medija, a dvije pri nižem udjelu zapaljivog medija od već utvrđenih granica eksplozivnosti. Pri udjelu zapaljivog plina u smjesi od 5 % mol korak u iteraciji iznosi 0,2 % mol zapaljivog plina, a ako je udio zapaljivog plina viši ili jednak 5 % mol onda korak iteracije iznosi 0,5 % mol (Fuß, 2004).

U slučaju da se za vrijeme kontroliranog eksperimenta u nekoj točki dogodi eksplozija, tada se granica eksplozivnosti određuje pri konstantnom udjelu zapaljivog plina. Ako je ta granica određena cijeli postupak se ponavlja samo pri konstantnim udjelom zraka. Postupak se ponavlja sve dok se ne odrede sve četiri točke bez da je ijedna eksplozija zabilježena. Dobiveni udio zraka u tom eksperimentu označen je kao maksimalno dopušteni udio zraka.

Pri određivanju točke granične koncentracije kisika u području eksplozivnosti, dobiju se dvije nove granice eksplozivnosti pri konstantnom udjelu inertnog plina od 80 %, a referentna granica eksplozivnosti iznosi 0,8 $x_{in,limit}$. Jedna točka granične koncentracije kisika nalazi se ispod, a druga iznad referentne granice eksplozivnosti. Slika 2-5 prikazuje trokutasti dijagram razrješenja kratke metode.



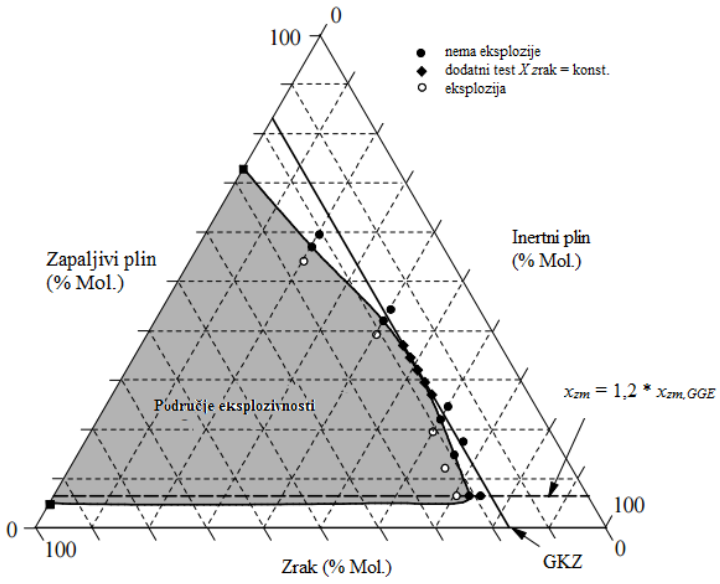
Slika 2-5. Kratka metoda (Fuß, 2004)

2.5.2. Produžena metoda

U slučaju da zapaljivi plin posjeduje jako prošireno eksplozivno područje nije isključeno da se granična koncentracija kisika (GKK) nalazi kod gornje granice eksplozivnosti (GGE) ili čak na njoj. U tom slučaju nije dovoljno promatrati samo vrh eksplozivnog područja, nego je potrebno upotrijebiti produženu metodu (engl. *extended procedure*) kako bi se utvrdila granična koncentracija kisika (GKK).

Uzduž gornje granice eksplozivnosti, određuje se pet točaka u kojima se udio inertnog plina drži konstantnim, a udio zapaljivog plina i zraka varira u razmacima od 0,5 % mol. Eksperimentalni udjeli zapaljivog plina i zraka se kasnije najčešće interpoliraju i tako spajaju. Na taj način se dobije vjerojatna krivulja gornje granice eksplozivnosti (GGE).

Na taj način moguće je identificirati znatan dio krivulje za određivanje maksimalnog dopuštenog udjela zraka. Prvo sjecište linije s gornjom granicom eksplozivnosti predstavlja vjerojatni sastav smjese, s najnižim udjelom zraka. Oko te točke izvodi se pet kontrolnih eksperimenata pri konstantnom udjelu zraka. Pri tim eksperimentima korak zapaljivog plina iznosi 2,5 % mol. Slika 2-6 prikazuje trokutasti dijagram produžene metode.



Slika 2-6. Produžena metoda (Fuß, 2004)

Ako pri nekom kontroliranom eksperimentalnu dođe do eksplozije potrebno je odrediti novu granicu eksplozivnosti pri tom udjelu inertnog plina. Zatim se cijeli postupak

ponavlja, interpoliraju se udjeli zapaljivog plina i zraka pri gornjoj granici eksplozivnosti (GGE), te se identificira dio krivulje za određivanje maksimalno dopuštenog udjela zraka. Dodirom te krivulje s gornjom granicom eksplozivnosti (GGE) dobije se točka koja predstavlja vjerojatni sastav smjese s najnižim udjelom zraka. Oko te točke odredi se novih pet točaka i provode se kontrolirani eksperimenti. Ako se u nijednoj točki ne zabilježi eksplozija, točka dobivena sjecištem krivulje i gornje granice eksplozivnosti predstavlja maksimalno dopušteni udio zraka.

2.5.3. Metoda Roslowski-Brandt

Metode proračuna granične koncentracije kisika su u literaturi manje zastupljene. Postoje razlike pri proračunima granične koncentracije kisika (GKK) za smjese prašina/zraka, i za smjese zapaljivog plina/zraka.

Metoda Roslowski-Brandt je proračun koji dovodi graničnu koncentraciju kisika (GKK) u vezu s potrebnom stehiometrijskom koncentracijom kisika pri koncentraciji zapaljivog medija donje granice eksplozivnosti smjese (DGE) i to izrazom (2-5) (Fuß, 2004).

$$GKK = n_{O2} * DGE, \tag{2-5}$$

Parametar n_{O2} predstavlja molarnu koncentraciju kisika koja je potrebna za potpuno sagorijevanje. Ova relacija vrijedi za smjesu zraka i zapaljivih plinova. Upotreba za smjesu zraka i zapaljivih prašina je isto moguća, međutim koncentracija medija trebaju biti izražene u g/m^3.

2.5.4. Metoda Krause

Metoda se uglavnom koristi za proračun granične koncentracije kisika (GKK) pri smjesi zraka i zapaljivih prašina, ali se može primijeniti i pri smjesi zraka i zapaljivih plinova. Potrebno je znati sastav zapaljivog medija. Drugi uvjet je poznavanje elementarnih reakcija izgaranja koja definira ukupnu potrošnju kisika za određeni zapaljivi medij. Granična koncentracija kisika (GKK) se računa prema relaciji (2-6) (Fuß, 2004):

$$GKK = 100 \left(\sum_i v_{02,i} \frac{w_i}{M_i} - \frac{w_{O2}}{M_{O2}} \right) M_{O2} GGE, \tag{2-6}$$

gdje:

$v_{O2,i}$ - jedan mol zapaljivog plina normiranog stehiometrijskog koeficijenta kisika i-te elementarne reakcije, % vol.,

M - molarna masa, g/mol,

w - maseni udio traženog elementa. % vol.

Gornja granica eksplozivnosti (GGE) za zapaljive plinove izražena je u % vol.

2.5.5. Metoda Razus

Ova metoda koristi drugačiji pristup od prethodno navedenih metoda. Pomoću nekog komercionalnog termodinamičkog računalnog programa odredi se temperatura vrelišta te za njega donja granica eksplozivnosti (DGE) zapaljivog plina. Dobivena temperatura vrelišta se linearnom funkcijom korigira na vrijednost granične koncentracije kisika. Metoda vrijedi za atmosferske uvjete i eksplozivne smjese gdje zapaljivi medij čini zrak, a dušik čini inertni medij. Rješenja dobivena računalnim programom su gotovo jednaka podacima raznih autora iz literature za dobivanje vrijednosti granične koncentracije kisika (GKK).

3. INERTIZACIJA

Inertizacija je jedna od mjera sprječavanja nastajanja eksplozivne atmosfere ili smanjenja vjerojatnosti te pojave na najmanju moguću razinu. Ubraja se u mjere sprečavanja eksplozije ili primarnu protueksplozijsku zaštitu. Glavni zadatak inertizacije je smanjenje udjela kisika i ispod određene koncentracije unutar koje bi se spriječila pojava nastajanja eksplozivne atmosfere. Smanjenje udjela kisika i zapaljive tvari postiže se dodavanjem inertnih tvari u smjesu zapaljive tvari i zraka. Inertne tvari koji se dodaju u tu smjesu mogu biti plinovi (npr. dušik (N_2), ugljični dioksid (CO_2), plemeniti plinovi, dimni plinovi itd.), vodena para ili inertne praškaste tvari. Najčešću primjenu u industriji imaju dušik i ugljikov dioksid (Mačković, 2012).

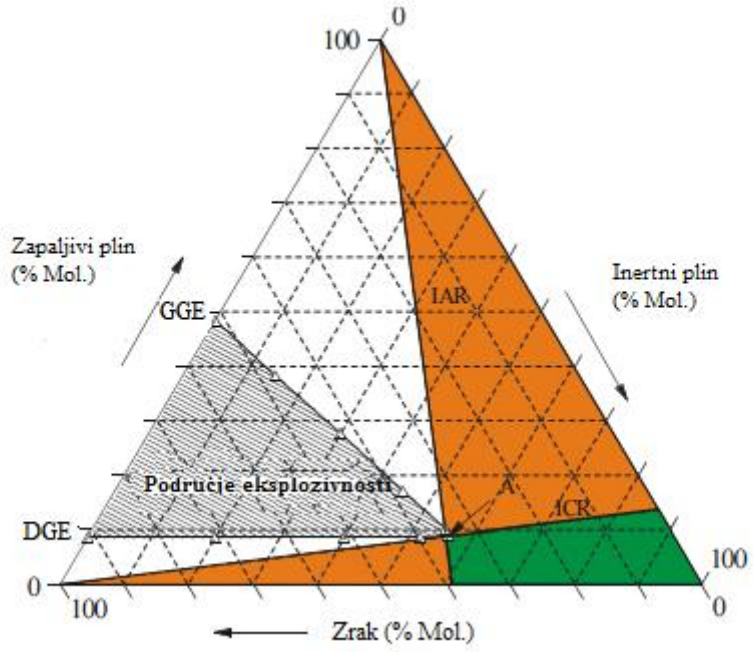
Razlikuju se dva načina inertizacije:

- potpuna i
- djelomična inertizacija.

Kod potpune inertizacije smjesa se homogenizira i dodavanjem zapaljivog i/ili oksidirajućeg medija u smjesu, smjesa ni u kojem slučaju neće postati eksplozivna. Udio inertnog medija naspram zapaljivog medija je toliko velik da dodavanjem zraka, odnosno kisika u zraku, neće dovesti do stvaranja eksplozivne atmosfere. Potpuna inertizacija se može primijeniti isključivo u unutrašnjosti opreme i instalacija, gdje se može lako pratiti i osigurati miješanje kisika s okolinom.
U praksi se potpuna inertizacija provodi kod stvaranja eksplozivne atmosfere zapaljivih plinova i para, jer kod zapaljivih prašina nije prikladna iz razloga što je koncentracija oblaka zapaljivih prašina promjenjiva.
Oprema gdje se najčešće koristi potpuna inertizacija je (Mačković, 2012):
- procesna oprema: zatvoreni reaktori, sita, mikseri, mlinovi, peći, filtri, cikloni, kolektori,
- oprema za skladištenje: lijevci i silosi,
- konvejeri i dizala: pneumatski i pužni konvejeri, dizala s posudama.

Kod djelomične inertizacije dodavanjem zapaljivog i/ili oksidirajućeg medija u smjesu, smjesa može postati eksplozivna. Najznačajniji parametar koji se promatra kod djelomične inertizacije je granična koncentracija kisika (GKK). Većina smjesa koje se sastoje od

zapaljivog medija i zraka nisu eksplozivne pri normalnim uvjetima ako je molarna koncentracija kisika ispod 8 % (kod vodika i ugljikovog monoksida ona je ispod 4 %). Djelomična inertizacija se ostvaruje dodavanje inertne tvari u smjesu kako bi inertna tvar snizila koncentraciju kisika ispod granične koncentracije kisika (GKK), gdje bi se izbjeglo stvaranje eksplozivne atmosfere. Glavni parametri koji utječu na djelomičnu inertizaciju su: zapaljivi medij, inertni medij te temperatura i tlak smjese. Razlike tih dvaju načina inertizacije mogu se bolje prikazati dijagramom na slici 3-1.



Slika 3-1. Načini inetizacije (Fuß, 2004)

Slika 3-1 pokazuje dijagram koji opisuje razliku između potpune i djelomične inertizacije. Područje zeleno obojano na dijagramu predstavlja područje potpune inertizacije. Područja narančasto obojano predstavljaju djelomičnu inertizaciju. Područje djelomične inertizacije dobije se, tako da se granične stranice područja potpune inertizacije produže do vrhova trokuta odnosno do 100 % molarnog udjela oksidirajućeg medija (ICR linija) odnosno 100 % molarnog udjela zapaljivog medija (IAR linija) tj. do čistih tvari oksidirajućeg medija i zapaljivog medija. ICR linija predstavlja maksimalni dopušteni omjer inertnog plina i zapaljivog medija, a IAR linija predstavlja maksimalni dopušteni omjer inertnog plina i oksidirajućeg medija. ICR i IAR linije prolaze kroz eksplozivno područje i one pokazuju pri kojem udjelu dodavanjem zapaljivog i/ili oksidirajućeg medija smjesa može postati eksplozivna.

Tablica 3-1. Granične vrijednosti inertizacije zapaljivih plinova i para pri 1 bar prema „Chemasafe“ (www.gasbehaelter.de, 2004)

		Djelomična inertizacija				Potpuna inertizacija	
Zapaljivi medij	**Temperatura u °C**	**Granična koncentracija kisika u smjesi zapaljivi medij/inertni plin/zrak pri inertizaciji s:**		**Minimalni odnos molarnih udjela inertnog plina (N_2 ili CO_2) i zraka (Z) potrebni za inertizaciju zapaljivog medija**		**Minimalni odnos molarnih udjela inertnog plina (N_2 ili CO_2) i zapaljivog medija (ZM) potrebni za inertizaciju zapaljivog medija**	
		N_2	CO_2	N_2/Z	CO_2/Z	N_2/ZM	CO_2/ZM
		C_{max} O_2 % mol	C_{max} O_2 % mol				
i-Butan	20	10,3	13,1	1,0	0,5	28	13
n-Butan	20	9,6	~12	1,1	-	27	-
Cikloheksan	100	8,5	11,3	1,3	0,8	54	27
Etan	20	8,8	11,7	1,3	0,7	21	11
Heptan	100	-	10,9	-	0,9	-	35
Ugljikov monoksid	20	4,3	4,6	3,1	1,7	6	3
Metan	20	9,9	13,7	1,0	0,4	11	5
Metanol	20	8,1	-	1,4	-	7	-
Pentan	20	9,3	-	~1,3	-	~42	-
Propan	20	9,8	12,6	1,1	0,6	26	13
Vodik	20	4,3	5,2	3,4	1,8	17	12

Tablica 3-1 prikazuje eksperimentalne granične vrijednosti inertizacije zapaljivih plinova i para pri tlaku od 1 bar prema bazi podataka „Chemsafe“. Tablica prikazuje kolika je koncentracija dušika i ugljikovog dioksida potrebna da se postigne djelomična ili potpuna inertizacija pri određenoj temperaturi. Za postizanje djelomične inertizacije potrebno je održavati koncentraciju kisika ispod vrijednosti u trećem stupcu tablice ili održavati omjer inertnog medija i zapaljivog medija iznad vrijednosti u četvrtom stupcu. Treći stupac tablice prikazuje graničnu koncentraciju kisika u molarnim postocima, ako je inertni medij dušik, odnosno ugljikov dioksid. Četvrti stupac tablice označava minimalni omjer molarnog udjela inertnog plina i zraka koji je potreban za djelomičnu inertizaciju. Peti stupac tablice prikazuje minimalni molarni odnos inertnog medija i zapaljivog medija koji je potreban za potpuno inertizaciju. Kao što se vidi iz tablice, upotrebom ugljikovog dioksida kao inertnog medija, dobiju se više vrijednosti granične koncentracije kisika za razliku od upotrebe dušika. Ekperimentalno je dokazano da porastom temperature i tlaka vrijednost granične koncentracije kisika (GKK) opada.

Chemsafe je baza podataka koja sadrži numeričke tehničke sigurnosne mjere za zaštitu od eksplozije i požara za zapaljive plinove, tekućine i prašine.

Tablica 3-2. Granična koncentracija kisika za inertizaciju zapaljivih prašina prema „Chemsafe“ (www.gasbehaelter.de, 2004)

	Finoća prašine (µm)	Granična koncentracija kisika (GKK) u (%)
Aluminij	22	5
Smeđi ugljen	63	12
Celuloza	22	9
Drvo	27	10
Kakao	< 63	9
Kaučuk	95	11
Kameni ugljen	17	14
Vosak	< 10	11
Cink	< 10	10

Tablica 3-2 prikazuje eksperimentalne granične koncentracije kisika za inertizaciju zapaljivih prašina s dušikom, kao inertnog medija, pri temperaturi uzvitlane prašine od 20 °C i tlaku od oko jednog bara. Drugi stupac prikazuje finoću prašine izraženu u µm, a treći stupac prikazuje graničnu koncentraciju kisika (GKK) u postocima molarnog udjela plinovite faze. Inertizaciju uzvitlanih prašina je u nekim slučajevima teško postići jer ugljikov dioksid lako reagira s puno prašina lakih metala, a dušik djelomično. U tom slučaju najbolju inertizacija postiže se upotrebom plemenitih plinova kao inertnih medija. Inertizacija smjese zapaljivih plinova i zraka može se postići i dodavanjem inertnih prašina u smjesu, kao što su npr. kamena sol, natrijev sulfat ili fosfor. Maseni udio inertnih prašina mora biti veći od 50 % smjese, ako se one upotrebljavaju kao inertni medij (www.gasbehaelter.de, 2004).

3.1. Ostvarivanje inertizacije dodavanjem inertnih plinova

Inertizacija se može postići upotrebom nezapaljivih plinova koji ne reagiraju niti s kisikom, niti sa zapaljivom tvari. Pod određenim uvjetima neki materijali mogu reagirati s vodenom parom, ugljičnim dioksidom ili čak s dušikom, stoga se to uvijek treba uzeti u obzir (npr. rastaljeni metal litij reagira s dušikom).

Najčešće korišteni inertni plinovi su (CEN/TR, 2006):

1. Dušik – dostupan u komprimiranom ili kriogenom obliku, moguće pridobivanje iz zraka na mjestu korištenja.

2. Ugljični dioksid - mogućnost proizvodnje na pogonu, ponekad je produkt procesa kao otpadni plin. Upotrebom ugljičnog dioksida dopuštena razina kisika (udio po volumenu) je veća u usporedbi s upotrebom dušika.

3. Vodena para – u procesu inertizacije koristi se vodena para s tlakom većim od 3 bar, jer je pri tome sadržaj kisika zanemariv. Prilikom korištenja vodene pare u procesu intertizacije mora se uzeti u obzir mogućnost pada tlaka, ulazak zraka u postrojenje te stvaranje vakuuma. Pri inertiziranju zapaljivih prašina kondenzacija vodene pare ima prednost jer se zapaljive prašine smoče te se sprečava raspršivanje prašine po okruženju. Treba biti oprezan s upotrebom vodene pare jer neki materijali mogu kemijski reagirati s vodom.

4. Dimni plinovi - Obično su to otpadni plinovi koji su nusprodukt izgaranja u pojedinim procesima. Koriste se prilikom kontroliranja koncentracije kisika u okolini. Primjena dimnih plinova zahtjeva dodatnu opremu kao što je oprema za hlađenje, uklanjanje užarenih čestica, kontaminirajućih tvari te zapaljivih para. Zbog nepraktičnog skladištenja dimnih plinova zahtijevane količine često nisu dostupne.

5. Plemeniti plinovi – Najčešći u primjeni argon (Ar) i Helij (He). Primjena je ograničena zbog ekonomskih razloga. Primjenjuju se ako se ne može koristiti niti jedan drugi inertni plin.

3.2. Metode ostvarivanja inertizacije

Inertizacija se postiže na jedan od sljedećih načina (CEN/TR, 2006):

1. inertizacija oscilacijom pretlaka,
2. inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma),
3. inertizacija protokom,
4. inertizacija istisnom zamjenom.

3.2.1. Inertizacija oscilacijom pretlaka

Inertizacija oscilacijom pretlaka je postupak smanjenja 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.

Teoretski udio kisika nakon određenog broja ciklusa ekspanzije i kompresije može se izračunati izrazom za parcijalne tlakove (3-1):

$$C_n = C_i + (C_o - C_i)\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^n, \tag{3-1}$$

gdje je:

C_n - koncentracija kisika poslije n ciklusa, % (vol.);

C_i - koncentracija kisika u inertnom plinu, % (vol.);

C_0 - početna koncentracija kisika, % (vol.);

P_1 - donji tlak, (MPa);

P_2 - gornji tlak, (MPa);

n - broj ciklusa, -;

Inertni plinovi korišteni u ovoj metodi mogu sadržavati i do 3 % kisika i taj sadržaj kisika uračunat je u članu C_i. No kada se zna da inertni plin ne sadrži kisik, ta vrijednost pada na nulu.

Jednadžba podrazumijeva da su ekspanzija i kompresija plinova izotermne reakcije i to je upravo situacija u mnogim slučajevima. No, ako se proces odvija pod visokim tlakom ili dramatičnim promjenama tlakova onda procesi mogu biti i adijabatski. U takvim uvjetima smanjenje kisika će biti manje i primjenjuje se modificirani izraz (3-2).

$$C_n = C_i + (C_o - C_i)\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{n}{k}}, \tag{3-2}$$

gdje je:

k - omjer specifične topline plina pri konstantnom tlaku do stalnog volumena.

Potreban broja ciklusa za ostvarivanje tražene koncentracije kisika dobije se inverznim izrazima (3-1) i (3-2) i glasi (3-3):

$$n = \frac{\log\left(\frac{C_n - C_i}{C_o - C_i}\right)}{log\frac{P_1}{P_2}}. \tag{3-3}$$

Ako je proces adijabatski onda inverzni izraz za računanje broja ciklusa glasi (3-4):

$$n = k\left(\frac{\log\left(\frac{C_n - C_i}{C_o - C_i}\right)}{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}\right). \tag{3-4}$$

Obično je početno stanje sustava na vrijednosti tlaka oko jednog bara, te nakon toga ekspandira na atmosferski tlak. Najčešće su potrebna dva ciklusa. Nepoznanica je minimalni tlak i računa se izrazom (3-5):

$$R = \left(\frac{C_o - C_i}{C_n - C_i}\right)^{\frac{1}{n}}, \tag{3-5}$$

gdje:

R - omjer gornjeg tlaka i donjeg tlaka.

Ako je proces adijabatski onda se minimalni tlak računa izrazom (3-6):

$$R = \left(\frac{C_o - C_i}{C_n - C_i}\right)^{\frac{k}{n}}, \tag{3-6}$$

Kod veliki i razgranatih sustava plin na krajevima sustava će biti ravnomjerno izmiješan s inertnim plinom, dok u ostalim dijelovima sustava može doći do neravnomjernog miješanja. Prema tome, prilikom smanjenja tlaka plin će jednostavno ekspandirati, a koncentracija kisika u granama će ostati sličnim onima prije kompresije. Pri računanju konačne koncentracije kisika treba uzeti u obzir i grananje sustava. Ako je sustav vrlo kompleksan, može biti potrebno ispuštanje inertnog plina iz svake pojedine grane da bi se osigurala adekvatna zamjena originalnog plina. Ako taj proces zahtjeva velik broj ponavljanja ciklusa tada je bolja metoda inertizacije oscilacijom podtlaka (vakuuma).

Gornje jednadžbe mogu biti korištene za izračun koncentracije kisika u svakom sustavu ali nisu točne za kompleksne i razgranate sustave. U sustavu koji se sastoji od jedne posude izračun koncentracije kisika će biti dovoljan, ali u kompleksnim sustavima bit će potrebno mjerenje koncentracije kisika u nekoliko različitih točaka sustava.

Nakon mjerenja koncentracije kisika i prihvaćanja rezultata, za većinu normalnih operacija je zadovoljavajuće zaključiti da je koncentracija kisika ista kao i prilikom izvođenja mjerenja, osiguravajući iste uvjete izmjene kao što su prilikom mjerenja. Za opremu s dijelovima koji mogu postići velike brzine vrtnje ili pokretnim dijelovima s malim

zazorom, kao što su centrifuge i tankoslojni isparivači potrebno je stalno kontrolirati koncentraciju kisika.

Zbog pojave inertnog plina u radnom prostoru postoji mogućnost istjecanja plina iz sustava. Stoga treba poduzeti odgovarajuće mjere opreza kako ne bi došlo do gušenja osoblja radi istjecanja inertnog plina. Kod sustava koji se nalaze na otvorenom prostoru do gušenja dolazi samo prilikom velikog istjecanja inertnog plina. U malim i uskim radnim prostorima potrebno je osigurati adekvatnu ventilaciju.

3.2.2. Inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma)

Inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma) je metoda smanjenja 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. Na mjestu nastanka pukotine, odnosno na mjestu spoja posude i ploče nužno je da mogu podnijeti podtlak inače će se disk raspršiti u posudu.

Proces je sličan inertizaciji oscilacijom pretlaka, ali pošto je posuda pod podtlakom moguća je pojava ulaska zraka u sustav, čime je efektivna količina inertnog plina manja nego ona dobivena proračunom. Stoga, izraz (3-1) za inertizaciju oscilacijom pretlaka može se koristiti, ali je potrebno obaviti test propuštanja podtlakom.

Propuštanje zbog ulaska zraka određuje se pražnjenjem sustava i izoliranjem izvora podtlaka. Tada je potrebno mjerenje razine porasta tlaka *J*. Vrijednost najviše tolerancije bi trebala biti što manja, te pod bilo kojim uvjetima ne smije prekoračiti 10 % od slijedećeg(CEN/TR, 2006):

a) vrijednost porasta tlaka kad se inertni plin koristi za povećanje tlaka na atmosfersku vrijednost ili,
b) najniža vrijednost pada tlaka tokom pražnjenja sustava.

Najbolje procedure su slijedeće (CEN/TR, 2006):

- Izdvajanje sustava na najniži vakuum,
- izolacija sustava za vakuum,
- mjerenje porasta tlaka u sustavu,
- prekid vakuuma dovođenjem inertnog plina.

Tablica 3-3. Tipične vrijednosti porasta tlaka za sustave oscilacijom podtlaka (CEN/TR, 2006)

	Porast tlaka, *J* mm Hg min^{-1}		
Visina stupca žive (Hg) mm Hg	Kategorija A*	Kategorija B*	Kategorija C*
1 to 10	0,5	0,2	0,05
10 to 30	1,0	0,5	0,05
30 to 100	2,0	0,5	0,05

Tablica 3-3 prikazuje tipične vrijednosti porasta tlaka koji je izražen u porastu stupca žive (Hg) u mm/min. Prvi redak tablice prikazuje porast stupca žive (Hg) u vrijednosti od 1 mm/min do 10 mm/min, drugi od 10 mm/min do 30 mm/min, a treći od 30 mm/min do 100 mm/min. Razine porasta tlaka su podijeljene u tri kategorije i to:

- Kategorija A - najčešće se koristi i obično je adekvatna;

- Kategorija B - je bolja od prethodne kategorije, ali često zahtijeva posebnu pažnju u velikim postrojenjima s velikim brojem prirubnica;

- Kategorija C - je adekvatna u slučajevima gdje ulazak zraka može biti štetan (farmaceutska i poluvodička industrija).

Tablica 3-4. Vrijednosti k = Cp / Cv za neke inertne plinove (CEN/TR, 2006)

Plin		*k* pri 15 °C , 1 atm
Argon	Ar	1,66
Ugljikov dioksid	CO_2	1,304
Helij	He	1,664
Dušik	N_2	1,404
Vodena para pri 100 °C	H_2O	1,324

Tablica 3-4 prikazuje vrijednosti varijable *k* za neke inertne plinove. Omjer specifične topline plina pri konstantnom tlaku i specifične topline pri stalnom volumenu izražen je pri temperaturi od 15 °C i tlaku od jedne atmosfere. U tablici su prikazani najčešći inertni plinovi: Argon (Ar), ugljikov dioksid (CO_2), helij (He), dušik (N_2), te vodena para.

Sigurnosni faktor nije potrebno koristiti ako je ispitivanje sustava pod podtlakom sastavni dio procesa. Zbog toga što je inertni plin pod podtlakom u sustav može ući kisik ili zrak i tada se koncentracija kisika mjeri ne samo nakon čišćenja da bi se potvrdila prihvatljiva početna redukcija kisika, nego i kontinuirano dok je sustav pod podtlakom.

Kao kod inertizacije pretlakom koncentracija kisika nakon čišćenja može biti dobivena iz gornjih jednadžbi, ali bi koncentraciju kisika trebalo izmjeriti kako je ranije opisano.

Za sustav koji radi pod podtlakom i najmanje propuštanje unutar sustava će postepeno poremetiti inertnu atmosferu. Ulaz zraka se otkriva pomoću dvije metode i to (CEN/TR, 2006):

- Inertna metoda - zasniva se na činjenici da je izvor podtlaka izoliran te da se vrijednost porasta tlaka nadgleda. Prema tome moguća je procjena najveće koncentracije kisika, koja bi se pojavila s vremenom pri zadanom podtlaku,

- Metoda stalnog mjerenja razine kisika - je bolja metoda koja će dati adekvatno upozorenje da razina kisika u sustavu raste.

3.2.3. Inertizacija protokom

Metoda inertizacije protokom zasniva se na tome da inertni plin ima sličnu gustoću kao i zrak koji se ispušta iz sustava. Tamo gdje su gustoće različite potrebno je koristiti metodu inertizacije istisnom zamjenom. Inertizacija protokom pretpostavlja savršeno miješanje zraka s inertnim plinom u sustavu, npr. koncentracija kisika u svim točkama sustava je ista u bilo kojem trenutku te je koncentracija plina koji se ispušta iz sustava jednaka. Zahtijevano vrijeme se može izračunati iz izraza (3-7):

$$t = F\frac{V}{Q}\ln\left(\frac{C_i - C_o}{C_i - C_f}\right), \tag{3-7}$$

gdje je:

t - vrijeme potrebno za čišćenje, (h),

F- zaštitni faktor za čišćenje, -,

V - volumen sustava, (m^3),

Q - protok inertnog plina, (m^3/h),

C_f - sadržaj kisika poslije inertzacije protokom, % (vol.),

C_0 - početna vrijednost kisika, % (vol.),

C_i - sadržaj kisika u inertnom plinu, % (vol.).

Ovo je samo teoretsko vrijeme. Trebalo bi koristiti približan faktor sigurnosti F, osim ako se stvarni sadržaj kisika ne mjeri u različitim točkama sustava. Računski dobiveno minimalno vrijeme potrebno je pomnožiti s faktorom sigurnosti između 2 i 5 (CEN/TR, 2006).

Kod nerazgranatih cjevovoda moguća je pojava čepolikog protoka stoga se preporuča jedinstven faktor sigurnost. Za posudu bez grana gdje su ulaz i izlaz dijametralno nasuprotni potrebno je koristiti faktor sigurnost 2, a kod posuda gdje nisu dijametralno suprotni onda se koristi faktor 5.

Jednom kada su karakteristike sustava ustanovljene, nadgledanjem koncentracije kisika prilikom inertizacije protokom, zaključna kontrola je dovoljna osiguravajući režim čišćenja identičnim početnom. Ipak, do porasta koncentracije kisika može doći u određenim

točkama sustava, zbog neravnomjernog miješanja plinova u sustavu. Za djelotvorno miješanje potrebno je više vremena.

Prije primjene ove metode potrebno je znati da je teško inertizirati vrlo velike količine inertnog plina, kao što su npr: posude gdje je ulaz i izlaz na istoj strani ili vrlo blizu jedan drugom; za kompleksne razgranate sustave. Ova tehnika može dati zadovoljavajuće rezultate ako su posude uske i dugačke, s ulazom i izlazom na suprotnim stranama, a za male posude brzina izmjene plina jedan volumen po satu.

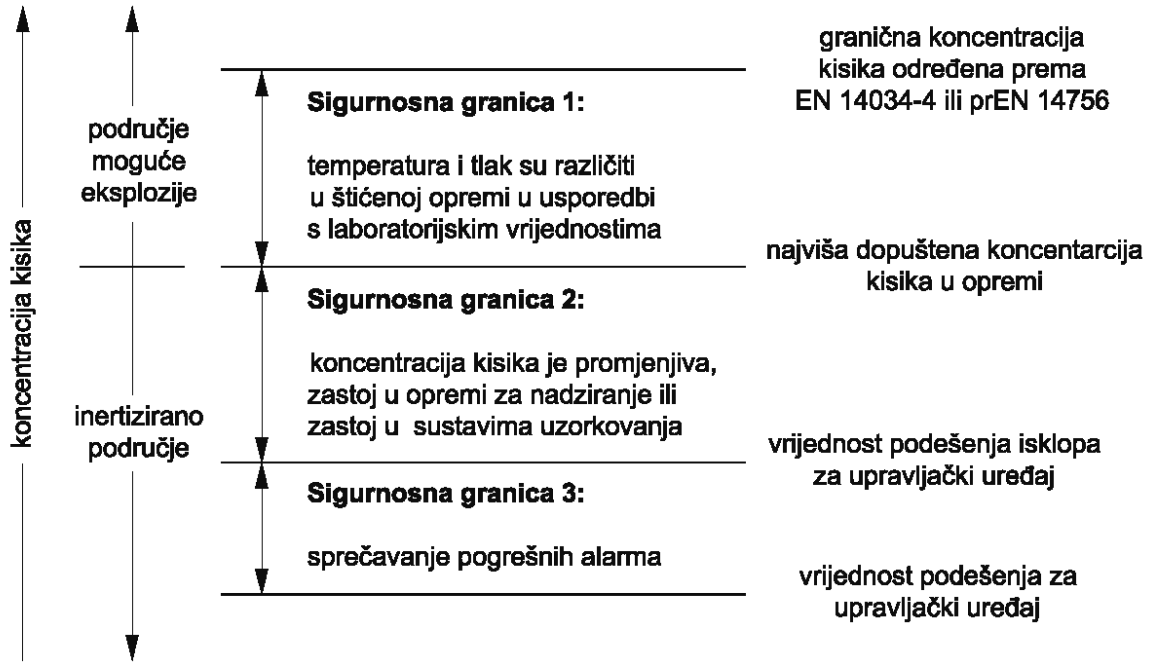
3.2.4. Inertizacija istisnom zamjenom

Inertizacija istisnom zamjenom je metoda zamjene zraka inertnim plinom bitno drugačije gustoće. Ova metoda najčešće se koristi za vrlo velike sustave, gdje su velike razlike u gustoći i gdje nema značajnijeg miješanja. Budući da se inertni plin pritom ne miješa znatno sa zrakom, zbog razlike u gustoći, potrebna je manja koncentracija inertnog plina kako bi se postigla niska koncentracija kisika. Metoda se koristi kada se udio kisika u posudi razrijedi upotrebom čistog dušika ili dimnog plina (sadrži 12 % -18 % CO_2, oko 2 % kisika i uravnoteženi dušik). Gustoća zraka i inertnog medija su praktički jednake. U slučaju velike razlike u gustoći, npr. zamjena vodika dušikom ili zrak argonom ili ugljikovim dioksidom, postoje dodatni zahtjevi koji se odnose na instalaciju ulaznih ili izlaznih cijevi. Iako nije izrazito bitno gdje ulazi plin za čišćenje, poželjno je da su ulazi dijametralno suprotni od otvora. Pozicija otvora je od ključne važnosti i ovisi o relativnoj gustoći plina koji je zamijenjen plinom za čišćenje. Kada je plin za čišćenje veće gustoće od zamijenjenog plina (npr. čišćenje da bi se zamijenio vodik), otvor bi se trebao nalaziti na najvišem dijelu posude. Neuobičajena je izmjena teškog plina pomoću lakšeg plina za vraćanje inertne atmosfere, često je potrebna zbog otvora posude. U tom slučaju gušći plin će se morati podići s dna posude, te dopustiti ulaz i strujanje zraka na vrhu.

3.3. Zadržavanje inertnih uvjeta

Zadržavanje inertnih uvjeta treba osigurati tijekom čitavog procesa primjerenim nadziranjem 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 3-2 dan je tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu djelotvornosti inertizacije.



Slika 3-2. Tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu procesa (Mačković, 2012)

Slika 3-2 prikazuje tehnički opis sigurnosnih granica za kontrolu procesa. Ako se za sprečavanje nastajanja eksplozije koristi inertizacija, tada je potrebno odrediti sigurnosne granice koji koncentracije kisika u eksplozivnoj smjesi. Kao što se može vidjeti na slici postoje tri sigurnosne granice. Sigurnosna granica 1 je najviša dopuštena koncentracija kisika (NDKK) u opremi, te ako se ona premaši proces se zaustavlja. Iznad te granice moguća je pojava eksplozije zato što su temperatura i tlak različiti u usporedbi s laboratorijskim vrijednostima. Sigurnosna granica 2 je granica kisika koja daje signal upravljačkoj jedinici da cijeli proces isključi. Područje između sigurnosnih granica 1 i 2 predstavlja najvišu dopuštenu koncentraciju kisika u opremi. Sigurnosna granica 3 je granica kisika koja se postavlja na upravljačku jedinicu koji kontrolira koncentraciju kisika u sustavu i održava ju konstantnom. Područje između 2 i 3 predstavlja inertizirano područje.

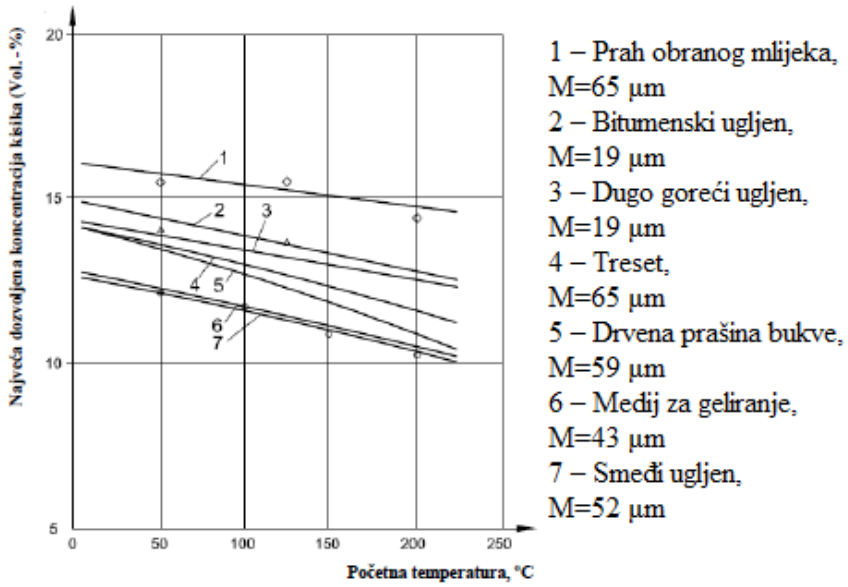
Iako nema status norme prijedlog tehničkog izvješća HRN CEN/TR 15281 od velike je pomoći pri provedbi postupka inertizacije. Neophodno u primjeni spomenutog dokumenta

treba voditi računa o brojnim ograničenjima, te uvažiti normativne reference na koje se isti poziva. Oprema na kojoj se temelji sigurnost mora biti u skladu sa zahtjevima europske direktive 94/9/EC.

Prilikom provedbi metoda inertizacije potrebno je poduzeti mjere zaštite radnika. Treba voditi računa o količini kisika koji se nalazi u prostorijama da ne dođe do gušenja radnika zbog nedostatka kisika (osigurati aparat za disanje, udovoljiti ventilacijskim zahtjevima, provoditi analize sastava zraka i sl.).

3.4. Utjecaj radnih parametara procesa na inertizaciju

Glavni radni parametri koji utječu na inertizaciju u procesima su temperatura i inicijalni tlak. Porastom temperature i inicijalnog tlaka u procesima se smanjuje granična koncentracija kisika (GKK). To znači da porastom tih parametara u procesu potrebno je povećati koncentraciju inertnog medija koji se koristi za inertizaciju da ne bi došlo do nastajanja eksplozije. Način na koji utječu na inertizaciju prikazani su na slikama 3-3 i 3-4.

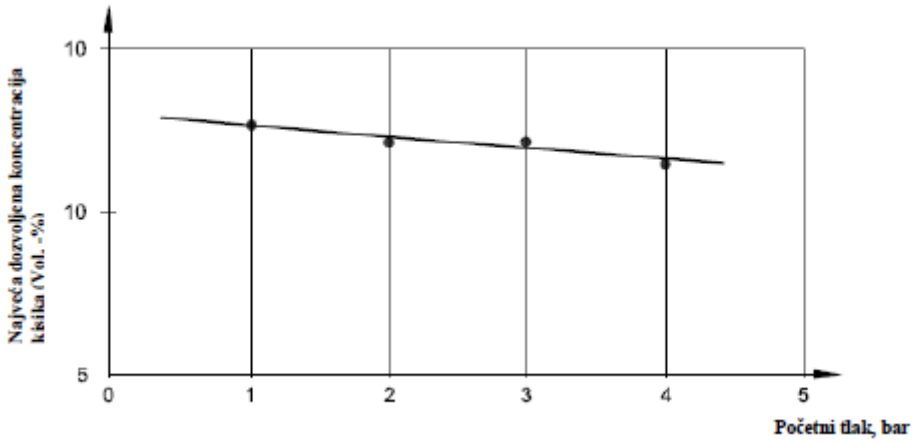


Slika 3-3. Utjecaj temperature na najveću dozvoljenu koncentraciju kisika (Mačković, 2012)

Kao što se iz dijagrama na slici 3-3 može vidjeti povećanjem temperature smanjuje se najveća dopuštena koncentracija kisika. Za usporedbu su uzeti idući od 1 do 7 zapaljivi mediji, prah obranog mlijeka koji ima veličinu čestica od 65 µm, bitumenski ugljen koji ima veličinu čestica 19 µm, dugo goreći ugljen koji ima veličinu čestica 19 µm, treset koji

ima veličinu čestica 19 μm, drvena prašina bukve koja ima veličinu čestica 59 μm, medij za geliranje koji ima veličinu čestica 43 μm, te smeđi ugljen koji ima veličinu čestica 52 μm.

Na slici 3-4 nalazi se dijagram koji prikazuje utjecaj tlaka na inertiziranje smeđeg ugljena. Kao što se može primijetiti, povećanjem početnog tlaka sa 1 na 4 bar dolazi do smanjenja najveće dozvoljene koncentracije kisika.



Slika 3-4. Utjecaj tlaka na inertiziranje smeđeg ugljena (Mačković, 2012)

Treba napomenuti da je granična koncentracija kisika određena ispitivanjem pri određenoj temperaturi i tlaku, a najveća dopuštena koncentracija kisika je ustvari granična koncentracija kisika pri stvarnim uvjetima procesa. Promatrajući dijagrame na slikama 3-3 i 3-4 može se zaključiti da su za efikasan sustav inertizacije najvažniji parametri temperatura i tlak u procesu.

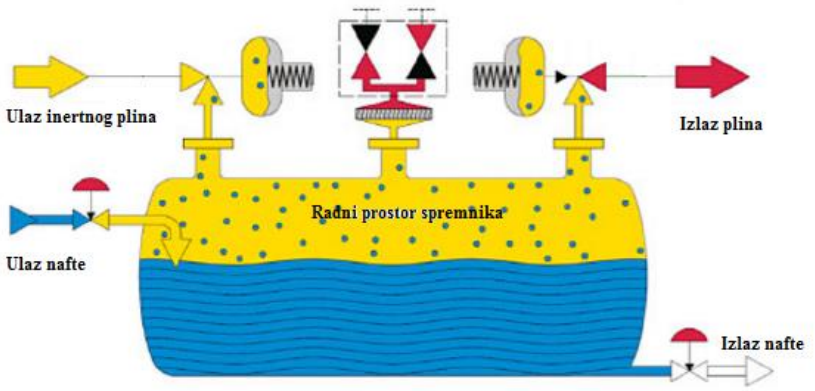
4. INERTIZACIJA U INDUSTRIJI

4.1. Inertizacija spremnika nafte

U pravilu se spremnici nafte koji sadrže manje od 11 % vol. kisika ne mogu zapaliti. Prema tome, radni obujam spremnika može biti zaštićen od požara ili eksplozije ako se koncentracija kisika u spremniku održava ispod te razine. To je moguće postići pomoću stacionarnog sustava cjevovoda u koji se upuhuje inertni plin, koji smanjuje udio zraka u spremniku, a samim time i koncentraciju kisika. Time se sprečava nastajanje gorivih ili eksplozivnih atmosfera u spremnicima. Metode koje se koriste pri inertizaciji spremnika nafte su (www.isgintt.org, 2010):

- inertizacija protok i
- inertizacija istisnom zamjenom.

Kod inertizacije protokom inertni se plin miješa sa atmosferom u spremniku i tako stvara homogenu smjenu, tako da se udio zapaljivog plina, koji se nalazi u spremniku, smanjuje (slika 4-1). Važno je, da ulazna brzina inertnog plina u spremnik bude dovoljna da dosegne dno spremnika, tako da se postigne ravnomjerno miješanje.



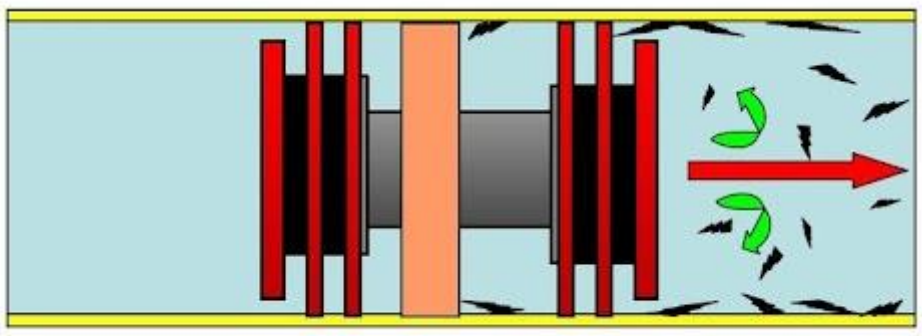
Slika 4-1. Inertizacija spremnika nafte protokom (www.bindergroup.info, 2001)

Kod metode inertizacije istisnom zamjenom inertni je plin lakši od para ugljikovodika u spremniku. Inertni plin ulazi u spremnik u gornjem dijelu spremnika, a pare ugljikovodika u spremniku izlaze iz spremnika u donjom dijelu. U ovoj metodi, važno je da je ulazna brzina inertnog plina jako mala, kako bi se omogućila stabilna horizontalna separacija sloja

između ulaznog i izlaznog plina. U praksi je to ipak teško ostvarivo jer se prilikom ulaska inertnog plina u spremnik stvara turbulencija.

4.2. Inertizacija plinovoda

Plinovodi se mogu inertizirati na dva načina (www.lsn2.com). Jedan način je da inertni plin služi kao medij koji potiskuje pjenasti čep (engl. *pig*) tj. čistač plinovoda kroz plinovod. Na taj način čistač odstranjuje sve zapaljive plinove iz plinovoda koji mogu stvoriti eksplozivnu atmosferu. Čistači plinovoda su tolikog promjera da stružu po stjenkama plinovoda, te imaju dvojaku svrhu. Jedna svrha je da inertiziraju plinovod tako da svojim prednjim dijelom istiskuju zapaljive plinove iz plinovoda, a druga je čišćenje stjenke plinovoda od nataloženih nečistoća koji se mogu naći u struji plina dok on protječe plinovodom, a talože se na stjenkama plinovoda. Prikaz inertizacije i čišćenja plinovoda nalazi se na slici 4-2.



Slika 4-2. Inertizacije i čišćenja plinovoda (www.kampsenergy.blogspot.hr, 2012)

Drugi način inertiziranja plinovoda je utiskivanje inertnog plina (najčešće dušika) u plinovod tako da se smjesa homogenizira čime se smanjuje udio zraka, a samim tim i koncentracija kisika ispod koje se smjesa može zapaliti.

4.3. Inertizacija u farmaceutskoj industiji

U farmaceutskoj industriji je neizbježna pojava praškastih materijala koji mogu postati eksplozivni. U toku samog procesa prašine tih praškastih materijala mogu prouzročiti generiranje elektrostatičke iskre i ako dođe do zapaljenje te smjese zraka i prašine može

nastati eksplozija. Budući da je najvažniji dio farmaceutske industrije mljevenje i miješanje prašina praškastih materijala, inertizacija ima važnu ulogu u sprečavanju nastanka eksplozije. U samom procesu nemoguće je izbjeći nastanak iskri, prilikom drobljenja ili miješanja prašina, koji mogu postati potencijalni uzročnik paljenja, a samim time je isto nemoguće smanjiti koncentraciju prašina. Granična koncentracija kisika (GKK) ovisi o vrsti prašina i korištenom inertnom plinu. Kako bi se odredio najprikladniji način zaštite u procesu potrebno je ispitati prašine koje nastaju u procesu.

Ispitivanja prašina su slijedeća:

- Temperatura tinjanja sloja prašine – 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,
- Temperatura paljenja oblaka prašine – najniža temperatura kod koje se najzapaljivija smjesa prašine i zraka može zapaliti (engl. *Minimum Ignition Temperature of a dust cloud*),
- Minimalna energija paljenja oblaka prašine – definirana je kao najmanja potrebna količina električne energije pohranjene u kondenzatorima koja pri pražnjenju preko iskrišta može zapaliti stvorenu smjesu prašine i zraka (engl. *Minimum Ignition Energy*, MIE),
- Specifični otpor prašine – daje mogućnost akumuliranja elektrostatskog naboja u tehnološkim procesima, što je veći električni otpor same prašine i mogućnost prodora prašine unutar električne i elektroničke opreme. Izaziva kratki spoj i oprema je podložna kvarovima. Obje mogućnosti mogu dovesti do stvaranja učinkovitog izvora paljenja. Prašina sa specifičnim električnim otporom manjim od $10^3\ \Omega$m smatra se vodljivom,
- Najveći tlak eksplozije oblaka prašine, p_{max} - tlak koji se razvije tijekom eksplozije stehiometrijske smjese prašine i zraka u zatvorenom volumenu,
- Najveća brzina porasta tlaka eksplozije $(dp/dt)_{max}$ oblaka prašine – najveći nagib na krivulji tlaka/vrijeme tijekom eksplozije, odnosno, prva derivacija krivulje vrijeme/tlak tj. brizanca,
- Donja granica eksplozivnosti (DGE) oblaka prašine – najmanja koncentracija zapaljive prašine u smjesi s zrakom kod koje je moguća eksplozija,
- Granična koncentracija kisika (GKK) u oblaku prašine – najveća koncentracija kisika u smjesi zapaljive prašine i zraka kod koje više nije moguća pojava eksplozije.

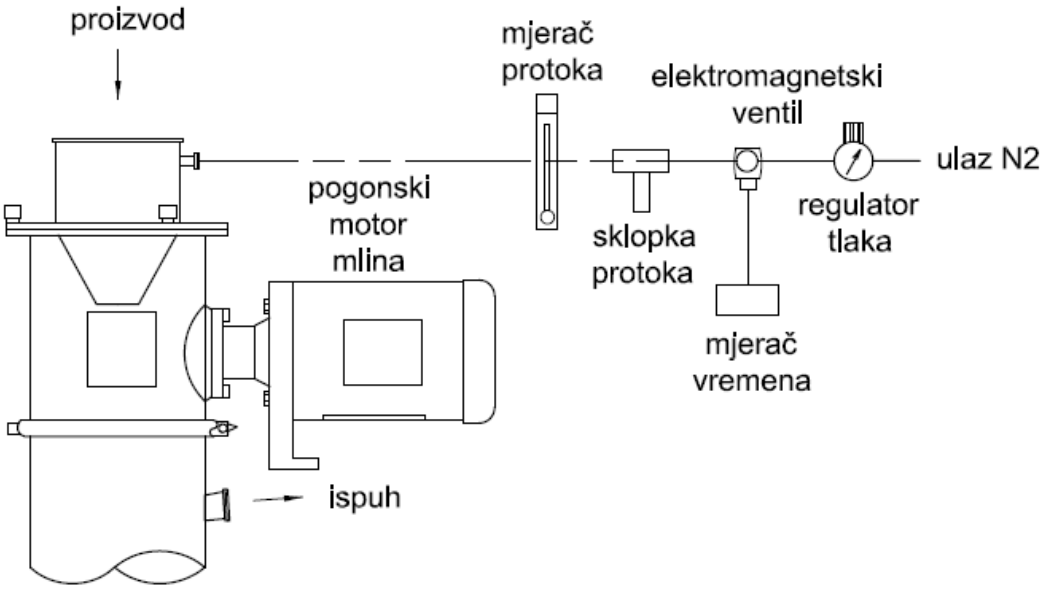
Najčešći sustavi inertiziranja mlinova su (Mačković, 2012):

1. Jednostavan sustav,
2. Inertizacija mlina s kontrolom kisika.

4.3.1. Jednostavan sustav

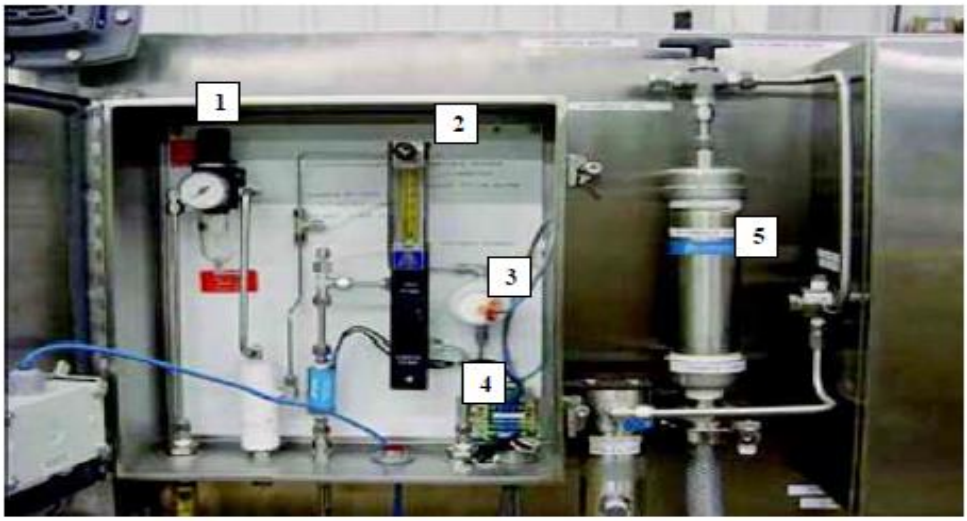
Jednostavan sustav koristi metodu inertizacije protokom, na način da inertni plin ulazi u sustav preko priključka s gornje strane opreme, te prolazi kroz sustav i izlazi na drugoj strani. Najčešće korišteni inertni plinovi su dušik ili ugljikov dioksid. Sustav inertizacije opremljen je regulatorom tlaka, elektromagnetskim ventilom, mjeračem protoka i sklopkom protoka (slika 4-3). Sustav je konstruiran tako da ako protok inertnog plina padne ispod minimalnog zahtijevanog protoka, mlin se zaustavlja (slika 4-4). Ispiranje mlina inertnim plinom se obavlja prije i nakon procesa mljevenja. Jednostavnim se proračunom može izračunati vrijeme ispiranja i potreban protok inertnog plina koji će razrijediti koncentraciju kisika u mlinu.

Slika 4-3 prikazuje jednostavan sustav inertizacije sustava mljevenja koji se sastoji od ulaza inertnog plina u sustav, u ovom slučaju dušika. Inertni plin preko regulatora tlaka, elektromagnetskog ventila i mjerača protoka ulazi u pogonski motor, te inertizira cijeli sustav tako da razrjeđuje koncentraciju kisika unutar mlina.



Slika 4-3. Jednostavan sustav inertizacije sustava mljevenja (Mačković, 2012)

Slika 4-4 prikazuje sklop za dobavu inertnog plina s provjerom protoka. Zadaća tog sklopa je mjerenje protoka inertnog plina i zaustavljanje rada cijelog mlina ako protok padne ispod minimalnog potrebnog protoka inertnog plina.



Legenda:
1 – regulator tlaka
2 – mjerač protoka sa sklopkom
3 – mjerač vremena
4 – elektromagnetski ventil
5 – spremnik inertnog plina

Slika 4-4. Sklop za dobavu inertnog plina s provjerom protoka (Mačković, 2012)

4.3.2. Inertizacija mlina s kontrolom kisika

Sustav inertizacije mlina s kontrolom kisika najčešće je korišteno rješenje. Sustav konstantno kontrolira sadržaj kisika u smjesi s inertnim plinom, te sadržaj inertnog plina koji se nalazi u sustavu. Uzorak plina se uzima preko venturijeve cijevi. Uzorak plina se filtrira i takav prolazi kroz osjetnik kisika koji šalje električni signal analizatoru kisika. Analizator kisika taj signal pretvara u koncentraciju kisika izraženu u postocima.
Slika 4-5 prikazuje prijenosni sustav inertizacije mlina s kontrolom koncentracije kisika. Sustav se sastoji od kontrolne i upravljačke jedinice, spremnika, crpke, spoja sa sustavom mlina te analizatora kisika.



Legenda:

1 – kontrolna i upravljačka jedinica
2 – spremnik
3 – crpka
4 – spoj sa sustavom mlina
5 – analizator kisika

Slika 4-5. Prijenosni sustav inertizacije mlina s kontrolom koncentracije kisika (Mačković, 2012)

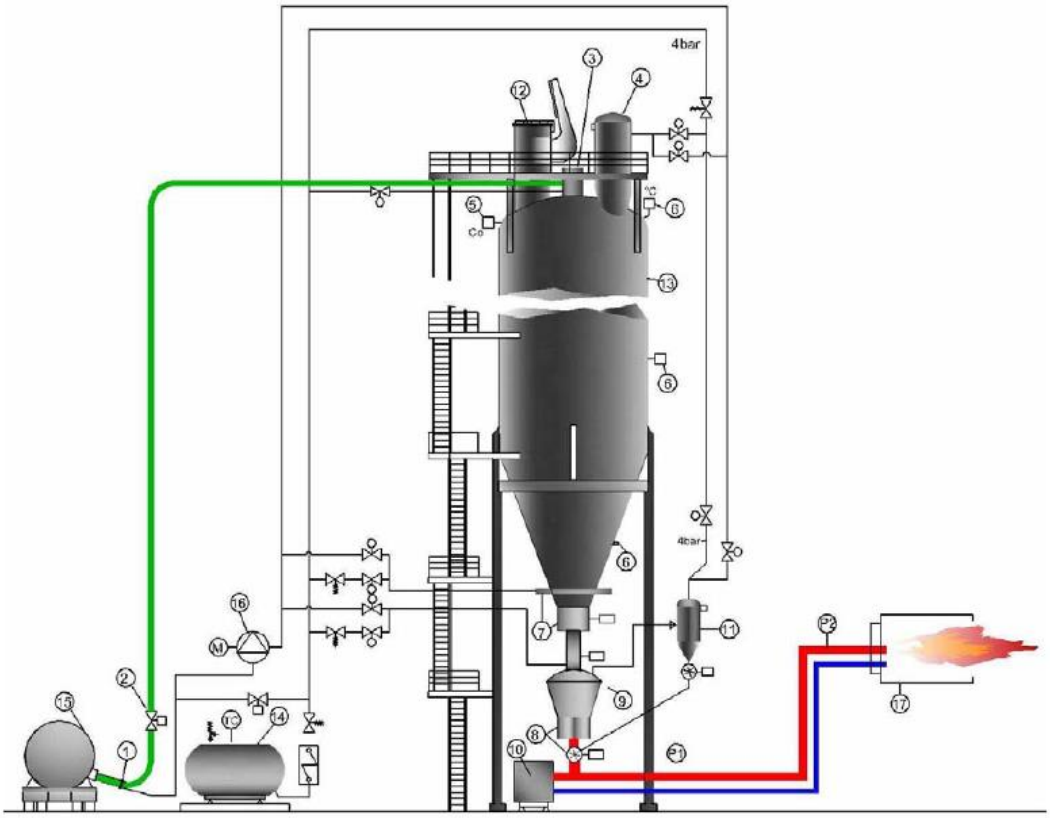
Sustav inertizacije mlina s kontrolom kisika ima dvije granične vrijednosti koji se mogu podešavati: razina alarma i razina upozorenja. Razina alarma predstavlja najvišu dopuštenu koncentraciju kisika (engl. *Maximum Oxygen Content*, MOC), a razina upozorenja je obično podešena za oko 2 % niže od razine alarma. Sustav funkcionira tako da sustav uvijek održava podešeni omjer koncentracija kisika i inertnog plina. Tako da, ako se koncentracija kisika u sustavu poveća iznad razine upozorenja, onda se poveća protok inertnog plina u sustav i s tim se ostvaruje željeni omjer koncentracija kisika i inertnog plina. U slučaju da kisik dosegne razinu alarma, oglašava se zvučni signal te se mlin zaustavlja. Tada počinje ispiranje mlina inertnim plinom sve dok se ne dosegne zadovoljavajuća koncentracija kisika. Treba paziti da se ispuh inertnog plina nalazi izvan prostorije gdje se nalazi mlin, jer može doći do smanjenja koncentracije kisika u okolini mlina koji može izazvati gušenje radnika. Zahvaljujući povratnom vodu, inertni plin se višestruko može koristiti u procesu inertizacije mlinova.

4.4. Inertizacija silosa

Prilikom punjenja ili pražnjenja silosa može doći do stvaranja eksplozivnih atmosfera prašina koje mogu izazvati eksploziju. Slika 4-6 prikazuje zaštitu silosa ugljene prašine prilikom punjenja i pražnjenja. Ugljena prašina se doprema cisternama koje se prazne pomoću cijevi. Prije pražnjenja cisterna se inertizira dušikom ili ugljičnim dioksidom i mora se staviti na pretlak od maksimalno 2 bar. Prašina dolazi u struji inertnog plina do kućišta za upuhivanje. Razinu popunjenosti silosa mjeri osjetnik razine popunjenosti, dok su osjetnici temperature i ugljičnog monoksida raspoređeni na različitim mjestima u silosu, čija je zadaća kontinuirano praćenje koncentracija ugljičnog monoksida i temperature u silosu. U slučaju povećane temperature i/ili koncentracije ugljičnog monoksida automatski se inicira inertizacija cijelog postrojenja.

Dijelovi postrojenja sa slike 4-6:

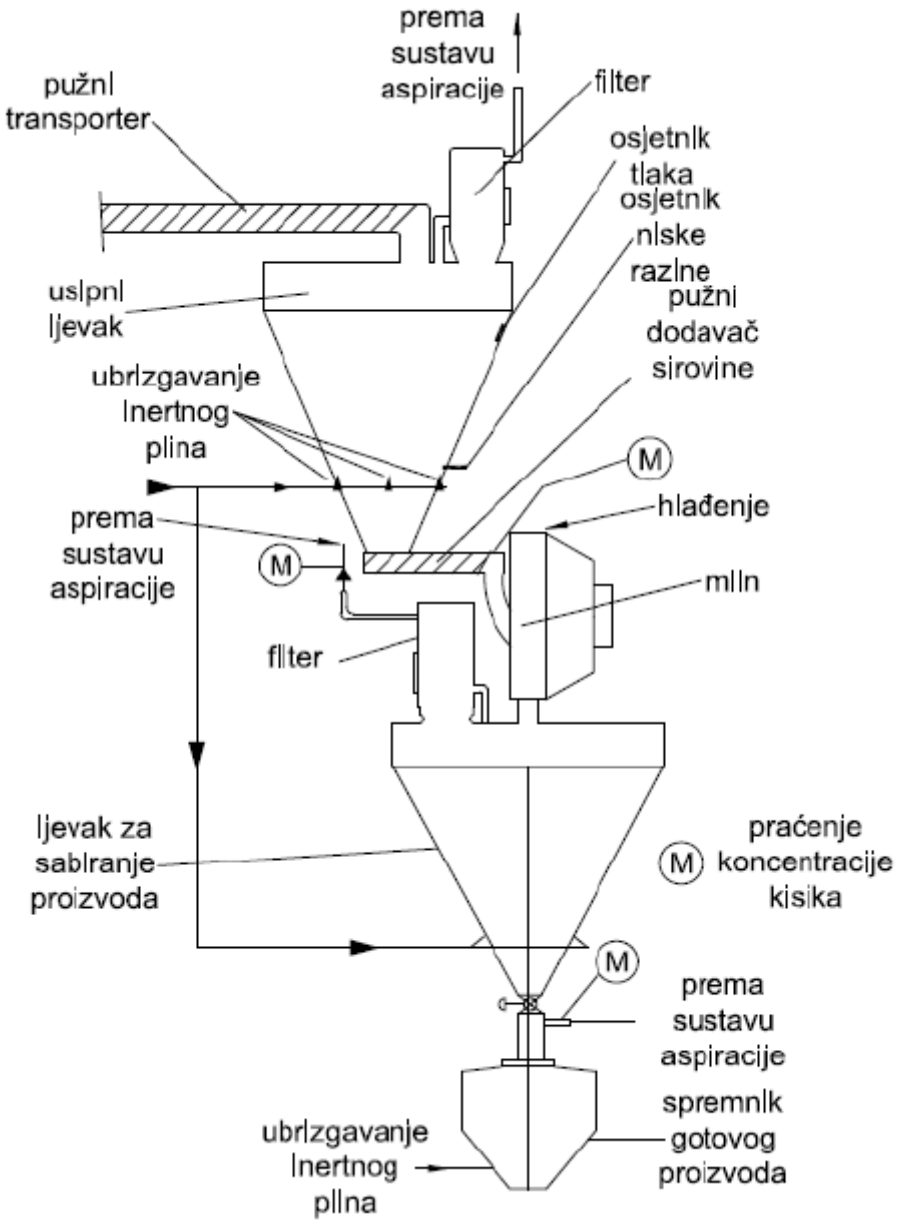
1 - spojka za punjenje;
2 – zaporni zasun;
3 – kućište za upuhivanja;
4 – filter na spremniku;
5 – mjerenje CO;
6 – mjerenje temperature;
7 – popuštanje;
8 – doziranje;
9 – kontrola težine.
10 - puhalo;
11 - filter za zrak koji se propušta;
12 - protueksplozijska zaklopka;
13 - spremnik (silos);
14 -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



Slika 4-6. Inertizacija sustava silosa (Mačković, 2012)

4.5. Inertizacija sustava mljevenja

Zbog nastajanja prašina prilikom mljevenja sustav mljevenja također treba inertizirati. Slika 4-5 prikazuje sustav mljevenja na način da se materijal koji se melje prenosi do lijevka pomoću pužnog transportera. Pužni dodavač ima ulogu kontrole pražnjenja lijevka u mlin i ne radi ako je razina materijala u dobavnom lijevku ispod osjetnika razine. Mlin u svakom trenutku u procesu mora biti pun. Samljeveni materijal se skuplja u lijevku te se nakon toga puni spremnik. Sustav inertizacije kontrolira i održava koncentraciju kisika u mlinu, lijevku i u spremniku samljevenog materijala ispod donje granične koncentracije (DGKK). Inertni plin direktno ulazi u dobavni lijevak, lijevak za sabiranje proizvoda i u spremnik. Koncentracija kisika se kontinuirano mjeri na četiri mjesta, i to: u mlinu, na izlazu gotovog proizvoda, na izlazu iz filtra i na ulasku u spremnik. Praćenje koncentracije kisika je potrebno i prilikom početnog ispiranja. Postrojenje počinje sa radom tek kad je koncentracija kisika ispod tražene granice. Ako se koncentracija kisika na bilo kojem mjernom mjestu za vrijeme rada mlina povisi iznad dopuštene mlin se isključuje.



Slika 4-7. Inertizacija sustava mljevenja (Mačković, 2012)

Kad materijal uđe u lijevak on sadrži značajnu količinu zraka u šupljinama između čestica. Najbolju učinkovitost uklanjanja zraka ima upuhivanje inertnog plina s donje strane lijevka jer inertni plin struji prema gore kroz materijal u lijevku.

5. PRIMJERI PRORAČUNA

Korištenjem jednadžbi koje su navedene u poglavlju 3 ovog diplomskog rada, može se provesti proračun za određene vrste inertizacije.

5.1. Primjer inertizacije oscilacijom predtlaka

Koristeći dušik tlaka 2 bar koji sadrži 0,8 % vol. kisika, potrebno je u posudi obujma 15 m^3 sniziti koncentraciju kisika ispod 3 % vol. Ulazni i izlazni protok plina iznosi 50 m^3/h. Koliko je ciklusa ispiranja potrebno?
U ovom proračunu koristi se jednadžba 3-3.

$$n = \frac{\log\left(\frac{C_n - C_i}{C_o - C_i}\right)}{\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)} = \frac{\log\left(\frac{3-0,8}{21-0,8}\right)}{\log\left(\frac{0+1}{0+2}\right)} = 2,018$$

Rješenjem jednadžbe 3-3 dolazi se do zaključka da je potrebno najmanje tri ciklusa ispiranja.

5.2. Primjer inertizacije protokom

Potrebno je posudu obujma 5 m^3 propuhivati dušikom, koji ne sadrži u svom sastavu kisik, kako bi se koncentracija kisika snizila ispod 5 % vol. Protok dušika 15 m^3/h, a prolazi kroz cijev promjera 25 mm. Koliko će proces ispiranja trajati?

U ovom proračunu najmanjeg trajanja propuhivati prikladna je jednadžba 3-7.

$$t = F\frac{V}{Q}\ln\left(\frac{C_i - C_o}{C_i - C_f}\right) = 2\frac{4}{15}\ln\left[\frac{0-21}{0-5}\right] = 1,04\ h$$

Rješenjem gore navedene jednadžbe dolazi se do zaključka da je potrebno najmanje propuhivanje 1,04 sati odnosno 63 minute.

6. ZAKLJUČAK

Inertizacija se ubraja u mjere sprečavanja eksplozije ili primarnu protueksplozijsku zaštitu. Svrha inertizacije je sprečavanje stvaranja eksplozivne atmosfere ili dodavanje inertne tvari smanjenje koncentracije kisika u smjesi, što onemogućuje eksploziju. Postoje dva načina inertizacije i to su potpuna i djelomična. Kod potpune inertizacije se smjesa homogenizira i dodavanje zapaljivog i/ili oksidirajućeg medija u mješavinu ne može doći ni u kojem slučaju do nastajanja eksplozivne atmosfere. Primjenjuje se u unutrašnjosti opreme i instalacije gdje se lako može nadgledati. Za razliku od potpune inertizacije kod djelomične inertizacije dodavanjem zapaljivog i/ili oksidirajućeg medija smjesa može postati eksplozivna. Najznačajniji parametar kod djelomične inertizacije je granična koncentracija kisika (GKK). Sprečavanje nastajanja eksplozivne atmosfere se ostvaruje dodavanjem inertne tvari u smjesu koja smanjenja koncentracije kisika u smjesi ispod granične koncentracije kisika (GKK). Glavni radni parametri u procesima inertizacije su temperatura i inicijalni tlak. Porastom temperature i inicijalnog tlaka smanjuje se granična koncentracija kisika, što znači da je potrebno povećati koncentraciju inertnog medija. Zadržavanje inertnih uvjeta u svakom trenutku treba biti osigurana i nadgledana od strane djelatnika, da kisik u ugroženim prostorima ne premaši najvišu dopuštenu koncentraciju kisika.

Inertizacija se ostvaruje dodavanjem inertnih tvari u smjesu ili primjenom određenim metodama. Inertne tvari koji se dodaju u smjesu mogu biti plinovi (npr. dušik (N_2), ugljični dioksid (CO_2), plemeniti plinovi, dimni plinovi itd.), vodena para ili inertne praškaste tvari. Najčešću primjenu u industriji imaju dušik i ugljikov dioksid. Metode ostvarivanja inertizacije su: inertizacija oscilacijom pretlaka, inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma), inertizacija protokom te inertizacija istisnom zamjenom.

Inertizacija oscilacijom pretlaka prikladna je za sustave koji se mogu tlačiti. Postupak je takav da se višestrukim tlačenjem i rasterećivanjem inertnog plina u zatvorenom sustavu smanjuje koncentracija kisika na željenu razinu.

Inertizacija oscilacijom podtlaka (vakuuma) prikladna je za sustave koji mogu izdržati podtlak, a ne pretlak npr. staklene posude. Postupak je sličan kao i kod metode inertizacije oscilacijom pretlaka.

Inertizacija protokom se koristi kada inertni plin ima sličnu gustoću kao i zrak. Prednost ove metode je u tome što dolazi do savršenog miješanja inertnog plina sa zraku i u cijelom sustavu je koncentracija kisika jednaka.

Inertizacija istisnom zamjenom se koristi kad je gustoća inertnog plina i zraka bitno različita, te se koristi u vrlo velikim sustavima. U ovoj metodi potrebna je manja koncentracija inertnog plina da bi se postigla željena koncentracija kisika.

Najznačajnija industrija gdje se inertizacija koristi je farmaceutska, prehrambena i kemijska industrija. U naftnoj industriji također ima svoju primjenu i to u segmentu sabiranja i transporta nafte i plina. Koristi se pri inertizaciji spremnika naftnih derivata i inertizaciji plinovoda. Dodavanje inertnih tvari u spremnike ili plinovode smanjuje se koncentracija kisika, te se time sprečava nastajanje eksplozivnih i gorivih atmosfera.

7. LITERATURA:

1. CEN/TC, 2005. Draft Resolution, Berlin

2. CEN/TR, 2006. Guidance on Inerting for the Prevention of Explosions, Bruxelles

3. Fuß O., 2004, Ermittlung und Berechnung der Sauerstoffgrenzkonzentration von brennbaren Gasen, Sveučilište Duisburg – Essen, Disertacija

4. Mačković M., 2012. Eksperimentalno istraživanje učinkovitosti inertizacije eksplozivnih atmosfera, Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje, Završni rad

5. Marinović N., 2005. Protueksplozijska zaštita za eksplozivnu atmosferu, Zagreb, vlastita naklada.

6. Marinović, N. 2010, Oprema i instalacije za eksplozivnu atmosferu, Zagreb, vlastita naklada

7. Rumbak S., 2012, Osnove protueksplozijske zaštite 1 dio, prezentacija, Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnja

8. Bindergroup, 2001, INSTRUM,
URL: http://www.bindergroup.info/binder/downloads/DE/INCH-M-PROS-IMAGE001-DE-R01.pdf (02.02.2017.)

9 .ISGINTT, 2010, Bordsysteme,
URL: http://www.isgintt.org/files/documents/Chapter_07de_isgintt_062010.pdf
(02.02.2017.)

10. LSU, Inerting Blanketing, Hartland,
URL: http://www.lsn2.com/Documents/LSU%20Inerting%20Blanketing.pdf (02.02.2007.)

12. TRBS, 2004, Technische Regeln für Betriebssicherheit,
URL: http://www.gasbehaelter.de/PDFs/BGR_104_EX_RL.pdf (14.08.2016.)

IZJAVA:

Ja, Ivo Žilić, pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom „Inertizacija“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

_____

Ivo Žilić