

Inherentna sigurnost pri projektiranju procesa

Plavšić, Antonella

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:807139>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Antonella Plavšić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Antonella Plavšić

INHERENTNA SIGURNOST PRI PROJEKTIRANJU PROCESA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: doc. dr. sc. Igor Dejanović

Članovi ispitnog povjerenstva:

doc. dr. sc. Igor Dejanović

izv. prof. dr. sc. Domagoj Vrsaljko

prof. dr. sc. Vesna Tomašić

SAŽETAK

Inherentna sigurnost definirana je kao osnovna zaštita procesnog postrojenja kojom se trajno uklanja ili smanjuje opasnost radi izbjegavanja ili smanjenja posljedica incidenta. Provodi se primjenom osnovnih načela inherentno sigurnijeg dizajna kao što su minimizacija, supstitucija, provođenje pri blažim uvjetima te pojednostavljenje. Sama sigurnost bazirana je na tri najveće opasnosti u procesnim postrojenjima, a to su požari, eksplozije te ispuštanje otrovnih tvari. Ovim radom upoznati će se sa osnovama same inherentne sigurnosti, čimbenicima koji utječu na nju te na koji način se primjenjuje pri projektiranju procesa.

Ključne riječi: inherentna sigurnost, inherentna sigurnost pri projektiranju, sigurnost pri projektiranju

ABSTRACT

Inherent safety is defined as the elementary protection of the process plant that permanently removes or reduces the risk of avoiding or reducing the consequences of an incident. It is being implemented by application of the basic principles of inherently safer design such as minimizing, substitution, attenuation and simplification. Safety alone is based on three biggest risks in process plants such as fires, explosions and toxic release. This paper presents the fundamentals of inherent safety and factors affecting it, as well as the mode how it is applied in process designing.

Key words: inherent safety, inherent safety in design, safety in design

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INHERENTNA SIGURNOST	2
3. METODE POSTIZANJA INHERENTNO SIGURNIJEG DIZAJNA	5
3.1. Minimizacija.....	5
3.2. Supstitucija.....	5
3.3. Provođenje pri blažim uvjetima	6
3.4. Pojednostavljenje	7
4. MJERENJE INHERENTNE SIGURNOSTI	8
4.1. Procjena indeksa.....	9
4.1.1. Relativno rangiranje	9
4.1.2. Napredni matematički pristup	9
4.1.3. Pristup temeljen na rizicima	9
4.1.4. Grafički pristup.....	10
4.1.5. Hibridni pristup.....	10
4.1.6. Pristup baziran na jednadžbi (formuli)	10
4.2. Podindeksi za opasne tvari	10
4.2.1. Podindeks zapaljivosti	10
4.2.2. Podindeks eksplozivnosti	11
4.2.3. Podindeks izlaganja otrovnim tvarima	12
5. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA INHERENTNO SIGURAN DIZAJN	13
5.1. Zapaljivost.....	13
5.1.1. Temperatura samozapaljenja	15
5.1.2. Granica zapaljivosti /eksplozivnosti	17
5.1.3. Minimalna koncentracija kisika.....	18
5.1.4. Točka paljenja.....	20
5.1.5. Minimalna temperature paljenja prašine	20
5.2. Eksplozivnost	21
5.2.1. Ograničena eksplozija.....	23
5.2.2. Neograničena eksplozija.....	23
5.3. Toksično ispuštanje	24
5.3.1. Vrijeme izmjerene izloženosti	25
5.3.2. Kratkoročno izlaganje.....	25

6. PRIMJENA NAČELA INHERENTNE SIGURNOSTI PRI PROJEKTIRANJU	26
5.1. Reaktori	26
5.2. Prijenos topline.....	26
5.3. Skladištenje	28
6. UVJETI SIGURNIJE PROVEDBE PROCESA.....	29
6.1. Tlak.....	29
6.2. Temperatura	29
ZAKLJUČAK.....	30
POPIS SIMBOLA	31
LITERATURA	32
ŽIVOTOPIS	34

1. UVOD

Jedan od ključnih koraka pri projektiranju procesa kemijske industrije je procjena vrsta i stupnja svih opasnosti koje proizlaze iz planiranog procesa koji se projektira, a koje mogu ugroziti živote ili utjecati na zdravlje radnika, djelovati štetno na okoliš te izazvati požare i eksplozije. Primjenom osnovnih pravila zaštite na radu, pravila zaštite od požara te pravila za zaštitu okoliša, opasnosti se otklanjaju ili svode na najmanju moguću mjeru.

Osnovna pravila zaštite na radu trebaju biti ugrađena u građevine namijenjene za rad s pripadajućim instalacijama, uređajima i opremom, prometna sredstva i radnu opremu. Za sprječavanje nastanka požara i eksplozije pravila zaštite na radu nalažu zaštitu od statičkog elektriciteta uzemljenjem, održavanje relativne vlage iznad 65%, upotrebu poluvodljivih materijala za podove i zidove te ionizaciju zraka. Primjenjuje se oprema u protueksplozivnoj izvedbi na dijelovima gdje postoji rizik od pojave eksplozivne atmosfere. Pravila zaštite na radu nalažu, ukoliko se radi o zaštiti od kemijskog štetnog djelovanja, zamjenu opasnih neopasnim ili manje opasnim kemikalijama i upotrebu zatvorenih sustava u postrojenjima te sustav ventilacije.

Jedan od načina sigurnog projektiranja je vođenje računa o inherentnoj sigurnosti što znači da se moguće opasnosti izbjegavaju samim dizajnom procesa. Inherentno siguran dizajn procesa postiže se svođenjem korištenja opasnih materijala na najmanju moguću mjeru, njihovim izlaganjem nižim temperaturama i tlakovima ili razrjeđivanjem s inertnim materijalom. Ukoliko je moguće, opasan materijal se u potpunosti izbjegava. Inherentna sigurnost ne zahtjeva primjenu i razradu dodatnih sigurnosnih sustava.

Velika pažnja stavlja se na tri glavne opasnosti u procesnim postrojenjima, a to su požar, eksplozije i toksična ispuštanja, odnosno ispuštanja otrovnih tvari.

2. INHERENTNA SIGURNOST

Inherentna sigurnost, poznatija i kao inherentno sigurniji dizajn je filozofija primjenjena na životni ciklus projektiranja i rada postrojenja, uključujući proizvodnju, transport, skladištenje, uporabu te odlaganje otpada, kojom se trajno uklanjaju ili smanjuju opasnosti radi izbjegavanja ili smanjenja posljedica incidenta. [1] Inherentno sigurniji dizajn temelji se na smanjenju količine opasnog materijala te broja opasnih operacija u postrojenju, čime se opasnosti izbjegavaju, umjesto da ih se kontrolira. Takav pristup je izuzetno važan zbog nemogućnosti postizanja savršene sigurnosti u radu postrojenja u praksi. [2]

Inherentna sigurnost kao koncepcija u projektiranju postrojenja primjenjivala se i prije nego što je definirana pod tim nazivom. [4] Ispitivanje opasnosti i traženje rješenja započeo je Trevor Kletz nakon velike eksplozije u Flixboroughu u Engleskoj (lipanj 1974.). Na Slici 1. prikazane su posljedice eksplozije tvornice za proizvodnju najlona Nypro Ltd, gdje je u tom trenutku ispušteno 40 tona cikloheksana i požar je trajao 3 dana. Pokazalo se da je opremanje kemijskih postrojenja isključivo slojevima zaštite neučinkovito u kontroli opasnosti; nesreće su se i dalje događale kao posljedica kvara sustava koji nastaje kao posljedica opasnosti koja je preostala u sustavu.



Slika 1. Posljedice eksplozije u Flixborough, Engleska

Kletz je ispitivao potrebu za tolikim količinama zapaljivih i/ili otrovnih tvari u tvornici te radom pri povišenoj temperaturi i tlaku. Predložio je da procesne industrije trebaju biti usmjerene prema uklanjanju opasnosti gdje je to moguće smanjenjem količine opasnog materijala, korištenjem manje opasnih tvari te razvojem tehnologije koja radi pri manje opasnim uvjetima, a ne dodatnim sigurnosnim sustavima i postupcima upravljanja rizicima. [1] Njegov prijedlog je objavljen 1978. godine u obliku članka u časopisu. Sama terminologija inherentne sigurnosti razvila se od 1991. godine s nešto drugačijim riječima, ali s istim ciljevima poput Kletza. [4]

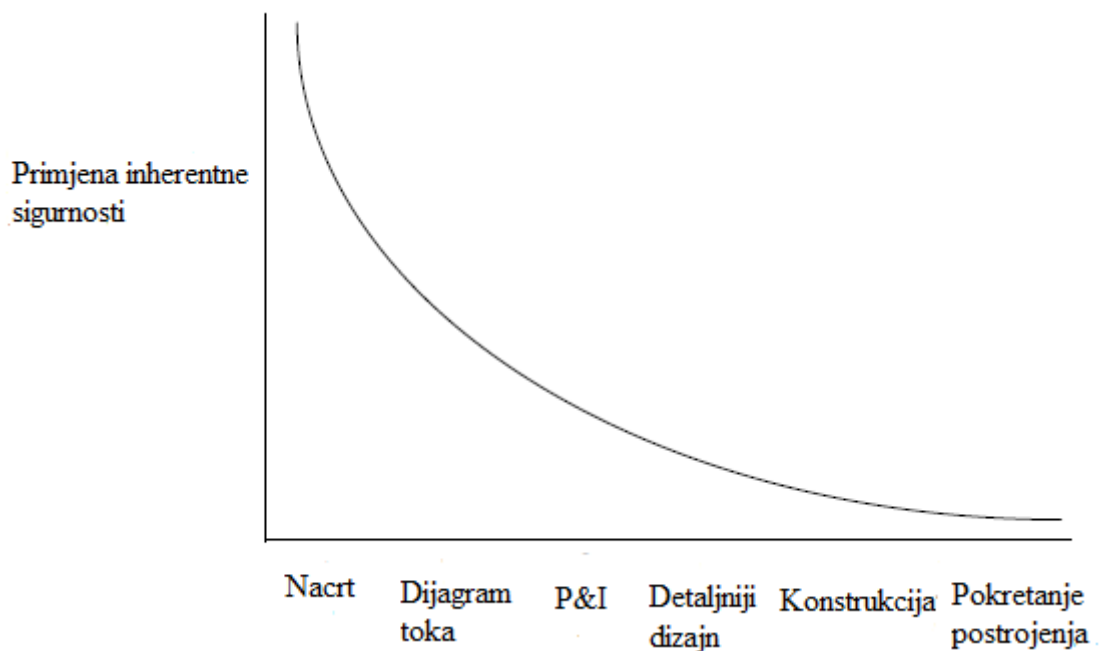
Samo upravljanje sigurnošću pri projektiranju procesa kemijske industrije uključuje četiri razine sigurnosti: *inherentnu*, *pasivnu*, *aktivnu* te *proceduralnu*. Prva razina je inherentna sigurnost temeljena na uklanjanju korijena uzroka opasnosti dok druge razine uključuju primjenu sigurnosnih uređaja ili procesa za kontrolu opasnosti te se smatraju stupnjevima zaštite. [3] Inherentno sigurnijim dizajnom nastoje se trajno smanjiti ili ukloniti procesne opasnosti koje se moraju kontrolirati kako bi se izbjegli incidenti, umjesto da kontroliraju opasnosti dodatnom zaštitnom opremom, te je učinkovitije rješenje od prihvaćanja opasnosti i pokušaja ublažavanja njihovog učinka. [1]

Prvi korak sigurnijeg dizajna je prepoznavanje alternative koja potpuno uklanja određenu opasnost, no treba reći da to ne govori ništa o utjecaju na druge opasnosti koje se mogu povećati, smanjiti ili ostati nepromjenjene – neka tehnologija može biti inherentno sigurnija od drugih u odnosu na neke opasnosti, ali manje sigurna u odnosu na druge. Inherentno sigurniji dizajn se dakle temelji na procesu odlučivanja pri čemu se mora uzeti u obzir cjelokupni životni ciklus, cijeli spektar opasnosti i rizika te njihov utjecaj na stanovništvo, ali treba razmotriti tehničku i ekonomsku izvedivost operacija. [1] Usklađeniji dizajn smanjuje opasnost ili uzrokuje nesreću povezanu s opasnošću za koju postoji manja vjerojatnost da će se dogoditi.

S obzirom da inherentno sigurniji dizajn ne može ukloniti sve potencijalne opasnosti [3], drugi korak obuhvaća projektiranje slojeva zaštite koji uključuju opremu za upravljanje rizicima i sustave upravljanja koji se često karakteriziraju kao aktivni, pasivni te proceduralni. Slojevi zaštite obuhvaćaju značajke upravljanja rizikom kao što su posude za kontrolu prolijevanja i propuštanja (pasivna), sigurnosni alarmi i sustavi za isključivanje (aktivna) te sigurnosni postupci i postupci operatera (proceduralna). Kada se uzme u obzir sve moguće opasnosti povezane s bilo kojom tehnologijom, mala je vjerojatnost da će biti moguće upravljati svima

njima inherentno, a slojevi zaštite uvijek će biti potrebni kao dio ukupnog programa upravljanja rizicima. [1]

Najbolja učinkovitost inherentno sigurnog dizajna može se postići tijekom ranih faza projektiranja procesnog postrojenja. Ranom fazom projektiranja procesnog postrojenja smatra se izrada nacrtā kao što je prikazano na Slici 2. Presudna je uloga dizajnerskih timova i istraživača za izbjegavanje opasnosti tijekom rane faze. Studije su pokazale da je nedostatak svijesti i poznavanje principa i mjerenja inherentno sigurnijeg dizajna jedna od glavnih prepreka pri primjeni inherentno sigurnijeg dizajna. Da bi se izbjegao taj problem, znanje dizajnera i stručnjaka bi trebalo biti opširnije u odnosu na izvor opasnosti. Na taj način je moguće smanjiti ili ukloniti moguću opasnost i razviti strategiju za mjerenje stupnja inherentne sigurnosti pomoću indeksa. [3] Inherentno sigurniji dizajn s godinama privlači sve veću pažnju kao važna komponenta sustava upravljanja sigurnošću procesa, a također se smatra vrijednim alatom u upravljanju sigurnosnim rizicima za rukovanje opasnim tvarima svih vrsta. [1]



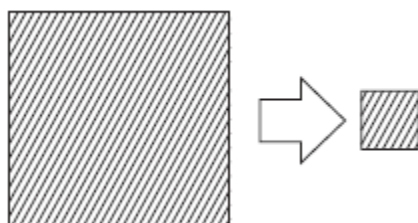
Slika 2. Primjena inherentne sigurnosti kroz faze projektiranja procesnog postrojenja

3. METODE POSTIZANJA INHERENTNO SIGURNIJEG DIZAJNA

3.1. Minimizacija

Minimizacija je metoda postizanja inherentno sigurnijeg dizajna primjenom manje količine opasnih tvari (Slika 3.), smanjuje se veličina opreme koja radi pod opasnim uvjetima kao što su visoki tlak i temperature (npr. pomoću manjih šarži). [3]

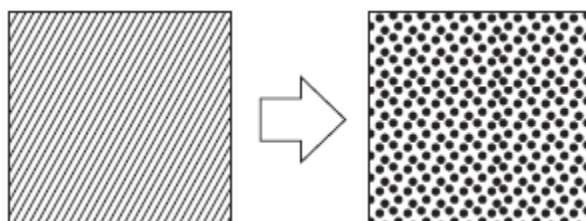
Sve do eksplozije u Flixboroughu 1974. godine nije se vodilo računa o količini opasnih tvari koje se primjenjuju, odnosno o smanjenju količine opasnog materijala. Kemijski inženjer Trevor Kletz predlaže rješenje za smanjenje opasnosti usmjeravanjem pažnje na korištenje manje količine opasnog materijala, manje opasnih tvari te rad u manje opasnim uvjetima. [5]



Slika 3. Smanjivanje količine tvari koje se primjenjuju

3.2. Supstitucija

Načelo supstitucije odnosi se na primjenu manje opasnih tvari te provođenje manje opasnih procesa (npr. čišćenje s vodom i deterdžentom, a ne zapaljivim otapalom). Zamjenjuje se jedan materijal drugim, manje opasnim (slika 4.). [3] Na taj način mogu se zamijeniti zapaljiva rashladna sredstva i mediji za prijenos topline onima koji nisu zapaljivi te opasne proizvode sigurnijima. Zamjenjuju se procesi koji koriste opasne sirovine ili međuprodukte postupcima koji nisu opasni. [5]



Slika 4. Zamjena materijala

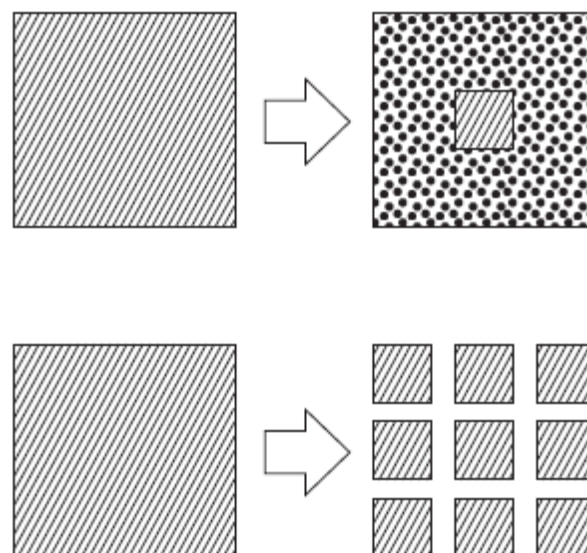
Minimizacija, odnosno korištenje manjih količina opasnih tvari, bolja je rješenje od supstitucije jer se to odnosi i na smanjenje ukupnih troškova. Ukoliko je prisutno manje materijala, manja je i potreba za cijevima odnosno smanjuje se sama struktura postrojenja. Veliki pritisak na minimizaciju prvenstveno se vrši zbog smanjenja troškova te utroška energije. [5]

3.3. Provođenje pri blažim uvjetima

Načelo provođenja pri blažim uvjetima odnosi se na smanjenje opasnosti razrjeđivanjem, hlađenjem te provedbom alternativnih procesa koji zahtjevaju manje opasne uvjete, kao što je zamjena plina pod visokim tlakom hladnom tekućinom ili korištenje razrjeđenih, umjesto koncentriranih kemikalija. [3]

Provođenje pri blažim uvjetima ponekad je obrnuti postupak minimizaciji. Naime, ukoliko su uvjeti reakcije manje ekstremni trebat će, u nekim slučajevima, dulje vrijeme provedbe procesa te samim time i veće postrojenje. [5]

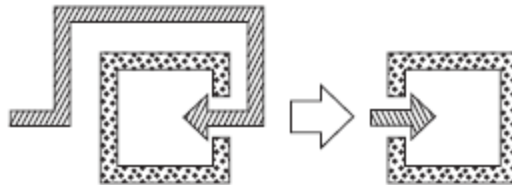
Slikom 5. prikazan je postupak smanjivanja opasnosti razrjeđivanjem i potreba za većim postrojenjem u slučaju duljeg vremena provedbe procesa.



Slika 5. Razrjeđivanje i povećanje postrojenja

3.4. Pojednostavljenje

Pojednostavljenjem procesa eliminira se nepotrebna složenost uporabom “*user friendly*” postrojenja (Slika 6.). Problemi se uklanjaju dizajnom, a ne dodavanjem dodatne opreme. [3] Kao primjer je cijevni reaktor koji je pogodniji od kotlastog reaktora jer je količina propuštanja ograničena presjekom cijevi i može se zaustaviti zatvaranjem ventila. [5]



Slika 6. Pojednostavljenje postrojenja

Minimizacija, supstitucija, provođenje pri blažim uvjetima i pojednostavljenje osnove su inherentno sigurnijeg dizajna koji se temelji na izbjegavanju opasnosti umjesto kontroliranja dodavanjem zaštitne opreme. Sam pojam inherentna sigurnost podrazumijeva da je sam proces sigurniji zbog svoje prirode, a ne zbog sigurnosti koju pruža dodatna oprema. [5]

4. MJERENJE INHERENTNE SIGURNOSTI

Inherentni procesni sigurnosni pokazatelj je indeks na kojem se temelji način mjerenja inherentnog stupnja sigurnosti procesa tijekom ranih faza projektiranja. Nedostatak mu je ograničeni skup čimbenika za koje se smatra da utječu na inherentnu sigurnost. Nepoznavanje dizajna procesa koji utječe na inherentnu sigurnost može dodatno pogoršati mjerenje inherentnog stupnja sigurnosti. [4]

Jednim od najvećih izazova prilikom projektiranja procesa smatra se određivanje inherentnog stupnja sigurnosti. Mjerenje inherentnog stupnja sigurnosti može pomoći i poboljšati inherentno siguran dizajn.

Pri samom određivanju inherentnog stupnja sigurnosti, inherentna sigurnost se klasificira u tri kategorije:

- a) modeli koji su usredotočeni na svojstva materijala ili operacije u eksperimentalnoj, računalnoj i matematičkoj okolini,
- b) kvalitativne procjene koje vrednuju opasnosti pomoću raznih tehnika i kontrolne liste te
- c) mjerenje koje kvantitativno ili kvalitativno procjenjuje inherentne opasnosti određenog procesa.

Mjereni podaci su od velike koristi jer su nosioci informacija koje su dostupne u ranim fazama dizajna te se mogu integrirati s procesnim simulatorom ili sličnim alatima za procjenu i usporediti s drugim metodama za projektiranje procesa.

Prvi uvedeni indeks "Prototipni indeks inherentne sigurnosti" (Edward i Lawrence 1993.godine) primjenjivao se za rangiranje inherentnog stupnja sigurnosti sintenznih putova.

Nedostatak definiranja inherentnog procesnog sigurnosnog pokazatelja na temelju indeksa je nepostojanje standarda za mjerenje stvarnog stupnja sigurnosti. Zbog toga točnost i osjetljivost rezultata može biti nejasna. Znanstvene studije su predložile minimalni kriterij za definiranje indeksa. Na razlike između rezultata različitih pokazatelja stupnja inherentne sigurnosti utječe

opseg prekrivenosti inherentnih sigurnosnih pokazatelja. Alati koji se temelje na indeksima imaju specifične strukture koje uključuju podindekse (indikatore), setove podindeksa i ukupne indekse. Razlika u indeksima se može pripisati različito izračunatim podindeksima (indikatorima), a oni se skupljaju u ukupni indeks. Studija Kollera i suradnika (2002.godine) pokazala je da sličnost između dvaju proučavanih indeksa, kada je rangirana sigurnost procesa, bila 75% zbog raznolikosti u prekrivenosti njihovih podindeksa. Kada indeks prekriva veliki broj inherentnih sigurnosnih pokazatelja, rezultat je realniji. Ne postoji indeks koji prekriva sve inherentne sigurnosne pokazatelje. [3]

4.1. Procjena indeksa

Definirano je šest kategorija za procjenu indeksa inherentno sigurnijeg dizajna. Sama procjena započinje definiranjem pristupa procjeni te zatim definiranjem čimbenika koji utječu na inherentno sigurniji dizajn.

4.1.1. Relativno rangiranje

Sustav rangiranja nastaje na temelju mogućih kvantitativnih vrijednosti svakog indikatora. Razina svakog ranga uvijek je određena kroz stručnu prosudbu, a svaki rang dobiva rezultat. Dobivene vrijednosti se uspoređuju s pokazateljima te je to najlakši pristup. Takav pristup zahtjeva minimalne informacije i vrijeme te obuhvaća procjenu većine pokazatelja inherentne sigurnosti.

4.1.2. Napredni matematički pristup

Temelji se na naprednim matematičkim metodama, statističkim metodama, numeričkim deskriptivnim metodama i dr.

4.1.3. Pristup temeljen na rizicima

Pristup temeljen na rizicima usmjeren je na procjenu glavnih posljedica inheretne opasnosti, odnosi se na vrstu požara, vrstu eksplozija te ispuštanje opasnih tvari. Kada se identificiraju svi mogući scenariji, može se procijeniti rizik koristeći težinu i vjerojatnost dobivenu iz modela i formule. Ovakav pristup procjeni indeksa inherentne sigurnosti zahtjeva više vremena te je složeniji ali pruža pouzdane rezultate.

4.1.4. Grafički pristup

Grafičkim prikazom izračunavaju se pokazatelji koristeći varijable koje su prikazane u grafičkom obliku pomoću jednostavnih grafičkih metoda ili reaktivnih slojeva. Ovaj pristup može pružiti vizualnu usporedbu između inherentnih sigurnosnih pokazatelja ili alternative za dizajn.

4.1.5. Hibridni pristup

Hibridni pristup koristi kombinacije više pristupa procjeni pokazatelja inherentne sigurnosti kao primjerice relativno rangiranje i pristup temeljen na rizicima. Kombinacijom više pristupa procjeni, hibridni pristup može pružiti više zadovoljavajuće rezultate od svakog pristupa zasebno.

4.1.6. Pristup baziran na jednadžbi (formuli)

Ovim pristupom eksperimentalne ili predložne jednadžbe koriste se za procjenu pokazatelja.

4.2. Podindeksi za opasne tvari

Svaka opasna tvar koja se primjenjuje u procesima, definirana je podindeksom zapaljivosti, eksplozivnosti te izlaganju otrovnim tvarima.

4.2.1. Podindeks zapaljivosti

Podindeks zapaljivosti opisuje zapaljivost tekućina dok se sama zapaljivost definira temperaturom paljenja i vrenja.

Klasifikacija tvari, na temelju direktive EU, dijeli tvari na nezapaljive, gorive, zapaljive, lako zapaljive i vrlo zapaljive kao što je prikazano u Tablici 1. [6]

Tablica 1. Klasifikacija zapaljivosti tvari ocjenjena indeksom zapaljivosti

Klasifikacija tvari	Ocjena zapaljivosti
Nezapaljivo	0
Gorivo (točka paljenja > 55 ° C)	1
Zapaljivo (točka paljenja 55 ° C)	2
Lako zapaljivo (točka paljenja <21 ° C)	3
Vrlo zapaljivo (točka paljenja <0 ° C i vrelište <35 ° C)	4

4.2.2. Podindeks eksplozivnosti

Podindeks eksplozivnosti opisuje tendenciju plina da stvori eksplozivnu smjesu sa zrakom. Eksplozivni raspon, izražen u postotcima po volumenu goriva pare u zraku, je raspon koncentracije pare ili mješavine plina sa zrakom koji će izgorjeti kada se zapali. Ako je koncentracija unutar svog eksplozivnog raspona, doći će do zapaljenja i eksplozije.

Ovaj model je gruba procjena, ali se koristi kada većina informacija o kemijskim svojstvima nije dostupna. [6]

U Tablici 2. prikazan je raspon eksplozivnosti tvari, izražen u postotcima po volumenu, ocjenjen indeksom eksplozivnosti.

Tablica 2. Raspon eksplozivnosti tvari ocjenjen indeksom eksplozivnosti

Raspon eksplozivnosti (donja granica- gornja granica) %vol	Ocjena eksplozivnosti
Ne eksplozivno	0
0-20	1
20-45	2
45-70	3
70-100	4

4.2.3. Podindeks izlaganja otrovnim tvarima

Izlaganje otrovnim tvarima podrazumijeva izlaganje kemikalijama koje su uzrok zdravstvenih problema. Sama procjena toksične izloženosti definira se graničnim vrijednostima (TLV) koje su dostupne za većinu tvari u procesnoj industriji. Granične vrijednosti definiraju štetne granice izlaganja tvarima unutar 8 sati te je važno koristiti isti vremenski prag radi mogućnosti usporedbe. Granične vrijednosti (TLV) ocjenjene indeksom izlaganja otrovnim tvarima nalaze se u tablici 3. Vrijednost indeksa je veća što je granična vrijednost manja tj. tvar je otrovnija. [6]

Tablica 3. Granične vrijednosti izlaganja otrovnim tvarima ocjenjene indeksom izlaganja otrovnim tvarima

Granične vrijednosti otrovnog izlaganja (TLV) (ppm)	Ocjena indeksa
TLV > 10 000	0
TLV ≤ 10 000	1
TLV ≤ 1000	2
TLV ≤ 100	3
TLV ≤ 10	4
TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 0,1	6

5. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA INHERENTNO SIGURAN DIZAJN

Fizikalna i kemijska svojstva tvari i materijala utječu na uklanjanje ili smanjivanje inherentno sigurnijeg dizajna te na samu sposobnost procjene njihovog utjecaja tijekom ranih faza projektiranja procesa. Sama svojstva tvari i materijala bitno je poznavati radi mogućnosti supstitucije (jedno od načela inherentne sigurnosti) ukoliko se koriste tvari ili materijali opasnih svojstava, sa manje opasnim. Smanjenjem opasnosti mogu se ublažiti posljedice velikih nesreća poput požara, eksplozija ili ispuštanje opasnih tvari.

Najčešći pokazatelji utjecaja tvari i materijala na sigurnost samog procesa su:

5.1. Zapaljivost

Zapaljivost ukazuje na sredstva u kojima krutina, plin ili tekućina lako gori u zraku. Ako tvar ili smjesa tvari ima nižu točku paljenja od skladišne ili operativne temperature, može predstavljati sigurnosni rizik što dovodi do požara ili eksplozije. U ispitivanjima se temperatura paljenja i temperatura vrenja koriste za procjenu zapaljivosti. [3] Sama temperatura paljenja definira se kao najniža temperatura do koje se treba zagrijati neka tvar da počne gorenje. Temperatura paljenja ovisi o okolnostima u kojima se tvar nalazi te što je kruta tvar sitnija to je niža temperatura paljenja. [7] Temperatura vrenja je temperatura pri kojoj tvar prelazi iz tekućeg u plinovito agregatno stanje te je tlak para jednak atmosferskom tlaku. [8]

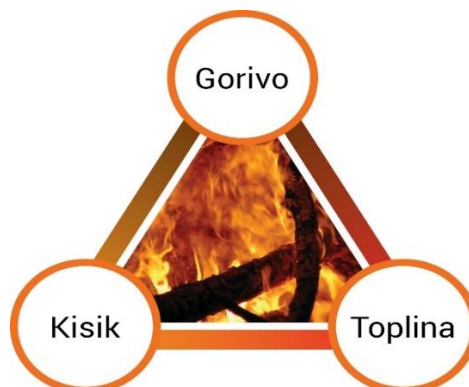
Dostupna je klasa zapaljivosti Nacionalnog saveza za zaštitu od požara za svaku tvar, a svaka klasa ima broj na temelju njegove temperature paljenja i temperature vrenja. [3]

Požarne značajke (fizikalno-kemijske promjene tvari) pri izloženosti požaru najčešće su: gorivost, zapaljivost, brzina širenja plamena, sposobnost stvaranja dima otrovnih plinova i toplinska moć. Osnovni način širenja požara je razvijanja plamena koji se može prikazati u četiri faze, od kojih su dvije faze požara presudne: požar u nastanku i puni požar, a tvar se u svakoj od njih ponaša sasvim različito. Požar u nastanku (zapaljenje i širenje) obuhvaća čitav niz različitih radnji poput načina izgaranja tvari, stupnja zapaljivosti, brzine širenja vatre po površini i intenziteta provođenja topline. Temperatura raste polako i gotovo linearno napreduje, zapaljive tvari su prisutne u ograničenim postotcima, usporeno je zagrijavanje okoline (zidovi i stropovi još su hladni i pojačano upijaju toplinu), a vlaga isparava iz svih materijala. "Vatreni skok" (*flash-over*) prijelaz (faza ili točka nakon koje nema povratka) je iz faze nastanka u fazu

punog požara. Temperatura naglo raste, a nastali plinovi u reakciji sa zrakom stvaraju zapaljivu smjesu. Zbog razvijene topline temperatura okoline raste do vrijednosti dovoljne za zapaljenje, a potom ubrzano raste postizući 500/600 °C u 5/25 minuta (ovisno o gorivu i dostupnoj količini inhibitora gorenja). Požar na početku zahvaća samo plinove, te se brže širi i na sva ostala goriva. Stvorena količina topline također eliminira i zaostalu vlagu velikom brzinom. Puni požar je faza u kojoj vatra zahvaća sve zapaljive tvari te zbog velike količine proizvedene topline raste temperatura. Razvijene temperature više su i od 900 °C i rastu konstantno do postizanja toplinske ravnoteže između vanjskog i opožarenog okruženja. Ova faza je najopasnija jer su moguća oštećenja (nekonstrukcijski elementi), otkazivanja (elementi i dijelovi konstrukcije) ili rušenje cijele konstrukcije, a širenjem plamena požar može zahvatiti i susjedna područja. Zatim nastupa faza konačnog hlađenja (od 300 °C do temperature okoline) koja je vrlo spora i jako opasna: hladne tvari s površine skrivaju mjesta gdje vatra tinja i moguće je novo zapaljenje. Zapaljive tvari počinju se trošiti, temperatura smanjivati do 200/300 °C isprva polako, a zatim sve brže i ovisi više o učinku isijavanja iz vrućih površina nego o novom gorenju. [9]

U unutrašnjosti procesnog postrojenja izvor opasnosti od požara proizlazi od zapaljivih tekućina, gorivih plinova, prašine te ostatka pare plinova i tekućina. Do povećane opasnosti od požara dolazi kada je koncentracija iznad dopuštenih granica ili kada se radna temperature poveća iznad dopuštene. [3]

Da bi došlo do zapaljenja, a time i do razvijanja požara potrebno je imati materijal koji je zapaljiv (plin ili para, tekućina, krutina, krutina u obliku prašine raspršena u plinu), kisik iz zraka te izvor paljenja koji nije uvijek potreban, kao što je prikazano na Slici 7. [10]



Slika 7. Trokut gorenja

Opasnost od požara može se kategorizirati kao velika opasnost od požara i eksplozije, manja opasnost od požara i eksplozije te velika opasnost od požara. U kategoriju “velika opasnost od požara” ubrajaju se tehnološki procesi s lako zapaljivim tekućinama s temperaturom paljenja ispod 23°C, te kod gorivih plinova s donjom granicom eksplozivnosti od 10%. U takvim tehnološkim procesima upotrebljavaju se opasni materijali kao aceton, benzin, etilklorid, toluen, sumporovodik, metan, propan i dr. Neki od primjera takvih tehnoloških procesa su ekstrakcija, destilacija, hidriranje i polimerizacija te razna skladišta materijala, tekućina i plinova. “Manje opasnosti od požara i eksplozije” je kategorija za tehnološke procese u kojima se upotrebljavaju lako zapaljive tekućine s temperaturom plamišta od 10°C do 23°C te gorivi plinovi sa donjom granicom eksplozivnosti iznad 10%. U tu kategoriju ubrajaju se i neke gorive krute tvari pri čijoj se obradi stvara eksplozivna prašina. Karakteristične lako zapaljive tekućine koje se upotrebljavaju u takvim tehnološkim procesima su dizelsko gorivo, amonijak, fenol, katran, ulje, naftalin, stiren i dr. Tehnološki procesi koji koriste lako zapaljive tekućine u proizvodnji su proizvodnja tekstila, obrada sintetičkog kaučuka, pogoni za transport prašine ugljena, proizvodnja šećera, duhana te razna skladišta. Posljednja kategorija je “Velika opasnost od požara” u koju spadaju tehnološki procesi koji upotrebljavaju zapaljive tekućine s temperaturom paljenja (samozapaljenja) od 100°C do 300°C te gorivi plinovi i plinovi koji potpomažu gorenje te kruta tvar sa temperaturom paljenja do 300°C. Zapaljive tekućine koje se upotrebljavaju su glicerol, laneno ulje, maslinovo ulje, stearinska kiselina te vosak, a upotrebljavaju se u tehnološkim procesima obrade drveta, tekstilnoj industriji, industriji papira, obradi pamuka te regeneraciji ulja. [3]

Posljedica požara i eksplozija je stvaranje opasnih tvari kao produkti gorenja (ugljičnog (II) oksid, ugljičnog (IV) oksid, oksidi dušika, plinovi sumpora, klorovodik, fluorovodik te bromovodik). Kod požara javljaju se štetni plinovi i pare koje utječu štetno na disanje osoba i njihovu smrtnost, a mogu dovesti i do eksplozije ili intenzivnog gorenja s posljedicom daljnjeg širenja požara. [3]

Čimbenici važni za procjenu opasnosti od požara su:

5.1.1. Temperatura samozapaljenja

Temperatura samozapaljenja plina ili pare je temperatura na kojoj će se plin ili para spontano zapaliti na zraku bez vanjskog izvora paljenja. Prisustvom katalitičkih nečistoća, površinskim materijalom ili većim volumenom ispitne posude temperatura samozapaljenja može se smanjiti.

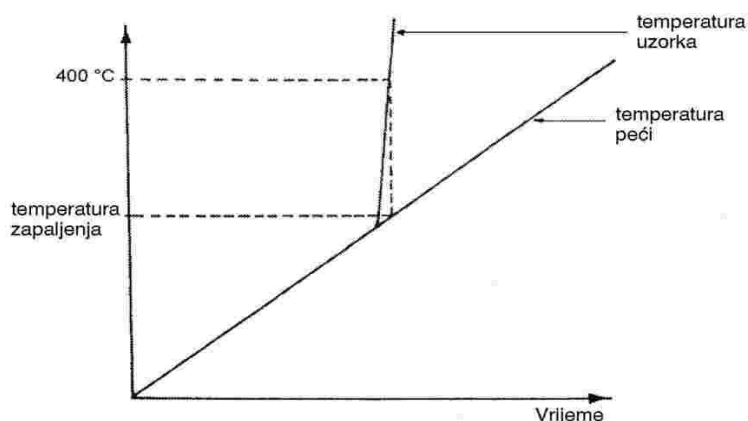
Ukoliko se toplina koja se razvija bilo reakcijom tvari s kisikom ili egzotermnim raspadanjem ne gubi dovoljno brzo u okolini, dolazi do samozagrijavanja koje vodi do samozapaljenja. [10]

U Tablici 4. nalaze se temperature samozapaljenja tvari iz skupina vrlo zapaljivo (acetone), lako zapaljivo (amonijak) i zapaljivo (glicerine).

Tablica 4. Temperature samozapaljenja acetona, amonijaka, glicerina

Naziv	Temperatura samozapaljenja °C
Aceton [11]	465
Amonijak [12]	651
Glicerine [13]	370

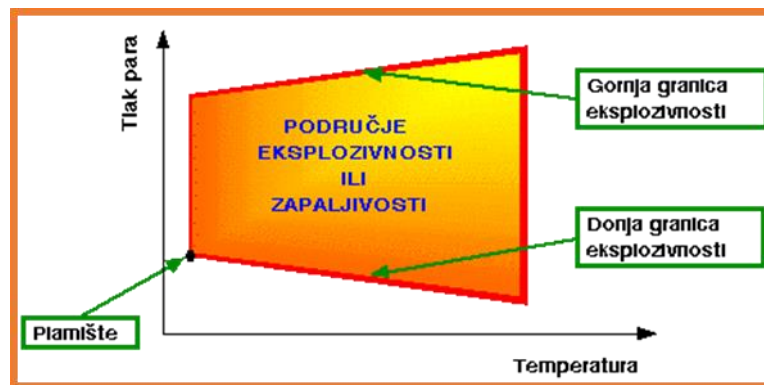
Sama metoda ispitivanja temperature samozapaljenja provodi se tako da se određeni volumen tvari koja se ispituje stavi u peć na temperaturu okoline te se bilježe promjene temperature u funkciji vremena s obzirom na uvjete u središtu uzorka (prikazano na Slici 8.). Temperatura peći povećava se brzinom od 0,5 °C/min do 400 °C, ili do tališta ukoliko je ono na nižoj temperaturi. U svrhu ispitivanja, temperatura peći u kojoj temperatura uzorka koji se samozagrijava dostiže 400 °C naziva se temperaturom samozapaljenja.



Slika 8. Graf ispitivanja temperature samozapaljenja

5.1.2. Granica zapaljivosti /eksplozivnosti

Granica zapaljivosti definira raspon koncentracija plina ili pare u zraku koja je zapaljiva. Ukoliko je koncentracija plina ispod donje granice zapaljivosti plin se neće zapaliti, te isto tako ako je koncentracija iznad gornje granice zapaljivosti plin se neće zapaliti. Koncentracija plina unutar tih granica tvori zapaljivi plin (prikazano na Slici 9.).



Slika 9. Područje zapaljivosti definirano p-T dijagramom

Ukoliko je sagorijevanje naglo, popraćeno razvijanjem velike količine topline sagorijevanja i naglim povećanjem tlaka onda se to naziva eksplozijom. Plinovi i pare koji naglo sagorijevaju u zraku nazivaju se zapaljivi plinovi i zapaljive pare, a njihova smjesa naziva se eksplozivnom smjesom.

Donja granica zapaljivosti karakterizirana je velikim suviškom zraka, a gornja granica zapaljivosti karakterizirana je velikim suviškom gorive tvari, dok je pri stehiometrijskoj koncentraciji odnos gorive tvari i zraka jednak teorijskim odnosima. [10]

Otpornost plina prema detonaciji definirana je metanskim brojem. [15] Metanski broj je postotni obujam sadržaja metana u uspoređivanom plinu kod kojeg nastaje isti otpor prema detonaciji kao kod plina koji se ispituje. Određuje se otpor prema detonaciji koji se uspoređuje sa smjesom metana i vodika. [16]

Granice zapaljivosti su pod utjecajem tlaka te promjenom tlaka dovodi do specifične promjene za svaku smjesu. U nekim slučajevima smanjenjem tlaka može se suziti područje zapaljivosti, podizanjem donje granice zapaljivosti te smanjenjem gornje granice zapaljivosti. Ukoliko se pomicanje granica (donje i gornje granice samozapaljenja) dovede do kraja, granice se

podudaraju i smjesa postaje nezapaljiva. Obrnuto, povećanjem tlaka može se povećati raspon zapaljivosti. Temperatura također utječe na granice zapaljivosti te povećanjem temperature područje zapaljivosti se širi. [3]

U tablici 5. Nalaze se rasponi koncentracija zapaljivosti tvari iz skupina vrlo zapaljivo (acetone), lakozapaljivo (amonijak) i zapaljivo (glicerine).

Tablica 5. Raspon koncentracija zapaljivosti acetona, amonijaka, glicerina

Naziv	Raspon koncentracije (donja-gornja) [% vol.]
Aceton (zapaljiva tekućina i para) [17]	1,4 - 11,3
Amonijak [18]	15 - 28
Glicerine [13]	2,6 - 11,3

5.1.3. Minimalna koncentracija kisika

Minimalna koncentracija kisika je koncentracija ispod koje reakcija ne može generirati dovoljno energije za smjesu kako bi se omogućilo stvaranje plamena. Minimalni kisik je postotak kisika u zraku zajedno sa gorivim materijalom.

Metoda određivanja minimalne koncentracije kisika je najrasprostranjenija da bi se utvrdila sklonost materijala prema gorenju. Sama metoda definira se kao najmanja količina kisika u smjesi kisik-dušik koja je potrebna da ispitno tijelo gori pri normalnim uvjetima te se naziva granični indeks kisika (GIO). Što je veća sklonost materijala prema gorenju to je potrebna koncentracija kisika manja, tj. niža je vrijednost graničnog indeksa kisika (izraženo u postotcima). Obzirom na vrijednost indeksa može se napraviti podjela materijala kao što je prikazano u Tablici 6. [10]

Tablica 6. Podjela gorivnosti ovisno o minimanoj koncentraciji kisika (GIO)

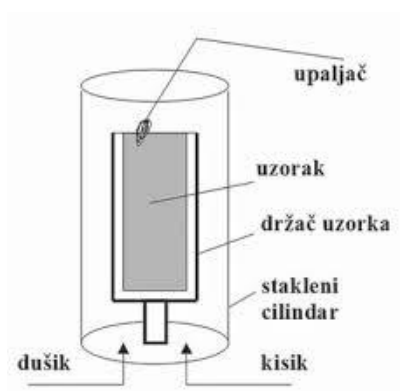
Podjela gorivosti	Raspon vrijednosti minimalne koncentracije kisika
Vrlo samogasiv	GIO>50
Samogasiv	25<GIO<50
Goriv	20<GIO<25
Vrlo goriv	GIO<20

Granični indeks kisika (GIO) može se izračunati prema formuli:

$$GIO(\%) = \frac{O_2}{O_2 + N_2} * 100$$

gdje su O_2 i N_2 volumne koncentracije plinova. [19]

Aparatura za GIO ispitivanja (Slika 10.) sastoji se od staklene cijevi u koju se vertikalno postavlja uzorak za ispitivanje. Smjesa kisika i dušika sa dna cijevi propušta se tako da plinovi protječu prema gore. Uzorak se zapali na vrhu te gori u kontroliranoj atmosferi dušika i kisika. Operator prilagođava koncentraciju kisika sve dok uzorak podržava gorenje, iz vrijednosti s mjerača protoka izračuna indeks kisika. [19]



Slika 10. Uređaj za određivanje minimalne koncentracije kisika

5.1.4. Točka paljenja

Točka paljenja je najniža temperature pri kojoj se stvara dovoljno pare da postane zapaljiva smjesa sa zrakom. Povećanjem tlaka ona se povećava. [10]

Smatra se jednim od važnih svojstava za procjenu ukupne opasnosti od zapaljenja materijala jer je točka paljenja pokazatelj sklonosti uzorka stvaranju zapaljive smjese sa zrakom.

Sa stajališta sigurnosti točka paljenja je od posebne važnosti jer daje bitne informacije kojim temperaturnim uvjetima tvari mogu biti podvrgnute tijekom transporta, skladištenja ili upotrebe. Za tvari s točkom paljenja ispod 40°C nužna je posebna pažnja pri rukovanju. Za tvari s točkom paljenja iznad 60°C, ovo svojstvo gubi primarno značenje za sigurnosne svrhe i postaje indirektna mjera općenite kakvoće tvari. [20]

5.1.5. Minimalna temperature paljenja prašine

Minimalna temperature paljenja prašine je najniža temperature na kojoj se prašina koja se raspršuje u obliku oblaka može zapaliti. To je važan faktor u procjeni osjetljivosti prašine na izvore paljenja kao što su vruće površine. Što je manja veličina čestica prašine te što je manji sadržaj vlage to je niža temperature paljenja. [10]

Poznavanje minimalne temperature paljenja prašine je od velike važnosti u postrojenjima gdje se nalaze zapaljive prašine, odnosno za procjenu rizika paljenja kod postrojenja gdje postoji mogućnost akumulacije, tj. taloženja prašine.

Ispitivanje temperature paljenja oblaka prašine provodi se uporabom uređaja koji se sastoji od spremnika zraka pod tlakom, spremnika za uzorak prašine, peći te regulatora temperature (Slika 11.). Otvaranjem ventila stlačeni zrak se (do max. 0,5 bar) upuhuje u spremnik s uzorkom prašine te tako nastao oblak ulazi u unaprijed zagrijanu peć. Postupak se ponavlja dok se ne odredi najniža temperatura paljenja oblaka prašine. [21]



Slika 11. Uređaj za određivanje minimalne temperature paljenja prašine

Sam proces pojave zapaljivih smjesa goriva i prašine treba izbjegavati, a ne se bazirati na uklanjanje izvora paljenja. To se može postići prvenstveno promjenom procesnih uvjeta tako da se vodi računa o čimbenicima koji utječu na opasnost od požara. Ukoliko to nije moguće izbjeci može se primjeniti inertni materijal kao što je dušik, ugljikov (IV) oksid ili para. Nužno je izbjegavati upotrebu zapaljivih tekućina pod tlakom te uvođenjem pare u sam proces je puno sigurnije. Potrebno je ukloniti, gdje god je to moguće, izvore paljenja kao što su plamenovi, iskre iz električne opreme, iskre iz udarca ili trenja. Električni naboj može se akumulirati na prašku, ukoliko je električki izolirano od tla. Na mjestima gdje se izvode postupci punjenja na površini (npr. prerada prašnjavih materijala) treba izbjegavati korištenje električne izolacije jer to omogućuje akumulaciju električnog naboja. Za pojedine slučajeve visoka relativna vlažnost može smanjiti akumulaciju statičkog naboja na prašini. [10]

5.2. Eksplozivnost

Eksplozivnost definiramo kao tendenciju tvari da formiraju eksplozivnu smjesu sa zrakom. Ukoliko dođe do eksplozije u atmosferi zraka, oslobađa se energija u kratkom vremenu i malom volumenu te nastaje čujni tlačni val. [10]

Eksploziju definiramo kao naglu oksidaciju koja rezultira trenutnim povećanjem tlaka i temperature, a njezini učinci su visoka buka te stvaranje tlačnih valova koji mogu uzrokovati rušenje zidova i lom stakla. Rezultat nagle eksplozije plina su toplina, dimni oblaci te plamen. [22]

Eksplozija je dakle iznenadno i nasilno oslobađanje energije, a energija koja se oslobađa u eksploziji proizlazi iz fizičke i kemijske energije. [6]

Fizička energija može biti tlačna energija u plinovima, toplinska energija, energija naprezanja ili električna energija.

Kemijska energija proizlazi iz kemijskih reakcija ili izgaranja zapaljivih tvari (prašina, para ili plin) te postoje dvije osnovne vrste eksplozija koje uključuje njeno oslobađanje. Prva vrsta eksplozija je deflagracija. Deflagracija je vrsta eksplozije u kojoj prednji plamen putuje kroz zapaljivu smjesu relativno polako. Druga vrsta je detonacija. Kod detonacija prednji plamen putuje kao udarni val koji slijedi val s izgaranjem koji oslobađa energiju za održavanje udarnog vala. Detonacijski val kreće se brzinom većom od brzine zvuka u neizreagiranom mediju. Sama detonacija stvara veći pritisak i više je razarajuća od deflagracije. Uspoređujući vršni pritisak, kod deflagracije je reda od 8 do 10 bar dok kod detonacije reda od 20 bar. Ukoliko deflagracija putuje kroz dugu cijev može se pretvoriti u detonaciju. [10]

Eksplozivna priroda tvari opisana je gornjom i donjom granicom eksplozivnosti. Sama eksplozivnost oblaka pare ovisi o donjoj granici eksplozivnosti. Što je širi raspon granica eksplozivnosti to je veća sklonost eksploziji. [6]

Donja granica eksplozivnosti je minimalna koncentracija zapaljivog plina, pare tekućine ili prašine koja sa zrakom može izazvati eksploziju, a donja granica eksplozivnosti maksimalna koncentracija. Ukoliko je koncentracija veća od gornje granice, smjesa je "prebogata" te nema dovoljno kisika za eksploziju. Temperatura i tlak također utječu na granice te ukoliko je viša temperatura raspon granica je širi dok tlak rezultira povećanjem obiju vrijednosti. [23]

Kao i kod procjene zapaljivosti, koristi se isti postupak procjenu eksplozivnosti smjese. Mogu se koristiti statistički, numerički i hibridni pristupi za određivanje pokazatelja eksplozivnosti. Nakon procjene eksplozivnosti za svaku kemijsku sintezu, može se odabrati alternativni put s nižom mogućnošću eksplozije. [3]

Informacije o eksplozivnosti plinova ili pare nalaze se na sigurnosno tehničkom listu koji isporučuje proizvođač zapaljive tvari. [23]

Uporaba industrijskih kemikalija s manjim eksplozivnim potencijalom čini proces više inherentno sigurnijim. Najveće eksplozije dolaze iz velikih oblaka zapaljivih tvari koje imaju izvor zapaljenja. Primjer katastrofe uzrokovane takvim uzrokom je Flixborough (1996.godine). [6]

Sama eksplozija dogodi se u jednom trenutku ali postoji više faza kroz koje se ona odvije u tom trenutku. Prva faza eksplozije je zapravo prvi udarni val u kojem dolazi do letenja dijelova opreme te ukoliko je tlak od udara dovoljno veliki dolazi do probijanja zidova, krova, vrata i prozora. Druga faza je posljedica razvijanja velike količine topline koja može uzrokovati sekundarni požar. Udarni valovi mogu ozbiljno oštetiti plinske te vodovodne cijevi i električne instalacije, a velike su posljedice i za ljudske živote. Vrlo su štetne i opasne međusobne reakcije tvari koje nastaju izgaranjem prilikom eksplozije pri čemu se koncentracija kisika u prostoru smanjuje i može doći do gušenja. [23]

Razlikujemo ograničenu i neograničenu eksploziju

5.2.1. Ograničena eksplozija

Ograničene eksplozije su one koje se pojavljuju unutar posuda, cjevovoda ili zgrada. Eksplozija zapaljive smjese u procesnoj posudi ili cjevovodu može biti deflagracijska ili detonacijska. Uvjeti za deflagracijsku eksploziju su da se plinska mješavina nalazi unutar granica eksplozivnosti te da postoji izvor paljenja. Do deflagracijske eksplozije može doći i bez izvora paljenja ukoliko se smjesa zagrije do samozapaljive temperature. Eksplozija koja započinje kao deflagracija može prijeći u detonacijsku te se taj prijelaz može pojaviti u cjevovodima. [10]

5.2.2. Neograničena eksplozija

Neograničena eksplozija javlja se na otvorenom te je to jedna od najozbiljnijih opasnosti u procesnoj industriji. Poblema eksplozije pare, koja je rezultat istjecanja zapaljive tekućine, je taj što oblak pare može doći do veće udaljenosti od mjesta ispuštanja te može ugroziti znatno područje.

Ukoliko dođe do eksplozije u nekontroliranom oblaku pare, energija udarnog vala je samo mali dio energije koja je teorijski dostupna iz izgaranja svih tvari koje tvore oblak. Teorijski dostupna energija iz topline izgaranja definirana je kao učinkovitost eksplozije te je obično u rasponu od 1 do 10 %. [10]

Potrebno je opasnost od eksplozije svesti na najmanju moguću mjeru izbjegavanjem zapaljivih mješavina plinova i zraka promjenom procesa ili primjenom inertnog materijala. Loša praksa je što se isključivo bazira na ukljanje izvora paljenja, a ne na smanjenje opasnosti primjenom alternativnih metoda. [10]

5.3. Toksično ispuštanje

Toksično ispuštanje je jedna od najvećih opasnosti s najvećim potencijalom katastrofe jer je veliki broj ljudi izložen visokim koncentracijama opasnih tvari. Dugoročna izloženost niskim koncentracijama tijekom rada također može uzrokovati ozbiljnije zdravstvene problem.

Da bi kemikalije mogle utjecati na zdravlje moraju doći u kontakt koji se vrši udisanjem, direktni kontakt sa kožom ili gutanjem. Primarno se razmatra kontakt udisanjem jer do njega najčešće dolazi u procesnim postrojenjima. Do kontakta dolazi slučajnim ispuštanjem opasnih tvari u atmosferu ili emisijama uzrokovanim sporim istjecanjem iz cijevi, ventila, brtve pumpe i kompresora. [10]

Definirane su odgovarajuće granice izloženosti koje ovise o vremenu izlaganja, da li je kratko ili produljeno. Granice izloženosti su definirane ispitivanje toksičnosti na životinjama koje je teško ekstrapolirati na ljudska bića. [10]

Granična vrijednost definirana je kao koncentracija u zraku koji se može disati bez štetnog djelovanja za 5 uzastopnih radnih dana u trajanju 8 sati. Granične vrijednosti temelje se na različitim učincima iritacije do fiziološke štete, pogotovo za industrijska postrojenja gdje se velika pažnja stavlja na zaštitu zaposlenika na random mjestu. [6]

Granica kratke izloženosti toksičnim tvarima koje se nalaze u zraku definira se koncentracijom toksičnog sredstva kojem je smrtnost 50% ispitne skupine tijekom određenog razdoblja izlaganja, obično 4 sata. Granice za produljeno izlaganje izražene su kao prag granične vrijednosti te su to prihvatljivije granice na random mjestu. [10]

Postoje dvije kategorije graničnih vrijednosti:

5.3.1. Vrijeme izmjerene izloženosti

Vrijeme izmjerene izloženosti je vrijeme normalnog radnog dana od 8 sati ili 40 sati tjedno kojem svi radnici mogu biti izloženi prosječnoj koncentraciji, dan za danom, bez štetnih učinaka. Ako postoji izlaganje iznad dopuštenih koncentracija, to vrijeme se kompenzira drugim ograničenjima.

5.3.2. Kratkoročno izlaganje

Kratkoročnim izlaganjem definiran je prag izloženosti od 15 minuta. Govori se o maksimalnoj koncentraciji kojoj radnici mogu biti izloženi u tom vremenu da ne dođe do nepodnošljivih iritacija, kroničnih nepovratnih promjena tkiva ili značajnog smanjenja učinkovitosti. Uvjet takvom izlaganju je da se ne bude izložen više od 4 puta po radnom danu i sa najmanje 60 minuta pauze između izlaganja. Dnevna definirana doza se nesmije prekoračiti. [10]

6. PRIMJENA NAČELA INHERENTNE SIGURNOSTI PRI PROJEKTIRANJU

Pri projektiranju procesa velika pažnja stavlja se na smanjenje opasnih tvari te posljedice nastalih kvarova, smanjenje broja procesnih operacije što uključuje manje cjevovoda, a samim time se smanjuje opasnosti od propuštanja. Vodi se računa o ograničenjima eksplozijskih pretlaka u manjim reaktorima te se tako izbjegava upotreba dodatnih uređaja za sigurnost. [5]

5.1. Reaktori

Kontinuirani reaktori, poput oksidacijskih reaktora u tekućoj fazi, sadrže velike zalihe vrlo zapaljivih tekućina te bi propuštanje iz takvih reaktora moglo izazvati požar i eksploziju. Uzimajući u obzir to kao jednu od opasnosti treba voditi računa o samoj veličini reaktora te količini tvari koja se primjenjuje. Neiskorištene tvari treba obnoviti i reciklirati, a to povećava sam inventar postrojenja i uvodi dodatne izvore opasnosti. [5]

Mali reaktori koji rade pri uvjetima visoke temperature i tlaka mogu biti inherentno sigurniji od onih koji rade pri manje ekstremnim uvjetima. Dok kod velikih reaktora, koji rade na atmosferskom tlaku i temperaturi, manja je vjerojatnost propuštanja te ukoliko i dođe do propuštanja biti će malo. Kompromisno rješenje koje uključuje rad pri umjerenom tlaku i temperaturi te uporabom srednje količine tvari može biti i najlošija kombinacija. Kompromisna rješenja nisu uvijek bolja od rada pri ekstremnim uvjetima. [10]

Cijevni reaktor uvijek se treba smatrati alternativom za reaktore. U cijevnim reaktorima postavljaju se ventili koji mogu zaustaviti ispuštanje. Postavljanjem nekoliko takvih ventila duž cijevi, cijevni reaktor može ograničiti ispuštanje na željenu količinu (primjerice 5 ili 10 tona) te se smanjuje vjerojatnost od požara, eksplozija i otrovnog ispuštanja. [5]

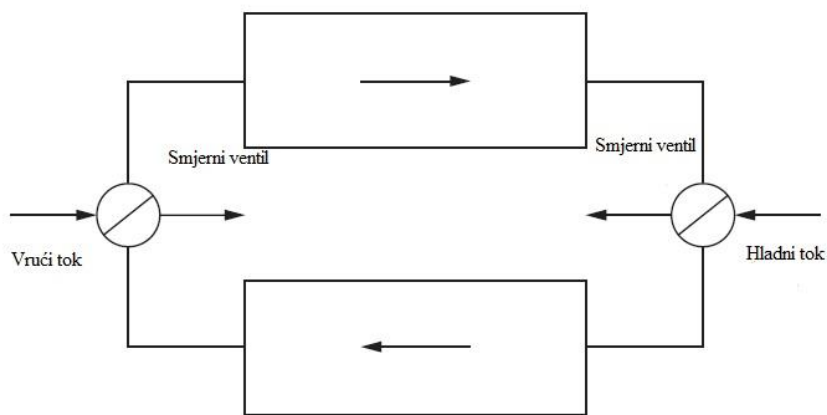
Jedan od načina rješavanja problema je smanjenje količine tvari u reaktoru i reaktor se zamjenjuje kontinuiranim reaktorom. Na taj način tijekom reakcije dodavat će se reaktanti te u slučaju opasnosti dodavanje se isključuje. [10]

5.2. Prijenos topline

U dizajnu sustava za izmjenu topline koriste se tekućine za prijenos topline. Tekućine koje se koriste su tekućine s visokim vrelištem. Prihvatljivija opcija je njihova zamjena sa nezapaljivim

tekućinama kao što je voda ili rastopljena sol. Potrebno je izbjegavati nepotrebno korištenje medija za zagrijavanje. [10]

Drugi način prijenosa topline može se ostvariti korištenjem paralelnih ploča izmjenjivača topline s uskim prostorima između ploča. Takvi izmjenjivači topline su prilagodljivi različitim protocima te razlikama temperature i padu tlaka. Primjer takvog izmjenjivača topline prikazano je na slici 12. U izmjenjivačima topline može se povećati turbulencija i time smanjiti onečišćenje. [5]



Slika 12. Regenerativni izmjenjivač topline s *fixed-bed*

Prijenos topline u izmjenjivačima topline može se poboljšati umetanjem žice u cijev koja potiče turbulenciju, pogotovo u blizini stijenka. Turbulencijom se ostvaruje bolji prijenos topline. [5]

Vodene tekućine mogu se zagrijavati izravnim ubrizgavanjem pare, čime se pojednostavljaju postrojenja i smanjuju troškovi izmjenjivača. Ubrizgavanjem mjehurića pare može doći do stvaranja vibracija ali to se može izbjeći miješanjem pare i vode prije ubrizgavanja u tekućinu. [5]

Neki se procesi moraju provesti pri niskoj temperaturi koja zahtjeva rashlađivanje. Rashladna tekućina može, na primjer, biti propilen i predstavljati veliku opasnost. Rad procesa pri višem tlaku donosi povećane opasnosti u procesnoj opremi, ali s druge strane, može omogućiti manje opasno hlađenje tekućine. [5]

5.3. Skladištenje

U skladištima sirovina, proizvoda te međufaznim pohranama zadržavaju se zalihe opasnih tvari. Način smanjivanja zaliha je blizina proizvodnje koja koristi sirovinu da ju nije potrebno skladištiti. Potrebno je prilagoditi kapacitet sirovina da se smanji potreba za pohranom. Otrovni plinovi poput klora i amonijaka te zapaljivi plinovi kao što su propan i etilen oksid mogu se pohraniti pod tlakom ili na atmosferskom tlaku u hladnim uvjetima. Ukoliko dođe do ispuštanja, iz spremnika na atmosferskom tlaku i pri hladnim uvjetima, manja količina opasnih tvari biti će ispuštena, nego iz spremnika pod tlakom. Ukoliko se za skladištenje koriste veliki spremnici, hlađenje je sigurnije dok kod malih spremnika rashladna oprema može biti izvor propuštanja. U manjim spremnicima sigurnije je skladištenje pod tlakom. [10]

Najgora katastrofa kemijske industrije dogodila se u Bhopalu, Indija, 1984. godine kada je iz spremnika, tvornice pesticida *Union Carbide India Ltd*, iscurila velika količina kemikalija (metil izocijanat). Kemikalije koje su iscurile nisu bile sirovine ili proizvod već međuproizvod koji se nalazio u međuprostoru koji je bio bitan, ali ne i prikladan za pohranu. Na slici 13. prikazani su ostaci tvornice nakon istjecanja kemikalija. [5]



Slika 13. Ostaci tvornice nakon istjecanja kemikalija

6. UVJETI SIGURNIJE PROVEDBE PROCESA

Samu sigurnost pri provedbi procesa možemo ostvariti provedbom procesa pri nižim temperaturama i tlakovima, odnosno korištenjem opasnog materijala pri manje opasnim uvjetima.

6.1. Tlak

Većina procesnih postrojenja radi pod tlakom manjim od 250 bar, dok neki procesi zahtjevaju rad pod visokim tlakom do oko 3 000 bar. [10] Proces s većim radnim pritiskom (veća energija) predstavlja veći rizik od kemijskih propuštanja, požara i eksplozije. Dizajner bi trebao birati kemijske putove s nižim tlakom. Utjecaj pritiska na inherentnu sigurnost procesa može se procijeniti pomoću procesnog tlaka, para tlaka i atmosferskog tlaka. Kao i kod većine pokazatelja, relativni rang je najčešći pristup za procjenu pritiska procesa. [5]

6.2. Temperatura

Problem provedbe procesa pri niskim i isto tako visokim temperaturama je podložnost opreme toplinskim rastezanjima, osobito pri pokretanju i zaustavljanju. Dizajneri procesa trebali bi pažljivo razmotriti problem rada pri ekstremnim uvjetima. Prigušenje će rezultirati sigurnijem postrojenju te se na taj način ne povećava količina opasnog materijala. Mogu se primjenjiti jeftiniji materijali prilikom gradnje, stijenke reaktora mogu biti tanje te nije potrebno dodavati zaštitnu opremu. [10]

ZAKLJUČAK

Inherentna sigurnost kao vrsta dizajna kojom se izbjegava potreba za opasnim materijalima ili upotreba u manjim količinama, pri nižim temperaturama i tlakovima ne zahtjeva dodatne razrađene sigurnosne sustave. To je vrsta dizajna koja ograničava pristup opasnim tvarima.

Sam koncept inherentne sigurnosti baziran je na trima najvećim opasnostima u procesnim postrojenjima, a to su požari, eksplozije te ispuštanje otrovnih tvari. Primjenom osnovnih načela inherentne sigurnosti, minimizacija, supstitucija, provođenje pri blažim uvjetima te pojednostavljenje osigurava se primarna i osnovna zaštita u procesnim postrojenjima.

Prilikom odabira tehnologije koja se smatra inherentno sigurnijom radi se usporedba sa drugim tehnologijama. Ovisno o vrsti opasnosti ili skupini opasnosti tehnologiju ćemo smatrati inherentno sigurnijom od druge u odnosu na neke opasnosti ili inherentno manje sigurnom.

Inherentna sigurnost je dizajn koji se temelji na procjeni i procesu odlučivanja te se u samu procjenu mora uzeti niz čimbenika kao što je utjecaj na stanovništvo i okoliš ali treba uzeti u obzir i tehničku te ekonomsku izvedivost.

POPIS SIMBOLA

TLV (*threshold limit value*) - granična vrijednost

GIO – granični indeks kisika

O_2 - Kisik

N_2 - Dušik

LITERATURA

- [1] The American Institute of Chemical Engineers, New York, Definition for Inherently Safer Technology in Production, Transportation, Storage, New York 2010.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Inherent_safety (pristup kolovoz 2018.)
- [3] Z. Abidin, M. Rusli, R. Buang, A. Shariff, A.M. Khan, Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2016)
- [4] Kletz, T.A., Chemistry and Industry, New York, 1978. str 287-292
- [5] Kletz, T., Amyotte, P., Process Plants, New York, 1998.
- [6] Heikkila, A.-M., Inherent Safety in Process Plant Design, Espoo (Finska) 1999.
- [7] <http://boris.kodmasin.net/sizop:temperaturapaljenja> (pristup kolovoz 2018.)
- [8] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vreli%C5%A1te> (pristup kolovoz 2018.)
- [9] Pavelić, Đ., Sigurnost, Zagreb 2015. str 263-266
- [10] Smith, R., Chemical Process Design and Integration, 2005. , str 625-632
- [11] https://www.carlroth.com/downloads/sdb/hr/K/SDB_KK40_HR_HR.pdf (pristup kolovoz 2018)
- [12] https://petrokemija.hr/Portals/0/Dokumenti_Kompanija/OtopinaAmonijaka25.pdf?ver=2017-10-11-151432-000 (pristup kolovoz 2018.)
- [13] https://www.carlroth.com/downloads/sdb/hr/7/SDB_7530_HR_HR.pdf (pristup kolovoz 2018.)
- [14] <https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/401408.pdf> (pristup kolovoz 2018.)

- [15] <http://www.hvz.hr/granice-eksplozivnosti-zapaljivih-plinova-tekucina/> (pristup kolovoz 2018.)
- [16] Karasalihović Sedlar, D., Gospodarenje plinovima, Zagreb 2010.
- [17] <http://www.kemosan.hr/sites/default/files/datoteke/03-8017x-stl-hr-n-20121210-aceton.pdf> (pristup kolovoz 2018.)
- [18] http://www.messer.hr/sheet/STL-Amonijak_-odobreno_05-09_Chemogas.pdf (pristup kolovoz 2018.)
- [19] Beloš, M., Dodaci za smanjenje gorivosti polimernih materijala, Završni rad
- [20] Sertić-Bionda, K., Procesi prerade nafte, Interna skripta
- [21] http://www.ex-agencija.hr/wp-content/uploads/2015/02/III.-c.-Markovic-Mackovic-_radno.pdf (pristup kolovoz 2018.)
- [22] Achillides, S., Gecelovska, D., Opasnosti od eksplozija, Njemačka 2010

