

# TOPLINSKI UČINCI I TRAGOVI DJELOVANJA POŽARA I/ILI EKSPLOZIJA U ZATVORENOM PROSTORU

---

**Premuž, Milan**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:631131>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite  
Stručni diplomski studij Sigurnost i zaštita

Milan Premuž

**TOPLINSKI UČINCI I TRAGOV  
DJELOVANJA POŽARA I /ILI  
EKSPLOZIJA U ZATVORENOM  
PROSTORU**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2024.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional graduate study of Safety and Protection

Milan Premuž

**HEAT EFFECTS AND TRACES OF FIRE  
AND/OR EXPLOSION IN CLOSED  
SPACE**

MASTER THESIS

Karlovac, 2024

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite  
Stručni diplomski studij Sigurnost i zaštita

Milan Premuž

**TOPLINSKI UČINCI I TRAGOV  
DJELOVANJA POŽARA I /ILI  
EKSPLOZIJA U ZATVORENOM  
PROSTORU**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Lidija Jakšić, mag. ing. cheming., pred.

Karlovac, 2024.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni prijediplomski/**stručni diplomski studij**: Sigurnost i zaštita

Usmjerenje: Zaštita od požara

Karlovac, 2024.

### ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Student: Milan Premuž

Matični broj: 0296014460

Naslov: TOPLINSKI UČINCI I TRAGOVI DJELOVANJA POŽARA I/ILI EKSPLOZIJA U ZATVORENOM PROSTORU

Opis zadatka:

U radu će se navesti osnove požara u zatvorenom prostoru, te će se detaljno objasniti utjecaji temperature i topline prilikom požara i znakoviti tragovi djelovanja topline ili eksplozije u zatvorenom prostoru.

Zadatak zadan:

Rujan 2023.

Rok predaje rada:

Rujan 2024.

Predviđeni datum obrane:

Rujan 2024.

Mentor:

Lidija Jakšić, mag. ing. cheming., pred.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **PREDGOVOR**

*Zahvaljujem mentorici pred Lidiji Jakšić na predloženoj temi, stručnom vodstvu, korisnim savjetima i velikodušnoj pomoći pri izvođenju i pisanju diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se i ostalim profesorima na susretljivosti i pruženoj pomoći te na uloženom vremenu prilikom mog školovanja.*

*Na kraju, zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i podršci, prijateljima, kolegama i svima koji su obilježili moje školovanje.*

## SAŽETAK

Svaki požar predstavlja nekontroliranu i nepredvidivu pojavu. Kad je vatra u zatvorenom prostoru, opasnost se povećava jer vatra ne može slobodno rasti i izmjenjivati energiju s okolinom. Toplina i dim se ne odvođe na odgovarajući način, smanjuje se količina kisika, počinju se stvarati opasne tvari koje se mogu zapaliti. Razumijevanje učinaka topline, tragova vatre i eksploziva u zatvorenim prostorima ključno je za razotkrivanje uzroka incidenata. Učinci topline mogu iza sebe ostaviti jasne tragove koji nude dragocjene uvide u okolnosti požara ili eksplozije. Tragovi vatre i eksploziva daju forenzičkim stručnjacima ključne dokaze za spajanje događaja koji su doveli do incidenta. Ovaj se rad daje pregled mogućih toplinskih učinaka te interakcije topline s različitim okruženjima, identifikacijom ostataka i implikacijama za istraživanja uzroka i okolnosti nastanka požara u zatvorenim prostorima.

Ključne riječi: požar, zatvoreni prostor, temperature, toplina, eksplozija

## **ABSTRACT**

Every fire is an uncontrolled and unpredictable phenomenon. When a fire is in a closed space, the danger increases because the fire cannot grow freely and exchange energy with the environment. Heat and smoke are not removed adequately, the amount of oxygen decreases, and dangerous substances that can ignite begin to form. Understanding the effects of heat, traces of fire and explosives in closed and semi-open spaces is essential to unraveling the causes of incidents. The effects of heat can leave behind clear clues that offer valuable insights into the circumstances of a fire or explosion. Traces of fire and explosives provide forensic experts with key evidence to piece together the events that led to the incident. This paper provides an overview of possible thermal effects and the interaction of heat with different environments, identification of remains, and implications for research into the causes and circumstances of fires in closed and semi-open spaces.

Key words: fire, closed downtime, temperature, heat, explosion



## SADRŽAJ

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA.....	I
PREDGOVOR .....	II
SAŽETAK .....	III
ABSTRACT.....	IV
1. UVOD.....	1
1.1. Predmet i cilj rada .....	2
1.2. Izvor podataka i metoda prikupljanja.....	2
2. OSNOVE POŽARA U ZATVORENIM PROSTORIMA .....	3
2.1. Razvoj požara.....	3
2.1.1. Početna faza.....	4
2.1.2. Faza razvoja.....	5
2.1.3. Razbuktna faza.....	5
2.1.4. Faza gašenja.....	5
2.2. Specifične pojave pri gašenju požara u zatvorenom prostoru.....	6
2.3. Čimbenici koji utječu na razvoj i širenje požara zatvorenog prostora .....	7
2.4. Brzo razvijanje požara.....	8
3. UTJECAJ TOPLINE I TEMPERATURE PRILIKOM POŽARA.....	9
3.1. Toplinska obilježja građevinskih konstrukcijskih materijala.....	10
3.2. Toplinska vodljivost materijala ( $\lambda$ ) .....	10
3.2.1. Koeficijent toplinske vodljivosti $k$ .....	13
3.2.2. Koeficijent prelaska topline.....	14
3.2.3. Koeficijent toplinske vodljivosti za materijale .....	15
3.3. Toplinski kapacitet materijala ( $C_p$ ).....	16
3.4. Toplinska difuzivnost materijala ( $\alpha$ ) .....	17
3.5. Toplinska inercija materijala ( $e$ ) .....	18
3.6. Toplinsko rastezanje materijala ( $\Delta l$ ) .....	19
4. EKSPLOZIJA .....	21
4.1. Uzroci eksplozije.....	22
4.2. Vrste eksplozije .....	22
4.1.1. Fizičke eksplozije .....	23
4.1.2. Kemijske eksplozije.....	23
4.1.3. Atomske eksplozije.....	23

4.3. Klasifikacijska zona opasnosti .....	23
4.3.1. Kontrolna lista za procjenu rizika (prepoznavanje opasnosti).....	25
4.4. Mjere provođenje za smanjenje rizika .....	26
4.4.1. Preventivne mjere .....	26
4.4.2. Organizacijske mjere .....	28
4.4.3. Protueksplozivne mjere .....	30
4.4.5. Protueksplozijski odušak .....	31
4.4.6. Suzbijanje eksplozije .....	31
4.4.7. Izoliranje eksplozije.....	31
4.4.8. Dokumentacija zaštite od eksplozija .....	32
5. ZNAKOVITI TRAGOVI PRILIKOM ISTRAŽIVANJA UZROKA POŽARA U ZATVORENIM PROSTORIMA .....	33
5.1. Tragovi čađe u obliku slova „V“ i „U“ .....	33
5.2. Čađavi vijenac .....	35
5.3. Tragovi uzrokovani gorivim tekućinama i kapljevinaama .....	36
5. 4. Tragovi na staklu.....	37
5. 5. Preopterećenost vođića.....	39
5.6. Tragovi topljenja nakon elektroničkog izboja.....	41
5. 7. Tragovi karbonizacije na životinjama .....	42
7. 8. Tragovi na negorivom materijalu - beton i žbuka .....	42
5. 9. Karbonizacija na drvetu .....	44
6. ZAKLJUČAK .....	47
7. LITERATURA .....	49
8. PRILOZI .....	52
8.1. Popis slika .....	52
8.2. Popis tablica .....	53

## 1. UVOD

Tema ovoga diplomskog rada naziva se Toplinski učinci i tragovi djelovanja požara i/ili eksplozija, istražno znakoviti tragovi požara i eksplozija u zatvorenom prostoru. Diplomski rad podijeljen je u pet zasebnih cjelina koji obrađuju navedenu tematiku.

U prvome dijelu ovoga diplomskog rada obradit će se pojam požara te se posebna pozornost posvetiti požarima u zatvorenim prostorima. Također, u ovome dijelu će se pojasniti i faze razvoja požara koje se odnose na: početnu fazu, fazu razvoja, razbuktalu fazu i fazu gašenja. Čimbenici koji utječu na razvoj i širenje požara u zatvorenom prostoru te specifične pojave koje se javljaju pri gašenju istoga također su dio tematike ovoga dijela završnoga rada.

Drugi dio ovoga diplomskog rada govorit će o utjecaju topline i temperature koji nastaju prilikom požara. Tu će biti riječ o toplinskim obilježjima građevinskih konstrukcijskih materijala, toplinskom kapacitetu materijala, toplinskoj difuzivnosti materijala, toplinskoj inerciji materijala, te o toplinskom rastezanju materijala.

U trećem dijelu ovoga diplomskog rada bit će riječ o eksploziji i njezinim uzrocima. Eksplozija je ekstremno brza kemijska reakcija praćena praskom, oslobađanjem velike količine topline i naglim povećanjem volumena zbog stvaranja plinovitih proizvoda. [1] Vrste eksplozije kao što su fizička, kemijska i atomska bit će detaljno objašnjene u ovome dijelu završnoga rada.

Prilikom dolaska na mjesto događaja potrebno je obaviti vizualni pregled s pomoću kojeg je potrebno utvrditi termička oštećenja s unutarnje i vanjske strane objekta te se na taj način utvrđuju znakoviti tragovi uzroka požara zatvorenog prostora, a neki od njih su: tragovi čađe na stijenkama u obliku slova "V" i "U", tragovi čađave krune na vanjskom otvoru objekata, tragovi na staklu, tragovi preopterećenja vodiča, tragovi zapaljivih tekućina, tragovi taljenja vodiča tijekom stvaranje lukova, karbonizacija kod životinja (glodavaca) i otisci stopala na nezapaljivom materijalu (gips, beton), – pougljenje na drvu. Navedena tematika obradit će se u petom dijelu ovoga završnoga rada.

## **1.1. Predmet i cilj rada**

Predmet i cilj ovoga rada je navesti obilježja požara i eksplozija u zatvorenim i poluzatvorenim prostorima te istražiti koje toplinske učinke i tragove ostavljaju prilikom izgaranja. U radu će biti navedeni istražno znakoviti tragovi požara i eksplozija u zatvorenim prostorima.

## **1.2. Izvor podataka i metoda prikupljanja**

Prilikom izrade ovoga rada korišteno je više izvora s pomoću kojih se prikupljala stručna literatura. Najviše izvora podataka pronađeno je putem knjiga koje obrađuju tematiku završnoga rada te literatura koja se nalazi na internetskim stranicama.

## **2. OSNOVE POŽARA U ZATVORENIM PROSTORIMA**

Požar je svako nekontrolirano gorenje koje uzrokuje ili bi moglo uzrokovati ozljede osoba ili materijalnu štetu. U principu, svaki požar uzrokuje štetu. No opseg i intenzitet štete na ljudima i imovini uvelike varira ovisno o tome gdje se požar dogodi. Ako požar izbije na otvorenom prostoru, opasnost i stupanj štete ne mogu se usporediti s požarima u kućanstvima i zatvorenim prostorima općenito. Iako je materijalna šteta uzrokovana velikim šumskim požarima golema, ne može se usporediti s gubitkom ljudskih života [1].

Požari stambenih zgrada klasificiraju se kao požari zatvorenih prostora i mogu se svrstati u područja male ili srednje požarne težine na temelju nepožarnog opterećenja, ovisno o vrsti zgrade. Što se tiče protupožarne zaštite, stambene zgrade se načelno mogu svrstati u razred A, jer se drvo još uvijek uglavnom koristi za izradu namještaja. Međutim, sve veći broj drugih klasa tvari može se naći u stambenoj gradnji. Umjetni materijali (uglavnom plastika) proizvode mnoge otrovne spojeve kada se spaljuju, što predstavlja veliku opasnost. Takvim tvarima najviše su pogođeni korisnici prostora [2]. Statistike dokazuju da je više smrtnih slučajeva od požara u zatvorenom prostoru uzrokovano trovanjem otrovnim spojevima nego opeklinama. Sljedeći problem koji postoji kod požara u zatvorenim prostorima je nedostatak kisika za potpuno izgaranje. Produkti izgaranja nastali izgaranjem tvari u okolišu s nedostatkom kisika puno su opasniji od onih nastalih potpunim izgaranjem. Najjednostavniji primjer je izgaranje ugljika, pri izgaranju ugljika nastaju, ovisno o količini kisika, dva spoja. Prvi je ugljikov dioksid, koji je nezapaljiv i netoksičan. Koristi se kao sredstvo za gašenje požara. Drugi spoj je ugljikov monoksid, koji je zapaljiv i vrlo otrovan plin.

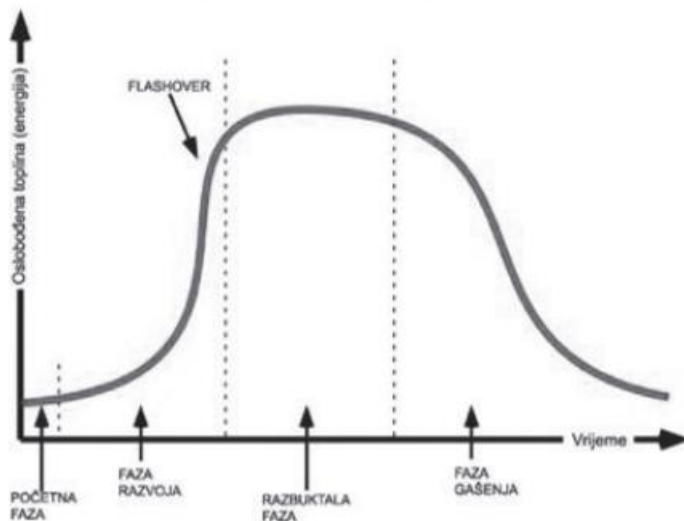
### **2.1. Razvoj požara**

U odnosu na razvoj i širenje požara u otvorenom prostoru, razvoj i širenje istog u požarnom sektoru predstavlja puno složeniji proces. Kada je riječ o požarnom sektoru pod njega spada dio građevine više njenih dijelova ili čak jedna cijela građevina na kojoj u nekom određenom vremenu dolazi do ograničenja požara. Količina goriva odnosno gorivnog materijala i količina kisika koja može pritjecati u prostor imaju najveći utjecaj na razvoj i širenje požara. U slučaju ograničenog

gorivnog materijala, koristi se izraz da je požar kontroliran gorivom, a u slučaju ograničenog pritjecanja kisika, kaže se da je požar kontroliran pomoću ventilacije.

Tijek požara u zatvorenoj prostoriji može se podijeliti u četiri faze (Slika 1.):

- početna faza,
- faza razvoja,
- razbuktala faza,
- faza gašenja [3].



Slika 1. Faze razvoja požara [4]

### 2.1.1. Početna faza

U principu, početna faza požara može trajati nekoliko minuta. To ovisi o vrsti goriva i protoku zraka u zonu izgaranja. Bilo je i slučajeva da je požar trajao satima, ali je zbog svojih karakteristika (brzina razvoja, porast temperature) stalno bio u početnoj fazi. To znači da ako se svježem zraku onemogućí ulazak u prostoriju u kojoj gori, plamen može gorjeti satima zbog nedostatka kisika koji apsorbira iz zraka. Poznato je da zapaljive tekućine i plinovi pod određenim

uvjetima postižu svoj maksimalni intenzitet izgaranja u kratkom vremenu, pa je na analogan način i početna faza kratkotrajna. U početnoj fazi temperatura je relativno niska i požar ima mali volumen. Neki predmeti se zapale dok se pritisak u prostoriji povećava. Zona dimljenja može biti relativno mala, ali je obično nekoliko puta veća od zone izgaranja. Veličina zone dima obično ovisi o protoku zraka [5].

#### 2.1.2. Faza razvoja

Tijekom ove faze, temperatura raste i količina topline se povećava, uzrokujući da plamen obavija sve više i više goriva. Nadtlak u prostoriji često dovodi do pukotina na staklenim površinama. Pristup svježeg zraka stvara uvjete za brži razvoj požara. Temperatura još nije dosegla maksimalnu vrijednost. U principu, razvojna faza traje od nekoliko minuta do nekoliko desetaka minuta i temperatura se stalno povećava dok ne postigne maksimalnu vrijednost [5].

#### 2.1.3. Razbukta faza

U ovoj fazi vatra se širi i preostali zapaljivi materijal zahvaća. Na mjestu izbijanja požara gorjelo je gorivo. Temperatura doseže maksimalnu vrijednost i, prema empirijskim podacima, kreće se između 650 i 1000 °C u stambenim područjima. Uzimajući u obzir stupanj vatrootpornosti, postoji opasnost od popuštanja manje otpornih građevinskih konstrukcija. Faza paljenja može trajati dugo, odnosno sve dok je dostupan odgovarajući materijal za gorivo. Faza paljenja je intenzivnija kada u zonu izgaranja ulazi dovoljno zraka. Izgaranje u fazi izgaranja prati stvaranje velike količine produkata izgaranja, koji su usko povezani s nastankom plamena. Ako su zadovoljeni uvjeti ventilacije, tj. ako u prostoriju ulazi dovoljno zraka, može doći do flashovera ili ako prostorija ima manjak svježeg zraka, požar u toj prostoriji može kulminirati povlačenjem [5].

#### 2.1.4. Faza gašenja

Količina zapaljivog materijala s vremenom se smanjuje i temperatura počinje padati. Kada se sredstvo za gašenje unese u zonu gorenja, pad temperature je vidljiviji. Krivulja standardnog napredovanja požara opada ovisno o količini goriva ili početku gašenja.[5]

## 2.2. Specifične pojave pri gašenju požara u zatvorenom prostoru

Potrebno je obratiti pozornost na određene pojave prilikom gašenja požara, odnosno potrebno je obratiti pozornost na opasnosti koje mogu nastati tijekom požara. A te opasnosti su su karakteristične za požare koji su nastali u zatvorenim prostorima:

- površinsko buknuće (flameover)/podstropno valjanje plamena (rollover),
- trenutno prostorno buknuće (flashover),
- temperaturno raslojavanje vrućih požarnih plinova,
- povratno prostorno buknuće (backdraft) [6].

Podkrovno površinsko/kotrljajuće plameno paljenje je pojava u kojoj vatreni jezici izbijaju tijekom požara i kreću se kroz sloj vrućih plinova i događa se u fazi prije nego što se dogodi prostorno buknuće, to jest ako uopće nije zahvaćen zapaljivi materijal u prostoriji. Nastaje kada se vrući plinovi nastali tijekom pirolize dignu u zrak i zajedno s njima zapale plamen. Zbog toga se u drugoj sobi počinju pojavljivati vatreni jezici - kovitlac plamena sa stropa. Trenutačno prostorno buknuće je iznenadno sagorijevanje njegovog zapaljivog materijala u požaru u ventiliranoj prostoriji. Javlja se na prijelomnoj točki između faze razvoja vatre i faze ljutnje. U početnim fazama požara materijal se zagrijava i tada počinje ispuštati zapaljive plinove. Trenutna prostorna eksplozija događa se kada se površine zapaljivog materijala zagriju do temperature samozapaljenja i kada se plinovi koji izlaze iz materijala zapale. Kada se vrući proizvodi pirolize nakupe u prostoriji i zagriju okolni materijal na više od 500°C, dolazi do trenutnog buknuća u prostojiri. Povratni tok je možda najopasniji fenomen koji se može dogoditi tijekom požara u zatvorenom prostoru. Nastaje kada se vatra guši u prostoriji bez ventilacije, odnosno kada je gotovo sav kisik potrošen, a temperatura plinova je još vrlo visoka, tj. iznad točke samozapaljenja. Nagli ulazak svježeg zraka u prostoriju (razbijanje stakla, otvaranje vrata) dovodi do naglog eksplozivnog paljenja plinova. Prije ulaska potražite znakove koji ukazuju na povratno prostorno buknuće, poput vruće kvake, dima ispod vrata ili zadimljene prostorije. Vrlo je opasno za vatrogasce ako se ne poduzmu potrebne mjere opreza, kao što su: cijevi pune vode i mlaznice dizajnirane za raspršivanje vode i polagano otvaranje vrata mogu biti vrlo smrtonosni [4].



### 2.3. Čimbenici koji utječu na razvoj i širenje požara zatvorenog prostora

Tijekom razvoja požara, od paljenja (početna faza) do točke gorenja (faza gašenja), nekoliko čimbenika utječe na njegovo "ponašanje", a to su:

- Veličina, broj i raspored otvora. Na veličinu otvora utječe Površina zahvaćena požarom
- Visina stropa.
- Izolacijska svojstva pregradnih elemenata
- Količina, sastav i raspored gorivih materijala od kojih je požar nastao.
- Prisutnost i raspored gorivih materijala (potencijalno zapaljivih materijala) preko kojih se požar može proširiti [5].

Da bi se vatra nakon paljenja (početni stadij) u potpunosti razvila, najprije je potrebna dovoljna količina zraka (kisika) kako bi se proces izgaranja odvijao neometano. Veličina i broj otvora u požarnom prostoru određuju kako i koliko brzo se požar širi. Veličina i oblik prostorije te visina stropa utječu na stvaranje sloja vrućeg plina za vatru. Mjesto na kojem se zapaljivi materijal zapali faktor je u kojem se stvara vrući sloj požarnih plinova.

Prilikom izgaranja ogrjevnog materijala koji se nalazi u sredini prostorije, plamen "upija" veliku količinu okolnog hladnijeg zraka za potrebe samog procesa izgaranja, tako da je toplina u tom prostoru znatno niža nego u prostoru bliže zidovima ili u kutovima sobe. Porast temperature u požarom zahvaćenom području izravno je povezan s energijom oslobođenom izgaranjem. Vatrogasci moraju pravovremeno identificirati vrste goriva uključenih u požar kako bi tim saznanjem mogli spriječiti potencijalnu opasnost od širenja požara unutar zgrade i okolnih objekata i prostora. Predmeti izrađeni od materijala s visokim toplinskim kapacitetom, poput sintetičkog tapeciranog namještaja ili madraca od sintetičkih materijala ili drvenih obloga, gorjet će puno brže od predmeta izrađenih od materijala s niskim toplinskim kapacitetom ako se zapale.

Općenito, materijali manje gustoće (poliuretanska pjena) gore mnogo brže od materijala veće gustoće (prirodno, pamučno platno) kada se radi o materijalima slične namjene. Čimbenik koji utječe na paljenje zapaljivog materijala koji u početku nije bio zahvaćen požarom jer se nije nalazio u blizini objekata na kojima je požar nastao je energija nastala u procesu izgaranja. U sva tri oblika prijenosa topline, ova energija, nastala izgaranjem materijala koji su izazvali požar,

prenosi se na sve zapaljive materijale u prostoriji koji još nisu bili zahvaćeni požarom. Toplina se prenosi na zapaljivi predmet konvekcijom kroz plamene jezike. Kondukcija je način na koji se toplina prenosi na zapaljive materijale kroz vruće plinove iz vatre koji cirkuliraju prostorijom. Prijenos topline zračenjem najvažniji je čimbenik prijelaza požara iz početne faze u fazu gašenja. Formirajući sloj vrućih požarnih plinova uz strop prostorije, čestice vrućeg dima zračenjem prenose toplinsku energiju na sav zapaljivi materijal izložen tom zračenju. Gorivi materijal koji u početku nije bio zahvaćen požarom naziva se potencijalno zapaljivim materijalom. Kako se količina energije prenesena zračenjem povećava, počinje piroliza potencijalno zapaljivog materijala, pri čemu se oslobađaju zapaljivi plinovi [5].

## **2.4. Brzo razvijanje požara**

Tijekom razvoja požara zatvorenog prostora mogu se pojaviti drugačije pojave nego kod požara otvorenog prostora. Zbog akumulacije topline i dima te loše evakuacije izvana zgrade, vatrogasci se uz smanjenu vidljivost i povišene temperature okoline mogu susresti i sa zapaljivom mješavinom produkata izgaranja i zraka. Ova se smjesa najčešće zapali tijekom stadija tinjanja i razvoja. Ovi fenomeni su međunarodno poznati kao "flashover" i "eksplozija proizvoda izgaranja (Backdraught, Backdraft)". Promatranje i definiranje ovih fenomena započelo je šezdesetih godina prošlog stoljeća. Izraz "flashover" skovao je britanski znanstvenik P.H. Thomas kako bi opisao trenutak kada požar dosegne fazu razbukatavnja (bljesak; posvuda). Ova definicija se mijenjala tijekom godina i današnji kontekst je potpuno drugačiji od izvorne definicije [5].

### 3. UTJECAJ TOPLINE I TEMPERATURE PRILIKOM POŽARA

Toplina je oblik energije koji je izravno povezan s kretanjem atoma i molekula. Kada se dodiruju dva tijela i jedno tijelo je toplije od drugog tijela, s vremenom se hladnije tijelo zagrijava, a toplije hladi, što se nastavlja sve dok se razine zagrijavanja obaju tijela ne izjednače. Tako se međusobno uravnotežuju. To znači da toplina putuje od najtoplijeg tijela do najhladnijeg tijela sve dok se tjelesne temperature ne uravnoteže. Da bi toplina prešla s jednog mjesta na drugo ili s jednog tijela na drugo, mora postojati temperaturna razlika između tih mjesta ili tijela. Prijelaz topline važan je fenomen na koji vatrogasci često moraju pravovremeno reagirati. Prijenos topline može se dogoditi na tri načina:

- vođenjem ili kondukcijom (prolaz topline kroz krute tvari poput pegle),
- strujanjem ili konvekcijom (prijelaz topline pomoću tekućine ili zraka),
- zračenjem ili radijacijom (prijelaz topline putem toplinskih zraka, npr. žarulja) [7].

Temperatura je stupanj do kojeg se tijelo zagrijava, a prikazuje se kretanjem čestica, odnosno atomskih molekula koje sadrži. Temperatura je mjera toplinskog stanja tvari. Temperatura samozapaljenja je temperatura do koje se tvar mora zagrijati u prisutnosti zraka da bi se zapalila bez vanjskog izvora paljenja. Temperatura paljenja je najniža temperatura tvari pri kojoj se ta tvar zapali uslijed djelovanja toplinske energije. Temperatura paljenja može se postići na različite načine. Ove vrste stvaranja topline nazivaju se uzrocima požara i mogu biti toplinske, kemijske, električne i mehaničke prirode. Toplinski uzroci požara mogu biti uzrokovani izravnim kontaktom i eksplozijom, kemijski uzroci požara mogu biti uzrokovani kemijskim reakcijama samo zagrijavanjem i samozapaljenjem, električni uzroci požara mogu biti uzrokovani električnom strujom, statičkim elektricitetom i gromom, dok mehanički uzroci požara mogu biti uzrokovani trenjem, udarcem i pritiskom mogu izazvati požar [7].

### 3.1. Toplinska obilježja građevinskih konstrukcijskih materijala

Ključan utjecaj na vrste i razine vatrootpornog ponašanja materijala konstrukcijskih elemenata i cijelih konstrukcija u uvjetima požara imaju svojstva:

- njihove toplinske vodljivosti,
- njihova specifičnog toplinskog kapaciteta,
- njihove toplinske difuzivnosti,
- njihove toplinske inercije,
- toplinskog rastezanja (širenje, dilatacija) materijala pod utjecajem topline požara [8].

### 3.2. Toplinska vodljivost materijala ( $\lambda$ )

Toplinska vodljivost ili Lambada (oznaka:  $\lambda$ ) je fizikalna veličina koja opisuje kako toplina prolazi kroz tvari. Dakle, to je količina topline koja se prenese u jedinici vremena, pri standardnim uvjetima u smjeru okomitom na površinu, pri razlici temperatura od 1 K (jedinica za toplinsku vodljivost je W/mK – vat po kelvinu i metru) [9].

Formula za izračunavanje toplinske vodljivosti materijala je:

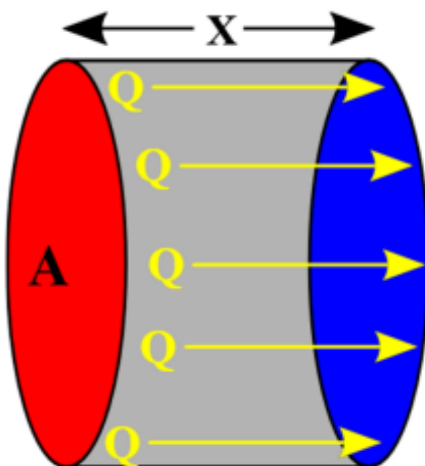
$$\lambda = (Q \times l) / (S \times t \times \Delta T) \quad (1)$$

gdje je:

- Q – toplina
- l – duljina vodiča
- S – ploština presjeka toplinskoga vodiča okomita na smjer širenja topline
- t – vrijeme vođenja topline
- $\Delta T$  – razlika temperature na krajevima toplinskog vodiča [11].

U građevinskim materijalima moguća su do tri različita mehanizma izmjene energije (topline), koji su već spomenuti. Budući da je toplinska vodljivost materijala usko povezana s mehanizmima izmjene energije, sljedeći tekst opisuje kako se to događa.

Mehanizam provođenja topline kroz vibracije atoma i molekula čvrste tvari (kondukcija) može se opisati kao sposobnost izmjene topline provođenjem kroz čvrstu tvar, što ovisi o prirodi veza između atoma i molekula ovog materijala. supstanca, shematski prikazana na slici 2.



Slika 2. Linearni tok topline kod provođenja ili kondukcije topline [9]

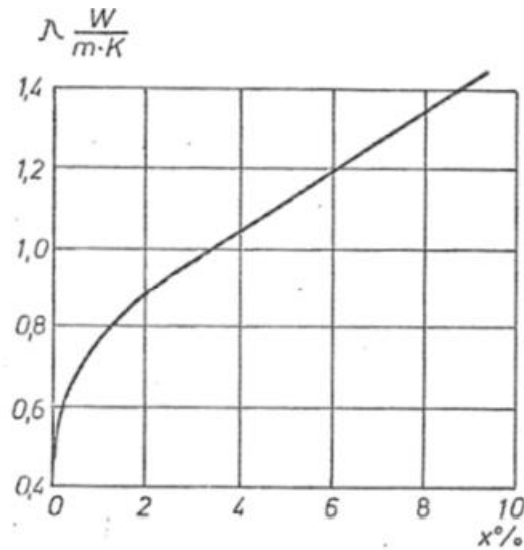
$Q$  – količina topline,  $A$  – površina presjeka,  $x$  – udaljenost među krajevima

Prolaz topline kroz materijalne strukture u kojima su navedene čestice povezane jačim vezama bolji je nego kod onih sa slabije povezanim česticama, jer je frekvencija titranja atoma ili molekula s jačim međusobnim vezama veća, a time i brzina međusobne izmjene energije. je također veći. Ta se energija izmjenjuje kroz masu materijala preko elastičnih valova vrlo visoke frekvencije (mogu se usporediti sa zvučnim valovima kroz materiju, ali je njihova valna frekvencija mnogo veća). Kvant energije mehaničkih vibracija koji se prenosi s jedne čestice na drugu tijekom gibanja vala kroz materijal naziva se fonon.

Ovaj proces izmjene energije prevladava u izolacijskim materijalima, dok je u dobrim vodičima topline (primjerice metalima) određen istiskivanjem i kretanjem dijela elektrona iz

elektroničke ljuske atoma iz dijelova tvari. s višom temperaturom. prema dijelovima tkanine s najnižom temperaturom. Zbog toga toplinska izolacijska svojstva pojedinih vrsta materijala proizlaze upravo iz sudara između fonona (fonon-fonon) ili iz sudara između fononsko-kristalnih rešetkastih struktura. S porastom temperature povećava se i broj međudjelovanja među fotonima, što dovodi do porasta toplinskog otpora, pa toplinska vodljivost (prohodnost) materijala opada ili njegov inicijalno brži rast postaje brži ili postupno stagnira. Budući da je većina građevnih materijala polikristalne prirode (sadrže više od jedne vrste kristalne strukture molekula materije) i budući da su fononi raspoređeni na granicama kristala i na rubovima šupljina u građevnom bloku, takvi materijali pokazuju slabiji otpor. fononska vodljivost kao oni napravljeni od jedne vrste kristala. U staklu (amorfnom materijalu) dominira proces raspršenja fonona: toplinska vodljivost ne ovisi o temperature [10].

U mehanizmu provođenja topline, zbog prijenosa mase tvari protokom topline (konvekcijom) kroz plinove, pare i tekućine prisutne u materijalu, važna je izvedba izmjene topline toplinskim ili protočnim učinkom. Mehanizam se temelji na prisutnosti pora u strukturi čvrstih materijalnih struktura koje su ispunjene zarobljenim plinovima (npr. zrakom) ili tekućinama (npr. vodom). Doprinos ove vrste vodljivosti fluida ukupnoj toplinskoj vodljivosti je umjeren u usporedbi s komponentom zračenja za porozne ili vlaknasteizolacijske materijale. Mehanizam provođenja topline emitiranjem toplinskog zračenja događa se i unutar struktura čvrstih tvari, pa se to zračenje raspoređuje u sve postojeće nesavršenosti u strukturi tih tvari (primjerice, u granicama kristala i površinskim porama čvrste strukture). U strukturama izrađenim od vrlo poroznih materijala ovaj je mehanizam vrlo utjecajan na temperaturama iznad 500 °C. Za neporozne čvrste vrste, ova vrsta izmjene topline postaje utjecajna na temperaturama od 1000 °C ili višim.[6] Važno je uzeti u obzir čimbenike koji utječu na vodljivost materijala: temperaturu, gustoću i sadržaj vlage. Na primjer, utjecaj vlažnosti može se opisati činjenicom da voda (vlaga) istiskuje zrak iz pora građevinskog materijala i time povećava njegovu toplinsku vodljivost, budući da je voda bolji vodič topline od zraka. Što je više zračnih šupljina unutar mase materijala ispunjeno vodom (vlagom), to je veća vrijednost ukupne toplinske vodljivosti materijala. Navedeno je prikazano na slici 3. Stoga se ukupna vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti građevinskog materijala značajno mijenja kako se vlaži ili zagrijava i suši [11].



Slika 3. Prikaz ovisnosti toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [11]

### 3.2.1. Koficijent toplinske vodljivosti $k$

Zakon provođenja topline, koji se naziva i Fourierov zakon, kaže da je vremenska frekvencija (tj. brzina) prijenosa topline kroz materijal proporcionalna negativnom temperaturnom gradijentu i pravokutnoj površini s tim gradijentom kroz koji teče toplina:

$$(\partial Q / \partial t) = (-k\lambda_s \Delta T \cdot dS) \quad (2)$$

gdje je:

$Q$  - količina prenesene topline (J/s = W),,

$t$  - proteklo vrijeme (s),

$k$  - koeficijent toplinske vodljivosti

(W/mK) (ovaj se faktor općenito mijenja s temperaturom, ali za neke materijale promjena može biti mala u značajnom temperaturnom rasponu).

S - površina kroz koju teče toplina (m<sup>2</sup>),

T - temperatura (K).

Kada se gornja diferencijalna jednačba integrira u jednostavne linearne situacije i kada je temperatura ravnomjerno raspoređena na jednake površine savršeno izoliranih strana, brzina protoka topline između krajeva površine dana je kao :

$$(\Delta Q/\Delta t) = [-kA (\Delta T / \Delta x)] \quad (3)$$

gdje je:

A - površina presječenog područja (m<sup>2</sup>),

$\Delta T$ - temperaturna razlika između krajeva (K),

$\Delta x$ - udaljenost među krajevima (m). [12]

### 3.2.2. Koeficijent prelaska topline

Koeficijent prolaska topline U [W/(m<sup>2</sup> K)]iznosi: [13]

$$U = k/\Delta x \quad (4)$$

Fourierov zakon se može isto izraziti kao:

$$(\Delta Q / \Delta t) = UA (- \Delta T) \quad (5)$$

$$(\Delta Q/ \Delta t) = UA (-\Delta T) \quad (6)$$

Suprotna vrijednost koeficijetu prolaska topline je toplinski otpor, za kojeg vrijedi:

$$R = (1/U) = (\Delta X/k) = [(A(-\Delta T) / (\Delta Q/\Delta t))] \quad (7)$$



Toplinski otpor se koristi ako toplina prolazi kroz više slojeva materijalarazličitih fizikalnih svojstava. Tada vrijedi:

$$(1/U) = (1/U_1) + (1/U_2) + (1/U_3) + \dots \quad (8)$$

Fourierov zakon za višeslojnu toplinsku izolaciju je:

$$(\Delta Q/\Delta t) = [A (-\Delta T)] / [ (\Delta x_1/k_1) + (\Delta x_2/k_2) + (\Delta x_3/k_3) + \dots ] \quad (9)$$

### 3.2.3. Koeficijent toplinske vodljivosti za materijale

U tablici 1. bit će prikazani koeficijenti toplinske vodljivosti za pojedine materijale.

Tablica 1. Koeficijent toplinske vodljivosti materijala [14]

<b>Materijal</b>	<b>Koeficijent toplinske vodljivosti k [W/mxk]</b>
Silicijev aerogel	0,004-0,04
Drveni ugljen	0,02
Zrak	0,025
Poliuretanska pjena	0,025-0,035
Stiropor	0,035-0,040
Drvo	0,04-0,4
Mineralna vuna	0,042
Alkoholi i ulja	0,1 i 0,21
Polipropilen	0,25
Mineralna ulja	0,138
Guma	0,16
Ukapljeni naftni plin	0,23-0,26
Cement, Portland	0,29
Epoksi smola (sa silicijem)	0,3
Epoksi smola (bez silicija)	0,12 - 0,177
Voda (tekuća)	0,6
Toplinska mast	0,7-3
Toplinska epoksi smola	1-7
Staklo	1,1
Tlo	1,5
Beton, kamen	1,7

Led (voda)	2
Pješčenjak	2,4
Živa	8,3
Nehrđajući čelik	12,11 ~ 45,0
Olovo	35,3
Aluminij	237 (čisti) 120-180 (legura)
Zlato	318
Bakar	401
Srebro	429
Dijamant	900-2320
Grafen	(4840 ± 440) - (5300 ± 480)

### 3.3. Toplinski kapacitet materijala (Cp)

Količina toplinske energije potrebna za zagrijavanje 1 kilograma tvari za jedan stupanj Kelvina (K) naziva se toplinski kapacitet materijala. Mjerna jedinica je džul po kelvinu (J/K).[15]

Formula za izračunavanje toplinskog kapaciteta materijala je:

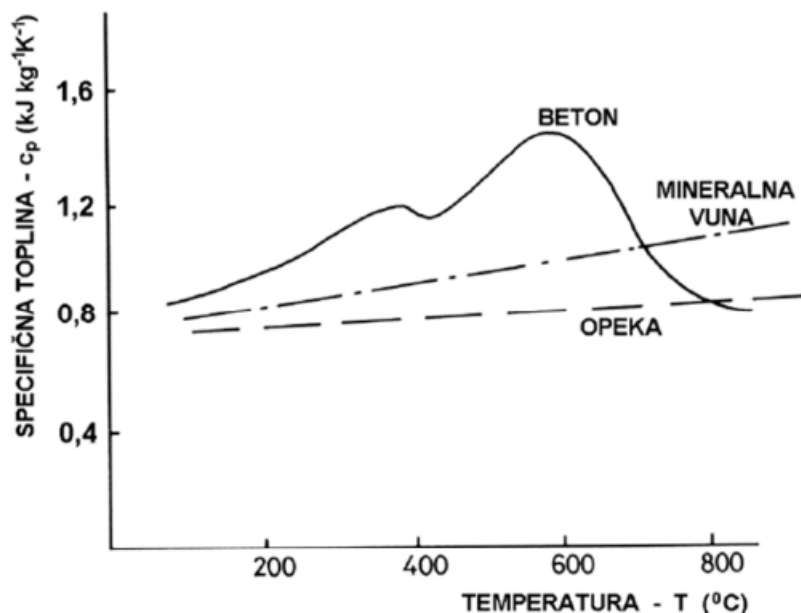
$$C = (Q / \Delta T) \quad (10)$$

gdje je:

- Q – količina topline dovedene nekom tijelu
- $\Delta T$  – promjena temperature

Vrijednost C ovisi o izmjerenoj temperaturi i razlikuje se od tvari do tvari. Svi građevinski materijali (osim metalnih materijala) u standardnim klimatskim uvjetima sadrže određenu količinu vlage (u obliku kemijski nevezane vode i vodene pare) - kada se zagriju iznad standardnih temperatura (kao što je požar), vlaga počinje izlaziti iz materijala van. Gubitak vlage najveći je u ranim fazama požara. Na 100 °C sva nekemijski vezana voda prelazi u vodenu paru i potpuno isparava iz materijala. U ovom trenutku, zbog entalpije isparavanja vode, količina topline potrebna za zagrijavanje 1 kg materijala za 1 Kelvin dramatično će se povećati. To se događa zbog topline utrošene na transformaciju tekuće vode u vodenu paru (proces isparavanja) - nagli skok vrijednosti

toplinskog kapaciteta materijala. Kemijske reakcije drugih vrsta složenih kemijskih promjena na višim temperaturama (uglavnom razgradnja molekula) i stapanje određenih topivih vrsta čestica materijala imaju presudan utjecaj na kasniju evoluciju vrijednosti toplinskog kapaciteta materijala - Slika 4.[10] Utjecaj ovih promjena na vrijednost toplinskog kapaciteta znatno je manji kod kemijski temperaturno stabilnih materijala kao što su opeka, beton i mineralna vuna.



Slika 4. - Dijagram vrijednosti toplinskog kapaciteta za opeku, beton i mineralnu vunu [10]

### 3.4. Toplinska difuzivnost materijala ( $\alpha$ )

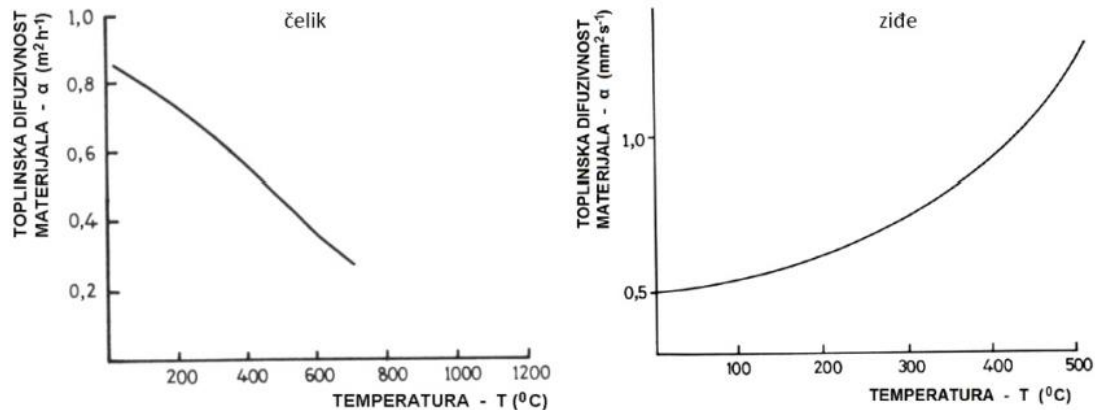
Mjera prijenosa topline s jedne na drugu stranu naziva se toplinska difuzivnost materijala. Toplinska difuzivnost materijala pokazuje sposobnost određenog materijala da provodi toplinu, ovisno o njegovoj sposobnosti zadržavanja topline, i pokazuje brzinu kojom toplinska energija može putovati kroz materijal, što se odnosi na brzinu porasta temperature unutar materijal. Simbol za toplinsku difuzivnost je  $\alpha$ , a mjerna jedinica [m<sup>2</sup>/s]. Određuje se prema matematičkoj formuli:

$$\alpha = [\lambda / (\rho \cdot C_p)] \quad (11)$$

gdje je:

- $\lambda$  – toplinska vodljivost (W/mK)
- $\rho$  – gustoća tvari (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_p$  – specifični toplinski kapacitet (J/kgK) [14]

U navedenom primjeru korišten je specifični toplinski kapacitet koji također uključuje fizikalnu veličinu mase (kg) u izračunu u odnosu na toplinski kapacitet naveden u matematičkoj formuli. Pri manjim vrijednostima toplina se sporije širi kroz materijal. Stoga svi materijali s visokom vrijednošću toplinske vodljivosti brzo reagiraju na upadni toplinski tok. Vrijednosti toplinske vodljivosti materijala različito se mijenjaju s promjenom temperature. Općenito može se reći da tekućine imaju nisku toplinsku vodljivost, a metali visoku toplinsku vodljivost. Iz toga proizlazi da je za izolaciju od utjecaja valova visokih temperatura najbolje koristiti građevinski materijal s najnižom toplinskom vodljivošću (slika 5).



Slika 5. - Dijagrami promjene vrijednosti veličine toplinske difuzivnosti čelika i zida s promjenama njihovih temperature [10]

### 3.5. Toplinska inercija materijala ( $e$ )

Sposobnost materijala da akumulira toplinu  $t$  u određenom vremenu  $t$ , bez obzira na svoje fizikalno stanje, naziva se toplinska tromost ili toplinska učinkovitost materijala. Kada se dva

elementa različitih temperatura dodiruju, brzina prijenosa topline određena je toplinskom inercijom materijala. Simbol za toplinsku inerciju je, a mjerna jedinica [ $W\sqrt{s/m^2K}$ ].[15]

Formula za izračunavanje toplinske inercije materijala je:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad (13)$$

gdje je:

- $\lambda$  – toplinska vodljivost materijala
- $\rho$  – gustoća materijala
- $C_p$  – specifični toplinski kapacitet

Promjene svojstava materijala zaštitnih površinskih prevlaka konstrukcija ovise o njihovim toplinskim svojstvima, odnosno o toplinskoj tromosti dijela prevlake koji je izložen najvećoj gustoći upadnog toplinskog toka od požara. Vrijeme do pojave flashovera ili vrijeme do nastanka požara u zatvorenom prostoru ovisi o toplinskoj inerciji materijala kojima su obložene zidne, podne i stropne površine [10]. Materijali visoke učinkovitosti hladni su na dodir, dok se materijali niske učinkovitosti (također s materijalno-tehničkim prednostima) mogu koristiti kao dobar materijal za podne površine kod kojih se površina brzo zagrijava zbog slabe toplinske vodljivosti [16].

### 3.6. Toplinsko rastezanje materijala ( $\Delta l$ )

Promjena dimenzije materijala koja se događa kao posljedica promjene temperature naziva se toplinsko istezanje materijala. S mjenjanjem temperature mijenja se i dimenzija svih tijela. [17] Toplinsko širenje materijala može se dogoditi na tri načina: linearno, volumetrijsko i planarno. Promjena bilo koje linearne dimenzije tijela ( $\Delta l$ ) dana je izrazom:

$$\Delta l = l_0 \times \alpha_r \times \Delta T \quad (14)$$

gdje je:

- $\alpha_r$  – koeficijent linearnog toplinskog rastezanja
- $l_0$  – početna ili referentna dimenzija referentnoj temperaturi
- $\Delta T$  – promjena temperature koja uzrokuje promjenu dimenzije

Tendencija materijala da se rasteže kada se zagrijava rezultat je povećanja unutarnje kinetičke energije njegovih atoma ili molekula. Tijela se pod djelovanjem sila deformiraju, osim kod promjena temperature i vlažnosti, kod rekristalizacije i drugih kemijskih promjena. Mogu nastati samo uravnotežene napetosti koje se ne mogu povezati s vanjskim opterećenjem i koje je teško odrediti. Kada su konstrukcije opterećene, prednaprezanja se dodaju naprezanjima koja uzrokuju opterećenje. Ova naprezanja mogu uzrokovati lom konstrukcije, čak i ako je naprezanje uzrokovano vanjskim opterećenjem manje od dopuštenog.

Na vrlo visokim temperaturama (npr. tijekom požara), linearni koeficijent toplinskog širenja materijala više se ne može smatrati konstantnim, već postupno raste s temperaturom.[10] Toplinsko širenje materijala nalazi svoju korisnu primjenu u toplinskim maksimalnim javljačima požara, gdje je senzorni element obično bimetal. Bimetal je traka koja se sastoji od dvije metalne trake jednake duljine i širine koje su međusobno spojene (najčešće zavarivanjem). Ove trake se savijaju kako se temperatura mijenja na jednu ili drugu stranu, uzrokujući da metal ima veći koeficijent istezanja. [18]

Termomaksimalni javljači požara registriraju kada se prekorači određena temperatura. Izazivaju požar ako temperatura poraste između 15°C i 35°C iznad temperature okoline. Rade na bimetalnom principu, koji zatvara ili otvara krug (ovisno o proizvođaču) čim temperatura prijeđe zadanu alarmnu temperaturu i šalje obavijest na vatrodojavnu ploču. [19]

## 4. EKSPLOZIJA

Eksplozija je ekstremno brza kemijska reakcija praćena praskom, oslobađanjem velike kolićine topline i naglim povećanjem volumena zbog stvaranja plinovitih proizvoda. Eksplozija plina ili prašine može se opisati kao rezultat brzog izgaranja plina/prašine pomiješanog sa zrakom [1].

Ućinci eksplozije ukljućuju glasne zvukove i valove pritiska, koji mogu uzrokovati urušavanje zidova i pucanje stakla. Isto tako, snažna eksplozija proizvodi toplinu, oblake dima, plamen i druge smrtonosne ućinke.

Za eksploziju je potrebno gorivo (plin poput vodika ili prašina poput brašna), oksidans (kisik u zraku) i izvor paljenja (kao što je vruća površina ili elektrićna iskra). Kada se postigne mješavina goriva i zraka i koncentracija goriva unutar granica eksplozivnosti, smjesa će se zapaliti ako izvor paljenja ima dovoljnu snagu.

Eksplozivna atmosfera može nastati ako se zapaljivi plinovi, zapaljive tekućine, pare i zapaljive prašine koje su raspoređene na radnom mjestu nekontrolirano oslobađaju. Kada se zapaljive tvari pomiješaju sa zrakom, stvara se eksplozivna atmosfera. Ako je koncentracija tvari u smjesi između niže i više, prisutnost aktivnog izvora paljenja može zapaliti smjesu i izazvati eksploziju. Donja granica eksplozivnosti je minimalna koncentracija zapaljivog plina, tekuće pare i prašine koja može izazvati eksploziju sa zrakom. Gornja granica eksplozivnosti je najveća koncentracija zapaljivog plina, tekuće pare ili prašine koja može izazvati eksploziju sa zrakom. Ako je koncentracija ispod donje granice eksplozivnosti, do eksplozije ne može doći.

Ako je koncentracija iznad gornje granice eksplozivnosti, smatra se da je smjesa prebogata i iz toga razloga nema dosta kisika za eksploziju. Temperatura i tlak također utjeću na granice zapaljivosti. Više temperature uzrokuju smanjenje donje granice eksplozivnosti i povećanje gornje granice eksplozivnosti, dok visoki tlakovi uzrokuju povećanje obje vrijednosti. Informacije o granicama eksplozivnosti plinova ili para općenito se mogu pronaći u sigurnosno-tehničkom listu proizvođaća ili distributera zapaljive tvari/proizvoda ili u drugom izvoru informacija. U praksi, gornje granice eksplozivnosti za prašine nisu dovoljno poznate i teško ih je primijeniti zbog poteškoća u kontroli eksplozivnih smjesa ogranićavanjem njihove koncentracije. Gornja granica

eksplozivnosti za većinu praškastih smjesa je između 2000 i 6000 g/m<sup>3</sup>. Treba uzeti u obzir da naslaga prašine uzrokovana naglim kretanjem zraka (otvaranje vrata, manja eksplozija) može stvoriti oblak koji se može zapaliti.

Važno je znati da čak i naslage prašine manje od 1 mm mogu stvoriti eksplozivnu atmosferu. Iako do eksplozije dođe u tren oka, ipak se u tom trenutku dogodilo nekoliko faza: sam udarni val eksplozije, dijelovi opreme za let, ovisno o udarnom pritisku, akumulirana toplina u dijelovima stijenci, krovovi, podovi, vrata, prozori, stropovi, itd. Može uzrokovati sekundarne požare, opekline i sekundarna oštećenja strukture. Osim toga, udarni valovi mogu ozbiljno oštetiti plinske, vodovodne, električne i kanalizacijske cijevi. Utjecaj eksplozije je teži, a posljedice po ljudske živote i materijalne štete ogromne.

Tijekom eksplozije tvari koje nastaju izgaranjem mogu međusobno reagirati na vrlo opasne i štetne načine, smanjujući koncentraciju kisika u prostoru i uzrokujući gušenje radnika. [20]

#### **4.1. Uzroci eksplozije**

Postoji mnogo različitih izvora paljenja za zapaljive tvari i smjese zraka koji se mogu pronaći u nasumičnim mjestima poslodavaca kao potencijalni izvori paljenja. Uobičajeni izvori paljenja uključuju: vruće površine, vrući plamen i plinove, mehanički generirane iskre (od brušenja ili rezanja), električne iskre. Statički elektricitet i slično. Ostali izvori paljenja uključuju: rasvjetu, elektromagnetska polja, kemijske reakcije itd. [21].

#### **4.2. Vrste eksplozije**

Prema vrsti nastanka eksplozije se dijele na tri osnovne grupe: fizičke, kemijske i atomske.



#### 4.1.1. Fizičke eksplozije

Fizičke eksplozije uzrokovane su trenutnim oslobađanjem velike količine mehaničke energije, kao što je komprimirani plin, i ne uključuju kemijske reakcije. Fizičke eksplozije uključuju eksplozije spremnika koji sadrže plinove pod tlakom, zadimljavanje posuda pod tlakom, jaka električna pražnjenja, vulkanske eksplozije, potrese i udare ili sudare velikih tijela brzina veća od 1,5 km/s. [21]

#### 4.1.2. Kemijske eksplozije

Veoma brzo opuštanje unutarnje kemijske energije tvari kao oblik toplinske energija karakteristika je kemijske eksplozije. Oslobođena toplinska energija dovodi do jakog zagrijavanja produkata reakcije, koji su obično plinovi. Ako se sustavu dopusti da promijeni volumen, produkti reakcije počinju se brzo širiti i dio proizvedene topline se pretvara u mehanički rad i fazu, ovisno o tome je li eksplozija kondenzirana ili razrijeđena faza.[22]

#### 4.1.3. Atomske eksplozije

Atomske ili nuklearne eksplozije uzrokovane su trenutačnim oslobađanjem velikih količina energije kao rezultat nuklearne reakcije. Nuklearna reakcija može biti uzrokovana fuzijom ili fisijom. Fisija je nuklearni proces u kojem se teška jezgra cijepa na dvije manje jezgre, pri čemu se oslobađa velika količina toplinske energije. Dvije manje jezgre nastale fisijom teške jezgre obično su radioaktivne, oslobađaju 2-3 neutrona i određenu količinu energije. Fuzija je nuklearni proces u kojem se dvije lakše jezgre spajaju u težu jezgru. Prati ga oslobađanje ili apsorpcija energije, ovisno o masi uključenih atomskih jezgri. Kada se lakše jezgre spajaju u težu jezgru i slobodni neutron, obično se oslobađa više energije nego što je potrebno za spajanje jezgri. [23]

### 4.3. Klasifikacijska zona opasnosti

Za potrebe ATEX upute za korisnike: Ako se eksplozivna atmosfera može pojaviti u takvim količinama da su potrebne posebne mjere za zaštitu sigurnosti i zdravlja radnika, takvo mjesto i odgovarajuća atmosfera tog mjesta nazivaju se opasnim eksplozivnim atmosferama. Na

takvim radnim mjestima mora biti istaknuto posebno upozorenje. Oznaka EX upozorava radnike i druge na opasnost od eksplozije u određenom dijelu radnog prostora zbog prisutnosti zapaljivih tvari, koje mogu biti u obliku tekućina, plinova, para ili prašine.

Eksplozivne atmosfere nastaju u različitim područjima djelatnosti, primjerice u kemijskoj industriji, u rafinerijama, u poduzećima za proizvodnju energije, u plinskim postrojenjima itd. Eksplozivne atmosfere mogu nastati u malim i srednjim tvrtkama, u drvnjoj industriji, kod plina stanice. itd.

Važno je znati da kada se stvori eksplozivna atmosfera, stupanj opasnosti ovisi o količini i štetnosti paljenja. Mora se pretpostaviti da će eksplozija izazvati štetu i da uvijek u eksplozivnoj atmosferi postoji opasnost. Na temelju navedenih načela treba provesti procjenu rizika u malim i srednjim tvrtkama. Opasna mjesta moraju se identificirati i podijeliti u zone na temelju učestalosti i trajanja eksplozivne atmosfere.

Tablica 2: Zone na temelju učestalosti i trajanja eksplozivne atmosfere [23]

Zona	Učestalost trajanja eksplozivne atmosfere
Zona 0	Prostor u kojem je eksplozivna atmosfera kao smjesa zraka i gorivih tvari u obliku plina, para ili magle prisutna kontinuirano, duže vremensko razdoblje ili učestalo
Zona 1	Prostor u kojem je eksplozivna atmosfera kao smjesa zraka i gorivih tvari u obliku plina, pare ili magle koja se može povremeno pojaviti pri uobičajenim radnim procesima
Zona 2	Prostor u kojem eksplozivna atmosfera kao smjesa zraka i gorivih tvari u obliku plina, para ili magle čiji nastanak nije vjerojatan u uobičajenom procesu rada ali, ako nastane, onda se zadržava kraće vrijeme
Zona 20	Prostor u kojem je eksplozivna atmosfera u obliku oblaka goriva i prašine u zraku prisutna kontinuirano, dulji vremenski period ili često.
Zona 21	Prostor u kojem se eksplozivna atmosfera u obliku oblaka goriva i prašine u zraku može povremeno pojaviti pri uobičajenim radnim procesima
Zona 22	Prostor u kojem pojava eksplozivne atmosfere u obliku oblaka goriva i prašine u zraku nije vjerojatna pri uobičajenim radnim operacijama, a ako se pojavi onda je to samo u krećem vremenskom periodu.

Najčešće korištena norma za određivanje veličine prostora i klasifikaciju goriva pare je EN 600079-10. Ova norma daje poveznicu između količine gorivih para koje se mogu stvoriti, ventilacije u prostoru, te klasifikacije zona.

Različitim drugim izvorima se pokušalo vremenski ograničiti ove zone ali niti jedno ograničenje nije službeno usvojeno. Primjeri nekih često korištenih vrijednosti su prikazani u Tablici 3.

Tablica 3. Vremensko ograničenje zona [23]

<b>Zona</b>	<b>Ograničenje</b>
Zona 0	Eksplozivna je atmosfera prisutna više od 10 % vremena rada postrojenja, ili 1000 sati/godinu
Zona 1	Eksplozivna je atmosfera prisutna od 0,1 % vremena rada postojanja ili sati/godinu, ali manje od % vremena rada postojanja ili sati / godinu
Zona 20	Eksplozivna je atmosfera prisutna manje od 0,1 % vremena rada postojanja ili 10 sati/godinu ali još uvijek je dovoljno vjerojatna i potrebna je kontrola nad izvorima paljenja.

Vrijednosti izražene u satima/godini mogu se primijeniti u slučajevima kada poduzeće posluje tijekom cijele godine. Kada ljudi žele opisati definiciju zona, ove vrijednosti su najprikladnije, ali za većinu situacija pristup kvaliteti je najprikladniji. Klasifikacija ove zone također se uzima u obzir pri određivanju opsega zaštitnih mjera, uzimajući u obzir vrstu zaštitnog sustava koji se koristi u zoni opasnosti.[23]

#### 4.3.1. Kontrolna lista za procjenu rizika (prepoznavanje opasnosti)

Pod opasnošću podrazumijevamo sve što može uzrokovati određenu štetu (npr. kemikalije, struja, rad na ljestvama, otvori u zemlji, rad s kružnim pilama itd.). Rizik je velika ili mala mogućnost da netko bude ozlijeđen zbog navedenih ili drugih opasnosti, zajedno s naznakom ozbiljnosti te ozljede.

Za procjenu rizika potrebno je procijeniti vjerojatnost stvaranja eksplozivne atmosfere i težinu moguće štete koja će nastati nakon eksplozije. Popisi za provjeru mogu se koristiti za provedbu procjene rizika za određivanje rizika od eksplozije na bilo kojoj lokaciji i za određivanje preventivnih zaštitnih mjera na temelju procjene rizika. [23]

#### **4.4. Mjere provođenje za smanjenje rizika**

Ako procjena rizika pokaže da postoji opasnost od eksplozije na radnom mjestu, moraju se razviti i provesti mjere za:

Otklanjanje rizika ili smanjenje rizika na prihvatljivu razinu. Nužne mjere mogu biti zaštitene, preventivne ili kombinacija tih mjera. [23]

##### **4.4.1. Preventivne mjere**

Cilj preventivnih mjera je spriječiti rizik od eksplozije što je više moguće izbjegavanjem stvaranja eksplozivne atmosfere ili uklanjanjem izvora paljenja. Uklonite ili smanjite količinu zapaljivog materijala.

Prema načelima Zakona o zaštiti na radu (NN 71/14, 118/14, 94/18 i 96/18), ova vrsta zaštitnih mjera zauzima istaknuto mjesto na ljestvici prevencije. Gorivi materijal se u većini slučajeva ne može zamijeniti negorivim, prvenstveno zato što je sam materijal rezultat određenog procesa ili nužan dio procesa.

U takvim slučajevima količinu zapaljivog materijala na radnom mjestu treba svesti na minimum. Gorivi materijal mora se skladištiti u odgovarajućim vatrostalnim spremnicima, propisno označenim i dalje od izvora paljenja. Vrlo je važno ne skladištiti ga u blizini nekompatibilnih materijala s kojima može kemijski reagirati i izazvati eksploziju. Držite koncentraciju zapaljivih tvari pomiješanih sa zrakom izvan granica eksplozivnosti. Stvaranje eksplozivne atmosfere izvan sustava mora se izbjegavati koliko god je to moguće. To se može postići zatvorenim sustavom. Sustav mora biti projektiran tako da u normalnim uvjetima rada ne dolazi do curenja, što se postiže redovitim održavanjem i ispitivanjem.

Ako se ne može spriječiti istjecanje zapaljivih tvari, mora se spriječiti stvaranje eksplozivne atmosfere poduzimanjem odgovarajućih mjera kako bi se koncentracija zapaljivih tvari pomiješana sa zrakom držala izvan granica eksplozivnosti. Ove mjere uključuju ventilaciju i čišćenje.

Konkretno za plinove i pare:

- Priroda ventilacija (prozračivanje prirodnim propuhom)
- Prisilna ventilacija (ventilacija s direktnim upuhivanjem zraka) [23]

Za prašinu, učinkovitim mjerama prevencije smatra se njezino određeno s opreme. Najučinkovitije je odrediti zapaljivu prašinu sa izvora njenog nastanka.

Vrlo važna stvar je održavanje čistoće radnog mjesta i opreme. Taloženje zapaljive prašine može se izbjeći redovitim čišćenjem pomoću odgovarajuće opreme. Teba izbjeći uzvitlavanje zapaljive prašine zbog mogućeg stvaranja zapaljive smjese u obliku oblaka. Vlažiti zapaljivu prašinu prije uklanjanja. Unatoč učinkovitosti sustava ventilacije i čišćenja, uvijek može postojati preostali rizik koje je potrebno ponovno procijeniti i smanjiti daljnim mjerama.

Kontrola veličine čestica zapaljivih materijala. Ova mjera se može koristiti za smjesu prašina/zrak. Ukoliko su čestice zapaljivog materijala dovoljno velike, npr. veće od 0,5 mm. smanjena je vjerojatnost stvaranja eksplozivne smjese. Potrebno je obratiti pozornost na to da uvijek uz grube mogu biti prisutne i fine čestice koje se mogu pojaviti i kao rezultat trenja. [23]

#### 4.4.1.1. Uklanjanje/kontrola aktiviranja mogućih izvora paljenja

Potencijalni izvori paljenja najčešće prisutni na radnom mjestu su varenje, brušenje, pušenje, vruće površine, električne i organizacijske mjetrostatičke iskre, mehaničke iskre, egzotermne kemijske reakcije, i slično.

Radni izvori paljenja koji nastaju kao rezultat kvara opreme ili uslijed nepravilnog rukovanja tijekom izvođenja radnog procesa mogu se spriječiti:

- elektrostatičkim uzemljenjem,
- izbjegavanjem materijala i predmeta niske električne vodljivosti,

- smanjenjem veličine nevodljive površine,
- izbjegavanje transporta i procesa punjena praškastog materijala kroz cijevi i spremnik koji imaju električnu izolaciju sa unutarnje strane,
- izbor mehaničke opreme sa malom random brzinom,
- izbor električne i mehaničke opreme prema zahtjevima Direktive ATEX 95. Treba napomenutu da oprema mora odgovarati samoj prirodi. [23]

#### 4.4.2. Organizacijske mjere

Učinkovitost zaštitnih mjera može se povećati ako se kombiniraju s organizacijskim mjerama. Organizacijske mjere moraju biti usklađene s drugim mjerama kako bi radno okruženje bilo sigurno za zdravlje i sigurnost radnika i drugih na koje to može utjecati.

Uobičajeni izvori paljenja kao što su pušenje, zavarivanje ili mljevenje mogu se suzbiti odgovarajućim organizacijskim mjerama kao što su zabrana pušenja, izdavanje pisanih uputa radnicima, isticanje kodeksa ponašanja, izdavanje pismene radne dozvole te provođenje obuke i odgovarajućeg nadzora. Moguće organizacijske mjere uključuju: Opasnosti koje se javljaju u povremenom okruženju, npr. uređaji certificirani za rad s plinovima trebaju se koristiti samo u područjima seksplozivnim plinskim atmosferama [23].

##### 4.4.2.1. Sustav za rano otkivanje eksplozivne atmosfere

Odgovarajući sustavi mogu se koristiti za rano otkrivanje pojave eksplozivne atmosfere. Ovi sustavi obično upozoravaju aktiviranjem alarma kada je koncentracija zapaljive tvari/smjese u zraku približno 10% donje granice eksplozivnosti. Takvi sustavi mogu isključiti uređaje bez zaštite od eksplozije, uključiti ventilacijski sustav itd. [23].

##### 4.4.2.2. Pisane upute za rad

Radne upute moraju se sastojati od pisanih pravila ponašanja koja poslodavac daje zaposlenicima, kao i popis pokretne radne opreme koja se smije koristiti u opasnom prostoru i upute o tome koju osobnu zaštitnu opremu treba nositi osoba koja ulazi u opasno područje [23].

#### 4.4.2.3. Osigurati osposobljavanje

Poslodavac je dužan osposobiti zaposlenike iz područja protueksplozijske zaštite o svim opasnostima na određenom mjestu i mjerama koje treba poduzeti. Osposobljavanje treba provoditi prije stupanja zaposlenika na rad, prilikom promjene radnog mjesta, prilikom uvođenja nove opreme ili tehnologije u radni proces.

Obuka treba uključivati objašnjenje uzroka eksplozije, točke u procesu rada gdje se eksplozija događa, radnje koje treba poduzeti, pravilno rukovanje slučajnom opremom i održavanje. Općenito, radnici moraju biti obučeni za siguran rad u i oko opasnog područja. Poslodavac također mora upozoriti treće strane, kao što su posjetitelji i vanjski izvođači, na opasnost od eksplozije [23].

#### 4.4.2.4. Uvođenje sustava dozvole za rad

Radni postupak koji bi mogao uzrokovati eksploziju u ili u blizini opasnog područja mora biti odobren radnom dozvolom. Obrazac radne dozvole mora biti potpisan od strane odgovorne osobe i sadržavati najmanje sljedeće:

- Lokaciju mjesta rada
- Opis broja i imena radnika
- Ukupan broj i imena radnika
- Opremu za rad koja će se upotrijebiti
- Identifikaciju opasnost
- Popis mjera zaštite te potvrda (potpis) odgovorne osobe da su mjere provedene
- Potrebnu osobnu zaštitnu opremu
- Potvrdu o osposobljenosti radnika za siguran rad [23].

Na primjer, radna dozvola mora se izdati prije početka radova na održavanju u opasnom području. Iskustvo pokazuje da održavanje i pregled opreme nosi visok rizik od nezgoda. Prije, tijekom i nakon izvođenja radova, potrebno je osigurati provedbu svih zaštitnih mjera [23].

#### 4.4.2.5. Pregled

Prije prvog početka rada na radnom mjestu koje sadrži prostore u kojima je moguća eksplozivna atmosfera, stručnjak mora procijeniti opću protueksplozijsku sigurnost. Pregled treba provoditi i tijekom promjena koje utječu na razinu sigurnosti u radnom prostoru i nakon završetka radova. [23]

#### 4.4.2.6. Nadzor

Osiguranje odgovarajućeg nadzora za radnike dok su u radnom području gdje može doći do eksplozivne atmosfere [23].

#### 4.4.2.7. Označavanje

Svi ulazi u opasna područja moraju biti propisno označeni odgovarajućim znakovima upozorenja [23].

#### 4.4.3. Protueksplozivne mjere

Ako se rizik od eksplozije ne može smanjiti na prihvatljivu razinu, moraju se poduzeti dodatne mjere. Ove mjere neće spriječiti eksploziju, ali će pomoći smanjiti učinke eksplozije i time izbjeći ili smanjiti štetu na opremi ili samoj tvrtki. Posljedice eksplozije mogu se spriječiti konstrukcijskim zaštitnim mjerama kao što su:

- konstrukcija otpornih na eksploziju,
- protueksplozijskog oduška,
- suzbijanje eksplozije
- izoliranje eksplozije u kombinaciji sa navedenim [23].

Da bi se sustav zaštite mogao koristiti mora biti u skladu sa direktivom ATEX 95.



#### 4.4.4. Konstrukcija opreme na eksploziju

Pri primjeni ovih mjera moraju se uzeti u obzir svi dijelovi sustava i projektirati da izdrže unutarnju eksploziju bez puknuća.

Spremnici i spremnici otporni na eksploziju moraju izdržati očekivani pretlak eksplozije bez trajne deformacije. Konstrukcija konstrukcije temelji se na očekivanom nad tlaku eksplozije.

Spremnici i kontejneri otporni na udare i udare na pritisak i eksploziju dizajnirani su da izdrže udarce u slučaju unutarnje eksplozije, ali i da se trajno deformiraju.

Nakon svake eksplozije svaki se uređaj mora provjeriti i utvrditi sve deformacije prije nego što se aktivnost može nastaviti [23].

#### 4.4.5. Protueksplozijski odušak

Protueksplozijska zaštita od zračenja uključuje sve mjere za zračenje prvobitno zatvorenih spremnika i uređaja. Odušnik za zaštitu od eksplozije je uređaj koji osigurava da objekt/oprema nije izložena sili eksplozije koja premašuje njegovu projektiranu snagu. Takvi ventilacijski uređaji su npr. eksplozivni diskovi ili protueksplozijska vrata. Za opasne tvari, npr. otvorene, korozivne i slične tvari, otvori za eksploziju se ne koriste kao mjera zaštite od eksplozije [23].

#### 4.4.6. Suzbijanje eksplozije

Protueksplozijsko gašenje je sustav uređaja koji, kao i kod protueksplozijske ventilacije, sprječava stvaranje nedopustivo visokog tlaka u spremnicima u slučaju eksplozije. Sustav uređaja mjeri povećanje tlaka ili širenje plamena tijekom eksplozije i suzbija eksploziju ispuštanjem sredstva za gašenje [23].

#### 4.4.7. Izoliranje eksplozije

Eksplozija se događa u jednom dijelu uređaja i može se proširiti na druge dijelove, gdje može doći do daljnjih eksplozija. Visoki tlak eksplozije uzrokovan je pomakom, tj. vrtlozima koji

nastaju širenjem eksplozije. Nastali eksplozivni nadtlak može doseći maksimalni tlak i uništiti nezaštićene dijelove sustava koji su također otporni na djelovanje pritiska ili eksplozije.

Stoga je važno izolirati moguće eksplozije u pojedinim dijelovima postrojenja, što se postiže sustavom protueksplozijske izolacije.

Sustav izoliranja eksplozije se može postići uporabom:

- brzo - djelujućih mehaničkih izolatora;
- gašenjem plamena u uskim otvorima ubrizgavanjem sredstva za gašenje;
- zaustavljanje plamena hlađenjem;
- vodenom brtvom;
- rotirajućim ventilima [23].

#### 4.4.8. Dokumentacija zaštite od eksplozija

Korisnička ATEX Direktiva predviđa da poslodavac mora izraditi “Dokumentaciju zaštite od eksplozije”. Ta se dokumentacija mora izraditi za svaki radni process i instalaciju prije početka rada te ju redovito ažurirati kada god dođe do izmjena.

U osnovi, ova dokumentacija sadrži velik broj informacija objašnjenih u dijelovima 2.7,3, 4 i 5 ovog vodiča.

Na primjer:

- Procjena rizika i mjere zaštite poduzete za smanjenja rizika,
- Podjela radnih područja po zonama opasnosti,
- Postupci za osposobljavanje i održavanja, i
- Kako koordinirati sigurnosne mjere [23].

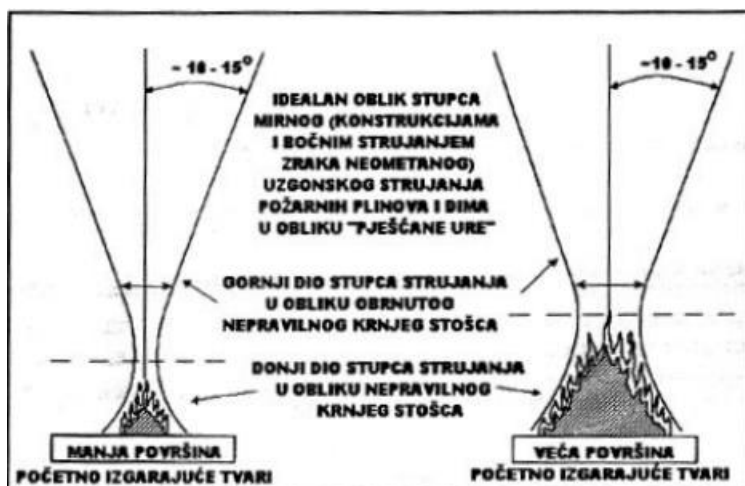
## **5. ZNAKOVITI TRAGOV I PRILIKOM ISTRAŽIVANJA UZROKA POŽARA U ZATVORENIM PROSTORIMA**

Po dolasku na gradilište potrebno je izvršiti vizualni pregled kako bi se utvrdila toplinska oštećenja unutarnjeg i vanjskog dijela zgrade. Uvidom u objekt istražna ekipa na temelju stanja brava na ulaznim vratima i drugih tragova otkriva tragove moguće provale. Za otkrivanje tragova potrebna su predznanja iz kojih istražitelji mogu zaključiti o postojećem stanju, odnosno tragovima koji su ostali nakon požara, kao što su:

- tragovi čađe na stijenkama u obliku slova "V" i "U",
- tragovi čađave krune na vanjskom otvoru objekata,
- tragovi na staklu,
- tragovi preopterećenja vodiča,
- tragovi zapaljivih tekućina,
- tragovi taljenja vodiča tijekom stvaranje lukova,
- karbonizacija kod životinja (glodavaca) i
- otisci stopala na nezapaljivom materijalu (gips, beton), – pougljenje na drvu [24].

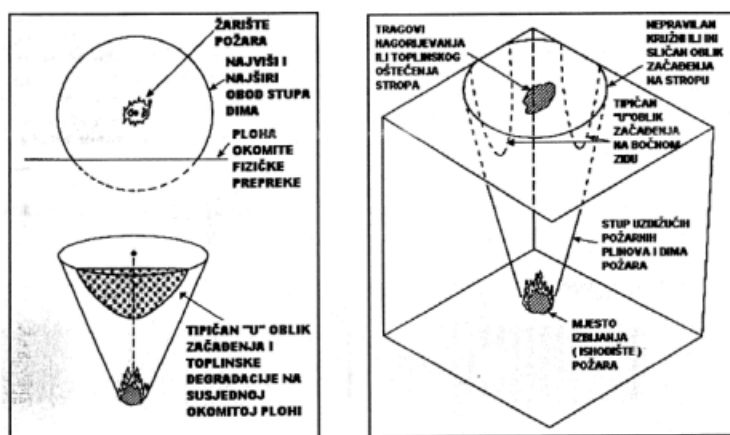
### **5.1. Tragovi čađe u obliku slova „V“ i „U“**

Zamračenja u obliku slova "V" i "U" idealizirani su geometrijski oblici, tipični za okomiti stup s neaktivnim uzlaznim tokom gorućih plinova, dima i plamena u obliku pješčanog sata s bazom na dnu dva inicijala. dimenzionalni požar s postupnim širenjem promjera stupa prema gore, pod kutom kretanja od oko 15° (slika 6.), bez jakog bočnog strujanja zraka [24].



Slika 6. Primjer razvoja stupa požara [24]

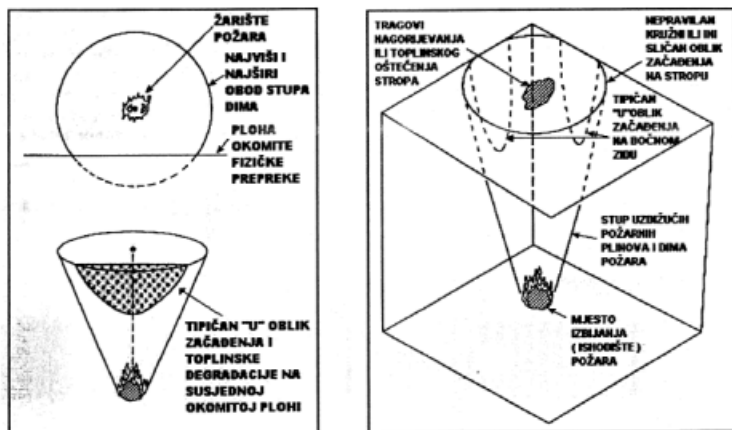
Međutim, ako tijekom širenja nosač naiđe na horizontalne prepreke u obliku krovova, krovova i velikih površina, njegovo bočno širenje i povećanje debljine događa se paralelno s tom preprekom. S druge strane, ako naiđete na kose i okomite fizičke prepreke, postoje primjeri otisaka stopala u obliku slova "V" ili "U", ovisno o tome gdje je izvor vatre. Da je vatra bila bliže okomitoj površini ili zidu, trag u obliku slova "V" postupno bi se formirao od podnožja do vrha zida. Kada bi izvor vatre bio bliže središtu prostorije, odnosno dalje od zida, oznaka na vrhu okomite plohe bila bi u obliku slova "U" (Slika 7.)



Slika 7. Prikaz tlocrtnog, bokocrtnog te prostornog izgleda traga tipa „U" [24]

Međutim, ako tijekom širenja nosač naiđe na horizontalne prepreke u obliku krovova, krovova i velikih površina, njegovo bočno širenje i povećanje debljine događa se paralelno s tom preprekom. S druge strane, ako naiđete na kose i okomite fizičke prepreke, postoje primjeri otisaka

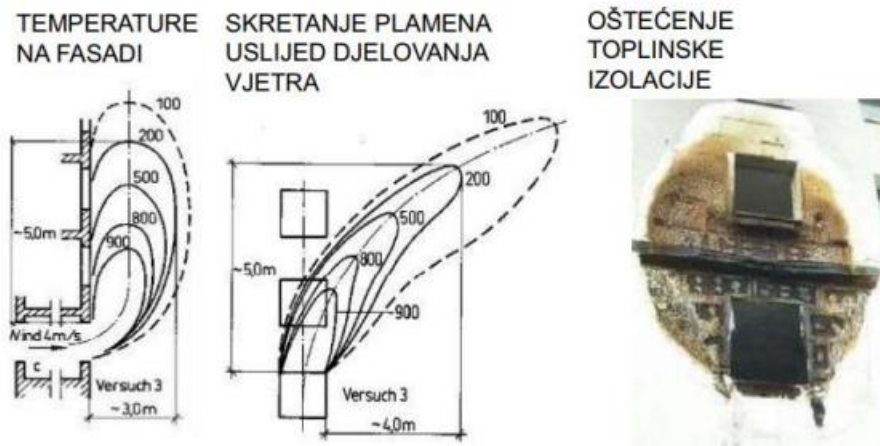
stopala u obliku slova "V" ili "U", ovisno o tome gdje je izvor vatre. Da je vatra bila bliže okomitoj površini ili zidu, trag u obliku slova "V" postupno bi se formirao od podnožja do vrha zida. Kada bi izvor vatre bio bliže središtu prostorije i dalje od zida, trag na vrhu okomite plohe poprimio bi oblik slova "U" (Slika 8.).



Slika 8. Prikaz tlocrtnog, bokocrtnog te prostornog izgleda traga tipa „U" [24]

## 5.2. Čađavi vijenac

Čađavi vijenac je pojava koja nastaje kada požar izbije kroz vanjske otvore i proširi se na gornje katove ili susjedne prostorije, a u nekim slučajevima i na susjedne zgrade. Vatra se širi na susjedne objekte skrećući plamen nošen vjetrom i zagrijavajući površinu susjednog objekta. Što je rub plamena udaljeniji od otvora, to je njegova temperatura niža i stoga se kontura ili kruna čađe smanjuje i postaje sve manje vidljiva (Slika 9.).



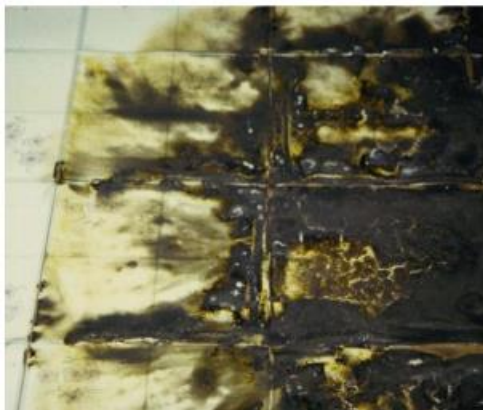
Slika 9: Prikaz izbijanja požara kroz vanjske prozore

### 5.3. Tragovi uzrokovani gorivim tekućinama i kapljevinama

Zbog svoje dostupnosti i djelovanja zapaljivih tekućina kao što su motorni benzin, nafta, razna ulja i maziva, špirit, alkohol, kerozin i nitro razrjeđivači su najzastupljeniji ubrzivači. Znakovi uporabe zapaljivih tekućina su:

- lokalni požar drvene podloge pod kutom od 90°,
- teška oštećenja nosivih greda,
- lokalne pukotine u betonskoj podlozi ili manjim pločama (slika 10),
- pridružena veća lokalna oštećenja s uskim lokalnim oštećenjem (tzv. osigurač),
- teško lokalno oštećenje namještaja [25].

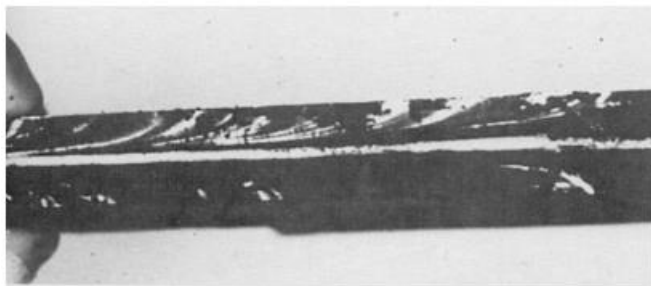
U većini slučajeva postoji i lokalno oštećenje tla u podnožju ovih objekata tako da je vidljiv protok tekućine. Time je moguće utvrditi s koje je strane dotični predmet izliven.



Slika 10. Znakoviti trag izgaranja lokve gorive kapljevine [24]

#### 5. 4. Tragovi na staklu

Staklo koje se razbilo ili rastalilo u požaru kada je bilo izloženo temperaturi iznad  $680^{\circ}\text{C}$  (najčešća temperatura taljenja je  $770^{\circ}\text{C}$ ). Mora se razlikovati između loma stakla i prskanja pri udaru, što može ukazivati na nasilni ulazak u prostoriju radi izazivanja požara. Udarni prijelomi mnogo su dulji i izraženiji od toplinskih projekcija. Zbog niskog koeficijenta vodljivosti staklo je otporno na nagle promjene temperature; Zagrijavanjem se postupno omekšava i topi. Kada dođe do nagle promjene temperature, raspada se u male komadiće. Pukotine na staklenim površinama nastaju u prvoj fazi razvoja požara, dok su kod udara groma krhotine stakla sitne i ostaju okrugle rupe koje ostaju skrivene izvana. Kod armiranog stakla staklo puca, ali se komadići malo odvajaju i čine svojevrsnu prepreku prolazu plamena. [24] Pri lomu stakla udarom kamena ili unošenjem zapaljive naprave nastaju karakteristični lomovi koji su dulji i izraženiji nego kod loma uslijed toplinskog djelovanja (Slika 11.).



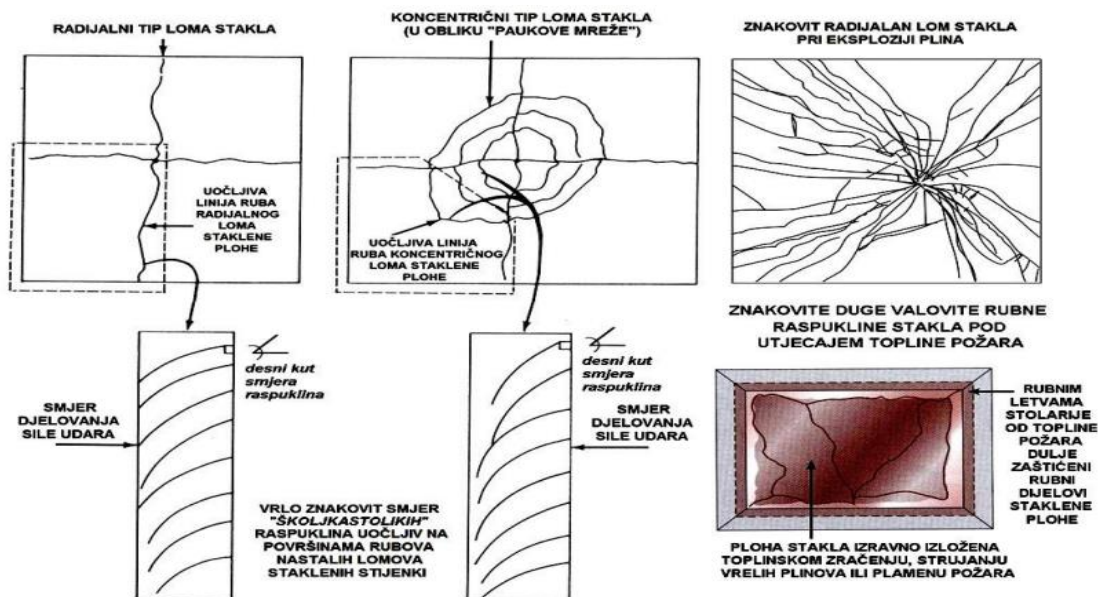
Slika 11. Lom stakla unošenjem zapaljive naprave [24]

Dok toplinski napuknuta (oštećena) prozorska stakla imaju vrlo izražene valovite pukotine (slika 12) i po slojevima čađe vidljivo je koliko su udaljena od požara. Čaše s obilnim naslagama dima i čađe pokazuju da su hladna stakla i najdalje su od vatre, dok su čaše s naslagama finog dima i čađe najbliže vatri.



Slika 12. Fragment stakla bez oštih rubova, iznimno oštećen toplinom [25]

Pukotine stakla se dijele na tri osnovna tipa: radijalni, koncentrični u obliku paukove mreže i znakoviti radijalni, a svi ostali su u osnovi pod utjecajem topline (Slika 13.)

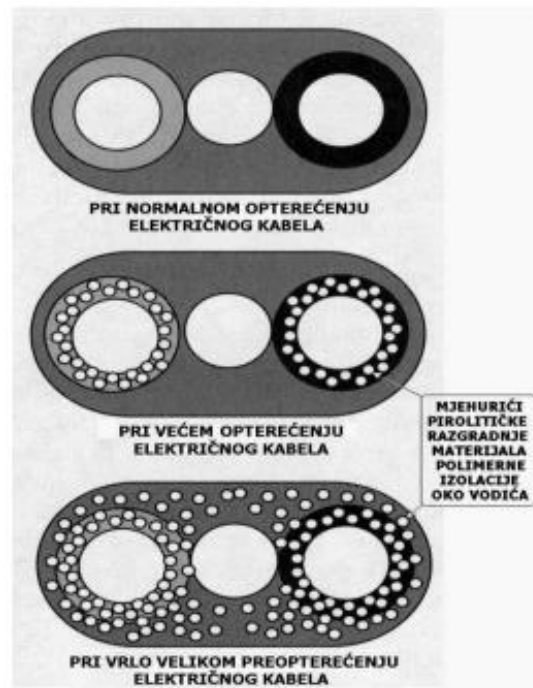


Slika 13. Tipovi lomova stakla [24]



## 5. 5. Preopterećenost vodiča

Znakoviti tragovi pregrijavanja električnih vodiča zbog njihova preopterećenja uočljivi u strukturi polimernog materijala njegove izolacije (Slika 14.).



Slika 14. Prikaz pojave mjehurića pirolitičke razgradnje materijala [24]

Osim pregrijavanja zbog preopterećenja u slučaju kratkog spoja, zgrada može biti opterećena i udarom groma. O tome svjedoče tragovi pougljenjenja na mjestu strujnog kabela zalijepljenog ispod (Slika 15.), što uzrokuje vidljivo pougljenje i na mjestu kupaonske električne višestruke sklopke (Slika 16.).



Slika 15. Podžbukno preopterećenje strujnog kabela [24]

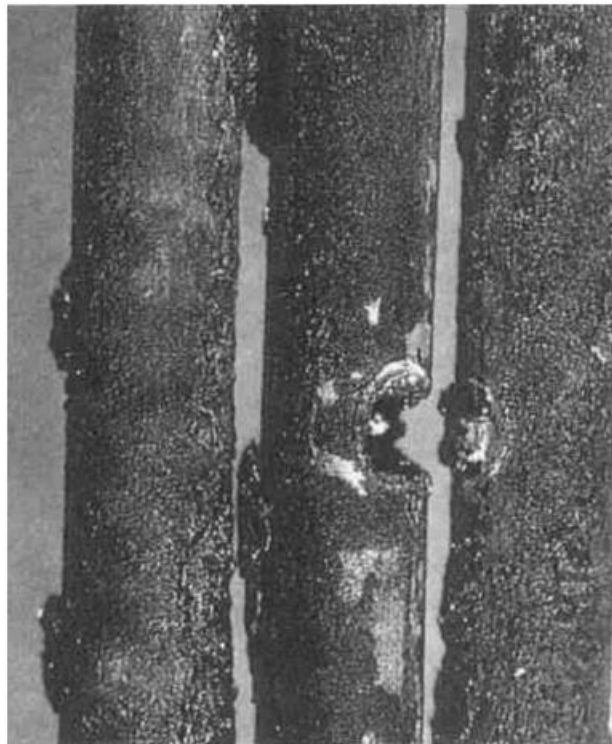


Slika 16. Karbonizacijsko začađenje na višestrukom prekidaču [24]

## 5.6. Tragovi topljenja nakon elektroničkog izboja

Uobičajeni znakovi taljenja električnih vodiča pod utjecajem luka su:

- izraženo razdvajanje između površine vodiča otopljenog lukom i neotopljenog dijela vodiča,
- zaobljeni, glatki oblik loma gledano s vodiča, jasno vidljiva kontaktna točka,
- jasna točka oštećenja uzrokovana lukom i prema suprotnom vodiču,
- izbočena točka na vodiču u obliku zrna (slika 17.),
- tragovi valova vraćanja rastaljenog bakra u čvrsto stanje,
- vidljivi ostaci trase napojnog bakrenog kabela do i iza mjesta nastanka njegova oštećenja te mjesto zaobljenog udubljenja,
- mala zrnca i rupice po ograničenoj površini vodiča oko mjesta izboja,
- visok stupanj unutarnje poroznosti vidljiv u presjeku kuglastog zaobljenja vodiča [24].



Slika 17. Ovalni tip oštećenja vodiča [24]

### 5. 7. Tragovi karbonizacije na životinjama

Nije rijetkost da kućni ljubimci ili razni glodavci izazovu kratki spoj ili požar žvačući električni izolacijski materijal, dodirujući ili igrajući se s neizoliranim električnim instalacijama ili uređajima pod naponom. U takvim se slučajevima na požarištu redovito i relativno lako pronađu pougljenjeni ostaci životinja, koje odmah uginu uslijed strujnog udara (Slika 18.).



Slika 18. Prikaz karbonizirane mačke [24]

Trupla karboniziranih četveronožnih kućnih ljubimaca možemo naći i u situacijama grube dječje igre ili maloljetničke “zabave“ s vatrom pri bezobzirnom paljenju krzna tih životinja. [24]

### 7. 8. Tragovi na negorivom materijalu - beton i žbuka

Ponašanje normalnog betona pri visokim temperaturama uglavnom je posljedica ponašanja njegovih komponenti, agregata i cementa. U većini slučajeva dodani agregati sadrže minerale silicija koji na temperaturama iznad 570 °C mijenjaju volumen i uzrokuju pukotine koje su vidljive na površini betona pucanjem i ljuštenjem površinskog sloja (slika 19).



Slika 19. Tragovi gorenja na betonu [24]

Promjene i posljedice nastale zbog djelovanja u požaru stvorenih visokih temperatura, su prikazani u (Tablica 4.).

Tablica 4. Temperaturne razlike [25]

Crnosmeđa boja	300°C
Siva boja	650°C
Mrvljenje betona	1.000°C
Taljenje betona	1.250°C

Gips se uglavnom sastoji od cementa, vapna i pijeska i služi kao vezivno sredstvo za zidane ili ožbukane površine. Pri visokim temperaturama vezivna tvar u vapnencu razlaže se na krutinu i plinoviti ugljikov dioksid. Žbuka gubi čvrstoću, puca i otpada sa zidnih ili stropnih površina izgorjelih zgrada (slika 20). Ovi otisci su nam od velike pomoći jer ukazuju na mjesta gdje su se tijekom požara dogodile visoke i dugotrajne temperature [25].





Slika 20. Otpala žbuka na intenzivnom djelovanju požara [25]

### 5. 9. Karbonizacija na drvetu

Sa stanovišta utvrđivanja uzroka i izvora požara, drvo je jedan od najprikladnijih materijala za procjenu. Osim izravnog djelovanja visokih temperatura, do zapaljenja drva najčešće dolazi konduktivnim provođenjem topline i to: - kod paljenja drvene grede krovne konstrukcije integrirane u dimnjak ili u neposrednoj blizini, - kod paljenja drvenog poda. (parket, daske) ispod peći na kruta goriva, - prilikom paljenja daske za glačanje ili zbog sličnog pregrijavanja uzrokovanog neizravnim kontaktom zagrijane ploče s drvenim materijalom [26].

Samo drvo počinje se širiti pri prvom zagrijavanju sve dok ne postigne temperaturu od oko 80°C. Tada proces širenja prestaje i drvo se skuplja. Tada ne gubi elastična mehanička svojstva,

budući da modul elastičnosti drva malo ovisi o temperaturi. Stoga je glavna prednost drvenih konstrukcija u slučaju požara to što se ne ruše u ključnom trenutku (30, 60 ili više minuta), što znači da vatrogasci svoj posao mogu pokušati obaviti što je brže moguće bez rizika od kolaps [24]. Sam plamen uvijek dolazi sa strane gdje je sloj ugljena mekši, a komadi napukle površine ugljena manji. Učinak ispuštanja plinovitih produkata kroz pougljenjeni sloj na površini drva vidljiv je u obliku ispucanih pravokutnika, nalik na krokodilsku kožu (slika 21).



Slika 21. Karbonizirani komad drveta - "krokodilska koža" [26]

Sami plinovi izgarajući na pougljenoj površini ostavljaju sloj pepela koji s vremenom postaje sve deblji i djeluje kao toplinski izolator, sprječavajući prolaz topline do središta drva. To može uzrokovati prestanak gorenja kasnije.

Na mjestima gdje su pukotine dublje i komadi "krokodilske kože" manji, gdje je vatra trajala duže. Tragovi na vratima i prozorima nakon požara uvijek pokazuju mjesto požara (slika 22).



Slika 22. Pojava tragova karbonizacije iz smjera požara [24]

Međutim, prije nego što se donese konačan zaključak, neophodno je proučiti razvoj požara, jer uvjeti konstrukcije, pregrade, zatvoreni prostori i druge razne prepreke mogu dovesti do toga da pojedina područja budu nedostupna tijekom procesa gašenja. Ne zaboravite na smjer strujanja zraka [25].



## 6. ZAKLJUČAK

Požar je svako nekontrolirano gorenje koje uzrokuje ili bi moglo uzrokovati ozljede osoba ili materijalnu štetu. U principu, svaki požar uzrokuje štetu, no opseg i intenzitet štete na ljudima i imovini uvelike varira ovisno o tome gdje se požar dogodio. Ako požar izbije na otvorenom prostoru, opasnost i stupanj štete ne mogu se mjeriti s požarima u običnim kućama i zatvorenim prostorima. Iako su materijalne štete uzrokovane velikim šumskim požarima goleme, ne mogu se usporediti s ljudskim gubicima. Proces požara u zatvorenoj prostoriji može se podijeliti u četiri faze: početnu fazu, fazu razvoja, fazu paljenja i fazu gašenja požara. Tijekom razvoja požara zatvorenog prostora mogu se pojaviti drugačije pojave nego kod požara otvorenog prostora. Osim smanjene vidljivosti i povišenih temperatura okoline, vatrogasci se mogu susresti sa zapaljivom mješavinom produkata izgaranja i zraka zbog nakupljanja topline i dima te loše evakuacije izvana zgrade.

Toplina je oblik energije izravno povezan s kretanjem atoma i molekula. Kada dva predmeta dođu u kontakt, jedan je topliji od drugog. S vremenom se hladniji objekt zagrijava, a topliji hladi. To se nastavlja sve dok se oba predmeta ne zagriju. Trenutak jednakosti, odnosno: toplina se prenosi s toplije tijelo prema hladnijem tijelu, sve dok temperatura tijela ne postane neuravnotežena. Da bi toplina mogla prelaziti s jednog mjesta na drugo ili s jednog predmeta na drugi, mora postojati razlika u temperaturi tih mjesta ili predmeta. Prolaz topline važan je fenomen na koji vatrogasci često moraju pravovremeno reagirati.

Temperatura je stupanj do kojeg je neki objekt zagrijan i predstavljena je kretanjem čestica (tj. atoma i molekula unutar njega). Temperatura je mjera toplinskog stanja tvari. Čestice, odnosno atomi i molekule unutar njih. Temperatura samozapaljivosti je temperatura do koje treba zagrijati tvar u prisutnosti zraka da bi se zapalila bez vanjskog izvora paljenja.

Eksplozija je iznenadna oksidacija koja rezultira trenutnim povećanjem temperature, tlaka ili oboje. Eksplozija plina ili prašine može se opisati kao rezultat brzog izgaranja plina/prašine pomiješanog sa zrakom,

Neki od učinaka eksplozije su velika buka i valovi pritiska koji mogu uzrokovati urušavanje zidova i pucanje stakla. Isto tako, snažne eksplozije mogu proizvesti toplinu, dim, plamen i druge smrtonosne posljedice.

Za eksploziju je potrebno gorivo (plin poput vodika ili prašina poput brašna), oksidans (kisik u zraku) i izvor paljenja (kao što je vruća površina ili električna iskra). Nakon što se postigne mješavina goriva i zraka i koncentracija goriva unutar granica eksplozivnosti, smjesa će se zapaliti ako izvor paljenja ima dovoljnu snagu.

Ovisno o vrsti izvora, eksplozije se dijele u tri osnovne skupine: fizičke eksplozije, kemijske eksplozije i atomske eksplozije.

## 7. LITERATURA

- [1] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49896>, pristupljeno 02.09.2023.
- [2] Pravilnik o razvrstavanju građevina u skupine po zahtjevanosti mjera zaštite od požara NN (92/10), pristupljeno 02.09.2023.
- [3] **Todorovski Đ:** „*Vatrogasna taktika*“, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, (2012.)
- [4] **Benković D., Todorovski Đ., Peretin S:** „*Sprječavanje pojave i širenja požara na informatičkoj opremi*“, Sigurnost 61, Stručni rad, (2019.)
- [5] **Grupa autora:** „*Priručnik za osposobljavanje vatrogasnih dočasnika i časnika*“, Hrvatska vatrogasna zajednica, Zagreb, (2006.), ISBN 953-6385-16-3
- [6] **Todorovski Đ:** *Vatrogasni uređaji i oprema*, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, (2012.)
- [7] **Besedić Ž.:** *Gorenje i gašenje*, Čakovec, (2011.)
- [8] **Matusinović Z.:** „*Ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara*“, Powerpoint prezentacija, kolegij Konstrukcijska protupožarna i protueksplozijska preventiva, Veleučilište u Karlovcu, (2019.)
- [9] *Toplinska vodljivost*, Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska\\_vodljivost](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_vodljivost), pristupljeno 09.09.2023.
- [10] **Matusinović Z.:** „*Ponašanje građevinskih i konstrukcijskih materijala u uvjetima požara*“, Powerpoint prezentacija, kolegij Konstrukcijska protupožarna i protueksplozijska preventiva, Veleučilište u Karlovcu, (2019.)
- [11] **Šimetin V.:** *Građevinska fizika*, Fakultet građevinski znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, (1983.)
- [12] "Određivanje toplinske vodljivosti izolacijskih materijala", [www.riteh.uniri.hr](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/4_toplinska_vodljivost.pdf), 2011, [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/laboratorijske\\_vjezbe\\_%2007/4\\_toplinska\\_vodljivost.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/4_toplinska_vodljivost.pdf) , pristupljeno 08.09.2023.

- [13] "Tehnički propis o ušeditoplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama", Hrvatske komore arhitekata i inženjera u graditeljstvu, [www.arhitekti-hka.hr](http://www.arhitekti-hka.hr), 2006.), <http://www.arhitekti-hka.hr/files/file/strucno-usavrsavanje/ssu/program/toplina.pdf>, pristupano 07.09.2023.
- [14] <https://myhouse-it.desigusxpro.com/sub/hr/strojmaterialy-i-tehnologii/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov#i-2>, pristupano 08.09.2023.
- [15] Toplinski kapacitet, Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski\\_kapacitet](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski_kapacitet), pristupljeno 10.10.2023.
- [16] **Jaković M., Slaviček I.:** „Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska”, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu Zagreb, (2010.)
- [17] **Generalić E.** "Toplinsko rastezanje." Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar. 20 lis. (2018.) KTF-Split., dostupno: <https://glossary.periodni.com>, pristupano 15.10.2023.
- [18] Toplinsko istezanje, Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko\\_istezanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko_istezanje), pristupljeno 10.10.2023.
- [19] **Benković D., Todorovski Đ., Peretin S.:** “*Sprečavanje pojave i širenja požara na informatičkoj opremi*”. Sigurnost, 61 (2), 133-144., (2019) <https://doi.org/10.31306/s.61.2.2>, pristupljeno: 11.10.2023.
- [20] **Achillides S., Gecelovská D.:** “7 opasnosti od eksplozija, Identifikacija i procjena rizika; Provođenje mjera”, Vodič za procjenu rizika u malim i srednjim poduzećima, Verlag Technik & Information e.K, Njemačka, 2010.
- [21] **Crowl D.:** „*Understanding Explosions*“, [books.google.hr](https://books.google.hr), pristupljeno 12.10. 2023
- [22] **Kulušić D.:** “*Tehnologija zaštite od požara i eksplozija*”, PPT, Veleučilište u Karlovcu, (2012.)
- [23] **Pavelić Đ.:** „*Opasne tvari Kako ih prepoznati i postupati s njima*“, Mi star, Novska, ISBN 953-6741-1-5, (2000.)
- [24] **Kulišić D.:** „*Metodika istraživanja požara i eksplozija*“, preslika u obliku pdf izvornika budućeg studijskog udžbenika i stručnog priručnika za službenike na poslovima kriminalističke policije te protupožarne, protueksplozijske i ine sigurnosti i zaštite, Zagreb, 2003.
- [25] Sjevneri.Info: Požar dimnjaka u Ivancu: U tijeku gašenje požara!, <https://www.sjevneri.info/pozar-dimnjaka-u-ivancu-u-tijeku-gasenje-pozara/>, pristupljeno 29.10.2023.

[26] **Blagojević M.:** „*Deo II - Tragovi požara na materijalima i delovima objekta*“, Powerpoint prezentacija, Ekspertiza udesa – (2013.)

## 8. PRILOZI

### 8.1. Popis slika

Slika 1. Faze razvoja požara .....	10
Slika 2. - Linearni tok topline kod provođenja ili kondukcije topline .....	17
Slika 3. – Prikaz ovisnosti toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke .....	19
Slika 4. - Dijagram vrijednosti toplinskog kapaciteta za opeku, beton i mineralnu vunu.....	23
Slika 5. - Dijagrami promjene vrijednosti veličine toplinske difuzivnosti čelika i zida s promjenama njihovih temperature .....	25
Slika 6. Primjer razvoja stupa požara .....	42
Slika 7. Prikaz tlocrtnog, bokocrtnog te prostornog izgleda traga tipa „U“ .....	42
Slika 8. Prikaz tlocrtnog, bokocrtnog te prostornog izgleda traga tipa „U“ .....	43
Slika 9. Prikaz izbijanja požara kroz vanjske prozore.....	44
Slika 10. Znakoviti trag izgaranja lokve gorive kapljevine .....	45
Slika 11. Lom stakla unošenjem zapaljive naprave .....	45
Slika 12. Fragment stakla bez oštih rubova, iznimno oštećen toplinom ,.....	46
Slika 13. Tipovi lomova stakla .....	46
Slika 14. Prikaz pojave mjehurića pirolitičke razgradnje materijala .....	47
Slika 15. Podžbukno preopterećenje strujnog kabela .....	48
Slika 16. Karbonizacijsko začađenje na višestrukom prekidaču .....	48
Slika 17. Ovalni tip oštećenja vodiča .....	49
Slika 18. Prikaz karbonizirane mačke .....	50
Slika 19. Tragovi gorenja na betonu .....	51
Slika 20. Otpala žbuka na intenzivnom djelovanju požara .....	52
Slika 21. Karbonizirani komad drveta - "krokodilska koža" .....	53
Slika 22. Pojava tragova karbonizacije iz smjera požara .....	54

## 8.2. Popis tablica

Tablica 1. Koeficijent toplinske vodljivosti materijala .....	22
Tablica 2: Zone na temelju učestalosti i trajanja eksplozivne atmosfere.....	31
Tablica 3. Vremensko ograničenje zona.....	32
Tablica 4. Temperaturne razlike .....	51