

Vatrousporavajući premazi za drvo

Kristić, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:849784>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-09**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
ZAVOD ZA NAMJEŠTAJ I DRVNE PROIZVODE

POVRŠINSKA OBRADA DRVA

DENIS KRISTIĆ

VATROSPORAVAJUĆI PREMAZI ZA DRVO

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
ZAVOD ZA NAMJEŠTAJ I DRVNE PROIZVODE

VATROUSPORAVAJUĆI PREMAZI ZA DRVO

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Površinska obrada drva

Studij: Preddiplomski studij Drvna tehnologija

Mentor: prof. dr. sc. Vlatka Jirouš-Rajković

Student: Denis Kristić, 0068237027

Akademska godina: 2022./2023.

Zagreb, Rujan, 2023.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Vatrousporavajući premazi za drvo
Autor:	Denis Kristić
JMBAG:	0068237027
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Završni rad
Mentor:	Prof.dr.sc. Vlatka Jirouš-Rajković
Izradu rada pomogao:	
Godina objave:	2023.
Obujam:	28 str., 12 slika, 5 tablica, 23 navoda literature
Ključne riječi:	Zapaljivost drva, vatrootpornost, vatroodbojni premazi za drvo, upjenjujući premazi za drvo, ablacijski premazi za drvo
Sažetak:	<p>Jedan od glavnih nedostataka drva kao materijala je njegova sposobnost gorenja čime se može značajno ugroziti sigurnost ljudi i imovine. Iz tog razloga razvijeni su vatroodbojni premazi. Vatroodbojni premazi svojom sposobnošću zaštite podloge od gorenja čine ključnu ulogu u zaštiti drvenih elemenata od požara. U ovom radu opisan je europski sustav klasifikacije građevnih materijala prema kojem drvo i drvni proizvodi pripadaju razredu D, a ako su obrađeni vatroodbojnim premazima mogu zadovoljiti zahtjeve razreda B. Opisana je gorivost drva, požarna svojstva drva, te kako i na koji način djeluju upjenjujući i ablacijski vatroodbojni premazi za drvo, također navedeni su i neki primjeri vatroodbojnih premaza za drvo.</p>

BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	Fire retardant coatings
Author:	Denis Kristić
JMBAG:	0068237027
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Science, University of Zagreb
Publication Type:	Undergraduate thesis
Supervisor:	Prof.dr.sc. Vlatka Jirouš-Rajković
Preparation Assistant:	
Publication year:	2023.
Volume:	28 pages, 12 figures, 5 tables and 23 references
Key words:	wood flammability, fire resistance of wood, fire-resistant coatings, intumescent wood coatings, ablative wood coatings
Abstract:	<p>One of the main drawbacks of wood as a material is its susceptibility to combustion, which can pose a significant risk to the safety of people and property. For this reason, fire-resistant coatings have been developed. Fire-resistant coatings, with their ability to protect the substrate from burning, play a key role in protecting wooden elements from fire. This paper describes the European classification system for construction materials, in which wood and wood products belong to Class D, but when treated with fire-resistant coatings, they can meet the requirements of Class B. The flammability of wood, the fire properties of wood, and the mechanism of action of intumescent and ablative fire-resistant coatings are described in this work. Additionally, some examples of fire-resistant coatings for wood are provided.</p>

	IZJAVA	OB FŠDT 05 07
	O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagrebu, 27.9.2023. godine

vlastoručni potpis

Denis Kristić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	V
1. UVOD	1
2. POŽARNA SIGURNOST	2
2.1. Požar u nastanku	2
2.2. Europski sustav klasifikacije požarne otpornosti građevinskih materijala	3
2.3. Američki sustav	6
3. DRVO KAO ZAPALJIVI MATERIJAL	7
3.1. Gorivost drva	7
3.2. Usporavanje gorenja drva	9
4. PREMAZI ZA USPORAVANJE GORENJA DRVA	13
4.1. Općenito o vatrousporavajućim premazima	13
4.2. Upjenjujući usporivači gorenja	14
4.3. Ablacijski premazi	16
5. PRIMJERI VATROUSPORAVAJUĆIH PREMAZA NA TRŽIŠTU	18
5.1. Vatrousporavajući premaz PROMADUR®	20
5.2. FlameOFF®	22
5.2.1. FlameOFF® Fire Barrier Paint	22
5.2.2. FlameOFF® FR Clear	22
5.3. TEKNOS®	23
6. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA	26

1. UVOD

Drvo je jedan od najpopularnijih građevinskih materijala zbog svoje estetike, lakoće obrade i ekološke prihvatljivosti. Međutim, drvo ima svoje inherentne slabosti, od kojih je jedna od najznačajnijih osjetljivost na požar. Požar može brzo uništiti drvene konstrukcije, ugroziti sigurnost ljudi i imovine, te prouzročiti ozbiljne ekonomske gubitke. U svrhu minimiziranja tih rizika, razvijeni su vatroodbojni premazi za drvo.

Ovaj rad fokusira se na analizu vatroodbojnih premaza za drvo, istražujući različite aspekte njihove primjene u kontekstu gorivosti drva. Vatroodbojni premazi za drvo su posebne formulacije koje se nanose na drvene površine kako bi se usporila brzina širenja požara i smanjila šteta koju požar može prouzročiti. Ovi premazi igraju ključnu ulogu u očuvanju strukturalnog integriteta drvenih materijala tijekom požara i omogućuju dodatno vrijeme za evakuaciju ili gašenje požara. Upravo zbog toga, vatroodbojni premazi se često koriste kako bi se drvo zaštitilo od vatre u komercijalnim i industrijskim aplikacijama, poput stambenih zgrada, hotela, uredskih prostora, škola i drugih objekata. Tretmani za usporavanje požara drva mogu se podijeliti u tri klase: 1) impregnacija drva sa sredstvom za usporavanje požara korištenjem vakuuma i nadtlaka, 2) dodavanje sredstva za usporavanje požara kao površinska obrada i 3) dodavanje sredstva za usporavanje požara proizvodu tijekom njegovog procesa proizvodnje. U ovome radu objasniti ćemo na koji način i kojim sredstvima možemo usporiti proces razvitka požara u ključnim trenucima pomoću vatroodbojnih premaza.

2. POŽARNA SIGURNOST

Sigurnost od požara uključuje prevenciju, detekciju, evakuaciju, suzbijanje i gašenje požara. Prevencija požara u osnovi znači sprječavanje održivog paljenja zapaljivih materijala kontroliranjem izvora topline ili samih zapaljivih materijala. To uključuje pravilno projektiranje, instalaciju ili konstrukciju te održavanje zgrade i njenog sadržaja. Adekvatne mjere sigurnosti od požara ovise o vrsti zauzeća ili procesima koji se odvijaju unutar zgrade. Jedna od mnogih mjera je dodavanje vatrosporivača u same nosive i nenosive građevinske proizvode (White i Dietenberger, 2010).

2.1. Požar u nastanku

Razvijanje plamena predstavlja ključni način širenja požara koji možemo opisati u četiri različite faze. Od tih faza, dvije su posebno važne: faza početka požara i puna požarna faza, a svaka od njih karakterizira različito ponašanje materijala. Faza početka požara (zapaljenje i širenje) obuhvaća niz različitih procesa, uključujući način kako materijal gori, stupanj zapaljivosti, brzinu širenja vatre po površini i intenzitet prijenosa topline. Tijekom ove faze, temperatura raste postupno i gotovo linearno, zapaljive tvari prisutne su u ograničenim količinama, zagrijavanje okoline (kao što su zidovi, stropovi) usporava se i oni još uvijek zadržavaju hladnoću, što potiče upijanje topline. Također, vlaga isparava iz svih materijala. "Vatreni skok" (flash-over) označava prijelaz iz faze početka u fazu punog požara i predstavlja kritičnu točku bez povratka. Tijekom ove faze temperatura rapidno raste, a plinovi koji nastaju reagirajući sa zrakom stvaraju zapaljivu mješavinu. Zbog intenzivnog toplinskog izlučivanja, temperatura okoline raste do razine potrebne za samozapaljenje, a potom se ubrzano povećava, često dosežući 500/600 °C (ovisno o vrsti goriva i prisutnoj količini inhibitora gorenja) u razdoblju od 5 do 25 minuta (Pavelić, 2015).

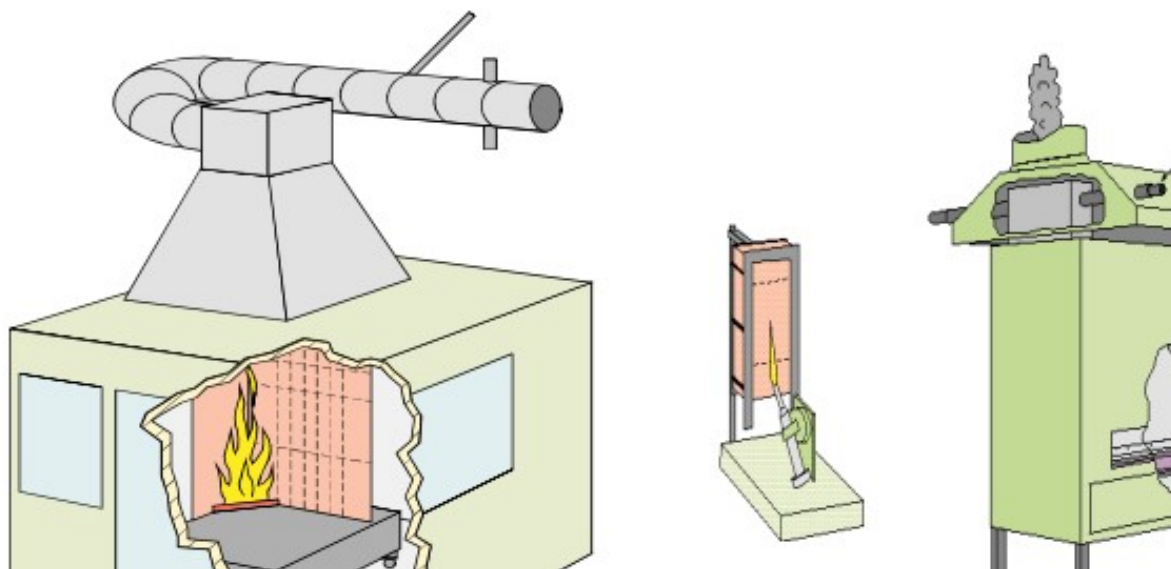
Vrijeme tijekom kojeg konstrukcija i njezini dijelovi moraju zadržati navedene karakteristike tijekom požara naziva se minimalnim vremenom otpornosti na požar. To je najkraće razdoblje u kojem su ispunjeni svi postavljeni zahtjevi za očuvanje funkcionalnosti konstrukcije i njezinih elemenata tijekom požarnog događaja (Pavelić, 2016).

2.2 Europski sustav klasifikacije požarne otpornosti građevinskih materijala

Točno je da Europska unija ima regulative i direktive koje se odnose na sigurnost u slučaju požara. Ove regulative i smjernice imaju za cilj osigurati visoke standarde požarne sigurnosti i time zaštititi ljudske živote i imovinu. Građevni elementi klasificirani su u različite skupine ili razrede prema njihovom utjecaju na rizik od zapaljenja, širenje vatre i stvaranje dima. Osim toga, definirane su metode ispitivanja koje se koriste za klasifikaciju proizvoda. Postoje tri metode ispitivanja za određivanje razreda gorivosti različitih proizvoda. Metode ispitivanja i svojstva požara korištena za klasifikaciju prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz europskih ispitnih metoda za određivanje zapaljivosti (Ostman i Mikkola, 2006)

Metoda ispitivanja	Građevinski proizvodi (bez podova)	Podovi	Glavna izmjerena svojstva požara korištena za klasifikaciju
Ispitivanje pojedinačnim izvorom plamena (HRN EN 11925-2) <i>Small flame test</i>	x	x	plamen se proširio unutar 60 ili 20 sekundi
Ispitivanje pojedinačno gorućeg elementa (HRN EN 13823: 2020) <i>Single burning item (SBI)</i>	x	–	FIGRA, Fire Growth Rate; SBI EN 13823 (2002) - SMOGRA, SMOke Growth Rate; plamene kapljice ili čestice
Ispitivanje uporabom izvora koji zrači toplinu (HRN EN ISO 9239-1):2011 <i>Radiant panel test</i>	–	x	CHF, Critical Heat Flux; proizvodnja dima



Slika 1. Prikaz metoda ispitivanja gorivosti; Lijevo: *Single burning item test (SBI)*, u sredini:) *Small flame test*, desno: *Radiant panel test* (Östman i Tsantaridis, 2016)

Ova nova europska klasifikacija, poznata kao Euro-class sustav, podrazumijeva podjelu građevinskih proizvoda u sedam različitih grupa na temelju njihovih reakcija na požar. Razredba građevinskih proizvoda ima dva podsustava: jedan obuhvaća konstrukcijske proizvode poput stropnih i zidnih obloga, bez podnih obloga, te drugi koji obuhvaća samo podne obloge. Ovisno o rezultatima ispitivanja, materijali se mogu svrstati u različite Euroklase (A1, A2, B, C, D, E, i F), pri čemu A1 označava najvišu razinu otpornosti na požar, dok F označava najnižu razinu (Östman i Tsantaridis, 2016).

U tablici 2. možemo vidjeti podjelu i ponašanje različitih materijala u požaru prema navedenoj europskoj normi. Materijali su kao što je prethodno rečeno kategorizirani u sedam klasa, dok s kombinacijom parametara ispitivanja reakcija na požar, stvaranje dima (s), te stvaranje gorivih kapljica (d). Time dobivamo četrdeset klasa po kojima se razvrstavaju građevinski materijali. Proizvodnja dima označava se malim slovom 's'. Radi se o progresivnom indeksu u kojem s_0 označava vrlo malo dima, dok s_2 označava značajno veću količinu dima. Gorive kapljice su čestice koje se mogu odvojiti od površine koja gori i imaju sposobnost širenja požara. One se označavaju slovom 'd', pri čemu d_0 označava da nema plamenih kapljica, dok d_2 ukazuje na značajnu količinu kapljica. Za drvene podloge uvijek se očekuje postizanje razine d_0 (WPA 2019).

Podne obloge razvrstavaju se prema istim klasama kao i građevinski materijali, a slovnu oznaku slijedi kratica „fl“ (npr. A1_{fl}).

Tablica 2. Razredba građevinskih proizvoda i njihovo ponašanje u požaru (Ostman i Mikkola, 2006)

KLASA	Ponašanje u požaru	Materijali
A1	materijal koji ne doprinosi požaru	izolacijski proizvodi od prirodnog kamena, opeke, keramike, stakla
A2	materijal koji zanemarivo malo doprinosi požaru	proizvodi iz klase A1, ali koji sadržavaju malu količinu organskog materijala
B	materijal koji u fazi razvoja požara vrlo malo doprinosi razvoju požara	gipsane ploče s različitim oblogama, drvo obrađeno vatro usporivačima
C	materijali koji imaju mogućnost zapaljenja te kod požara vrlo ograničeno širenje i oslobađanje energije	fenolna pjena, gipsane ploče s različitim oblogama tanjim od one u klasi B
D	materijali koji imaju mogućnost zapaljenja te kod požara ograničeno širenje i prihvatljivo oslobađanje energije	drveni proizvodi debljine veće od 10 mm i gustoće veće od 400 kg/m ³
E	materijali koji su kod izuzetno malog požara (plamen šibice) zapaljivi i šire plamen	vlaknaste ploče, proizvodi od plastike
F	lakozapaljivi materijali (bez zahtjeva glede ponašanja u požaru)	proizvodi koji nisu ispitani na požar

U tablici 2. također je vidljivo da su drvo i drveni proizvodi prema ponašanju u požaru svrstani u klasu D. Ako su obrađeni materijalima za usporavanje gorenja, mogu biti svrstani u razred zapaljivosti B.

2.3 Američki sustav

Klasifikacije otpornosti na požar u Sjedinjenim Američkim Državama obično se uspostavljaju putem različitih građevinskih propisa i organizacija za normizaciju. Najpoznatija organizacija u SAD-u za utvrđivanje klasifikacija otpornosti na požar je Nacionalna asocijacija za zaštitu od požara (NFPA), posebno NFPA 101, Kodeks za životnu sigurnost, i NFPA 5000, Kodeks za građevinsku izgradnju i sigurnost. Ovi propisi definiraju različite ocjene otpornosti na požar za građevinske komponente i sklopove, kao što su zidovi, podovi, vrata i stropovi.

Klasifikacija otpornosti na požar obično se izražava u vremenskom trajanju (u minutama ili satima) tijekom kojeg građevinska komponenta ili sklop može izdržati izloženost požaru prije nego što ne zadovolji određene kriterije. Ovi kriteriji često uključuju očuvanje strukturalnog integriteta, sprječavanje širenja požara i ograničavanje prolaska dima i otrovnih plinova. Vatrosigurnosni propisi klasificiraju materijale (uključujući vatroodbojne premaze za drvo i ostale materijale) od klase A do E. Klasa A je najotpornija na vatru prema ocjeni širenja plamena, dok je klasa E najmanje otporna.

Tablica 3. Američki sustav razredbe materijala prema otpornosti i brzini širenju vatre
(<https://www.coatingpaint.com/fireproof-paints/>)

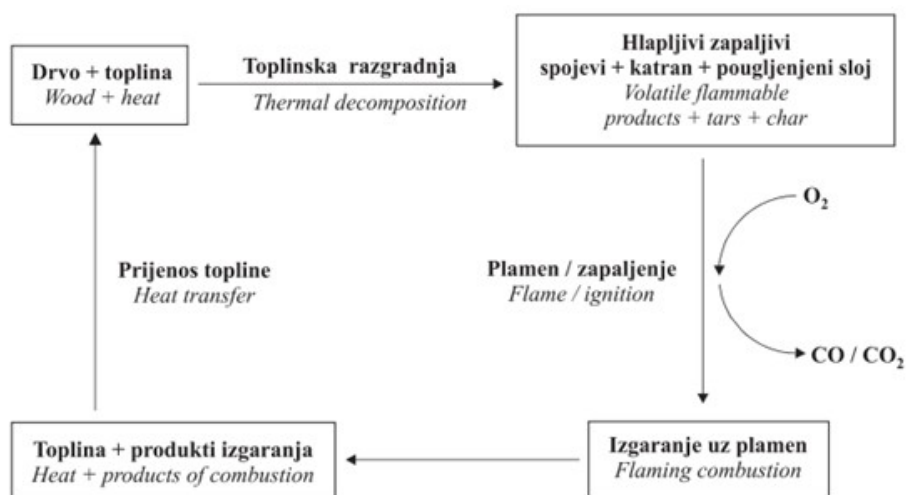
KLASA	Brzina širenja plamena	Otpornost prema širenu vatre
Klasa A	0 - 25	odlična
Klasa B	26 - 75	umjerena
Klasa C	76 - 200	blaga
Klasa D	201 - 500	nema
Klasa E	500 +	nema

3. DRVO KAO ZAPALJIVI MATERIJAL

3.1. Gorivost drva

Drvo kao protupožarni materijal ima praktično najbolja svojstva za uporabu kao graditeljsko konstrukcijski materijal u odnosu na beton ili čelik. Dakako, drvo gori, međutim drvo samim gorenjem stvara zaštitni pougljeni sloj koji ima jako nizak koeficijent vodljivosti topline čime drvo samo sebe štiti. Uporabom usporivača gorenja, odnosno uporabom vatroodbojnih premaza zapaljivost drva se može smanjiti. Važno je znati da bilo kakav sustav zaštite ne može učiniti drvo potpuno otpornim na vatru. Sam proces gorenja drva možemo razjasniti na sljedeći način.

Pri povišenoj temperaturi dolazi do razdvajanja kemijskih veza unutar drva, proces koji se zove piroliza. Tijekom pirolize, stvaraju se tri glavna proizvoda: čvrsti ostatak (poznat kao pougljenjeni sloj), tekući ostatak (katran) i hlapljivi plinovi. Hlapljivi plinovi se miješaju s okolnim zrakom i ako temperatura dosegne točku paljenja, pokreće se egzotermna reakcija gorenja. U situacijama kada se nakupi dovoljno topline za emitiranje zračenja u vidljivom spektru, dolazi do gorenja s plamenom, što se događa u parnoj ili plinovitoj fazi. Ovisno o vrsti drva i uvjetima gorenja, hlapljivi plinovi reagiraju s kisikom kako bi stvorili ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Toplina generirana ovim egzotermnim reakcijama dodatno potiče pirolizu drva i pougljenjenog sloja, oslobađajući još više hlapljivih spojeva. Ovaj proces se nastavlja sve dok ne ostane samo pepeo i dok se sve hlapljive tvari ne oslobode. (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009). Na slici 1. prikazan je ciklus gorenja drva.



Slika 2. Prikaz ciklusa gorenja drva (Marley, 2005)

Tablica 4. Temperaturni rasponi piroze i izgaranja drva (Lowen i Hull, 2013)

Područje temperature	Procesi raspadanja
> 100 °C	Isparavanje kemijski nevezane vode
< 160 - 200 °C	Tri polimerne komponente drva počinju se sporo raspadati. Plinovi koji nastaju u ovoj fazi su nezapaljivi (uglavnom H ₂ O)
< 200 - 225 °C	Piroliza drva je i dalje vrlo usporena, a većina proizvedenih plinova je nezapaljiva
< 225 - 275 °C	Glavna piroliza započinje i plamensko izgaranje će se dogoditi uz pomoć pilot plamena
< 280 - 500 °C	Proizvedeni plinovi sada su isparljivi (CO, metan itd.). Vidljive su čestice dima. Ugljen se formira brzo kako se fizička struktura drva narušava
> 500 °C	Proizvodnja hlapivih tvari je završena. Ugljen se nastavlja topiti i oksidirati te tvori CO, CO ₂ i H ₂ O.

U tablici iznad vidljivi su procesi u drvu prilikom temperaturnih promjena koje uzrokuju izgaranje drva. Modifikacija procesa pirolize predstavlja najčešću, najpoznatiju, jednostavnu i ekonomičnu metodu obrade materijala kako bi se usporilo njihovo sagorijevanje. U ovom procesu, drvo se tretira supstancama koje ubrzavaju pirolizu molekula celuloze, što obično rezultira formiranjem sloja ugljena (Bjelanović, 2011). Ideja je da se reakcije odvijaju tako da se celuloza razloži u sloj ugljena i vodu, što bi bio idealan ishod.

Plinovi izgaranja koji se razvijaju tijekom pirolize mogu se razrijediti plinovima koji se oslobađaju iz usporivača gorenja. Jedan primjer je sredstvo za usporavanje gorenja kao npr. aluminijev hidroksid koji oslobađa vodenu paru na temperaturama neposredno ispod temperature toplinske degradacije. Drugi primjer je sredstvo za usporavanje gorenja koje ispušta ugljični dioksid ili neki drugi nezapaljivi plin, što su primjeri impregnacijskog sustava zaštite drva od požara (URL 1).

3.2 Usporavanje gorenja drva

Iako je potrebna značajna količina energije da bi se drvo i materijali na temelju drva zapalili, oni jesu zapaljivi. Usprkos mogućnosti za smanjenjem njihove zapaljivosti impregnacijom ili primjenom zaštitnih premaza, materijale od drva ne možemo učiniti potpuno nezapaljivima. Konkretni stupnjevi zapaljivosti ovise o faktorima kao što su gustoća drva, botanička vrsta, sadržaj vlage te omjer obujma i presjeka elemenata. Prilikom zapaljenja drva, vatra se širi površinom, pokrećući nove točke zapaljenja, no brzina širenja plamena relativno je niska za materijale koji su klasificirani kao zapaljivi. U ispitivanju drvnih proizvoda u prirodnoj veličini prema ISO 9705 standardu, može se primijetiti da se požar na neobrađenom drvu razvija iz faze početnog razvoja u fazu potpunog razvoja (flashover) požara za samo tri minute. No, kada se koristi drvo obrađeno usporivačima gorenja, taj se proces može dogoditi čak 20 minuta ili čak i dulje.

Usporivači gorenja djeluju na način da usporavaju ili čak u rijetkim slučajevima potpuno zaustavljaju proces sagorijevanja. Drugim riječima, ova sredstva usporavaju ili odgađaju zapaljenje, formiranje plinova, širenje požara, oslobađanje otrovnih plinova, ispuštanje korozivnih spojeva i prijenos topline. Koriste se radi zaštite metala, različitih polimera, tekstila, te nama najbitnijeg materijala, drva. Ovisno o njihovom sastavu, oni mogu usporiti proces gorenja putem fizičkih, kemijskih ili kombiniranih fizičkih i kemijskih mehanizama (Marney i sur., 2005). Daljnji mehanizmi usporivača gorenja ilustrirani su na slici 3.

Fizikalni procesi usporavanja gorenja pomoću usporivača gorenja:

- a) Hlađenje: Dodaci aktiviraju endotermni proces koji izvlači toplinu iz podloge, snižavajući njenu temperaturu ispod razine potrebne za proces gorenja.
- b) Stvaranje zaštitnog sloja: Podloga može biti zaštićena slojem materijala, bilo krutim ili plinovitim, čime se smanjuje izloženost kisiku i sprječava prijenos topline. Ovo također smanjuje količinu plinova koji nastaju tijekom pirolize.
- c) Razrjeđivanje smjese plinova: Dodavanjem aditiva koji se razgrađuju u inertne plinove, smanjuje se koncentracija gorivih plinova u smjesi, čime se oslabljuje reakcija sagorijevanja.

Kemijske reakcije usporavanja gorenja mogu se događati u dvije različite faze gorenja:

a) Plinovita faza: Usporivači gorenja prekidaju stvaranje slobodnih radikala, što dovodi do zaustavljanja egzotermne reakcije. To rezultira smanjenjem količine gorivih plinova i smanjenjem temperature. Primjerice, halogeni usporivači gorenja djeluju na ovaj način.

b) Kruta faza: Usporivači gorenja stvaraju sloj ugljika na površini goriva, izolirajući ga od kisika i topline. Primjerice, fosforni spojevi djeluju na ovaj način kako bi usporili proces gorenja u krutoj fazi.

Razlikujemo dvije vrste sredstava za usporavanje požara: reaktivne i aditivne. Kombinacijom tih sredstava može se postići sinergijski učinak koji ima značajnu praktičnu važnost, jer omogućuje smanjenje količine sredstava za usporavanje požara bez smanjenja njihove učinkovitosti. Ove vrste sredstava opisane su u nastavku. Reaktivna sredstva za usporavanje požara kemijski su povezana s materijalom putem kovalentne veze, čime se sprječava ispiranje ili isparavanje sredstava za usporavanje požara i time se zadržava njihova vatrostalnost. Aditivna sredstva za usporavanje požara dodaju se materijalu i nisu kovalentno povezana s njim. Slabije, sekundarne kemijske interakcije kao što su vodikove veze ili dipol-dipol interakcije mogu doprinijeti zadržavanju aditiva u materijalu, na način sličan tome kako se neka zaštitna sredstva zadržavaju u drvenoj strukturi. Kombinacijom aditivnih i reaktivnih sredstava za usporavanje požara moguće je postići aditivni, sinergijski ili antagonistički učinak. Dok aditivni učinak predstavlja zbroj pojedinačnih učinaka, sinergijski i antagonistički učinci su, redom, veći i manji od tog zbroja. Sinergisti ne pokazuju značajnu učinkovitost kad se koriste samostalno, već se sinergijski učinak ostvaruje kad se koriste zajedno s određenim sredstvima za usporavanje požara. Sustavi sredstava za usporavanje požara i sinergista dobili su veliku praktičnu važnost jer su obično ekonomičniji od pojedinačno korištenih sredstava za usporavanje požara (Russell i sur., 2004).

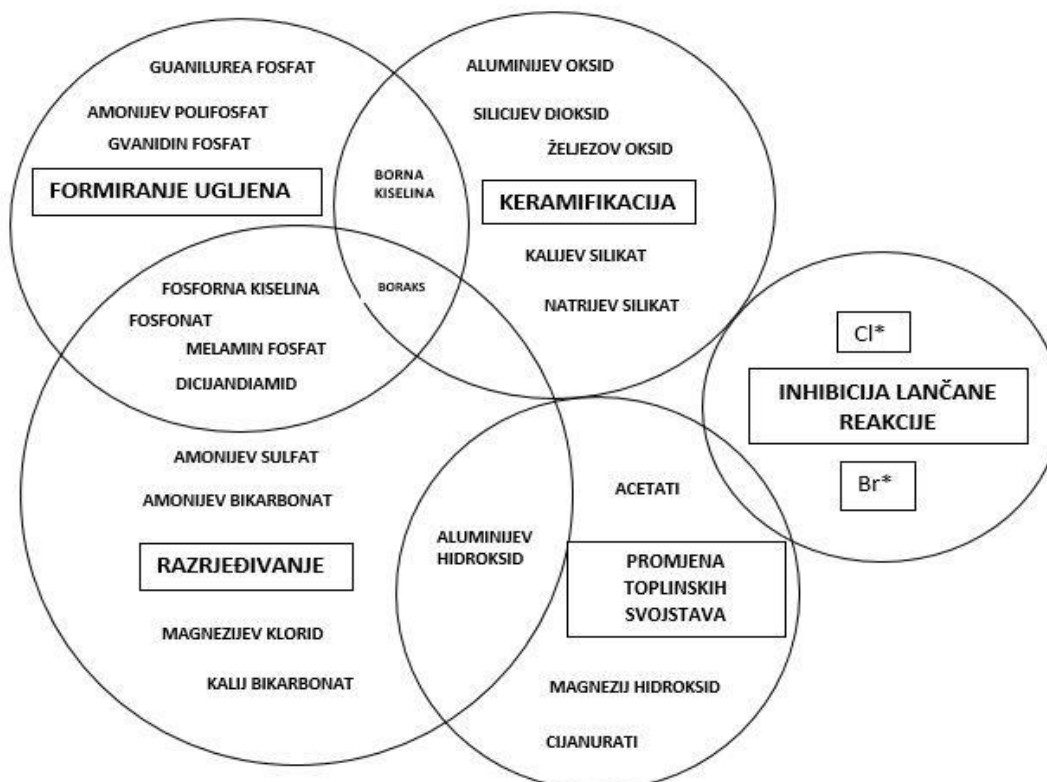
Materijali koji se koriste za usporavanje gorenja drva obično su proizvedeni od fosfora, dušika, bora, aluminijskih hidroksida i nekoliko drugih spojeva (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009.) Usporivači gorenja mogu se podijeliti u tri glavne kategorije: anorganski usporivači gorenja (čine oko polovine svjetske proizvodnje), halogenirani proizvodi (čine oko četvrtine proizvodnje) i organofosforni proizvodi (čine oko 20% svjetske proizvodnje), (Van Esch, 1997.) Osnovni premazni materijali za usporavanje gorenja obično sadrže halogene elemente poput klora ili broma, fosfor, dušik, bornu kiselinu, boraks ili anorganske metalne spojeve kao

glavne komponente u njihovoj formulaciji. Njihova prisutnost pomaže u suzbijanju širenja plamena tako što sprječava širenje slobodnih radikala i/ili stvaranje staklastih ili pjenastih zaštitnih slojeva. (Popescu i Pfriem 2019).

Hakkarinen i sur. (2005), kako je citirano u istraživanju Jirouš-Rajković i Miklečić (2009), detaljno objašnjavaju kako materijali za usporavanje gorenja djeluju na proces na način prikazan na slici 3:

- mijenjaju tijek pirolize.
- stvaraju zaštitni izolacijski sloj na površinama.
- promjenjuju toplinska svojstva materijala.
- razrjeđuju plinove koji nastaju tijekom pirolize.
- prekidaju lančanu reakciju gorenja.

Sredstva za usporavanje gorenja uglavnom su dostupna u obliku praška, pjene, gela i tekućine, kako bi odgovarala materijalima koji se razlikuju po svojoj fizičkoj prirodi i kemijskom sastavu (Ali i sur., 2019)



Slika 3. Način djelovanja materijala za usporavanje gorenja
(Lowden i Hull, 2013)

Sredstva za usporavanje gorenja obično se ili nanose kao premaz na površinu drva ili impregniraju u strukturu drva koristeći vakuum-tlačnu tehniku. Kada se radi o impregnaciji, struktura drva se opisuje kao slična strukturi spužve, s šupljinama i staničnim stijenkama. Cilj primjene sredstava za usporavanje gorenja je obložiti ove stijenke kako bi se zaštitila struktura od požara. Prvo, vakuum uklanja zrak iz šupljina kako bi se stvorio prostor za otopinu sredstva za usporavanje gorenja, koja se potom pod visokim pritiskom gura duboko u drvo. Postupak se može ponavljati, a parametri se mogu prilagoditi kako bi se optimizirao tretman, ovisno o razini zaštite i potrebnom profilu dubine usporivača gorenja kroz drvo. Međutim, korištenje zaštitnih premaza s usporivačima gorenja privlačnije je mnogim korisnicima zbog jednostavnosti primjene i relativno malih količina materijala potrebnih za zaštitu od požara. (Lowden i Hull, 2013).

4. PREMAZI ZA USPORAVANJE GORENJA DRVA

4.1. Općenito o vatrousporavajućim premazima

Usporivači gorenja su tvari koje se dodaju nekim materijalima za premaze kako bi usporile, zaustavile ili suzbile rizik od požara kod premazanih proizvoda. Drvo, njegovi derivati i premazni filmovi su organski materijali koji mogu gorjeti kada su izloženi otvorenom plamenom ili visokim temperaturama u prisutnosti kisika. Prisutnost otvorenog plamena i visokih temperatura tipično je za požare, stoga, zbog sigurnosnih propisa, u određenim okolnostima određeni proizvodi (npr. Podne i zidne obloge) trebaju biti premazani odgovarajućim premazima za sprečavanje širenja vatre (Bulian i Graystone, 2009).

Premazi za usporavanje gorenja drva mogu ometati proces gorenja u svim stadijima razvitka požara: tijekom zagrijavanja, razgradnje, zapaljenja ili širenja plamena (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009).

Materijali za premazivanje su složeni kemijski proizvodi uključujući lakove, boje i slične proizvode. U većini slučajeva, premazi se sastoje od veziva (također poznatih kao film formers), pigmentata, aditiva za poboljšanje svojstava, otapala i ostalih dodataka. Osim svoje osnovne funkcije usporavanja gorenja, idealan premaz za drvo također se definira na temelju njegovog utjecaja na hidrofobnost, čvrstoću, zaštitu od oksidacije, otpornost na UV zračenje i trajnost (Liu i sur., 2017).

Premazi koji usporavaju gorenje obično se dijele na izolacijske ili ablacijske materijale. Izolacijski materijali, s druge strane, mogu se dalje podijeliti na pasivne i kemijski reaktivne tipove. Pasivni izolacijski materijali sadrže negorive mineralne dodatke kao što su liskun ili perlit. Kemijski reaktivni izolacijski materijali uključuju kemijske spojeve koji reagiraju na visokim temperaturama, stvarajući pjenasti karbonizirani sloj, poznat kao intumescentni sloj, koji služi kao zaštita za podlogu (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009).

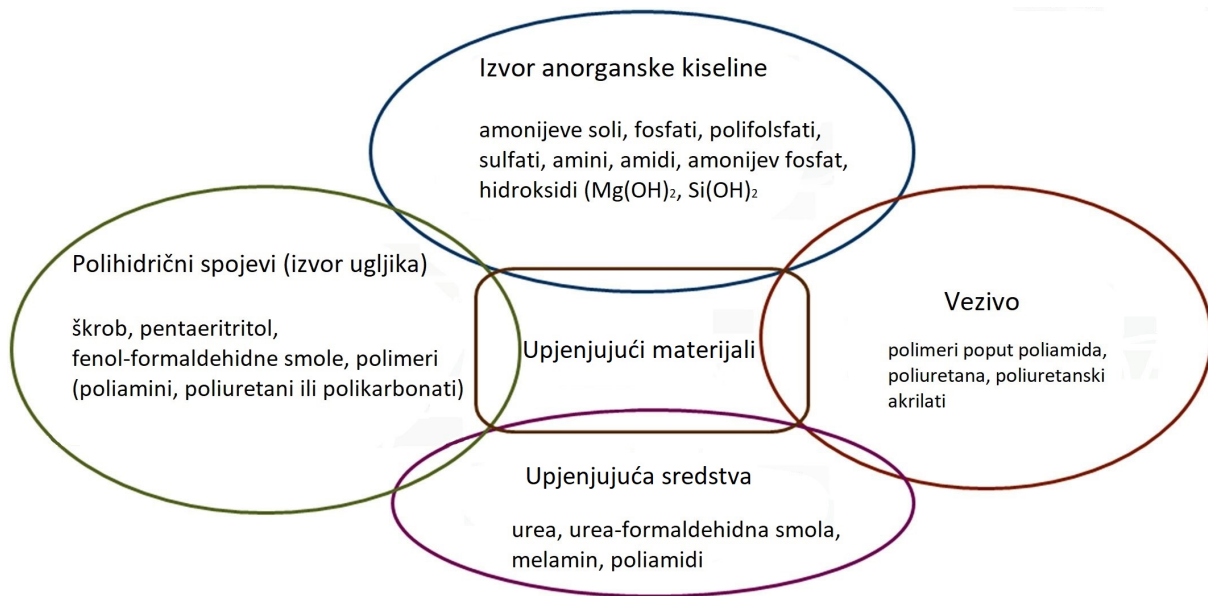
4.2. Upjenjujući usporivači gorenja

Upjenjujući (intumescentni) premazi imaju mnoge prednosti, među kojima su niski zahtjevi za količinu materijala, kao i relativno tanki sloj kako bi osigurali učinkovitu zaštitu od požara tijekom određenog vremenskog razdoblja. Oni pokazuju jedinstveno svojstvo upnjavanja kad su izloženi plamenu i stvaraju barijeru protiv plamena i pristupa kisiku zaštićenoj površini. Kada su izloženi toplini, započinje kemijska reakcija te materijal bubri i povećava mu se volumen i do 200 puta, formirajući debeli karbonizirani sloj koji štiti površinu od naglog povećanja temperature i kontakta s kisikom (Russell i sur. 2004).

Prema istraživanju Zybina i sur. (2009.), kako je navedeno u radu Popesca i Pfriema (2019), proces upnjavanja predstavlja kombinaciju karbonizacije i pjenjenja na površini tijekom plinske i kondenzirane faze. Karbonizacija se događa tijekom polutekuće faze, koja se podudara s nastankom plina koji se širi na površini. Oslobođeni plinovi zadržavaju se i postupno difundiraju u viskozni topljivi materijal koji postaje razgrađeni materijal. Istovremeno, reakcije umrežavanja i karbonizacija doprinose otvrdnjivanju osnovne matrice. Stoga se pri formuliranju premaza pažljivo biraju komponente s određenim talištem i sastavom kako bi reagirale u precizno određenom redosljedu i stvarale uvjete za transformaciju premaza pod utjecajem plamena. Karakterizira ih visoka poroznost pougljenjenog sloja, a rezultirajuća struktura ima izrazito nisku toplinsku vodljivost. Ključni faktor u ovom procesu je stabilnost upjenjenog pougljenjenog sloja, koja ovisi o strukturi i poroznosti pjenastog ekspanirajućeg materijala

Upjenjujući sustavi mogu biti na bazi vode ili na bazi organskih otapala. U pravilu, uključuju tri sloja premaza: temeljni, osnovni i završni sloj (Jirouš-Rajković i Miklečić, 2009).

Kao što je prikazano na slici 4. upjenjujući sastavi uključuju: anorganske kiseline ili materijale koji stvaraju kiseline komponentu koja stvara pougljeni sloj (ugljik) i komponentu koja se razgrađuje kako bi omogućila povećanje obujma sustava stvaranjem pjene (Popescu i Pfriem, 2019).

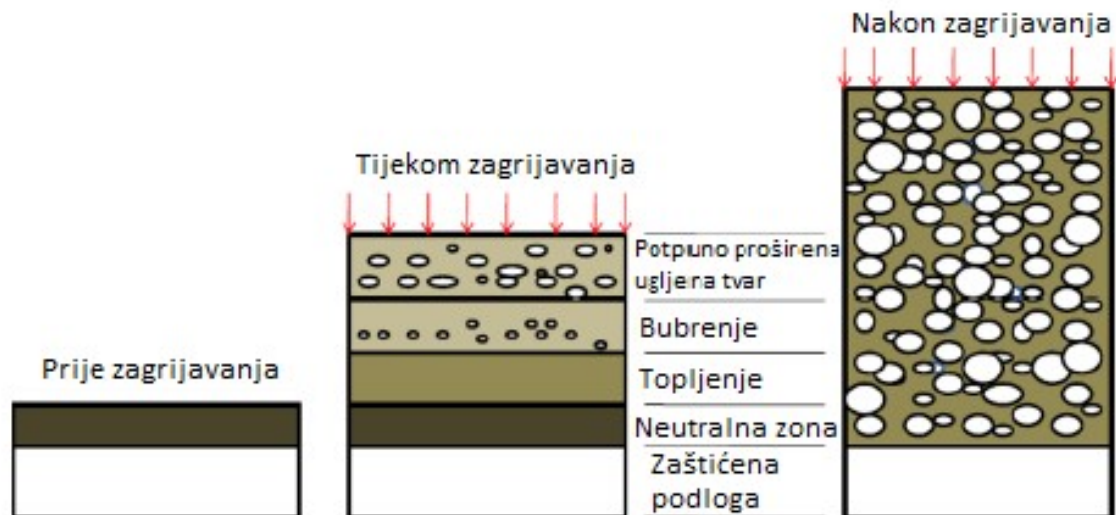


**Slika 4. Prikaz komponenti upjenjujućih materijala
(Popescu i Pfriem 2019)**

Tijekom procesa izgaranja, odvija se niz uzastopnih događaja:

- Prvo dolazi do razgradnje dehidrirajućeg sredstva, nakon čega slijedi formiranje kiseline iz njezine amonijeve soli, amina ili estera, pri čemu temperatura ovisi o izvoru i drugim komponentama.
- Zatim kiselina dalje reagira s hidroksilnim grupama ugljične tvari te stvara termalno nestabilan ester na temperaturama nešto iznad temperature otpuštanja kiseline.
- Smjesa materijala se otapa prije ili tijekom esterifikacije.
- Razgradnju estera prati razgradnja tvari koja stvara pore, što rezultira stvaranjem značajnih količina nezapaljivih plinova.
- Oslobađani plinovi stvaraju pjenjenje ugljične tvari koja se formira kao posljedica razgradnje estera, što dovodi do stvaranja debelog izolacijskog sloja.
- Na kraju, dolazi do procesa geliranja i očvršćivanja, što rezultira čvrstom, višestaničnom pjenom.

Proces je prikazan na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz djelovanja upjenjujućih premaza
(Puri i Khanna, 2017)

Upjenjujući vatrousporavajući premazi imaju prednost niske cijene, jednostavne pripreme i visoke dostupnosti. Obično se dobivaju dodavanjem intumescentnih protupožarnih sredstava izravno u smolu s visokom koncentracijom, što obično dovodi do problema s neprozirnošću, teškoćama u otvrdnjivanju i taloženju iz matrice. Upjenjujući premazi se obično primjenjuju s nanosom od približno 500 g/m^2 , što rezultira debljinom nanosa od nekoliko stotina mikrometara. Ove premaze karakterizira niska gustoća i jednostavan proces nanošenja. Međutim, imaju nekoliko nedostataka, uključujući osjetljivost na abraziju i trošenje, sklonost stvaranju pukotina te visoku higroskopsnost. Stoga se rijetko koriste u vanjskim uvjetima. Najčešća primjena upjenjujućih premaza je za oblaganje stropova i zidova koji nisu izloženi mehaničkim opterećenjima, kako je opisano u radu (Roßkopf, 2003).

4.3. Ablacijski premazi

Ablacijski premazi su premazi koji sadrže komponente koje se pod utjecajem visoke temperature mijenjaju putem endotermnih kemijskih reakcija kako bi ohladili površinu materijala kojeg štite (Roggon, 2008). Za razliku od izolacijskih premaza, koji se koriste za zaštitu materijala od vanjskih čimbenika, ablacijskim premazima se štiti materijal od nepovoljnih atmosferskih uvjeta i ne sadrže sastojke koji se otapaju u vodi. Ablacijski

materijali su obično polimerni ili smolasti materijali s niskom toplinskom vodljivošću, koji se pri zagrijavanju površine razgrađuju sloj po sloj, ostavljajući zaštitni sloj koji će se kasnije razgraditi pod utjecajem topline.

Wade i sur. (2001.), kako je navedeno u radu Jirouš – Rajković i Miklečić (2009.). govore o tome kako se kao pigmenti za ablacijske negorive premaze obično koriste metalni oksidi, koji pri visokim temperaturama stvaraju antimonove halide, koji djeluju u kondenzacijskoj i plinovitoj fazi. Pougljeni sloj, čija je glavna svrha zaštita površine drva od izravne izloženosti vatri, formira se u kondenzacijskoj fazi. Plinovita faza doprinosi zaustavljanju stvaranja slobodnih radikala stvaranjem halogenih radikala. Nedostatak ablacijskih premaza leži u tome što moraju sadržavati visoku koncentraciju aditiva kako bi pružili odgovarajuću razinu vatrostalnosti, što rezultira viskoznim premazima koji su skloni kredanju i imaju ograničen vijek trajanja. Najbolje rezultate pokazuju premazi koji sadrže visok postotak pigmenata.

Ovi premazi često se temelje na epoksidnim, kloriranim alkidnim, poliuretanskim ili vinilnim smolama i mogu se koristiti kako u unutarnjim tako i u vanjskim primjenama u različitim bojama. Također se mogu kombinirati s premazima koji stvaraju pjenasti karbonizirani sustav (engl. *ablative intumescent system*) kako bi se značajno poboljšala požarna otpornost drva kao konstrukcijskog materijala (Raevski i Vitaly, 1993).

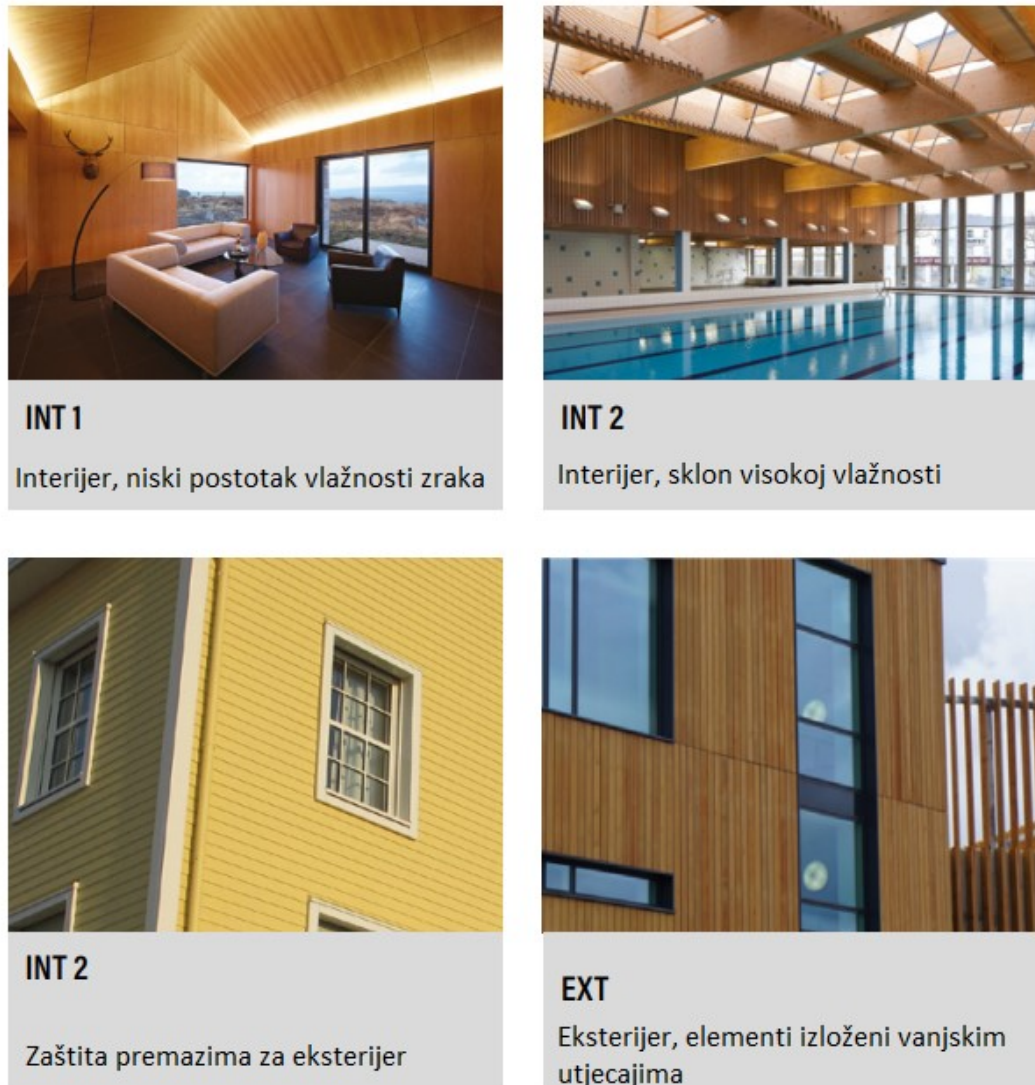
5. PRIMJERI VATROUSPORAVAJUĆIH PREMAZA NA TRŽIŠTU

Udruženje za zaštitu drva iz Velike Britanije (*Wood Protection Associaton, WPA*) napravilo je podjelu usporivača gorenja prema europskoj normi EN 16755 (eng. *Durability of reaction to fire performance – Classes of fire-retardant treated wood products in interior and exterior end use applications*) kako bi svaki proizvod bio prikladan mjestu uporabe (WPA, 2022). Sredstva za usporavanje gorenja biraju se na osnovu potrebne reakcije na požar (Euroklasa B ili C u skladu s EN 13501) i na osnovu okolišnih uvjeta u primjeni (klase primjene prema EN 1995-1-1).

Tablica 5. Prikaz razredbe sredstava za usporavanje gorenja drvaprema uvjetima u primjeni (WPA, 2022).

Vrsta	Klasa uporabe (EN 1995)	Uvjeti	Primjeri uporabe	Uvjeti
INT 1	1	Vlaga u materijalima koja odgovara temperaturi od 20°C i relativnoj vlažnosti manjoj od 65 % veći dio godine.	Drvo u zgradama s grijanjem i zaštitom od vlage: unutarnji zidovi, unutarnji podovi i topli krovovi	Zajednička karakteristika je da je drveni proizvod obrađen usporivačem gorenja osjetljiv na visoku vlažnost; dugotrajna izloženost može rezultirati cvjetanjem soli (kristalnim osipanjem) i/ili migracijom.
INT 2	2	Vlaga u materijalima koja odgovara temperaturi od 20°C i relativnoj vlažnosti manjoj od 85 % veći dio godine.	Konstrukcije prizemlja gdje nema slobodne vlage, hladni krovovi, bazeni i potpuno zaštićene vanjske primjene.	Tretirano drvo ili drvena ploča znatno manje je osjetljiva na visoku ili promjenjivu vlažnost i stoga se može koristiti u praktički svim unutarnjim i poluzaštićenim vanjskim situacijama.
EXT	3	Uvjeti koji dovode do višeg sadržaja vlage u materijalima u usporedbi s klasom primjene 2 ((Service Class 2).	Krovnna pokrivna obloga od cedrovine i nezaštićena vanjska obloga.	Tretirani drveni proizvod može se koristiti u svim unutarnjim i vanjskim situacijama iznad površine tla.

Primjeri primjene pojedine vrste usporivača gorenja prikazani su na slici 6 (WPA, 2022).



Slika 6. Prikaz uporabe vatroodbojnih premaza prema WPA u različitim uvjetima (WPA, 2022)

U nastavku će biti prikazani neki komercijalni vatroodbojni premazi koji se primjenjuju za drvo

5.1 Vatrousporavajući premaz PROMADUR®

PROMADUR® je vodeni upjenjujući premaz za drvene konstrukcije, otpornost na požar drvenih elemenata ovisi o njihovoj debljini, obliku, materijalu (vrsta drva, odnosno crnogorica ili bjelogorica, puno drvo, lijepljeno, piljeno drvo ili iverica), gustoći drva, dostupnosti kisika i kvaliteti nanesenih protupožarnih premaza. Ovisno o tim čimbenicima, ovaj proizvod povećava razred otpornosti na požar drvenih elemenata na 120 minuta (R120) ili više. Upotrebljava se i za smanjenje stupnja zapaljivosti drvenih površina na najniži mogući razred (B, s1 d0, prema normi EN-13501), što znači da taj premaz osigurava najveći mogući dostupni razred zaštite od požara za reaktivne premaze. Konstrukcijski elementi od punog drva, iverice i šperploča (minimalne debljine 12 mm) zaštićeni sa samo 300 g/m² premaza odgovaraju razredu reakcije na požar B-s1, d0. Drvene konstrukcije premazane s ≤ 150 g/m² generičkim poliuretanskim završnim slojem i ≥ 470 g/m² PROMADUR® premaza ima klasu gorivosti C-s1, d0 (Promat, 2020).

Glavne prednosti protupožarnog premaza za drvo PROMADUR® su:

1. Izvrsna zaštita od požara - postiže razred otpornosti do R120 ili više, ovisno o dimenzijama drvenih elemenata.
2. Najnovija generacija reaktivnog protupožarnog premaza za drvo - premaz aktivira toplinom, smanjujući zapaljivost drvenih konstrukcija.
3. Povećana otpornost na požar nosivih drvenih konstrukcija, uključujući stupove, grede, stropove i zidove, čak i s jednim slojem premaza.
4. Visoka prozirnost - struktura drva ostaje vidljiva nakon nanošenja.

PROMADUR® (slika 7.) se može nanositi na površinu drvenih elemenata pomoću kista, valjka (valjak kratke dlake) ili sustava štrcanja bez zraka, što je idealno za obradu iznimno velikih površina. Može se primijeniti u širokom rasponu zgrada, poput hotela, restorana, škola, javnih objekata, muzeja, knjižnica, ureda i privatnih kuća. Ovaj proizvod je dizajniran za uporabu u zatvorenim prostorima. Završni premaz nije nužan u normalnim uvjetima, ali

primjena završnog premaza PROMADUR® *Top Coat*-a je preporučljiva zbog povećane otpornosti na vlagu i mehaničkih svojstava (uključujući abrazivnu otpornost).

PROMADUR® *Top Coat* (slika 8.) jednokomponentni je bezbojni završni premaz na bazi otapala, posebno proizveden za poboljšanje otpornosti na vlagu i mehaničkih svojstava PROMADUR®-a, bez smanjenja klase otpornosti na požar zaštićenih drvenih elemenata. Proizvod nema aromatičnih sastojaka, brzo se suši i vrlo je jednostavan za primjenu, te nema negativnih učinaka na ekspanziju protupožarnih premaza.

Proizvod se nanosi četkom ili valjkom (velura ili mohera kratke dlake) ili za vrlo velike površine, opremom za bezračno štrcanje.



Slika 7. PROMADUR® – premaz za drvene konstrukcije

[\(https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/proizvodi-i-konstrukcije/proizvodi-za-protupozarnu-zastitu/intumescentni-premazi/promadur/\)](https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/proizvodi-i-konstrukcije/proizvodi-za-protupozarnu-zastitu/intumescentni-premazi/promadur/)



Slika 8. PROMADUR® *Top Coat* - bezbojni završni premaz

[\(https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/proizvodi-i-konstrukcije/proizvodi-za-protupozarnu-zastitu/intumescentni-premazi/promadur-topcoat/\)](https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/proizvodi-i-konstrukcije/proizvodi-za-protupozarnu-zastitu/intumescentni-premazi/promadur-topcoat/)

5.2 FlameOFF®

5.2.1 FlameOFF® Fire Barrier Paint

FlameOFF® Fire Barrier Paint je upjenjujući premaz koji se može nanijeti na većinu građevinskih materijala. Najčešće se koristi za zaštitu konstrukcijskog čelika, ali zaštita može obuhvatiti i druge materijale poput lima, gipskartonskih ploča, kompozitnih panela i drva u interijeru. Bijele je boje. Proizvod se može nanositi četkom ili štrcanjem. Štrcanje se preporučuje za optimalan izgled. Jedan sloj izgrađen uz pomoć nekoliko brzih prolaza omogućuje veću kontrolu nad količinom, debljinom i završnom obradom (FlameOFF, 2022).



Slika 9. FlameOFF Fire Barrier Paint

<https://flameoffcoatings.com/intumescent-fire-resistant-paint>

5.2.2 FlameOFF® FR Clear

FlameOFF® FR Clear je protupožarni premaz koji se najbolje nanosi na drvene površine te na druge prirodne ili sintetičke materijale. S FlameOFF® FR Clear, korisnici mogu uživati u sigurnosti protupožarnog premaza, uz prozirnu završnu obradu koja omogućuje materijalima da zadrže svoje izvorne boje, izgled i trajnost.

Ova vatroodbojna tehnologija štiti drvo i druge materijale, istovremeno ostajući ekološki prihvatljiva i netoksična. Učinkovito štiti građevinske materijale od širenja vatre, očuvavajući pri tom izvorne karakteristike materijala. Baziran je na vodi, netoksičan je i ekološki

prihvatljiv. Premaz je lagan i jednostavan za nanošenje štrcanjem ili uranjanjem. Proizvod nije testiran na uvjete u eksterijeru tako da se primjenjuje samo za elemente koji se nalaze u interijeru (FlameOFF, 2020).



Slika 10. FlameOFF® FR Clear

(<https://flameoffcoatings.com/fire-retardant-clear-spray>)

5.3 TEKNOS®

Tvrtka TEKNOS® razvila je posebni sustav površinske obrade za zaštitu proizvoda od požara u eksterijeru (slika 11).

	LAYER 1 PRETREATMENT*	LAYER 2 PRIMER	LAYER 3 TOP COAT
PRODUCT	TEKNOL AQUA 14 10-01	TEKNOSAFE 2407-00	TEKNOSAFE FLAME PROTECT 2408-00
RECOMMENDED APPLICATION METHOD	Dip / Flowcoat	Spray	Spray
APPLICATION TEMPERATURE	Minimum 10°C		
WET FILM THICKNESS (G/M ²)	100-120	≥350	≤150
OVERCOAT TIME 23°C, 50% RH	2-3 hours	12 hours	N/A
EQUIPMENT CLEANER	Water	Water	Water

Slika 11. Sustav premaza za uporabu u eksterijeru. Prvi sloj se koristi samo kod impregnacije drva zaštitnim sredstvom protiv bioloških štetnika.

(https://www.teknos.com/globalassets/teknos.com/industrial-coatings/special-applications/wood-fr-coatings/system-specfr_teknosafe-2407_exterior_0058_v2.pdf)

TEKNOSAFE 2407-00 (slika 12.) vodeni upjenjujući temeljni premaz za drvene fasade izložene vremenskim utjecajima. Nanosi se pomoću bezzračnih pištolja za nanošenje premaza ili pomoću vakuumata. Proizvod se koristi u kombinaciji sa završnim premazom TEKNOSAFE FLAME PROTECT 2408-00 koji je isto na bazi vode. Proizvod je klasificiran kao kao B-s1, d0 / B-s2, d0 prema normi EN 13501-1 (SBI test) kao dio Teknos FR fasadnog sustava.



Slika 12. Prikaz proizvoda TEKNOS® tvrtke

6. ZAKLJUČAK

Vatrootbojni premazi za drvo predstavljaju ključnu komponentu u naporima za povećanje požarne sigurnosti u građevinskoj industriji i raznim drugim sektorima. Ovaj rad je pružio dublji uvid u gorivost drva, europske norme i klasifikacije materijala prema njihovoj gorivosti, vrste premaza za usporavanje gorenja drva te primjere premaza koji su trenutno dostupni na tržištu. Na temelju provedenog rada, možemo zaključiti da vatrootbojni premazi igraju ključnu ulogu u povećanju sigurnosti građevinskih objekata. Oni mogu značajno usporiti širenje požara, omogućiti evakuaciju osoba i smanjiti štetu na imovini. Međutim, važno je napomenuti da vatrootbojni premazi nisu apsolutno rješenje i ne mogu spriječiti požar, već samo doprinose njegovoj kontroli.

U konačnici, vatrootbojni premazi su neizostavan dio moderne građevinske industrije i njihova pravilna primjena može znatno doprinijeti sigurnosti i zaštiti od požara.

LITERATURA

1. Ali, S., Hussain, S. A., & Tohir, M. Z. M. (2019). Fire Test and Effects of Fire Retardant on the Natural Ability of Timber: A Review. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 27(2). Dostupno na: https://www.researchgate.net/profile/Mohd-Zahirasri-MohdTohir2/publication/332754332_Fire_Test_and_Effects_of_Fire_Retardant_on_the_Natural_Ability_of_Timber_A_Review/links/5cc839904585156cd7bc08dc/Fire-Test-and-Effects-of-Fire-Retardant-on-the-Natural-Ability-of-Timber-A-Review.pdf (Pristupljeno 1.9. 2023.)
2. Bjelanović A., (2011); Ponašanje drva i drvenih konstrukcija u požaru i otpornost na djelovanje požara, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska sveučilišna naklada.
3. Bulian, F., & Graystone, J. (2009). *Wood coatings: Theory and practice*. 125 str.
4. FlameOFF 2020: FlameOFF® FR clear List s podacima o proizvodu, dostupno na: <https://flameoffcoatings.com/files/FlameOFF-FR-Clear-Product-Data-Sheet.pdf> (Pristupljeno 20.9. 2023.)
5. FlameOFF 2022: FlameOFF® Fire Barrier Paint Brošura proizvoda, dostupno na: <https://flameoffcoatings.com/files/FlameOFF-Product-Brochure.pdf> (Pristupljeno 20.9. 2023.)
6. Hakkarainen, T., Mikkola, E., Östman, B., Tsantaridis, L., Brumer, H. Piispanen, P., (2005), Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. Dostupno na: http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/finalreport/sp_rapp_2006_30_innofirewood.pdf (Pristupljeno 25.8. 2023.)
7. Jirouš – Rajković V., Miklečić J.,(2009); Usporivači gorenja drva Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu *DRVNA INDUSTRIJA* 60 (2) 111-121 (2009), dostupno na: https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=59745 (Pristupljeno 5.8. 2023.)
8. Liu, J., Kutty, R. G., Zheng, Q., Eswariah, V., Sreejith, S., & Liu, Z. (2017). Hexagonal Boron Nitride Nanosheets as High-Performance Binder-Free Fire-Resistant Wood Coatings. *Small*, 13(2), 1-6. Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/sml.201602456> (Pristupljeno 11.9. 2023.)
9. Lowden L.A., Hull T.R., (2013); Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews* 2013 2:4, dostupno na: <https://link.springer.com/article/10.1186/2193-0414-2-4> (Pristupljeno 5.8. 2023.)
10. Marney, D.C.O., Russell, L.J., Humphrey, D.G., (2005); Fire retardants for outdoor timber applications – A literature review.

11. Östman, B.A.-L.; Mikkola, E. 2006: European classes for the reaction to fire performance of wood products. Holz als Roh-und Werkstoff 64: 327-337. Dostupno na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962295/FULLTEXT01.pdf> (Pristupljeno 20.8. 2023.)
12. Östman, B., & Tsantaridis, L. (2016). Fire retardant treated wood products—Properties and uses. Dostupno na; <https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dswid=3181&pid=diva2%3A1014993> (Pristupljeno 20.8. 2023.)
13. Pavelić, Đ., (2015), Ponašanje građevnog materijala u požaru, Sigurnost 57 (3) 263-266. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/225446> (Pristupljeno 1.9. 2023.)
14. Pavelić, Đ., (2016), Temeljni zahtjevi zaštite od požara građevina, Sigurnost 58 (3) 257-260. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/265007> (Pristupljeno 1.9. 2023.)
15. Popescu C-M., Pfriem A.,(2019); Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products;44:100–111., dostupno na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fam.2779> (Pristupljeno 10.9. 2023.)
16. Promat 2020: PROMADUR® & PROMADUR® Top Coat Tehnički list, dostupno na: <https://etex.azureedge.net/pi12394/original/-1819443706/protupozarni-premaz-promadur-i-promadur-top-coat-tehnicki-list-promat-hr-2020-05.pdf> (Pristupljeno 15.9. 2023.)
17. Raevsky, V. 1993: Ablative-intumescent system. US Patent 5206088. Dostupno na: <https://patents.google.com/patent/US5206088A/en> (Pristupljeno 7.8. 2023.)
18. Roßkopf, W., (2003), Die durchs Feuer gehen. Der Maler und Lackierermeister 9: 13-15
19. Russell L.J.; Marney D.C.O.; Humphrey D.G.; Hunt A.C.; Dowling V.P; Cookson L.J., (2004): Combining fire retardant and preservative systems for timber products in exposed applications-state of the art review. Forest and wood products research and development corporation, Victoria 8005, dostupno na: <https://fwpa.com.au/wp-content/uploads/2007/03/PN04.2007-Combining-fire-retardant.pdf> (Pristupljeno 3.9. 2023.)
20. Van Esch, G.J., (1997), Flame retardants. A general introduction, World Health Organization Geneva.
21. White, R.H., Diitenberg, M.A. 2010: Wood Handbook Wood as an engineering material. General Technical Report 113. Chapter 18. Dostupno na: https://www.researchgate.net/profile/MarkDiitenberger/publication/282480485_Fire_safety_of_wood_construction/links/584f142008aecb6bd8d02685/Fire-safety-of-wood-construction.pdf (Pristupljeno 3.9. 2023.)

22. Wood Protection Association. Ref: WPA FR 3 Issue 4: March 2022. Dostupno na: https://www.thewpa.org.uk/_files/ugd/65ba63_022d451d30a5404ba869fed5443c008d.pdf?index=true (Pristupljeno 25.8. 2023.)
23. Zhang J., Li G., Wu Q., Li M-C., Sun X., Ring D., (2017); Synergistic influence of halogenated flame retardants and nanoclay on flame performance of high density polyethylene and wood flour composites. RSC Adv. 2017;7(40):24895-24902. Dostupno na: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ra/c7ra03327c#!divAbstract>(Pristupljeno 10.9. 2023.)
- URL 1: <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/database.html>