

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok RAMOVŠ

**GORLJIVOST TERMIČNO MODIFICIRANEGA IN Z
BOROVIMI PRIPRAVKI IMPREGNIRANEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2009

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Rok RAMOVŠ

**GORLJIVOST TERMIČNO MODIFICIRANEGA IN Z BOROVIMI
PRIPRAVKI IMPREGNIRANEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**COMBUSTIBILITY OF THERMALLY MODIFIED AND WITH
BORON PREPARATIONS OF IMPREGNATED WOOD**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2009

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v laboratoriju na Katedri za patologijo in zaščito lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Franca Pohlevna, za recenzenta pa doc. dr. Miho Humarja.

Mentor: prof. dr. Franc Pohleven

Recenzent: prof. dr. Miha Humar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Rok RAMOVŠ

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*841.1
KG	les/gorenje/modifikacija/bor/gorljivost
AV	RAMOVŠ, Rok
SA	POHLEVEN, Franc (mentor)/HUMAR, Miha (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2009
IN	GORLJIVOST TERMIČNO MODIFICIRANEGA IN Z BOROVIMI PRIPRAVKI IMPREGNIRANEGA LESA
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	IX, 63 str., 21 pregl., 27 sl., 18 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Les je, kot naravni material, vnetljiv in gorljiv. Ker ga je zato treba ustrezno zaščititi proti gorenju, smo preizkušali najnovejše postopke termične modifikacije lesa ter impregnacijo z okolju prijaznejšimi sredstvi kot so borove učinkovine. Ugotoviti smo želeli, kakšna je gorljivost termično modificiranega lesa. Les smo impregnirali z 1, 5 ter 10 % vodno raztopino Topbora. Impregniran kot neimpregniran les smo nato še dodatno termično modificirali v vakuumu pri temperaturi 150, 170, 190, 210, 230 °C. Za testiranje gorljivosti lesa smo uporabili modificirano ameriško metodo ASTM: E 69-50 (1965). Rezultati so pokazali, da so kontrolni vzorci v 4,28 min izgubili 75 % lesne mase. Pri modificiranem lesu pa smo najboljši rezultat zabeležili pri temperaturi modificiranja 210 °C ter 10 % vodno raztopino Topbora, kjer so vzorci v 4,16 min izgubili le 32 % mase. Ugotovili smo, da se gorljivost modificiranega lesa zniža samo z dodatkom Topbora. Pri neimpregniranem modificiranem lesu je odstotek izgube lesne mase nižji ali enak kot pri kontrolnih vzorcih.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs

DC UDC 630*841.1

CX wood/combustion/modification/boron/combustibility

AU RAMOVŠ, Rok

AA POHLEVEN, Franc (supervisor)/HUMAR, Miha (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2009

TI COMBUSTIBILITY OF THERMALLY MODIFIED
AND WITH BORON PREPARATIONS IMPREGNATED WOOD

DT Graduation Thesis (Higher professional studies)

NO IX, 63 p., 21 tab., 27 fig., 18 ref.

LA sl

AL sl/en

AB Wood is a natural material, inflammable and combustible material. Considering this fact it is necessary to utilise proper flame retardants. The latest procedures of thermal modification of wood and impregnation with environmentally friendly biocides such as boron compounds were tested. Our purpose was to find out the combustibility of thermally modified wood. Wood was impregnated with 1, 5 and 10 % Topbor based aqueous solutions. The impregnated so as not impregnated wood was then further thermally modified in the vacuum at 150, 170, 190, 210 and 230 °C. For testing, a modified American method ASTM E 69-50 (1965) was utilised. Control samples lost 75 % of wood mass in 4.28 min. At the modified wood, the best results are reported after modification of samples impregnated with 10 % Topbor aqueous solution at 210 °C, where the samples lost only 32 % of the weight in 4.16 min. It was found out that the burning behaviour of the modified wood was reduced only by the addition of boron. When not impregnated, the percentage of loss of wood mass is comparable to the control specimens.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJI NALOGE	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 DEFINICIJA GORENJA	4
2.2 TRIKOTNIK GORENJA	4
2.2.1 Gorivo	5
2.2.2 Zrak	5
2.2.3 Toplota	6
2.3 MEHANIZMI GORENJA	6
2.3.1 Gorenje s plamenom	6
2.3.2 Gorenje s tlenjem/žarenjem	8
2.4 DEJAVNIKI KI VPLIVAJO NA VŽIG IN GORENJE	9
2.4.1 Katalizatorji	9
2.4.2 Inhibitorji	10
2.5 GORENJE TRDNIH SNOVI	10
2.5.1 Direktno gorenje	11
2.5.2 Gorenje s spremembo agregatnega stanja	11
2.5.3 Gorenje s pirolizo	11
2.6 GORENJE LESA	12
2.7 NARAVNA ODPORNOST LESA PROTI GORENJU	15
2.8 MODIFIKACIJA LESA	18
2.8.1 Načini modifikacije lesa	19
2.8.2 Lastnosti termično modificiranega lesa	20
2.8.2.1 Ognjeodpornost	21
2.8.3 Uporaba termično modificiranega lesa	21
2.9 ZAŠČITA LESA PROTI GORENJU Z BOROVIMI PRIPRAVKI	22
2.9.1 Prednosti in slabosti borovih spojin	22
2.10 HARRISONOVA METODA ZA DOLOČANJE GORLJIVOSTI LESA	23
2.10.1 Naprava	24
2.10.2 Postopek preizkušanja	26
3 MATERIALI IN METODE DELA	28

3.1	MATERIALI	28
3.1.1	Opis vzorcev	28
3.1.2	Zaščitni pripravek za impregnacijo - Topbor	28
3.2	METODA DELA	29
3.2.1	Priprava impregnacijskega sredstva	29
3.2.2	Impregnacija vzorcev	30
3.2.3	Termična modifikacija vzorcev	32
3.2.4	Naprava za merjenje odpornosti proti gorenju	33
4	REZULTATI	35
4.1	UMERITEV NAPRAVE	35
4.2	IZGUBA MASE TERMIČNO MODIFICIRANIH VZORCEV	35
4.3	MERITEV GORLJIVOSTI VZORCEV	37
4.3.1	Meritev gorljivosti kontrolnih nezaščitenih vzorcev	37
4.3.2	Meritev gorljivosti s Topborom impregniranih nemodificiranih vzorcev	39
4.3.3	Meritev gorljivosti modificiranih vzorcev	42
4.3.3.1	Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 150 °C	42
4.3.3.2	Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 170 °C	45
4.3.3.3	Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 190 °C	47
4.3.3.4	Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 210 °C	49
4.3.3.5	Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 230 °C	51
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	54
5.1	RAZPRAVA	54
5.1.1	Gorljivost lesa impregniranega z borovim pripravkom	54
5.1.2	Gorljivost vzorcev modificiranih pri temperaturi 150 °C	55
5.1.3	Vzorci modificirani pri temperaturi 170 °C	56
5.1.4	Vzorci modificirani pri temperaturi 190 °C	57
5.1.5	Vzorci modificirani pri temperaturi 210 °C	58
5.2	SKLEP	59
6	POVZETEK	61
7	VIRI	62
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1 :	Glavne faze sprememb lesa, ki jih povzroča segrevanje	12
Preglednica 2 :	Odpornost lesa drevesnih vrst proti gorenju.....	16
Preglednica 3 :	Povprečna energetska vrednost lesa pri različnih vlažnostih, izražena v MJ/kg.....	17
Preglednica 4 :	Povprečna izguba mase neimpregniranih vzorcev med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210, 230 °C	36
Preglednica 5 :	Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev z 1 % raztopino..... Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C	36
Preglednica 6 :	Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev s 5 % raztopino Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C	37
Preglednica 7 :	Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev z 10 % raztopino Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C	37
Preglednica 8 :	Meritve časa zloma smrekovih kontrolnih vzorcev ter izguba mase pred točko zloma	38
Preglednica 9 :	Izguba mase kontrolnih nezaščitene vzorcev v odvisnosti od časa gorenja	38
Preglednica 10 :	Čas zloma impregniranih vzorcev z 1, 5 in 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase pred točko zloma.....	40
Preglednica 11 :	Izguba mase impregniranih vzorcev s Topborom 1, 5 in 10 % v odvisnosti od časa.....	41
Preglednica 12 :	Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 150 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma	44
Preglednica 13 :	Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 150°C v odvisnosti od časa.....	44
Preglednica 14 :	Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 170 °C in mpregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma	46
Preglednica 15 :	Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 170°C v odvisnosti od časa.....	47
Preglednica 16 :	Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 190 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter i zguba mase v točki zloma.....	48
Preglednica 17 :	Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 190°C v odvisnosti od časa.....	49
Preglednica 18 :	Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 210 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma.....	50

Preglednica 19 :	Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 210°C v odvisnosti od časa	51
Preglednica 20 :	Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 230 °C ter izguba mase v točki zloma	52
Preglednica 21 :	Izguba mase vzorcev modificiranih pri temperaturi 230 °C v odvisnosti od časa	52

KAZALO SLIK

Slika 1:	Trikotnik gorenja.....	4
Slika 2:	Gorenje Bunsenovega gorilnika.....	8
Slika 3:	Shematski prikaz heterogenega gorenja z žarom	9
Slika 4:	Katalitsko znižanje aktivacijske energije	10
Slika 5:	Piroliza lesa	13
Slika 6:	Shematski prikaz procesa gorenja	14
Slika 7:	Shematski prikaz širjenja plamenov pri gorenju lesa.....	15
Slika 8:	Čas gorenja v odvisnosti od gostote oziroma vrste lesa pri temperaturi 320 °C. 1. balzovina, 2. smrekovina, 3. borovina, 4. bahinovina, 5. gabunovina, 6. jelševina, 7. javorovina, 8. hrastovina, 9. bukovina, 10. jesenovina, 11. les robinije, 12. ebenovina, 13. pitchpine	16
Slika 9:	Vpliv obdelanosti površine na vžig trdnih materialov	17
Slika 10:	Vpliv vlažnosti lesa na izgubo lesne mase pri sežigu borovih letvic po metodi ASTM: E 69 – 50 (1965)	18
Slika 11:	Naprava za preizkušanje požarnozaščitnih premazov po Harrisonovi metodi: 1 - mrežasta ognjevarna cev; 2 - razširjeni del zaščitne cevi; 3 - gorilnik; 4 - ročica tehtnice; 5 - kazalec; 6 - skala; 7,8 - protiuteži za uravnavanje; 9 - vzorec; 10 – stojalo	25
Slika 12:	Priprava impregnacijskega sredstva.....	30
Slika 13:	Vzorci pripravljeni za impregnacijo.....	30
Slika 14:	Vakuumska-tlačna komora KAMBIČ.....	31
Slika 15:	Sušenje vzorcev v zložaju.	32
Slika 16:	Primerjava barvnih odtenkov z višanjem stopnje termične modifikacije lesa. Levi vzorci so bili modificirani pri 150 °C, desni pa pri 210 °C.....	33
Slika 17:	Shema naprave za preizkušanje gorljivosti lesa: 1 - mrežasta ognjevarna cev; 2 - prižema za pritrditev mrežaste ognjevarne cevi; 3 - vzvod; 4 - nastavitveni vijaki; 5 - brezstični induktivni senzor pomika; 6 - USB vmesnik; 7 - računalnik; 8 - stojalo naprave; 9 – gorilnik	34
Slika 18:	Umeritvena krivulja naprave za določevanje gorljivosti.....	35
Slika 19:	Izguba lesne mase pri kontrolnih smrekovih vzorcih v odvisnosti od časa	39
Slika 20:	Prikaz poškodovanosti pri vzorcu zaščiten z 10 % vodno raztopino Topbora (B3/1)	42
Slika 21:	Prikaz poškodovanosti vzorcev	53
Slika 22:	Poškodbe modificiranih vzorcev pri temperaturi 230 °C.....	53
Slika 23:	Diagram izgube lesne mase vzorcev impregniranih z borovim pripravki (B1 = 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %)	55
Slika 24:	Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 150 °C	56
Slika 25:	Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino topbora (B1 = 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 170 °C	57
Slika 26:	Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 190 °C	58
Slika 27:	Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 210 °C	59

1 UVOD

Les spada med najpogostejše uporabljene materiale, ki ga tudi v življenju modernega človeka ni zamenjal noben umetni material. Zaradi razširjenosti v naravi, naravne lepote, občutka toplote, pa tudi zaradi njegovih mehanskih lastnosti, kot so trdnost, upogljivost, elastičnost, dobre obdelovalne lastnosti, je njegova uporaba vsestranska. Uporabljajo ga za izdelke industriji, gradbeništvu, rudarstvu, ladjedelništvu. Z relativno majhnimi stroški ga lahko obdelujemo, oblikujemo in spreminjamo v poljubne oblike. Vloga lesa kot človekovega sopotnika se je skozi zgodovino spreminjala. Naši predniki so les najprej uporabljali za preprosta orodja in kurjavo, danes pa ga uporabljamo večinoma kot surovino za izdelke in gradivo.

Les je organski material, kar pomeni, da vsebuje različne spojine ogljika (~ 50 %), vodika (~ 6 %) in kisika (~ 44 %). Najpomembnejše sestavine lesa so celuloza, hemiceluloza, in lignin. Delež posameznih sestavin je odvisen od vrste lesa in pogojev rasti.

Les kot organska snov razpada, zaradi različnih dejavnikov, v anorgansko snov. Razkroj lesa povzročijo biotični in abiotični dejavniki. Biotični dejavniki so dejavniki žive narave, zlasti insekti in glive. Abiotični dejavniki pa so dejavniki nežive narave, kot so vremenski vplivi s temperaturnimi spremembami, vlago, vetrom in kemičnimi spremembami. Največji destruktor lesa pa je ogenj (Langendorf, 1988).

Ena od značilnosti lesa je, da je vnetljiv in gorljiv material. Lastnost gorenja s pridom izkoriščamo v energetske namene, za lesne izdelke pa je gorenje nezaželeno. Ta slabost je še posebej izrazita v objektih, kjer je potrebno upoštevati načela protipožarne zaščite. Uporaba nezaščitenega lesa v stavbah z večjo požarno ogroženostjo ni ustrezna.

Les je slab prevodnik toplote. Zaradi tega, čeprav nezaščiten, v konstrukcijah bolje prenese požarne obremenitve, kot nekateri drugi gradbeni materiali, na primer beton in jeklo. Lesene konstrukcije ostanejo po požaru večinoma nedeformirane, česar ne moremo trditi za jeklene konstrukcije. Jeklo ima približno 500 krat večjo toplotno prevodnost, kot les v smeri lesnih vlaken in 1500 krat večjo kot v radialni smeri. Jekleni nosilci se pri visokih

temperaturah hitro segrejejo. Pri tem pa izgubijo večino mehanske lastnosti. Zaradi velike razlike v toplotni prevodnosti, se jeklo segreje po celotni površini, medtem ko se les segreje le na površinskih plasteh, kjer gori in poogleni. Ta plast predstavlja izolacijo, zato se notranji sloji počasi segrevajo in obdrže svoje mehanske lastnosti. Med požarom se jekleni nosilci porušijo mnogo prej kot leseni nosilci (Premrov in Boršič, 2002).

Razkroja lesa pri višjih temperaturah ni mogoče preprečiti, lahko pa ga zmanjšamo ali omejimo. Ker se les vedno bolj uveljavlja kot gradivo, je potrebno preprečevanju gorenja lesa posvetiti posebno pozornost. Ena od možnosti je zaščita s požarnozaščitnimi premazi, s katerimi izboljšamo lastnosti, podaljšamo trajnost ter ga tako zaščitimo pred gorenjem.

V zadnjem času se na tržišču pojavljajo številni novi materiali. V lesarstvu se uveljavlja modificiran les, ki ga želimo uporabiti tudi v gradbeništvu, zato je pomembno, da ugotovimo, kakšna je gorljivost teh modificiranih materialov. Eden od možnih postopkov modifikacije je tudi obdelava z okolju prijaznejšimi biocidi in proti požarnimi sredstvi, kot so pripravki na osnovi bora.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Najnovejši postopek zaščite lesa je termična modifikacija ali pa impregnacija z okolju prijaznejšimi pripravki na osnovi borovih učinkovin, s katerimi dosežemo, da je les odpornejši na škodljivce. Borove snovi poleg insekticidnosti delujejo tudi kot ognjevarna sredstva. Z modifikacijo pa ob povečani odpornosti na škodljivce pridobimo tudi boljšo dimenzijsko stabilnost. Kljub temu, da se termično modificiran les že dolgo uporablja, v literaturi še vedno ni zaslediti podatkov o njegovi gorljivosti. Zato bomo preskusili gorljivost pri različnih temperaturah modificiranega lesa, ki ga bomo pred modifikacijo impregnirali z borovimi pripravki.

1.2 CILJI NALOGE

Cilj naloge je ugotoviti gorljivosti lesa modificiranega do različnih stopenj ter vpliv predhodne impregnacije z borovimi pripravki na njegovo odpornost na ogenj. Še posebej

nas zanima, če v primeru povečane gorljivosti modificiranega lesa, lahko ognjezadrževalni borovi preparati to lastnost izboljšajo oz. nevtralizirajo.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da je termično modificiran les manj odporen na gorenje, medtem, pa bo z borovimi pripravki impregniran les imel enako ali pa celo večjo odpornost na gorenje.

2 PREGLED OBJAV

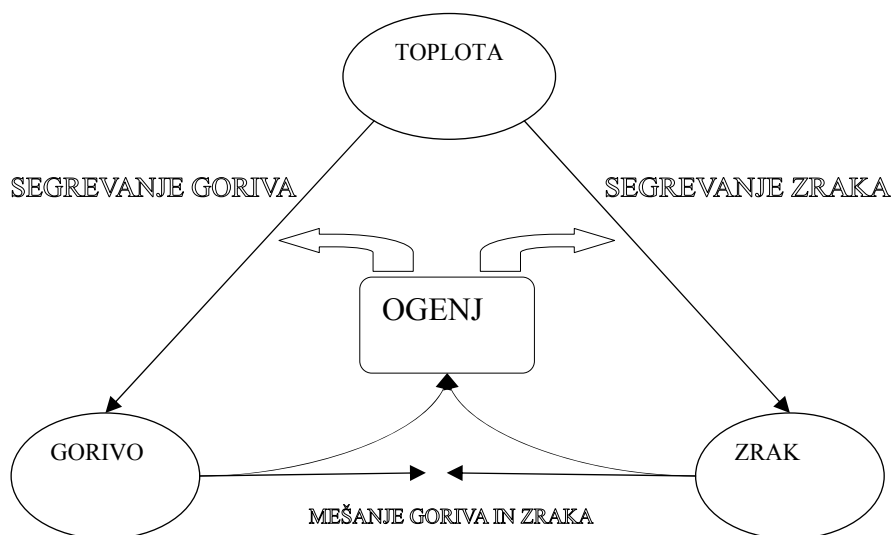
2.1 DEFINICIJA GORENJA

Gorenje je eksotermna kemijska reakcija med gorljivo snovjo in kisikom. S tem, ko je sprožena kemijska reakcija, se pri tem pojavi plamen. Za začetek gorenja mora biti gorljiv material segret na vžigalno temperaturo. V večini primerov se pri gorenju sprosti veliko večja temperatura od količine energije, ki je za vzdrževanje gorenja potrebna. S tem dobimo razlog, zakaj se požar širi in obseg gorenja povečuje. To pomeni, da gorenje snovi lahko nadziramo s regulacijo kisika in z količino gorljive snovi. Do začetka gorenja lahko pride zaradi samodejnega vžiga gorljivega materiala ali pa zaradi zunanjega vira vžiga.

2.2 TRIKOTNIK GORENJA

Do pogoj za vžig je, če so istočasno v zadostnih količinah oziroma koncentracijah prisotni gorljiv material (gorivo) in oksidacijsko sredstvo ter vir toplote oziroma vžiga (Grm in Stevanović, 2002).

Gorivo, kisik in toplota so trije potrebni elementi za gorenje in tvorijo tako imenovani trikotnik gorenja (slika 1).



Slika 1: Trikotnik gorenja (Grm in Stevanović, 2002)

2.2.1 Gorivo

Goriva predstavljajo materiali, ki zaradi svoje kemijske sestave lahko oksidirajo. To so najpogostejše materiali, ki so pretežno sestavljeni iz ogljika in vodika. Večina gorljivih trdnih organskih snovi in vnetljivih tekočin ter plinov vsebuje visok delež ogljika in vodika. Ob vodiku in ogljiku lahko oksidirajo tudi drugi kemijski elementi (nekovine in kovine), vendar pa so ti materiali manj pogosti ter imajo tudi počasnejši proces oksidacije (Grm in Stevanović, 2002).

2.2.2 Zrak

Kemično vezanje gorljivih snovi s kisikom imenujemo oksidacija, nastalo snov pa oksid. Tako se goreča snov pri gorenju lesa spremeni v pline, to je okside ogljika in vodika, ter v pepel. Med oksidante pa uvrščamo tudi naslednje snovi: KMnO_4 , NaNO_3 , KClO_3 , HgO (Grm in Stevanović, 2002).

Vsako gorenje je oksidacija, vendar vsaka oksidacija ni gorenje. Tudi človeško ali živalsko dihanje je oksidacija. Pri tem nastane toplota. Pri oksidaciji se vedno sprošča energija (toplota, svetloba ...).

Tako po hitrosti oksidacije razlikujemo:

- počasna ali tiha oksidacija – rjavenje kovin, trohnenje lesa, gnitje krme
- burna oksidacija – gorenje,
- zelo burna oksidacija – eksplozija, detonacija

Kisik je ena od najbolj razširjena snov na zemlji. Zrak vsebuje povprečno 21 % kisika in 79,5 % dušika. Veliko kisika je kemično vezanega v vodi in drugih spojinah.

Kisik ne gori, pač pa vzdržuje in pospešuje gorenje. Je brezbarven plin, brez vonja in okusa ter nekoliko težji od zraka. V čistem kisiku izgorevajo snovi hitreje in močnejše. Težko

gorljive snovi, ki v zraku samo tlijo, v čistem kisiku zgorijo. Na primer: razžarjena jeklena žica. Proces gorenja preneha, če je koncentracija kisika nižja od 15 % (Jagrovič, 1974).

2.2.3 Toplota

Toplota je potrebna za zagotovitev poteka reakcije oksidacije in sicer:

- za segrevanje do vžigne temperature;
- pri trdnih in tekočih snoveh za nastanek hlapov (izparevanje) in nastanek plinskih razkrojnih produktov (piroliza);
- za cepljenje vezi pri molekulah gorljivih snovi in kisika (aktivacijska energija).

Za začetek poteka reakcije gorenja, ni vedno nujno potrebno segrevati celotno površino materiala. Začetek gorenja lahko sprožimo tudi z zunanjim virom vžiga, kot je plamen (temperatura okoli 2000 °C), z električno iskro (temperatura preko 10000 °C) ter z iskro zaradi trenja med materiali (temperatura med 1000 °C in 1200 °C).

2.3 MEHANIZMI GORENJA

Za lažjo ter poenostavljeno razlago o gorenju lahko uporabimo že predstavljeni trikotnik gorenja (slika 1). V resnici pa ne moremo za razlago uporabiti samo trikotnik gorenja, ker je dejansko je gorenje bolj zapleten proces, ki ga delimo na dva dela:

- gorenje s plamenom
- gorenje s tlenjem/žarenjem.

2.3.1 Gorenje s plamenom

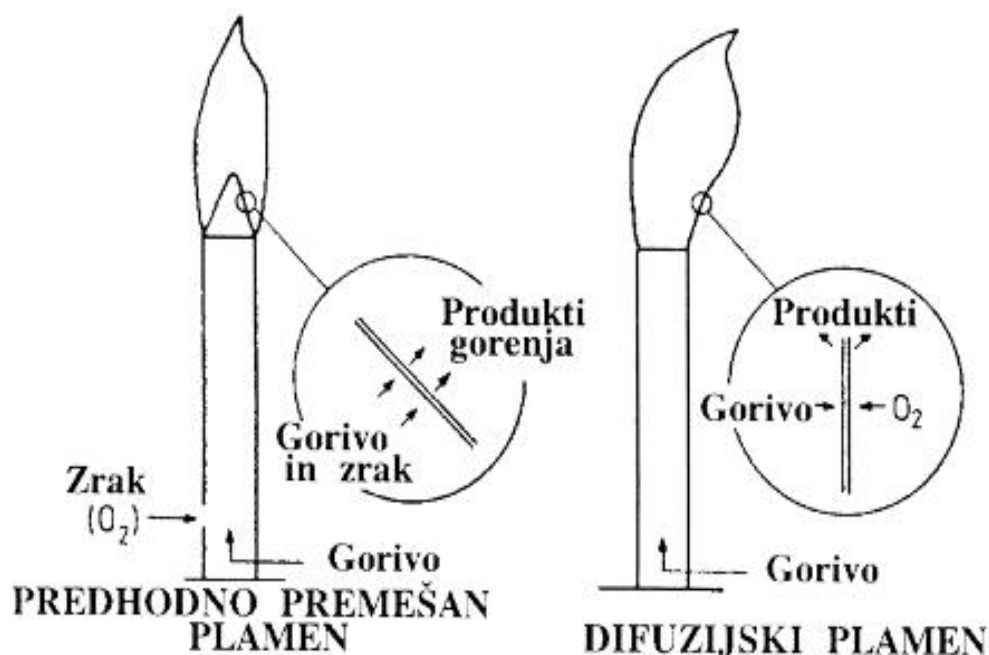
Gorenje s plamenom poteka v plinski fazi in ga imenujemo tudi homogeno gorenje. Za to gorenje so značilni plameni. S plameni gorijo gorljivo plini in hlapni tekočine, pri trdnih snoveh pa gorijo gorljivi hlapni in plinski produkti termičnega razvoja. Plameni so lahko predhodno premešani ali pa difuzijski (Grm in Stevanovič, 2002).

Za predhodno premešane plamene je značilno, da so gorljivi hlapi/plini in zrak pred vstopom v reakcijsko cono že premešani v koncentracijah med spodnjo in zgornjo mejo

vnetljivosti. Pri koncentracijah gorljivih plinov pod spodnjo mejo vnetljivost za potek gorenja ni dovolj goriva, pri koncentracijah nad zgornjo mejo pa ni dovolj kisika. Za to vrsto gorenja je značilno, da hitrost gorenja določa kinetika kemijskih reakcij gorenja. S tem mehanizmu gorenja se srečujemo predvsem pri gorenju v gorilcih, pri požaru pa v glavnem ne.

Za difuzijske plamene je značilno, da gorljivi hlapi/plini z zrakom/oksidanti niso predhodno premešani, ampak se mešajo postopno z vrtinčasto in/ali molekularno difuzijo. Hitrost gorenja je določena s hitrostjo mešanja med gorljivimi hlapi in zrakom. Če so difuzijski procesi počasni, plinska zmes gorljivih plinov in kisika ne bo tako hitro dosegla spodnje meje vnetljivosti ter se vžgala. Pot, zaradi vzgona dvigajoče plinske zmesi od nastanka hlapov pa do mesta, kjer je dosežena spodnja meja vnetljivosti in vžiga, bo daljša. Zato bodo v tem primeru plameni višji. V primeru intenzivnih difuzijskih procesov pa bo zmes hitro premešana (sorazmerno hitro bo dosegla spodnjo mejo vnetljivosti) in se vžgala. Plameni bodo v tem primeru krajši.

Na sliki 2 sta na primeru Bunsenovega gorilnika prikazana oba tipa gorenja s plamenom. Če je na gorilniku zaprt dovod zraka, poteka gorenje z rumenim difuzijskim plamenom. Zrak vstopa v reakcijsko cono iz okolice plamena. Kisika ni dovolj za popolno zgorevanje, zato je zgorevanje plina nezadostno in temperatura plamena je nižja (rumena barva plamena). Pri odprtem dovodu zraka na gorilniku pa poteka gorenje z modrim, predhodno premešanim plamenom. Na razpolago je dovolj kisika, zato je gorenje popolno in temperatura plamena je višja.

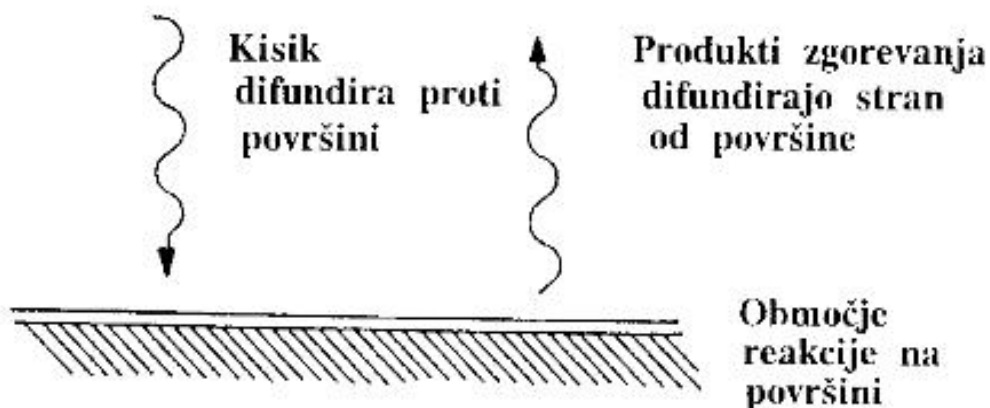


Slika 2: Gorenje Bunsenovega gorilnika (Grm in Stevanović, 2002)

2.3.2 Gorenje s tlenjem/žarenjem

Gorenje s tlenjem/žarenjem poteka na površini gorljivih trdnih snovi, zato ga označujemo kot heterogeno gorenje. Na ta način gorijo trdni kemijski elementi: nekovine in kovine.

Ta mehanizem srečamo tudi pri gorenju trdnih materialov, ki so sestavljeni pretežno iz ogljika ter vodika in pri pirolizi tvorijo poleg tekočih in plinskih produktov tudi trdni produkti – oglje. Po končani pirolizi in potem, ko pogorijo plinski produkti pirolize, preostane sloj oglja. Oglje predstavlja elementarni ogljik in gori po mehanizmu heterogenega gorenja. Za gorenje s tlenjem je značilno, da ni plamena. Hitrost gorenja je odvisna predvsem od prenosa kisika iz glavne mase okoliškega zraka do površine trdnega kemijskega elementa ali drugače povedano, v glavnem od molekulske difuzije kisika proti površini materiala oziroma območju reakcije na površini (slika 3).

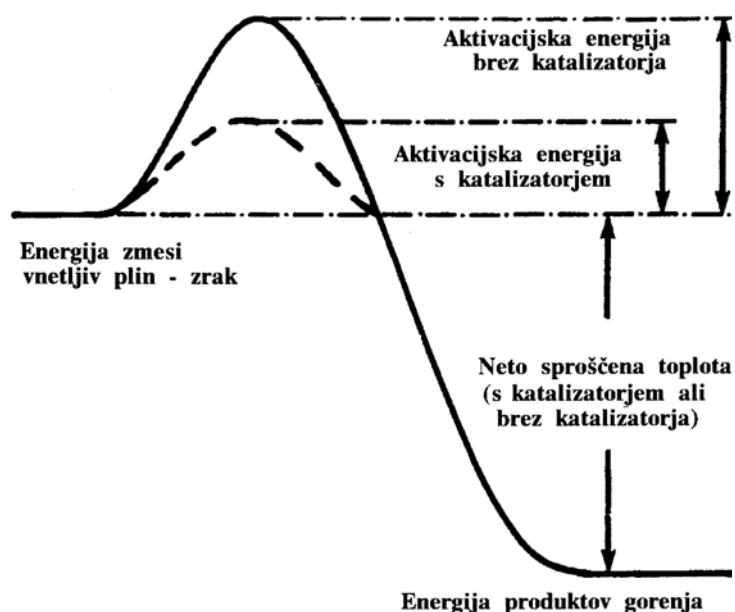


Slika 3: Shematski prikaz heterogenega gorenja z žarom (Grm in Stevanović, 2002)

2.4 DEJAVNIKI KI VPLIVAJO NA VŽIG IN GORENJE

2.4.1 Katalizatorji

Katalizatorji so snovi, ki močno vplivajo na hitrost kemijske reakcije, ne da bi se pri tem sami spreminjali. Prisotnost katalizatorjev povzroči, da pride do vžiga že pri temperaturah, ki so nižje od normalne temperature samovžiga. Katalizator zniža aktivacijsko energijo, ki je potrebna za pretvorbo aktiviranega kompleksa. Neto sproščena energija pri reakciji je enaka, toda zaradi znižane aktivacijske energije lahko pri reakciji gorenja s katalizatorjem reagira bistveno več molekul, kot pri reakciji gorenja brez katalizatorja (slika 4).



Slika 4: Katalitsko znižanje aktivacijske energije (Grm in Stevanović, 2002)

2.4.2 Inhibitorji

Inhibitorji so snovi, ki so prisotni oziroma dodani že v majhnih količinah. Ob njihovi prisotnosti upočasnijo ali celo zavrejo kemijske reakcije gorenja. Kemikalije, ki se dodajajo materialom za zaviranje gorenja, delujejo kot inhibitorji. S tem se poslabša možnost širjenja plamena po površini materiala. V fazi razvitega požara so dodatki za zaviranje gorenja običajno manj učinkoviti.

2.5 GORENJE TRDNIH SNOVI

Mehanizem gorenja ni enak za vse trdne snovi. Sam potek gorenja in spremembe snovi, ki spremljajo potek gorenja, so odvisne od sestave trdnih snovi in njihovih lastnosti. Glede na potek gorenja oziroma sprememb, ki spremljajo potek gorenja trdnih snovi, ločimo tri osnovne mehanizme (Grm in Stevanović, 2002):

- direktno gorenje,
- gorenje s spremembo agregatnega stanja,
- gorenje s pirolizo (termični razpad).

2.5.1 **Direktno gorenje**

Direktno gorenje trdnih snovi poteka pri segrevanju trdnih snovi, ki pri segrevanju ne razpadejo ali izhlapevajo. Ampak ko dosežejo določeno temperaturo, pride na površini trdne snovi do reakcije s kisikom oziroma do gorenja s tlenjem/žarenjem (hetero gorenje). Na ta način gorijo gorljivi trdni kemijski elementi, in sicer tako nekovine (ogljik, silicij, fosfor) kot kovine (magnezij, aluminij, titan, natrij, kalij) (Grm in Stevanović, 2002).

Kovina : $\text{Mg} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{Mg} + \text{Q}$

Nekovina: $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{Q}$

2.5.2 **Gorenje s spremembo agregatnega stanja**

Za ta način gorenja trdnih snovi je značilno, da v prvi fazi v procesu segrevanja pride do prehoda materiala iz trdnega v tekoče stanje (taljenje) in nato do prehoda iz tekočega v plinsko stanje (izhlapevanje). Gorenje materiala torej poteka po mehanizmu gorenja s plamenom (homogeno gorenje v plinski fazi). Na ta način gorijo nekateri trdni materiali kot so vosek, mast in parafin (Grm in Stevanović, 2002).

2.5.3 **Gorenje s pirolizo**

Gorenje večine trdnih snovi poteka po procesu pirolize. Piroliza je definirana kot kemijski razkroj snovi pod vplivom toplote.

Če segrevamo gorljive trdne materiale nad sobno temperaturo, se pričnejo razkrojni procesi. Najprej izpari prosta in vezana voda, nato pa pričnejo izhlapevati gorljive hlapne komponente, ki gorijo. Večina organskih materialov, kot so les in izdelki na osnovi lesa ter premoga, ne gori, ampak pirolizira. Gorijo vnetljivi produkti pirolize in sicer hlapni ter plinski produkti po mehanizmu gorenja s plamenom (gorenje v homogeni fazi), trdni (ogljje) pa po mehanizmu gorenja s tlenjem/žarenjem (Grm in Stevanović, 2002).

2.6 GORENJE LESA

Les je organski material, ki ga karakterizirata predvsem vnetljivost in gorljivost. Gorenje je termični razkroj lesa, do katerega pride pri segrevanju. Glavne sestavine lesa so celuloza (24 % - 51 %), hemiceluloza (24 % - 30 %), lignin (18 % - 30 %) in akcesorne snovi (nizko molekularne snovi 2 %- 10 %, mineralne snovi 0,2 % - 0,8 %). Petdeset odstotkov suhe mase dreves predstavlja ogljik, ki je bil s fotosintezo odvzet iz ogljikovega dioksida v zraku. V času rasti torej drevo "skladišči" ogljik. Ob starosti po letih zapolni svoje kapacitete, ga je smiselno posekati oziroma izkoristiti, sicer odmre in med trohnenjem znova sprosti v ozračje ogljik, ki se je med rastjo uskladiščil. Izraza gorenja ne moremo ločiti od pojma oksidacije. Oksidacija je prisotna pri vseh temperaturah, kar se odraža v spremembi barve lesa ob normalnih dnevnih temperaturah. Pri višjih temperaturah se les ob gorenju razgradi v enostavnejše spojine in toplotno energijo (preglednica 1).

Preglednica 1: Glavne faze sprememb lesa, ki jih povzroča segrevanje

Temperatura (°C)	Sprememba
80 - 100	Izparevanje vode in hlapnih komponent (faza sušenja, les se mehansko ne spremeni)
90 - 160	Razvijanje gorljivih plinov - produktov razkroja. Pokanje lesa, les potemni
150 - 270	Gorenje sproščenih plinov, les na površini gori, površina pogleni
270	Razkroj lesa se nadaljuje. Zaradi izolatorskih lastnosti poglenele plasti les preneha goreti, če odstranimo vir gorenja
270 - 300	Vnetišče lesa
330 - 470	Temperatura samovžiga
300 - 600	Gorenje se nadaljuje samo, tudi če vir gorenja umaknemo.
nad 600	Intenzivno gorenje in razkroj lesa.

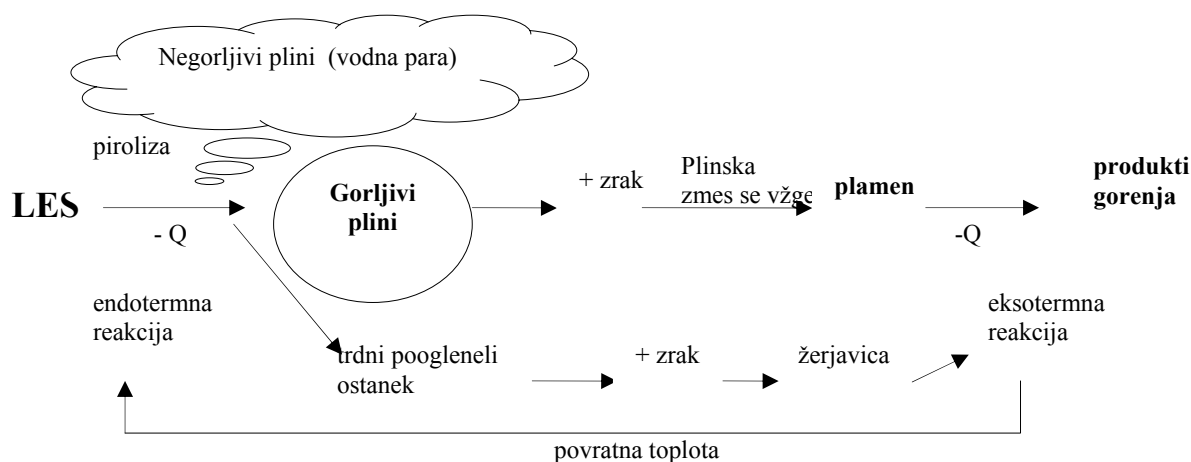
Ena od osnovnih sestavin lesa je celuloza. Z višanjem temperature se prične razpad (piroliza) celuloze. Ker voda predstavlja velik delež celotne sestave lesa, se v začetni fazi pirolize celuloze najprej prične sproščati vodna para. Z nadaljnjim segrevanjem pričnejo izhajati različni negorljivi in gorljivi hlapi, proti koncu razkroja pa prevladuje ogljikov monoksid, ogljikov dioksid in vodna para, dokler na koncu ne preostane samo še ogljik v

obliki sloja oglja. Piroliza se najprej prične na površini lesa in nato se širi globlje v notranjost (slika 5).



Slika 5: Piroliza lesa (Grm in Stevanović, 2002)

Iglavci vsebujejo večje količine smol, ki pri segrevanju hitro izhlapevajo. Za iglavce so značilne večje celice, zato izparevanje poteka pri nižjih temperaturah kot pri listavcih. Celična struktura lesa ima vpliv na temperaturo samovžiga. Proces pirolize lahko poteka pri temperaturah, ki so precej nižje od temperature samovžiga (od 330 °C do 471 °C). Gorljivi plini, ki se sproščajo, se pomešajo z okoliškim zrakom. Ko je dosežena spodnja meja vnetljivosti (od 270 °C do 300 °C) in minimalna vžigna energija, se ti plini vžgejo. Gorenje poteka s plamenom v plinski fazi. Pri temperaturi vžiga se celotni kemijski proces z endotermnega spremeni v eksotermnega in postane samozadrževalen. Na začetku je pri doseženi temperaturi samovžiga koncentracija ogljikovega dioksida in vodne pare v sproščenih plinih še previsoka, da bi omogočila daljše vzdrževanje gorenja s plameni. Toplota, ki jo oddajajo plameni, sproži reakcijo sekundarne pirolize, kar ima za posledico sproščanje večje količine gorljivih plinov in gorenje s plameni poteka v celoti v plinski fazi. Do temperature gorišča (280 °C) je gorenje lesa endotermen proces, nad temperaturo gorišča pa je proces eksotermen in se sprošča energija (slika 6).

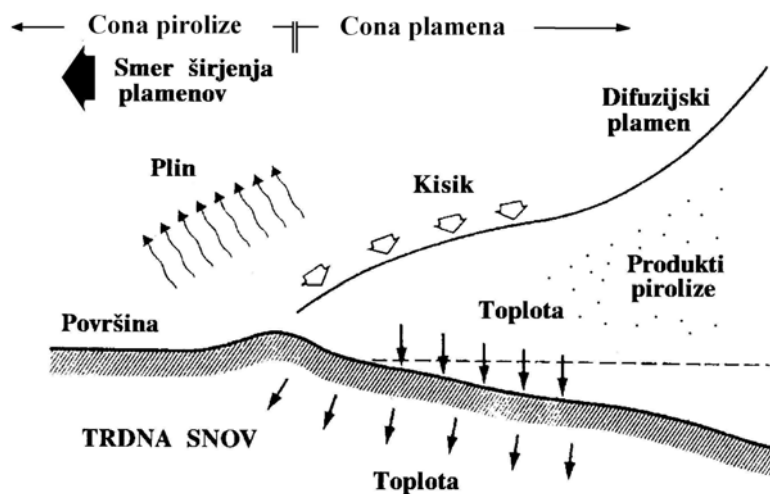


Slika 6: Shematski prikaz procesa gorenja (Ličan, 2005)

Sproščanje plinov pod površino lesa oziroma v območju pirolize je lahko tako intenzivno, da onemogoča dostop kisika do površine lesa ter tako plasti oglja upočasni ali celo prepreči gorenje. Kasneje, ko se proces pirolize pričenja ustavljati, ker zmanjkuje lesa, pa ima kisik iz zraka dostop tudi do površine oglja. Oglje prične goreti brez plamena.

Do gorenja z žarenjem pride pri lesu v zadnji fazi pirolize, ko večina gorljivih hlapov in plinov že zgori, ali pa v primerih, ko je nastanek hlapov in plinov preprečen z dodatkom snovi za preprečevanje plamenenja (Grm in Stevanović, 2002).

Pri gorenju lesa ločimo cono plamena in cono pirolize. Zaradi prenosa toplote (kondukcija, konvekcija in sevanje) s cone napredujočega plamena pride do segrevanja negorečih površin lesa. Toplota omogoča potek procesov pirolize. Na smer in hitrost širjenja plamena vplivajo poleg požarnih in toplotnih lastnosti lesa tudi prostorninska orientacija ter vpliv toka zraka (jakost in smer), zaradi vzgona ali prisilne ventilacije. Proces širjenja plamenov je odvisen od kinematike reakcij oksidacije v plamenu, hitrosti prenosa toplote z gorečega na negoreče območje ter hitrosti pirolize (slika 7).

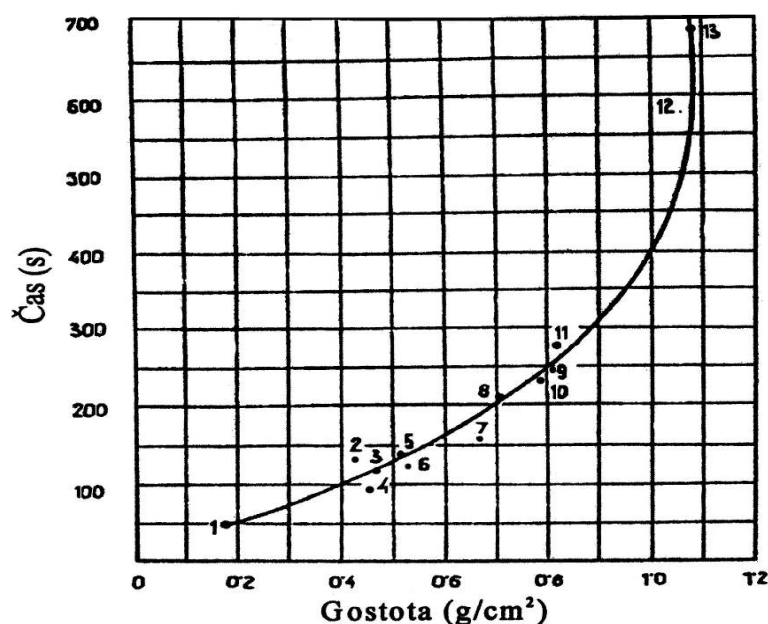


Slika 7: Shematski prikaz širjenja plamenov pri gorenju lesa (Grm in Stevanović, 2002)

2.7 NARAVNA ODPORNOST LESA PROTI GORENJU

Naravna odpornost in hitrost gorenja lesa sta odvisni od:

- specifične gostote oziroma volumenske teže (bolj porozen in lahek les lažje gori) (slika 8),
- dimenzij lesa (manjši kosi lažje zagorijo, kocka gori lažje kot krogla),
- površine lesa (kosmata površina lesa ima večjo specifično površino, zato bolje gori kot gladka površina) (slika 9),
- vlačnosti lesa (vlažen les težje zagori kot suh, ker se del toplote porabi za izparevanje vode).



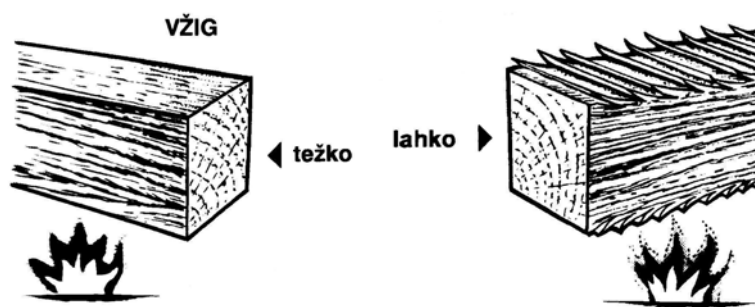
Slika 8: Čas gorenja v odvisnosti od gostote oziroma vrste lesa pri temperaturi 320 °C. 1. balzovina, 2. smrekovina, 3. borovina, 4. bahinovina, 5. gabunovina, 6. jelševina, 7. javorovina, 8. hrastovina, 9. bukovina, 10. jesenovina, 11. les robinije, 12. ebenovina, 13. pitchpine (Ditrich, 1971)

Vnetljivost in hitrost gorenja lesa sta obratno sorazmerni gostoti lesa. Različne vrste lesa imajo različne gostote in se lahko zelo razlikujejo med seboj po odpornosti za vžig ter hitrosti gorenja (preglednica 2).

Preglednica 2: Odpornost lesa drevesnih vrst proti gorenju (Kervina – Hamović, 1990)

Odpornost	Les drevesne vrste
Zelo visoka	senegalski ebenovec
Visoka	pušpan, sandalovina, gvajak
Srednja	hrast, jesen, bukev, breza, robinija, glog, brest, tik
Nizka	smreka, javor, lipa, češnja, oreh, macesen, duglazija, jelka
Zelo nizka	jelša, lipa, vrba, samba
Izredno nizka	palisander

Les z večjo specifično površino (tanke plošče, oblanci, sekanci, prah) se pod vplivom toplote in v prisotnosti kisika lažje vname ter gori kot pa les z manjšo specifično površino.



Slika 9: Vpliv obdelanosti površine na vžig trdnih materialov (Grm in Stevanović, 2002)

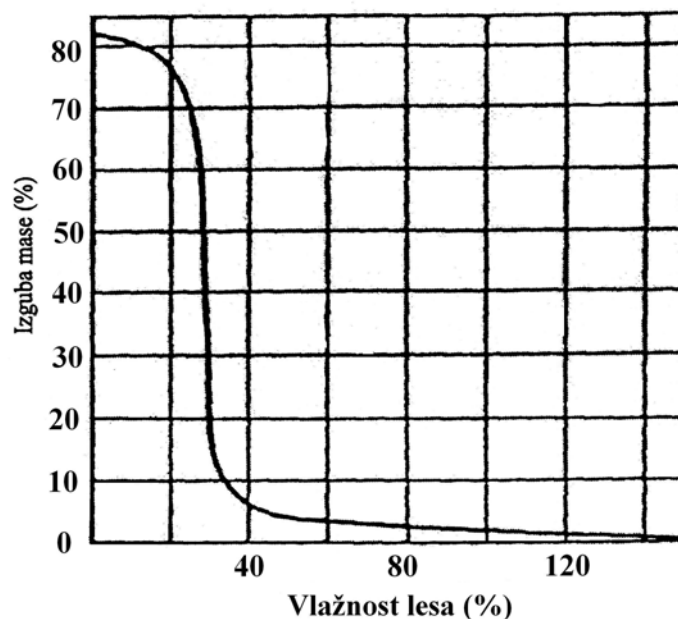
Majhna količina vode pospeši proces gorenja, ker suhe zmesi ogljikovega monoksida in kisika ni mogoče vžgati. Če pa plinska zmes ogljikovega monoksida in kisika vsebuje le sledove vode, je gorenje mogoče. Pri oksidaciji ogljikovega monoksida deluje namreč voda kot katalizator. Večje količine vode pa zavirajo proces gorenja. Voda pri izparevanju absorbira veliko količino toplote, saj je njena izparilna energija 2,2 MJ/kg. Da se les vname, mu moremo najprej dovesti toliko toplote, da vsa voda izpari in potem še toliko, da ga segrejemo do temperature vnetišča (280 °C).

Voda v lesu močno zmanjšuje energijsko vrednost lesa. Za vsak odstotek povečanja vlažnosti se toplotna vrednost zmanjša za 1,2 %. V preglednici 3 je prikazana povprečna toplotna vrednost lesa pri različnih vlažnostih (Likavec, 1980).

Preglednica 3: Povprečna energetska vrednost lesa pri različnih vlažnostih, izražena v MJ/kg

Vlažnost (%)	Energetska vrednost (MJ/kg)
0	17,58
20	14,23
40	11,72
80	8,37

Preizkusi vpliva vlažnosti pri gorenju so bili izvedeni po Truax - Harrisonovi metodi. Pri 30 % vlažnosti lesa je izguba mase vzorcev le okoli 10 %. Ta odstotek vode v lesu dovolj učinkovito zavira gorenje, vendar pa vgrajen les, razen v izjemnih primerih, ni tako vlažen (slika 10) (Ditrich, 1971).



Slika 10: Vpliv vlažnosti lesa na izgubo lesne mase pri sežigu borovih letvic po metodi ASTM: E 69 – 50 (1965)

2.8 MODIFIKACIJA LESA

V iskanju novih okolju prijaznejših postopkov in biocidne zaščite lesa, ki bi uspešno nadomestili kemična zaščitna sredstva, se je modifikacija lesa izkazala kot alternativna možnost izboljšanja odpornosti lesa.

Les lahko modificiramo z različnimi postopki. Vsem je skupno, da se med postopkom modifikacije trajno spremeni molekularna struktura celične stene oziroma struktura lesnih polimerov (celuloza, lignin in hemiceluloza). Posledica spremembe strukture lesa so spremenjene lastnosti lesa: zmanjšana higroskopnost, povečana biološka odpornost, povečana dimenzijska stabilnost, itd. (Rep in Pohleven, 2002).

2.8.1 Načini modifikacije lesa

Glede na postopek spremembe strukture lesnih polimerov obstajajo trije glavni načini modifikacije lesa:

- kemična modifikacija
- encimska modifikacija
- termična modifikacija
- fizikalna modifikacija

Kemična modifikacija lesa

Pri kemični modifikaciji poteče kemijska reakcija med kemičnim reagentom in komponentami lesnih polimerov in s tem se spremeni njihova struktura. Največkrat poteče kemična reakcija med reagentom in hidroksilnimi skupinami lesnih polimerov, saj so to tudi najbolj reaktivne. Lastnosti modificiranega lesa so odvisne predvsem od uporabljenega reagenta in dosežene stopnje modifikacije (Rep in Pohleven, 2002).

Encimska modifikacija lesa

Modifikacija lesa s pomočjo encimov je zaenkrat še najmanj raziskano področje. Način spremembe osnovne molekularne strukture poteka s pomočjo encimov. Na primer encim lakaza spremeni strukturo lignina in s povečanjem števila reaktivnih mest omogoča vroče lepljenje lesnih vlaken. Možno je celo lepljenje brez dodatnega lepila (Rep in Pohleven, 2002).

Termična modifikacija lesa

V odsotnosti kisika les segrevamo in s tem spremenimo osnovno molekularno strukturo lesa. Pri tem pride do delne depolimerizacije polimerov v celični steni in do preoblikovanja

le-teh. Termično modificiran les je biološko odpornejši in dimenzijsko stabilnejši, a mehansko oslabljen (Rep in Pohleven, 2002).

Fizikalna modifikacija lesa

Fizikalno modifikacijo lesa dobimo z zgoščevanjem lesa, pri komercialno nezanemljivih drevesnih vrstah in drevesnih vrstah z nižjo gostoto. Zgoščevanje lesa dosežemo s stiskanjem lesa v prečni smeri in je sestavljeno iz naslednjih korakov:

- mehčanje ali plastificiranje celičnih sten,
- stiskanje pravokotno na vlakna v zmehčanem stanju,
- sušenje in ohlajanje v deformiranem stanju,
- fiksiranje deformiranega stanja (Kutnar, 2008).

2.8.2 Lastnosti termično modificiranega lesa

Pri obdelavi lesa z termično modifikacijo lesa se spremenijo tudi lastnosti lesa:

- izguba lesne mase (pri maksimalni temperaturi 190 °C do 230 °C, navaja Rep s sodelavci (2004), da le ta znaša med 3,5 in 24 % pri smrekovem lesu,
- z višanjem stopnje modifikacije se povečuje tudi dimenzijska stabilnost,
- z višanjem stopnje modifikacije se povečuje tudi odpornosti proti glivam in insektom,
- zmanjšajo se mehanske lastnosti, upogibna trdnost se zmanjša 10 do 30 %, če pa ni proces modifikacije ni optimiziran, se upogibna trdnost zmanjša celo do 50 % (Militz in Tjeedrsma, 2001),
- z večanjem izgube lesne mase pada tudi pH, kar ima posledično vpliv na lepljenje ter površinsko obdelavo lesa,
- z večanje temperature modifikacije lesa se spreminja tudi barva lesa (od svetlo rjave roti temnejši rjavi barvi).

2.8.2.1 Ognjeodpornost

Kemična modifikacija lesa običajno ne vpliva na ognjeodpornost lesa. Termično modificiran les, kateremu se pri postopku poškoduje struktura površine, pa je v primerjavi s termično neobdelanim lesom hitreje vnetljiv. Z višjo stopnjo modifikacije in z naraščanjem izgube mase pri termični modifikaciji se vnetljivost lesa sorazmerno povečuje (Patzelt in sod., 2002).

2.8.3 Uporaba termično modificiranega lesa

Lastnost termično modificiranega lesa se močno razlikuje od lastnosti nemodificiranega lesa. Namenjen je zunanji in notranji uporabi, kjer je zahtevana povečana odpornost proti škodljivcem ali pa dimenzijska stabilnost in tam kjer ni mehansko obremenjen. Pomembna prednost modificiranega lesa je, da se v lesu z modifikacijo lesa izloči smola v velikem deležu ali celo v celoti.

Najpogosteje uporabljamo termično modificiran les za:

- vrtno pohištvo
- okna/vrata
- talne obloge
- zunanje opaže
- specifične namene (savne, kopalnice, glasbila, itd.)

Odpornost termično modificiranega lesa proti glivam in insektom je odvisna o pogojev v katerih je potekala modifikacija. Vendar je ne moremo primerjati z odpornostjo lesa, zaščenega s pripravki, ki vsebujejo biocidne spojine. Uporaba termično modificiranega lesa v stiku z zemljo in vodo (4. razred izpostavitve) ni primerna (Militz, 2002).

2.9 ZAŠČITA LESA PROTI GORENJU Z BOROVIMI PRIPRAVKI

Kmalu po prvih uporabah borovih spojin v industriji, se je začela tudi uporaba v protipožarnih zaščitnih sredstvih. Za zadostno protipožarno zaščito mora les vsebovati vsaj 48 kg/m^3 borove kisline. To je 10-krat višjo vrednost borove kisline v lesu, kot je potrebno za učinkovito zaščito pred glivami razkrojevalkami. Okorn (1999) je ugotovil, da so raztopine z večjim deležem bora bolj zavirala gorenje kot raztopine z manjšim deležem bora. Primerljive so tudi izgube mase in deleži bora med samimi sredstvi ter so ravno tako v takšni povezavi. Pri tem je še ugotovil, da topilo ne vpliva bistveno na gorljivost lesa.

2.9.1 Prednosti in slabosti borovih spojin

V zaščiti lesa pred gorenjem se uporabljajo različne borove spojine. Pri tem je značilno za večino borovih sredstev, da tvorijo pri povišani temperaturi na površini lesa plast, ki zadržuje izhajanje gorljivih plinov iz lesa. Poleg tega pa je za borove spojine značilna nizka strupenost za sesalce in majhen vpliv na mehanske lastnosti lesa.

Glaven problem borovih spojin je kako zagotoviti fiksacijo bora v les ter s tem zmanjšati njegovo izpiranje iz lesa. Na tem področju potekajo številne raziskave, vendar do sedaj praktične rešitve še niso zadovoljive.

Prednosti borovih spojin:

- že v majhnih koncentracijah so toksične za večino ksilofagnih gliv in insektov, učinkovito delujejo proti termitom ter glivam, ki povzročajo belo in rjavo trohnobo,
- so nehlapne, brez barve in vonja, kar omogoča površinsko obdelavo lesa po želji,
- ob primerni površinski zaščiti, ki preprečuje navlaženje lesa, je impregniran les uporaben tudi za zunaj, vendar ne ob stiku z zemljo,
- borove spojine ne vplivajo na mehanske lastnosti lesa ter na nadaljnjo mehansko in površinsko obdelavo lesa,
- so učinkoviti zadrževalci gorenja lesa, zato je impregniran les odpornejši proti gorenju od neimpregniranega,

- primerne so za vse postopke impregnacije,
- globino penetracije borovih ionov lahko določimo z enostavno barvno reakcijo,
- pri uporabljenih koncentracijah so precej manj škodljive za človeka in okolje od drugih zaščitnih sredstev.

Slabosti borovih spojin:

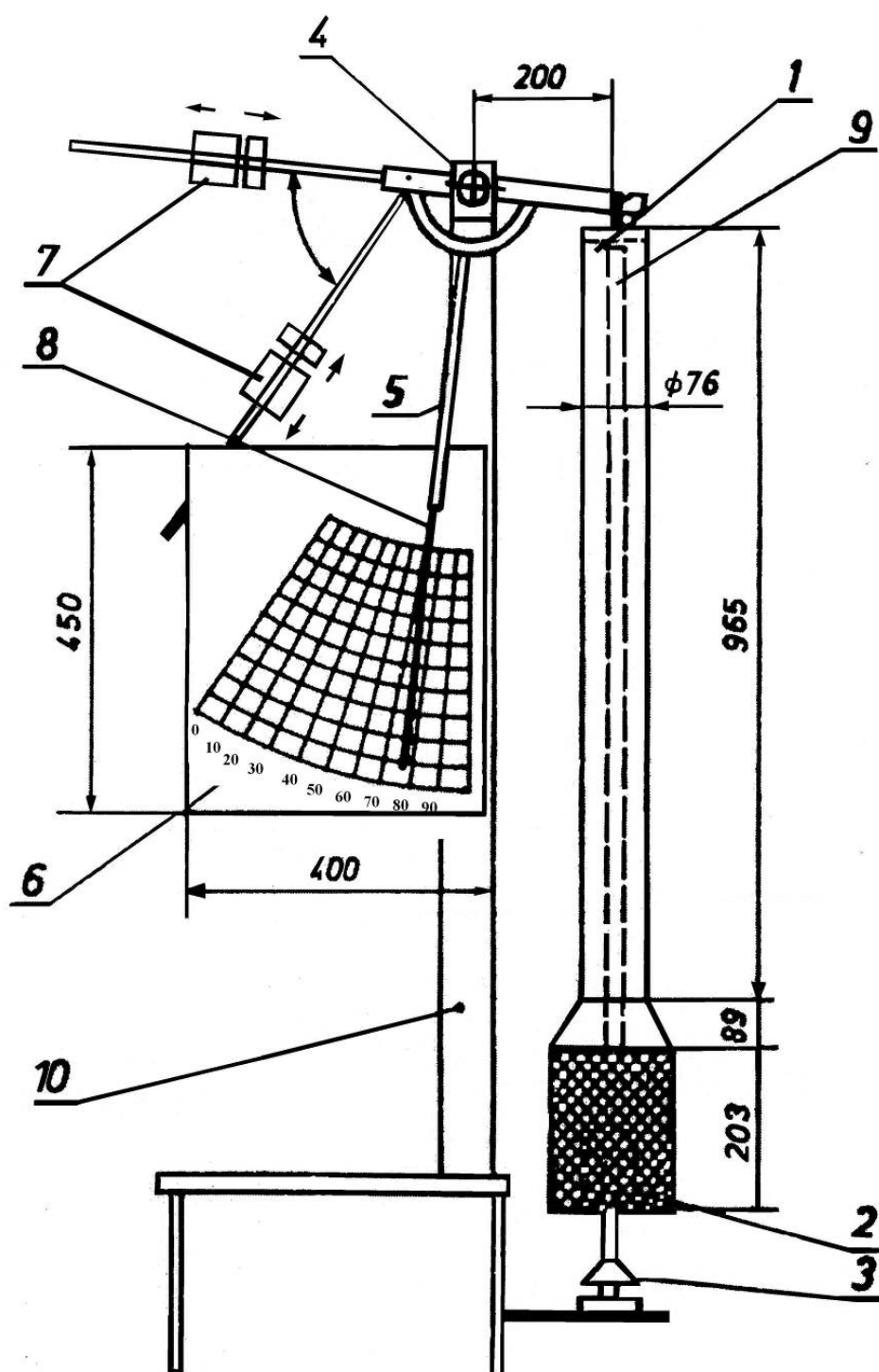
- bor se slabo fiksira v les in je izpirljiv. Tudi v že impregniranem lesu ni dobro fiksiran ampak difuzivno prehaja z vlažnostjo,
- borati so najprimernejši za zaščito svežega lesa, pri osušenem in suhem lesu pa je potrebna oprema za globinsko penetracijo,
- borove spojine ne ščitijo lesa proti vsem vrstam plesni in gliv ter encimov, ki povzročajo obarvanje lesa. Lahko jih uporabljamo v kombinaciji z drugimi učinkovinami, ki so odporna nanje,
- so neselektivni biocidi, ki so toksični že v majhnih koncentracijah,
- borove spojine so težje topne v vodi, zato je potrebno segrevanje,
- odpadni zaščiteni les je težje gorljiv in zažig je potrebno več energije.

2.10 HARRISONOVA METODA ZA DOLOČANJE GORLJIVOSTI LESA

Harrisonova metoda za preizkus sredstev za zaščito lesa pred gorenjem s cevno napravo za ogenj - ASTM: E 69-50, 1965 služi predvsem za preizkušanje zaščitnega sredstva kot materiala, ne pa lesa kot ognje odpornega elementa, ki se uporablja v konstrukciji. Metoda je povzeta po ameriškem standardu ASTM, zato so vse vrednosti podane v anglosaksonskih enotah in so preračunane v evropski merski sistem (Devjak, 1999)

2.10.1 Naprava

Aparatura je sestavljena iz mrežaste ognjevarne cevi, v katero se vstavi lesni vzorec ter dodatna oprema. Bistvo naprave je nihalo, ki direktno pokaže odstotek izgube mase vzorca med gorenjem. Uporablja se Bunsenov gorilnik, ki ima notranji premer 9,5 mm. Za preizkus je potrebnih vsaj pet vzorcev dimenzij 1000 mm × 20 mm × 10 mm z vlažnostjo $(7 \pm 3) \%$. Površine vzorcev morajo biti gladke (slika 11).



Slika 11: Naprava za preizkušanje požarnozaščitnih premazov po Harrisonovi metodi: 1 - mrežasta ognjevarna cev; 2 - razširjeni del zaščitne cevi; 3 - gorilnik; 4 - ročica tehtnice; 5 - kazalec; 6 - skala; 7,8 - protiuteži za uravnavanje; 9 - vzorec; 10 – stojalo (ASTM: E 69-50, 1965)

2.10.2 Postopek preizkušanja

Preizkušanje mora potekati po naslednjem vrstnem redu:

- izdelava vzorcev,
- kondicioniranje vzorcev,
- zaščita vzorcev,
- sušenje in kondicioniranje premazanih vzorcev,
- preizkus gorljivosti,
- analiza rezultatov.

Gorilnik mora biti uravnan tako, da je višina celotnega plamena 28 cm z nerazločnim notranjim modrim stožcem. Temperatura plamena je 1000 °C, na vrhu cevi pa 180 ± 5 °C. Nihalo naprave se s posebnimi utežmi naravna tako, da kaže pri predhodno segreti prazni cevi kazalec vrednost 100 %, ko je preizkušanec obešen v cev, pa vrednost 0 %.

Preizkus opravimo tako, da vzorec po uravnavanju naprave postavimo 25 mm nad ustje gorilnika. Izvajamo ga v prostoru, kjer ni prepiha ali v laboratorijskem digestoriju. Plamen deluje na preizkušanec štiri minute, nato ga izključimo. Med delovanjem ognja vsakih trideset sekund odčitamo izgubo mase vzorca. S tem nadaljujemo tudi po odstranitvi plamena, vse dokler izguba mase v eni minuti ni večja od 1 % ali če se vzorec ne prelomi. V primeru, da se vzorec prelomi pred potekom 4 minut, plamen odmaknemo in se zabeleži čas preloma.

Odstotek izgube lesne mase je merilo gorljivosti vzorca. Po ASTM E 69-50 uvrščamo vzorce, ki izgubijo med preizkušanjem gorljivosti manj kot 15 % svoje mase in katerih stopnja zaščite je med 8,125 in 10. S temi lastnostmi je les kvalitetno zaščiten proti gorenju in premaz je uvrščen med požarnozaščitno sredstvo.

V standardu je naveden čas delovanja plamena na vzorec štiri minute, ki pa ni nujno, da je dosežen, saj se les pogosto prej zlomi. V primeru da pri nobenem vzorcu ne dosežemo

ustrezne stopnje zaščite (...1), poleg izgube lesne mase kot merilo gorljivosti navedemo še čas gorenja.

Stopnjo zaščite lesa izračunamo po formuli:

$$U = 10 \times (1 - t / t_0) \quad \dots (1)$$

Pri čemer pomeni:

U..... stopnja zaščite,

t končna izguba mase zaščitenega lesa (%),

t_0 končna izguba mase nezaščitenega lesa (%).

3 MATERIALI IN METODE DELA

3.1 MATERIALI

3.1.1 Opis vzorcev

Za preizkušanje gorljivosti vzorcev, smo uporabili jedrovino smrekovega lesa, z vlažnostjo 7 ± 3 %. Vzorci so bili brez grč in s približno enako teksturo lesa. Predpisani vzorci so dimenzije $1000 \times 20 \times 10$ mm. Naši vzorci pa so dimenzije $500 \times 20 \times 10$ mm, zato smo jih medsebojno čelno spojili z jeklenimi sponkami in tako dosegli predpisano dolžino.

Vzorci, ki smo jih uporabili pri diplomski nalogi, smo razvrstili ter označili v posamezne podskupine po pet vzorcev. Vseh skupaj je bilo 125.

Vzorci smo nato postavili v laboratorijsko sušilno komoro Kambič, v kateri smo pustili vzorce 24 ur na temperaturi 103 ± 2 °C, da so se osušili na absolutno suho stanje ter jih stehali.

3.1.2 Zaščitni pripravek za impregnacijo - Topbor

Topbor se v praksi uporablja kot gnojilo za poljščine. Na trgu je navoljo v beli prškasti obliki, ki ga raztopimo v vodi. Topbor je lahko topen v vodi pri koncentraciji pod 5 %, višje koncentracije Topbora pa so slabše topna v vodi. Topbor je za ljudi in okolje neškodljiv.

Kemijske lastnosti:

Kemijsko ime: dinatrijev oktoborat tetrahidrat

Formula: $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \times 4 \text{H}_2\text{O}$

Vsebnost bora: 19,9 % B (oz. 64,4 % B_2O_3)

pH 2 % vodne raztopine: 8,6

3.2 METODA DELA

V diplomskem delu smo ugotavljali gorljivost termično modificiranega in impregniranega z borovimi pripravki, po modificirani standardni metodi ASTM: E69 – 50, 1965 (metoda po Harrisonu) (Ličan, 2005). Napravi smo najprej določili umeritveno krivuljo. Ročico krivulje smo obremenjevali z različnimi utežmi mase 10, 30, 80 in 90 g in odčitali vhodne napetosti ter določili linearnost naprave. Nato smo določili gorljivost kontrolnih vzorcev, pri različnih temperaturah modificirani vzorci, pri impregniranih vzorcih za borovimi pripravki in kombinacija modificiranja ter z borovimi pripravki impregnirani vzorci. Dobljene rezultate smo med seboj primerjali in ugotavljali vpliv modifikacije ter koncentracije bora na ognjeodpornost.

3.2.1 Priprava impregnacijskega sredstva

Za impregnacijsko sredstvo smo uporabili Topbor, kateri se nahaja v prašni obliki. Zaradi praškaste oblike, ga ne moremo uporabiti za impregnacijsko sredstvo, dokler ga ne raztopimo v destilirani vodi. V našem primeru smo v čašo zatehtali 20 gramov Topbora in nato prelili z 2000 grami vode, da smo dobili impregnacijsko sredstvo z 1 % vodno raztopino Topbora. Ko smo prelili z vodo smo v čašo vstavili še magnetno mešalo ter postavili na mešalnik z vgrajenim grelcem, za hitrejše raztapljanje impregnacijskega sredstva. Mešalnik smo pustili delovati toliko časa, dokler se Topbor ni v popolnosti raztopil v vodi. Primerljiv postopek smo ponovili še dvakrat, za pripravo 5 % in 10 % vodno raztopino Topbora (slika 12).



Slika 12: Priprava impregnacijskega sredstva

3.2.2 Impregnacija vzorcev

Po pripravi impregnacijskega sredstva smo v plastično posodo zložili vzorce za določeno koncentracijo impregnacijskega sredstva. Med vzorce smo postavili mrežico, da je impregnacijsko sredstvo obilo vzorce z vseh strani. Na vrhu smo jih še obtežili, kot je razvidno iz slike 13.



Slika 13: Vzorci pripravljeni za impregnacijo

Vzorci smo impregnirali v vakuumsko-tlačni komori KAMBIČ (slika 14). V komoro smo postavili posodo z vzorci prelitimi z borovim pripravki. Komoro smo zaprli ter postopoma vzpostavili vakuum na 0,95 bara. V vakuumu smo pustili vzorce 1 uro, nato pa smo vzpostavili nadtlak, ki pa je znašal 8 barov. Tudi v nadtlaku smo pustili vzorce 1 uro, nakar pa smo jih ponovno za 15 minut izpostavili podtlaku.



Slika 14: Vakuumsko-tlačna komora KAMBIČ

Po končanem postopku impregnacije smo posodo z vzorci vzeli iz komore ter jih še dve uri pustili v posodi pri normalnih pogojih za vzpostavitev ravnovesja. Nato smo vzorce vzeli iz posode ter jih zložili v zložaj, da so se posušili. Mokrega navzema nismo določali v diplomski nalogi (slika 15).



Slika 15: Sušenje vzorcev v zložaju.

3.2.3 Termična modifikacija vzorcev

Po impregniranju vzorcev ter kasnejšem sušenju v sušilni komori pri temperaturi 103 ± 2 °C, je sledila še termična modifikacija pri temperaturi 150, 170, 190, 210 ali 230 °C.

V vakuumsko tlačno napravo smo zložilo vzorce med katere smo zaradi enakomernega prehoda temperature med vzorci vstavljali distančne letvice. Za spremljanje temperature smo dodali še manjši kos lesa z izvrtino, v katero smo vstavili temperaturno sondo.

Postopek termične modifikacije poteka v treh fazah:

1. segrevanje temperature na želeno vrednost.
2. proces modifikacije pri želeni temperaturi
3. ohlajanje preizkušancev

V prvi fazi smo s pomočjo vakuumске črpalke vzpostavili vakuum -0,95 bara in nato pričeli s segrevanjem vzorcev. Segrevanje je trajalo toliko časa, dokler nismo dosegli predvideno temperature modifikacije.

V drugi fazi smo želeno temperaturo vzdrževali tri ure.

Po končani temperaturni izpostavitvi je sledila tretja faza ohlajevanja vzorcev. V našem primeru do naslednjega dne.

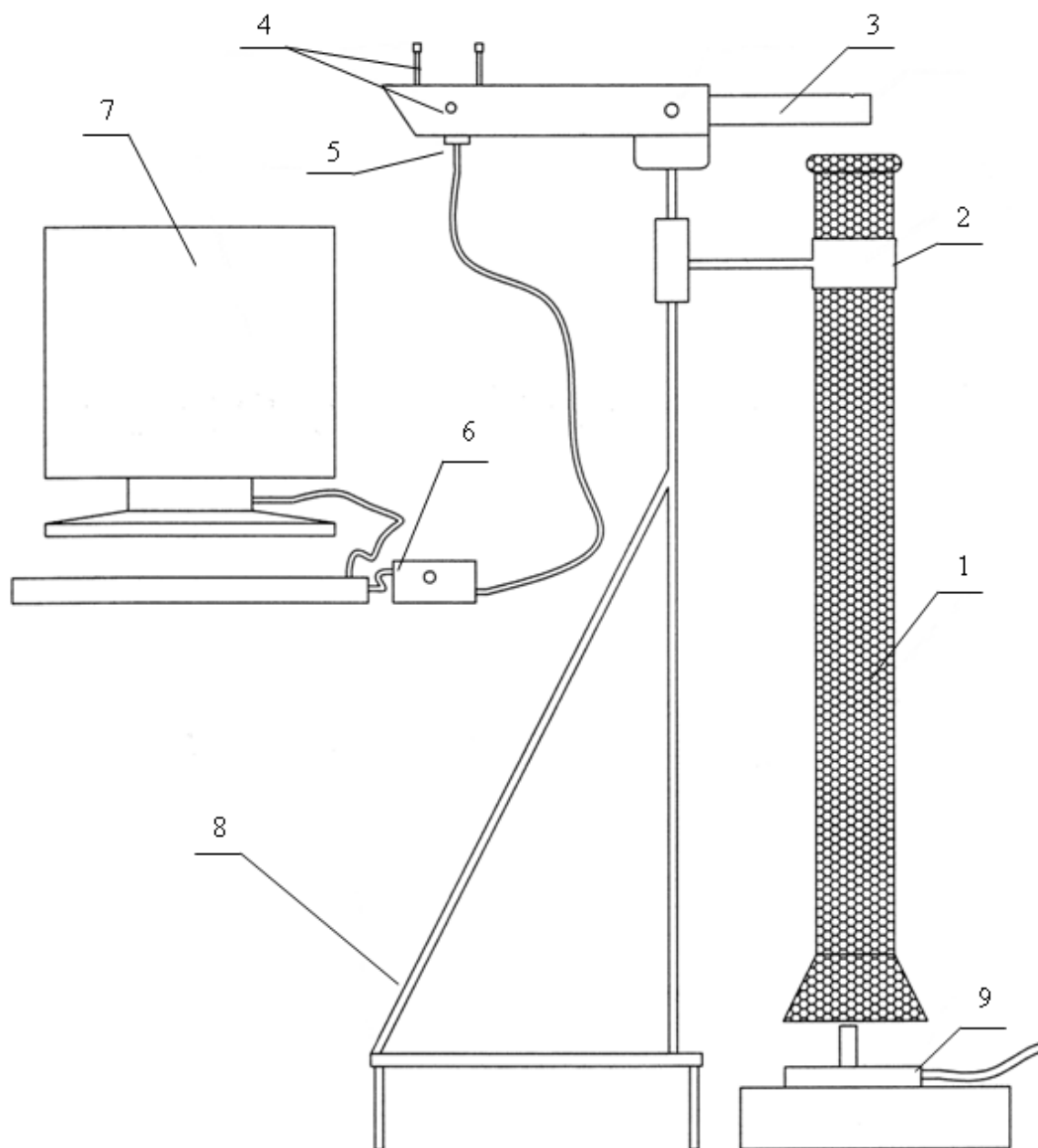
Enak postopek smo izvedli za vsako temperaturo posebej. Pri tem smo spreminjali barvo modificiranih vzorcev, se je z višanjem temperature, barva vzorcev prehajala od svetlejše proti temnejši (slika 16).



Slika 16: Primerjava barvnih odtenkov z višanjem stopnje termične modifikacije lesa. Levi vzorci so bili modificirani pri 150 °C, desni pa pri 210 °C.

3.2.4 Naprava za merjenje odpornosti proti gorenju

Aparatura je sestavljena iz mrežaste ognjevarne cevi, v katero smo vstavili vzorec dimenzij (1000 mm × 20 mm × 10 mm) z vlažnostjo (7 ± 3 %). Vzorec smo obesili na vzvod. Na drugi strani vzvoda je v točno določeni legi nameščen brezstični induktivni senzor pomika. Preko USB vmesnika so lahko beležili pomik vzvoda, ki je premo sorazmeren izgubi mase vzorca med gorenjem. Pod vzorcem smo na razdalji 25 cm namestili Bunsenov gorilnik, kot to določa standard (slika 17)(Ličan, 2005).

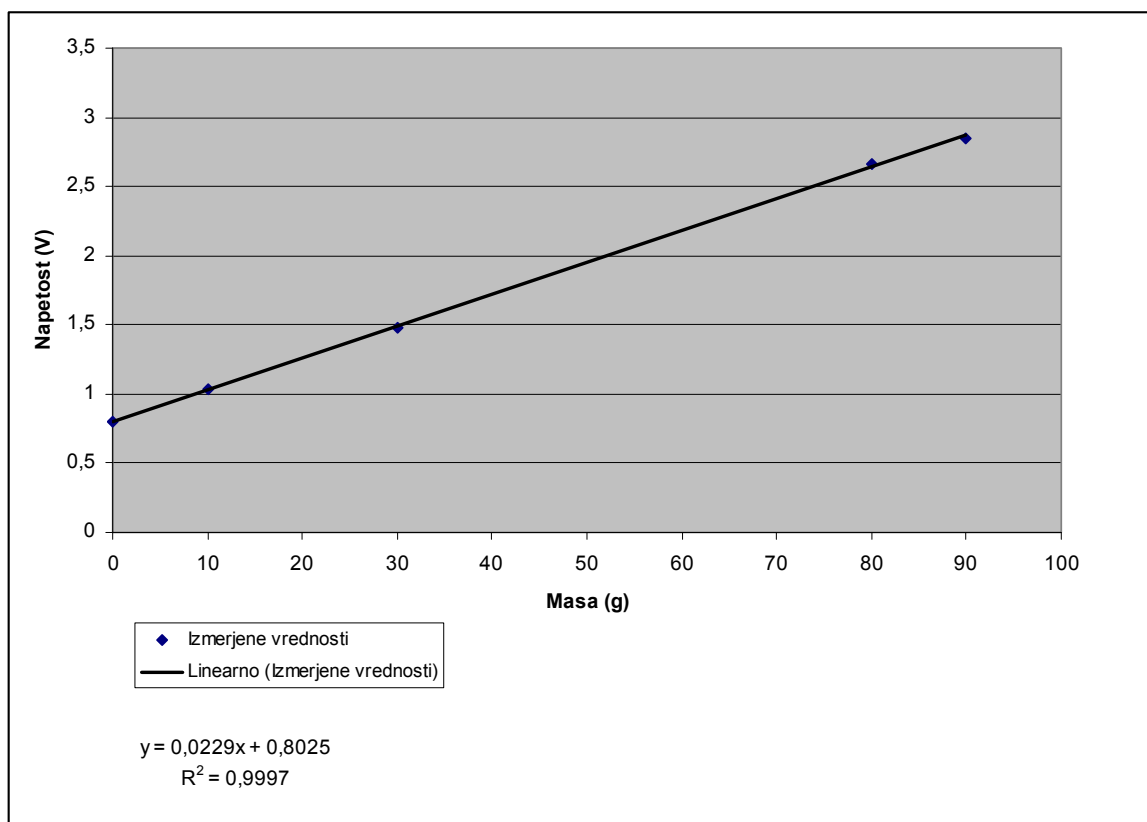


Slika 17: Shema naprave za preizkušanje gorljivosti lesa: 1 - mrežasta ognjevarna cev; 2 - prižema za pritrditev mrežaste ognjevarne cevi; 3 - vzvod; 4 - nastavitveni vijaki; 5 - brezstični induktivni senzor pomika; 6 - USB vmesnik; 7 - računalnik; 8 - stojalo naprave; 9 – gorilnik (Ličan, 2005)

4 REZULTATI

4.1 UMERITEV NAPRAVE

Pred določevanjem gorljivosti preizkušancev, je bilo potrebno še preveriti, ali je linearnost naprave pravilna. Kot je razvidno iz slike 18, je linearnost naprave skoraj popolna. Pri tem smo ugotovili, da znaša korelacijski koeficient med izhodno napetostjo in maso 0,9997.



Slika 18: Umeritvena krivulja naprave za določevanje gorljivosti

4.2 IZGUBA MASE TERMIČNO MODIFICIRANIH VZORCEV

izgubo mase smo določili tako, da smo vzorce stehali pred termično modifikacijo in po termični modifikaciji. Iz dobljenih podatkov smo določili odstotek izgube lesne mase med termično modifikacijo lesa.

Termično modificirani vzorci, ki niso bili predhodno impregnirani, so izgubili pri 150 °C 1,2 % mase, pri temperaturi 170 °C je izguba znašala 2,41 %, izguba mase pri temperaturi 210 °C je znašala 4,51 %. Najvišjo izgubo mase med modifikacijo smo zabeležili pri temperaturi 210 °C, ki je znašala 9,19 %. Zanimiv pa je podatek, da največje izgube nismo zabeležili pri temperaturi 230 °C, ki pa je 8,46 % (preglednica 4).

Preglednica 4: Povprečna izguba mase neimpregniranih vzorcev med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210, 230 °C

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase vzorcev (%)
150	1,2 (0,41)
170	2,41 (0,55)
190	4,51 (0,07)
210	9,19 (0,55)
230	8,46 (0,46)

* standardni odkloni so v oklepajih

Izguba mase pri modifikaciji impregniranih vzorcih z 1 % vodno raztopino Topbora. Pri temperaturi 150 °C je izguba znašala 0,85 %, pri 170 °C 3,92 % in pri 190 °C 6,13 %. Pri najvišji temperaturi pa je znašala 10,14 % (preglednica 5).

Preglednica 5: Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev z 1 % raztopino Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase vzorcev (%)
150	0,85 (0,46)
170	3,92 (0,42)
190	6,13 (0,51)
210	10,14 (0,54)

* standardni odkloni so v oklepajih

Termično modificirani vzorci, kateri so bili predhodno impregnirani s 5 % vodne raztopine Topbora, se je pri temperaturi 150 °C zmanjšala masa za 1,59 %, pri 170 °C 3,46 % in pri 190 °C pa je znašala 5,84 %. Pri najvišji temperaturi 210 °C je znašala izguba mase 10,14 % (preglednica 6).

Preglednica 6: Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev s 5 % raztopino Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase vzorcev (%)
150	1,59 (0,47)
170	3,46 (1,00)
190	5,84 (0,28)
210	10,52 (1,02)

* standardni odkloni so v oklepajih

Vzorci, kateri so bili impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora, so pri modifikaciji z 150 °C izgubili 3,38 %, pri 170 °C 4,2 % in pri 190 °C 6,74 % mase. Pri temperaturi 210 °C smo zabeležili 11,56 % lesne mase (preglednica 7).

Preglednica 7: Povprečna izguba mase impregniranih vzorcev z 10 % raztopino Topbora med postopkom modifikacije pri temperaturah 150, 170, 190, 210 °C

Temperatura modifikacije (°C)	Povprečna izguba mase vzorcev (%)
150	3,38 (1,62)
170	4,32 (0,79)
190	6,74 (0,64)
210	11,56 (0,95)

* standardni odkloni so v oklepajih

4.3 MERITEV GORLJIVOSTI VZORCEV

Po umeritvi smo začeli testirati vzorce na odpornost proti gorenju. Kot predpisuje ASTM standard, smo pri vsaki skupini testirali po pet vzorcev in izračunali povprečne vrednost izgube mase lesa ter zabeležili čas zloma.

4.3.1 Meritev gorljivosti kontrolnih nezaščitenih vzorcev

Kontrolni smrekovi vzorci so se v povprečju porušili po 257 sekundah, pri tem so v povprečju izgubili 75 % lesne mase. Po 30 sekundah opazimo, da so se vzorci še segrevali. Pri tem pa so v povprečju izgubili samo 1 % lesne mase. Po eni minuti pa so smrekovi vzorci zgubili že 8 % lesne mase. Čas porušitve je bil v območju med 197 sekund (K2) ter 320 (K9) sekund. Pri tem pa je najnižja izguba lesne mase 61 % (K2) in najvišja izgube

lesne mase pri vzorcu K9 je znašala 80 % (čas porušitve 320 s). Podrobni rezultati so razvidni v preglednicah 8 in 9 ter sliki 19.

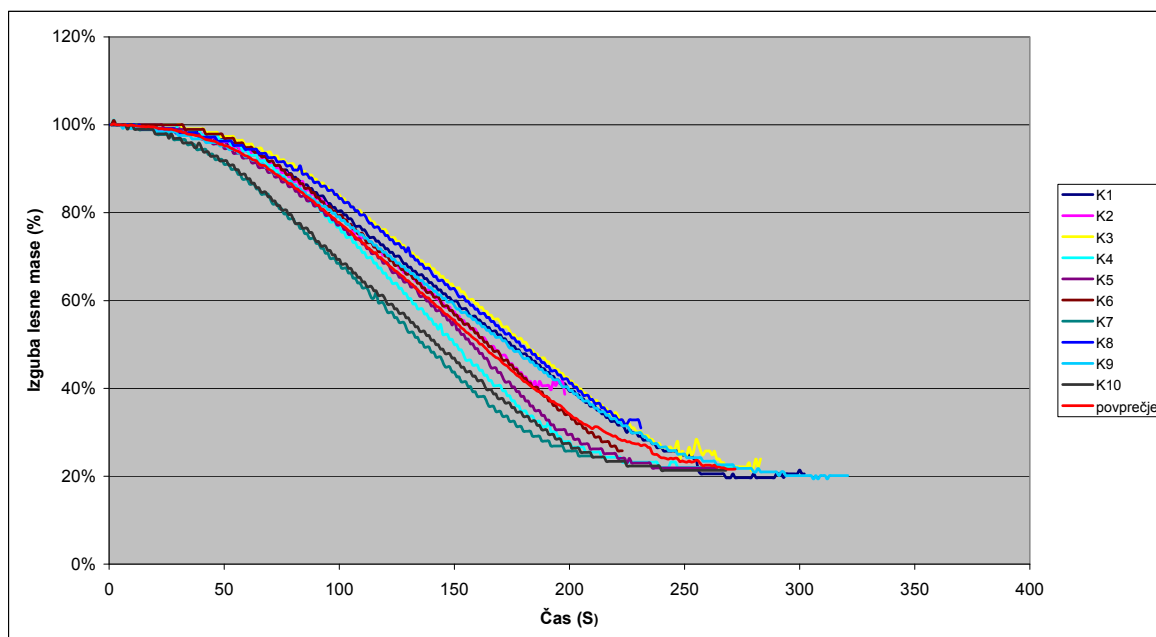
Preglednica 8: Meritve časa zloma smrekovih kontrolnih vzorcev ter izguba mase pred točko zloma

Oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
K1	302	79
K2	197	61
K3	282	76
K4	276	78
K5	263	78
K6	222	74
K7	209	75
K8	234	68
K9	320	80
K10	267	79

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 9: Izguba mase kontrolnih nezaščitenih vzorcev v odvisnosti od časa gorenja

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa															
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s	
K1	1	6	15	28	40	52	64	73								
K2	1	6	17	30	44	57										
K3	0	4	13	25	37	50	63	73								
K4	1	7	19	35	50	65	74	78								
K5	1	8	18	31	47	63	74	78								
K6	0	5	17	30	43	58	71									
K7	3	14	27	43	57	70	85									
K8	2	6	13	25	38	51	63									
K9	2	7	18	30	42	53	65	73								
K10	3	12	27	41	54	66	76	79								



Slika 19: Izguba lesne mase pri kontrolnih smrekovih vzorcih v odvisnosti od časa

4.3.2 Meritev gorljivosti s Topborom impregniranih nemodificiranih vzorcev

Pri 1 % raztopini Topbora (oznaka vzorcev B1/) opazimo, da v primerjavi s kontrolnimi vzorci čas porušitve daljši za samo 2 sekundi, kar pomeni, da med tema vzorcem ni bistvene razlike. Hkrati pa pri tem izgubi manjši delež lesne mase (v povprečju 52 %). Kontrolna skupina vzorcev je pri gorenju do prvega preloma izgubila 75 % mase. Najdaljši čas gorenja je imel vzorec B1/3, saj je vzdržal do zloma 292 sekund, pri tem pa je izgubil 73 % mase. Najmanjši delež lesne mase pa izgubi vzorec B1/5, pri katerem znaša 61 %, vendar pa pride do porušitve pred potekom 4 minut, kot določa standard ASTM.

Pri 5 % raztopini Topbora (oznaka vzorcev B2/) opazimo, da je v povprečju prišlo do hitrejše porušitve vzorcev, kot pa pri kontrolnih vzorcih, saj znaša čas porušitve 252 sekund. Pri tem pa so vzorci v povprečju izgubili 53 % mase, kar pa je boljši rezultat kot pri kontrolnih vzorcih (75 %). Do najhitrejše porušitve je prišlo pri vzorcu B2/3, kjer je bil čas porušitve 177 sekund, pri tem pa je izgubil 55 % mase. Najdaljši čas gorenja pa smo zabeležili pri vzorcu B2/1 (286 sekund), pri tem pa je izgubil 43 % svoje mase.

Pri 10 % raztopini Topbora (oznaka vzorcev B3/), so vsi vzorci presegli čas porušitve, kot predvideva ASTM standard. Najkrajši čas gorenja je znašal 248 sekund (vzorec B3/1), najdaljšega pa smo zabeležili pri vzorcu B3/3 (320 sekund). V povprečju pa so vzorci vzdržali do porušitve 274 sekund, kar je v povprečju za 17 sekund več kot pri kontrolnih vzorcih. Pri tem pa so v povprečju izgubili 35 % mase, vzporedni kontrolni vzorci pa so v istem obdobju izgubili 75 % mase. Vendar če pogledamo preglednico 6 opazimo, da iz povprečja izstopa vzorec B3/3, saj je njegov delež izgube mase višji za 40 %. Če izločimo ta vzorec, pa znaša povprečna izguba mase 25 %, kar pa je boljše od kontrolnih vzorcev. Pri vzorcu B3/4 pa smo ga izločili zaradi težav pri meritvah.

Če primerjamo vzorce impregnirane z različnimi vodnimi raztopinami Topbora opazimo, da se z večanjem deleža Topbora njegova ognjeodpornost povečuje, saj so pri tem izgubili manjši delež lesne mase (preglednici 10 in 11).

Preglednica 10: Čas zloma impregniranih vzorcev z 1, 5 in 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase pred točko zloma

oznaka	Čas zloma (s)		Izguba mase (%)	
b1/1	265	259 (26)	72	52 (5)
b1/2	259		73	
b1/3	292		73	
b1/4	265		62	
b1/5	212		61	
b2/1	286	252 (39)	43	53 (5)
b2/2	256		47	
b2/3	273		44	
b2/4	268		54	
b2/5	177		55	
b3/1	248	274 (29)	29	61 (17)
b3/2	279		22	
b3/3	320		65	
b3/5	251		25	

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 11: Izguba mase impregniranih vzorcev s Topborom 1, 5 in 10 % v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa															
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s	
b1/1	2	2	6	7	13	15	24	26	37	38	49	50	60	60	66	66
b1/2	3		8		16		27		38		50		62		69	
b1/3	2		6		13		24		36		48		58		66	
b1/4	3		10		20		31		41		52		59		62	
b1/5	2		6		15		26		39		51		61			
b2/1	0	1	2	5	6	10	10	17	16	26	23	33	31	40	40	46
b2/2	1		4		8		15		22		31		41		46	
b2/3	2		5		9		18		28		36		41		44	
b2/4	1		5		10		16		28		38		48		53	
b2/5	2		7		15		27		38							
b3/1	1	2	3	3	7	7	13	11	18	16	23	24	25	29	26	31
b3/2	2		4		6		9		12		17		20		20	
b3/3	2		3		7		11		19		33		46		53	
b3/5	1		3		6		11		15		21		25		25	

Pri vzorcu B3/1 je zgornji del ostal praktično nepoškodovan, porušil pa se je do razdalje 40 cm (slika 20)



Slika 20: Prikaz poškodovanosti pri vzorcu zaščiten z 10 % vodno raztopino Topbora (B3/1)

4.3.3 Meritev gorljivosti modificiranih vzorcev

4.3.3.1 Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 150 °C

Vzorci modificirani pri temperaturi 150 °C (oznaka T150/), so imeli povprečni čas porušitve pri 241 sekund. So se pa izkazali slabše kot kontrolni pri katerih smo zabeležili daljši čas gorenja do porušitve. Pri tem so v povprečju izgubili 77 % mase. Če primerjamo izgubo lesne mase s kontrolnimi, tudi tukaj zabeležimo za 2 odstotni točki slabši rezultat izgube mase. Najdaljši čas gorenja smo zabeležili pri vzorcu T150/1, pri katerem je prišlo do porušitve po 283 sekundah, pri tem pa je izgubil 79 % mase. Najhitreje pa je prišlo do zloma pri vzorcu T150/5 in sicer pri 157 sekundah. Zanimivo pa je, da je pri tem izgubil celo 75 % mase. Pri vzorcu T150/1 je prišlo do napake pri meritvi in zato smo ga izločili.

Impregnirani vzorci z 1 % vodno raztopino Topbora in modificirani pri temperaturi 150 °C (oznaka T150/B1/) smo zabeležili povprečni čas zloma 205 sekund. To pomeni, da ne zadošča po ASTM standardu, to je za 51,6 sekund slabši rezultat, kot pri kontrolnih vzorcih. Pri tem pa smo zabeležili 69 % izgube mase, kar je za 6 odstotnih točk manj kot pri kontrolnih vzorcih. Minimalni čas porušitve 4 minut je dosegel samo vzorec T150/B1/1, pri katerem smo zabeležili čas zloma 249 s. Pri tem pa je izgubil 72 % mase. Vsi drugi vzorci te skupine pa niso dosegli predpisanega časa zloma.

Impregnirani vzorci s 5 % vodno raztopino Topbora in modificirani (oznaka T150/B2/), se v povprečju niso zlomili v 240 sekundah. Pri teh vzorcih smo zabeležili čas zloma v 210 sekundi in pri tem so izgubili 63 % mase. Edini vzorec T150/B2/5 je presegel mejo 240 sekund in sicer za 17 sekund pri tem pa je izgubil 77 % mase (257 sekund).

Pri impregniranih z 10 % vodno raztopino Topbora in modificiranih vzorcih (oznaka T150/B3/), smo zabeležili povprečni čas zloma 240 sekund, pri tem pa so izgubili 54 % mase. Čas porušitve vzorcev sicer je na predpisani meji 240 sekund, ki je za 17 sekund slabši rezultat kot pri kontrolnih vzorcih. Najboljši rezultat smo izmerili pri vzorcu T150/B3/4, kjer je bil čas zloma pri 274 sekundah, pri tem pa je izgubil 46 % mase. Najslabše se je izkazal vzorec T150/B3/5 pri katerem je prišlo do zloma pri 196 sekundah in je izgubil 49 % svoje mase. Pri vzorcu T150/B3/1 pa je prišlo do napake pri merjenju gorljivosti, zato smo ga izločili.

Pri vseh vzorcih, modificiranih pri temperaturi 150 °C, smo zabeležili hitrejši zlom, kot pri kontrolnih vzorcih. Predpisani čas gorenja 240 sekund so dosegli vzorci T150/, ki pa so izgubili največ mase ter vzorci iz skupine T150/B3/, ki so bili impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora (preglednica 12 in 13).

Oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
T150/2	283	79
T150/3	244	77
T150/4	280	78
T150/5	157	75
T150/B1/1	249	72
T150/B1/2	192	64
T150/B1/3	197	71
T150/B1/4	168	61
T150/B1/5	222	77
T150/B2/1	229	75
T150/B2/2	191	63
T150/B2/3	194	66
T150/B2/4	181	55
T150/B2/5	257	57
T150/B3/2	250	62
T150/B3/3	239	59
T150/B3/4	274	46
T150/B3/5	196	49

Preglednica 13: Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 150°C v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa															
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s	
T150/2	3	3	12	12	25	26	41	43	57	59	70	71	76	75	78	77
T150/3	2		10		23		38		55		68		76		77	
T150/4	3		8		20		34		49		62		72		77	
T150/5	5		18		37		57		74		83					
T150/B1/1	3	3	13	11	29	25	44	41	61	55	69	68	71	74	72	72
T150/B1/2	2		7		18		33		46		59					
T150/B1/3	4		15		30		45		59		69					
T150/B1/4	2		9		23		39		55		68					
T150/B1/5	3		11		25		42		56		74		77			
T150/B2/1	2	2	8	7	20	16	36	30	51	46	70	59	74	74		57
T150/B2/2	1		5		13		27		41		62		78			
T150/B2/3	1		9		20		36		60		65		87			
T150/B2/4	3		7		16		31		44		55		77			
T150/B2/5	1		5		10		19		32		45		54		57	
T150/B3/2	2	2	10	5	24	13	40	23	53	35	60	48	62	53	62	53
T150/B3/3	1		3		8		16		28		47		55			
T150/B3/4	2		5		10		17		27		39		42		44	
T150/B3/5	1		3		8		17		30		47					

4.3.3.2 Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 170 °C

Modificirani vzorci brez impregniranja s Topborom so pri temperaturi 170 °C (oznaka T170/) v povprečju dosegli predpisanih 240 sekund in sicer je bil čas gorenja do prvega zloma presežen za 8 sekund, pri tem pa so izgubili 78 % mase. Če pa primerjamo ne impregnirane in modificirane pri temperaturi 150 °C s kontrolnimi nemodificiranimi vzorci, so dosegli slabši rezultat. Najboljši čas do prvega zloma je dosegel vzorec T170/3. Pri njem smo zabeležili zlom pri 276 sekundah in je izgubil 78 % mase. Najslabši rezultat pa smo zabeležili pri vzorcu T170/2 (čas zloma pri 197 sekundah in izgubi 78 % mase). Pri vzorcu T170/1 pa je prišlo do napake pri merjenju gorljivosti in smo ga izločili.

Pri impregniranih z 1 % vodno raztopino Topbora in modificiranih vzorcih (oznaka T170/B1/), smo zabeležili povprečni čas porušitve pri 228 sekundah, pri tem pa so izgubili 63 % mase. Skupina vzorcev ni dosegla predpisane meje 240 sekund, ter tudi v primerjavi z kontrolnimi vzorci smo zabeležili slabši čas do prvega zloma. Najboljši rezultat smo zabeležili pri vzorcu T170/B1/5, saj je do zloma poteklo 297 sekund, pri tem pa je izgubil 69 % lesne mase. Najslabši rezultat pa je zabeležen pri vzorcu T170/B1/3, ko je bil zlom pri 169 sekundi ter 58 % izgubi mase.

Vzorci kateri so bili modificirani ter impregnirani s 5 % vodno raztopino Topbora (oznaka T170/B2/), so dosegli še slabši rezultat kot impregnirani z 1 % raztopino Topbora. V tej skupini vzorcev smo zabeležili povprečni čas do zloma 184 sekund in 51 % izgubo mase. Nobeden vzorec ni dosegel predpisanih 240 sekund. Najboljši rezultat smo zabeležili pri vzorcu T170/B2/3 in sicer 199 sekund in 53 % izguba mase. Pri vzorcu T170/B2/2 ni podatka, zaradi nepravilne meritve.

Podoben rezultat smo zabeležili tudi pri vzorcih modificiranih pri temperaturi 170 °C ter impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora (oznaka T170/B3/). Prelomili so se pri 182 sekundah in pri tem izgubili 39 % mase. Do predpisanih štirih minut so vzdržali le dobre tri minute. Najboljši rezultata smo zabeležili pri vzorcu T170/B3/4, ki je skoraj dosegel predpisanih 240 sekund in sicer 238 sekund ter 48 % izgube mase.

Pri tej skupini vzorcev, ki so bili modificirani pri temperaturi 170 °C, razberemo, da z dodajanjem Topbora zmanjšamo čas zloma, saj nobena skupina impregnirana s Topborom, ni dosegla predpisanih 240 sekund. Z višanjem deleža Topbora se je zmanjševala izguba lesne mase, kar pa je razlog hitrejšega zloma (preglednica 14 in 15)

Preglednica 14: Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 170 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma

Oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
T170/2	197	78
T170/3	276	78
T170/4	263	77
T170/5	256	77
T170/B1/1	172	57
T170/B1/2	256	65
T170/B1/3	169	58
T170/B1/4	248	66
T170/B1/5	297	69
T170/B2/1	186	61
T170/B2/3	199	53
T170/B2/4	180	45
T170/B2/5	172	44
T170/B3/1	154	24
T170/B3/2	151	52
T170/B3/3	157	31
T170/B3/4	238	48
T170/B3/5	209	41

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 15: Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 170°C v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa													
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s	240 s
T170/2	5	2	17	12	35	26	53	41	70	57	77	70		77
T170/3	2		9		21		34		48		63		73	
T170/4	1		9		21		34		49		65		74	
T170/5	1		11		26		42		59		73		77	
T170/B1/1	1	1	6	8	17	20	31	33	46	48		53		66
T170/B1/2	1		8		20		33		49		60		64	
T170/B1/3	1		6		17		30		47				65	
T170/B1/4	3		10		23		36		51		60		64	
T170/B1/5	1		9		22		34		47		39		67	
T170/B2/1	2	2	8	7	20	16	33	28	45	39	59	54		
T170/B2/3	4		7		15		27		39		51			
T170/B2/4	1		5		14		25		36		45			
T170/B2/5	1		6		13		25		37		59			
T170/B3/1	1	1	3	5	9	12	18	23	24	33	36	48		42
T170/B3/2	4		13		26		39		51		74			
T170/B3/3	1		4		11		22		27		51			
T170/B3/4	0		3		8		18		29		38		44	
T170/B3/5	1		3		7		16		33		40		39	

4.3.3.3 Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 190 °C

Skupina vzorcev iz serije T190/ (modificirana pri 190 °C), je v celoti je presegla čas zloma kontrolnih vzorcev. V povprečju je prišlo do zloma v času 262 sekund, pri tem pa so izgubili 75 % mase. V tej skupini je bilo vseh pet vzorcev v časovnem razmiku zloma v mejah 252 do 277 sekund in razmiku izgube lesne mase za 2 %, to pomeni, da je bila zelo homogena skupina. Najdaljši čas gorenja smo zabeležili pri vzorcu T190/1 in to 277 sekund ter izgubo lesne mase 74 %. Najkrajši čas gorenja do zloma pa smo zabeležili pri vzorcu T190/2 ter T190/3, kjer je čas znašal 252 sekund ter 75 % izgubo mase.

Vzorci impregnirani z 1 % vodno raztopino Topbora ter modificirani pri temperaturi 190 °C, smo najboljši rezultat zabeležili pri vzorcu T190/B1/2 in sicer 255 sekund do preloma ter 65 % izgube lesne mase. Ta vzorec, pa je tudi edini, ki je dosegel predpisanih 240 sekund do zloma. Pri vzorcu T190/B1/4, pa je zabeležen najslabši rezultat, saj smo izmerili čas pri prelomu 175 sekund ter 59 % izgube mase. Ta skupina vzorcev pa je v povprečju dosegla čas do prvega preloma 211 sekund in je izgubila 62 % mase.

Pri vzorcih impregniranih s 5 % vodno raztopino Topbora ter modificirani pri temperaturi 190 °C (oznaka T190/B2/), smo zabeležili povprečni čas gorenja do preloma 243 sekund ter 59 % izgube mase. Ta skupina je sicer dosegla predpisanih 240 sekund, ni pa dosegla 257 sekund zabeleženih pri kontrolnih vzorcih. V tej skupini vzorcev ni dosegel predpisanega časa gorenja samo vzorec T190/B2/2 (194 sekund). Najdaljši čas gorenja pa smo dosegli pri vzorcu T190/B2/3 in sicer 260 sekund.

Vzorci impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora ter modificirani pri temperaturi 190 °C (oznaka T190/B3/), so imeli povprečni čas do zloma 210 sekund in 43 % izgubo mase. Tako izmerjen čas ne doseže 240 sekund, kar je tudi slabši od kontrolne skupine. Predpisani čas sta dosegla le vzorca T190/B3/1 (258 sekund), ter vzorec T190/B3/4 (243 sekund). Ostali vzorci pa niso dosegli predpisanega časa (preglednici 16 in 17).

Preglednica 16: Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 190 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma

oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
T190/1	277	74
T190/2	252	75
T190/3	252	75
T190/4	274	76
T190/5	256	75
T190/B1/1	187	60
T190/B1/2	255	65
T190/B1/3	208	63
T190/B1/4	175	59
T190/B1/5	231	63
T190/B2/1	256	58
T190/B2/2	194	62
T190/B2/3	260	58
T190/B2/4	248	66
T190/B2/5	255	51
T190/B3/1	258	52
T190/B3/2	158	33
T190/B3/3	163	32
T190/B3/4	243	50
T190/B3/5	227	47

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 17: Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 190°C v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa																	
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s			
T190/1	1	2	10	12	24	26	35	39	50	54	65	67	72	73	74	75		
T190/2	2		13		28		44		61		71		75		75			
T190/3	2		16		29		42		57		70		74		75			
T190/4	2		10		23		36		48		61		71		75			
T190/5	2		13		26		39		53		68		74		75			
T190/B1/1	1	2	8	11	21	24	32	36	45	49	58	62	75	67		65		
T190/B1/2	1		7		21		33		45		56		62		65			
T190/B1/3	7		21		33		48		57		62		62					
T190/B1/4	1		8		22		34		48		73							
T190/B1/5	1		10		23		35		50		61		63					
T190/B2/1	1	1	6	5	18	15	31	27	44	39	54	49	56	56	59	58		
T190/B2/2	1		7		19		33		45		58							
T190/B2/3	1		6		15		29		41		47		49		55		57	
T190/B2/4	1		5		13		25		35		43		65		66			
T190/B2/5	1		3		10		18		31		43		48		50			
T190/B3/1	1	1	2	5	6	11	17	20	29	30	44	45	49	47	50	50		
T190/B3/2	1		4		11		22		31		53							
T190/B3/3	3		11		20		28		31		44							
T190/B3/4	1		3		8		18		30		39		47		50			
T190/B3/5	1		3		8		17		28		43		45					

4.3.3.4 Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 210 °C

Vzorci modificirani pri temperaturi 210 °C (T210/), so sicer v povprečju zdržali do zloma 240 sekund. Pri tem so v povprečju izgubili 73 % lesne mase. V primerjavi s kontrolnimi vzorci pa je bil zabeležen slabši rezultat. Najdaljši čas gorenja smo zabeležili pri vzorcu T210/1 (263 sekund in 73 % izgube mase). Najkrajši čas gorenja pa smo zabeležili pri vzorcu T210/5 in sicer 220 sekund in 72 % izgube mase.

Pri vzorcih impregnirani z 1 % vodno raztopino Topbora ter modificirani pri temperaturi 210 °C, smo zabeležili povprečni čas gorenja do preloma 212 sekund ter 60 % izgube mase. Povprečni čas gorenja ne dosega kontrolnih vzorcev, kot tudi ne predpisane meje 240 sekund. Najbolje se je obnesel vzorec T210/B1/1, ki je bil prelom pri 250 sekund ter 67 % izgube mase. Najmanj je vzdržal vzorec T210/B1/2 (le 150 sekund) in pri tem izgubil 51 % mase.

Vzorci impregnirani s 5 % vodno raztopino Topbora, so dosegli povprečni čas do zloma 221 sekund in pri tem izgubili 60 % mase. Tako ta skupina ni dosegla predpisanih 240 sekund, bila pa je slabša tudi od kontrolnih vzorcev. Najboljši čas smo zabeležili pri vzorcu T210/B2/4 z 262 sekundami ter 61 % izgubo mase. Vsi ostali vzorci pa so dosegli čas pod 4 minute.

Z 10 % vodno raztopino Topbora impregnirani modificirani (210 °C), so dosegli povprečni čas gorenja 250 sekund. Pri tem so izgubili 32 % mase. Najboljši rezultat smo zabeležili pri vzorcu T210/B3/1, ki je znašal čas 294 sekund in 62 % izgube mase. Zelo zanimiv je vzorec T210/B3/5, pri katerem smo zabeležili čas zloma 292 sekund in pri tem izgubil samo 23 % mase. Če primerjamo to skupino s kontrolnimi vzorci, je ta skupina v povprečju slabša za 7 sekund, vendar pa je pri tem izgubila za 43 % manj mase. To pomeni, da je ta kombinacija predstavljala najboljšo protipožarno zaščito. Podrobnejši rezultati so prikazani v preglednici 18 in 19.

Preglednica 18: Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 210 °C in impregniranim z 1,5 ter 10 % vodno raztopino Topbora ter izguba mase v točki zloma

Oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
T210/1	263	73
T210/2	249	75
T210/3	236	73
T210/4	233	71
T210/5	220	72
T210/B1/1	250	67
T210/B1/2	150	51
T210/B1/3	198	54
T210/B1/4	217	63
T210/B1/5	243	65
T210/B2/1	190	68
T210/B2/2	209	48
T210/B2/3	217	55
T210/B2/4	262	61
T210/B2/5	229	67
T210/B3/1	294	62
T210/B3/2	264	19
T210/B3/3	191	21
T210/B3/4	209	35
T210/B3/5	292	23

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 19: Izguba mase vzorcev impregniranih z različnimi koncentracijami Topbora in naknadno modificiranih pri temperaturi 210°C v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa																
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s		
T210/1	2	2	11	11	23	24	34	37	48	53	62	64	71	71	73	74	
T210/2	3		14		28		43		61		74		75		75		
T210/3	3		13		26		39		66		67		73				
T210/4	1		8		21		34		46		59		68				
T210/5	0		7		20		34		45		60		70				
T210/B1/1	1	2	6	11	17	24	29	36	40	48	50	57	61	65	66	66	
T210/B1/2	1		12		25		37		51								
T210/B1/3	1		8		19		32		45		55		74				
T210/B1/4	3		15		29		42		53		61		63				
T210/B1/5	4		14		28		39		53		61		63				65
T210/B2/1	1	1	9	5	21	13	33	24	44	42	68	52		61		59	
T210/B2/2	0		2		8		17		27		38		67				
T210/B2/3	0		3		8		15		40		48		54				
T210/B2/4	1		4		13		26		38		47		56				59
T210/B2/5	1		6		16		29		61		61		66				
T210/B3/1	1	1	3	3	7	6	14	13	28	19	36	23	17	19	51	30	
T210/B3/2	1		2		5		8		12		15				18		
T210/B3/3	1		3		7		20		20		21						
T210/B3/4	1		3		6		13		19		22						
T210/B3/5	0		3		5		11		16		19		20		21		

4.3.3.5 Gorljivost vzorcev modificirani pri temperaturi 230 °C

Vzorci, kateri so bili modificirani pri temperaturi 230 °C so dosegli povprečni čas zloma 245 sekund, pri tem pa so izgubili 74 % mase. Ta skupina je torej presegla predpisano mejo 240 sekund, bila pa je slabša od kontrolnih vzorcev. Vsi vzorci so presegli čas 240 sekund razen vzorec T230/4 z 232 sekundami. Najdaljši čas gorenja pa smo zabeležili pri vzorcu T230/5, ki je znašal 261 sekunde (preglednici 20 in 21).

Preglednica 20: Čas zloma modificiranih vzorcev pri temperature 230 °C ter izguba mase v točki zloma

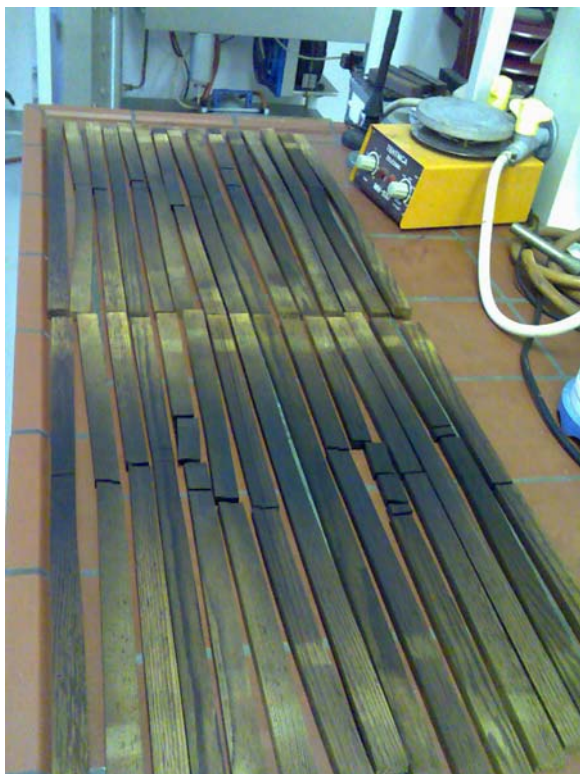
Oznaka	Čas zloma (s)	Izguba mase (%)
T230/1	251	74
T230/2	242	78
T230/3	241	71
T230/4	232	72
T230/5	261	75

* standardni odkloni so v oklepajih

Preglednica 21: Izguba mase vzorcev modificiranih pri temperaturi 230 °C v odvisnosti od časa

Oznaka	Izguba lesne mase (%) v odvisnosti od časa															
	30 s		60 s		90 s		120 s		150 s		180 s		210 s		240 s	
T230/1	3	2	10	10	23	23	36	36	51	52	67	64	73	72	74	74
T230/2	1		8		21		33		46		62		77		78	
T230/3	2		10		23		35		47		62		69		71	
T230/4	3		14		27		42		59		69		70			
T230/5	1		9		22		34		56		58		69		74	

Ostale skupine vzorcev so bile zaradi popolnoma uničene lesne strukture, neuporabne za testiranje. Za uničenje vzorcev pri temperaturi 230 °C, sta verjetno dva razloga. Prvi razlog je neustrezna porazdelitev grelnih teles v komori (razpad vzorcev po sredini dolžine). Drugi razlog pa je, da je lahko zaradi pregretja borovih sestavin med termično modifikacijo, prešla pH vrednost v prekomerno kislo območje. (slika 21 in 22). Vzorci, ki niso bili impregnirani s Topborovim pripravkom, so bili še toliko ohranjeni, da smo jim lahko izvedli test odpornosti proti gorenju.



Slika 21: Prikaz poškodovanosti vzorcev



Slika 22: Poškodbe modificiranih vzorcev pri temperaturi 230 °C

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

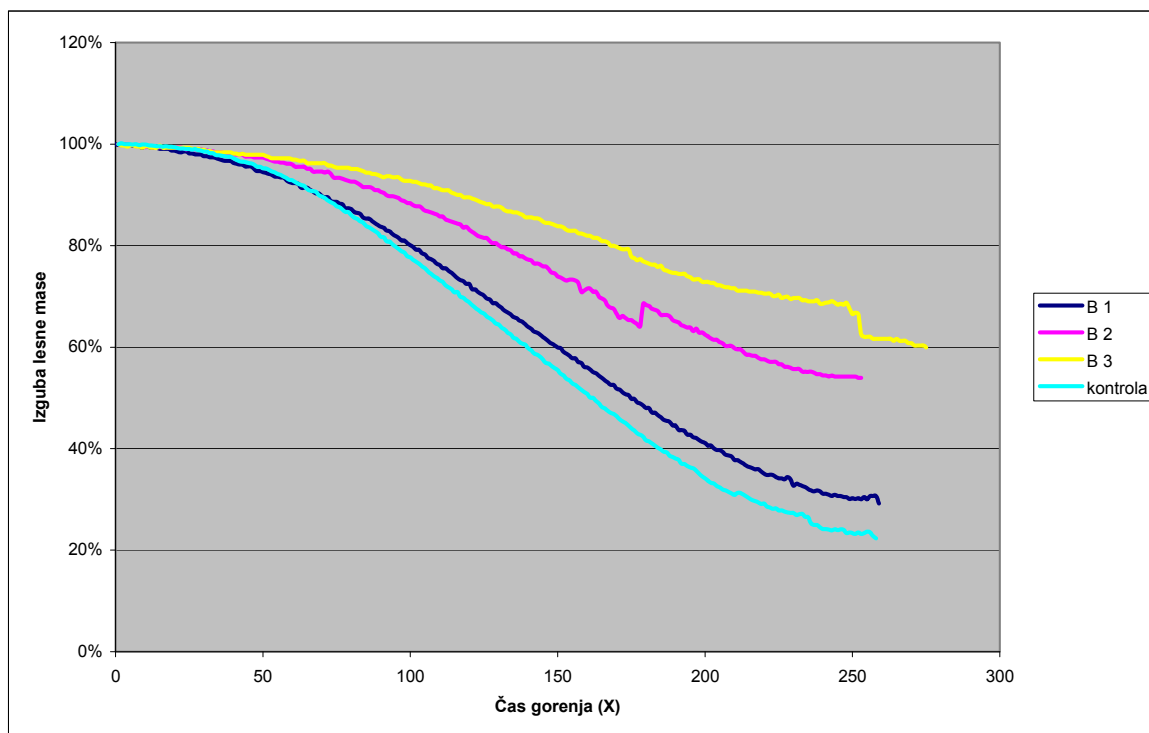
5.1 RAZPRAVA

Sodobni kupci so usmerjeni k čim manjšemu onesneževanju okolja. To pa lahko dosežemo s postopki termične modifikacije ali pa impregniranje z okolju prijaznimi zaščitnimi sredstvi. Med spadajo pripravki na osnovi bora, z njimi impregniran les postane odpornejši na škodljivce. Borove snovi pa delujejo tudi kot ognjevarna sredstva. Z modifikacijo postane les dimenzijsko stabilnejši ter odpornejši proti lesnim škodljivcem, ni pa znana njegova gorljivost. Predvideva se, da je manj odporen na gorenje (Rep in sod., 2004; Hill, 2006). Če pa ga zaščitimo z borovimi pripravki pa naj bi pridobil enako ali boljšo odpornost na gorenje.

Za določevanje gorljivosti smo izbrali Ameriško metodo ASTM: E 69-50, (1965) oziroma metoda po Harrisonu, ki pa smo jo prilagodili tako, da se izguba mase med gorenjem spremlja in beleži preko računalniškega vmesnika (Ličan, 2005)

5.1.1 Gorljivost lesa impregniranega z borovim pripravkom

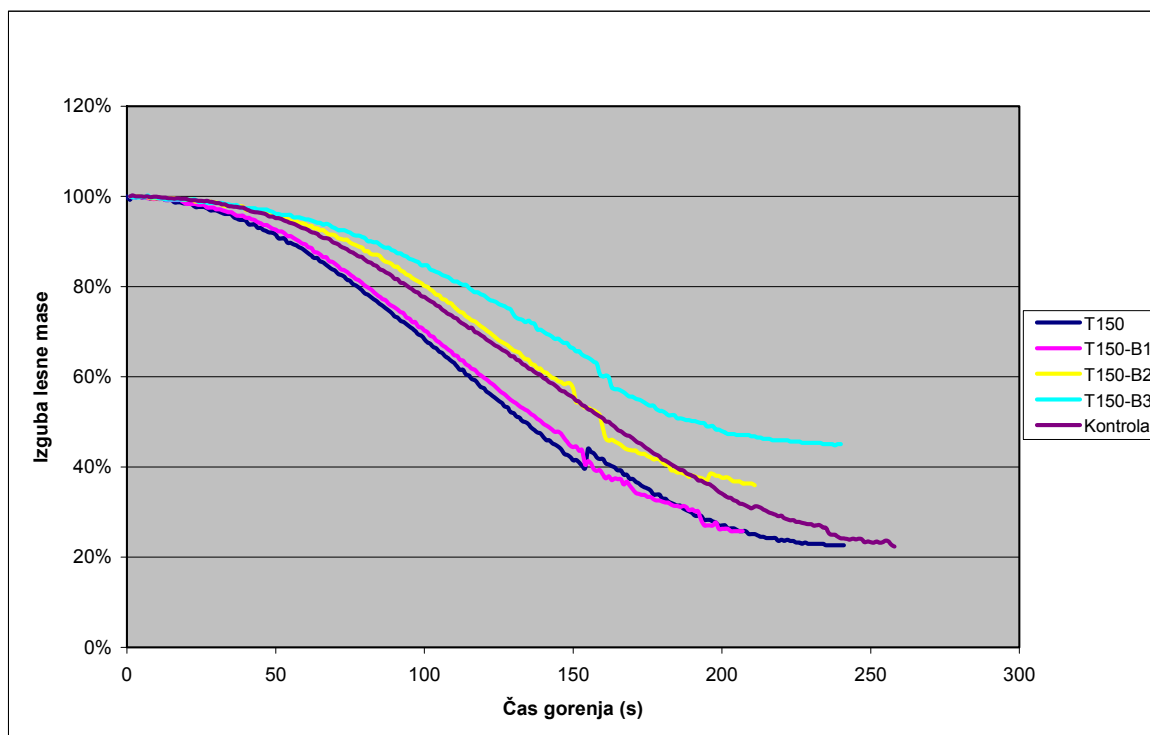
Iz primerjave diagramov (slika 23) razberemo, da smo z dodajanjem Topbora izboljšali odpornost na gorenje v primerjavi s kontrolnimi vzorci. Po pričakovanju se je z večjim deleža bora, izboljšala tudi požarna zaščita vzorcev. Vsi vzorci so dosegli predpisani čas gorenja do porušitve (240 sekund). Najmanjši delež mase so izgubili vzorci impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora (40 %). Vzorci impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora (B3) imajo tudi najboljšo ognjeodpornost med vsemi testiranimi vzorci (slika 23).



Slika 23: Diagram izgube lesne mase vzorcev impregniranih z borovimi pripravki (B1 = 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %)

5.1.2 Gorljivost vzorcev modificiranih pri temperaturi 150 °C

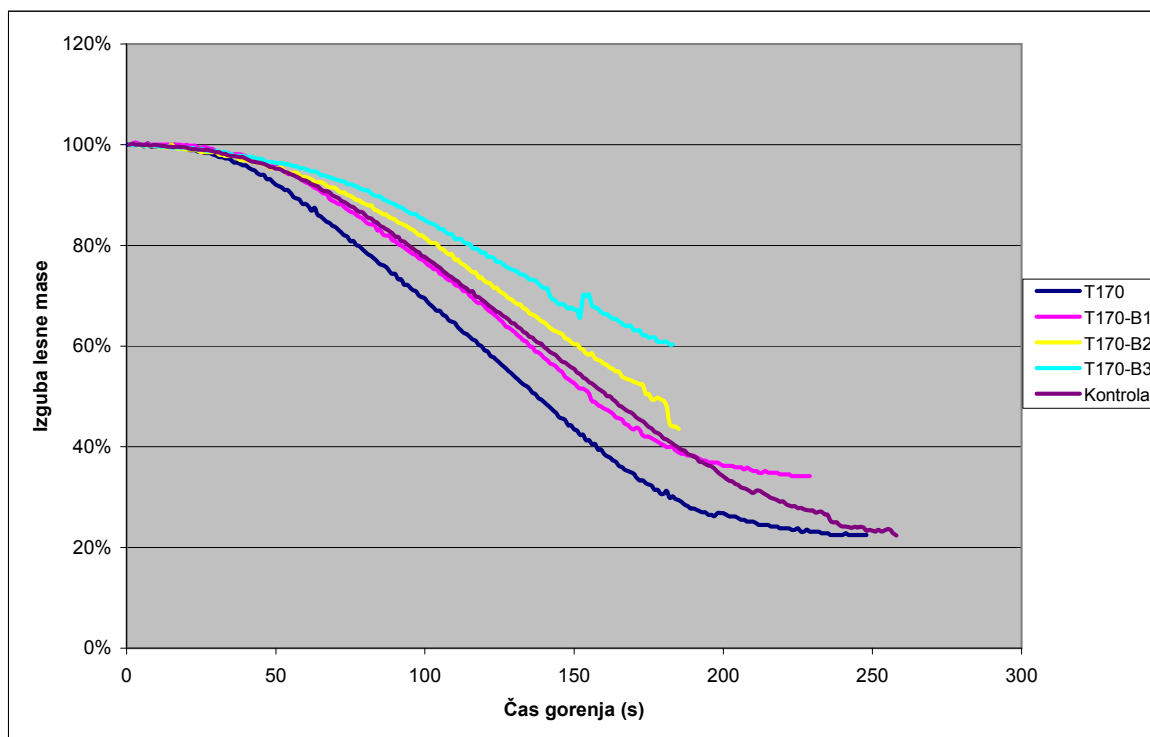
Vzorci modificirani pri temperaturi 150 °C, so bili v primerjavi s kontrolnimi bolj gorljivi. Predpisani čas gorenja, sta dosegli dve skupini vzorcev in sicer T150/B3 (240 sekund) ter pri skupini T150, ki pa je dosegla 241 sekund. Skupini T150/B1 ter T150/B2 pa nista dosegli predpisanega časa. Najmanjši delež mase sta izgubili skupini T150/B3 (55 %) ter T150/B2 (62 %). Tudi tukaj smo opazili, da z dodajanjem Topbora zmanjšamo izgubo mase, vendar pri 1 % koncentracije nismo zabeležili izboljšanja v primerjavi s kontrolnimi vzorci (slika 24).



Slika 24: Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 150 °C

5.1.3 Vzorci modificirani pri temperaturi 170 °C

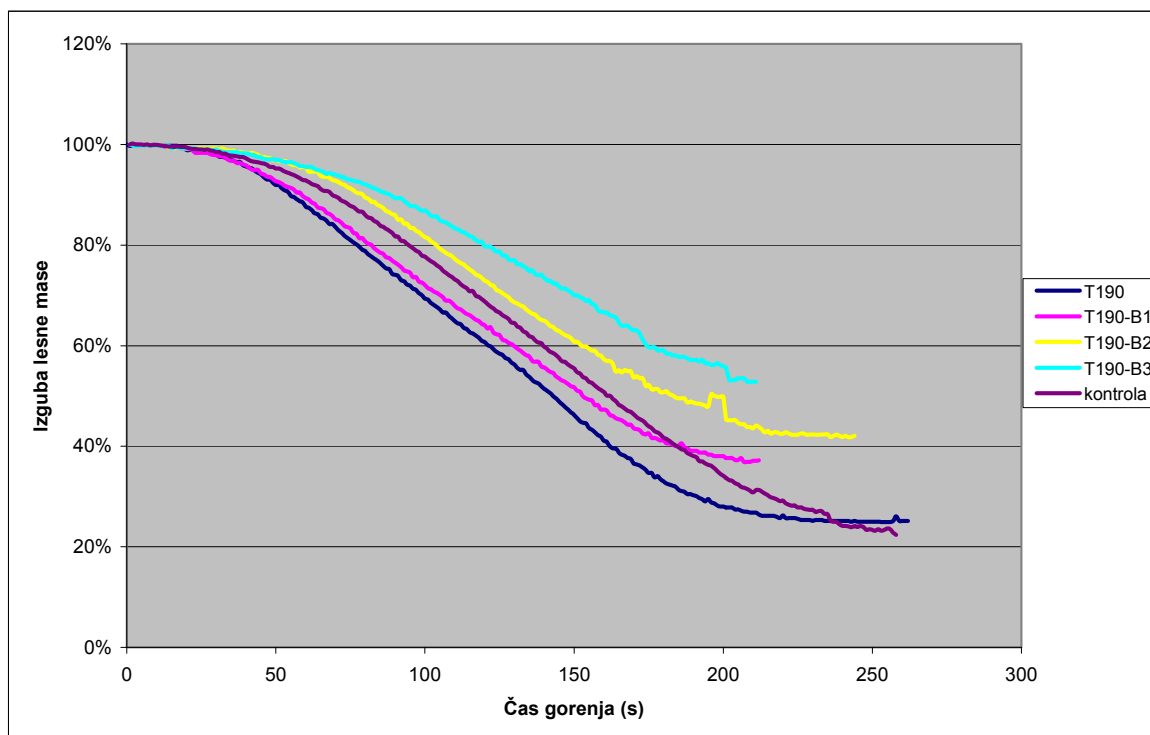
Podobno kot predhodna skupina vzorcev se tudi vzorci modificirani pri 170 °C dosegli krajši čas do zloma kot kontrolni vzorci. Kontrolnim vrednostim se je približala le podskupina T170, pri katerem je bil izmerjen povprečni čas 248 sekund. Z dodajanjem Topbora pa se je zmanjšal delež izgube lesne mase, vendar se pri tem z dodajanjem Topbora čas gorenja do porušitve zmanjševal. Pri skupini T170/B1 smo zabeležili povprečni čas gorenja do porušitve 228 sekunde in 66 % izgubo mase. Skupini vzorcev T170/B2 smo izmerili čas zloma pri 184 sekundah ter 55 % izgube mase. Podoben čas gorenja do porušitve (182 sekund) je dosegla tudi skupina vzorcev T170/B3 s 40 % povprečno izgubo mase. Edino vzorci T170 so dosegli predpisan čas 240 sekund. Pri tem je izgubil približno enaki delež mase kot kontrolna skupina (78 %), vendar so se porušili hitreje kot kontrolni vzorci (slika 25).



Slika 25: Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino topbora (B1 = 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 170 °C

5.1.4 Vzorci modificirani pri temperaturi 190 °C

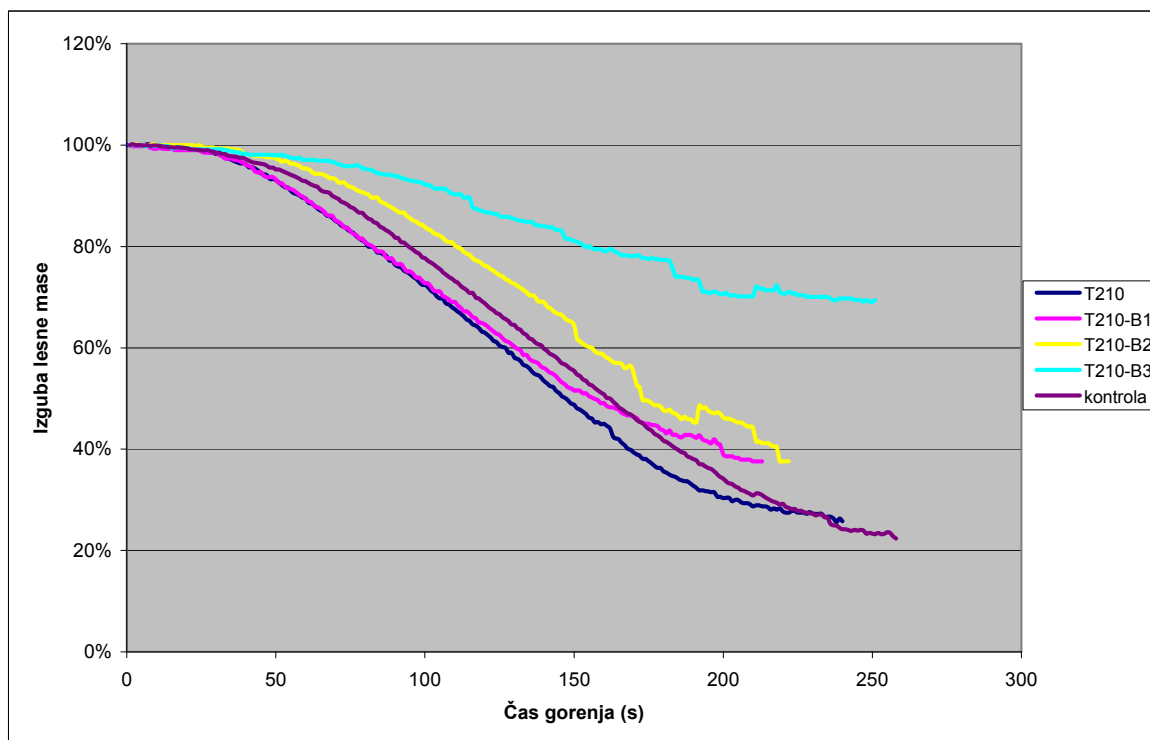
Skupina vzorcev T190 je presegla čas gorenja kontrolnih vzorcev. Zlom smo zabeležili pri 262 sekundah, sicer je to rezultat najboljši med vsemi skupinami termično modificiranih vzorcev. Pri tem so vzorci v povprečju izgubili 75 % mase, ki je manj kot pri kontrolnih vzorcih. Iz krivulje gorenja lahko ugotovimo, da vzorci T190 hitreje izgubljajo maso kot kontrolni vzorci. Pri vzorcih impregniranih s Topborom se je ognjeodpornost povečala, predvsem pri vzorcih impregnirani s 5 in 10 % vodno raztopino Topbora. Vendar je predpisani čas 240 sekund dosegla le skupina T190/B2 in ga je presegla za 2 sekundi pri 57 % izgube mase (slika 26).



Slika 26: Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 190 °C

5.1.5 Vzorci modificirani pri temperaturi 210 °C

Podobno kot vzorci T190 so tudi modificirani vzorci T210 dosegli predpisan čas gorenja do porušitve 240 sekund in pri tem izgubili 73 % mase. Impregnacija s Topborom je odpornost na gorenje povečal. Skupina T210/B3 je tako presegla predpisani čas (240 sekund), pri tem pa so vzorci v povprečju izgubili le 30 % mase, kar je najboljši rezultat med vsemi testiranimi vzorci glede na čas in izgubo mase (slika 27).



Slika 27: Diagram izgube mase vzorcev impregniranih z vodno raztopino Topbora (B1= 1 %, B2 = 5 %, B3 = 10 %) in modificiranih pri temperaturi 210 °C

5.2 SKLEP

Iz rezultatov je razvidno, da imajo najboljšo ognjeodpornost vzorci, ki so bili impregnirani z borovimi pripravki. Z višanjem deleža vodne raztopine Topbora se povečuje tudi čas gorenja ter zmanjša delež izgube mase vzorcev.

Pri temperaturi 150 °C modificirani vzorci imajo manjšo odpornost na gorenje kot kontrolni vzorci. Z predhodno prepojitvijo z nizko koncentracijo borovih učinkovin se čas gorenja zmanjša vendar pa se pri tem delež izgube lesne mase tudi zmanjšuje. Z višanjem deleža vodne raztopine Topbora se čas gorenja povečuje, hkrati pa se delež izgube lesne mase zmanjšuje.

Vzorcem, ki so bili modificirani pri temperaturi 170 °C, se je zmanjšala odpornost proti gorenju. Neimpregnirani modificirani vzorci so dosegli predpisani čas gorenja. Vzorci, impregnirani z nižjem deležem Topbora pa predpisanega časa gorenja niso dosegli, vendar se je z višanjem deleža Topbora zmanjševal čas gorenja in tudi delež izgube mase.

Neimpregnirani ter pri temperaturi 190 °C modificirani vzorci, imajo med modificiranimi vzorci najdaljši čas gorenja. Pri višjih deležih vodne raztopine Topbora se je skrajšal čas gorenja in tudi delež izgube mase vzorcev.

Modifikacija lesa pri temperaturi 210 °C zmanjša ognjeodpornost. Tudi impregnacija z nižjim deležem vodne raztopine Topbora, je odpornost znižala. Vendar z višanjem vodne raztopine Topbora na 10 % smo izmerili boljšo odpornost na gorenje, kot pri ne impregniranih vzorcih, hkrati pa smo z višanjem deleža Topbora zmanjševali tudi delež izgube lesne mase.

Po pričakovanjih se je odpornost proti gorenju pri lesu modificiranem pri nižjih temperaturah (150 °C do 190 °C) zmanjšala. Po drugi strani pa se je pri višjih temperaturah modifikacije (pri temperaturi 210 °C) čas gorenja do zloma podaljšal, ob enakem deležu izgube lesne mase. Pri impregniranih ter modificiranih vzorcih pa se je čas gorenja do porušitve vzorcev zmanjšal, z izjemo pri vzorcih, ki so bili impregnirani z 10 % vodno raztopino Topbora ter modificirani pri temperaturi 210 °C (čas gorenja 4,17 minute, 32 % izgubi mase). Ta kombinacija je delovala najbolj ognjeodporna.

6 POVZETEK

Namen diplomske naloge je bil ugotoviti gorljivost termično modificiranega lesa. Ker smo predvidevali, da se gorljivost modificiranega lesa zviša. Zato smo vzorce impregnirali s pripravki na osnovi bora, za katerega je znano, da znižuje gorljivost lesa.

Vzorci so bili izdelani iz smrekovega lesa dimenzij $(2 \times 500) \times 20 \times 10$ mm z vlažnostjo 7 ± 3 %. Za vsako sredstvo ter stopnjo modificiranja je bilo potrebno izdelati po pet vzorcev.

V preizkusu smo uporabili tri različne vodne raztopine Topbora 1 %, 5 % in 10 %. Vzorce smo zaščitili po postopku impregniranja v vakuumsko tlačni komori Kambič. Impregniranje je potekalo 60 minut v vakuumu, nato smo za 60 minut vzpostavili nadtlak, na koncu pa smo še dodatno vzpostavili za 15 minut vakuum.

Po impregniranju smo vzorce še modificirali pri različnih temperaturah od 150 °C do 230 °C. Termična modifikacija je potekala v vakuumu po postopku segrevanja na določeno temperaturo. Postopek termične modifikacije lesa je trajal tri ure.

Preizkušanje gorljivosti je potekalo po modificirani ameriški metodi ASTM: E 69-50 (1965) ali metodi po Harrisonu, ki je nadgrajena z računalniškim zajemanjem in beleženjem podatkov. Tako se izguba mase spremlja in beleži preko računalniškega programa. Odstotek izgube lesne mase v času 4 minut služi kot merilo zaščitenega lesa v primerjavi z izgubo lesne mase pri kontrolnih vzorcih.

Iz rezultatov je razvidno, da z višanjem stopnje modifikacije do temperature 190 °C se gorljivost glede na kontrolne vzorce povečuje, nad 190 °C pa se odpornost na ogenj izboljšuje. Tudi z dodajanjem vodne raztopine Topbora se ognjeodpornost poveča in zniža se odstotek izgube mase vzorca med gorenjem.

7 VIRI

- ASTM: E 69 – 50 1965. Standard Method of Test for Combustible Properties of Treated by the Fire – Tube Apparatus: 6 str.
- Ditrich B. 1971. O procesih gorenja in zaščite lesa. Les, 23, 1-2: 15-18
- Devjak E. 1999. Razvoj naprave za preizkušanje gorljivosti lesa. Dipl. delo. Ljubljana, BF - Oddelek za lesarstvo: 52 str.
- Grm B., Stevanović B. 2002. Gorenje. Osnove požara. V: Kemija v gasilstvu. Pograjc M. (ur.). Ljubljana, Gasilska zveza Slovenije: 80 str.
- Hill C.A.S. 2006. Wood modification, Chemical, thermal and other processes. Hoboken, John Wiley & Sons: 239 str.
- Kervina-Hamović Lj. 1990. Zaščita lesa. Ljubljana, BF - Oddelek za lesarstvo: 126 str.
- Jagrovič A. 1974. Osnovni pojmi o gorenju in gašenju. V: Priročnik za gasilce. Dimec S. (ur.). Ljubljana, Gasilska zveza Slovenije: 16 str.
- Langendorf G. 1988. Holzschutz. Ein Handbuch für Baufachleute. Leipzig, VEB Fachbuchverlag: 272 str.
- Lesar B., Humar M. 2007. Borove spojine za zaščito lesa, II del: Vezava v les ter fungicidne in insekticidne lastnosti. Les, 59: 216-222
- Ličan D., 2005. Preizkušanje naprave in gorljivosti lesa modificiranega s silicijevimi spojinami. Dipl. delo. Ljubljana, BF - Oddelek za lesarstvo: 69 str.
- Likavec A. 1980. Tehnologija lesa. Ljubljana, DZS: 125 str.
- Militz H. 2002. Thermal treatment of wood: European Processes and their background. IRG/WP 02-40241: 18 str.
- Militz H., Tjeerdsma B. 2001. Heat Treatment of wood by the PLATO-PROCESS. V: Review on heat treatments of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities: 11 str.
- Okorn, T. 1999. Vpliv biocidnih borovih zaščitnih sredstev na gorljivost lesa. Dipl. delo. Ljubljana, BF-Oddelek za lesarstvo: 54 str.
- Patzelt M., Stingl R., Teischinger A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. V: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte (Teischinger A., Stingl R. eds.). Wien, Lignovisionen: 101-147
- Premrov M., Boršič B. 2002. Požarne poškodbe lesenih konstrukcij. Požar, 8, 3: 37-40

Rep G., Pohleven F. 2002. Wood modification - a promising method for wood preservation
= Modifikacija drva – obečavajuča metoda za zaščito drva. Drvna industrija, 52, 2: 71-76

Rep G., Pohleven F., Bučar B. 2004 Characteristics of thermally modified wood in
vacuum. IRG/WP 04-40287: 8 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi kakor koli pomagali pri izdelavi te diplomske naloge. Še posebej se zahvaljujem mentorju prof. dr. Francu Pohleven za vso pomoč in vodenje pri opravljanju diplomske naloge in recenzentu doc. dr. Mihi Humarju. Prav tako bi se zahvalil tudi asistentu Gregorju Repu za pomoč pri modificiranju vzorcev v laboratoriju za patologijo lesa na Katedri za patologijo in zaščito lesa.

Posebna zahvala pa gre tudi mojim staršem, ki so mi ta študij omogočili in me podpirali skozi vsa ta leta.