

Zidovi laganih čeličnih okvirnih konstrukcija-toplinska i požarna svojstva

Juraković, Franka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:150247>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Franka Juraković

**ZIDOVI LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH
KONSTRUKCIJA – TOPLINSKA I POŽARNA
SVOJSTVA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Franka Juraković

**ZIDOVI LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH
KONSTRUKCIJA – TOPLINSKA I POŽARNA
SVOJSTVA**

ZAVRŠNI ISPIT

Izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Franka Juraković

**LIGHT STEEL FRAME WALLS – THERMAL
AND FIRE PROPERTIES**

FINAL EXAM

Assoc. prof. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Franka Juraković

(Ime i prezime)

0082064154

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Zidovi laganih čeličnih okvirnih konstrukcija - toplinska i požarna svojstva

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Light steel frame walls – thermal and fire properties

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

Kompozitni lagani panel s integriranom nosivom konstrukcijom (KLIK PANEL), KK.01.1.1.07.0060

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

17. rujna 2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Marija Jelčić Rukavina

Potpis mentora:

Komentor:

-



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Franka Juraković, 0082064154

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

Zidovi laganih čeličnih okvirnih konstrukcija - toplinska i požarna svojstva

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

17.09.2024.

Potpis:

Franka Juraković



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

Franka Juraković, 45522234751

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

Zidovi laganih čeličnih okvirnih konstrukcija - toplinska i požarna svojstva

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

Marija Jelčić Rukavina

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

24.09.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

17.09.2024.

Potpis:

Franka Juraković

ZAHVALE

Zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Mariji Jelčić Rukavini na strpljenju, stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i partneru na razumijevanju i podršci tijekom studija.

SAŽETAK

U radu se, temeljem dostupne znanstvene i stručne literature, daje pregled stanja područja vezanog za lagane čelične okvirne (eng. *Light Steel Frame - LSF*) konstrukcije. Budući da su LSF konstrukcije relativno nova tehnologija građenja te se kao takva i dalje istražuje i neprestano razvija, cilj ovog rada je pobliže opisati sustave LSF konstrukcija uz naglasak na karakteristične materijale od kojih se konstrukcija sastoji te njihova svojstva. Također, opisano je i ponašanje cjelokupnog LSF sustava u vidu toplinskih i požarnih svojstava. Toplinska svojstva LSF zidova najviše ovise o izboru izolacijskih materijala, njihovoj poziciji unutar zida, kao i o minimalizaciji toplinskih mostova uz pomoć različitih metoda poput primjene toplinskih prekida. Požarna svojstva ponajviše ovise o odabiru materijala za oblaganje, poput gipsanih ploča, kao i o kvaliteti izvedbe spojeva te konfiguraciji (rasporedu, broju i vrsti primijenjenih obložnih ploča i izolacijskog materijala) komponenti LSF zida.

Ključne riječi: LSF konstrukcija, toplinska svojstva, izolacijski materijali, materijali za oblaganje, požarna svojstva

SUMMARY

This paper, based on available scientific and professional literature, provides an overview of the current state of the field related to Light Steel Frame (LSF) constructions. Since LSF constructions are a relatively new building technology that is still being researched and constantly developed, the aim of this paper is to provide a detailed description of LSF construction systems, with an emphasis on the characteristic materials used in the construction and their properties. The behavior of the entire LSF system in terms of thermal and fire properties is also described. The thermal properties of LSF walls largely depend on the choice of insulation materials, their position within the wall, and the minimization of thermal bridges using various methods such as thermal breaks. Fire properties primarily depend on the choice of sheathing materials, such as gypsum boards, as well as the quality of joint execution and the configuration (arrangement, number, and type of applied sheathing panels and insulation materials) of LSF wall components.

Key words: LSF construction, thermal properties, insulation materials, sheathing materials, fire properties

POPIS KRATICA

Kratika	Opis na engleskom	Opis na hrvatskom
LSF	<i>Light Steel Frame</i>	Lagani čelični okvir
PCM	<i>Phase Change Material</i>	Fazna promjena materijala
OSB	<i>Oriented Strand Bord</i>	Ploče s usmjerenim vlaknima
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>	Ekspandirani polistiren
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>	Vanjski kompozitni sustav toplinske izolacije
LFA	<i>Laser Flash Analysis</i>	Analiza laserskog bljeska
GK	/	Gips karton
PUR	<i>Polyurethane rigid foam</i>	Poliuretanska pjena
PIR	<i>Polyisocyanurate/rigid polysio</i>	Polizocijanurat pjena
MgO	/	Magnezijev oksid
MgSO ₄	/	Magnezijev sulfat
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i>	Ekstrudirani polistiren
MW	<i>Mineral Wool</i>	Mineralna vuna
LCS	<i>Lipped Channel Section</i>	U profil s rubom
FS	<i>Fire Side</i>	Požarna strana
AS	<i>Ambient Side</i>	Ambijentna strana
OHF	<i>Outer Hot Flange</i>	Vanjska topla pojasnica
IHF	<i>Inner Hot Flange</i>	Unutarnja topla pojasnica
ICF	<i>Inner Cold Flange</i>	Unutarnja hladna pojasnica
OCF	<i>Outer Cold Flange</i>	Vanjska hladna pojasnica
Pb1	<i>Outer Fire Side Layer</i>	Vanjski sloj požarne strane
Pb2	<i>Inner Fire Side Layer</i>	Unutarnji sloj požarne strane
Pb3	<i>Inner Ambient Side Layer</i>	Unutarnji sloj ambijentalne strane

Pb4	<i>Outer Ambient Side Layer</i>	Vanjski sloj ambijentalne strane
HFC	<i>Hollow Flange</i>	Profil sa šupljom pojasnicom
LSB	<i>LiteSteel Beam</i>	Lagana čelična greda
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>	Metoda konačnih elemenata

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
POPIS KRATICA	iv
SADRŽAJ	vi
1. UVOD	1
2. SUSTAVI LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA	3
2.1. Uvod.....	3
2.2. Tipični elementi LSF konstrukcije.....	3
2.3. Prednosti i nedostaci LSF konstrukcija.....	6
3. OSNOVNA SVOJSTVA MATERIJALA	8
4. MATERIJALI U ZIDOVIMA LAGANIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA.....	9
4.1. Čelični profili.....	9
4.2. Materijali za oblaganje.....	10
4.2.1. Općenito o materijalima za oblaganje.....	10
4.2.2. Vrste materijala za oblaganje.....	11
4.3. Izolacijski materijali.....	17
4.3.1. Klasifikacija LSF elemenata ovisno o položaju toplinske izolacije.....	17
4.3.2. Vrste izolacijskih materijala.....	18
5. TOPLINSKA SVOJSTVA ZIDOVA LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA.....	23
5.1. Toplinski mostovi	23
5.1.1. Vanjska kontinuirana toplinska izolacija	24
5.1.2. Toplinski prekidi za građevinske komponente	24
5.1.3. Trake za toplinske prekide	24
5.1.4. Povećanje puta toplinskog toka.....	25
5.1.5. Smanjenje kontaktnog područja pojasnice profila.....	25
5.2. Toplinska inercija.....	26
5.2.1. Primjena vanjske toplinske izolacije.....	28
5.2.2. Uporaba masivnih materijala	28
5.2.3. Sustav izmjene topline s tlom.....	29

5.2.4.	Primjena PCM-a.....	30
6.	POŽARNA SVOJSTVA ZIDOVA LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA	31
6.1.	Otpornost na požar konstrukcijskih elemenata.....	31
6.2.	Faktori koji utječu na požarnu otpornost LSF sustava.....	32
6.2.1.	Utjecaj gips-kartonskih ploča.....	32
6.2.1.1.	Reakcije dehidracije i toplinska svojstva	32
6.2.1.2.	Otkazivanje GK ploča.....	35
6.2.2.	Utjecaj spojeva GK ploča.....	38
6.2.3.	Utjecaj vrste toplinske izolacije.....	43
6.2.4.	Nove konfiguracije LSF zidova za poboljšanu otpornost na požar.....	43
6.2.5.	Utjecaj vijčanih spojeva.....	45
7.	ZAKLJUČAK.....	46
	POPIS LITERATURE	48
	POPIS SLIKA.....	53
	POPIS TABLICA.....	55

1. UVOD

Predgotovljena gradnja, također poznata i kao montažna gradnja, postaje sve popularnija metoda gradnje zbog svoje učinkovitosti, isplativosti i održivosti. Predgotovljene zgrade izrađuju se u dijelovima čiji se elementi proizvode unutar kontroliranog tvorničkog okruženja, a zatim se transportiraju na gradilište gdje se montiraju u cjelinu. Ovaj proces smatra se jednim od najnaprednijih načina građenja, jer smanjuje vrijeme gradnje te minimalizira utjecaj vanjskih faktora koji je neizbježan u tradicionalnom načinu gradnje (od opeke i betona) na licu mjesta. Također, montažna gradnja nudi poboljšanu kontrolu kvalitete jer se građevinski elementi proizvode u kontroliranim pogonskim uvjetima prema strogim normama i dosljednim uputama. Kontroliranom proizvodnjom se ujedno i smanjuje količina nastalog otpada od materijala čineći time ovu vrstu gradnje isplativijom i održivijom od tradicionalne gradnje. Prilagodljivost montažne gradnje omogućuje širok raspon primjene unutar građevinskog sektora kao što je izgradnja stambenih ili poslovnih zgrada, obrazovnih ustanova (škola, vrtića)... [1]

Predgotovljena gradnja se izvodi od različitih materijala kao što su drvo ili čelik. Od čeličnih konstrukcija izdvajamo gradnju s laganim čeličnim okvirima. LSF konstrukcije sastoje se od hladno oblikovanih čeličnih elemenata čime čine lagan, ali robusni okvir. Ova vrsta gradnje nudi brojne prednosti poput otpornosti na vanjske utjecaje, dobre toplinske i požarne otpornosti.

Osnovni cilj ovog rada je pobliže opisati sustave LSF konstrukcija s naglaskom na toplinska i požarna svojstva.

LSF konstrukcijski sustavi postaju sve popularnija alternativa tradicionalnoj gradnji zbog svoje brzine montaže, mogućnosti reciklaže materijala i smanjenja troškova gradnje. Iako imaju mnogo prednosti poput lakše izgradnje i održivosti, glavni izazovi su povezani s pojavom toplinskih mostova i niskom toplinskom masom, što može utjecati na energetska učinkovitost i udobnost stanara unutar zgrada.

Nosiva konstrukcija LSF sustava koristi hladno oblikovane pocinčane čelične profile, čime se povećava trajnost i otpornost na koroziju. Najčešće korišteni materijali za oblaganje LSF konstrukcije su gipsane ploče koje zbog svoje nezapaljive jezgre pružaju visoku toplinsku i požarnu otpornost. Također, uz klasične gips-kartonske ploče u posljednje vrijeme raste primjena gips-vlaknastih ploča, tj. gipsanih ploča ojačanih vlaknima koja povećavaju čvrstoću i otpornost na požar. Izolacijski materijali u LSF konstrukcijama mogu biti smješteni unutar čelične konstrukcije ili na vanjskoj strani, pri čemu svaki raspored ima

prednosti i mane u pogledu toplinske učinkovitosti i otpornosti na kondenzaciju. Najčešće korišteni izolacijski materijal je mineralna vuna koja zbog svojeg niskog koeficijenta toplinske provodljivosti zadovoljava energetske učinkovitost gradnje.

Pri projektiranju LSF konstrukcija nužno je voditi obzira i o njihovim toplinskim svojstvima, tj. potencijalnim nedostacima vezano uz pojavu toplinskih mostova i toplinsku inerciju. Toplinski mostovi u zgradama predstavljaju područja pojačanog prijenosa topline, smanjujući učinkovitost izolacije i povećavajući energetske zahtjeve, a njihovo ublažavanje moguće je kroz strategije poput vanjske kontinuirane izolacije i korištenja toplinskih prekida. Navedene tehnike smanjuju prijenos topline kroz čelične elemente, poboljšavajući ukupnu energetske učinkovitost zgrade. Toplinska inercija predstavlja sposobnost materijala da pohranjuje i oslobađa toplinu, što je ključno za stabilnost temperature u unutrašnjosti zgrade. Iako LSF konstrukcije imaju manju toplinsku inerciju, učinkovite strategije poput primjene vanjske toplinske izolacije, masivnih materijala i PCM-ova mogu povećati njihovu toplinsku učinkovitost te smanjiti energetske potrebe.

Osim toplinskih svojstava, pri projektiranju LSF konstrukcija važno je razmotriti njihovu otpornost na požar, a neki od ključnih faktora su konfiguracije komponenti gipsanih ploča, toplinske izolacije i utjecaja spojeva, koji zajedno utječu na otpornost od požara. Razumijevanje ovih aspekata, uključujući utjecaj novih konfiguracija i materijala, omogućava optimizaciju otpornosti LSF zidova na požar.

2. SUSTAVI LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA

2.1. Uvod

U proteklim godinama sve češće se pojavljuju alternative tradicionalnoj gradnji. Jedan od rastućih trendova, koji privlači pažnju diljem svijeta, je LSF konstrukcijski sustav. Zgrade s LSF-om bilježe sve širu primjenu u SAD-u, Australiji, Japanu te polako dobivaju i sve veći udio na tržištu u Europi. [2]

Sustavi lagane konstrukcije posebno ovise o holističkom projektiranju u kojem su ključni faktori poput instalacija zgrada, ljudskog ponašanja i održivosti. Ti građevinski sustavi su posebno osjetljivi na inovacije već u fazi projektiranja, primjeni predgotovljenih elemenata, upotrebi novih i inteligentnih materijala, visoko učinkovitih sustava gradnje te održivih arhitektonskih praksi. [2]

Na razini projekta, naglasak se stavlja na prilagodljivost kako bi se zadovoljili zahtjevi energetske efikasnosti unutar konstrukcije, kao što je koncept pasivne kuće te zahtjevi za udobnost, konstrukcijski detalji i funkcionalni zahtjevi. Na razini materijala, koriste se inovativni izolacijski materijali te fazno promjenjivi materijali (eng. *Phase Change Material – PCM*) koji pomažu pri optimizaciji i kontroli vlage i temperature unutar same građevine. [2]

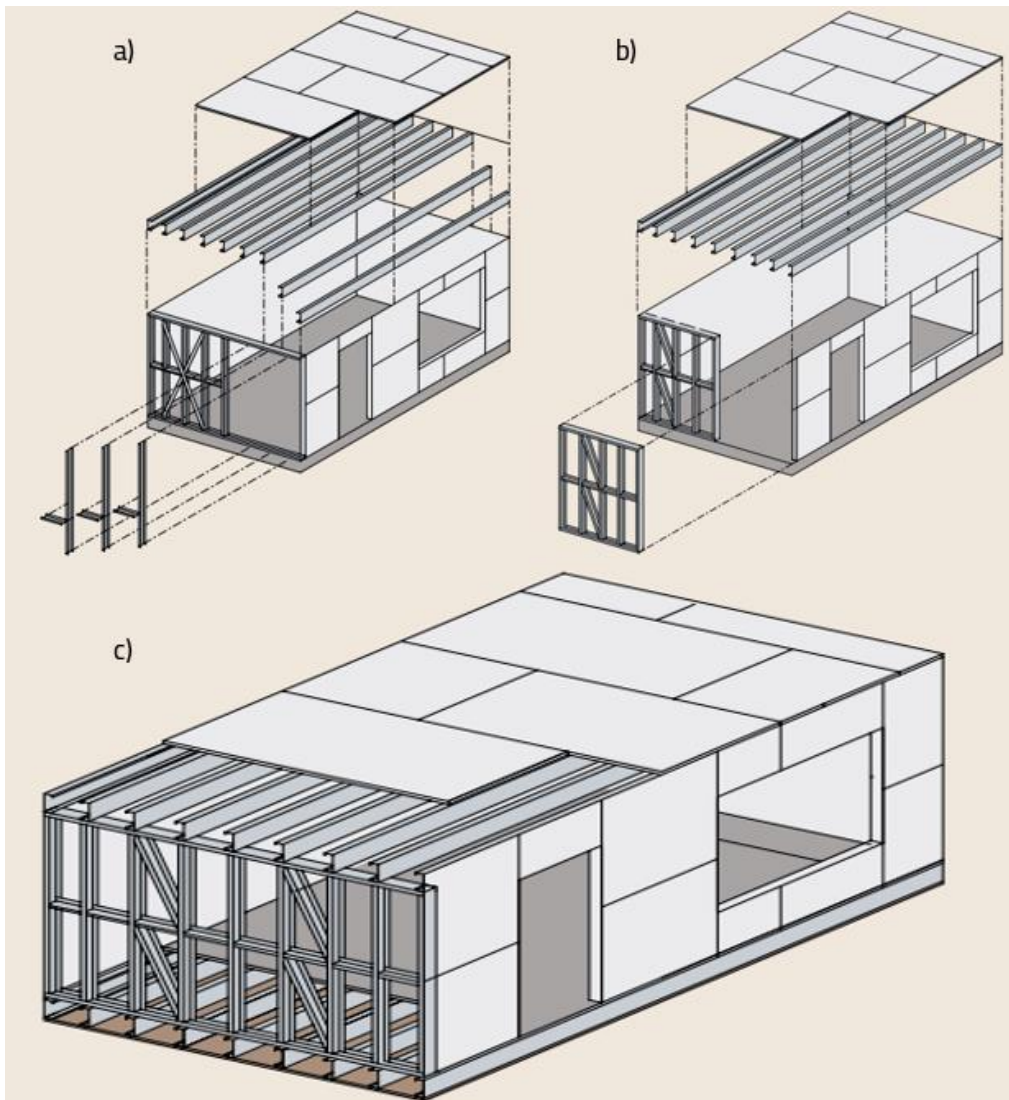
U pogledu održivosti, ovaj tip građevinskih sustava ima velik potencijal za ekološku učinkovitost kroz recikliranje, smanjenje proizvodnje otpada i ponovnu upotrebu, što smanjuje negativne utjecaje na okoliš povezane s građevinskim sektorom. [2]

2.2. Tipični elementi LSF konstrukcije

Metode LSF konstrukcijskog sustava mogu se podijeliti u tri kategorije, kako je prikazano na **Slika 1**, ovisno o razini predgotovljenosti: „*stick-build*“, panelne i modularne.

U „*stick-build*“ metodi (**Slika 1a**) zasebni konstrukcijski elementi se sastavljaju na gradilištu kako bi tvorili stupove, zidove, grede, rogove i ukrute. Na formiranu nosivu konstrukciju se zatim pričvršćuju unutarnje i završne obloge. Konstrukcijski elementi se uobičajeno isporučuju na gradilište spremni za ugradnju, tj. odgovarajućih dimenzija s unaprijed izbušenim rupama za pričvrstne spojeve, te se zatim na gradilištu međusobno povezuju uz pomoć vijaka ili drugih pričvrstnih metoda. Neke od glavnih prednosti „*stick-build*“ metode su jednostavno rukovanje, mogućnost prilagodbe odstupanjima i modifikacija direktno na

gradilištu, jednostavno međusobno povezivanje elemenata... Također, prednost u usporedbi s ostalim LSG konstruktivnim metodama je što u „stick-build“ metodi nema potrebe za radioničkim pogonima kao u ostalim LSF konstruktivnim metodama. Glavni nedostatak je veća potreba za radnom snagom na licu mjesta. [3]



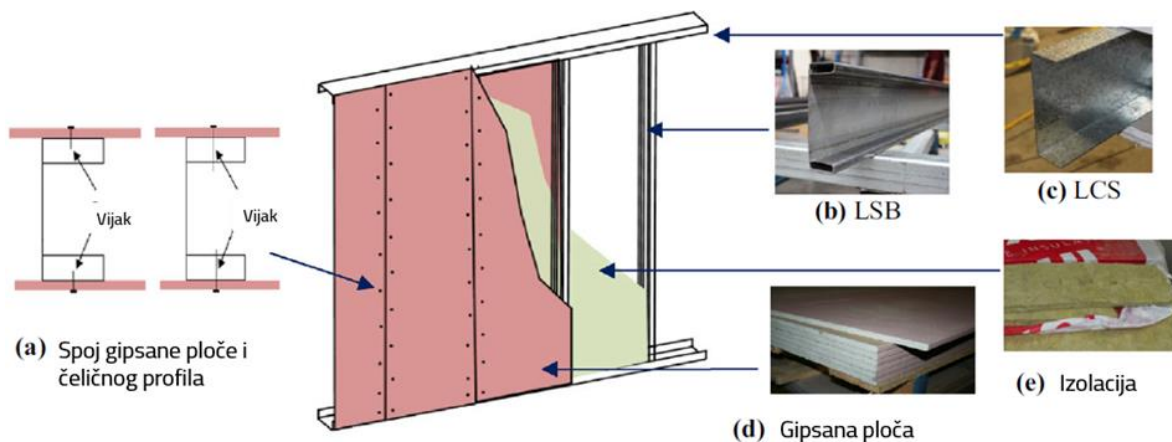
Slika 1.: Konstruktivne metode LSF-a: (a) „stick-build“; (b) panelne; (c) modularne (Izvor: [3])

U panelnoj metodi (Slika 1b), konstrukcijski elementi poput zidnih panela, krovnih rešetki i podnih kaseti mogu se prethodno izraditi u tvornici, a zatim montirati na gradilištu. U usporedbi sa stick-build metodom glavna razlika je što se pojedini završni materijali mogu nanijeti u tvornici što ubrzava proces gradnje na gradilištu. Predgotovljeni elementi se na gradilištu međusobno povezuju pomoću tradicionalnih tehnika kao što su vijci ili samobušajući vijci. Neke od glavnih prednosti panelne metode su visoka kontrola kvalitete, preciznost i

sigurnost na radu zbog proizvodnje u tvornici, brža ugradnja na licu mjesta te manji troškovi zbog smanjene potrebe za radnom snagom na gradilištu. [3]

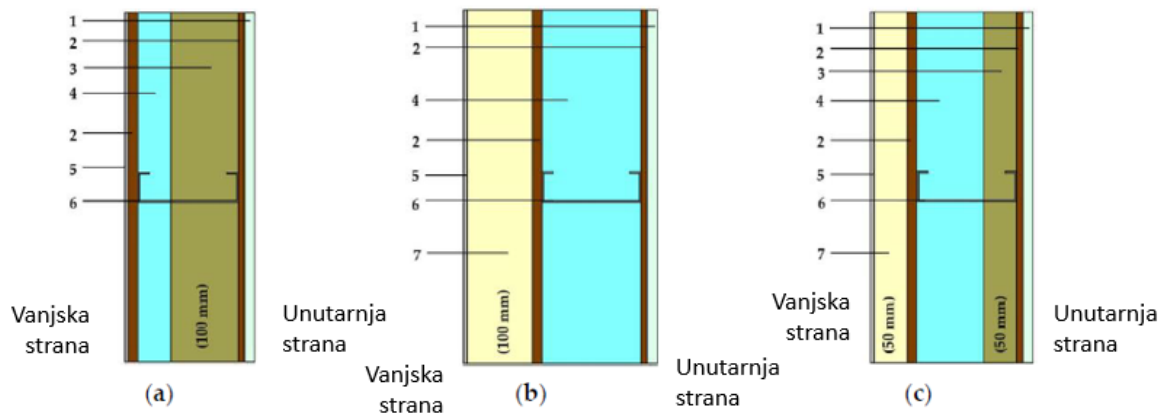
U modularnoj metodi (**Slika 1c**) gradnje konstrukcijske jedinice su potpuno izgrađene u tvornici te se isporučuju na gradilište s već dovršenim unutarnjim završnim radovima i ugrađenom opremom. Jedinice se na gradilištu slažu jedna na drugu ili jedna kraj druge te međusobno povezuju u završnu cjelinu. U usporedbi s ostalim metodama gradnje, modularna gradnja je najisplativija jer je moguća serijska proizvodnja modularnih jedinica koje se zatim mogu primjenjivati i u drugim projektima. Također, zbog proizvodnje u tvornici kontrola kvalitete i sigurnost na radu su na visokoj razini. [3]

LSF konstrukcijski sustav koristi predgotovljene, lako sklopive komponente te za razliku od tradicionalne gradnje nema potrebu za mokrim građevinskim metodama poput korištenja morta ili betona, za izgradnju. Ovi materijali mogu se grupirati u tri glavne kategorije, kako je prikazano na **Slika 2**: hladno valjani/oblikovani čelični profili za prenošenje opterećenja, obloge i izolacijski materijali. Također, koriste se i drugi materijali za sastavljanje pojedinih komponenti (samobušajući vijci), kao i drugi važni elementi, poput nepropusnih membrana za zrak i vodu te materijala za završnu obradu. [2]



Slika 2.: Osnovni elementi LSF zida (Izvor: [4])

Također, elementi LSF konstrukcije mogu se podijeliti u tri tipa, ovisno o položaju izolacijskih materijala. Na **Slika 3** prikazani su primjeri hladne, tople i hibridne okvirne konstrukcije, ovisno o položaju izolacijskih materijala. Prikazani primjeri se razlikuju po odnosu položaja materijala unutar zida: gipsa; ploča s usmjerenim vlaknima (eng. *Oriented Strand Board – OSB*); kamene vune; ETICS-a; LSF okvira; ekspanziranog polistirena (eng. *Expanded Polystyrene – EPS*). [5]



Slika 3.: Klasifikacija LSF konstrukcija, ovisno o položaju toplinske izolacije: (a) hladna okvirna konstrukcija; (b) topla okvirna konstrukcija, (c) hibridna konstrukcija (Materijali: 1- gips ploča; 2-OSB; 3-kamena vuna; 4-zračni prostor; 5-ETICS; 6-LSF; 7-EPS) (Izvor: [6])

U hladnoj okvirnoj konstrukcija sva izolacija se nalazi unutar debljine čelika, pri čemu izolacijski sloj prolazi između čeličnih nosača što je vidljivo na **Slika 3a**. Ovaj tip konstrukcije nije preporučljiv na geografskim područjima s hladnom klimom, budući da niža temperatura unutar zida povećava rizik od kondenzacije unutar strukture zida, posebno u čeličnim nosačima i njihovoj blizini. [5]

Na **Slika 3b** prikazana je primjer tople okvirne konstrukcija u kojoj se sva izolacija nalazi izvan čeličnih okvira. Ovaj tip konstrukcije smatramo najboljom opcijom jer smanjuje rizik od pojave kondenzacije unutar zida te maksimizira toplinsku masu ovojnice zgrade. [5]

U trećem tipu, hibridne okvirne konstrukcije vidljivom na **Slika 3c**, izolacija se nalazi između čeličnih okvira. Kako bi se što više ublažili toplinski mostovi, vanjska kontinuirana toplinska izolacija trebala bi biti maksimalne debljine [5]

2.3. Prednosti i nedostaci LSF konstrukcija

Sustavi LSF konstrukcija u usporedbi s drugim vrstama konstrukcijskih sustava imaju značajan potencijal za recikliranje te ponovnu uporabu materijala. Ostatci čelika tijekom faze izgradnje i uklonjenog čelika tijekom faze rušenja mogu se u potpunosti reciklirati te u budućnosti ponovno upotrijebiti omogućujući time održivu gradnju. [5] [2]

Od ostalih benefita LSF sustava, izdvajaju se još i smanjena težina uz istodobnu visoku mehaničku čvrstoću; predizrada potkonstrukcija i njihovo naknadno sastavljanje na

gradilištu čime se ujedno i skraćuje vrijeme montaže, omogućuje bolja kontrola kvalitete te niži troškovi gradnje. [5] [2]

Što se tiče utjecaja na okoliš, LSF sustavi zbog svoje mogućnosti prenamjene omogućuju dugoročno očuvanje prirodnih resursa te usklađuju odnos između prirodnog okoliša i ljudske gradnje. U usporedbi s tradicionalnom gradnjom, LSF konstrukcija zbog svoje manje težine konstrukcijskih elemenata ima manji utjecaj na promjene okoliša. Proizvodnja u tvornici je učinkovitija, a većina građevinskih komponenti se može lako razdvojiti i reciklirati na kraju životnog vijeka zgrade. [5]

Mogućnost reciklaže ujedno utječe i na ekonomski značaj LSF sustava. Zbog ubrzanog procesa izgradnje uz proizvodnju u masovnom obujmu i visoku kvalitetu postignutu kontrolom kvalitete u tvornici smanjuje se potreba za velikim brojem radne snage što posljedično uzrokuje i niže troškove.

Također, jedna od značajnih prednosti korištenja LSF modularnih sustava je i smanjenje nesreća na radu upravo zbog uporabe laganih elemenata i tipa montaže. [5]

Iako LSF konstrukcijski sustavi nude brojne prednosti i potencijale, primarno u postizanju održivosti i ekonomičnosti u građevinskom sektoru, također postoje i nedostaci u pogledu energetske učinkovitosti.

Jedan od glavnih nedostataka vezanih uz LSF sustave je visoka toplinska provodljivost čelika, što može uzrokovati stvaranje toplinskih mostova ukoliko njegova konstrukcija nije adekvatna. Pojava toplinskih mostova negativno utječe na toplinske karakteristike čime se smanjuje energetska učinkovitost zgrade zbog povećane potrošnje energije, a samim time i troškova tijekom korištenja zgrade. [2]

Također, toplinski mostovi mogu uzrokovati građevinske probleme smanjenja razine udobnosti i zdravstvenih uvjeta stanara koji proizlaze iz pojave kondenzacije uzrokovane lokaliziranim padom temperature unutar građevinskih elemenata. Ovaj problem je od posebne važnosti u zgradama gdje relativna vlaga može biti visoka i time znatno smanjiti trajnost materijala. Stoga je od ključne važnosti koristiti kontinuiranu toplinsku izolaciju (npr. vanjski kompozitni sustav toplinske izolacije; eng. *External Thermal Insulation Composite System - ETICS*) koja sprječava pojavu toplinskih mostova o čemu će se detaljnije pričati u daljnjim poglavljima. [5]

Drugi potencijalni nedostatak LSF konstrukcijskog sustava je niska toplinska masa i posljedična toplinska inercija, što dovodi do većih dnevnih fluktuacija temperature uzrokujući time veću nelagodnu za stanare te povećanu potrošnju energije unutar same zgrade. Ova situacija je posebno izražena u područjima s većim dnevnim oscilacijama temperature, kao što su zemlje s mediteranskom klimom. [5]

3. OSNOVNA SVOJSTVA MATERIJALA

Osnovna toplinska svojstva koja definiraju toplinsko ponašanje LSF zidova su: gustoća, specifični toplinski kapacitet, toplinska provodljivost, otpor prolasku topline i koeficijent prolaska topline čije definicije su dane u nastavku.

Gustoća materijala (oznaka: ρ [kg/m³]) je fizikalna veličina određena kao omjer mase suhog materijala i volumena čvrste tvari, odnosno materijala bez pora i šupljina.

Specifična topline je količina topline po jedinici mase potrebna da se jediničnoj masi nekog materijala temperatura povisi za jedan stupanj. Često se izražava pomoću specifičnog toplinskog kapaciteta (oznaka: c_p [J/kgK]) koji je proizvod specifične topline i gustoće. Specifični toplinski kapacitet materijala mijenja se s promjenom temperaturom te gubitkom mase, a pri konstantnom tlaku i gubitku mase mjeri se pomoću simultano toplinskog analizatora (STA uređaja).

Toplinska provodljivost (oznaka: λ [W/mK]) je svojstvo građevinskih materijala da provode toplinu uslijed razlike temperatura na dvije granične ploštine elementa, tj. toplinska provodljivost opisuje prolaz topline kroz tvari. Proračuni toplinske provodljivosti temelje se na toplinskoj difuzivnosti (oznaka: α), specifičnoj toplini te relativnoj gustoći. Toplinska provodljivost se povećava s povećanjem prijenosa topline, a uobičajeno se mjeri uz pomoć LFA (eng. *Laser Flash Analysis*) uređaja.

Otpor polasku topline (oznaka: R [m²K/W]) jednak je omjeru debljine materijala i njegove toplinske provodljivosti. Toplinski otpor građevinskog elementa karakterizira svojstvo toplinske izolacije tog elementa, tj. što je veća R -vrijednost, to je građevinski element bolji izolator.

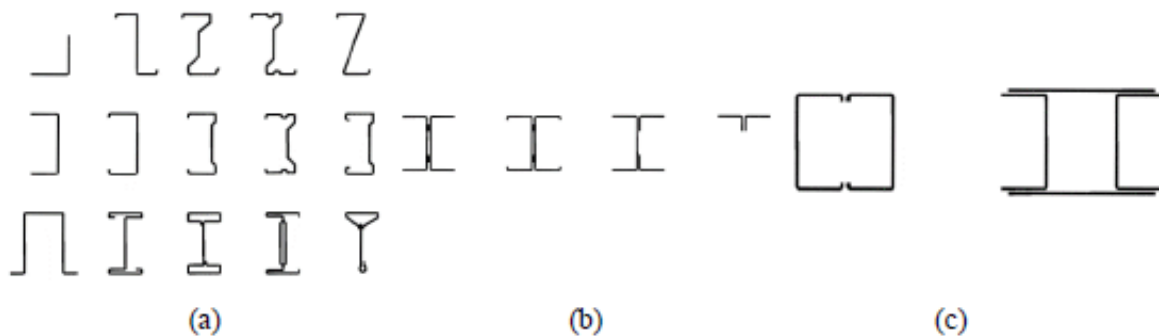
Recipročna vrijednost toplinskog otpora je **koeficijent prolaska topline** (oznaka: U [W/m²K]). Koeficijent prolaska topline označava količinu topline koju građevinski element gubi, tj. što je manja U -vrijednost, to su gubici topline manji čime je i toplinska zaštita zgrade bolja.

4. MATERIJALI U ZIDOVIMA LAGANIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA

4.1. Čelični profili

Nosiva konstrukcija LSF sustava sastoji se od čeličnih profila oblikovanih hladnim valjanjem. Pojam "hladno oblikovani" odnosi se na tanke metalne elemente proizvedene od pocinčanih čeličnih limova koji su dobili svoj konačni oblik mehaničkim postupkom oblikovanja bez korištenja topline. Snaga i krutost čeličnog profila ovise o debljini, kvaliteti materijala te obliku poprečnog presjeka. [7]

Unutar LSF sustava, hladno oblikovani elementi mogu imati različite dimenzije, što omogućuje širok raspon konstrukcijskih mogućnosti. Prema normi EN 1993-1-3 [8] ove dimenzije mogu varirati od pojedinačnih otvorenih presjeka do otvorenih i zatvorenih sastavljenih presjeka kao što je prikazano na **Slika 4.** [2] Uobičajeno se za LSF profile koriste čelični limovi debljine u rasponu od 0,45 do 6 mm. [7]



Slika 4.: Tipični oblici presjeka za hladno oblikovane **elemente:** (a) pojedinačni otvoreni presjeci; (b) sastavljeni otvoreni presjeci; (c) zatvoreni sastavljeni presjeci (**Izvor:** [2])

Hladno oblikovani profili mogu se proizvesti na tri načina: vučenjem, savijanjem i valjanjem. Proizvodnja vučenjem uključuje provlačenje čelične trake kroz otvor čiji je presjek manji od presjeka materijala prije vučenja. Ovaj je postupak jeftin te pogodan za izradu vrlo tankih i složenih presjeka. Savijanje čeličnog lima postiže se upotrebom kočnica, savijača ili preša za sile. Glavna razlika između savijanja i druga dva postupka je da čelična traka ne mora biti valjana. Valjanje se najčešće koristi u industrijskoj proizvodnji hladno oblikovanih čeličnih profila zbog veće produktivnosti. Postupci vučenja i valjanja su pretežito slični; međutim pri valjanju čelična traka prolazi kroz valjke koji ju pri tome stanjuju i deformiraju. Dimenzije i

poprečne tolerancije za hladno valjane čelične profile proizvedene na strojevima za valjanje propisane su prema normi EN10162:2003 [9]. Hladno oblikovani čelični profili obično se proizvode u duljini do 12 m. [2] [7]

Klase čelika koje se koriste za projektiranje hladno oblikovanih elemenata i profiliranih limova propisani su normom EN1993-1-3. [8]

Važan korak u proizvodnji čeličnih limova jest postupak pocinčavanja, koji čeliku povećava trajnost i štiti ga od korozije, a često se izvodi kao postupak potapanja u vrući cink. [10] Ovaj postupak provodi se u skladu s propisima navedenim u normi EN10326:2004. [2] [11] Prema toj normi, osnovna čvrstoća materijala mijenja se od 220 do 550 N/mm², a postoji minimalni premaz G275 s normalnom debljinom cinka od 0,04 mm (275 g/m²), što osigurava izvrsnu trajnost za trenutne LSF primjene. [7]

Kao i kod teške čelične konstrukcije, u LSF sustavu postoji nekoliko vrsta hladno oblikovanih profila. Tri najčešće vrste profila koje se koriste u praksi zbog svoje jednostavnosti izrade i mogućnosti integracije s različitim poprečnim presjecima te specifičnim funkcijama, su C, U i L profili. (Slika 4). [2]

Trenutno su na tržištu dostupni utori koji poboljšavaju strukturnu i funkcionalnu učinkovitost čeličnih profila. Također, postoje profili s posebnim konfiguracijama poprečnog presjeka: profili s utorima u sredini širine koji povećavaju toplinsku učinkovitost te elastični profili koji omogućuju elastičniju vezu i poboljšano akustično ponašanje u smislu izolacije buke. Unutarnja šupljina između čeličnih profila idealna je za postavljanje cijevi, kanala i kabela (Slika 4c). [7] [10]

4.2. Materijali za oblaganje

4.2.1. Općenito o materijalima za oblaganje

Sustavi vanjskog završnog sloja LSF-a zahtijevaju podlogu koja omogućuje njihovu pravilnu primjenu. U tu svrhu, vanjski materijali za oblaganje pričvršćuju se na vanjsku stranu čelične konstrukcije. Ovi materijali, obično primijenjeni u obliku ploča, mogu biti po funkciji nosivi ili nenosivi. [2]

Nosiva vanjska obloga zida jača zgradu pružajući joj potporu povezujući okvire nosača. Daje posmičnu čvrstoću okviru čime pomaže u otporu silama trenja te prevenciji njihanja i savijanja koje može nastati tijekom ekstremnih vremenskih uvjeta ili pri slijeganju temelja konstrukcije. Neke od najčešće korištenih vrsta obloga su obloge od gipsa, cementa, drveta

(šperploča, iverica, OSB ploča)... Glavna mana konstruktivnih obloga je što u većini slučajeva imaju nisku toplinski otpor (R-vrijednost). [12]

Nenosiva vanjska obloga zida zajedno s ovojnicom zgrade poboljšava izolaciju te kao dodatni sloj na okviru pomaže u zadržavanju topline unutar konstrukcije te sprječavanju prodiranja vanjskih utjecaja (vjetra, vode). Nenosiva vanjska obloga zida postavlja se na vanjsku ili unutarnju stranu nosive obloge zida pri čemu izolacijska obloga dolazi u različitim R-vrijednostima. Primjeri nenosivih vanjskih obloga zida su plastične obloge, pjene, celulozna vlakna, ploče s papirom i folijom. [12]

4.2.2. Vrste materijala za oblaganje

Najčešće korišteni materijali za oblaganje vanjskih i unutarnjih slojeva su OSB te gipsane ploče i šperploče. Također važno je napomenuti da, osim svoje funkcije oblaganja, materijali za oblaganje mogu imati značajnu nosivu ulogu u zidovima koji prenose opterećenje u horizontalnom smjeru, kao što je opterećenje vjetrom. [10]

OSB (**Slika 5**) je drvena nosiva ploča vrlo prepoznatljivog izgleda, koja se sastoji od kratko usmjerenih drvenih vlakana (krupno iverje i strugotine) dužine oko 10 cm. „Rezanci“ se aglomeriraju smolom i voskom te komprimiraju pod visokim tlakom i temperaturom. Krajnji slojevi tangencijalnog rezanja su postavljeni i aglomerirani međusobno okomito što rezultira povećanjem čvrstoće i fleksibilnosti konačnog elementa. Vrste smole korištene za ove ploče su vrlo slične ili jednake onima koji se koriste za ploče iverice pri čemu prevladava PF - fenolformaldehidno ljepilo, a težinski udio ljepila iznosi otprilike 2% do 4%. Ploče se pretežito proizvode u debljinama raspona od 5 do 25 mm, pri čemu im gustoća iznosi od 550 do 750 kg/m³. [13] [2]



Slika 5.: OSB ploče različitih dimenzija i njihova aplikacija (**Izvor:** [2])

OSB ploče se ističu svojom fleksibilnošću i širokom primjenom u oblaganju metalnih konstrukcija, kako u vanjskim elementima (vanjski zidovi, krovovi), tako i u unutarnjim zidovima, podovima ili stepenicama. Karakterizira ih mala težina zbog čega su lake za prijevoz i rukovanje te rezanje i pričvršćivanje na metalnu konstrukciju pomoću mehaničkih spojnih elemenata. Fizikalna svojstva OSB-a omogućuju poboljšanje toplinskih i zvučnih izolacijskih svojstava elemenata na kojima se primjenjuju. [2]

Šperploča ima slična svojstva kao i OSB ploča, ali je mnogo skuplja zbog čega se OSB ploče koriste u puno većoj mjeri.

Gips-kartonske (GK) ploče su najčešće korišteni materijal za oblaganje u LSF konstrukciji. Ove ploče se sastoje uglavnom od gipsane jezgre i papirne površine. Nakon spajanja i stabilizacije različitih materijala, konačni proizvod se reže u različite formate. Norma EN 520:2004+A1:2009 [14] sadrži definicije, ispitne metode i zahtjeve vezane uz GK ploče. [2]

Trenutno na tržištu postoji nekoliko varijanti gipsanih ploča pri čemu je svaka namijenjena određenoj svrsi (**Tablica 1**). Najčešće varijante su standardne, otporne na vlagu i požarno otporne ploče. Također se mogu koristiti i druge varijante, poput ploča otpornih na udarce ili ploča sa zvučnom izolacijom. [2]

Na **Slika 6** prikazan je primjer gipsane ploče otporne na vlagu te ista vrsta ploče pričvršćena na čeličnu konstrukciju.



Slika 6.: Gipsana ploča tip H i njena aplikacija (Izvor: [2])

Tablica 1.: Klasifikacija gipsanih ploča (Izvor: [15])

<i>Razred</i>	<i>Opis</i>
Tip A <i>(standardne gipsane ploče)</i>	Gipsane ploče s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane ili dekorativne žbuke. Namijenjene za upotrebu u unutarnjim sustavima suhe gradnje (pregradni zidovi, zidne obloge).
Tip H <i>(gipsana ploča sa smanjenom brzinom apsorpcije vode)</i>	Gipsane ploče s aditivima za smanjenje brzine apsorpcije vode. Namijenjene su za posebne primjene u prostorima s povišenom vlagom (pregrade i stropovi vlažnih prostora). S obzirom na učinak upijanja vode razlikujemo različite tipove: H1, H2 i H3.
Tip E <i>(gipsana ploča za oblaganje)</i>	Gipsane ploče smanjene brzine apsorpcije vode s minimalnom propusnosti vodene pare. Namijenjene su za oblaganje vanjskih zidova, ali nisu projektirane za trajnu izloženost vremenskim uvjetima. Nisu namijenjene u dekorativne svrhe.
Tip F <i>(gipsane ploče s poboljšanom adhezijom jezgre na visokim temperaturama)</i>	Gipsane ploče s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane ili dekorativne žbuke. Ove ploče imaju mineralna vlakna i/ili druge dodatke u gipsanoj jezgri za poboljšanje kohezije jezgre na visokim temperaturama. Namijenjene su za pregrade i stropove viših sigurnosnih zahtjeva od požara.
Tip P	Gipsane ploče koje imaju lice namijenjeno za nanošenje gipsane žbuke ili za kombiniranje kolaža s drugim materijalima u obliku ploča ili panela. U slučaju ploča namijenjenih za postavljanje gipsane žbuke, rubovi su kvadratni ili okrugli.
Tip D <i>(gipsana ploča kontrolirane gustoće)</i>	Gipsane ploče kontrolirane gustoću, s licem na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane ili dekorativne žbuke što omogućuje poboljšana svojstva u određenim primjenama.
Tip R <i>(gipsane ploče s povećanom čvrstoćom)</i>	Gipsane ploče koje imaju lice na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekoracije. Namijenjene za posebne primjene gdje je potrebna veća čvrstoća, imaju povećana uzdužna i poprečna prekidna opterećenja.
Tip I <i>(gipsane ploče s povećanom tvrdoćom površine)</i>	Gipsane ploče koje imaju lice na koje se mogu nanijeti odgovarajuće gipsane žbuke ili dekoracije. Namijenjene za posebne primjene gdje je potrebna veća površinska tvrdoća.

GK ploče samostalno ne poboljšavaju nosiva svojstva zgrada s LSF-om i stoga se ne koriste za poboljšanja nosivosti. Međutim, ovaj materijal je odličan građevinski materijal koji pruža otpornost na požar te njegovo korištenje u svrhe oblaganja čelične konstrukcije doprinosi postizanju željene otpornosti na požar. [2]

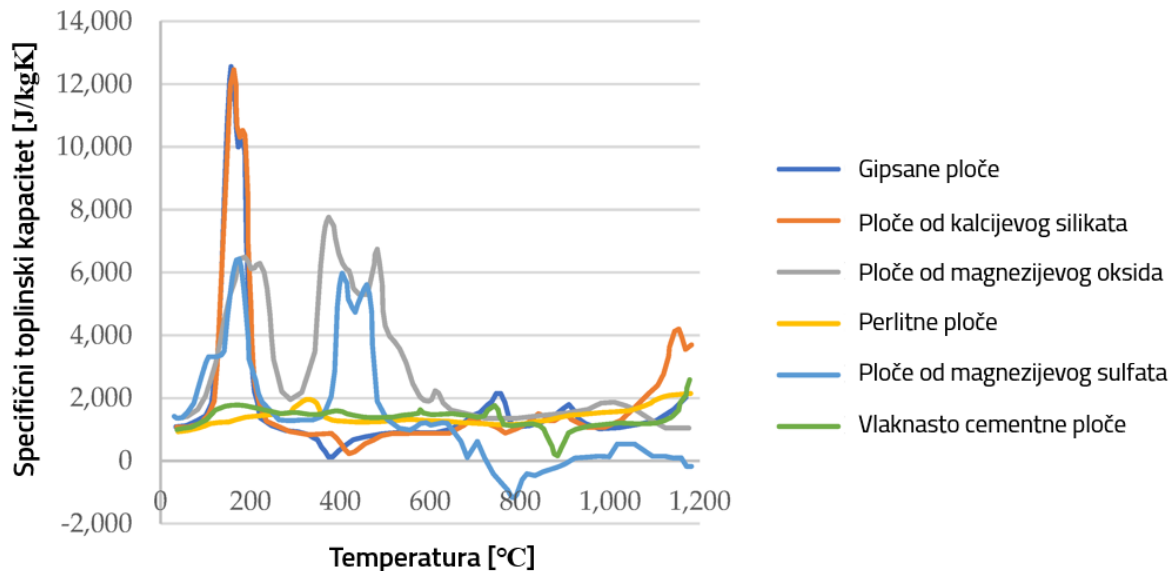
Osim GK ploča te ostalih ploča na bazi drveta, zbog svoje čvrstoće, otpornosti na udarce i požar te površinskog izgleda u industrijskim primjenama često se koriste i metalne ploče za oblaganje. Metalne ploče najčešće dolaze u debljinama u rasponu od 0,5 mm do 1 mm te su kruto vezane na LSF konstrukciju pomoću samobušućih vijaka. Nedostaci metalnih ploča su lošija zvučna svojstva te loša toplinska izolacija što dovodi do pojavljivanja toplinskih mostova i potrebe za dodatnom izolacijom. Zbog navedenih nedostataka, metalne ploče uglavnom dolaze u obliku sendvič panela s mineralnom vunom ili poliuretanskom (eng. *Polyurethane rigid foam - PUR*) i polizocijanuratnom (eng. *Polyisocyanurate/rigid polysio foam - PIR*) pjenom. [16]

Druge nemetalne, uglavnom požarno otporne ploče su ploče od magnezijevog oksida (MgO), magnezijevog sulfata, kalcijevog silikata te PCM ploče. [16]

Po kemijskom sastavu MgO ploče su pretežito sastoje od dva elementa: magnezijevog oksida (MgO) i magnezijeva klorida (MgCl₂) pri čemu njihova svojstva primarno ovise o postotku MgO. Zbog svojih akustičnih, toplinskih i požarnih svojstava, MgO ploče se uglavnom primjenjuju kao obloge u unutrašnjosti LSF. U usporedbi s gipsanim pločama, MgO ploče se rijetko koriste s obzirom da pri povišenim temperaturama imaju 15% veći gubitak mase u odnosu na gipsane ploče zbog čega dolazi do pucanja i propadanja mehaničkog integriteta ploče. Osim toga, u kontaktu s vodom dolazi do kemijskog propadanja ploče jer se na površini ploče stvara slana voda koja može dovesti do pojave stvaranja korozije. Upravo iz ranije navedenih razloga MgO ploče nisu primjenjive za vanjske fasade ili ostala mjesta gdje su izložene vlazi. Kako je ova vrsta ploča prilično nova na tržištu, za nju trenutno ne postoje jasno definirane europske norme koje definiraju uvjete, zahtjeve i ispitivanja za ovu vrstu ploča. [16]

Ploče od magnezijevog sulfata (MgSO₄) su po kemijskom sastavu sačinjene od 55% MgO, 25% MgSO₄ i 18% staklenih vlakana. Većinski udio MgO u magnezij sulfatnim pločama čini ih veoma sličnim MgO pločama, ali zamjenom MgCl₂ u MgO pločama s MgSO₄ uklonjeni su nedostaci korozivnog učinka u kontaktu s vodom. Toplinska svojstva MgSO₄ ploča su bolja nego u MgO pločama, ali i u njima pri porastu temperature dolazi do gubitka mase i brzog pucanja. Kao i kod MgO ploča, trenutno ne postoje usklađene europske norme koje definiraju pojmove i zahtjeve ispitivanja za ovu vrstu ploče. [16]

Usporedba specifičnog toplinskog kapaciteta različitih vrsta ploča za oblaganje je vidljiva na Slika 7.



Slika 7.: Usporedba specifičnog toplinskog kapaciteta različitih vrsta ploča (Izvor: [16])

Ploče od kalcijevog silikata ovisno o gustoći dijelimo u tri kategorije: niske gustoće (200–500 kg/m³), srednje gustoće (500–1000 kg/m³) i visoke gustoće (1000–1800 kg/m³). Na visokim temperaturama zbog isparavanja vode im vrijednosti specifične topline dosežu slične vrhunce kao i gipsane ploče (Slika 7). Općenito su tvrđe od gipsanih ploča što im je često prednost u upotrebi. [16]

Još jedna vrsta ploča za oblaganje su perlitne ploče koje su izrađene od vulkanskog stakla. U usporedbi s ostalim pločama, perlitne ploče karakteriziraju mala težina, lakoća u rukovanju, povoljna cijena, velika čvrstoća i kemijska postojanost. [16]

PCM gipsane ploče se sastoje od mikrokapsuliranih PCM-a, gipsane jezgre te male količine dodatka. PCM-ovi apsorbiraju ili gube znatne količine energije te prolaze kroz faznu promjenu, topeći se tijekom dana i stvrdnjavajući tijekom noći, što im pomaže u održavanju toplinske udobnosti u prostoru. Zbog svoje povišene specifične topline, većih gubitaka mase te toplinske provodljivosti PCM gipsane ploče imaju slabiju požarnu otpornost u usporedbi s ostalim materijalima za oblaganje. Također, gubitak mase PCM gipsane ploče je veoma visok na povišenim temperaturama zbog dehidracije i isparavanja PCM-a. [16]

Gips-vlaknaste ploče su posebna vrsta gipsanih ploča koje su dodatno ojačane celuloznim ili staklenim vlaknima, a dobivaju se miješanjem tih materijala i prešanjem pod visokim

tlakom nakon dodavanja vode, bez dodatnih veziva. Ploče se nakon sušenja impregniraju hidrofobnim sredstvom i režu u potrebne dimenzije. Gips-vlaknaste ploče se mogu koristiti za oblaganje vanjskih elemenata (vanjski zidovi, krovovi) te za oblaganje unutarnjih zidova stropova i podova u unutrašnjosti. U usporedbi s gips-kartonskim pločama, gips-vlaknaste ploče zbog svog sastava imaju veću stabilnost i čvrstoću te su otpornije na požar, vodu i udarce. [17]

Vlakna unutar ploča mogu biti sintetička (staklena, karbonska, poliamidna) ili od prirodnih materijala (lan, juta, konoplja, kokos, vuna). Prisutnost vlakana u gipsanoj ploči pridonosi boljoj povezanosti materijala te pri pojavi pukotina, vlakna sprječavaju daljnju propagaciju ploče što ujedno povećava trajnost i nosivost materijala. Mane sintetičkih gips-vlaknastih ploča su visoka cijena i značajan utjecaj sintetičkih vlakana na okoliš. Također, sintetička vlakna zbog svojih kemijskih svojstava u kombinaciji s gipsom mogu pokazati ograničenu adheziju. Zamjena sintetičkih vlakana prirodnim smanjuje njihov utjecaj na okoliš te pomaže u smanjenju emisije ugljikovog dioksida. Svojstva biljnih vlakana variraju ovisno o vrsti biljke koja se koristi te se samim time razlikuje njihova otpornost i nosivost. Također, svojstva biljnih vlakana ovise o njihovim mehaničkim (čvrstoća vlakna) i fizikalnim svojstvima kao što su duljina i promjer vlakna. [18]



Slika 8.: Gips-vlaknasta ploča (Izvor: [17])

Još jedna vrsta vlaknima ojačanih ploča za vanjsko i unutarnje oblaganje zidova su vlaknasto-cementne ploče. Zbog utjecaja cementa na okoliš i velikog ugljičnog otiska vlaknasto-cementne ploče se slabo primjenjuju. Najčešće se koriste celulozna i polimerna vlakna, a kao alternativa pojavljuju se prirodna vlakna poput bambusovih, kokosovih i rižinih ljuskica. U ispitivanju čvrstoće na savijanje, cementne ploče s prirodnim vlaknima (osim

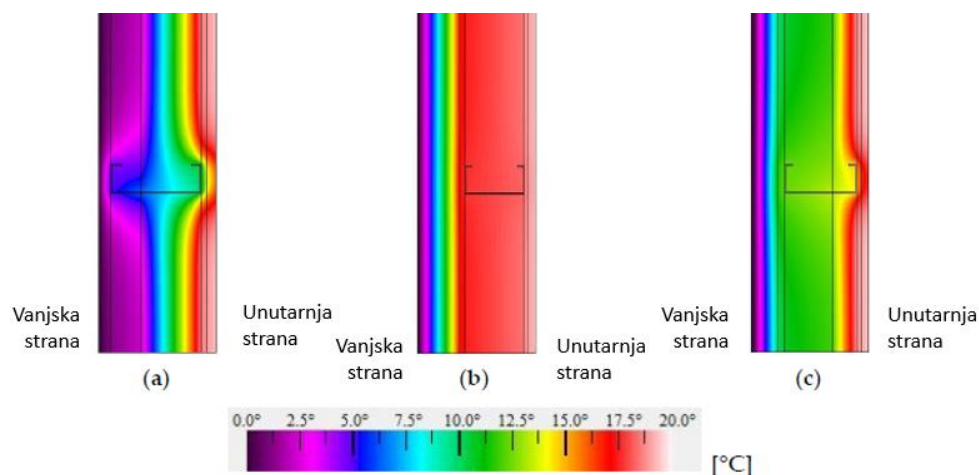
rižinih ljuskica) su pokazale čak 80% bolje rezultate od klasičnih građevinskih materijala. [19] [20]

4.3. Izolacijski materijali

4.3.1. Klasifikacija LSF elemenata ovisno o položaju toplinske izolacije

U LSF konstrukcijskom sustavu, izolacijski materijali postavljaju se na vanjskoj strani kao završni sloj sustava ili unutar zračne šupljine unutar čelične konstrukcije. U okviru toplinskih svojstava, LSF elementi (kao što su fasadni zidovi) mogu se klasificirati u tri klase, ovisno o položaju toplinske izolacije. Na **Slika 3** prikazana su sva tri primjera zidova s istom debljinom izolacije (100 mm). Na slici se, također, osim toplinske izolacije mogu vidjeti i neke od najčešćih komponenti fasadnih zidova LSF-a kao što su gipsane ploče, staklena vuna, OSB ploče te EPS koji je obično integriran u ETICS. [2] [6]

Slika 9 prikazuje raspodjelu temperatura duž presjeka ranije opisanih vrsta zidova pri čemu su postavljeni granični uvjeti za vanjsko i unutarnje okruženje. Pri tome je vanjska temperatura postavljena na 0 °C, a unutarnja na 20 °C, dok je konvektivni koeficijent prijenosa topline definiran normom EN ISO 6946:2007 [21] za horizontalni toplinski tok, odnosno $h_e = 25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ za vanjsko okruženje i $h_i = 7.69 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ za unutarnje okruženje. [6]



Slika 9.: Raspodjela temperatura unutar LSF fasadnih zidova: (a) hladna okvirna konstrukcija ($U = 0.5316 \text{ W/m}^2\text{K}$); (b) topla okvirna konstrukcija ($U = 0.2951 \text{ W/m}^2\text{K}$); (c) hibridna konstrukcija ($U = 0.3581 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Izvor: [6])

U hladnoj konstrukciji (**Slika 3a**), sva toplinska izolacija, uglavnom fleksibilna, smještena je u prazninu unutar zida, u debljini čeličnog okvira. Ovaj tip konstrukcije se ne preporuča u područjima hladne klime zbog svoje loše toplinske i hidrotermalne učinkovitosti u usporedbi s ostalim tipovima konstrukcije, što je vidljivo na **Slika 9**, uspoređujući U-vrijednost svih triju tipova zida s istom debljinom toplinske izolacije. Osim niže učinkovitosti toplinske izolacije još jedna od značajnih mana hladne konstrukcije je i veći rizik od međufazne kondenzacije, zbog niskih temperatura koje se mogu pojaviti unutar zida, posebice u čeličnim stupovima i njihovoj blizini kao što je vidljivo na **Slika 9a**. Također, niske unutarnje površinske temperature, koje se mogu pojaviti duž područja čeličnih stupova i njihove blizine, mogu biti kritične u pojavi patologija vidljivih unutar zgrada, kao što je fenomen nazvan '*thermal ghosting*', što predstavlja pojavu mrlja na hladnim površinama zidova. [6]

Suprotno hladnoj konstrukciji, primjenjuje se topla konstrukcija (**Slika 3b**), u kojoj je sva toplinska izolacija smještena izvan čeličnog okvira. Ovaj tip konstrukcije maksimizira potencijal toplinske izolacije smanjenjem U-vrijednosti fasadnih zidova te minimizira rizike od pojave međufazne i površinske kondenzacije što uočavamo na **Slika 9b**. Također, postavljanje izolacije izvan čeličnog okvira olakšava primjenu kontinuiranog sloja izolacije te njenu ugradnju. [6]

Uz navedene prednosti tople konstrukcije, postavljanjem toplinske izolacije kontinuirano izvan čeličnog okvira izolacija je u izravnom kontaktu s vanjskim okruženjem i klimatskim promjenama što može uzrokovati degradaciju njezine cjelovitosti i toplinske učinkovitosti ukoliko se pri projektiranju dovoljno ne razmatra ili ne projektira pravilno. Stoga je potrebno procijeniti ne samo početnu učinkovitost materijala, već i stvarno izvedeno stanje na koju mogu utjecati razni čimbenici poput starenja materijala, degradacije podloge ili mogućih pukotina. [6]

Kao kombinacija ranije navedenih tipova, primjenjuje se hibridna konstrukcija (**Slika 3c**), u kojoj je sva toplinska izolacija smještena izvan i između čeličnog okvira. U hibridnom tipu konstrukcije povećanjem debljine toplinske izolacije izvan čeličnog okvira poboljšavaju se toplinska i hidrotermalna učinkovitost fasadnih zidova. [6]

4.3.2. Vrste izolacijskih materijala

Izolacijski materijali predstavljaju ključni dio LSF građevinskog sustava jer pružaju potrebna toplinska svojstva i toplinsku udobnost.

S povećanim zahtjevima za poboljšanjem energetske učinkovitosti, vanjski toplinski izolacijski sustavi (ETICS) postaju dominantan izbor kao vanjski završni sloj LSF zgrada (**Slika**

10a). ETICS se često koristi u toplim LSF konstrukcijama, a vrlo je pogodan za smanjenje toplinskih mostova čeličnih profila jer vanjski sloj toplinske izolacije može biti kontinuiran.

Uobičajeno je koristiti EPS specificiran normom EN 13163:2012+A1 [22] ili ekstrudirani polistiren (eng. *Extruded Polystyrene - XPS*) specificiran normom EN 13164:2001/A1:2004 [23] zbog njihove sličnosti u sastavu. (Slika 10b). U ETICS sustavu se uz EPS i XPS mogu pronaći i drugi izolacijski materijali pri čemu EPS i ostale petrokemijske pjene čine 27% europskog tržišta. [2] [7] [16]



Slika 10.: ETICS (Izvor: [2])

Kao što je ranije spomenuto u ETICS sustavima uz EPS se od drugih polimera najčešće koristi XPS zbog njihove sličnosti u strukturi i svojstvima. Oba materijala se klasificiraju kao visoko zapaljive pjene zatvorenih ćelija bez značajnih akustičnih svojstava. Niža akustična svojstva proizlaze iz čvrste strukture EPS-a i XPS-a u usporedbi s poroznom MW dobrih akustičnih svojstava. Također, u usporedbi s MW, toplinska provodljivost je niža čime je toplinska izolacija bolja te se kreće u rasponu između 0,032 do 0,045 W/mK. Glavna razlika u usporedbi EPS-a i XPS-a je ta što EPS ima veću apsorpciju vlage u usporedbi s XPS-om koji zbog zatvorene stanične strukture ne upija vodu te je samim time postojaniji pri izloženosti vlazi. [16]

Vanjski sloj izolacije nadopunjuje onaj koji je postavljen unutar čelične konstrukcije postižući time željene razine toplinskih performansi. Unatoč tome, vanjska toplinska izolacija nije obavezna u LSF zgradama. Ovaj konstrukcijski sustav također je kompatibilan s drugim vanjskim završnim elementima, kao što su ventilirane fasade, obloge od kamena i ploče od vinila. [2]

Na niže prikazanoj **Tablica 2** vidljiva su toplinska i fizikalna svojstva različitih izolacijskih materijala korištenih u LSF panelima. Iz slike se jasno može očitati da je toplinska provodljivost polimera značajno niža u usporedbi s drugim navedenim materijalima. [16]

Tablica 2.: Toplinska i fizikalna svojstva različitih izolacijskih materijala (Izvor: [16])

<i>Materijal</i>	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	C_p [J/kgK]
<i>MW</i>	12-200	0.030-0.040	0.08-1.00
<i>EPS</i>	10-80	0.032-0.045	1.25
<i>XPS</i>	15-85	0.025-0.040	1.45-1.70
<i>PUR</i>	30-160	0.022-0.035	1.30-1.45
<i>PIR</i>	28-40	0.020-0.035	1.40-1.50
<i>Celulozna vlakna</i>	30-70	0.038-0.040	1.30-1.60
<i>Aerogel</i>	100-150	0.013-0.021	1.00

Najčešće korišteni izolacijski materijal unutar LSF konstrukcije je mineralna vuna (eng. *Mineral Wool - MW*), koja se uglavnom postavlja između čeličnih profila (pr. kamena vuna). Tržišni udio MW u Europi iznosi 60% što dokazuje širok spektar primjene ovog materijala. MW se osim u vanjskim zidovima i pločama, koristi i kao izolacijski materijal unutar pregrada i ploča. MW, specificirane normom EN 13162:2012+A1:2015 [24], se kao nezapaljiv materijal koriste u LSF konstrukciji u svrhe toplinske i zvučne izolaciju. Toplinska provodljivost, najvažniji faktor za toplinske izolacijske materijale, iznosi $\lambda = 0,035$ W/mK čime zadovoljava energetska učinkovitost gradnje. Kamena vuna trenutno je dostupna na tržištu u različitim oblicima i gustoćama što je čini prikladnom za različite primjene u LSF konstrukciji. [2] [7] [16]

Osim što doprinosi toplinskim svojstvima, kamena vuna je i materijal koji zbog svoje porozne strukture, za razliku od krutih izolacijskih materijala, apsorbira zvuk čime znatno poboljšava izolacijske sposobnosti elemenata. Također, ovaj materijal ima iznimnu otpornost na požar, usporavajući njegovo širenje te time pružajući zaštitu čeličnoj konstrukciji. [2]

Najčešći korišteni oblici kamene vune prikazani su na **Slika 11**: fleksibilni pokrivači i krute ploče.



Slika 11.: Oblici kamene vune i njihova aplikacija (Izvor: [2])

Najveći problem u uporabi MW nastaje kada se vuna koristi na mjestima gdje postoji rizik od kondenzacije te veće izloženosti vlazi. Kada voda uđe u sustav, MW apsorbira vlagu uzrokujući povećanje toplinske provodljivosti materijala te time znatno smanjuje njegova izolacijska svojstva. Uzimajući u obzir navedenu manu MW potrebne su dodatne membrane i mjere opreza. [16]

Dodatan način izolacije u LFS sustavima su sendvič paneli gdje PUR i PIR zbog svojih prednosti doprinose porastu korištenja obloge sendvič panelima u LSF konstrukcijama. Spomenuti materijali predstavljaju jeftinije, čvrste te lako ljepljive alternative mineralnoj vuni te istovremeno imaju bolja izolacijska svojstva, odnosno lošiju toplinsku provodljivost raspona od 0,020 W/mK do 0,035 W/mK u odnosu na mineralnu vunu. Bolja izolacijska svojstva rezultiraju tanjim građevinskim elementima te većom iskoristivošću prostora što povećava učinkovitost i smanjuje operativne troškove izolacijskog sustava. [16]

U zadnje vrijeme, PUR se koristi s drugim materijalima s ciljem dobivanja kompozita s niskom gustoćom uz dobra mehanička svojstva kao što su visoka čvrstoća i visoka duktilnost te visoka otpornost na udarce uz učinkovitu zvučnu izolaciju. Kompozitni materijali sastavljeni od PUR-a proizvode se u mnogim varijacijama svojstava i gustoće te tako postižu gustoće u rasponu od 30 do 500 kg/m³ što ovisi o zahtjevima na svojstva materijala. [16]

Jedan od značajnih nedostataka PUR-a je loša otpornost na požar, koju je moguće poboljšati dodavanjem aditiva, no unatoč dodavanju aditiva, izgaranjem PUR-a dolazi do formiranja plinova opasnih za okoliš i ljude u blizini. Alternativan materijal je PIR, koji nastaje sličnom kemijskom reakcijom kao i PUR, ali ima jednu značajnu prednost u odnosu na sve pjenaste materijala, a to je bolja otpornost na požar. [16]

Celulozna vlakna, dodatan materijal koji je pronašao svoju primjenu u LSF sustavima, proizvode se u mlinu od recikliranog papira i drveta, a posjeduju dobra toplinska i zvučna

izolacijska svojstva. Uz celulozna vlakna dodaju se i dijelovi nekih kemijskih kompozita s ciljem povećavanja otpornosti na požar, štetočine i truljenje. Materijal je dostupan u pločama, no unatoč tome češće se koristi u praškastom obliku te ubacuje u šupljine zidova. Toplinska provodljivost kreće se u rasponu od 0,038 W/mK do 0,040 W/mK, a zahvaljujući elastičnosti i poroznosti idealan je u primjeni kao zvučna izolacija u plivajućim podovima, dok nedostatak celuloznih vlakana predstavlja apsorpcija vlage koja negativno utječe na toplinska svojstva. [16]

5. TOPLINSKA SVOJSTVA ZIDOVA LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA

5.1. Toplinski mostovi

Pojava "toplinskih mostova" obično se koristi za opisivanje lokaliziranih fenomena u zgradama gdje dolazi do pojačanog prijenosa topline u ovojnicu zgrade, što rezultira smanjenom učinkovitošću toplinske izolacije. Kao posljedica toga dolazi do većeg utroška energije za grijanje što je od osobitog značaja u zgradama visoke energetske učinkovitosti. Ukupan utjecaj toplinskih mostova na potrošnju energije za grijanje je značajan, dosežući do 30%, što je više nego utjecaj na potrošnju energije za hlađenje. [5]

Toplinski mostovi imaju dvije važne posljedice: promjenu brzine toka topline i promjenu temperature unutarnje površine. Obično, prisutnost konstruktivnih elemenata u kontaktu s vanjskom ovojnicom može stvoriti "toplinski most", tj. brz i jednostavan put za provođenje topline. Problem toplinskih mostova je osjetljiv i iznimno nezgodan, jer može ugroziti učinkovitost bilo kojeg izolacijskog sustava. Tijekom faze projektiranja, utjecaj toplinskih mostova često se zanemaruje ili površno razmatra pri procjeni toplinskih svojstava zgrade. [5]

Kao što je ranije spomenuto u odjeljku 4.3 upotreba vanjske kontinuirane toplinske izolacije (ETICS-a) je važna strategija za ublažavanje pojave toplinskih mostova pri čemu se posebna pažnja treba posvetiti odabiru tehnike pričvršćivanja toplinske izolacije. Prednost se daje ljepilu kao tehnici pričvršćivanja, a ukoliko se koriste mehanički spojevi, trebali bi biti izrađeni od PVC materijala umjesto od čelika.

Ublažavanje toplinskih mostova može se postići pridržavanjem određenih pravila pri projektiranju ovojnice zgrada. Neki primjeri tih pravila uključuju: održavanje jednostavne geometrije fasade, izbjegavanje prekida izolacijskog sloja, povezivanje izolacijskih slojeva u punoj širini na spojevima građevinskih elemenata, uporabu materijala s najnižom mogućom toplinskom provodljivošću kada su prekidi u izolacijskom sloju neizbježni, postavljanje otvora poput vrata i prozora u kontakt s izolacijskim slojem. [5] [10]

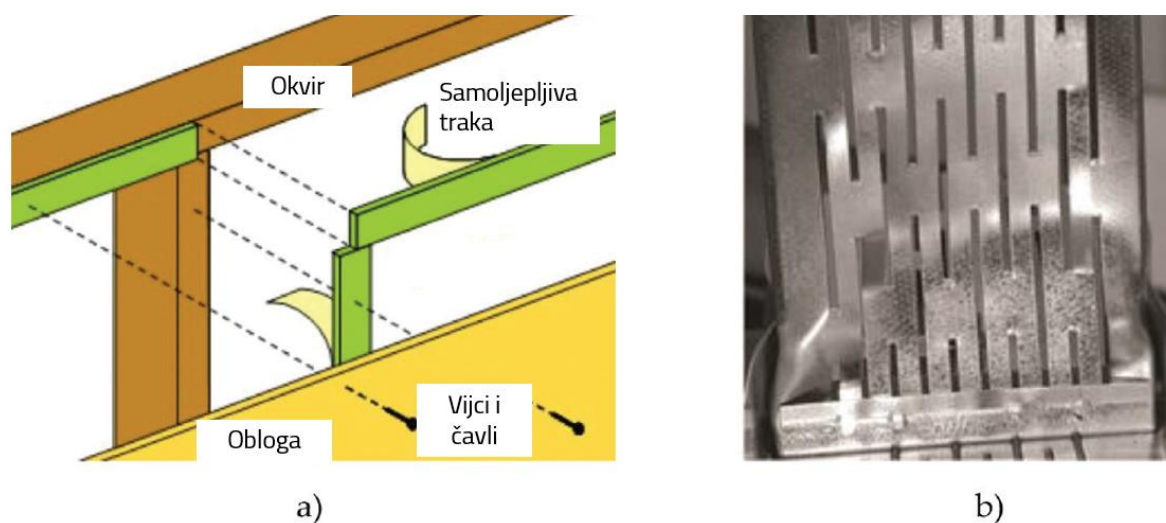
U nastavku slijedi prikaz i opis različitih tehnika koje se mogu koristiti za ublažavanje toplinskih mostova, posebno usmjerenih na čelične konstrukcije.

5.1.1. Vanjska kontinuirana toplinska izolacija

Kao što je već ranije navedeno, primjena vanjske kontinuirane toplinske izolacije je efikasan način za poboljšanje toplinskih karakteristika i smanjenje toplinskih mostova. Povećanje razmaka između profila također omogućuje povećanje toplinske otpornosti (viša R-vrijednost). Prema Kosny i sur. [5], povećanje R-vrijednosti uzrokovano povećanim razmakom bilo je oko 20% s 1.3 cm EPS-a i oko 15% s 2.5 cm EPS-a.

5.1.2. Toplinski prekidi za građevinske komponente

Gubitke topline nastale zbog pojave toplinskih mostova možemo smanjiti korištenjem toplinskih prekida. Najčešće korišteni materijali za toplinski prekidi su kontinuirane izolacije poput poliamidnih traka koje se postavljaju s unutarnje i/ili vanjske strane čeličnog profila. Uvođenje toplinskih prekida omogućuje stvaranje barijere u prijenosu topline između vanjskih komponenata i unutrašnjosti zgrade, tj. zadržavaju toplinu unutar konstrukcije i pomiču točku rosišta prema van. Toplinski prekidi mogu se ugraditi u čelične konstrukcije omogućujući istovremeni prijenos visokih opterećenja. [5]



Slika 12.: Strategije ublažavanja toplinskih mostova u LSF konstrukcijskim elementima. (a)

Trake za prekid toplinskog mosta; (b) Čelični profil s utorima (Izvor: [10])

5.1.3. Trake za toplinske prekide

Budući da glavni gubici topline često nastaju preko čeličnih profila, jedna od strategija uključuje postavljanje traka za prekid topline duž profila, prikazanih na **Slika 12a**. Ovo rješenje se sastoji u postavljanju izolacijske trake pričvršćene za čeličnu konstrukciju

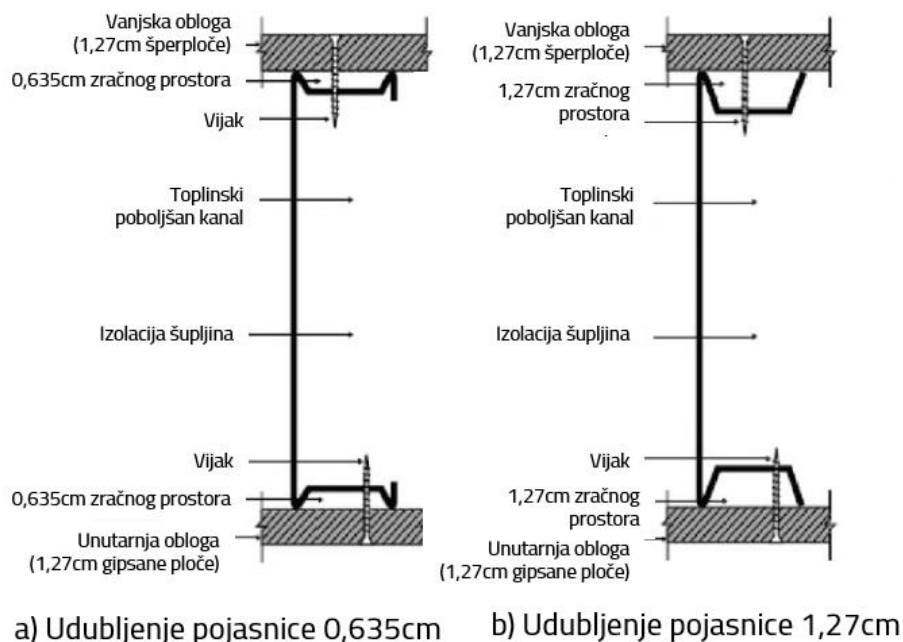
pomoću vijaka ili ljepila. Učinkovitost ove mjere za ublažavanje pojave toplinskih mostova može se povećati upotrebom toplinskih izolacijskih traka poput aerogela. [5] [10]

5.1.4. Povećanje puta toplinskog toka

Povećanje puta toka topline ostvaruje se umetanjem utora u čeličnim profilima, kako je prikazano na **Slika 12b**, čime se smanjuje protok topline. Ova strategija poboljšava toplinsku učinkovitost elemenata LSF-a (smanjenje U-vrijednosti), ali istovremeno smanjuje njihovu mehaničku otpornost, što je bitno za uzeti u obzir kod nosivih čeličnih profila. [5] [10]

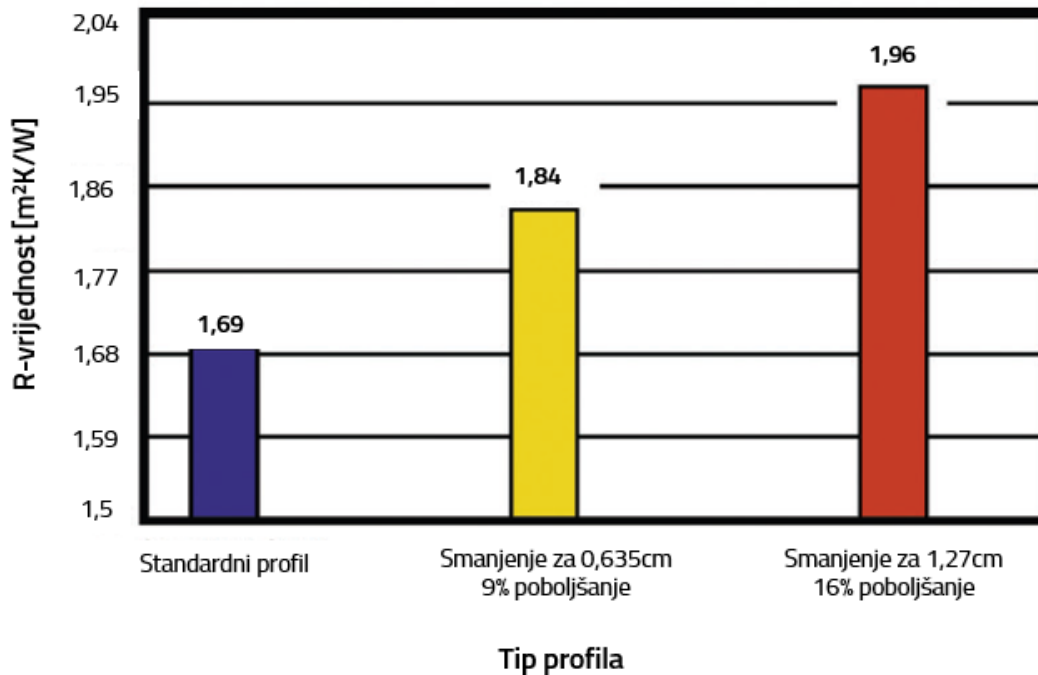
5.1.5. Smanjenje kontaktnog područja pojasnice profila

Još jedno od mogućih rješenja je korištenje profila s geometrijom koja omogućuje smanjenje kontaktnog područja pojasnice, stvarajući svojevrsni toplinski prekid zbog malog zračnog razmaka, čime se povećava R-vrijednost zida. Povećanje veličine udubljenja u pojasnici (**Slika 13**) također poboljšava toplinsku učinkovitost, kao što je prikazano na **Slika 14**. U ovom slučaju, poboljšanje toplinske otpornosti zida iznosilo je 9% i 16% u usporedbi s standardnim čeličnim profilom, tj. ukoliko povećamo udubljenje u pojasnici na 0,635cm R-vrijednost će porasti s početnih 1,69 na 1,84 m^2K/W što iznosi povećanje od 9%. [5] [10]



Slika 13.: Strategije ublažavanja toplinskih mostova u LSF konstrukcijskim elementima:

Utori na pojasnici profila; (a) 0,635cm; (b) 1,27cm (**Izvor:** [10])



Slika 14.: Usporedba toplinske učinkovitosti nakon primjene strategija za ublažavanje toplinskih mostova sa Slika 13 (Izvor: [10])

5.2. Toplinska inercija

Toplinska inercija se odnosi na sposobnost masivnih materijala da provode, pohranjuju i oslobađaju toplinu tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja, dok istovremeno utječe na otpornost materijala pri promjeni temperature tijekom vremena. Može se smatrati suprotnošću od toplinske difuzivnosti, koja predstavlja omjer toplinske provodljivosti te produkta gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta materijala. Toplinski kapacitet mjeri sposobnost materijala za pohranu toplinske energije, a toplinska provodljivost je svojstvo materijala da provodi toplinu. U projektiranju zgrada, toplinski kapacitet obično se naziva i toplinska masa. Toplinska masa omogućuje zgradi da skladišti toplinsku energiju i pruža inerciju koja pomaže u održavanju stabilnosti temperature unutar prostora. Materijali s visokim specifičnim toplinskim kapacitetom i visokom gustoćom, a umjerenom toplinskom provodljivošću (niska toplinska difuzivnost), posebno su prikladni za postizanje dobre toplinske mase u zgradama. Da bi se učinkovito iskoristila toplinska masa, ti materijali se obično smještaju unutar izolacijskih slojeva zgrade. Izrazi "teška" i "lagana" gradnja često se koriste za opisivanje različitih strategija toplinske mase zgrada, a time i njihovog toplinskog odgovora na grijanje i hlađenje. U kombinaciji s dobrim projektiranjem pasivnog

solarnog grijanja, toplinska masa može značajno smanjiti potrebu za energijom za grijanje i hlađenje zgrade, istovremeno poboljšavajući unutarnju toplinsku udobnost. [7]

Hoes i suradnici [25] predlažu konvencionalni stav da zgrade s većom toplinskom masom zahtijevaju manje energije za klimatizaciju i pružaju bolje uvjete toplinske udobnosti. Međutim, u nekim operativnim situacijama, veća toplinska inercija može imati negativan utjecaj na potrošnju energije i toplinsku udobnost, što može rezultirati preferencijom za zgradu koja brže reagira na promjene temperature (s nižom toplinskom masom) [25]. Kako bi se poboljšala toplinska inercija u zgradama od lakih čeličnih konstrukcija, Santos i suradnici [26] predlažu nekoliko strategija, uključujući primjenu tehnika koje koriste toplinsku masu tla. Hoes i suradnici [25] također ukazuju da nijedan od trajnih koncepta toplinske mase (zgrade s velikom ili malom toplinskom masom) nije optimalan za sve operativne uvjete u konvencionalnim zgradama. Kako bi prevladali ovaj izazov, autori su predložili hibridni koncept toplinske mase koji kombinira prednosti zgrada s niskom i visokom toplinskom masom primjenom prilagodljivog kapaciteta toplinskog skladištenja u laganoj zgradi [25]. To postižu koristeći latentnu toplinu koja se oslobađa ili apsorbira tijekom promjene faze unutar PCM-ova, čime se povećava toplinski kapacitet skladištenja konstrukcije. [7]

Zgrade od LSF-a imaju manju toplinsku inerciju u usporedbi s tradicionalnim zgradama koje imaju armirano-betonsku konstrukciju i zidove od opeke. Ovo je rezultat smanjene težine i manje toplinske mase u LSF zgradama. Kao posljedica toga, LSF zgrade mogu pokazivati veće fluktuacije unutarnje temperature. Stoga je u fazi projektiranja bitno pažljivo planirati dimenzije, položaj i strategije zaštite staklenih otvora kako bi se kontrolirali solarni toplinski dobitci, osobito tijekom sezone hlađenja, kako bi se izbjeglo pregrijavanje. [10]

Važno je napomenuti da veća toplinska inercija zgrade nije uvijek prednost u smislu energetske učinkovitosti. U situacijama kada zgrada povremeno ostaje prazna, što je čest slučaj u mnogim stambenim zgradama tijekom radnih dana, ova prividna mana može postati prednost. U konvencionalnim LSF zgradama s niskom toplinskom masom, kada se klimatizacijski sustav uključi, brže će se postići željena ugodna temperatura, čime će se ujedno smanjiti potrošnja energije te povećati energetska učinkovitost. [10]

Međutim, ako želimo iskoristiti pasivno solarno grijanje, potrebno je imati "mehanizam" koji će tijekom dana pohranjivati toplinsku energiju sunca i oslobađati je tijekom noći. U tim situacijama, toplinska masa unutar zgrade postaje iznimno korisna. Stoga, ponekad je prikladno povećati toplinsku masu unutar zgrada, odnosno njenu toplinsku inerciju.

U nastavku slijedi prikaz nekoliko strategija za povećanje toplinske inercije u LSF zgradama.

5.2.1. Primjena vanjske toplinske izolacije

Korištenje vanjske toplinske izolacije (ETICS) (**Slika 15a**) omogućuje ne samo povećanje toplinske inercije već i smanjenje toplinskih mostova, budući da predstavlja kontinuirani sloj toplinske izolacije.



a)



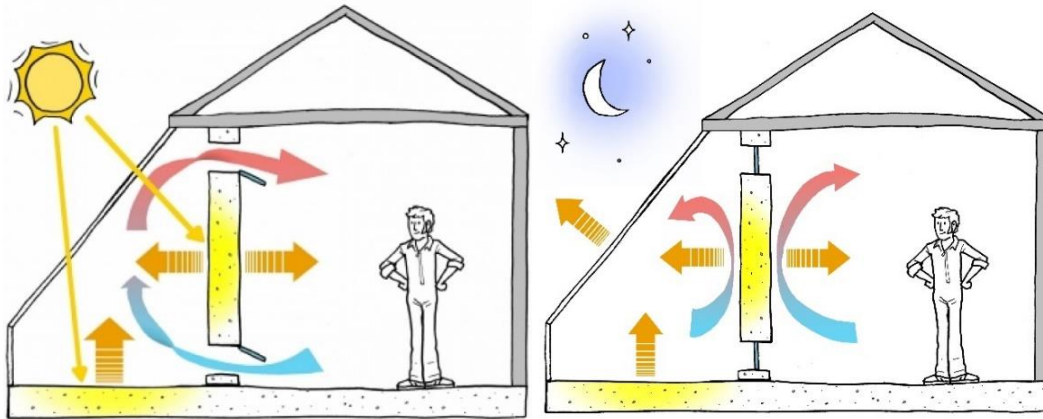
b)

Slika 15.: Strategije za povećanje toplinske inercije u LSF konstrukcijama. (a) Vanjska toplinska izolacija; (b) Uporaba masivnih građevinskih materijala (**Izvor: [10]**)

5.2.2. Uporaba masivnih materijala

Drugi primjer na **Slika 15b** prikazuje upotrebu masivnih materijala (npr. kamen) koji pomažu u apsorpciji i pohrani toplote. U ovom slučaju, zid od kamena postavljen je ispred prozora kako bi bolje apsorbirao sunčevu svjetlost, slično kao unutarnji Trombeov zid [27] (**Slika 16**).

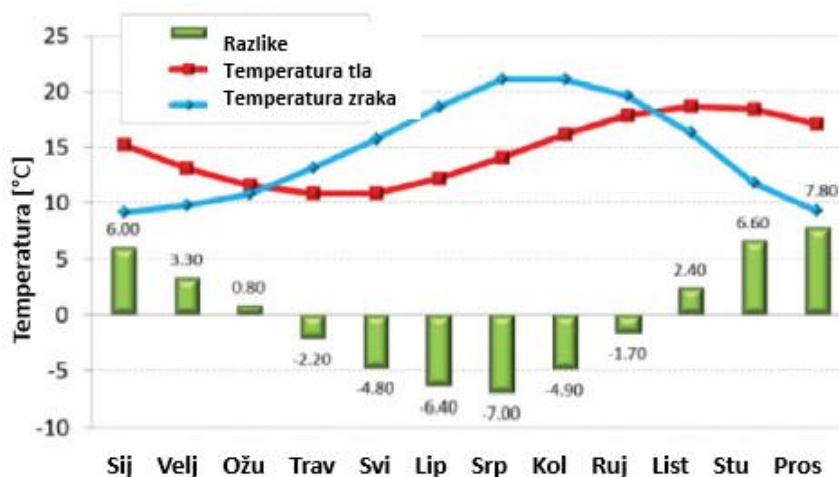
Trombeov zid je masivni zid izgrađen na južnoj strani, uobičajeno izrađen od betona, kamena ili opeke, obojan tamnom bojom radi bolje apsorpcije sunčeve toplote. Zid se postavlja neposredno iza velike staklene površine, uglavnom prozora, okrenut prema suncu. Sunčeva svjetlost prolazi kroz staklo tijekom dana te zagrijava zid koji pohranjuje toplinu te ju kasnije oslobađa unutar zgrade, pružajući tako prirodno grijanje. [27]



Slika 16.: Trombeov zid (Izvor: [27])

5.2.3. Sustav izmjene topline s tlom

Slika 17 prikazuje prosječne mjesečne vanjske temperature zraka i tla (2 m dubine) za Coimbru (Portugal), kao i razliku između tih temperatura. Ova razlika u temperaturi nije stalna i značajnija je tijekom zimske i ljetne sezone, dosežući vrijednost od $+7.8^{\circ}\text{C}$ u prosincu i -7.0°C u srpnju. Važno je primijetiti da je tlo hladnije tijekom sezone hlađenja, a toplije tijekom sezone grijanja, što je povoljno u oba razdoblja. Postoji nekoliko načina kako iskoristiti ovu razliku u temperaturi zraka i tla. Na primjer, može se koristiti geotermalna dizalica topline temeljena na protoku zraka ili tekućine (npr. glikolne tekućine) kroz ukopane cijevi. [10]



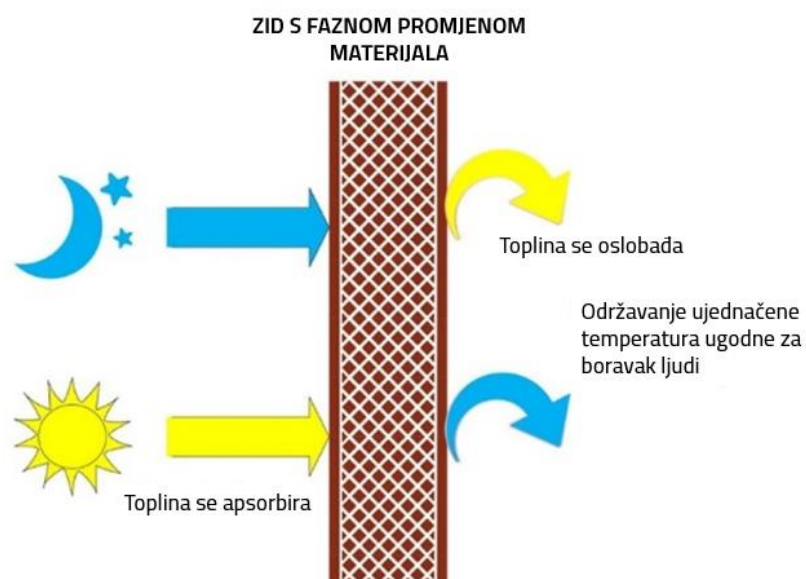
Slika 17.: Korištenje velike toplinske mase tla . prikaz mjesečnih vanjskih temperatura zraka i tla U Coimbri, Portugal (Izvor: [10])

5.2.4. Primjena PCM-a

Za kraj, **Slika 18** prikazuje primjenu materijala s promjenom faze u stropu (alumijski laminirani panel s PCM-om [28]). PCM-ovi imaju sposobnost pohranjivanja i oslobađanja velike količine topline kada dođe do promjene faze (topljenja ili stvrdnjavanja), zahvaljujući principu latentne topline (**Slika 19**) [29]. Ova latentna topline omogućuje materijalu da apsorbira ili otpušta toplinu bez povećanja njegove temperature, čime se povećava toplinska inercija okolnog prostora. [10]



Slika 18.: Upotreba PCM-a (Izvor: [10])



Slika 19.: PCM zid (Izvor: [30])

6. POŽARNA SVOJSTVA ZIDOVA LAGANIH ČELIČNIH OKVIRNIH KONSTRUKCIJA

6.1. Otpornost na požar konstrukcijskih elemenata

Pri projektiranju LSF konstrukcije nužno je razmotriti njena požarna svojstva i čimbenike koji utječu na nju. Požar definiramo kao samopodržavajući proces gorenja koji se nekontrolirano širi u prostoru. Temeljne zadaće zaštite od požara su sprječavanje nastanka požara, sprječavanje širenja požara, predviđanje puteva evakuacije te ugradnja uređaja za gašenje i najavu požara. Upravo zbog same nepredvidivosti požara nemoguće je postići apsolutnu zaštitu od požara te ga je iz tog razloga nužno tretirati kao djelovanje na konstrukciju. [31]

Požarna otpornost je sposobnost konstrukcije, dijela konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da zadrži zahtijevana svojstva (svojstva nosivosti i/ili funkcija odjeljivanja požara) za određenu razinu opterećenja, za određenu izloženost požaru ili za određeni vremenski period (EN 1991-1-2:2002 [32]). Vremensko razdoblje tijekom kojeg konstrukcija odgađa učinak širenja vatre na susjedni prostor, osiguravajući mu integritet i izolaciju bez gubitka strukturalne stabilnosti, mjerimo njegovom ocjenom (razredom) otpornosti na požar (REI-nosivost/cjelovitost/izolacija). Razredi otpornosti na požar REI15/30/45/60/90/120/180 označavaju vrijeme u minutama koje konstruktivni element može izdržati tijekom standardnog ispitivanja otpornosti na požar. Ukoliko je konstrukcijski element nenosiv, prilikom ispitivanja otpornosti na požar razmatra se samo svojstvo cjelovitosti i izolacije, tj. EI. Drugim riječima veći razred otpornosti na požar označava i veću sigurnost stanara zgrade te potencijalno manja oštećenja same konstrukcije od utjecaja požara. [4] [33]

Važno je napomenuti da svojstvo otpornosti na požar ne posjeduju svi građevni materijali nego samo konstrukcijski elementi koje se sastoje od jednog ili više materijala. [33]

Tijekom požara, LSF zidovi djeluju kao razdjelna granica i sprječavaju širenja požara u susjedni prostor za određeni vremenski period. Hladno oblikovani čelični okviri su tankostijeni zbog čega se brže zagrijavaju te gube svoju čvrstoću i krutost tijekom požara.

Tradicionalno se otpornost na požar LSF elemenata određuje propisanim metodama koje se temelje na velikom broju požarnih ispitivanja što je izuzetno skupa i vremenski zahtjevna metoda. Kako zbog navedenih nedostataka ne bi došlo do zastoja u razvoju inovacija vezanih uz LSF sustave istraživači se sve više usmjeravaju na razvoj metoda temeljenih na modeliranju. [4]

6.2. Faktori koji utječu na požarnu otpornost LSF sustava

Toplinska svojstva LSF zidova uvelike ovisi o svojstvima komponenata (**Slika 2**) poput oblika i veličine poprečnog presjeka čeličnih elemenata, vrstama obložnih ploča i izolacije te njihovim debljinama, detaljima pričvršćivanja, konstrukciji zidova i spojevima ploča.

Konstrukcijska svojstva ovise o vremensko-temperaturnom profilu razvijenom u čeličnim profilima, oblicima i veličinama profila, bočnoj stabilnosti koju pružaju obložne ploče te faktorima smanjenja mehaničkih svojstava hladno oblikovanog čelika pri povišenim temperaturama.

Nadalje trenutno se istražuju i utjecajni faktori, poput učinka spojeva obložnih ploča, smanjenja mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama te oblika i veličina čeličnih profila. Osim toga, izloženost zida požaru s jedne strane dovodi do neravnomjerne raspodjele temperature kroz poprečni presjek profila, što dodatno komplicira problem otpornosti na požar LSF zidova.

U nastavku su prikazani i opisani različiti faktori koji utječu na otpornost na požar.

6.2.1. Utjecaj gips-kartonskih ploča

U nastavku su obrađene GK ploče kao najčešće korišteni tip materijala za oblaganje, no moguće je koristiti i druge vrste obloga (**Slika 7**).

6.2.1.1. Reakcije dehidracije i toplinska svojstva

Kada se zahtjeva da LSF elementi budu određene otpornosti na požar, kao obložni materijal, najčešće se koriste gips-kartonske ploče. Gips-kartonske (GK) ploče se sastoje od gipsa ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i kalcijeva karbonata (CaCO_3) pri čemu kalcijev sulfat (CaSO_4) sadrži oko 3% slobodne vode u ravnoteži i oko 20% kemijski vezane kristalne vode. Reakcije dehidracije gipsa (**jednadžbe 1, 2**) i razgradnja kalcijevog karbonata (**jednadžba 3**) pri povišenju temperature apsorbiraju toplinu što ima značajan utjecaj na otpornost na požar GK ploča. Pri izloženosti požaru, površinska temperatura GK ploče postupno raste dok ne dosegne oko 100°C pri čemu dolazi do zastoja u porastu temperature jer se tad toplinska energija koristi za isparavanje vode, što rezultira pojavom horizontalnog platoa u profilu *temperatura-vrijeme*. Upravo opisano svojstvo GK ploče značajno doprinosi požarnoj otpornosti LSF sustava. [4]



Kalcijev karbonat u GK pločama, kao što je vidljivo u **jednadžbi 3**, raspada se na kalcij oksid i ugljikov dioksid pri temperaturi od 670°C. Prikazane reakcije u **jednadžbama 1, 2 i 3** zahtijevaju znatnu količinu energije. Temperature pri kojima dolazi do navedenih kemijskih reakcija i količina apsorbirane energije u tim reakcijama ključne su informacije za razumijevanje ponašanja GK ploča na povišenim temperaturama te za potrebe daljnjeg modeliranja. [4]



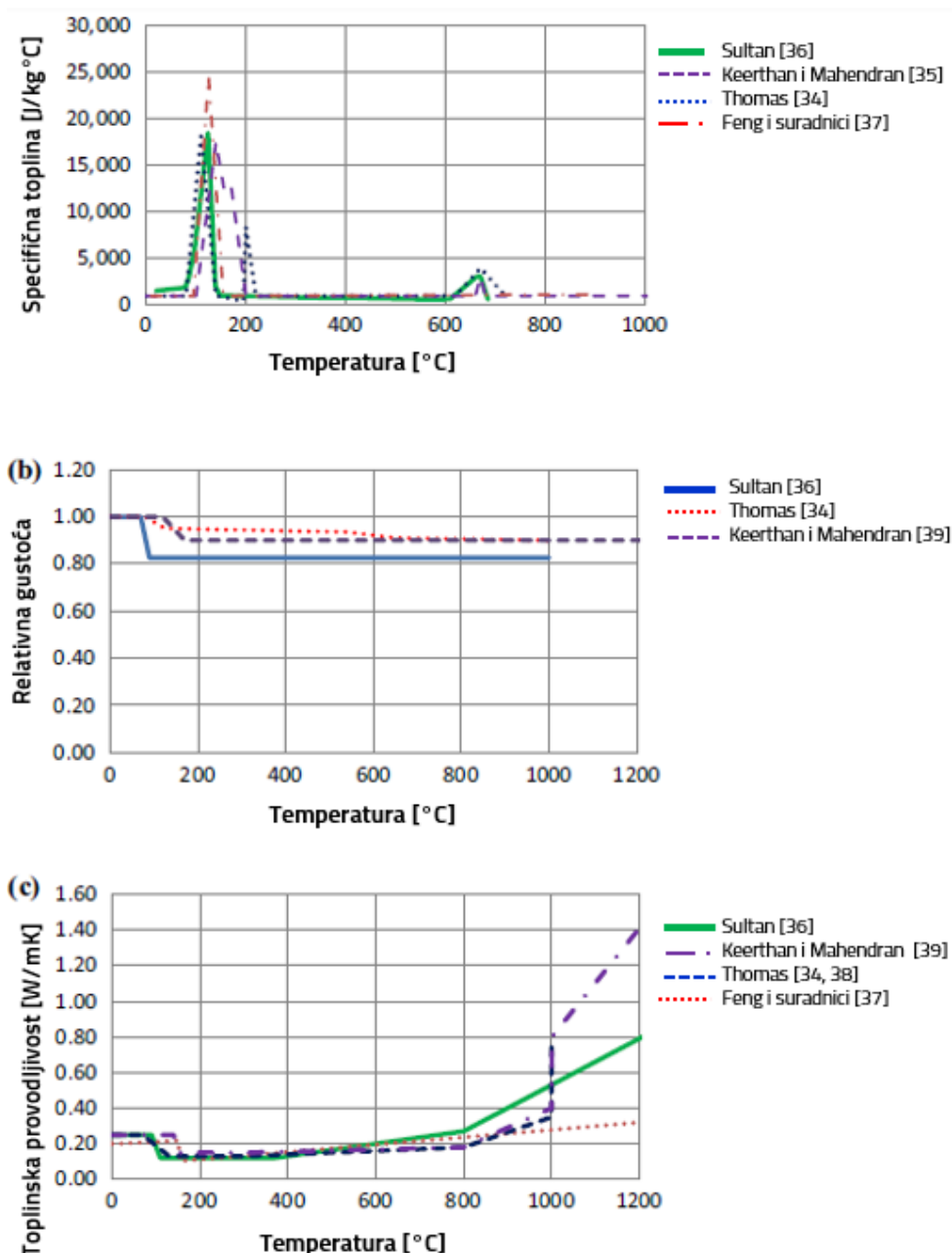
Na temelju prethodnih istraživanja konstruirani su grafikoni toplinskih svojstava LSF zidova u ovisnosti o porastu temperature materijala, gdje su uzete u obzir sve kemijske promjene nastale unutar GK ploče tijekom zagrijavanja.

Slika 20 prikazuje promjenu osnovnih toplinskih svojstava (specifični toplinski kapacitet, gustoća i toplinska provodljivost) GK ploča na povišenim temperaturama, dobivenih u istraživanjima [34] [35] [36] [37]. Vrijednosti relativne gustoće i toplinske provodljivosti vidljive su na **Slika 20b** i **Slika 20c** pri čemu je uočeno smanjenje gustoće na temperaturi oko 100°C kao posljedica isparavanja vode. Na **Slika 20c** prikazane su modificirane ili prividne vrijednosti toplinske provodljivosti koje su u svojim radovima predložili ranije spomenuti istraživači [36] [37] [38] [39]. Učinci pukotina nastalih zbog skupljanja i djelomičnog otkazivanja GK ploča implicitno su uzeti u obzir u prikazanim vrijednostima toplinske provodljivosti pri povišenim temperaturama (**Slika 20c**).

Lokalni maksimumi na ovim grafikonima predstavljaju reakcije dehidracije i razgradnje u GK pločama (**jednadžbe 1, 2, 3**). Kao što je vidljivo na **Slika 20a**, postoje razlike između specifičnih toplinskih vrijednosti GK ploča proizvedenih u različitim zemljama. [4]

Tijekom požara, toplina razvijena u nekom prostoru (požarnom odjeljku) prenosi se na GK ploče konvekcijom i zračenjem, a zatim se proces prijenosa topline unutar same ploče odvija kondukcijom, nakon čega slijedi prijenos topline u šupljinu konvekcijom i zračenjem. Nakon toga, toplina se prenosi na ploče koje nisu direktno izložene požaru, a zatim konačno i na prostor koji nije izložen požaru. Stoga je pri ocjeni požarne otpornosti LSF zidova ključno

koristiti točna toplinska svojstva GK ploča na povišenim temperaturama, kao što su specifična toplina, relativna gustoća, emisivnost, toplinska kondukcija i konvekcija. Među njima, vrijednosti emisivnosti i konvekcije koje su predložili ranije navedeni istraživači su približno jednake, pri čemu je emisivnost požarne i ambijentne strane oko 0,9, dok su konvekcijski koeficijenti požarne i ambijentne strane oko 25 i 10 W/m²K pri svim temperaturama [40].



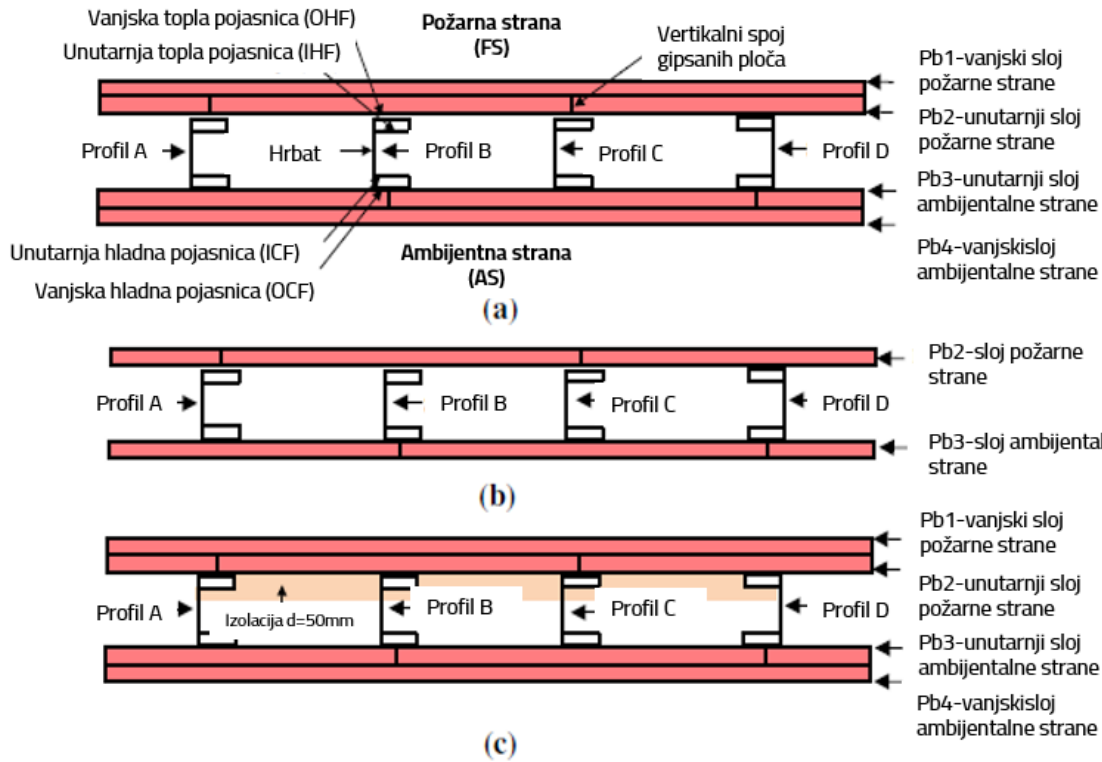
Slika 20.: Toplinska svojstva GK ploča na povišenim temperaturama. (a) specifična toplina; (b) relativna gustoća; (c) toplinska provodljivost (Izvor: [4])

Zaključno, toplinska svojstva GK ploča na povišenim temperaturama, posebice vrijednosti specifične topline i toplinske provodljivosti, variraju između požarno otpornih GK ploča, primarno zbog razlika u njihovom kemijskom sastavu i procesu proizvodnje. Dobivene vrijednosti GK ploča treba koristiti s oprezom jer toplinska svojstva mogu značajno varirati između pojedinih vrsta ploča i proizvođača. Također, od značajne je važnosti odrediti toplinska svojstva na povišenim temperaturama pri proizvodnji novih požarno otpornih GK ploča uzevši pri tome u obzir procese proizvodnje i kemijske sastave. [4]

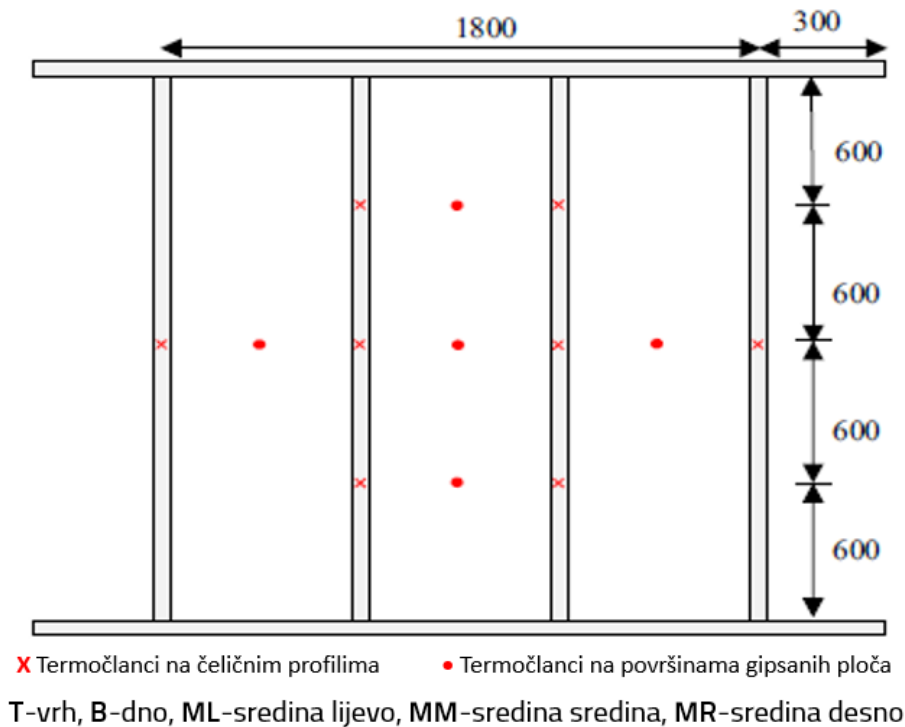
6.2.1.2. Otkazivanje GK ploča

Pri povišenim temperaturama dolazi do otkazivanja GK ploča uzrokovano dehidracijom (Jednadžbe 1, 2), skupljanjem, kalcinacijom te do trganja GK ploča zbog posmičnih sila, koji se javljaju tijekom zagrijavanja u vijcima (**Jednadžba 3**). Navedene pojave posljedično mogu dovesti do otkazivanja samih ploča pri dosezanju viših temperatura. U LSF zidovima s dvostrukim oblogama GK ploča, usporavanju topline doprinose oba sloja obloge, no otkazivanjem vanjskog sloja GK ploča dolazi do direktnog grijanja unutarnjeg sloja i posljedično tome bržeg porasta temperature na površinama GK ploča i čeličnih elemenata čime se smanjuje otpornost na požar LSF zidova [4].

Požarna ispitivanja, koja su proveli Gunalan i sur. [41] na panelima LSF zidova bez toplinske izolacije izrađenim od standardnih U profila s rubom (eng. *Lipped Channel Section-LCS*) debljine 90 x 40 x 15 x 1,15 mm pokazala su da se otkazivanje GK ploča događa kada neizložena površina vanjskog sloja GK ploče dosegne otprilike 900°C. Međutim, navedena istraživanja su oprečna istraživanjima - Buchanana i Gerlicha [42], koji su predvidjeli otkaz pri 600°C. Iz navedenog je vidljivo da je teško znati točnu temperaturu pri kojoj dolazi do otkazivanja GK ploča jer su opisana požarna ispitivanja na LSF zidovima s GK pločama provedena u različitim zemljama, tj. GK ploče su proizvedene u različitim tvornicama, a samim time imaju različita svojstva. [4]

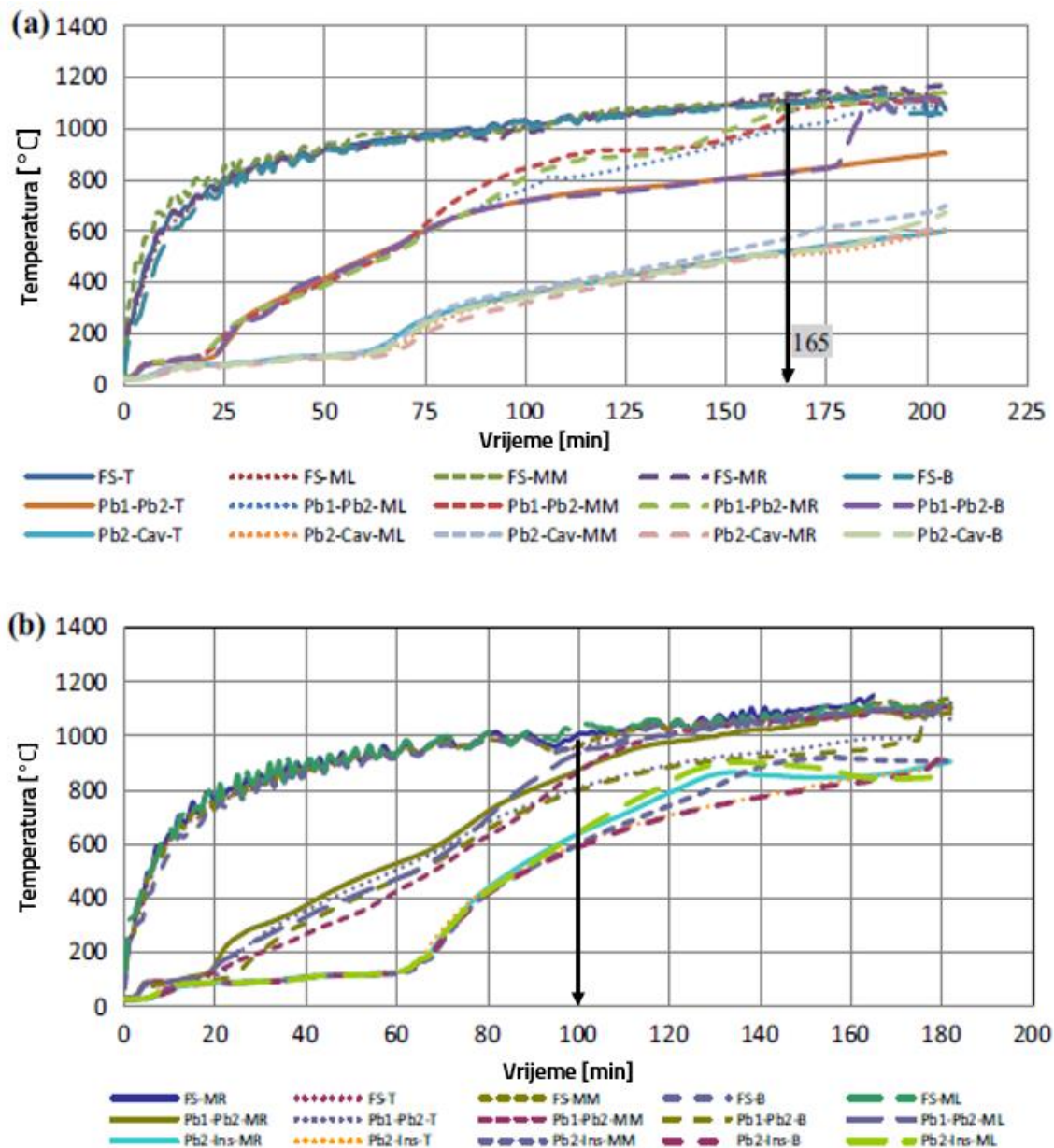


Slika 21.: Konfiguracije LSF zidova: (a) neizolirani LSF zidovi s dvostrukim slojem GK ploča; (b) neizolirani LSF zidovi s jednim slojem GK ploča; (c) izolirani LSF zidovi s dvostrukim slojem gipsanih ploča (Izvor: [4])



Slika 22.: Lokacije termočlanaka (Izvor: [4])

Krivulje *temperatura-vrijeme* površina GK ploča (prikaz položaja termočlanaka prikazan na (Slika 22) dobivenih iz požarnih istraživanja Kesawana i Mahendrana [43] na neizoliranim i izoliranim LSF zidovima izrađenim od zavarenih profila sa šupljom pojasnicom / lagane čelične grede (eng. *Hollow Flange Channel-HFC/LiteSteel Beam-LSB*) profila debljine 150 x 45 x 15 x 1,6 mm (Slika 21) podvrgnutih omjeru opterećenja od 0,2 i izloženih standardnim uvjetima požara, prikazani su na Slika 23. [4]



Slika 23.: Krivulje *temperatura-vrijeme* kod LSF zidova s dvostrukim slojem GK ploča, izrađenih od LSB profila, pod opterećenjem s omjerom 0,2 (oznake sa Slika 21 i Slika 22).

(a) neizolirani LSF zidovi; (b) LSF zidovi s izolacijom u šupljini (Izvor: [4])

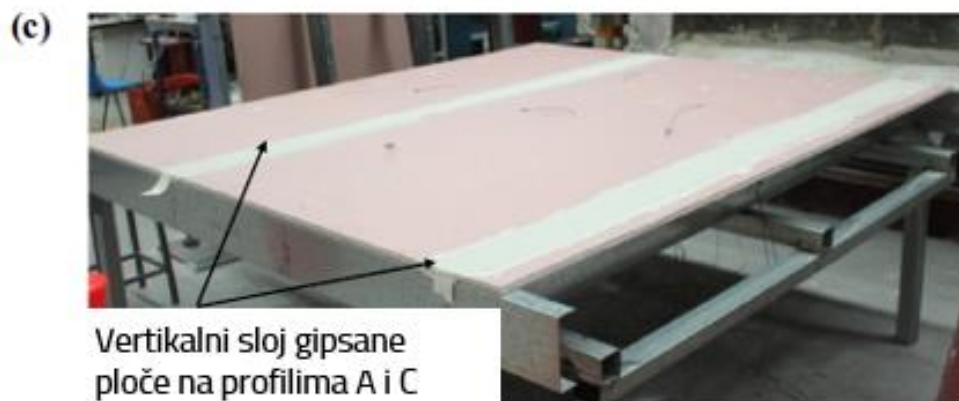
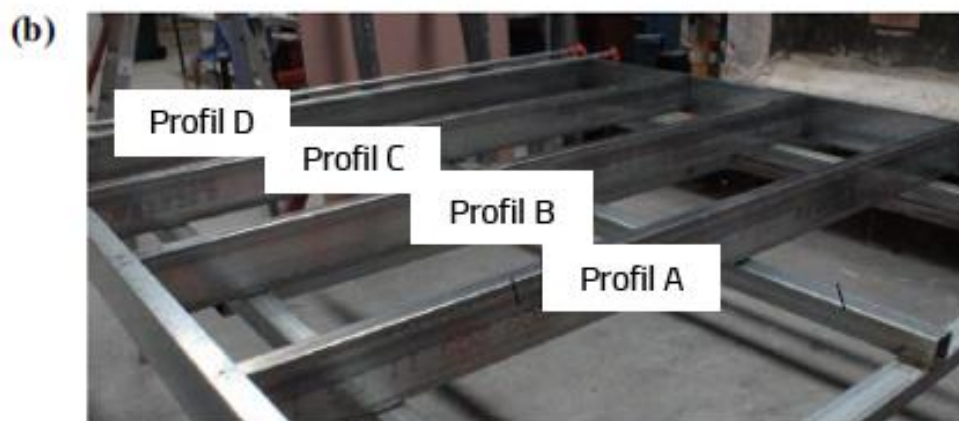
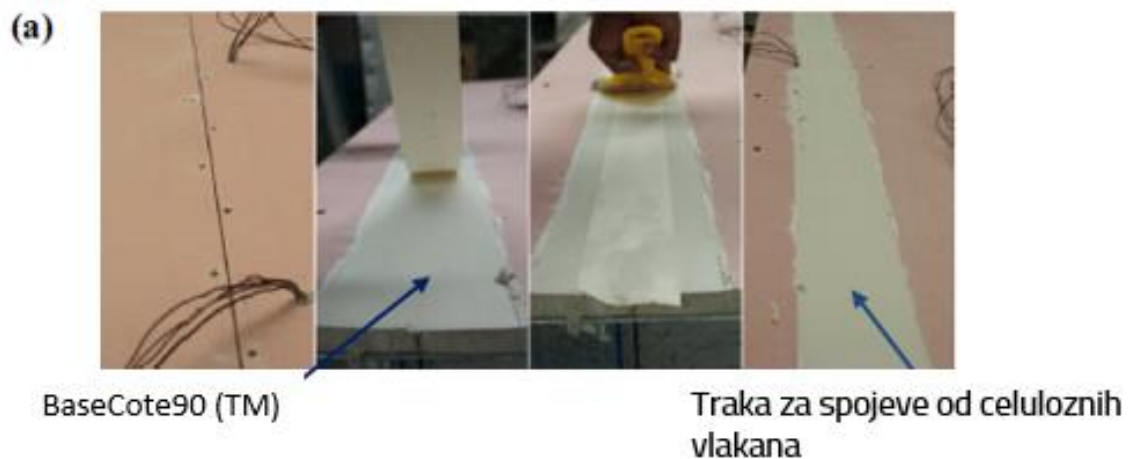
Na navedenim slikama, vidljivo je da do otkazivanja GK ploča dolazi pri poklapanju površinske temperature vanjske (Pb1) i unutarnje (Pb2) požarne strane (FS). Na **Slika 23** vidljivo je da otkazivanje GK ploča kod neizoliranih LSF zidova počinje oko 165. minute, dok kod LSF zidova s izolacijom unutar šupljine (50mm izolacije od kamene vune) otkazivanje počinje oko 100. minute. [4]

Međutim, neovisno o vrstama konstrukcija zidova, u požarnim ispitivanjima Kesawana i Mahendrana [43], do otkazivanja GK ploča došlo je pri prosječnoj temperaturi neizložene površine vanjskog sloja gipsane ploče (Pb1-Pb2) od 950°C. Razvoj gipsanih ploča s odgođenim periodom otkazivanja pri povišenim temperaturama značajno bi povećao otpornost na požar LSF zidova, a samim time i njihovu širu primjenu. [4]

6.2.2. Utjecaj spojeva GK ploča

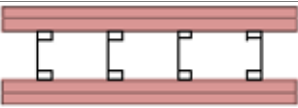
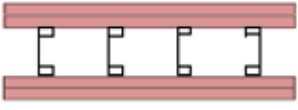
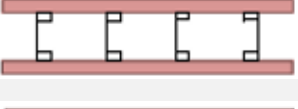
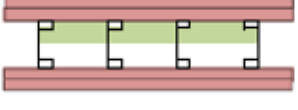
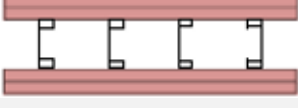
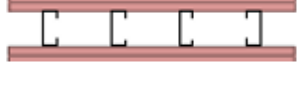
GK ploče unutar LSF zidne konstrukcije nužno je međusobno povezati, a samim time potrebno je razmotriti utjecaj spojeva na ponašanje cjelokupnog konstrukcijskog elementa. Iako su spojevi gipsanih ploča potpuno zabrtvljeni oni su ujedno i najslabiji dio LSF zidova izloženih požaru te nepovoljno utječu na otpornost na požar LSF zidova. [4]

Za potrebe ispitivanja Kesawana i Mahendrana [43] spojevi GK ploča su ispunjeni brtvilom (BaseCote 90(TM) [44]) kao što je vidljivo na **Slika 24a**. Na spoj je stavljena traka na bazi celuloznih vlakana širine 50 mm. U **Tablica 3** prikazani su rezultati provedenog ispitivanja požarne otpornosti Kesawana i Mahendrana [43] LSF zidova sačinjenih od zavarenih HFC profila. Za potrebe ispitivanja promatrani su zidni paneli s dvostrukim slojem GK ploča pri čemu su unutarnji i vanjski slojevi GK ploča postavljeni međusobno okomito. Profil B izveden je bez spojeva, a profil C s vertikalnim spojem na unutarnjem sloju GK ploče (**Slika 24b**). Na kraju ispitivanja zaključeno je da su profili s vertikalnim spojevima (**Slika 24c**), u usporedbi s ostalim profilima, zakazali. [4]

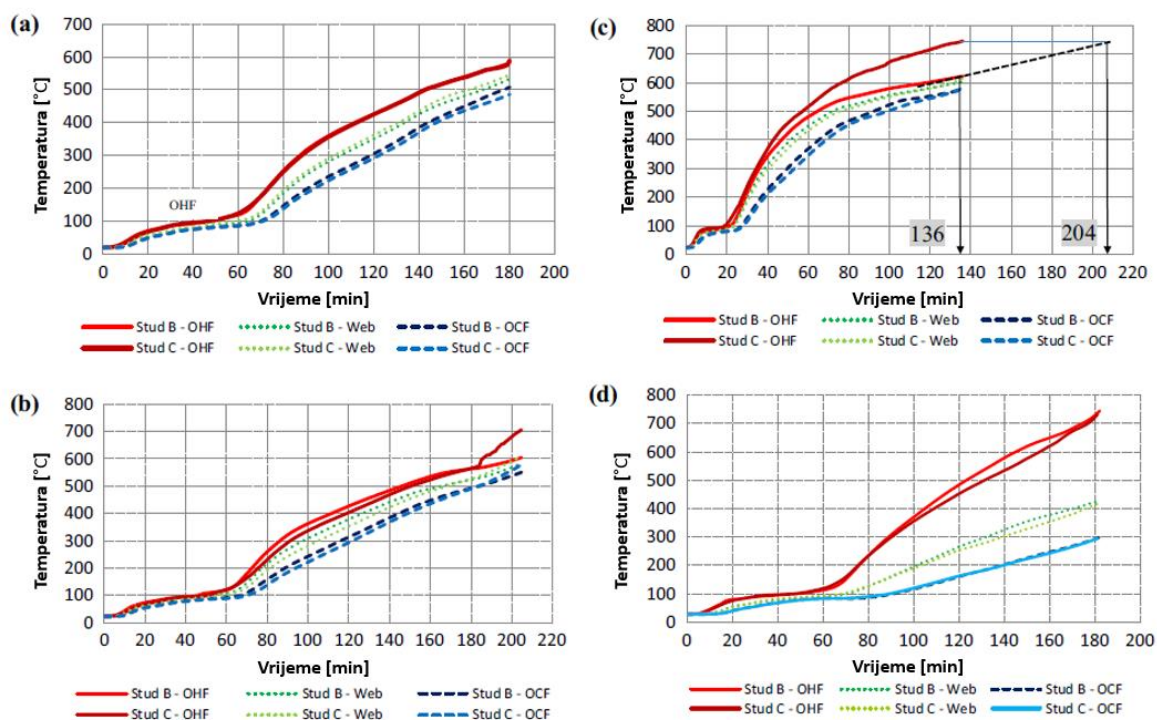


Slika 24.: Spojevi GK ploča na profilima A i C: (a) postupak brtvljenja spojeva; (b) hladno oblikovani čelični okvir; (c) unutarnji sloj GK ploče na požarnoj strani. (Izvor: [4])

Tablica 3.: Rezultati požarnih ispitivanja Kesawana i Mahendrana (Izvor: [4])

Test	Konstrukcija zida	Opterećenje [kN]/omjer opterećenja	Izolacija	REI [min] (nosivost/izolacija/cjelovitost)	Slom [°C]
1		83/0,4	-	180/-/-	582
2		41,5/0,2	-	205/-/-	706
3		41,5/0,2	-	136/98/-	745
4		41,5/0,2	50mm kamene vune	182/-/-	739
5		125/0,6	-	138/-/-	525
6		15,8/0,2	-	165/-/-	580

Dobiveni odnosi temperatura vanjske tople pojasnice (OHF), hrpta i vanjske hladne pojasnice (OCF) profila B i C u neizoliranim LSF zidovima obloženih dvostrukim GK pločama prikazani su na **Slika 25a** i **Slika 25b**. Kao što se može uočiti na **Slika 25a**, temperature OHF profila B i C na Testu 1 su približno jednake, ali u Testu 2 se poklapaju samo do 185. minute. Oba testa su izvedena s istim konfiguracijama panela, ali s različitim opterećenjem (**Tablica 3**). Prilikom Testa 1 vanjski sloj GK ploče nije otkazao, dok je isti prilikom Testa 2 otkazao. Otkazivanje vanjskog sloja rezultiralo je direktnom izlaganju spoja unutarnjeg sloja GK ploče požaru na Profilu C, uzrokujući time naglo povećanje temperature tople pojasnice Profila C. Međutim, na hrptu i vanjskoj hladnoj pojasnici nije zabilježena promjena temperature jer je OHF apsorbirala toplinu te ju raspodijelila zračenjem unutar šupljina. Navedeno lokalizirano povećanje temperature uzrokovalo je dodatne temperaturne razlike između toplih i hladnih pojasnica, što je dovelo do većih toplinskih deformacija profila. Zbog većih deformacija smanjen je mehanički integritet čeličnog profila te je ispitivanje rezultiralo otkazom vertikalnog spoja čeličnog profila i GK ploče. (**Slika 24c**). [4]



Slika 25.: Krivulje temperatura-vrijeme profila B i C: (a) Test 1; (b) Test 2; (c) Test 3; (d) Test

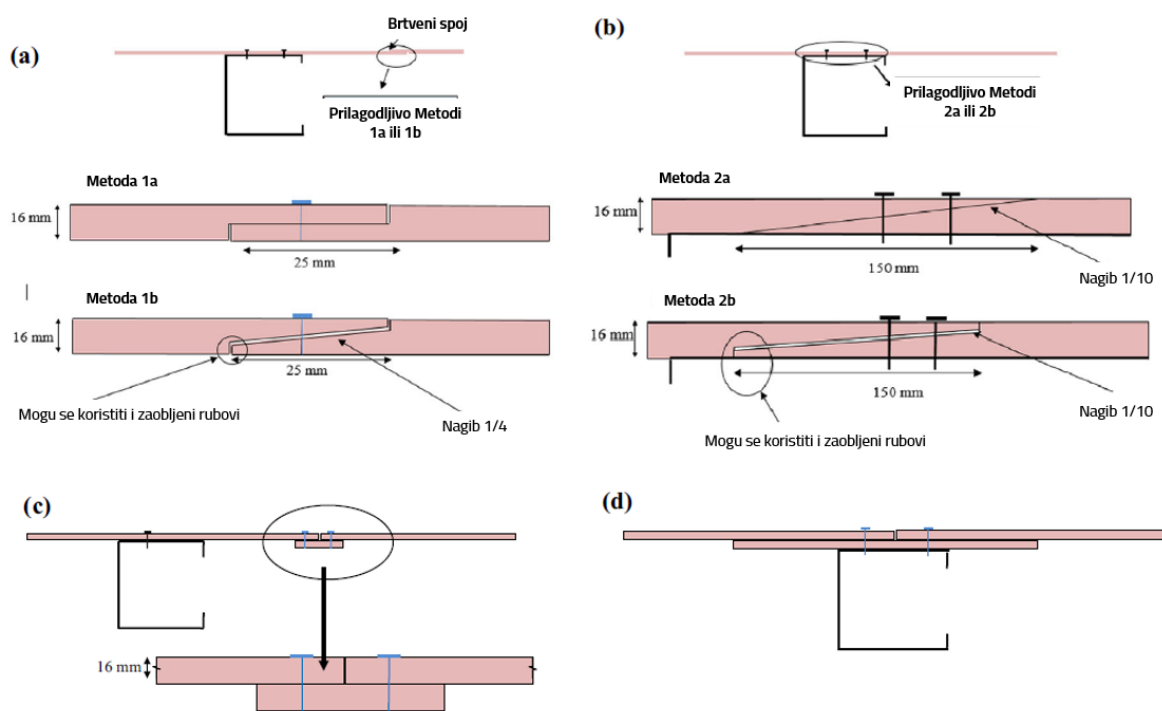
4. (Izvor: [4])

Tijekom Testa 3 s neizoliranim LSF zidovima obloženim jednim slojem GK ploča, vertikalni spojevi GK ploča direktno su izloženi požaru od samog početka ispitivanja. Nakon što je postignuta određena temperatura, spojevi su oslabili, što je dovelo do povećanja temperature OHF profila iza njih. Utjecaj spojeva je teško precizno odrediti jer ovisi o načinu izrade. Temperature hrpta i OCF profila B i C su gotovo jednake jer se dodatna toplina, koju je apsorbirala OHF, raspršila u šupljinama. Na Slika 25c vidi se da je temperatura OHF profila C u trenutku otkaza oko 745 °C, dok profilu B treba još 68 minuta da postigne istu temperaturu. Zaključuje se da spojevi GK ploča značajno smanjuju nosivost (R) LSF zidova te bi se, u slučaju da spojevi nisu prisutni uzduž profila, nosivost (R) u Testu 3 povećala sa 68 na 204 minute. [4]

Razvijene temperature prilikom Testa 4 vidljive su na Slika 25d. Prilikom testa, nije došlo do promjena unutar profila, tj. spoj GK ploče nije imao utjecaj. Izolacija od kamene vune spriječila je prolaz topline kroz šupljine što je rezultiralo višim temperaturama površine GK ploče izložene požaru (FS, Pb1-Pb2 i Pb2-šupljina) i OHF. Utjecaj izolacije unutar šupljina je veći pri porastu temperature profila B i C, dok je utjecaj spoja zanemariv u LSF zidu s obloženim dvostrukom GK pločama s izoliranom šupljinom (Test 4). Međutim, utjecaj spoja

GK ploča na temperature profila je nepoznat za LSF zidove s jednim slojem gipsanih ploča i ispunjenom šupljinom. [4]

Nastavno na ranije opisano provedeno istraživanje, Keerthan i Mahendran [39] su razvili FEA (eng. *Finite Element Analysis*) modele za predviđanje krivulja rasta temperature u ovisnosti o vremenu profila LSF zidova bez spojeva GK ploča, jer sam utjecaj spoja nisu mogli uključiti. Eliminacija utjecaja vertikalnih spojeva dovodi do poboljšanih izvedbi LSF zidova. Unutar istraživanja predložili su 4 rješenja za eliminaciju utjecaja spojeva koja su prikazana na **Slika 26**. U Metodi 1, spojevi nisu na profilima, a u Metodi 2, iako je spoj na profilu, izrađen je tako da spoj nema utjecaj na promjenu temperature profila. Metode 3 i 4 mogu se prilagoditi kako bi se smanjio učinak spojeva na profile, posebice Metoda 4 jer ne zahtijeva velike napore i mogla bi značajno povećati REI LSF zidova. Primjenom ovih metoda moglo bi doći do razvoja poboljšanih požarno otpornih LSF zidova uz minimalne troškove proizvodnje. Međutim, i dalje su potrebna dodatna istraživanja toplinskih svojstava LSF konstrukcija kako bi se kvantificiralo poboljšanje otpornosti na požar. [4]



Slika 26.: Poboljšane metode spajanja gipsanih ploča: (a) Metoda 1; (b) Metoda 2; (c) Metoda 3; (d) Metoda 4. (Izvor: [4])

6.2.3. Utjecaj vrste toplinske izolacije

Izolacija se primarno koristi kao zaštitni materijal za poboljšanje toplinskih svojstava LSF zidova kao što je obrađeno u poglavlju 4.3. Međutim, postavlja se pitanje njenog utjecaja na svojstvo požarne otpornosti LSF zidova. Iako se većina istraživanja provodi na požarnoj otpornosti LSF zidova s negorivom izolacijom, poput MW, profesori s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u sklopu projekta „KLIK PANEL“ [45] proveli su istraživanje s gorivom izolacijom. Istraživanje je provedeno na LSF konstrukciji s oblogom od gips-vlaknastih ploča te gorivom izolacijom od PUR pjene. Iako je korištena zapaljiva izolacija, dobiveni rezultati su obećavajući za primjenu u LSF konstrukcijama gdje je potrebna požarna otpornost u trajanju više od 60minuta. [45]

Osim Fenga i sur. [37], drugi znanstvenici [41] [43] [46] su u svojim istraživanjima došli do zaključka da ugradnja toplinske izolacije u šupljine nosivih LSF zidova smanjuje njegovu požarnu otpornost. [4]

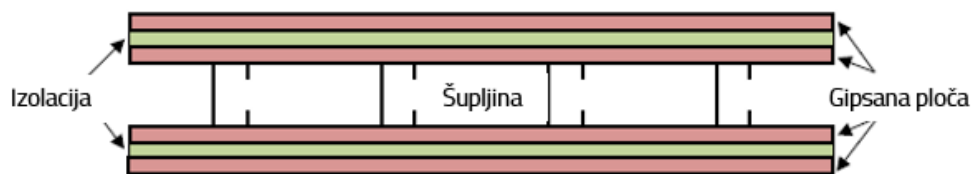
U LSF zidovima s toplinski izoliranom šupljinom, temperatura OHF naglo raste dok je povećanje temperature hladne pojasnice usporeno jer izolacija djeluje kao toplinska barijera što rezultira povećanjem temperaturne razlike između njih. Povećanje temperaturnih razlika dovodi do većih toplinskih deformacija, koje posljedično uzrokuju veće savijanje u nosivim LSF zidovima. [4]

Na **Tablica 3** prikazani su rezultati ispitivanja požarne otpornosti LSF zidova izrađenih od HFC profila sa izolacijom unutar šupljina. Iz navedene tablice uočljivo je da je REI LSF zida s izolacijom unutar šupljina (Test 4) niži/lošiji za 23 minute od neizoliranog LSF zida (Test 2). Također, važno je napomenuti da tip izolacije utječu na konačnu otpornost na požar LSF zidova. Gunalan i sur. [41] su unutar svog istraživanja obradili tri tipa izolacije (kamena vuna, staklena vuna, celulozna vlakna) te utvrdili da izolacija od kamene vune daje najviši razred otpornosti na požar za LSF zidove s vanjskom izolacijom. Također, točna svojstva izolacijskih materijala pri povišenim temperaturama, poput toplinske provodljivosti, specifične topline i gustoće utječu na njegovu požarnu otpornost. [4]

6.2.4. Nove konfiguracije LSF zidova za poboljšanu otpornost na požar

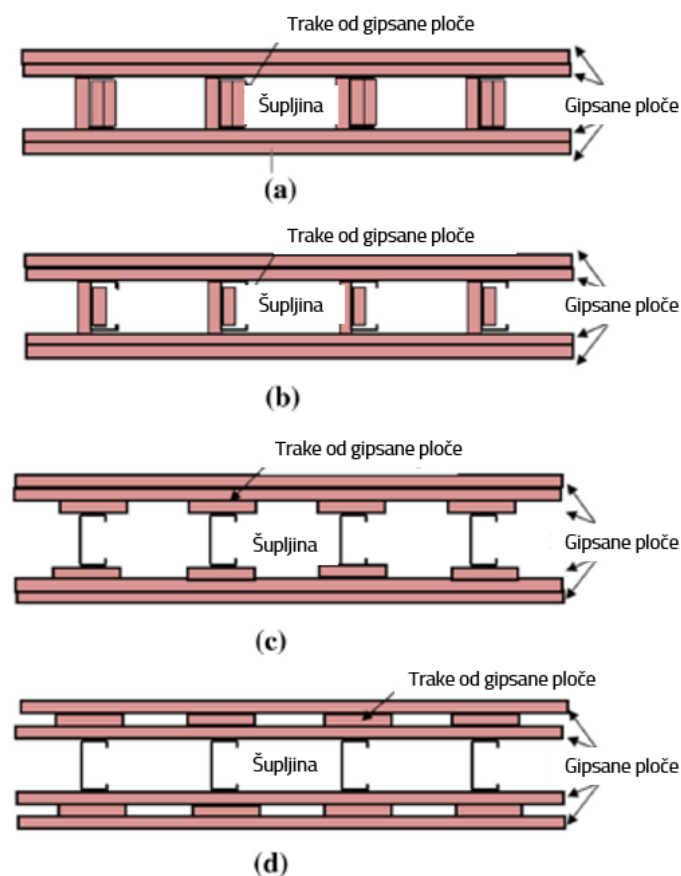
Konfiguracija zidova u LSF sustavima može imati značajan utjecaj na njihov razvoj temperature tijekom požara. Dok neizolirani LSF zidovi pokazuju izvrsnu otpornost na požar, još uvijek se traže rješenja za poboljšanje otpornosti na požar zidova s izolacijom u šupljini. [4]

Kolarkar i Mahendran [47] predlažu vanjski izolacijski sustav LSF zidova gdje se sloj izolacije nalazi između dva sloja gipsanih ploča (Slika 27). Eksperimentalna istraživanja [41] LSF zidova s vanjskom izolacijom pokazala su da ti zidovi imaju 30% duže trajanje otpornosti na požar u odnosu na zidove s izolacijom u šupljini. Navedeni sustav nije prihvaćen zbog zahtjevnosti ugradnje i povećanog poprečnog presjeka elementa. [4]



Slika 27.: Kompozitni zidni panel (Kolarkar i Mahendran) (Izvor: [4])

Istraživanja [4] predlažu četiri nove konfiguracije LSF zidova s izolacijom u šupljini (Slika 28).



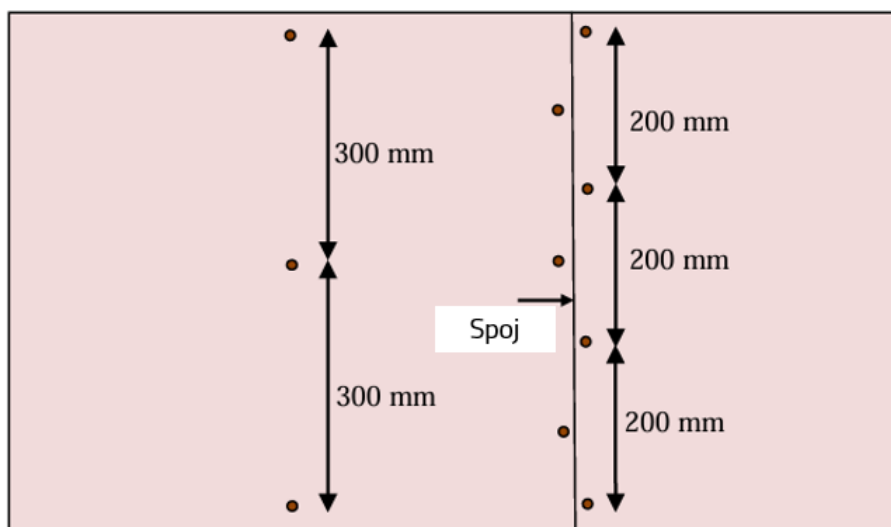
Slika 28.: Nove predložene konfiguracije LSF zidova za povećanje otpornosti na požar

(Izvor: [4])

U prvoj konfiguraciji između pojasnica U-profila postavljene su gipsane ploče u dva sloja, a u drugoj verziji se koriste LCS profili. Dodatni slojevi gipsanih ploča djeluju kao toplinski spremnici, koji apsorbiraju toplinu te smanjuju temperature unutarnjih i vanjskih pojasnica. U trećoj i četvrtoj verziji postojećim gipsanim pločama dodani su dodatni tanki slojevi gipsane ploče s obje strane. Dodatne ploče usporavaju zagrijavanje čeličnih profila te eliminiraju probleme na spojevima. Navedene metode se mogu primijeniti i na zidove s izolacijom šupljine, ali ih još treba potvrditi eksperimentalnim istraživanjem. [4]

6.2.5. Utjecaj vijčanih spojeva

Za pričvršćivanje gipsanih ploča za čelični okvir koriste se vijci s glatkom glavom. Razmak između vijaka općenito iznosi 300 mm, ali kod spojeva gipsanih ploča vijci su međusobno razmaknuti 200 mm u cik-cak uzorku (**Slika 29**). [43] Prijenos topline kroz vijke je zanemariv te vijci do određene mjere sprječavaju otkazivanje gipsanih ploča. Gipsane ploče smanjuju bočno pomicanje čeličnih profila, čime se sprječava bočno-torzijsko izvijanje. Vijci su izloženi posmičnim silama, što može dovesti do pucanja gipsanih ploča i ubrzati njihovo otkazivanje. Korištenjem većih vijaka povećava se kontaktna površina između vijaka i ploča, čime se posljedično usporava otkazivanje ploča. Požarna otpornost LSF zidova može se poboljšati ako pri povezivanju gipsanih ploča za čelične okvire vijak prolazi kroz obje pojasnice HFC profila (Pogreška! Izvor reference nije pronađen. **Slika 2a** čime se ujedno poboljšava i povezanost cijele konstrukcije. [4]



Slika 29.: Spojevi gipsanih ploča (Izvor: [43])

7. ZAKLJUČAK

Lagani čelični okvirni (eng. *Light Steel Frame* - LSF) sustavi predstavljaju inovativan oblik gradnje, koji se temelji na upotrebi predgotovljenih elemenata sastavljenih od hladno valjanih čeličnih profila, obložnih ploča i izolacijskih materijala kako bi se postigla visoka mehanička čvrstoća uz malu težinu konstrukcije.

Prednosti LSF konstrukcija uključuju brzu montažu, mogućnost reciklaže materijala, ekonomičnost i smanjeni utjecaj na okoliš, dok su glavni nedostaci pojava toplinskih mostova i niska toplinska masa, što može imati znatan utjecaj na energetske učinkovitost zgrada.

Cilj ovog rada bio je, temeljem analize dostupne znanstvene i stručne literature, detaljno opisati LSF sustave s posebnim naglaskom na toplinska i požarna svojstva.

Toplinska svojstva ovise o:

- izboru izolacijskih materijala; materijali s nižom toplinskom vodljivošću i većom debljinom bolje sprječavaju prolazak topline što rezultira povećanjem energetske učinkovitosti
- poziciji izolacijskih materijala unutar ili izvan zida; ako se izolacija nalazi izvan čeličnog okvira postiže se bolja toplinska otpornost jer se na taj način smanjuje utjecaj toplinskih mostova koji nastaju u čeličnim profilima
- minimalizaciji toplinskih mostova uz pomoć različitih tehnika; korištenjem toplinskih prekida (poput poliamidnih traka) između čeličnih profila i obloga ili ugradnjom vanjske kontinuirane izolacije (ETICS-a), smanjuje se direktni prijenos topline kroz čelik što rezultira poboljšanjem toplinskih karakteristika te smanjenjem energetske gubitaka.

Požarna svojstva ovise o:

- odabiru materijala za oblaganje, poput gipsanih ploča koje su nezapaljive te pružaju pasivnu zaštitu jer usporavaju širenje požara, čime se povećava vrijeme zaštite od požara
- kvaliteti izvedbe spojeva; kvalitetno izvedeni spojevi između različitih komponenti LSF zida ključni su za sprječavanje prodora vatre i dima te produžuju vrijeme otpornosti na požar

-
- konfiguraciji komponenti LSF zida; pravilno pozicioniranje i kombinacija materijala unutar zida (poput slojeva obloge i izolacije) može usporiti prijenos topline i povećati otpornost na požar.

Zaključno, s porastom primjene LSF konstrukcija u građevinskoj industriji povećavaju se i zahtjevi energetske učinkovitosti, što čini odabir odgovarajućih materijala ključnim aspektom u procesu projektiranja LSF konstrukcije. Uz pažljiv odabir materijala za oblaganje i izolaciju, ključno je posvetiti pažnju konfiguraciji i izvedbi LSF zidova kako bi se učinkovito smanjili energetske gubici i poboljšala otpornost na požar.

U budućnosti, s daljnjim tehnološkim napretkom i razvojem novih materijala, LSF konstrukcije imaju potencijal postati još učinkovitije i održivije rješenje u gradnji, pružajući optimalnu kombinaciju mehaničke čvrstoće, energetske učinkovitosti i otpornosti na požar.

POPIS LITERATURE

- [1] M. Smrekar, »Tehnologija gradnje kao faktor isplativosti montažne gradnje,« 2024.
- [2] E. Roque, R. Oliveira, R. Almeida, R. Vicente i A. Figueiredo, »Lightweight and prefabricated construction as a path to energy efficient buildings: Thermal design and execution challenges,« *International Journal of Environment and Sustainable Development*, Siječanj 2020.
- [3] E. Yandzio, R. Lawson i A. Way, *Light steel framing in residential constructions*, Ascot: The Steel Construction Institute, 2015.
- [4] S. Kesawan i M. Mahendran, »A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls,« *Fire Technology*, pp. 3-35, 2018.
- [5] C. Martins, P. Santos i L. Simões da Silva, »Lightweight Steel Framed Construction System,« 2013.
- [6] E. Roque i P. Santos, »The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position,« *Buildings*, 16 Veljača 2017.
- [7] N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J. Costa i L. Simões da Silva, »Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [8] *CEN EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [9] *CEN EN 10162:2003; Cold rolled steel sections - Technical delivery conditions - Dimensional and cross-sectional tolerances*, Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
- [10] P. Santos, »Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings,« *Energy Efficient Buildings*, 2017.

- [11] *CEN EN10326:2004; Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels - Technacl delivery conditions*, Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [12] »Barircade building products - A Complete Breakdown of Exterior Wall Sheathing Options,« 4 Lipanj 2018. [Mrežno]. Available: <https://barricadebp.com/news/exterior-wall-sheathing>. [Pokušaj pristupa 9 Lipanj 2024].
- [13] V. Rajčić i A. Bjelanović, *Drvene konstrukcije prema europskim normama*, Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada: Građevinski fakultet Sveučilišta, 2005.
- [14] *CEN EN 520:2004+A1:2009; Gypsum Plasterboards. Definitions, Requirements and Test Methods*, Brussels: European Committee for Standardization, 2009.
- [15] M. Mataković, »Utjecaj gips-vlaknastih ploča na ponašanje laganih kompozitnih panela u požarnim uvjetima,« 2023.
- [16] M. Jelčić Rukavina, D. Skejić, A. Kralj, T. Ščapec i B. Milovanović, »Development of Lightweight Steel Framed Construction Systems for Nearly-Zero Energy Buildings,« *Buildings*, 2022.
- [17] »emajstor,« [Mrežno]. Available: https://www.emajstor.hr/clanak/83/Gips-vlaknaste_ili_gipsano-kartonske_ploce. [Pokušaj pristupa 12 rujan 2024].
- [18] G. Agossou i S. Amziane, »Experimental Investigation on the Strengthening of Gypsum Board by Flax Fibres,« *Bio-Based Building Materials*, 14 Lipanj 2023.
- [19] A. Younesian, M. Nili i A. Azarioon, »Feasibility study on production of fibre cement board using mortar reinforced by fibreglass net and polypropylene fibres,« u *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, London, 2019.
- [20] N. Balboul, M. Jaber i A. F. Mamouri, »Mechanical and physical properties of natural fibercement board for building partitions,« *Physical Sciences Research Internatio*, pp. 49-53, Rujan 2014.
- [21] *CEN EN ISO 6946:2007; Building Components and Building Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Calculation Method*, Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [22] *CEN EN 13163: 2013+A2:2016; Factory Made Expanded Polystyrene (EPS) Products. Specification*, Brussels: European Committee for Standardization, 2012.

- [23] *CEN EN 13164: 2013+A1:2015; Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Extruded Polystyrene Foam (XPS) Products. Specification.*, Brussels: European Committee for Standardization, 2012.
- [24] *CEN EN 13162:2013+A1:2015; Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Mineral Wool (MW) Products. Specification.*, Brussels: European Committee for Standardization, 2015.
- [25] P. Hoes, M. Trcka, J. Hensen i B. Bonnemma, »Investigating the potential of a novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage,« *Energy Conversion and Management*, pp. 2442-2447, 6 Lipanj 2011.
- [26] P. Santos, L. Simões da Silva i V. Ungureanu, »Energy Efficiency of Light-weight Steel-framed Buildings,« u *European convention for Constructional Steelwork*, 2012.
- [27] »VENTURWELL,« [Mrežno]. Available: <https://sustainabilityworkshop.venturewell.org/buildings/trombe-wall-and-attached-sunspace.html>. [Pokušaj pristupa 9 rujan 2024].
- [28] »DuPont Energain - Thermal mass solution for drywalls,« Prosinac 2010. [Mrežno]. Available: www.dupont.com.
- [29] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar i P. Santos, »Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency,« *Energy and Buildings*, pp. 82-103, Travanj 2013.
- [30] S. W. Sharshir, J. Abanob, M. Elsharkawy, M. A. Hamada, A. Kandeal, M. R. Elkadeem, A. Kumar Thakur, M. Yanbao, E. M. Moustapha, R. Maher i A. Müslüm, »Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development,« *Energy and Buildings*, 15 Travanj 2023.
- [31] B. Androić, D. Dujmović i I. Džeba, *Metalne konstrukcije 1*, Zagreb: IGH Zagreb, 1994.
- [32] *CEN EN 1991-1-2 (2002): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2:General actions - Actions on structures exposed to fire*, 2002: European Committee for Standardization, Brussels.
- [33] M. Jelčić Rukavina, *Zaštita od požara*, Zagreb, 2022.
- [34] G. Thomas, »Modelling thermal performance of gypsum plasterboard-lined light timber frame walls using SAFIR and TASEF,« *Fire and Materials*, pp. 385-406, Prosinac 2010.

- [35] P. Keerthan i M. Mahendran, »Numerical modelling of non-load-bearing light gauge cold-formed steel frame walls under fire conditions,« *Journal of Fire Sciences*, pp. 375-403, Kolovoz 2012.
- [36] M. A. Sultan, F. Alfawakhiri i N. Benichou, »A Model for predicting heat transfer through insulated steel-stud wall assemblies exposed to fire,« *National Research Council Canada*, Siječanj 2001.
- [37] M. Feng, Y. C. Wang i J. M. Davies, »Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire,« *Fire Safety Journal*, pp. 365-394, Lipanj 2003.
- [38] G. Thomas, »Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures,« *Fire and Materials*, Lipanj 2002.
- [39] P. Keerthan i M. Mahendran, »Thermal performance of load-bearing cold-formed steel walls under fire conditions using numerical studies,« *Journal of Structural Fire Engineering*, pp. 261-290, Rujan 2014.
- [40] P. Keerthan i M. Mahendran, »Numerical studies of gypsum plasterboards under fire conditions,« *Fire Safety Journal*, p. 105-119, 2012.
- [41] S. Gunalan, P. Kolarkar i M. Mahendran, »Experimental study of load bearing cold-formed steel wall systems under fire conditions,« *Thin-Walled Structures*, pp. 72-92, Travanj 2013.
- [42] A. Buchanan i J. Gerlich, »Fire performance of gypsum plasterboard,« u *Proceedings of the IPENZ annual conference, Wellington Institution of Professional Engineers*, Novi Zeland, 1997.
- [43] S. Kesawan i M. Mahendran, »Fire tests of load-bearing LSF walls made of hollow flange channel sections,« *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 191-205, Prosinac 2015.
- [44] K. G. P. Ltd, »Product Data Sheet BASECOTE™ 45, 60, 90,« Australian Gypsum Industries, Victoria, 2024.
- [45] M. Jelčić Rukavina, D. Skejić, B. Milovanović i T. Ščapec, »Fire Tests of Load-Bearing, Light-Steel-Framed Wall Systems Insulated with Polyurethane Foam,« *Applied Sciences*, 11 Siječanj 2024.
- [46] V. Kodur i M. Sultan, »Factors Influencing Fire Resistance of Load-bearing Steel Stud Walls,« *Fire Technology*, pp. 5-26, 2006.

- [47] P. N. Kolarkar i M. Mahendran, »Thermal performance of plasterboard lined steel stud wall formed steel structures,« u *19th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, 2008.

POPIS SLIKA

Slika 1.: Konstruktivne metode LSF-a: (a) "stick-build"; (b) panelne; (c) modularne (Izvor: [3])	4
Slika 2.: Osnovni elementi LSF zida (Izvor: [4])	5
Slika 3.: Klasifikacija LSF konstrukcija, ovisno o položaju toplinske izolacije: (a) hladna okvirna konstrukcija; (b) topla okvirna konstrukcija, (c) hibridna konstrukcija (Materijali: 1-gips ploča; 2-OSB; 3-kamena vuna; 4-zračni prostor; 5-ETICS; 6-LSF; 7-EPS) (Izvor: [6])	6
Slika 4.: Tipični oblici presjeka za hladno oblikovane elemente: (a) pojedinačni otvoreni presjeci; (b) sastavljeni otvoreni presjeci; (c) zatvoreni sastavljeni presjeci (Izvor: [2])	9
Slika 5.: OSB ploče različitih dimenzija i njihova aplikacija (Izvor: [2])	11
Slika 6.: Gipsana ploča tip H i njena aplikacija (Izvor: [2])	12
Slika 7.: Usporedba specifičnog toplinskog kapaciteta različitih vrsta ploča (Izvor: [16])	15
Slika 8.: Gips-vlaknasta ploča (Izvor: [17])	16
Slika 9.: Raspodjela temperatura unutar LSF fasadnih zidova: (a) hladna okvirna konstrukcija ($U = 0.5316 \text{ W/m}^2\text{K}$); (b) topla okvirna konstrukcija ($U = 0.2951 \text{ W/m}^2\text{K}$); (c) hibridna konstrukcija ($U = 0.3581 \text{ W/m}^2\text{K}$) (Izvor: [6])	17
Slika 10.: ETICS (Izvor: [2])	19
Slika 11.: Oblici kamene vune i njihova aplikacija (Izvor: [2])	21
Slika 12.: Strategije ublažavanja toplinskih mostova u LSF konstrukcijskim elementima. (a) Trake za prekid toplinskog mosta; (b) Čelični profil s utorima (Izvor: [10])	24
Slika 13.: Strategije ublažavanja toplinskih mostova u LSF konstrukcijskim elementima: Utori na pojasnici profila; (a) 0,635cm; (b) 1,27cm (Izvor: [10])	25
Slika 14.: Usporedba toplinske učinkovitosti nakon primjene strategija za ublažavanje toplinskih mostova sa Slika 13 (Izvor: [10])	26
Slika 15.: Strategije za povećanje toplinske inercije u LSF konstrukcijama. (a) Vanjska toplinska izolacija; (b) Uporaba masivnih građevinskih materijala (Izvor: [10])	28
Slika 16.: Trombeov zid (Izvor: [27])	29
Slika 17.: Korištenje velike toplinske mase tla . prikaz mjesečnih vanjskih temperatura zraka i tla U Coimbri, Portugal (Izvor: [10])	29
Slika 18.: Upotreba PCM-a (Izvor: [10])	30
Slika 19.: PCM zid (Izvor: [30])	30
Slika 20.: Toplinska svojstva GK ploča na povišenim temperaturama. (a) specifična toplina; (b) relativna gustoća; (c) toplinska provodljivost (Izvor: [4])	34

Slika 21.: Konfiguracije LSF zidova: (a) neizolirani LSF zidovi s dvostrukim slojem GK ploča; (b) neizolirani LSF zidovi s jednim slojem GK ploča; (c) izolirani LSF zidovi s dvostrukim slojem gipsanih ploča (Izvor: [4])	36
Slika 22.: Lokacije termočlanaka (Izvor: [4]).....	36
Slika 23.: Krivulje <i>temperatura-vrijeme</i> kod LSF zidova s dvostrukim slojem GK ploča, izrađenih od LSB profila, pod opterećenjem s omjerom 0,2 (oznake sa Slika 21 i Slika 22). (a) neizolirani LSF zidovi; (b) LSF zidovi s izolacijom u šupljini (Izvor: [4]).....	37
Slika 24.: Spojevi GK ploča na profilima A i C: (a) postupak brtvljenja spojeva; (b) hladno oblikovani čelični okvir; (c) unutarnji sloj GK ploče na požarnoj strani. (Izvor: [4])	39
Slika 25.: Krivulje <i>temperatura-vrijeme</i> profila B i C: (a) Test 1; (b) Test 2; (c) Test 3; (d) Test 4. (Izvor: [4])	41
Slika 26.: Poboljšane metode spajanja gipsanih ploča: (a) Metoda 1; (b) Metoda 2; (c) Metoda 3; (d) Metoda 4. (Izvor: [4]).....	42
Slika 27.: Kompozitni zidni panel (Kolarkar i Mahendran) (Izvor: [4])	44
Slika 28.: Nove predložene konfiguracije LSF zidova za povećanje otpornosti na požar (Izvor: [4]).....	44
Slika 29.: Spojevi gipsanih ploča (Izvor: [43]).....	45

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Klasifikacija gipsanih ploča (Izvor: [15])	13
Tablica 2.: Toplinska i fizikalna svojstva različitih izolacijskih materijala (Izvor: [16])	20
Tablica 3.: Rezultati požarnih ispitivanja Kesawana i Mahendrana (Izvor: [4])	40