



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

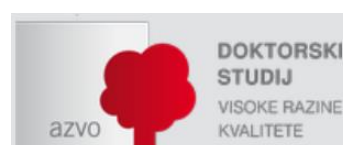
KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

**Primjena geopolimernih obloga na bazi građevnog otpada u
zaštiti metalnih konstrukcija izloženih požaru**

Dalibor Kramarić

Split, lipanj 2025.

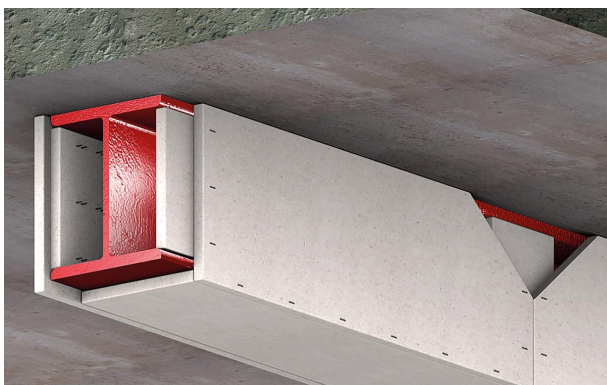
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
Sveučilište u Splitu
Matice hrvatske 15, 21000 Split



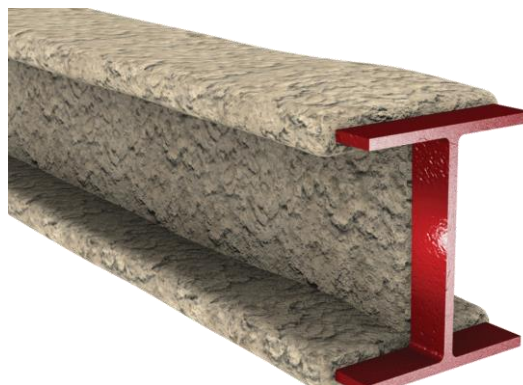
1. Požarna otpornost metalnih konstrukcija – metode i norme

Požar je slučajni izvanredni događaj nekontroliranog gorenja koji uzrokuje materijalnu štetu te može ugroziti ljudske živote. S inženjerskog stajališta, požar promatramo kao izvanredno djelovanje na nosivu konstrukciju koje može ugroziti njenu nosivost i stabilnost. Prilikom projektiranja nosivih konstrukcija potrebno je dokazati otpornost konstrukcije u slučaju požara u određenom vremenskom trajanju, a koja će omogućiti evakuaciju ljudi, intervenciju vatrogasaca i spriječiti širenje požara na druge građevine. Prema važećim propisima u Republici Hrvatskoj otpornost na požar je definirana kao sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara (*Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara*). Projektiranju čeličnih konstrukcija na djelovanje požara pristupa se integriranjem toplinskih i mehaničkih modela koji uzimaju u obzir svojstva materijala, geometriju elemenata konstrukcije te uvjete izgaranja, a najčešće se odabire jedan od sljedećih pristupa:

1. **Pasivna zaštita** – najčešći oblik zaštite kod kojeg se čelični elementi konstrukcije štite protupožarnim oblogama (*slika 1*) od gips-kartona, cementnih ploča, vermikulita i sličnog ili pak nanošenjem omotača od betona ili žbuke određene debljine (*slika 2*). Pasivna zaštita se osigurava i protupožarnim premazima male debljine koji se šire (bubre) pod utjecajem topline i stvaraju izolacijski sloj.
2. **Aktivna zaštita** – osigurava se sustavima za prskanje vodom (sprinkleri) ili pjenom. Više se koriste za kontrolu požara u određenom prostoru nego za direktnu zaštitu čelične konstrukcije.
3. **Dimenzioniranje bez dodatne zaštite** – kod manjih požarnih opterećenja, ukoliko je moguće, konstrukcija se može proračunati da izdrži određeno vrijeme požara bez dodatne zaštite.



*Slika 1. Pasivna zaštita protupožarnim pločama
(Sustavi zaštite čeličnih konstrukcija – Kako odabrati?)*



*Slika 2. Pasivna zaštita omotačem od protupožarne
žbuke (Sustavi zaštite čeličnih konstrukcija – Kako
odabrati?)*

Norma [HRN EN 1991-1-2](#) obuhvaća djelovanja na konstrukcije izložene požaru. Navedena norma nam propisuje osnovne korake za proračun protupožarne zaštite konstrukcija koji čine temelj inženjerskog požarnog proračuna konstrukcija:

1. Odabir relevantnog scenarija požara – određivanje realnog požarnog scenarija koji bi mogao nastati u određenom objektu za projektiranog vijeka građevine
2. Određivanje odgovarajućeg projektantskog požara – odabir krivulje povećanja temperature s vremenom, trajanje požara, izloženost konstrukcijskih elemenata
3. Toplinski proračun – analiza zagrijavanja zaštićenih ili nezaštićenih konstruktivnih elemenata
4. Strukturni proračun – proračun elemenata pri povišenim temperaturama za traženo vrijeme otpornosti

Vezano za odabir relevantnog scenarija požara u normi su definirani mogući požarni scenariji kao tri osnovne krivulje porasta temperature zraka kroz vrijeme (Slika 3).

Standardna krivulja:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

θ_g – temperatura zraka u požarnom odjeljku

t – vrijeme

Krivulja vanjskog požara:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

θ_g – temperatura zraka uz element

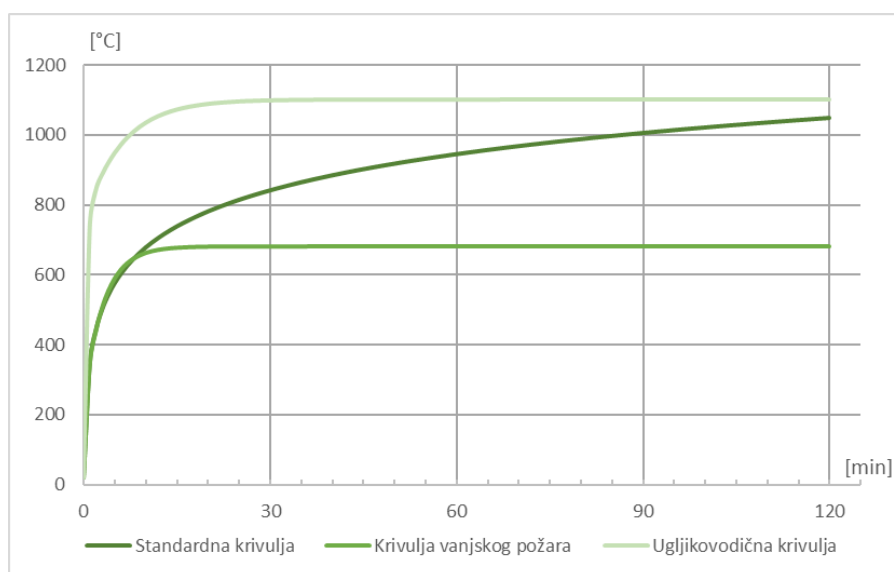
t – vrijeme

Ugljikovodična krivulja:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

θ_g – temperatura zraka u požarnom odjeljku

t – vrijeme



Slika 3. Prikaz međusobnog odnosa triju osnovnih krivulja porasta temperature zraka ([HRN EN 1991-1-2](#))

Nastavljajući se na normu *HRN EN 1991-1-2* koja daje smjernice za proračun djelovanja na sve konstrukcije izložene požaru, norma *HRN EN 1993-1-2* obuhvaća proračun čeličnih konstrukcija uključujući proračun čeličnih konstrukcija izloženih povišenim temperaturama. U navedenoj normi je dana tablica 1. sa faktorima redukcije karakteristika čelika sa povećanjem temperature čeličnog elementa. Iz navedene tablice možemo vidjeti da do opadanja svojstava čelika dolazi već pri prekoračenju temperature od 400 °C te da su svojstva čelika pri temperaturi od 500°C već drastično opala.

Tablica 1. Faktori redukcije za odnos naprezanje-deformacija čelika na povišenim temperaturama

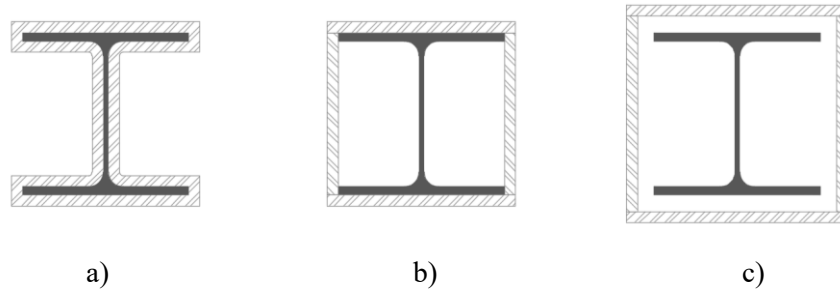
Temperatura čelika θ_a	Faktor redukcije za granicu popuštanja $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Faktor redukcije za granicu proporcionalnosti $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Faktor redukcije za modul elastičnosti $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,00	1,0000	1,0000
100°C	1,00	1,0000	1,0000
200°C	1,00	0,8070	0,9000
300°C	1,00	0,6130	0,8000
400°C	1,00	0,4200	0,7000
500°C	0,78	0,3600	0,6000
600°C	0,47	0,1800	0,3100
700°C	0,23	0,0750	0,1300
800°C	0,11	0,0500	0,0900
900°C	0,06	0,0375	0,0675
1000°C	0,04	0,0250	0,0450
1100°C	0,02	0,0125	0,0225
1200°C	0,00	0,0000	0,0000

U istoj normi je dana tablica 2. sa prikazom kritičnih temperatura s obzirom na koeficijent iskorištenosti čeličnog konstruktivnog elementa pri temperaturi od 20 °C. Iz navedene tablice možemo vidjeti da do približno 500 °C konstruktivni element može biti iskorišten i do 80% dok već na 550 °C moguća iskoristivost pada na 60%, a na 600°C na svega 45%.

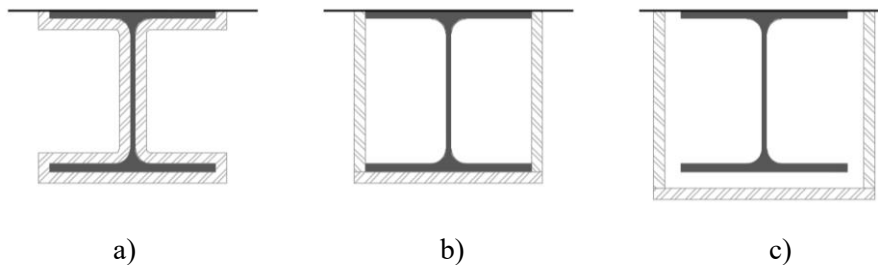
Tablica 2. Kritična temperatura s obzirom na koeficijent iskorištenosti elementa

Koeficijent iskorištenosti μ_0	Kritična temperatura $\theta_{a,cr}$	Koeficijent iskorištenosti μ_0	Kritična temperatura $\theta_{a,cr}$	Koeficijent iskorištenosti μ_0	Kritična temperatura $\theta_{a,cr}$
0,22	711°C	0,42	612°C	0,62	549°C
0,24	698°C	0,44	605°C	0,64	543°C
0,26	685°C	0,46	598°C	0,66	537°C
0,28	674°C	0,48	591°C	0,68	531°C
0,30	664°C	0,50	585°C	0,70	526°C
0,32	654°C	0,52	578°C	0,72	520°C
0,34	645°C	0,54	572°C	0,74	514°C
0,36	636°C	0,56	566°C	0,76	508°C
0,38	628°C	0,58	560°C	0,78	502°C
0,40	620°C	0,60	554°C	0,80	496°C

Norma [HRN EN1993-1-2](#) predlaže nekoliko načina zaštite čeličnih elemenata protupožarnim materijalom koji su prikazani na slici 4. i slici 5. Za proračun porasta temperature čeličnih konstruktivnih elemenata izoliranih protupožarnim materijalom s obzirom na porast temperature okolnog zraka norma nam daje formule (4) i (5).



Slika 4. Prikaz zaštite čeličnog elementa s četiri strane a) nanošenjem materijala po konturama profila b) pločama po vanjskim dimenzijama profila i c) pločama po vanjskim dimenzijama profila s odmakom



Slika 5. Prikaz zaštite čeličnog elementa s tri strane a) nanošenjem materijala po konturama profila b) pločama po vanjskim dimenzijama profila i c) pločama po vanjskim dimenzijama profila s odmakom

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \frac{A_p}{V} (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a \left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1\right) \Delta\theta_{g,t} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (5)$$

$\frac{A_p}{V}$ – faktor presjeka za izolirane čelične elemente [1]

A_p – odgovarajuća površina materijala za protupožarnu zaštitu po jedinici duljine elementa [m^2/m]

V – volumen štićenog elementa po jedinici duljine [m^3/m]

c_a – temperaturno ovisna specifična toplina čelika [J/kgK]

ρ_a – jedinična masa čelika [kg/m^3]

c_p – temperaturno neovisna specifična toplina protupožarnog materijala [J/kgK]

d_p – debljina protupožarnog materijala [m]

λ_p – toplinska vodljivost protupožarnog materijala [W/mK]

ρ_p – jedinična masa protupožarnog materijala [kg/m^3]

Δt – vremenski interval [sec]

$\theta_{a,t}$ – temperatura čelika u vremenu t [$^{\circ}\text{C}$]

$\theta_{g,t}$ – temperatura okolnog zraka u vremenu t [$^{\circ}\text{C}$]

$\Delta\theta_{g,t}$ – porast temperature okolnog zraka u vremenskom intervalu Δt [K]

2. Pregled istraživanja na temu geopolimera

Tablica 1 naglašava važnost pasivne zaštite čelične konstrukcije. Učinkovitost pasivne zaštite čelične konstrukcije ovisi o požarnoj otpornosti materijala od kojeg je takva pasivna zaštita napravljena. Kada je riječ o cementnim kompozitima, iako oni ne gore, njihova svojstva bivaju u požaru degradirana uslijed izloženosti visokim temperaturama (*Malik et al., 2021*) a u literaturi se obim degradacije cementnih kompozita najčešće izražava kroz preostala mehanička svojstva (najčešće tlačna čvrstoća). Otpornost cementnih kompozita na djelovanje visokih temperatura ovisi o njegovom sastavu i kompatibilnosti njegovih komponenata. Naime, dok se vezivo (cement) tijekom visokih temperatura skuplja, agregat se širi te zbog razlike u njihovu ponašanju nastaju pukotine na agregat-pasta kontaktnoj zoni (ITZ zoni) (*Netinger et al., 2013*). Stoga je iznimno važno odabrati vezivo i agregat koji se što sličnije ponašaju uslijed izloženosti požaru.

Kao zamjena za uobičajene cementne kompozite sve češće se u literaturi spominju kompoziti sa alkalno aktiviranim vezivima koji se znatno bolje ponašaju pri izloženosti visokim temperaturama (*Gökce, 2024*). Alkalno aktivirana veziva se dobivaju aktivacijom aluminosilikatnog materijala koji se naziva prekursor s alkalnim aktivatorom (*Provis, 2018*). Kao prekursori mogu koristiti: a) sirovine iz prirodnih resursa kao što je npr. kaolin iz kojeg se dobiva metakaolin, ali i b) otpadni materijali u vidu nusprodukata različitih industrijskih procesa kao što su leteći pepeo i troska te c) građevinski otpad kao što su produkti rušenja objekata (ciljanog ili potresom inducirano) ili pak opekarski lom (proizvodi loše kvalitete) nastao u industriji opečnih glinenih elemenata. U procesu izrade alkalno aktiviranih materijala je od naročitog interesa uporaba otpadnih materijala i građevnog otpada jer se time doprinosi očuvanju prirodnih resursa (*Kravchenko et al., 2024*), zbrinjavanju otpada (*Jamalimoghadam et al., 2024*), smanjenju utroška energije (*Sedira et al., 2018*) i smanjenju emisije CO₂ (*da Costa Gonçalves et al., 2023; Sedira et al., 2018*) pri proizvodnji cementa. Uz prekursor, za alkalno aktivirano vezivo potreban je i alkalni aktivator. Najčešći alkalni aktivatori korišteni u literaturi su NaOH, KOH, Na₂SiO₃, K₂SiO₃, Na₂CO₃, CaO, and Ca(OH)₂ i njihove kombinacije (*Li et al., 2021*). Ako prekursor sadrži velik udio CaO, tada će se pri njegovom očvršćivanju formirati tzv. C-A-S-H gel (*Tran et al., 2024; Choubi i Akgul, 2022*) a ako sadrži nizak udio CaO ali je bogato aluminosilikatima, tada će se formirati tzv. N-A-S-H gel (*Statkauskas et al., 2023; Choubi i Akgul, 2022*). Ona alkalno aktivirana veziva čiji prekursor ima visok udio aluminosilikata u svom sastavu se zovu geopolimeri (*Zaidi et al., 2020*).

Prilikom djelovanja visokih temperatura na alkalno aktivirana veziva, upravo N-A-S-H i C-A-S-H gelovi osiguravaju bolju požarnu otpornost alkalno aktiviranim vezivima u odnosu na portland cement. Naime, C-S-H i CH kao glavni produkti hidratacije portland cementa se počinju razlagati već pri 150 °C i 450 °C a na 740 °C bivaju potpuno raspadnuti (*Choubi i Akgul, 2022*) dok su N-A-S-H- i C-A-S-H gelovi stabilni do 700-800 °C (*Choubi i Akgul, 2022*). Prema literaturi, alkalno aktivirana veziva su zadržala bolja mehanička svojstva nakon požara od portland cementa do 550 °C (*Pan et al., 2014*), do 600 °C

(*Pan et al., 2018a*) ili čak do 1200 °C (*Jiang et al., 2020; Razak et al. 2022*). Prema istraživanju autora *Duan et al., 2015*, portland cement je izgubio u potpunosti čvrstoću na 600 °C dok je alkalno aktivirano vezivo zadržalo 75% svoje početne čvrstoće čak pri 1000 °C. Isti istraživači su pokazali da se alkalno aktivirana pasta znatno manje skuplja pri visokim temperaturama nego cementna pasta što je možda čini prikladnijom za kombiniranje sa agregatom u kompozitu koji se s porastom temperature širi.

Prema *Song et al., 2022*, N-A-S-H gel je čak stabilniji od C-A-S-H gela pri visokim temperaturama jer je C-A-S-H sličan cementu i ima nižu toplinsku stabilnost od N-A-S-H gela. Prekursori pri čijoj će se alkalnoj aktivaciji najvjerojatnije formirati N-A-S-H gel su metakaolin, leteći pepeli sa niskim udjelom CaO te drobljeni opečni elementi (opeka, blok opeka, crijep).

Dosadašnja istraživanja su izučavala svojstva alkalno aktiviranog veziva s ovom vrstom prekursora uglavnom na razini paste. *Gado et al., 2020*, u svom istraživanju alkalno aktiviraju drobljenu opeku njegujući je pri sobnoj temperaturi i ostvarujući tlačnu čvrstoću paste od 32 Mpa. *Cardoza i Colorado, 2023*, su istraživali mogućnost alkalne aktivacije drobljene opeke pri sobnoj temperaturi i ostvarili tlačnu čvrstoću paste čak od 33,11 MPa za tlačnu čvrstoću i 13,8 MPa za savojnu čvrstoću. *García-Díaz et al., 2024*, su alkalno aktivirali mješavinu miješanog građevinskog otpada i drobljene opeke te tako dobivene paste njegovali pri sobnoj temperaturi. Opazili su da sa povećanjem udjela drobljene opeke rastu i tlačne i vlačne čvrstoće te su one ostvarile vrijednosti od 29,7 MPa za tlačnu čvrstoću i 15,7 MPa za vlačnu čvrstoću pri omjeru miješanog građevinskog otpada i drobljene opeke od 60:40. *Statkaustas et al., 2023*, su alkalno aktivirali drobljenu opeku sa dodatkom metakaolina u različitim omjerima, uz mali udio fosforgipsa, te njegujući tako pripremljene paste na sobnoj temperaturi ostvarili najveću tlačnu čvrstoću od čak 35,1 MPa za omjer drobljene opeke i metakaolina od 70:30. *Robayo et al., 2016*, su istraživali alkalnu aktivaciju drobljene opeke pri temperaturama od 25 °C i 70 °C u trajanju od 24h i 48h te zaključili da temperatura njege od 70 °C pri 48 h rezultira najvećom tlačnom čvrstoćom (16,4 MPa). Međutim, kada su zamijenili dio drobljene opeke portland cementom, čak i pri temperaturi njege od 25 °C paste su postigle višestruko veće vrijednosti tlačnih čvrstoća. *Robayo-Salazar et al., 2017*, su izradili alkalno aktivirane paste od drobljene opeke i uz dodatak portland cementa u različitim udjelima te njegujući ih pri sobnoj temperaturi uspjeli ostvariti tlačnu čvrstoću i do 102,6 MPa za udio portland cementa od 20%. Naime, ukoliko se prekursoru u alkalno aktiviranom vezivu doda određen udio portland cementa, alkalno aktivirano vezivo je sposobno očvrnuti na sobnoj temperaturi i ostvariti pristojnu čvrstoću (*Robayo-Salazar et al., 2017*). *Zhang et al., 2021*, su alkalno aktivirali drobljenu opeku njegujući je prvo na niskoj temperaturi (50 °C) u različitim vremenskim intervalima a onda i na povišenim temperaturama (65-200 °C) u određenim vremenskim intervalima te zaključili da takav dvostupanjski temperaturni režim povoljno utječe na tlačne čvrstoće paste te da temperatura njege od 200 °C u vremenu od 24 h rezultira najvećom vrijednosti tlačne čvrstoće (40 MPa). *Ulugöl et al., 2021*, su razvijali alkalno aktivirane paste od drobljene opeke, drobljenog crijepa i drobljenog bloka te ih njegovali na temperaturama od 50-125 °C u trajanju od 1, 2 ili 3 dana te su zaključili da viša temperatura njege i duži period njege na povišenoj temperaturi nedvojbeno utječu pozitivno na tlačnu čvrstoću.

Yildirim et al., 2021, u svom istraživanju proizvode alkalijski aktivirane paste od tri tipa otpada od rušenja; drobljene opeke, drobljenog crijepa i drobljene šuplje opeke kombinirajući ih u različitim omjerima i njegujući ih pri temperaturama 95-125 °C u periodu od 1, 2 ili 3 dana te potvrđuju zaključak iznesen u *Ulugöl et al., 2021*. *Sedira et al., 2018*, su istraživali alkalnu aktivaciju drobljene opeke sa dodatkom volframa u različitim omjerima pri temperaturi njege od 60 °C u prva 24 h te pri sobnoj temperaturi u nastavku te dobili tlačnu čvrstoću paste od čak 59 MPa za omjer drobljene opeke i volframa od 50:50. *Vidak Vasić et al., 2022*, su kao prekursor koristili mješavinu drobljene opeke i gline (omjer 60:40) te proizveli alkalno aktiviranu mješavinu i iz nje izradili crijepove koje su njegovali 1 dan u vlazi, 3 dana na zraku i 2 dana na 60 °C (1. režim njege). Također, proizveli su i alkalno aktiviranu mješavinu te iz nje izradili crijepove koje su njegovali 1 dan u vlazi, 3 dana na zraku i 4 dana na 70 °C (2. režim njege) ili pak 1 dan u vlazi, 3 sata u pari, 2 dana na zraku i 4 dana na 70 °C (3. režim njege). Svim crijepovima su ispitane savojne čvrstoće a najveće vrijednosti savojnih čvrstoća ostvarili su crijevovi njegovani 3. režimom njege. Istraživanja na temu mortova drobljenom opekama kao prekursorom je znatno manje. *Reig et al., 2013*, su u istraživanju koristili drobljenu opeku kao prekursor i kvarcni pijesak kao agregat kako bi proizveli alkalno aktivirane mortove. Mortove su njegovali na 65 °C u vremenu 3 ili 7 dana te ostvarili dobre tlačne čvrstoće do npr. 50 MPa pri 7 dana njege na 65 °C. *Tuyan et al., 2018*, su izradili alkalno aktivirane mortove od drobljene opeke i kvarcnog pijeska te ih njegovali na sobnoj temperaturi a i na povišenim temperaturama (50-100 °C) u različitim periodima (1-7 dana). Očekivano, više temperature njege i dulji period njege rezultirali su višim vrijednostima tlačnih čvrstoća.

I dok je prilično jednoznačno u literaturi utvrđeno da alkalno aktivirani mortovi zadržavaju bolja mehanička svojstva nakon požara (*Ghazy et al., 2023*), o ponašanju toplinskih svojstava (koeficijent toplinske provodljivosti, specifični toplinski kapacitet) alkalno aktiviranih mortova se vrlo malo zna. Sukladno spoznajama prijavitelja, do sada je objavljeno svega nekoliko radova koji uspoređuju toplinska svojstva alkalno aktiviranog kompozita i portland cementnog kompozita (*Pan et al., 2018b; Goncalves et al., 2018*) pri sobnoj temperaturi i pri temperaturi razvijenoj u požaru te je zaključeno da se i toplinska svojstva alkalno aktiviranih veziva mijenjaju u požaru iako nije usuglašeno na koji način. Prema *Pan et al., 2018b*, portland cementni kompozit ima veći koeficijent toplinske vodljivosti nego portland cementni kompozit ali gotovo jednak specifični toplinski kapacitet kao portland cementni kompozit pri temperaturi od 20°C. Ako bi se alkalno aktivirani mortovi (tj. geopolimerni mortovi ako je prekursor u tim mortovima drobljena opeka) koristili kao pasivna zaštita čeličnih nosača u požarnim uvjetima (*Slika 1*), niži koeficijent toplinske vodljivosti alkalno aktiviranog morta mogao bi značiti sporiji prijenos temperature razvijene u požaru kroz takvu ploču do čeličnog nosača kojeg takva ploča štiti što bi moglo značiti dulji period odolijevanja tog čeličnog nosača požaru tj. požarnu otpornost građevine u dužem vremenskom periodu. Sažetak rezultata spomenutih istraživanja na temu primjene opeke kao prekursora u alkalno-aktiviranoj pasti prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Pregled istraživanja koja koriste drobljenu opeku kao prekursor u alkalno-aktiviranoj pasti

Istraživanje	Prekursor	Alkalni aktivator	Režim njege	Postignuta mehanička svojstva nakon 28 dana (MPa)
Gado i sur., 2020	Usitnjena opeka	NaOH+Na ₂ SiO ₃	Na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 32 MPa
Cardoza i Colorado, 2023	Usitnjena opeka	NaOH+Na ₂ SiO ₃	Na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 33.11 MPa i savojna čvrstoća od 13.8 MPa
García-Díaz i sur., 2024	Mješavina građevinskog otpada i usitnjene opeke	NaOH+Na ₂ SiO ₃	Na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 29.7 MPa i savojna čvrstoća od 15.7 MPa za mješavinu građevinskog otpada i usitnjene opeke u omjeru 60:40
Statkaustas i sur., 2023	Mješavina usitnjene opeke i metakaolina sa malom količinom fosfor-gipsa	NaOH	24h na sobnoj temperaturi, 24 h na 60 °C, i preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 35.1 MPa za mješavinu usitnjene opeke i metakaolina u omjeru 70:30
Robayo i sur., 2016	Usitnjena opeka	NaOH+Na ₂ SiO ₃	24h na sobnoj temperaturi; 24 h/48 h na 70 °C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 16.36 MPa za 48h njege u sušioniku na 70 °C, a preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi
	Mješavina usitnjene opeke i Portland cementa	NaOH+Na ₂ SiO ₃	Na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 102.6 MPa za mješavinu usitnjene opeke i Portland cementa u omjeru 80:20
Robayo-Salazar i sur., 2017	Mješavina usitnjene opeke i Portland cementa	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaOH, NaOH+Na ₂ SiO ₃	Na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 102 MPa za mješavinu usitnjene opeke i Portland cementa u omjeru 80:20 te sa alkalnim aktivatorom NaOH+Na ₂ SiO ₃
Zhang i sur., 2021	Usitnjena opeka	NaOH+Na ₂ SiO ₃	0/24h/48h/72h/96h na 50°C, 24 h na 200 °C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 48 MPa za 48h na 50 °C i 24h at 200°C (ispitivano neposredno nakon njege)
Ulugöl i sur., 2021	Usitnjena opeka	NaOH	24h/48h/72h na 50/66/75/85, 95/105/115/125 °C	Tlačna čvrstoća od 45.7 MPa za 24h na 105 °C (ispitivano neposredno nakon njege)
Yildirim i sur., 2021	Usitnjena opeka	NaOH	24h/48h/72h na 95/105/115/125 °C	Tlačna čvrstoća od 80 MPa za 48 h na 115 °C (ispitivano neposredno nakon njege)

Istraživanje	Prekursor	Alkalni aktivator	Režim njege	Postignuta mehanička svojstva nakon 28 dana (MPa)
Sedira i sur., 2018	Mješavina usitnjene opeke i otpadnog mulja iz eksploatacije volframa	NaOH+Na ₂ SiO ₃	24h na 60 °C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi	Tlačna čvrstoća od 59 MPa za mješavinu usitnjene opeke i otpadnog mulja iz eksploatacije volframa u omjeru 50:50
			24h u vlažnom okruženju, 72h na zraku, 48h na 60 °C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi;	
Vidak Vasić i sur., 2022	Mješavina usitnjene opeke i gline s niskim udjelom litija	KOH+Na ₂ SiO ₃	24h u vlažnom okruženju, 72h na zraku, 96h na 70 °C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi;	Savojna čvrstoća od 13.7 MPa za 24h u vlažnom okruženju, 3h u pari, 48h na zraku, 96h na 70°C, a preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi
			24h u vlažnom okruženju, 3 h u pari, 48h na zraku, 96h na 70°C, preostalo vrijeme na sobnoj temperaturi	

3. Primjena drobljenih opečnih elemenata kao građevinskog otpada

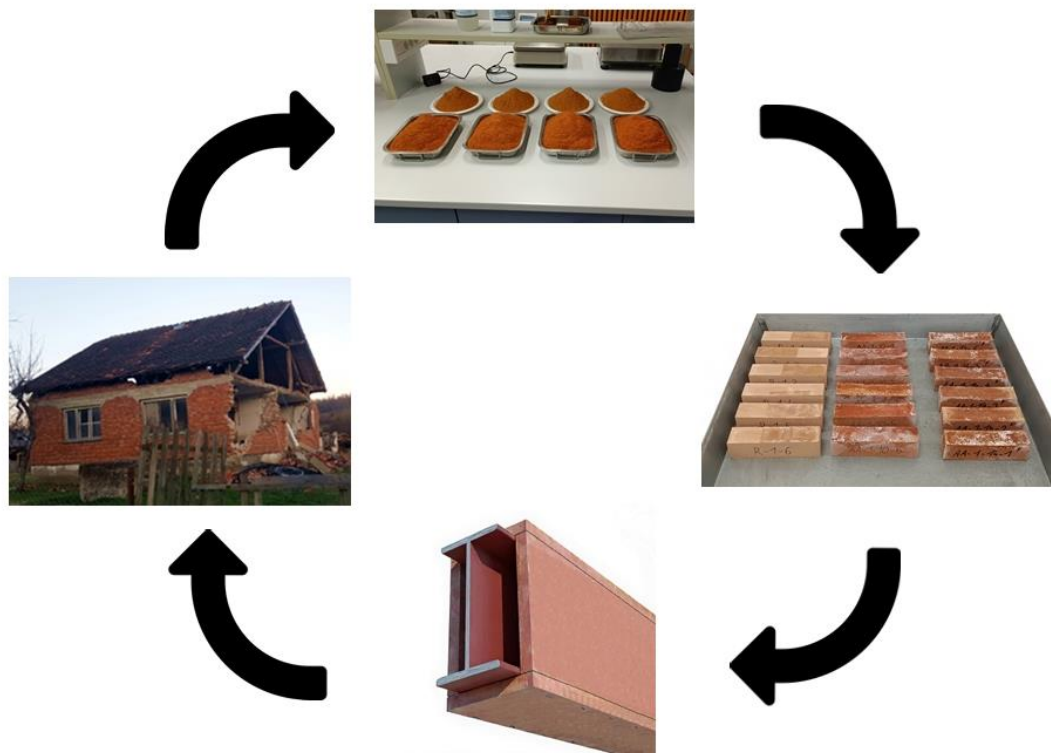
Drobljeni opečni elementi spadaju u građevinski otpad, a mogu nastati rušenjem zidanih građevina (prirodnim putem ili potresom induciranim) i usitnjavanjem ili pak mogu nastati u tvornicama opečnih elemenata prilikom brušenja opečnih elemenata do normom zahtjevane ravnosti ili drobljenjem opečnih elemenata koji ne zadovoljavaju propisane uvjete kvalitete za plasiranje na tržište. U sastavu drobljenih opečnih elemenata dominiraju aluminosilikati tako da bi korištenje drobljenih opečnih elemenata kao prekursora rezultiralo nastankom geopolimera kao podskupine alkalno aktiviranih veziva.



Slika 6. Otpadni proizvodi loše kvalitete u tvornici opeke



Slika 7. Građevinski otpad nastao zbog urušavanja djelovanjem potresa



Slika 8. Prikaz kružne održivosti

4. Smjernice za istraživanje i temu doktorata

Zidanje glinenom opekom jedan je od najstarijih i najtrajnijih načina gradnje koje čovjek koristi. Međutim, mnoge postojeće zidane građevine izgubile su svoju funkcionalnost i potrebno ih je ukloniti kako bi se osigurao prostor za nove objekte. Te zgrade vrlo često trpe velika oštećenja uslijed potresa, a bilo da se uklanjaju zbog propadanja ili oštećenja izazvanih potresom, pri tome nastaju velike količine građevinskog otpada. Osim toga, industrija proizvodnje glinene opeke proizvodi velike količine opečnog praha tijekom brušenja pojedinačnih opeka radi postizanja potrebne ravnosti. Također, neki opečni proizvodi se smatraju neprikladnima za tržište zbog nedostataka poput pukotina, geometrijskih nepravilnosti ili loše kvalitete, te se zatim odbacuju na odlagališta uz proizvodne pogone. Bez obzira na to kako nastaje ovaj otpad, postoji potencijal da se on prenamijeni u materijal dodane vrijednosti.

Trenutno stanje u području istraživanja prikazalo je superiornost geopolimera nad cementom u pogledu požarne otpornosti no u literaturi nije pronađena konkretna primjena geopolimera u građevinarstvu. Kroz ovaj rad će se istražiti primjena geopolimera u vidu ploča za zaštitu čeličnih konstruktivnih elemenata od požara kao konkretnog građevnog proizvoda.

Dosadašnja istraživanja su prikazala da geopolimere treba njegovati na povišenoj temperaturi (u sušioniku, na barem 70°C, *Slika 9*) ili im dodati mali udio cementa kako bi se pospješio postupak geopolimerizacije te ostvarila određena tlačna čvrstoća geopolimera. Možda je upravo njega na povišenoj temperaturi prepreka za konkretnu primjenu geopolimera u građevinarstvu, a i samo mali udio cementa ne čini ovaj kompozit CO₂ neutralnim. Obzirom na činjenicu da se prilikom spravljanja alkalnih aktivatora (lužina za uporabu u geopolimeru) oslobađa određena toplina, istražiti će se iskorištavanje tako razvijene topline za unutarnju njegu geopolimera te ostvarivanje određene tlačne čvrstoće geopolimera, bez njege geopolimernih uzoraka na povišenoj temperaturi tj. uz njegu geopolimernih uzoraka na sobnoj temperaturi (*Slika 10*). Navedeno bi znatno pojednostavilo izradu ploča za zaštitu od požara većih dimenzija. Takve ploče bile bi napravljene u potpunosti bez dodatka cementa što ih čini CO₂ neutralnim.



Slika 9. Njega uzoraka geopolimera na povišenoj temperaturi, u sušioniku



Slika 10. Njega uzoraka geopolimera na sobnoj temperaturi

Trenutno stanje u području istraživanja prikazalo je geopolimere u svom osnovnom sastavu (prekursor plus alkalni aktivator). Ovom temom istražiti će se učinkovitost komponenata koje se učestalo koriste u cementnim kompozitima za povećanje poroznosti (aerant, „upjenjivač“, aluminijski prah) u geopolimerima, a s ciljem poboljšanja toplinskih svojstava geopolimera (koeficijenta toplinske vodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta) kao važnih svojstava za prijenos topline na čelične konstruktivne elemente.

Uzevši u obzir pregled literature te stanje područja, planirano istraživanje uključivati će ispitivanje mehaničkih i toplinskih svojstava alkalno-aktiviranog morta sa usitnjenom opekam kao agregatom, prekursorom od sitne opekarske prašine te mješavinom $\text{KOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ kao alkalnim aktivatorom u različitim omjerima prije i nakon izlaganja povišenim temperaturama. Prije svega, navedeno podrazumijeva ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće kao i općenito stabilnosti i otpornosti navedenog materijala u slučaju požara. Uz to, prema trenutno važećim propisima za proračun protupožarnih izolacijskih materijala, svojstva bitna za proračun su jedinična masa, toplinska vodljivost te temperaturno neovisna specifična toplota. S obzirom da se radi o novom i neistraženom materijalu u pogledu primjene kao protupožarna zaštita, istraživanje će biti usmjereno na analizu varijacija svojstava s obzirom na različite omjere pojedinih komponenti, različitu njegu te potencijalne dodatke za postizanje što boljih toplinskih svojstava.

Nakon provedenih ispitivanja na razini materijala i statističke analize dobivenih rezultata, od morta sa najboljim svojstvima formirat će se pločasti elementi za zaštitu čelične konstrukcije koji će zatim biti ispitani u uvjetima realnog požara radi dobivanja što točnijih podataka o svojstvima vatrozaštite. Također, dobiveni rezultati će se usporediti sa računski dobivenim vrijednostima sukladno propisima.

Uzevši u obzir dosadašnja istraživanja i prikazana povoljna svojstva alkalno-aktiviranih mortova na povišenim temperaturama, te s jedne strane analizirajući prisutnost građevinskog i proizvodnog otpada drobljene opeke i opekarske prašine, a s druge strane potrebu za ponovnom uporabom otpada u korisne svrhe, očita je potreba za istraživanjem navedenog materijala s ciljem prikazivanja povoljnih svojstava i mogućnosti primjene takvog materijala.

Literatura

- Cardoza A., Colorado H.A. (2023). Alkali-activated cement manufactured by the alkaline activation of demolition and construction waste using brick and concrete wastes. *Open Ceramics*, 16, 100438. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100438>
- Choubi S.S., Akgul C.M. (2022). High temperature exposure of alkali-activated coal fly ashes. *Journal of Building Engineering*, 59, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105081>
- da Costa Gonçalves L.F., Balestra C.E.T., Gil M.A.R. (2023). Evaluation of mechanical, physical and chemical properties of ecological modular soil-alkali activated bricks without Portland cement. *Environmental Development*, 48, 100932. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100932>
- Duan P., Yan C., Zhou W., Luo W. (2015). Thermal Behavior of Portland Cement and Fly Ash–Metakaolin-Based Geopolymer Cement Pastes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 2261-2269. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1748-0>
- Gado, R.A., Hebda, M., Łach, M., Mikula, J., (2020). Alkali Activation of Waste Clay Bricks: Influence of The Silica Modulus, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ Molar Ratio, and Liquid/Solid Ratio. *Materials* 13 (2), 383. <https://doi.org/10.3390/ma13020383>
- García-Díaz, A., Delgado-Plana, P., Bueno-Rodríguez, S., Eliche-Quesada D., (2024). Investigation of waste clay brick (chamotte) addition and activator modulus in the properties of alkaline activation cements based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering* 84, 108568. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108568>
- Ghazy M. F., Abd Elaty M. A., Taman M., Mehriz A. M. (2023). Performance of geopolymer mortars prepared by different alkaline solutions under elevated temperature. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 10 (3), 423-447. <https://revue.ummt.dz/index.php/JMES/article/view/3272>
- Gökçe H.S. (2024). Durability of slag-based alkali-activated materials: A critical review. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 60, 885-903. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01011-z>
- Goncalves, J.R.A.; Boluk, Y.; Bindiganavile, V. (2018). Thermal properties of fibre-reinforced alkali-activated concrete in extreme temperatures, *Magazine of Concrete Research* 70(18), 954-964, <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00189>
- HRN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- HRN EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- Jamalimoghadam M., Vakili A.H., Keskin I., Totonchi A., Bahmyari H. (2024). Solidification and utilization of municipal solid waste incineration ashes: Advancements in alkali-activated materials and stabilization techniques, a review. *Journal of Environmental Management*, 367, 122014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122014>
- Jiang X., Xiao R., Zhang M., Hu W., Bai Y., Huang B. (2020). A laboratory investigation of steel to

- fly ash-based geopolymer paste bonding behavior after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 254, 119267.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119267>
- Kravchenko E., Lazorenko G., Jiang X., Leng Z. (2024). Alkali-activated materials made of construction and demolition waste as precursors: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00829. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00829>
- Li Z., Xu G., Shi X. (2021). Reactivity of coal fly ash used in cementitious binder systems: A state-of-the-art overview. *Fuel*, 301, 121031. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121031>
- Malik M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. (2021). Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121398>
- Netinger I., Jelčić Rukavina M., Mladenović A. (2013). Improvement of Post-fire Properties of Concrete with Steel Slag Aggregate. *Procedia Engineering*, 62, 745-753.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.121>
- Pan Z., Sanjayan J.G., Collins F. (2014). Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Research*, 56, 182-189.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.014>
- Pan Z., Tao T., Cao Y.F., Wuhler R., Murphy T. (2018a). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.011>
- Pan, Z.; Tao, Z.; Cao, Y-F.; Wuhler, R. (2018b). Measurement and prediction of thermal properties of alkali activated fly ash/slag binders at elevated temperatures, *Materials and Structures* 51(108),
<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1233-9>
- Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara (NN29/2013)
- Provis J.L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48,
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Razak S.N.A., Shafiq N., Guillaumat I., Farhan S.A., Lohana V.K. (2022). Fire-Exposed Fly-Ash-Based geopolymer Concrete: Effects of Burning Temperature on Mechanical and Microstructural Properties, *Materials*, 15(5) 1884. <https://doi.org/10.3390/ma15051884>
- Reig L., Tashima M.M., Borrachero M.V., Monzó J., Cheeseman C.R., Payá J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.031>
- Robayo R.A., Mulford A., Munera J., de Gutiérrez R.M. (2016). Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163-169.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023>
- Robayo-Salazar R.A., Mejía-Arcila J.M., de Gutiérrez R.M. (2017). Eco-efficient alkali-activated

- cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. *Journal of Cleaner Production*, 166, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.243>
- Sedira N., Castro-Gomes J., Magrinho M. (2018). Red clay brick and tungsten mining waste-based alkali-activated binder: Microstructural and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 190, 1034-1048. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.153>
- Song Q., Guo M.Z., Ling T.C. (2022). A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, 341, 127894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127894>
- Statkauskas M., Vaičiukynienė D., Grinys A., Borg R.P. (2023). Mechanical properties and microstructure of ternary alkali activated system: Red brick waste, metakaolin and phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, 387, 131648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131648>
- Sustavi zaštite čeličnih konstrukcija – Kako odabrati?, <https://www.promat.com/hr-hr/graditeljstvo/projekti/za-strucnjake/39721/odabir-odgovarajuceg-sustava-za-protupožarnu-zastitu-celicnih-konstrukcija/>
- Tran N.P., Nguyen T.N., Black J.R., Ngo T.D. (2024). High-temperature stability of ambient-cured one-part alkali-activated materials incorporating graphene nanoplatelets for thermal energy storage. *Developments in the Built Environment*, 18, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100447>
- Tuyan M., Andiç-Çakir Ö., Ramyar K. (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>
- Ulugöl H., Kul A., Yıldırım G., Şahmaran M., Aldemir A., Figueira D., Ashour A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124358>
- Vidak Vasić M., Terzić A., Radovanović Ž., Radojević Z., Warr L.N. (2022). Alkali-activated geopolymerization of a low illitic raw clay and waste brick mixture. An alternative to traditional ceramics. *Applied Clay Science*, 218, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106410>
- Zaidi F.H.A., Ahmad R., Yahya Z., Tahir M.F.M., Ibrahim W.M.W., Saufi S. (2020). Properties of Blended Alkaline System Geopolymer- A Review. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 743, 012015, doi:10.1088/1757-899X/743/1/012015
- Yıldırım, G., Kul, A., Özçelikci, E., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., Ashour, A., (2021). Development of alkali-activated binders from recycled mixed masonry-originated waste. *Journal of Building Engineering* 33, 101690. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101690>
- Zhang Z., Wong Y.C., Arulrajah A. (2021). Feasibility of producing non-fired compressed masonry units from brick clay mill residues by alkali activation. *Journal of Cleaner Production*, 306, 126916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126916>