

Primljen / Received: 16.3.2020.

Ispravljen / Corrected: 2.6.2020.

Prihvaćen / Accepted: 18.6.2020.

Dostupno online / Available online: 10.9.2020.

Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije

Autori:

Doc.dr.sc. **Bojan Milovanović**, dipl.ing.grad.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za materijale

bojan.milovanovic@grad.unizg.hrDr.sc. **Marina Bagarić**, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za materijale

marina.bagarić@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju

Pregledni rad

Bojan Milovanović, Marina Bagarić

Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije

Implementacijom standarda zgrade gotovo nulte energije (NZEB) došlo je do značajnog razvoja projektiranja i izvođenja vanjske ovojnice zgrade koja ima najveći utjecaj na kvalitetu zgrade u smislu energetske učinkovitosti. Praksa pokazuje da za kvalitetno izvođenje radova treba kompetentna i motivirana radna snaga, odgovarajuća oprema i dobra komunikacija između svih sudionika u građenju. U radu su prikazani osnovni principi arhitektonsko-građevinskog projektiranja i izvođenja NZEB-a te su predočeni problemi koji se javljaju i mogu rezultirati građevinskom štetom.

Ključne riječi:

zgrada gotovo nulte energije, NZEB, energetska učinkovitost, vanjska ovojnica zgrade, toplinski mostovi, zrakonepropusnost, infracrvena termografija

Subject review

Bojan Milovanović, Marina Bagarić

How to achieve Nearly zero-energy buildings standard

The implementation of the Nearly zero-energy buildings (NZEB) standard has enabled significant developments in the design and realisation of external building envelopes, which have the greatest influence on the quality of buildings in the sense of energy efficiency. Experience has shown that prerequisites for good-quality realisation of works mainly include competent and motivated workforce, appropriate equipment, and good communication between all participants in construction. Basic principles of architectural and civil engineering design and realisation of NZEB projects are presented, and problems occurring and possibly resulting in construction damage are presented in the paper.

Key words:

Nearly zero-energy building, NZEB, energy efficiency, external building envelope, thermal bridges, airtightness, infrared thermography

Übersichtsarbeit

Bojan Milovanović, Marina Bagarić

Wie erreicht man ein Niedrigstenergiegebäude

Die Umsetzung des NZEB-Standards (Nearly zero-energy building) hat zu einer bedeutenden Entwicklung bei der Planung und Konstruktion der Außenhülle des Gebäudes geführt, die den größten Einfluss auf die Energieeffizienz des Gebäudes hat. Die Praxis zeigt, dass eine qualitativ hochwertige Arbeit eine kompetente und motivierte Belegschaft, angemessene Ausrüstung und eine gute Kommunikation zwischen allen am Bau beteiligten Parteien erfordert. Die Arbeit stellt die Grundprinzipien der Architektur- und Konstruktionsplanung und des Baus eines NZEB vor und zeigt die Probleme auf, die auftreten und zu Bauschäden führen können.

Schlüsselwörter:

Niedrigstenergiegebäude, NZEB, Energieeffizienz, Gebäudeaußenhülle, Wärmebrücken, Luftdichtheit, Infrarot-Thermografie

1. Uvod – Zgrade gotovo nulte energije (NZEB), što je to i zašto se uvodi standard NZEB

Procijenjeno je da se u zgradama koristi otprilike 40 % ukupno potrošene energije u Europskoj uniji i cilj je smanjiti potrošnju energije u zgradarstvu. Obveza gradnje prema uvjetima za zgrade gotovo nulte energije propisana je Direktivom 2010/31/EU Europskog parlamenta i Vijeća o energetske učinkovitosti zgrada (preinaka) [1], a odredbe Direktive prenesene su u zakonodavni okvir RH Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama ("Narodne novine" broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18) [2].

Zgrada gotovo nulte energije (eng. *Nearly zero-energy building* – NZEB) ima vrlo visoka energetska svojstva i ta gotovo nulta odnosno vrlo niska količina energije se u značajnoj mjeri pokriva energijom iz obnovljivih izvora, uključujući energiju iz obnovljivih izvora koja se proizvodi na zgradi ili u njezinoj blizini [2].

Zahtjeve za NZEB moraju ispunjavati sve nove zgrade za koje se zahtjev za izdavanje građevinske dozvole podnosi nakon 31. prosinca 2019. godine, a nove zgrade koje kao vlasnici koriste tijela javne vlasti već su trebale biti projektirane kao NZEB, ako je zahtjev za izdavanje građevinske dozvole podnesen nakon 31. prosinca 2017. godine.

Zgrade javnog sektora su zgrade u kojima se obavljaju društvene djelatnosti (odgoja, obrazovanja, prosvjete, znanosti, kulture, sporta, zdravstva i socijalne skrbi) a koje su u vlasništvu javnog sektora, zatim zgrade u kojima se obavljaju djelatnosti državnih tijela i organizacija kao i tijela i organizacija lokalne i područne (regionalne) samouprave, kao i djelatnosti pravnih osoba s javnim ovlastima, te zgrade za stanovanje zajednica, zgrade udruga građana i zgrade vjerskih zajednica [3].

EPBD direktivom se od država članica zahtijeva da uspostave minimalne zahtjeve za energetske učinkovitost novih zgrada kao i postojećih zgrada koje se podvrgavaju većoj rekonstrukciji.

Europska komisija ne određuje koja su minimalna svojstva za gotovo nulte energetske zgrade, već je državama članicama prepušteno da ih same definiraju prema vlastitim mogućnostima, i to na osnovi troškovno optimalnih analiza.

Zahtjevi energetske učinkovitosti za postizanje gotovo nultog energetske standarda postavljeni su na osnovi izrađenih "Izveštaja o minimalnim zahtjevima na energetske svojstvo zgrade za kontinentalnu i primorsku Hrvatsku" prema vrsti zgrade, odnosno za jednoobiteljske zgrade, višestambene zgrade, uredske zgrade, zgrade za obrazovanje, zgrade trgovina, hotele i restorane, bolnice i sportske dvorane.

U skladu s tim minimalnim zahtjevima za Republiku Hrvatsku je utvrđen jasan zahtjev za sve nove zgrade koji je definiran specifičnom godišnjom potrošnjom energije za grijanje zgrade te specifičnom godišnjom potrošnjom primarne energije, a zahtjevi su definirani za ukupno devet vrsta zgrada i to za kontinentalnu i primorsku klimatsku zonu (tablica 1.) [2].

Prilikom projektiranja i građenja stambenih zgrada i nestambenih zgrada uredske namjene, obrazovnih zgrada, bolnica, hotela i restorana, treba osigurati da je godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine zgrade $Q''_{C,nd} \leq 50$ kWh/(m²·a). Istovremeno, nestambene zgrade (uredske i obrazovne namjene, bolnice, hoteli i restorani) kod kojih je udjel ploštine prozora u ukupnoj ploštini pročelja $f > 30$ % moraju biti projektirane i izgrađene na način da je $Q''_{C,nd} \leq 70$ kWh/(m²·a). Dodatno, ako je za zgradu izračunana vrijednost E_{prim} [kWh/(m²·a)] koja je niža za najmanje 20 % od maksimalno dopuštenih vrijednosti iz Tehničkog propisa [2], smatra se da su ispunjeni zahtjevi za $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m²·a)] i za $Q''_{C,nd}$ [kWh/(m²·a)] propisani Tehničkim propisom. Osim prije navedenim zahtjevima za $Q''_{H,nd}$ te E_{prim} zahtjevi za NZEB određeni su i:

- minimalnim udjelom isporučene energije podmirenim iz obnovljivih izvora energije (min 30% godišnje isporučene energije zgrade treba biti podmireno iz obnovljivih izvora energije),

Tablica 1. Najveće dopuštene vrijednosti za zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hlađene na temperaturu 18 °C ili više [2]

VRSTA ZGRADE	$Q''_{H,nd}$ [kWh/(m ² ·a)]						E_{prim} [kWh/(m ² ·a)]	
	NZEB						NZEB	
	kontinentalna, $\Theta_{mm} \leq 3$ °C			primorska, $\Theta_{mm} > 3$ °C			kontinent, $\Theta_{mm} \leq 3$ °C	primorje, $\Theta_{mm} > 3$ °C
	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$	$f_0 \leq 0,20$	$0,20 < f_0 < 1,05$	$f_0 \geq 1,05$		
Višestambena	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_0$	45,99	80	80
Obiteljska kuća	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$17,16 + 38,42 \cdot f_0$	57,50	45	35
Uredska	16,94	$8,82 + 40,58 \cdot f_0$	51,43	16,19	$11,21 + 24,89 \cdot f_0$	37,34	35	25
Obrazovna	11,98	$3,86 + 40,58 \cdot f_0$	46,48	9,95	$4,97 + 24,91 \cdot f_0$	31,13	55	55
Bolnica	18,72	$10,61 + 40,58 \cdot f_0$	53,21	46,44	$41,46 + 24,89 \cdot f_0$	67,60	250	250
Hotel i restoran	35,48	$27,37 + 40,58 \cdot f_0$	69,98	11,50	$6,52 + 24,89 \cdot f_0$	32,65	90	70
Sportska dvorana	96,39	$88,28 + 40,58 \cdot f_0$	130,89	37,64	$32,66 + 24,91 \cdot f_0$	58,82	210	150
Trgovina	48,91	$40,79 + 40,58 \cdot f_0$	83,40	13,90	$8,92 + 24,91 \cdot f_0$	35,08	170	150
Ostale nestambene	40,50	$32,39 + 40,58 \cdot f_0$	75,00	24,84	$19,86 + 24,89 \cdot f_0$	45,99	/	/

Tablica 2. Definirani tehnički sustavi za proračun isporučene i primarne energije [2]

Vrsta zgrade	Sustav grijanja	Sustav hlađenja	Sustav pripreme PTV-a	Sustav meh. ventilacije i klimatizacije	Sustav rasvjete
Obiteljske kuće	DA	NE	DA	Uzima se u obzir ako postoji	NE
Višestambene zgrade	DA	NE	DA		NE
Uredske zgrade	DA	DA	NE		DA
Zgrade za obrazovanje	DA	NE	NE		DA
Bolnice	DA	DA	DA		DA
Hoteli i restorani	DA	DA	DA		DA
Sportske dvorane	DA	DA	DA		DA
Zgrade trgovine	DA	DA	NE		DA
Ostale nestambene zgrade	DA	NE	NE		DA

- ispunjavanjem zahtjeva o zrakopropusnosti koji se dokazuje ispitivanjem na zgradi prije tehničkog pregleda zgrade.

Dodatno, treba imati na umu da se kod proračuna E_{prim} u Hrvatskoj ne uzimaju u obzir svi tehnički sustavi (tablica 2.).

Na temelju prikazanih definicija i nacionalnih kriterija za NZEB, koje proizlaze iz Tehničkog propisa [2], a implementirane su u zakonodavni okvir Republike Hrvatske u skladu sa zahtjevima Direktive [1], Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja izradilo je Smjernice za zgrade gotovo nulte energije. Smjernice su namijenjene za opću zainteresiranu javnost (1. dio [4]) i stručnu zainteresiranu javnost (2. dio [5]). Valja naglasiti da u ovom radu osnovni principi projektiranja NZEB-a kao i metode kontrole kvalitete izvođenja građevinskih radova, što postaje iznimno važno pri izvođenju NZEB-a, pokazuju vlastito iskustvo i znanje autora ovog rada proizašlo iz brojnih znanstvenih i stručnih projekata.

2. Osnovni principi projektiranja NZEB-a

Zgradu gotovo nulte energije treba projektirati na način da njezine energijske potrebe budu što manje, a pri čemu ne postoje jedinstvena rješenja za ostvarenje zahtjeva NZEB standarda.

Potrebna je koordiniran sveobuhvatni pristup svih struka uključenih u projektiranje zgrade (projektnata arhitekture, građevinske fizike, termotehničkih sustava kao i elektroinstalacija) od koncepta i idejnog projekta zgrade, pa sve do izvedbenog projekta te stručna i pažljivo kontrolirana izvedba.

Razmatranje energetskog koncepta NZEB zgrade treba uključiti u početnoj fazi projektiranja, kako bi se u proces projektiranja uspješno uključili principi održive, energetski i ekološki svjesne arhitekture. Kvalitetan i optimiran energetski koncept NZEB-a uključuje dobro izbalansirane, ali ne i predimenzionirane debljine toplinske izolacije kao i termotehničke sustave, uz obveznu primjenu obnovljivih izvora energije (OIE). Takav, najpovoljniji energetski koncept tada omogućava niži trošak investicije, te rezultira troškovno-optimalnim rješenjem koje je u skladu sa zahtjevima NZEB standarda.

NZEB treba projektirati s povoljnim faktorom oblika i u skladu s bioklimatskim uvjetima, primijeniti najpovoljnije materijale, elemente i toplinsku izolaciju, projektirati detalje s minimalnim toplinskim mostovima i za osiguranje niske zrakopropusnosti, osigurati rješenja za kontrolu insolacije, koristiti prirodno svjetlo, predvidjeti mehaničku ventilaciju s rekuperacijom, te također predvidjeti primjerene, dostupne i izvedive termotehničke sustave velike učinkovitosti ili s visokim udjelom obnovljivih izvora energije.

Cijena uvijek ima vrlo velik utjecaj na odabir proizvoda za vanjsku ovojnicu zgrade i tehnički sustav. Gotovo svaka zgrada može biti u skladu s NZEB standardom, ali je pitanje uz koju cijenu investicije. Vrlo je jednostavno predvidjeti najsuvremenije izuzetno skupe visokoučinkovite tehnologije, opremu i materijale te time postići NZEB standard, ali to nije cilj zakonodavne regulative. Cilj je postići NZEB standard uz troškovno optimalna rješenja, uzimajući u obzir ekonomski opravdana, tehnički moguća, održiva i ekološki svjesna rješenja.

Još jedan od vrlo važnih parametara koji treba postići pri projektiranju NZEB-a jest povećana razina ugodnosti stanovanja u NZEB-u, pri čemu je posebno važno osigurati odgovarajuću kvalitetu zraka u prostoru (ovisno o namjeni zgrade i/ili prostora) što se u slučaju zrakonepropusne vanjske ovojnice zgrade kod NZEB-a može postići isključivo primjenom mehaničke ventilacije uz preporuku rekuperacije topline otpadnog zraka. Dodatno, treba osigurati dovoljno visoku unutarnju površinsku temperaturu građevinskih dijelova zgrade (prozora, zidova, itd.) kako bi se izbjegao osjećaj hladnoće, ili pojava rošenja te građevinske štete uslijed kondenzacije vodene pare.

Općenito se može govoriti o pet osnovnih principa projektiranja zgrade gotovo nulte energije (NZEB):

- toplinska izolacija – neprekinuta toplinska izolacija optimalne debljine
- prozori odgovarajućih toplinskih karakteristika (U_w) i svojstava propuštanja Sunčeve energije (g^L)
- mehanička ventilacija s rekuperacijom topline – radi osiguranja optimalne kvalitete zraka u prostoru (koncentracije CO_2)

- zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade – radi smanjenja gubitaka topline, smanjenja mogućnosti pojave građevinske štete unutar i na površini građevnih dijelova zgrade, smanjenja razine buke, osiguranja učinkovitog rada mehaničke ventilacije
- minimiziranje toplinskih mostova – smanjenje gubitaka topline, smanjenje rizika od pojave građevinske štete.

Kyoto piramida (slika 1.) prikazuje strategiju za projektiranje niskoenergetskih kuća razvijenu u Norveškoj, a koja se analogno može primijeniti i za projektiranje NZEB-a.

Najprije treba smanjiti gubitke topline kako bi se smanjila potrebna energija za grijanje i/ili hlađenje. To se postiže optimiziranjem oblika zgrade i zoniranjem, toplinskom izolacijom i ostvarenjem zrakonepropusne vanjske ovojnice zgrade, primjenom učinkovite mehaničke ventilacije s rekuperacijom (povratom) topline, projektiranjem kanala za ventilaciju s malim padom tlaka, itd. Osim toga, treba primijeniti napredne fasadne sustave, optimalnu orijentaciju prozora, iskorištavanje dnevnog svjetla, pravilno korištenje toplinske mase za "skladištenje" energije unutar ovojnice zgrade, itd.

Sljedeći je korak primjena energetski učinkovite opreme i rasvjete. Iskorištenje energije Sunca, ali i geotermalne energije ili općenito pasivnog grijanja i hlađenja, omogućuje optimalnu upotrebu pasivnog solarnog grijanja, dnevnog svjetla, prirodne ventilacije, noćnog hlađenja i korištenje topline tla za predgrijavanje ili hlađenje zraka.

Prikaz i kontrola potrošnje energije dokazani je učinkovit pristup za smanjenje potrošnje energije u zgradama. Naime, korisnici često kad su svjesni svoje potrošnje u usporedbi s neposrednom okolinom skloniji su smanjenju potrošnje energije. Dodatno, ako je omogućena inteligentna kontrola sustava, uključujući kontrolu potrošnje energije za grijanje, ventilaciju, rasvjetu i potrošnu toplu vodu, dolazi do sve veće sklonosti prema smanjenju potrošnje energije. Odabir prikladnog izvora energije podrazumijeva minimiziranje upotrebe fosilnih goriva te promiče upotrebu obnovljivih izvora energije (OIE), što uključuje primjenu solarnih kolektora, fotonaponskih ćelija, geotermalne energije, skladištenje podzemne vode, biomasu itd. Pri tome se OIE mogu promatrati kao "šlag na torti".



Slika 1. Kyoto piramida – strategije projektiranja NZEB-a [6]

Glavna prednost Kyoto piramide je u tome što naglašava važnost smanjenja potrebne energije za grijanje, hlađenje, rasvjetu itd. prije dodavanja sustava za opskrbu energijom, čime se promiču postojeća rješenja s najnižim mogućim opterećenjem okoliša.

2.1. Toplinska ovojnica kod NZEB-a

Vanjsku ovojnicu zgrade čine građevni dijelovi (fizička barijera) između unutarnjeg kondicioniranog prostora zgrade i vanjskog okoliša te nekondicioniranog unutarnjeg prostora zgrade, a sastoji se od neprozirnih (pod, zidovi, krov, itd.) i prozirnih građevnih dijelova (prozori, vrata, itd.). Uloga vanjske ovojnice zgrade je osigurati zdravu i ugodnu unutarnju klimu za korisnike zgrade (kvaliteta unutarnjeg zraka, toplinska ugodnost, akustična zaštita, vizualna ugodnost).

Suprotno od laičkog razmišljanja, veće debljine toplinske izolacije neće proporcionalno smanjiti U-vrijednost pojedinih građevnih dijelova (slika 2.) kao ni godišnje toplinske gubitke zgrade te godišnje troškove energijom (slika 3.). Rezultati prikazani na slici 3. odnose se na primjer manje jednoobiteljske kuće s površinom vanjskih zidova 100 m², smještene u klimi središnje Europe (tijekom zimskih mjeseci prosječna vanjska temperatura -12 °C i prosječna unutarnja temperatura 21 °C).

Općenito se može reći da debljina konvencionalnih proizvoda za toplinsku izolaciju (EPS, mineralna vuna i sl.) iznad 20 do 25 cm prestaje imati značajan utjecaj na uštedu energije za grijanje. Za gradnju je moguće odabrati različite tipologije i tehnologije dostupne na tržištu:

- drvo (drveni okvir, CLT, TJI/FJI, ...) + toplinska izolacija,
- pjeno i plinobeton + toplinska izolacija
- čelična konstrukcija + toplinska izolacija
- zidana (ili armirano betonska) konstrukcija + ETICS
- izolirana oplata za beton (ICF), itd.

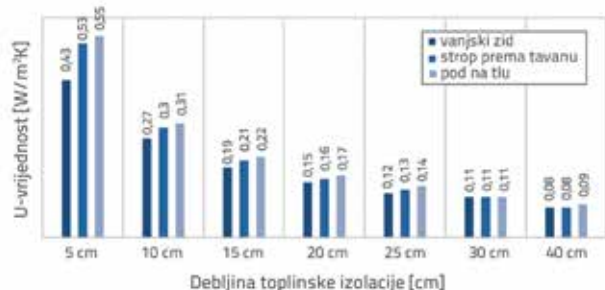
... ali se postavlja pitanje je li veća debljina izolacije rješenje?

Tehničkim propisom definirani su maksimalni dopušteni koeficijenti prolaska topline kroz građevne dijelove ovisno o referentnoj klimi [2], ali svakako treba naglasiti da je prema prikazanoj Kyoto piramidi vrlo smisleno smanjiti potrebu za energijom za grijanje i hlađenje u odnosu na smanjenje E_{prim} isključivo tehničkim sustavima i energentima.

Uzimajući u obzir dopuštene koeficijente prolaska topline ne znači da će zgrada automatski ispuniti zahtjeve o potrebnoj energiji za grijanje ili hlađenje. U slučaju nepovoljne orijentacije, vrlo razvedene dispozicije ili potrebe za većim brojem izmjena zraka, moguća je potreba za većim debljinama izolacije kako bi se zadovoljile granične vrijednosti potrebne energije za grijanje. U hrvatskim klimatskim uvjetima, pa čak i u najhladnijim krajevima, ako se debljina konvencionalnih proizvoda za toplinsku izolaciju (EPS, mineralna vuna i sl.) poveća više od 30 cm, teško se može naći tehničko ili ekonomsko opravdanje.

Suprotno tome, u toplijim krajevima Hrvatske veća debljina toplinske izolacije zahtijevat će znatno povećanu potrebu

energije za hlađenje zgrade, tako da je zaista važno naći optimum koji daje minimalni zbroj potrebne energije za grijanje i hlađenje određene zgrade. Zbog toga je približno 15 cm maksimalna debljina toplinske izolacije u mediteranskoj klimi za koju se može naći tehničko ili ekonomsko opravdanje.



Slika 2. Utjecaj debljine izolacije na U-vrijednost građevnih dijelova



Slika 3. Utjecaj U-vrijednosti vanjskih zidova na godišnje toplinske gubitke jednoobiteljske kuće (površine vanjskih zidova 100 m²) u klimi središnje Europe

Dodatno, tijekom proteklih petnaestak godina, proizvođači raznih građevnih proizvoda razvijaju nove materijale s ciljem smanjenja njihove toplinske provodljivosti, a time i U-vrijednosti. Slika 4. daje primjer relativno novorazvijenih opekarskih proizvoda punjenih mineralnom vunom (MW), EPS-om, perlitom i opekarskog bloka od ekspanzirane gline s integriranim EPS-om kao toplinskom izolacijom. Ti primjeri nikako nisu jedini napredak, naročito ako se pogleda razvoj u području toplinskih izolacija. Njihova je toplinska provodljivost (λ) danas već manja od 0,035 W/mK u slučajevima EPS-a i MW ili pak PUR-a ili PIR-a i aerogela kod kojih je λ približno 0,020 W/mK i tehnologije vakuumsko izolacijskih ploča približno $\lambda = 0,007$ W/mK, pa sve do reflektirajućih folija, fazno promjenjivih materijala (PCM) za akumulaciju energije u slučajevima lagane gradnje, itd.

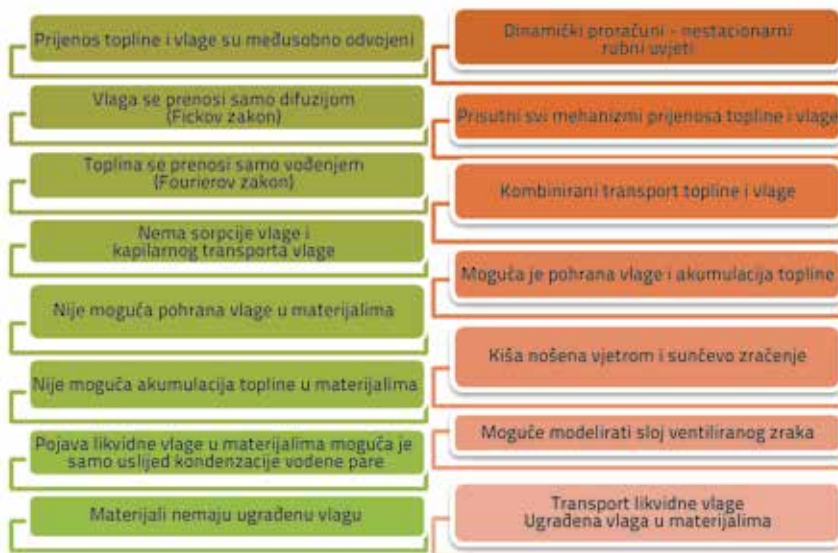


Slika 4. Primjer nekoliko novorazvijenih opekarskih blokova s nižom U-vrijednosti od konvencionalnih proizvoda

Iako postoji širok raspon toplinskoizolacijskih materijala i sustava dostupnih na tržištu, prikladni odabir i ugradnja ovise o zahtjevima koji se mijenjaju od slučaja do slučaja (vanjska ili unutarnja izolacija, zahtjevi zaštite od požara, prisutnost vlage). Ispravan odabir proizvoda koji se koristi za pojedine slojeve građevnih dijelova zgrade mora zadovoljiti zahtjeve postavljene na toplinske ovojnice poput: zaštite od požara, smanjenja toplinskih mostova, osiguranje zrakonepropusnosti, kontrola vlage (difuzija vodene pare - paronepropusna ili paropropusna rješenja), odvodnja likvidne vlage, a zatim i ostale zahtjeve poput zahtjeva zaštite od buke, konstrukcijske zahtjeve, ekološke zahtjeve, estetske zahtjeve, zahtjeve ekonomičnosti, brzine i kvalitete izvođenja.

Fizikalnim svojstvima i fizikalnom ponašanju materijala u konstrukciji i međuodnosno nekoliko različitih materijala ne pridaje se dovoljno pozornosti pri projektiranju i izvođenju zgrade. To može poremetiti fizikalne procese u građevnim dijelovima, prolazak topline, vlage i toplinski rad koji se događaju uslijed različitih unutarnjih i vanjskih klimatskih uvjeta što uzrokuje građevinske štete.

S obzirom na činjenicu da je cilj gradnje NZEB-a između ostaloga i poboljšanje toplinske ugodnosti stanara i korisnika takvih zgrada, osiguranje zdrave unutarnje klime te, naravno, izbjegavanje pojave građevinske štete uzrokovane vlagom iz zraka koja se pojavljuje u slučajevima kada zgrade imaju povećanu zrakonepropusnost vanjske ovojnice, dakle zbog svega toga je potrebno pri projektiranju NZEB-a provesti procjenu higrotermalnog ponašanja. Naročito je važno procijeniti higrotermalno ponašanje: novih materijala i sustava koji se razvijaju, ovojnice postojećih zgrada koje se energetske obnavljaju zbog promjene postojeće dinamičke higrotermalne ravnoteže te kod projektiranja novih energetski visokoučinkovitih ovojnica zgrada. Higrotermalno ponašanje elemenata ovojnice zgrade može se procijeniti primjenom tradicionalne Glaserove metode (stacionarni proračuni) i/ili primjenom dinamičke metode – HAM (Heat, Air and Moisture) modeli (nestacionarni proračuni). Svaka metoda proračuna ima svoja ograničenja, pa ih korisnik (projektant) treba biti svjestan. Na slici 5. prikazana su ograničenja Glaserove metode i prednosti HAM proračuna. Dinamičke higrotermalne simulacije zahtijevaju više ulaznih podataka i veće znanje i vještine korisnika, ali nude i više mogućnosti za dodatnu analizu građevnih dijelova zgrade (npr. različiti aspekti trajnosti i procjena dugoročnog ponašanja).



Slika 5. Ograničenja Glaserove metode (lijevo), prednosti HAM proračuna (desno) higrotermalnog ponašanja građevnih dijelova zgrade

Nije li projektirano stanje zgrade sigurno od mogućeg utjecaja vlage, tada može doći do rasta gljivica i plijesni koji je direktno vezan na vlažnost unutarnjeg zraka i površinsku temperaturu građevnih elemenata, detaljnije u poglavlju 2.2. (slika 7.). Što je niža unutarnja površinska temperatura zida, to je vlažnija njegova površina. Ako bi došlo do njihova razvoja, spore gljivica i plijesni su prirodni alergeni te mogu uzrokovati zdravstvene probleme (alergije) kod izloženih osoba.

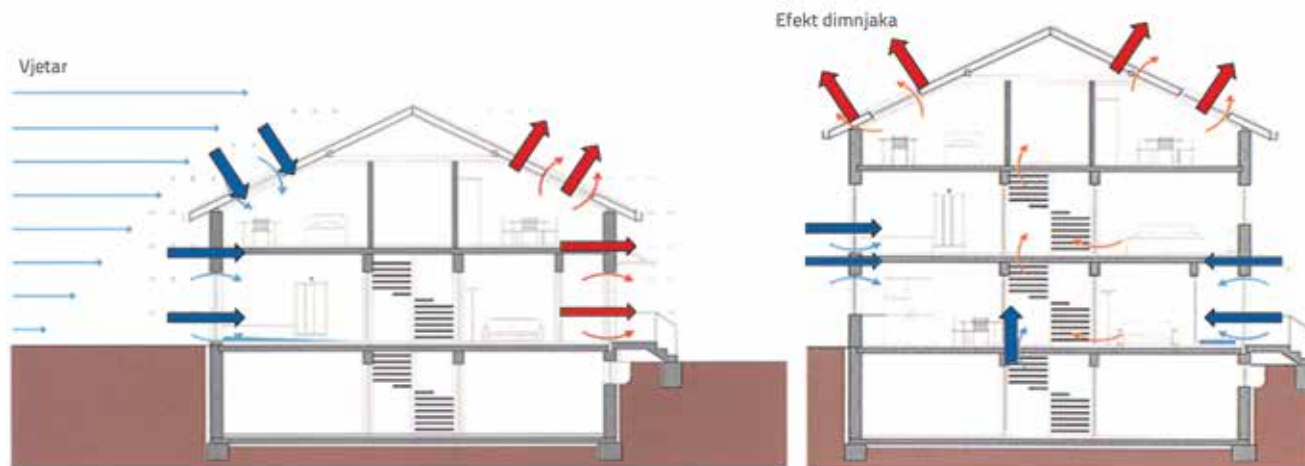
2.2. Zrakonepropusnost vanjske ovojnice kod NZEB-a

Zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade definira se kao otpor prolasku unutrašnjeg toplog zraka koji izlazi iz zgrade ili ulasku hladnog vanjskog zraka u zgradu kroz pukotine, šupljine i druga mjesta nastala slučajnim i nenamjernim propustima, ali nikako kroz ventilacijski sustav zgrade. Ovakav prolazak zraka kroz

građevne dijelove naziva se infiltracija, a ona je uzrokovana razlikom tlaka s obje strane vanjske ovojnice zgrade koji nastaje zbog razlike u temperaturi zraka, pritiska vjetra i zbog mehaničkog sustava ventilacije (slika 6.).

Tehnički propis [2] zahtijeva ispunjavanje zahtjeva o zrakonepropusnosti (u istom propisu definiranih maksimalnih vrijednosti) te dokazivanje ispunjenja zahtjeva ispitivanjem na novoizgrađenoj ili rekonstruiranoj postojećoj zgradi u skladu s normom HRN EN ISO 9972:2015 i to prije tehničkog pregleda zgrade. Obvezni dokazivanje jesu li zadovoljeni zahtjevi zrakonepropusnosti ispitivanjem odnosi se na NZEB zgrade i zgrade koje su projektirane na: $Q''_{H,nd} \leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ u kontinentalnoj klimi i $Q''_{H,nd} \leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ u primorskoj klimi. Pri tome, za razliku tlakova od 50 Pa, izmjereni broj izmjena zraka, ne smije biti veći od: $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ kod zgrada bez mehaničkog uređaja za ventilaciju, odnosno $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ kod zgrada s mehaničkim uređajem za ventilaciju. n_{50} je broj izmjena zraka tijekom jednog sata pri razlici tlakova od 50 Pa u odnosu na obujam unutarnjeg zraka. Dodatno treba naglasiti kad je riječ o višestambenim zgradama koje imaju više od jedne stambene jedinice, da takve zahtjeve treba ispuniti za svaki stan, a kod nestambenih zgrada zahtjevi se odnose na ovojnicu grijanog dijela zgrade.

Iako se laicima smatra kontraintuitivnom preporuka da treba ostvariti zrakonepropusnu vanjsku ovojnicu zgrade zato što tada neće biti dovoljno svježeg zraka u zgradama, treba naglasiti da je zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade ključna ne toliko zbog toplinskih gubitaka (iako može značajno doprinijeti) nego upravo zbog smanjenja mogućnosti kondenzacije vodene pare unutar građevnih dijelova zgrade. Svježiji zrak u NZEB-u se



Slika 6. Shematski prikaz infiltracije i eksfiltracije zraka kroz građevne dijelove zgrade



Slika 7. Razvoj gljivica i plijesni na površini (lijevo) i unutar (sredina i desno) građevnih dijelova zgrade

osigurava mehaničkom ventilacijom s rekuperacijom (povratom topline).

Infiltracija zraka u slojeve vanjske ovojnice propuštanjem (a time ujedno i ulazak vodene pare) približno je 30 puta veća kod jednomilimetarske pukotine nego tijekom prijenosa difuzijom po jednom metru kvadratnom površine. Opisana problematika može se poduprijeti istraživanjem [7] u kojem je pokazano da se kroz zrakopropusnu ovojnicu zgrade ($n_{50} = 3,5$ 1/h) mehanizmom difuzije dnevno prenosi 360 g/m^2 vodene pare, a infiltracijom zraka kroz rešku duljine 1 m i širine 1 mm pri razlici tlakova od 2 Pa prenosi se i do 2,5 l vode. S druge strane, ako se promatra zrakonepropusna vanjska ovojnica zgrade ($n_{50} = 0,6$ 1/h), uz otpor difuzije vodene pare građevnog dijela $s_d = 10 \text{ m}$, difuzijom se prenosi 1 g/dan/m^2 vodene pare.

Propuštanja (curenja) zraka (a s njim i vodene pare) neće nužno u svim slučajevima dovesti do građevinske štete uzrokovane vlagom, no, oprez je i dalje nužan te zbog toga sve pukotine i mjesta curenja vanjske ovojnice zgrade moraju biti zabrtvljena. Propuštanja koja NEĆE dovesti do građevinske štete uzrokovane vlagom su sljedeća:

- kada zrak teče izvana prema unutra (u hladnim predjelima) – mala apsolutna vlažnost
- kad je brzina protoka zraka velika
- kada je put strujanja zraka iznutra prema van kratak.

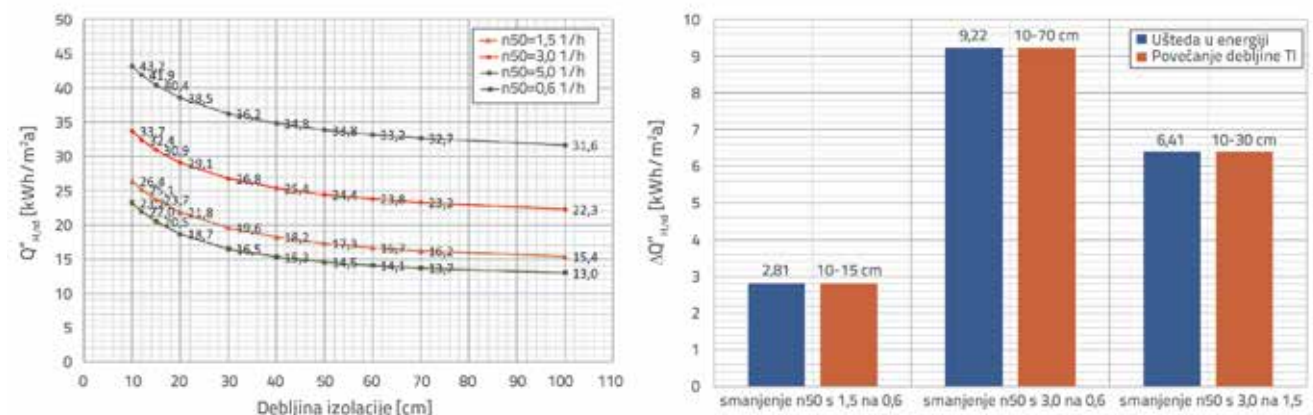
S druge strane, propuštanja koja će gotovo sigurno dovesti do građevinske štete uzrokovane vlagom su sljedeća:

- kada zrak teče iznutra prema van (redovito pri vrhu zgrada zbog prirodne razlike tlakova) – velika apsolutna vlaga zraka
- kad je brzina protoka zraka mala (pri malim razlikama tlakova – slučajevi s malo vjetra)
- kada je put strujanja zraka iznutra prema van dugačak (veće debljine građevnih dijelova).

Kao što je već bilo naglašeno, posljedice zrakopropusnih zgrada su:

- povećani toplinski gubici
- kondenzacija vodene pare
- manja učinkovitost mehaničkih sustava ventilacije (u odnosu na rekuperaciju topline)
- smanjenje zvučne izolacije vanjske ovojnice zgrade
- narušena kvaliteta unutarnjeg zraka.

Iz dosadašnjih razmatranja mogu se objasniti građevinske štete uslijed kondenzacije vodene pare u slojevima građevnih dijelova zgrade, problem narušavanja kvalitete zraka zbog pojave gljivica i plijesni, zatim sustav mehaničke ventilacije s rekuperacijom kad ima manju učinkovitost zbog manje temperature izlaznog zraka uzrokovane infiltracijom, kao i utjecaj pukotina i zazora na zvučnu izolacijsku moć građevnih dijelova zgrade.



Slika 8. Utjecaj zrakopropusnosti na potrebnu energiju za grijanje (lijevo) i usporedba uštede energije u slučaju povećanja debljine toplinske izolacije (desno)

Daljnje razmatranje u ovom radu uključuje primjer utjecaja zrakopropusnosti na toplinske gubitke kod NZEB-a na obiteljskoj kući koja ima ploštinu korisne površine $A_k = 175,34 \text{ m}^2$. Kuća se nalazi u zagrebačkom predjelu Maksimir i projektirana je na NZEB razinu s ciljem ostvarenja $Q''_{H,nd} = 25 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Pri tome je promatrana proračunska vrijednost specifične potrebne energije za grijanje zgrade $Q''_{H,nd}$ (slika 8. lijevo) te ušteda $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$ u slučaju smanjenja n_{50} u usporedbi s istom uštedom u slučaju povećanja debljine toplinske izolacije vanjskih zidova (slika 8. desno).

Slika 8. desno, prikazuje da za razmatranu kuću smanjenje n_{50} sa $1,5 \text{ h}^{-1}$ na $0,6 \text{ h}^{-1}$ dovodi do proračunske uštede specifične potrebne energije za grijanje i hlađenje od $\Delta Q''_{H,nd} + \Delta Q''_{C,nd} = 2,81 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, što je ekvivalentno povećanju debljine toplinske izolacije vanjskih zidova sa 10 na 15 cm mineralne vune odnosno ušteda u cijeni mineralne vune od približno 12.000 HRK. Istovremeno, smanjenje n_{50} sa $3,0 \text{ h}^{-1}$ na $1,5 \text{ h}^{-1}$ dovodi do proračunske uštede specifične potrebne energije za grijanje te hlađenje od $\Delta Q''_{H,nd} + \Delta Q''_{C,nd} = 6,41 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, što je ekvivalentno povećanju debljine toplinske izolacije vanjskih zidova sa 10 na 30 cm mineralne vune, odnosno ušteda u cijeni mineralne vune od približno 45.000 HRK. Drastičan pak je slučaj ako se promotri smanjenje n_{50} sa $3,0 \text{ h}^{-1}$ na $0,6 \text{ h}^{-1}$ koje rezultira proračunskom uštedom od $\Delta Q''_{H,nd} + \Delta Q''_{C,nd} = 9,22 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ što je ekvivalentno povećanju debljine toplinske izolacije vanjskih zidova sa 10 na čak 70 cm mineralne vune.

Očito je dakle da se može ostvariti znatno smanjenje ventilacijskih toplinskih gubitaka ako se usmjeri veća pozornost na zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade, a time se može smanjiti i cijena investicije NZEB-a. Potrebno je i iznimno je važno naglasiti da projektom (ili propisom) zadani kriterij zrakonepropusnosti treba moći ostvariti ispravnim izvođenjem

detalja na gradilištu, što podrazumijeva promjene u uobičajenom načinu izvođenja građevinskih, instalaterskih pa i završnih radova te zapošljavanje kompetentnih radnika. Izobrazba građevinskih radnika u ovom smjeru u Hrvatskoj je pokrenuta kroz projekt Croskills [8], te zatim nastavljena kroz Horizon 2020 projekte Fit-to-NZEB [9] i Net-UBIEP [10] te Erasmus+ projekt BIMzeED [11] koji se provode ili su se provodili na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade gotovo nulte energije (NZEB) moguće je ostvariti pravilnim izvođenjem i brtvljenjem (slika 9.):

- specijaliziranih proizvoda poput specijaliziranih traka i folija (membrana)
- specijaliziranih tekućih membrana, kitova
- ožbukano žida (bez pukotina na žbuci i prodora za instalacije)
- armiranobetonskog žida (bez pukotina i prodora za instalacije)
- nekih vrsta OSB ploča ako su one ispitane i klasificirane u razred 3 ili 4 (prema seriji norme HRN EN 300) i imaju debljinu veću od 18 mm
- specijaliziranim elementima za izvođenje prodora instalacija
- ugradnjom prozora prema RAL smjernicama itd.

S druge strane, zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade nije moguće ostvariti neožbukanim židom, upotrebom nekih vrsta OSB ploča ili drugih ploča vlaknata, pločama toplinske izolacije (iako se spajaju na pero i utor ili na preklop), nekim vrstama prskane izolacije, gipskartonskim pločama, trakama za označavanja, univerzalnim/višenamjenskim/pakirnim ljepljivim trakama i drugim nenamjenskim trakama, nenamjenskim kitovima i brtvilima (silikonski kit, PUR pjena i sl.) (slika 10.). Važno je istaknuti da projektanti trebaju razlikovati paronepropusnu ovojnicu zgrade (koja sprječava difuziju vodene



Slika 9. Proizvodi kojima jest moguće ostvariti zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade



Slika 10. Proizvodi kojima NIJE moguće ostvariti zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade

pare) od zrakonepropusne ovojnice (koja sprječava infiltraciju zraka). Razlika je u tome što zrakonepropusna vanjska ovojnica zgrade ne propušta strujanje zraka ali ne nužno i difuziju vodene pare, dakle ona može istovremeno biti i paropropusna ovojnica (primjer je npr. vapnenocementna žbuka, itd.). To se ne odnosi na paronepropusnu ovojnicu (parnu branu) koja je istovremeno paronepropusna i zrakonepropusna (npr. aluminijška folija).

2.3. Toplinski mostovi kod NZEB-a

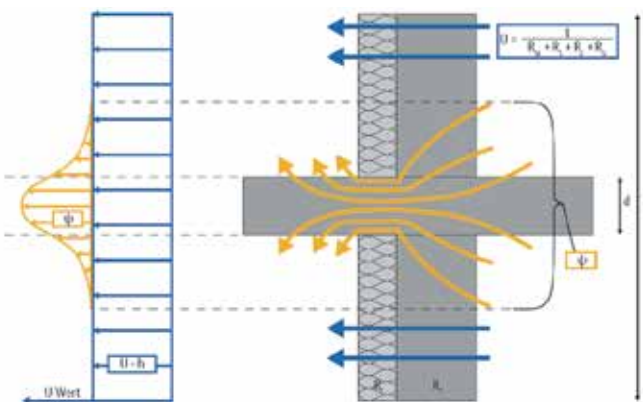
Toplinski most je ograničeno područje u ovojnici zgrade kroz koje je tok topline povećan zbog promjene materijala, debljine građevnog dijela ili pak njegove geometrije.

Zgrada mora biti projektirana te izgrađena tako da utjecaj toplinskih mostova na godišnju potrebnu toplinu za grijanje i hlađenje bude što manji te da se ne pojavljuje građevinska šteta u obliku unutarnje ili površinske kondenzacije u projektnim uvjetima korištenja prostora zgrade. Utjecaj toplinskog mosta iskazuje se kao povećanje ili smanjenje toplinskog toka na promatranom detalju. Za linijske toplinske mostove označava se oznakom Ψ (psi), a mjerna jedinica je $W/(m \cdot K)$. Za točkaste toplinske mostove označava se oznakom χ (hi), a mjerna jedinica je W/K .

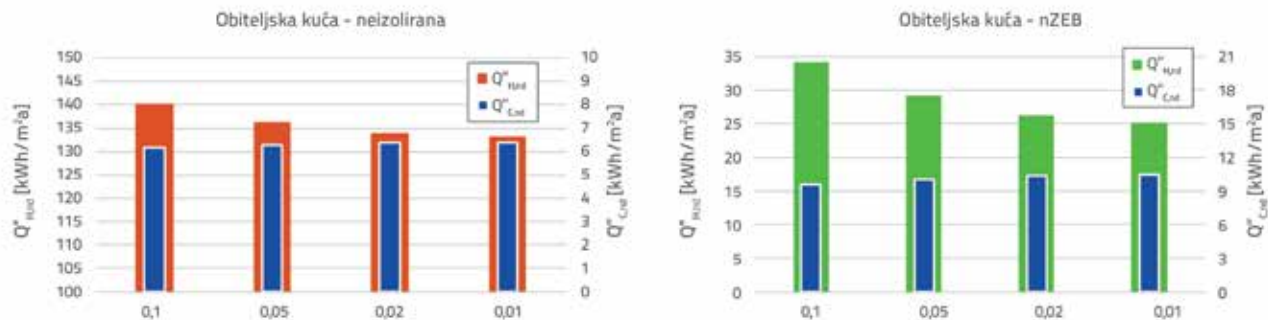
Slika 11. lijevo prikazuje povećanje toplinskog toka zbog promjene materijala i geometrije građevnog dijela (balkona), pri čemu se U-vrijednost vanjskog zida uvećava za $\Psi \cdot h$ kako bi se proračunski uzeo u obzir utjecaj toplinskog mosta zbog balkona na gubitke topline.

U razdoblju od 2006. godine do danas nastavlja se trend povećanja debljina toplinskih izolacija na građevnim dijelovima zgrada i, posljedično tome, nastavlja se smanjenje transmisijskih gubitaka topline, a udio toplinskih mostova u ukupnim transmisijskim gubicima topline relativno se povećava. Taj trend ne prate rješenja zaštite zona toplinskih mostova, čemu je najčešći uzrok neznanje projekatanta, izvođača i/ili investitora.

U ovom će se radu prikazati još jedan primjer obiteljske kuće i utjecaj toplinskih mostova na potrošnju energije. Promatrana obiteljska kuća je locirana u Varaždinu, korisne je površine $A_k = 182,40 \text{ m}^2$, ploštine oplošja grijanog dijela zgrade $A = 407,45 \text{ m}^2$ te volumena grijanog dijela zgrade $V_e = 570 \text{ m}^3$. U primjeru je provedena analiza promjene $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$ ako se svi ostali parametri zadržavaju konstantnima, a mijenja se utjecaj toplinskih mostova promjenom paušalnog dodatka redom: $\Delta U_{TM} = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\Delta U_{TM} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\Delta U_{TM} = 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\Delta U_{TM} = 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Slika 11. Shematski prikaz povećanog toplinskog toka zbog promjene materijala i geometrije građevnog dijela (lijevo) [12], termogram vanjske ovojnice zgrade s izraženim linijskim i točkastim toplinskim mostovima (desno) [13]



Slika 12. Prikaz utjecaja toplinskih mostova na $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$ potpuno neizolirane obiteljske kuće (lijevo) i izolirane obiteljske kuće – NZEB razina (desno)

Na slici 12. vidi se da je relativni utjecaj toplinskih mostova kod neizolirane kuće ($\Delta U_{TM} = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ smanjen na $\Delta U_{TM} = 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$) u razini 5-postotnog smanjenja $Q''_{H,nd}$ i povećanja $Q''_{C,nd}$ za 3 % na godišnjoj razini (slika 12. lijevo). S druge strane, relativni utjecaj toplinskih mostova kod NZEB-a (kad se $\Delta U_{TM} = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ smanji na $\Delta U_{TM} = 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$) u razini je 26-postotnog smanjenja $Q''_{H,nd}$ i povećanja $Q''_{C,nd}$ za 10 % na godišnjoj razini (slika 12. desno). Navedeni primjer zorno prikazuje relativni utjecaj toplinskih mostova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrada i pokazuje da toplinski mostovi imaju znatan utjecaj na koji treba usmjeriti posebnu pozornost.

Toplinske mostove nije moguće ukloniti iz vanjske ovojnice zgrade i oni će postojati neovisno o debljini toplinske izolacije (slika 13. lijevo). Kad se projektiraju i grade zgrade gotovo nulte energije (NZEB) vrijedi načelo: toplinski mostovi se moraju izbjeći, odnosno njihovo djelovanje treba što više oslabiti, a pri tome treba koristiti sve ekonomski prihvatljive tehničke i tehnološke mogućnosti.

Razlog tome su posljedice toplinskih mostova koje uključuju (slika 13. sredina i desno): povećani gubici topline iz zgrade tijekom zime; kondenzacija vodene pare na površini; razvoj gljivica / plijesni; razaranje građevnih dijelova uslijed korozije; povećano gomilanje prašine na vlažnoj površini; pukotine zbog različitog toplinskog rada; razaranje građevnih dijelova uslijed smrzavanja; odvajanje žbuke, naliča, tapeta; povećanje toplinske provodljivosti izolacijskih materijala; iscvjetavanje soli.

Kod zgrada suvremene izvedbe dogodilo se više građevnih šteta uslijed orošavanja na mjestima toplinskih mostova, ako se one uspoređuju s prije građenim zgradama. Razlozi građevnih

učestalijih šteta uslijed orošavanja na toplinskim mostovima kod zgrada suvremene izvedbe mogu biti brojni:

- Zgrade bez primjene toplinske izolacije - nepovoljni utjecaji toplinskih mostova nisu jako izraženi jer:
 - u njima je niža relativna vlažnost zraka u prostoriji zbog toga što je vanjska ovojnica zrakopropusna - veći n_{50}
 - plošna je temperatura približno jednaka u cijeloj prostoriji pa se kondenzat pravilno raspoređivao, upijao u podlogu i isušivao bez posebno štetnih posljedica (podloga ga je uspjela apsorbirati bez značajnog povećanja relativne vlažnosti materijala).
- Zgrade s debelom, kontinuiranom toplinskom izolacijom - utjecaj toplinskih mostova je jače izražen jer:
 - u njima je obično viša RH zraka u prostoriji (ako nema mehaničke ventilacije) zbog bolje zabrtvljenosti vanjske ovojnice zgrade - manji n_{50}
 - veći je dio unutarnje površine zagrijan na temperature bliske temperaturi zraka u prostoriji i svakako više od temperature rosišta,
 - osim u lokalnim (i malim) područjima toplinskih mostova gdje se ukupna količina vodene pare iz prostorije kondenzira te materijal podloge vrlo brzo dosegne kritičnu vlažnost pri kojoj započinje rast i širenje gljivica i plijesni.

Analogno navedenome, kod NZEB zgrada također postoji povećan rizik orošavanja ako toplinski mostovi nisu adekvatno riješeni (unutarnja površinska temperatura preniska), ili ako je unutar zgrade visoka relativna vlažnost (što se događa u zgradama NZEB razine koje nemaju mehaničku ventilaciju).



Slika 13. Termogram toplinskog mosta u izvedenoj NZEB obiteljskoj kući u Zagrebu (lijevo), prikaz posljedice toplinskih mostova (sredina i desno)

2.4. Toplinska masa zgrade

Pri odabiru sustava gradnje NZEB-a ne smije se zaboraviti niti na "toplinsku masu" (toplinsku inerciju, akumulaciju topline) zgrade. Akumulacija topline je svojstvo građevnih dijelova zgrade i materijala da mogu prihvatiti dovedenu toplinu, akumulirati je (sačuvati) te prilikom hlađenja okoline ponovno tu toplinu predavati okolini. Ovo svojstvo je vrlo bitno u zgradama tijekom zimskog perioda u slučajevima kada grijanje ne radi kontinuirano tijekom cijelog dana, već se prekida obično tijekom noći. Akumulirana toplina omogućuje u takvim slučajevima da se temperatura zraka u prostorijama ne smanji bitno tijekom noći. Količina topline koja se akumulira u građevnom dijelu zgrade najviše ovisi o razlici temperatura građevnog elementa i okolnog zraka te o specifičnom toplinskom kapacitetu i masi elementa. Da bi se akumulirala što veća količina topline, potrebno je materijale s većom specifičnom masom u višeslojnim građevnim dijelovima postaviti s unutrašnje tople strane. Drugim riječima, kako bi se iskoristio ovaj učinak, toplinsku izolaciju vanjske ovojnice treba postavljati s vanjske strane.

Parametri dinamičke toplinske inercije zgrade su vremenski pomak i smanjenje amplitude. Određivanje tih parametara nužno je za procjenu sposobnosti pohrane toplinske energije pojedinih elemenata vanjske ovojnice zgrade, koje su povezane sa željenim razinama toplinske udobnosti unutarnjeg prostora i smanjenjem potrošnje energije.

Utjecaj toplinske mase na potrošnju energije pokazat će se na višestambenoj zgradi izgrađenoj predgotovljenim ventiliranim sendvič zidnim panelima (sustav ECO-SANDWICH). Sustav ECO-SANDWICH zapravo su betonski sendvič paneli proizvedeni korištenjem recikliranog agregata iz građevnog otpada. Ovojnica građevine izrađena s tim panelima može se klasificirati kao teška ovojnica (plošna masa 458 kg/m²).

Proračuni su provedeni prema metodi mjesečnog izračuna koja je opisana u HRN EN 13790. Metoda se temelji na mjesečnom balansu dobitaka topline i toplinskih gubitaka utvrđenih u stacionarnom stanju. Simulacija je izvedena za kontinuirani način grijanja (sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije [HVAC]

uključen je svaki dan i svaki sat) za konstrukcije koje variraju od vrlo lagane do vrlo teške. Slika 14. (lijevo) prikazuje specifičnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje predmetne zgrade ovisno o specifičnoj plošnoj masi vanjske ovojnice zgrade koja ima konstantnu U-vrijednost te relativnu promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade u usporedbi s teškom ovojnicom. Pokazano je da vrlo lagane ovojnice poput drvenih konstrukcija i laganih sendvič panela od lima troše 20 % više energije za grijanje i hlađenje godišnje u odnosu na teške ovojnice.

Slika 14. (desno) dodatno prikazuje utjecaj efektivnog toplinskog kapaciteta na specifičnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrada u različitim klimama Hrvatske, od vrlo hladne klime Gospića do tople klime Hvara. Pri tome je vidljivo da zgrada iste arhitekture i orijentacije s jednakim U-vrijednostima građevnih dijelova vanjske ovojnice zgrade, ako je ta ovojnica vrlo lagana, troši u klimi Gospića 33 % energije više nego u slučaju teške ovojnice, dok u klimi Hvara troši 8 % više energije nego teška ovojnica jednakih U-vrijednosti.

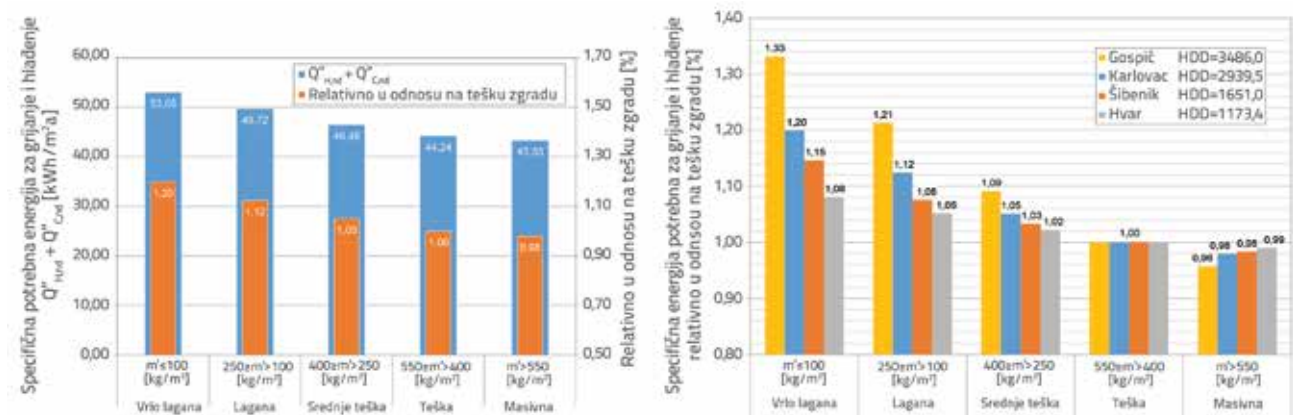
2.5. Prozori kod NZEB-a, optimalni solarni dobitci

Prozori su općeprihvaćeni i poželjni element svakog prostora potreban za ugodan život. Oni omogućuju ispunjenje važnih faktora koji utječu na dobrobit korisnika zgrade kao što su: sunčeva svjetlost, svjež zrak, zaštita od buke, toplinska zaštita, zaštita od sunca, zaštita od oborina, sigurnost.

Prozori uvijek imaju složeniju toplinsku funkciju od izoliranih zidova ili krovova te su samim time izuzetno važni u energetske bilancu NZEB-a.

Prozori redovito imaju niži otpor prolasku topline (veću U_w - vrijednost) od ostatka vanjske ovojnice zgrade. U_w - vrijednost odličnog prozora koji se preporučuje za NZEB iznosi približno $U_w = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$, a U-vrijednost vanjskog zida koji se preporučuje za NZEB iznosi približno $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, što je čak pet puta manja vrijednost, a to znači da su transmisivni gubici topline kroz zidove pet puta manji nego kroz prozore.

Prema tome, oni su uglavnom odgovorni za veći udio u ukupnim gubicima topline. Istodobno, njihova prozirnost omogućava



Slika 14. Specifična potrebna energija za grijanje i hlađenje (lijevo); Utjecaj efektivnog toplinskog kapaciteta na specifičnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrada u različitim klimama (desno) [14]

dobivanje sunčeve topline i svjetlosti u zgradu. Pasivni dobici (dobici od sunca) mogu pozitivno doprinijeti smanjenju potrebne energije za grijanje zimi, ali s druge strane povećavaju potrebnu energiju za hlađenje ljeti. Potrebna energija za grijanje i hlađenje zgrade značajno ovisi o:

- vrsti i veličini ostakljenja
- orijentaciji prozora
- postojanju ili nepostojanju sustava zasjenjenja.

Prilikom projektiranja novih NZEB-a treba odvagati solarne toplinske dobitke i transmisijske gubitke topline kroz prozore i druge ostakljene dijelove vanjske ovojnice zgrade. Ovisno o klimi (lokaciji), orijentaciji, veličini prozora, svojstvima prozora (vrsta stakla, okvir, rub stakla) i zasjenjenju, treba pronaći optimum koji daje energetska ravnotežu i u zimskom i u ljetnom razdoblju. Ne postoji univerzalni "recept" prema kojemu se može projektirati i odabrati vrsta prozora, to je različito za svaku zgradu, kao i za različite lokacije (hladna, umjerena i vruća klima). Optimalna energijska bilanca prozora je temeljni zahtjev za NZEB.

Uravnoteženje toplinskih gubitaka i toplinskih dobitaka kroz prozore postiže se razmatranjem U_w – vrijednosti prozora (definira transmisijske gubitke topline) i g_{\perp} – vrijednosti stakla (definira solarne dobitke topline) koji su dva najvažnija faktora koji utječu na godišnju potrebnu energiju za grijanje i hlađenje zgrade.

Svi detalji o izračunu U_w vrijednosti prozora ili vrata navedeni su u normama HRN EN ISO 10077-1; HRN EN ISO 10077-2.

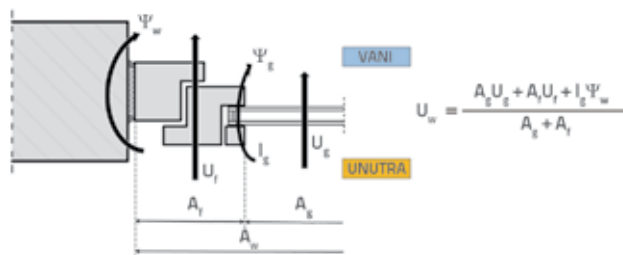
Izračun U_w vrijednosti temelji se na četiri sastavna dijela ukupnog koeficijenta prolaska topline (slika 15.):

- za elemente koji sadrže ostakljenje površine A_g , tj. prozore, U_g vrijednost ostakljenja, tj. stakla ili plastike; jedno staklo ili više stakala; sa low-e premazom ili bez njega, i s međuprostorima punjenima zrakom ili drugim plinovima
- za elemente koji sadrže neprozirne panele, npr. vrata, prolaz topline kroz neprozirne panele
- U_f vrijednost (koeficijent prolaska topline) okvira površine A_f , izračunanu pomoću HRN EN ISO 10077-2 ili preuzetu iz Priloga D HRN EN ISO 10077-1 za drveni, PVC, metalni

s prekidom i bez prekida toplinskog mosta, ili bilo kojom kombinacijom materijala (drvo-aluminij, drvo-PVC, itd.)

- linearni koeficijent prolaska topline (ψ_g - vrijednost) okvira / zastakljenja duljine l_g , izračunana u skladu s HRN EN ISO 10077-2 ili preuzeta iz Priloga E HRN EN ISO 10077-1.

Nadalje, prema potrebi, proračuni u HRN EN ISO 10077 omogućuju dodavanje toplinskog otpora različitih tipova zasjenjenja (rolete, grilje, itd.), ovisno o njihovoj zrakopropusnosti.



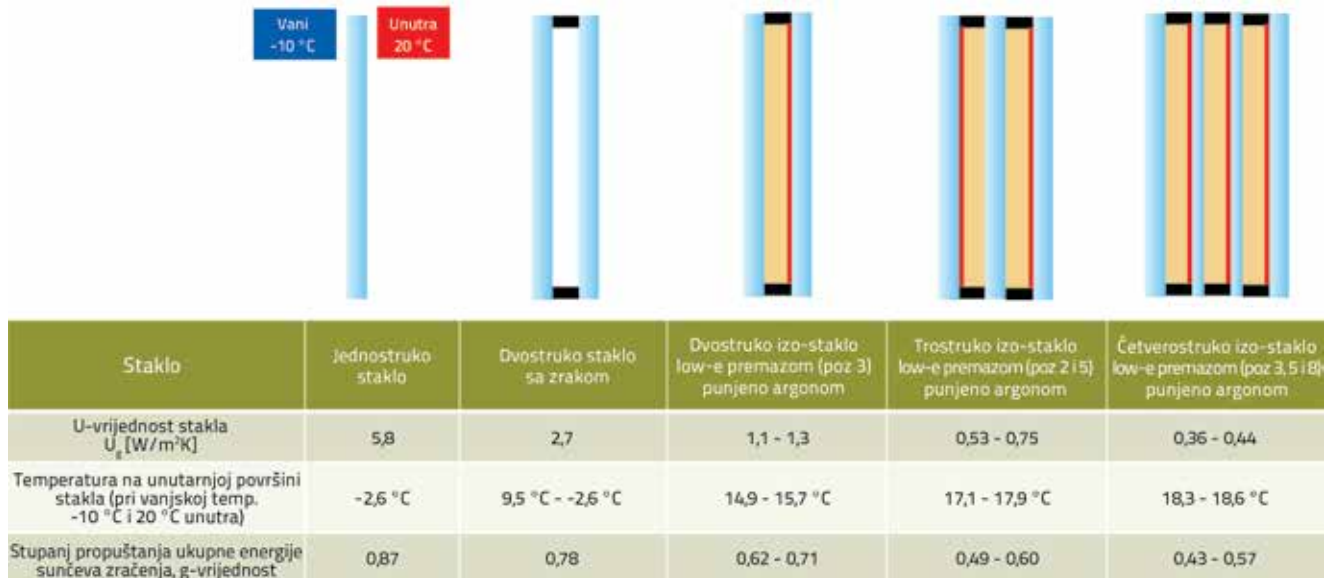
Slika 15. Shematski prikaz veličina te izraz za proračun U_w vrijednosti prozora

Malena komponenta, ali koja ima velik utjecaj i važna je za razmatranje u slučaju prozora, svakako je rub stakla. Ona ima ulogu održavanja razmaka između dva stakla te reguliranja vlažnosti u međuprostoru stakla, a u kombinaciji s butilnim brtvama osigurava brtvljenje ruba stakla kako ne bi iz međuprostora stakala iscurili plinovi (argon, ksenon, kripton) pomoću kojih se između ostalog osigurava niža U_g vrijednost ostakljenja. Rub stakla dodatno može smanjiti gubitke energije po opsegu (rubu) dvostrukog (trostrukog ili četverostrukog) stakla ako ima manju ψ_g vrijednost, ali i smanjiti mogućnost lokalne kondenzacije vodene pare na rubu stakla (slika 16.). Ako se promatraju vrste ostakljenja, dvostruko izo-staklo je zasad najpopularnija vrsta stakla u postojećim zgradama, ali trostruko izo-staklo postaje sve popularnije u novim zgradama, naročito za NZEB. Prednosti i nedostaci trostrukog izo-stakla su sljedeći:

- bolja toplinska izolacija, npr. manja U_g vrijednost kada se koriste jednaki premazi za stakla, razmaci između stakala i ispunja (plin) između stakala



Slika 16. Kondenzacija vodene pare na rubu stakla (lijevo), kompozitni i aluminijски rub stakla (sredina), termogram toplinskog mosta na rubu stakla (desno)



Slika 17. Prikaz temperatura na unutarnjoj površini stakla ovisno o U_g -vrijednosti i broju te poziciji low-e premaza

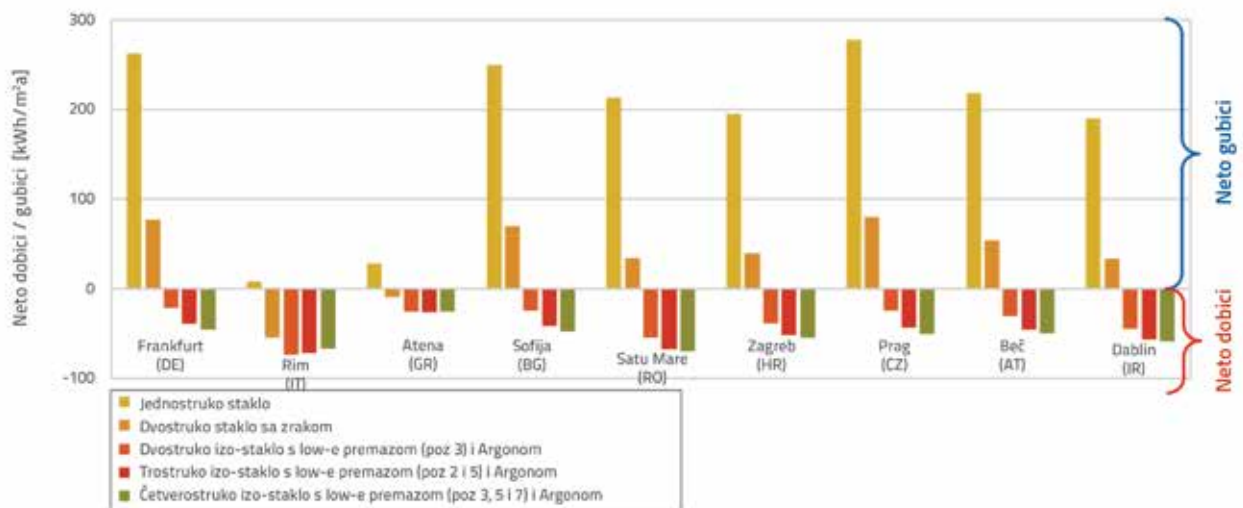
- viša površinska temperatura na unutarnjoj površini stakla, što pridonosi osjećaju ugodnosti u prostoru (naročito u NZEB-u)
- stakla veće mase ograničavaju otvaranje prozora (iako je i to moguće ali treba kvalitetnije riješiti).

Ljudi se osjećaju neugodno kada predmeti i tijela koji ih okružuju istovremeno zrače s različitim intenzitetom prema ljudskom tijelu. Osjećaj ugodnosti je prisutan samo ako je razlika u temperaturi tijela manja od 4 K. Prozori s $U_w \leq 0,8$ W/(m²K) imaju površinsku temperaturu koja nije značajno niža u odnosu na okolne zidove, obično je temperatura prozora niža od zidova za < 3 K (za klimatske uvjete srednje Europe). Slika 17. daje prikaz vrsta stakala s pripadnim U_g vrijednostima te stupnjem propuštanja ukupne energije sunčeva zračenja (g -vrijednostima) ovisno o broju te poziciji low-e premaza kao i

pripadnih temperatura na unutarnjoj površini stakla. Prema tom prikazu očito da samo trostruko izo-staklo s dva low-e premaza i četverostruko s tri low-e premaza zadovoljavaju uvjet da površinska temperatura bude manje od 4 K niža od temperature zraka u prostoru. Otprilike se može kazati da strategija za ispravan odabir vrste stakla za NZEB može biti sljedeća:

- hladne klime: propustiti sunčevu svjetlost u prostor (viša vrijednost g_{\perp}) te minimizirati transmisivne gubitke (minimalni U_w)
- tople klime: zadržati opterećenje od sunca izvan prostora (što manja vrijednost g_{\perp}) mogu se dopustiti nešto viši transmisivni gubici (nešto viši U_w)

Slika 18. prikazuje indikativne vrijednosti neto gubitaka topline (pozitivne vrijednosti) i neto dobitaka topline (negativne vrijednosti) za različite gradove (klime) Europe. Uočava se da su



Slika 18. Indikativni prikaz neto gubitaka i neto dobitaka topline za različite vrste stakla i različite klimatske zone

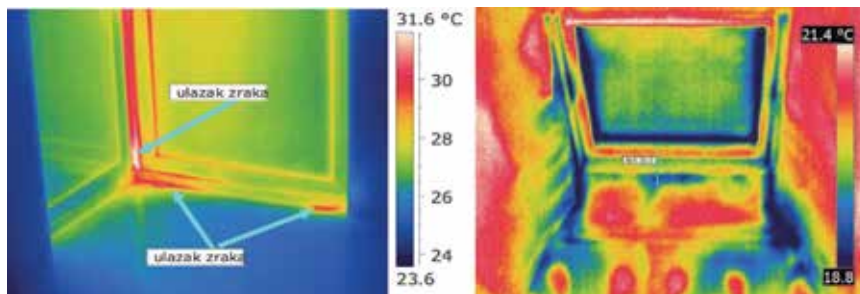
za jednostruko staklo i dvostruka stakla punjena zrakom i bez low-e premaza toplinski gubici puno veći od dobitaka topline. Istovremeno su za izo-stakla s low-e premazima i s ispunom od plemenitih plinova toplinski dobitci veći od gubitaka topline.

Može se, dakle, zaključiti da upotreba low-e premaza malo smanjuje sunčeve toplinske dobitke, ali uvelike smanjuje gubitke topline, a zamjena zraka u praznini argonom (ksenonom, kriptonom) smanjuje toplinske gubitke ali bez smanjenja solarnih dobitaka. Potrebna je optimizacija! Treba odvagati toplinske dobitke u odnosu na toplinske gubitke kao i cijenu prozora. Možda bi npr. dvoslojno izo-staklo na jugu i trostruko izo-staklo na sjevernim prozorima u nekim slučajevima bili optimalni za NZEB, ali ne smije se zaboraviti na toplinsku udobnost i temperaturu unutarnjeg stakla! Iznimno je važno ovdje napomenuti da je ugradnja prozora ključna! Prozori vrlo dobrih svojstava mogu biti dobri samo ako su ispravno ugrađeni. Ugradnja prozora mora riješiti nekoliko ključnih problema:

- nosivost
- vodonepropusnost
- zrakonepropusnost
- kontroliranje prolaska vodene pare
- minimizirati utjecaj toplinskih mostova.

Pod optimalnim uvjetima ugradnje mogu se postići ψ -vrijednosti ugradnje od $0,005 \text{ W / (mK)}$. Važno je da prozor bude ugrađen u sloju toplinske izolacije i da je fiksni okvir prozora po mogućnosti potpuno prekriven izolacijom. U pravilu bi debljina izolacije koja pokriva okvir trebala biti približno 6 cm. Tada se može postići $U_{w, \text{ instaliranu}} = 0,78 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Konvencionalne metode ugradnje mogu imati fatalne posljedice. ψ -vrijednosti ugradnje od $0,15 \text{ W/(mK)}$ povećava $U_{w, \text{ instaliranu}}$ vrijednost na približno $1,19 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Zanimljivo je da se slična



Slika 20. Termogrami s primjerima loše ugradnje prozora bez brtvljenja prema RAL smjernicama

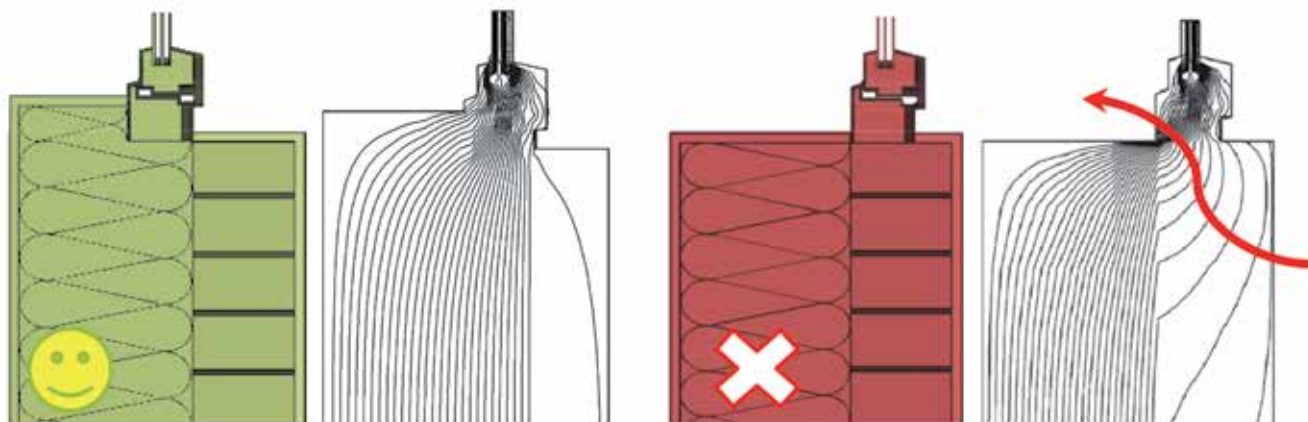
vrijednost može postići s jeftinijim konvencionalnim prozorom koji se instalira u optimiziranim uvjetima.

Dodatno, pravilna ugradnja vanjske stolarije ima jedan od najvećih utjecaja na postizanje zadovoljavajuće zrakonepropusnosti vanjske ovojnice zgrade. Ugradnja vanjske stolarije prema RAL smjernicama, poznatija kao "RAL ugradnja" [15], propisuje tri razine brtvljenja – unutarnja paronepropusna brtva ili parna brana, ekspandirajuća traka ili pjena i vanjska brtva ili paropropusna folija. Prozori su izloženi toplinskom radu i vibracijama, stoga s vremenom nastaju pukotine na spoju okvira i zida. Parna brana i paropropusna folija elastične su trake koje dugotrajno sprječavaju prolazak zraka kroz reške između okvira i zida. Špaleta na koju se lijepi parna brana mora biti ožbukana, ravna i očišćena.

Loša ugradnja prozora može rezultirati povećanim gubicima topline (ventilacijski – zrakonepropusnost i transmisijski – toplinski mostovi), ali i pojavom građevinske štete te osjećajem neugodnosti stanovanja (strujanje hladnog zraka kroz spojeve okvira i zida, gljivice i plijesan štetne za zdravlje) (slika 20.).

3. Kontrola kvalitete izvođenja građevinskih radova (*Blower door* + termografija)

Zbog nedostatka potrebnog znanja i vještina, pritiska rokova izvođenja, pokušaja uštede ali i drugih razloga, u Hrvatskoj



Slika 19. Prikaz ugradnje prozora u sloj toplinske izolacije (preporučena ugradnja) i ekstremno lošeg načina ugradnje prozora na nosivi dio zida bez prekrivanja okvira

se pokazalo da postoji velik broj primjera loše izvedenih građevinskih radova.

Niti vanjska ovojnica zgrada gotovo nulte energije (NZEB) nije u tome iznimka, te se mogu nabrojiti primjeri građevinske štete do kojih je došlo zbog ugradnje neadekvatnih materijala i neuzimanja u obzir preporučene tehnologije gradnje i pravila struke.

U smislu energijske učinkovitosti, najveći utjecaj na kvalitetu zgrade ima vanjska ovojnica zgrade i to ne samo zbog upotrijebljenih materijala i sustava već i zbog izvedbe pojedinih detalja [16]. Smatra se da za kvalitetno izvođenje radova radnik treba imati potrebnu kvalifikaciju (znanje i vještine), odgovarajuću opremu, ali on mora biti i motiviran za kvalitetan rad te se treba ostvariti dobra komunikacija i informiranje svih sudionika u gradnji.

3.1. Metoda ispitivanja zrakopropusnosti – *Blower door*

Za zgrade gotovo nulte energije obavezno je ispitivanje zahtjeva zrakopropusnosti (eng. *Blower door test*) koje se provodi prema propisanoj normi prije tehničkog pregleda zgrade. Za višestambene zgrade (više od jednog stana), zahtjev o zrakopropusnosti mora biti ispunjen za svaki stan.

Sa stajališta mjeriteljstva, mjerenje zrakopropusnosti se svodi na problem mjerenja protoka zraka kroz vanjsku ovojnicu kao funkcije razlike tlakova s obje strane ovojnice. Pri tome se uređaj (*Blower door*) (slika 21.) koristi za stvaranje prisilne razlike tlakova između unutarnjeg i vanjskog prostora.

Za ocjenjivanje zrakopropusnosti zgrade koristi se standardna razlika tlakova od 50 Pa (nadtak ili podtlak), koja je zapravo

ekvivalentna djelovanju vjetra brzine 35 km/h sa svih strana zgrade istodobno. Ta razlika tlakova od 50 Pa je potrebna i dovoljno velika da se prevlada šum mjerenja i drugi utjecaji koji nepovoljno utječu na točnost mjerenja, a događaju se zbog promjena temperature zraka tijekom mjerenja ili zbog djelovanja slabog vjetra. Navedeno čini metodu relativno točnom i ponovljivom.

Provođenje ispitivanja zrakopropusnosti vanjske ovojnice zgrade preporučuje se prije izvođenja završnih radova i samog završetka radova na zgradi. Cilj je te preporuke povećati kvalitetu izvođenja radova na zrakonepropusnoj ovojnici zgrade te na što brži i jeftiniji način ispraviti neminovne pogreške u izvođenju. Ostvarivanje zrakonepropusnosti nakon završetka radova znatno poskupljuje i komplicira postupak otklanjanja nedostataka.

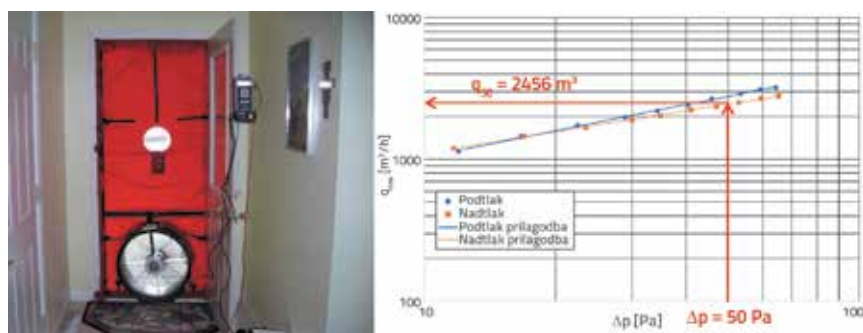
Primjenom anemometra, hladnog dima ili metodom infracrvene termografije moguće je otkriti mjesta infiltracije zraka u građevne dijelove zgrada tijekom provođenja ispitivanja metodom *Blower door*, slika 22.

Kako bi se rezultati ispitivanja dobiveni metodom *Blower door* približili shvaćanju opće javnosti i pokazalo koliko su sitni detalji izvođenja bitni za kvalitetu izvedbe, treba izračunati ekvivalentnu infiltracijsku površinu (eng. *Equivalent Leakage Area* – ELA). ELA je ploština otvora koji ima oštre rubove, kroz koji postoji laminarno strujanje zraka i to je strujanje ekvivalentno strujanju zraka kroz zbroj ploština svih propusta na vanjskoj ovojnici zgrade koje je nastalo uslijed jednakih uvjeta razlike tlaka s obje strane građevnih dijelova zgrade [17]. Zbog toga što je ona samo aerodinamički ekvivalentna površina dobivena na osnovi mnogih pretpostavki, ELA se može promatrati samo kao korisna orijentacijska vrijednost i ništa više od toga.

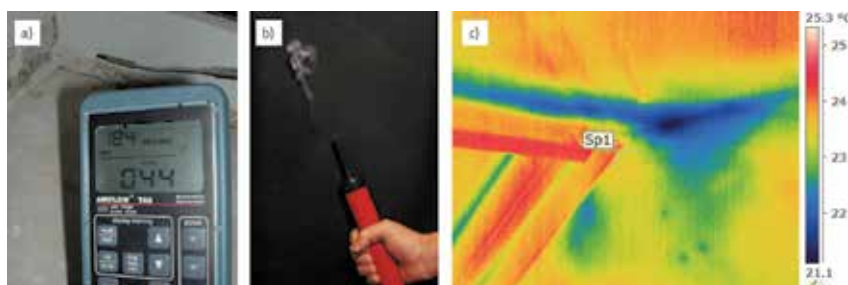
Ako se promatra primjer ispitivanja obiteljske kuće korisne površine $A_k = 173,63 \text{ m}^2$ i volumena unutarnjeg zraka $V = 420 \text{ m}^3$, a površina vanjske ovojnice zgrade jednaka je $342,66 \text{ m}^2$, izmjeren je protok zraka od $1259 \text{ m}^3/\text{h}$ pri razlici tlakova od 50 Pa, što je dalo vrijednost $n_{50} = 3,00$. Izračunom ekvivalentne infiltracijske površine dobiveno je $ELA = 628 \text{ cm}^2$, što odgovara 0,018 % površine vanjske ovojnice zgrade.

Dobivene vrijednosti za $ELA = 628 \text{ cm}^2$ (0,018 % površine vanjske ovojnice zgrade) upućuju na potrebu detaljne i kvalitetne izvedbe svih pa i najsitnijih detalja, potrebu za striktnom kontrolom kvalitete izvedbe zrakonepropusne ovojnice zgrada, pogotovo NZEB-a jedino ispitivanjem *in situ*.

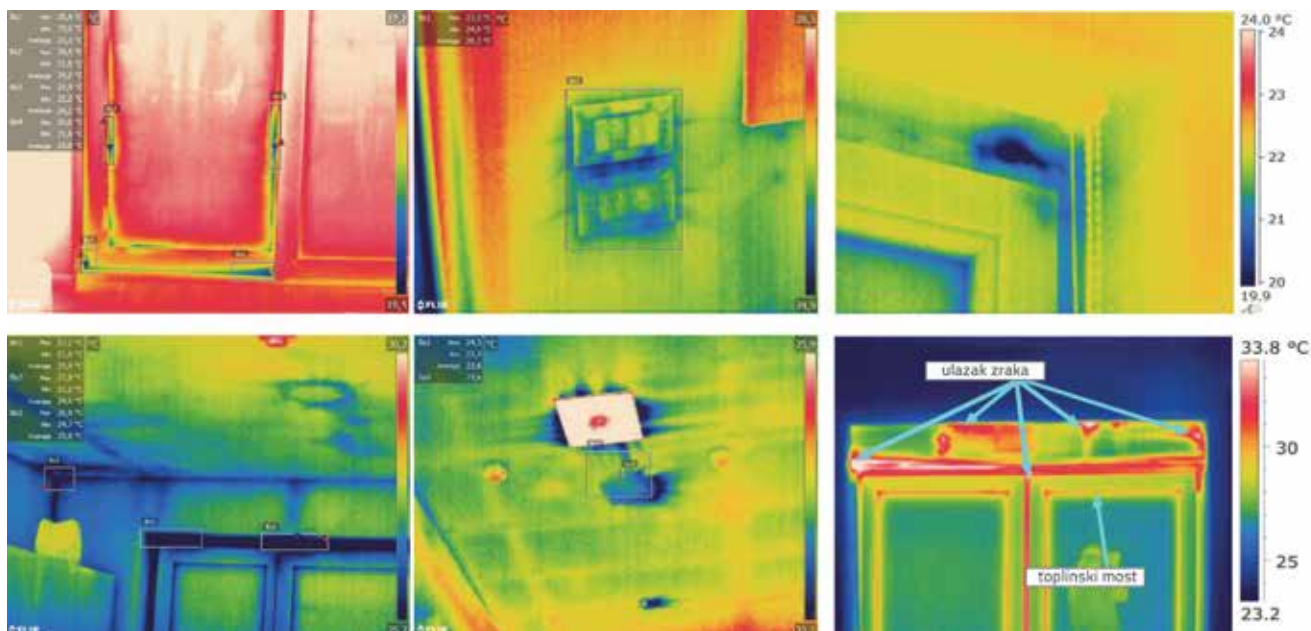
Najčešće pogreške izvođenja zrakonepropusne ovojnice zgrada jesu propusti na njezinim spojevima, propusti oko proboja i oštećenja zrakonepropusne



Slika 21. *Blower door* uređaj te prikaz rezultata mjerenja



Slika 22. Otkrivanje mjesta infiltracije upotrebom: a) anemometra, b) hladnog dima, c) IC termografijom



Slika 23. Termogrami loše izvedenih detalja zbog čega dolazi do infiltracije zraka u građevne dijelove zgrade

ovojnice, upotreba neprikladnih rješenja proizvoda (razvodnih kutija, cijevi za kabele, itd.), ugradnja stolarije koja nije u skladu s RAL smjernicama i slični propusti (slika 23.).

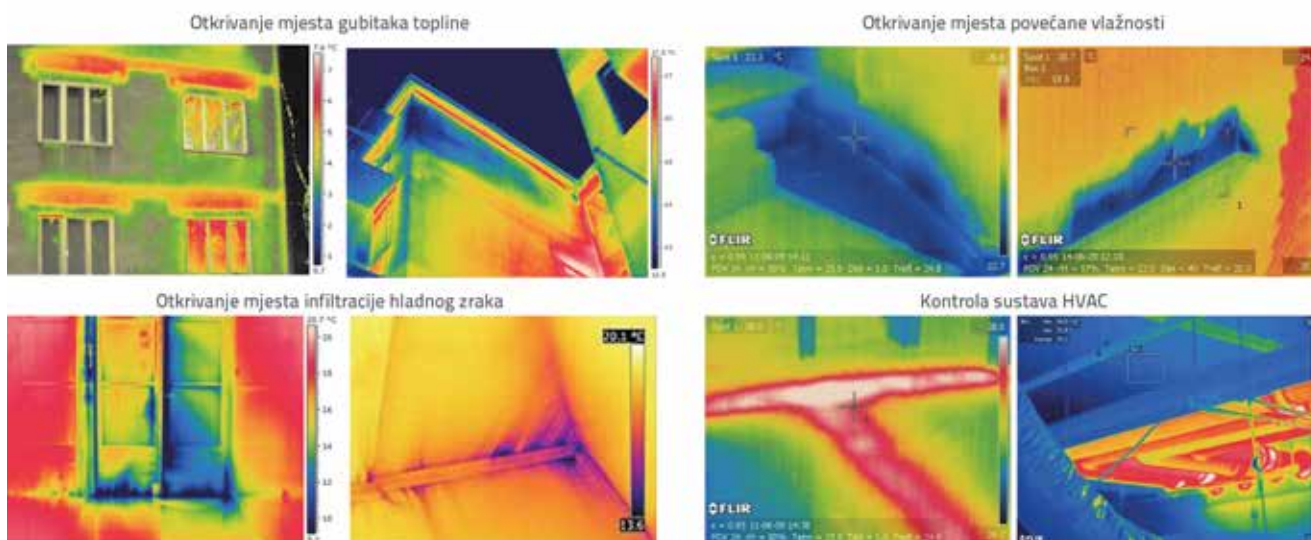
Ako se opisane pogreške izvođenja ne isprave, s vremenom one neminovno dovode do pojavljivanja građevinske štete unutar građevnih dijelova zgrade, što je naročito izraženo kod NZEB zgrada, koje se u široj javnosti percipiraju kao bezuvjetno vrlo kvalitetne zgrade.

3.2. Metoda infracrvene termografije

Infracrvena (IC) termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela. Kod IC termografije se energija zračenja s površine tijela s pomoću

osjetnika konvertira u ljudskom oku vidljivi dio elektromagnetskog spektra (0,4 do 0,7 μm). Primjenom metode IC termografije moguće je nakon izvedbe toplinske izolacije vanjske ovojnice zgrade provjeriti njezinu kvalitetu te potvrditi učinkovitost rješenja za smanjenje toplinskih mostova, postojanje eventualnih područja sa smanjenom debljinom sloja izolacije te vlažnih područja (slika 24.).

U području IC termografije tijekom proteklih desetak godina cijena je termografskih mjernih uređaja postala sve prihvatljivija (zbog novih tehnoloških rješenja i povećane primjene), što je dovelo do toga da se termografskim uređajima često služe i nedovoljno educirane osobe. Posljedice toga često su nezadovoljavajuća obrada i netočna interpretacija rezultata termografskih mjerenja.



Slika 24. Nekoliko termogramskih primjera najčešće primjene IC termografije u zgradarstvu

4. Zaključak

Poboljšanje kvalitete može se postići ako se slijedi nekoliko jednostavnih pravila, a holistički pristup postaje standard projektiranja, te je zapravo neizbježan pri projektiranju NZEB-a. Drugim riječima, da bi se postigli navedeni ciljevi u projektiranju zgrada gotovo nulte energije potrebna je koordinacija svih struka čija projektna rješenja utječu na realizaciju zgrade (projektanata arhitekture, fizike zgrade, termotehničkih sustava i elektroinstalacija). Koordinirani integralni pristup potreban je od idejnog rješenja i energetskog koncepta do rješenja izvedbenih detalja i kontrole izvedbe. Treba promišljati detalje unaprijed kako bi se izbjegli problemi i improvizacije prilikom izvođenja NZEB-a, jer se pokazalo da improvizacija često rezultira problemima.

Koncept cijele zgrade ili integralni koncept i pristup projektiranju NZEB-a uključuje sve aspekte gradnje zgrada (arhitektura, fasada, konstrukcija, funkcija, požar, akustika, materijali, upotreba energije, kvaliteta okoliša u zatvorenom prostoru itd.). Općenito se može zaključiti da s povećanjem razine toplinske zaštite povećava se važnost projektiranja i izvedbe detalja, koji kod takvih zgrada ako su nesmotreno izvedeni mogu uzrokovati pojavu građevinske štete u obliku pojave plijesni ili korozije (propadanja) materijala unutar građevnih dijelova zgrada.

Kada se pokušava zaključiti sveobuhvatni pregled različitih aspekata zgrade gotovo nulte energije (NZEB), postavlja se pitanje kako kontrolirati one različite aspekte NZEB-a, tj. tko

bi trebao biti odgovoran za postizanje doista kvalitetne i vrlo uspješne zgrade gotovo nulte energije (NZEB).

Svatko od sudionika u gradnji, bez obzira na ulogu u projektiranju, izgradnji, korištenju i održavanju NZEB-a, odgovoran je za poštivanje pravila i pridržavanje smjernica proizvođača materijala i sustava. Izvođenje radova na NZEB-u treba povjeriti iskusnim i kompetentnim radnicima koji razumiju posljedice nemarne ili loše gradnje i treba imati kvalitetne proizvode primjerene za specifičnu upotrebu. Nakon izvođenja svakako treba provesti propisima zahtijevana mjerenja.

Pri izvođenju vanjske ovojnice zgrada, a naročito se to odnosi na NZEB, svi sudionici u gradnji trebali bi biti adekvatno obrazovani (pa i certificirani) za izvođenje NZEB-a. Time bi se dokazalo njihovo poznavanje načina izvođenja i poznavanje tehnologije izvedbe, to jest potvrdilo bi se da radnici trebaju imati specijalizirane kvalifikacije. Pri tome treba uspostaviti sustav u kojem oni svojim ugledom i/ili materijalno odgovaraju za konačni proizvod, zgradu. Izobrazba građevinskih radnika u tom je smjeru u Hrvatskoj započela projektom Croskills (definiran je i sustav certificiranja građevinskih radnika, što je regulirano Pravilnikom koji je propisalo Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja), a zatim nastavljena kroz Horizon 2020 projekte Fit-to-NZEB, Net-UBIEP i nZEB Roadshow te Erasmus+ Erasmus+ projekt BIMzeED koji se provode ili su se provodili na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Da bismo povećali kompetencije svih uključenih u NZEB projekte, cjeloživotno učenje i praćenje razvoja građevinskog sektora u području NZEB-a je obvezno!

LITERATURA

- [1] European Parliament and the Council, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), vol. OJEU L153/13, European Parliament, 2010.
- [2] Republika Hrvatska, Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Vol. 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, Narodne novine.
- [3] Ministarstvo graditeljstva i prostornoga uređenja, Program energetske obnove zgrada javnog sektora za razdoblje 2016.-2020., vol. NN 22/2017, Narodne novine, 2017.
- [4] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Smjernice za zgrade gotovo nulte energije – PRVI DIO (namijenjene za opću zainteresiranu javnost), 2019. https://mgipu.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Smjernice_1_dio_nZEB_mgipu.pdf, 16.05.2020.
- [5] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, Smjernice za zgrade gotovo nulte energije – DRUGI DIO (namijenjene za stručnu zainteresiranu javnost), 2019. https://mgipu.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Smjernice_2_dio_nZEB_mgipu.pdf 16.05.2020.
- [6] T. a. R. A. Dokka, Kyoto Pyramid, 2005. www.lavenergiboliger.no, 11.03.2020.
- [7] Passnet, Passive house seminar for professionals from the building sector, Intelligent Energy Europe Project Passnet.
- [8] Croskills konzorcij, CROSKILLS - Build Up Skills Croatia - osposobljavanje građevinskih radnika u energetskoj učinkovitosti, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2015. <http://www.croskills.hr/>, 11.03.2020.
- [9] Fit-to-NZEB konzorcij, Fit-to-nZEB - Innovative training schemes for retrofitting to nZEB-levels, 2017, <http://www.fit-to-nzeb.com/>, 11.03.2020.
- [10] Net-UBIEP konzorcij, NET-UBIEP Project - Network for Using BIM to Increase the Energy Performance, 2017. <http://www.net-ubiep.eu/hr/home-hr/>, 11.03.2020.
- [11] BIMzeED konzorcij, BIMzeED - Education for zero energy buildings using Building Information Modelling, 2018. <http://bimzeed.eu/>, 11.03.2020.
- [12] Schoeck Ltd., Thermal Bridging Guide, September 2018. https://www.schoeck.co.uk/view/5993/Thermal_Bridging_Guide_Schoeck_Isokorb_%5B5993%5D.pdf, 05.01.2020.
- [13] Milovanović, B.: Termogram vanjske ovojnice zgrade s izraženim linijskim i točkastim toplinskim mostovima, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2018.

- [14] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B.: Recycled Aggregate Concrete for Nearly Zero Energy Buildings, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2014) 11, pp. 575-584, <https://doi.org/10.1680/mac.14.00220>
- [15] ift Rosenheim, *Guideline for installation of windows and external pedestrian doors (RAL)*, 2016.
- [16] Mikulić, D., Štirmer, N., Milovanović, B., Banjad Pečur, I.: Energijsko certificiranje zgrada, *Građevinar*, 62 (2010) 12, pp. 1087-1096.
- [17] Colliher, D.G.: A predictive method to determine the leakage area needed in residences for IAQ control by infiltration, in *Dublin 2000: 20 20 Vision*, Dublin, 2000.