

Primljen / Received: 25.4.2012.

Ispravljen / Corrected: 7.2.2013.

Prihvaćen / Accepted: 21.2.2013.

Dostupno online / Available online: 10.4.2013.

Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakopropusnosti

Autori:



Prof.dr.sc. **Željko Koški**, dipl.ing.arh
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
zkoski@gfos.hr



Doc.dr.sc. **Irena Ištoka Otković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
iirena@gfos.hr



Ivana Miličević, dipl.ing.građ.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
ivana.milicevic@gfos.hr

Pregledni rad

Željko Koški, Irena Ištoka Otković, Ivana Miličević

Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakopropusnosti

Polazeći od potrebe poboljšanja energetske učinkovitosti u zgradama, u članku se kronološki analizira toplinska kvaliteta odabranih elemenata omotača postojećih stambenih zgrada. Temeljem analize odabrani su najznačajniji parametri za klasifikaciju obodnih građevinskih elemenata s ciljem stvaranja kriterija za odabir reprezentativnog uzorka postojećeg stambenog fonda. Postavljena je hipoteza određene zavisnosti odabranih ulaznih faktora i zrakopropusnosti koja se planira dokazati terenskim mjerenjima u nastavku istraživanja. Ukratko se predstavljaju "Blower door" i "Tracer gas" metode mjerenja zrakopropusnosti.

Ključne riječi:

stambene zgrade, zrakopropusnost, ušteda energije, energetska učinkovitost

Subject review

Željko Koški, Irena Ištoka Otković, Ivana Miličević

Classification of building elements as a function of air permeability measurements

Starting from the need to increase energy efficiency of buildings, the thermal quality of selected envelope elements of existing residential buildings is chronologically analyzed in the paper. Following this analysis, the most significant parameters for classification of boundary building elements are selected, in order to establish criteria for selection of a representative sample of the existing housing stock. The hypothesis of a dependence between the input factors selected and the airtightness is proposed, and the "Blower door" and "Tracer gas" methods for airtightness measurement are presented.

Key words:

residential buildings, airtightness, energy saving, energy efficiency

Übersichtsarbeit

Željko Koški, Irena Ištoka Otković, Ivana Miličević

Klassifizierung von Gebäudeelementen in Bezug auf Luftdurchlässigkeitsmessungen

Ausgehend von der Notwendigkeit die Energieeffizienz in Gebäuden zu verbessern, wird in dieser Arbeit die thermische Qualität ausgewählter Gebäudehüllenelemente für bestehende Wohngebäude chronologisch analysiert. Auf den gegebenen Analysen beruhend, sind die bedeutendsten Parameter für die Klassifizierung von äußeren Bauelementen ausgewählt, um Kriterien für die Auswahl repräsentativer Proben des existenten Wohngebäudebestands zu definieren. Die Hypothese einer bestimmten Abhängigkeit ausgewählter Eingangsparameter und der dazugehörigen Luftdurchlässigkeit wird aufgestellt. Außerdem werden zwei Methoden zur Messung der Luftdurchlässigkeit ("Blower door" und "Tracer gas") beschrieben.

Schlüsselwörter:

Wohngebäude, Luftdurchlässigkeit, Energiesparen, Energieeffizienz

1. Uvod

Neposredna budućnost naše civilizacije najviše ovisi o osiguranju dovoljnih količina jeftine energije i zaštiti čovjekova okoliša. Osiguranje dovoljnih količina energije bazira se, između ostalog, na razvitku novih tehnologija korištenja obnovljivih i drugih izvora energije, ali i na racionalnoj potrošnji energije kojom raspolažemo. Pred nama stoji razrješenje vrlo složenog problema koji traži zadovoljenje sve većih svjetskih potreba za energijom, a istodobno smanjenje emisije stakleničkih plinova koji vrlo štetno djeluju na okoliš.

Primjeri uspješne racionalizacije uporabe energije kojom raspolažemo poznati su u različitim područjima ljudskog djelovanja. Svima je dobro poznat primjer automobilske industrije koja je u zadnja četiri desetljeća izvrsnim tehnološkim inovacijama uspjela smanjiti potrošnju goriva u automobilima za nekoliko puta s tendencijom daljnjih velikih ušteda.

Kada je u pitanju potrošnja energije u zgradama, situacija je nešto drugačija. Zgrade su složeni energetske sustavi i pojedinačno najveći potrošači energije koje u Europi troše više od 40 % ukupno proizvedene energije [1]. U jednom svom dijelu ta energija troši se nepotrebno jer zgrade građene prije više desetljeća ne odgovaraju standardima i današnjim propisima iz područja toplinske zaštite i energetske učinkovitosti zgrada. Problem je veći i zbog toga što će velik postotak takvih zgrada biti u funkciji još dugi niz godina i, ako se ne poduzmu određene mjere, nepotrebno će trošiti velike količine energije potrebne za grijanje, hlađenje, rad uređaja i rasvjetu.

Republika Hrvatska, kao nova članica Europske unije od 1. srpnja 2013., prihvatit će i provoditi sve rezolucije, deklaracije i direktive s ciljem unaprjeđenja energetske učinkovitosti u zgradarstvu. Rezolucija parlamenta Europske unije broj 2007/2016, od 31. siječnja 2008. u članku 29. navodi da će od 2011. godine pasivna kuća ili vrlo niskoenergetska gradnja postati standard građenja.

Postizanje dobre energetske učinkovitosti u zgradama nije moguće ostvariti bez primjene istih kriterija i u sustavnoj obnovi postojećih zgrada. Ostvarivanje načela racionalne uporabe energije u postojećim zgradama neposredno doprinosi arhitektonsko-energetskim zahtjevima suvremenog boravka u zgradama. Postizanje primjerene energetske učinkovitosti u zgradama posredno doprinosi i biološko-ekološkim zahtjevima jer se kroz ugodniji boravak doprinosi zdravlju ljudi, a kroz manju potrošnju energije ostvaruje se manja emisija CO₂ u atmosferu, što značajno doprinosi zaštiti okoliša.

Kontrolirana izmjena zraka je vrlo važan element u postizanju učinkovite energetske ravnoteže pasivnih kuća i niskoenergetskih zgrada. Za osiguranje odgovarajuće kontrolirane ventilacije iznimno je važna niska zrakopropusnost ovojnice prostorija u zgradama. Ventilacija je također važna sa stajališta potrošnje energije i ostvarivanja odgovarajuće toplinske udobnosti u zgradama. Unatoč važnosti ventilacije u zgradama, ne postoji dovoljno informacija o izmjenama zraka i zrakopropusnosti u

postojećim, pa čak ni u novim zgradama. Cilj je ovog rada stvaranje klasifikacije postojećih stambenih zgrada temeljem kategorizacije toplinskih svojstava najbitnijih elemenata omotača zgrada, materijala za nosivu konstrukciju, položaja stambenih jedinica u zgradi i perioda izgradnje. Ustanovljavanjem jasne klasifikacije vanjskih zidova i prozora stambenih zgrada omogućilo bi se određivanje reprezentativnog uzorka za mjerenje zrakopropusnosti.

Klasifikaciju zgrada potrebno je provesti na osnovi bitnih svojstava građevina, uključujući vrijeme izgradnje i energetske karakteristike omotača zgrade. Posebno važnu ulogu u klasifikaciji zgrada ima toplinska kvaliteta prozora, jer ventilacijski gubici topline kroz prozore predstavljaju vrlo važan element u analizi zrakopropusnosti ovojnice zgrade. Kvaliteta prozora u zgradama bitno se mijenjala u zadnjih stotinjak godina. Karakteristike tradicionalnih i starijih zgrada u regiji vrlo su slične, ali novije zgrade, građene u zadnjih nekoliko desetljeća, različitih su karakteristika.

Obradom podataka izmjerenih vrijednosti zrakopropusnosti za različite tipove stambenih zgrada, iz različitih perioda izgradnje, dobit će se prijeko potrebne informacije koje se mogu koristiti u budućim procesima sustavne obnove zgrada radi postizanja odgovarajuće energetske učinkovitosti u zgradama, primjerene toplinske udobnosti i preporuka Europske unije u tom području.

2. Klasifikacija odabranih elemenata omotača stambenih zgrada

Opća kvaliteta zgrada mijenjala se tijekom različitih razdoblja izgradnje u našoj regiji zavisno od klimatskih, gospodarskih, tehničko-tehnoloških i socioloških utjecaja. Osim toga, poseban utjecaj na kvalitetu imala je cijena energije potrebna za zagrijavanje i propisi iz područja toplinske zaštite zgrada koji se prvi put pojavljuju 1970. [2], a kasnije se sustavno nadopunjuju od 1980. godine [3].

Cjelovita buduća rekonstrukcija postojećih stambenih zgrada u funkciji postizanja primjerene energetske učinkovitosti treba se bazirati na utvrđivanju karakteristika elemenata zgrade. Jedna od glavnih karakteristika o kojoj ovisi potrošnja energije je zrakopropusnost omotača zgrade. Pod pojmom omotača zgrade podrazumijeva se više vrsta neprozirnih i prozirnih obodnih konstrukcija, odnosno elemenata koji dijele unutarnji grijani (hlađeni) od negrijanog (nehlađenog) ili vanjskog prostora. Svaka od tih obodnih konstrukcija doprinosi ukupnoj toplinskoj kvaliteti proporcionalno udjelu površine pojedine konstrukcije u ukupnoj površini omotača zgrade. Postojeće stambene zgrade značajno variraju u toplinskoj kvaliteti omotača zgrade. Toplinski gubici zgrade općenito ovise o koeficijentu transmisijskog toplinskog gubitka (U) i koeficijentu toplinskog gubitka provjetranjem.

Osim toplinske kvalitete omotača, na njegovu zrakopropusnost ima utjecaj i tehnologija izgradnje, izvedba spojeva različitih elemenata i proboji kroz omotač zbog vođenja instalacija.

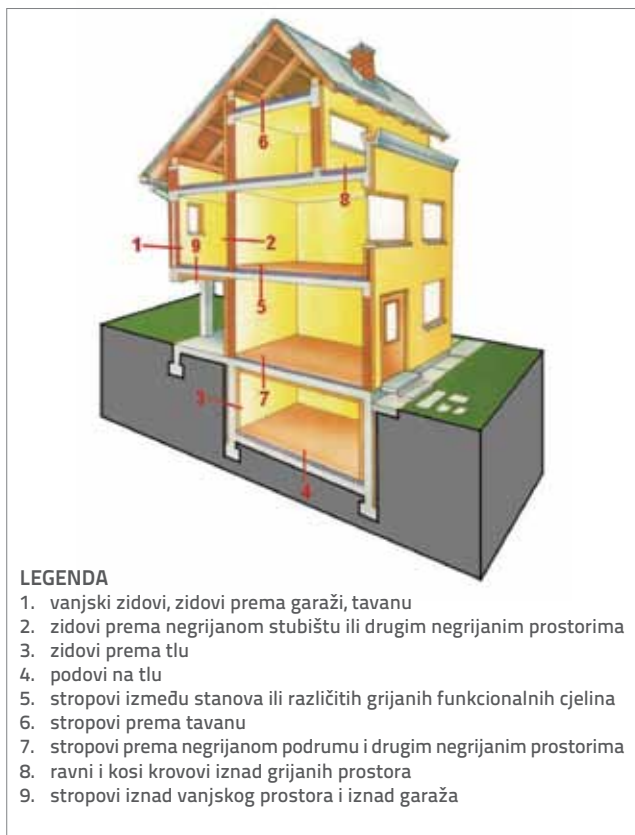
Ograničenja zrakopropusnosti omotača zgrade i ventiliranje prostora zgrade propisani su Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 76/2007 – članci 20-24) [7].

2.1. Toplinska kvaliteta neprozirnih dijelova omotača stambenih zgrada

Neprozirni dijelovi u pravilu čine veći dio ovojnice zgrade, što u postojećim stambenim zgradama najčešće iznosi oko 75-80 % njene ukupne površine. Najveći postotak površine omotača zgrada čine vanjski zidovi, što je logično, jer sa četiri od šest strana dijele unutarnji prostora od vanjskoga. Naslijeđeni stambeni fond u zgradama koje su u funkciji ima vrlo različite kvalitete omotača zgrada.

Položaj svakog od elemenata koji čini omotač zgrade posebno je definiran jer ima različite fizikalne karakteristike u načinu vođenja, odnosno prolaska topline. Ta razlika između građevinskih elemenata prema položaju u zgradi važna je i za zrakopropusnost. Postoji bitna razlika u pogledu zrakopropusnosti elemenata koji mogu biti izloženi jakim zračnim strujanjima (krov, vanjski zidovi) od elemenata koji su zaštićeni svojim položajem u zgradi od zračnih strujanja (podovi na tlu, zidovi prema tlu).

Teorijski omotač stambene zgrade prema položaju može činiti devet različitih obodnih elemenata kako je prikazano na slici 1.

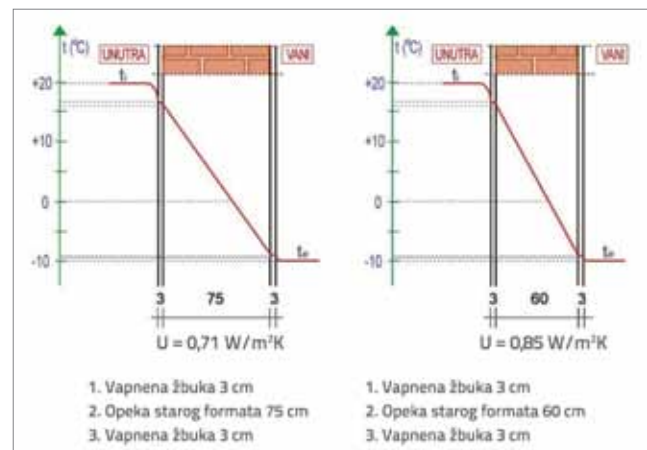


Slika 1. Omočač stambene zgrade

Analiza sastava najčešće izvođenih vanjskih zidova u kontinentalnom dijelu Hrvatske, u različitim periodima izgradnje, može dovesti do klasifikacije toplinske kvalitete neprozirnih dijelova omotača postojećih stambenih zgrada. Kameni vanjski zidovi stambenih zgrada u primorskom dijelu Republike Hrvatske zbog svojih tradicionalnih osobitosti nisu predmet analiza u ovom radu.

2.1.1. Period izgradnje prije 1900. godine

Ovaj period izgradnje karakteriziraju relativno debele konstrukcije vanjskih zidova što je posljedica tadašnjeg tehničko-tehnološkog stupnja razvitka u izvedbi stambenih zgrada. Izvedba vanjskih zidova u kontinentalnom dijelu Hrvatske bila je gotovo isključivo od obostrano žbukane pune opeke. Debljine vanjskih zidova najčešće su bile 75 ili 60 cm, što je postignuto uporabom opeke starog formata. Rezultat takve gradnje bila je dobra toplinska kvaliteta zidova jer je njihova debljina pridonijela relativno dobrim koeficijentima prolaska topline "U" koji su na granici zadovoljenja najvećih dopuštenih vrijednosti i po današnjim propisima. Na slici 2. nacrtane su temperaturne krivulje vanjskih zidova u zimskom periodu s pripadajućim koeficijentima prolaska topline "U" za konstrukciju dva najizvođenija vanjska zida iz tog perioda.

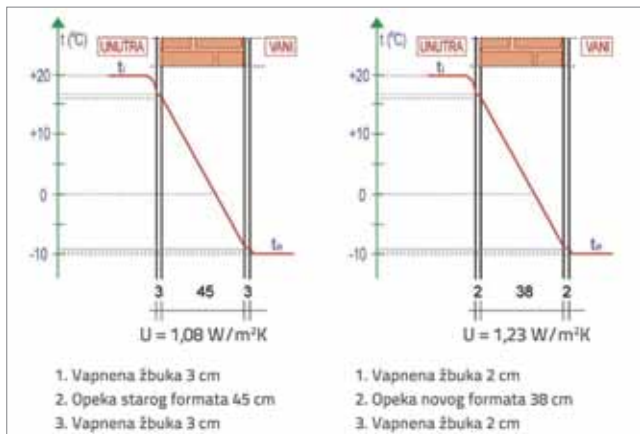


Slika 2. Tipični vanjski zidovi prije 1900. godine

2.1.2. Period izgradnje 1901.-1945. godine

Tehnološki napredak tijekom izgradnje zgrada u ovom periodu uvjetovao je izvedbe tanjih vanjskih zidova od opeke što je rezultiralo slabijom kvalitetom u toplinskom smislu. Pred kraj perioda u izvedbu se uvodi opeka novog formata (25x12x6,5 cm) što također uvjetuje izvedbu tanjih vanjskih zidova od opeke (slika 3.).

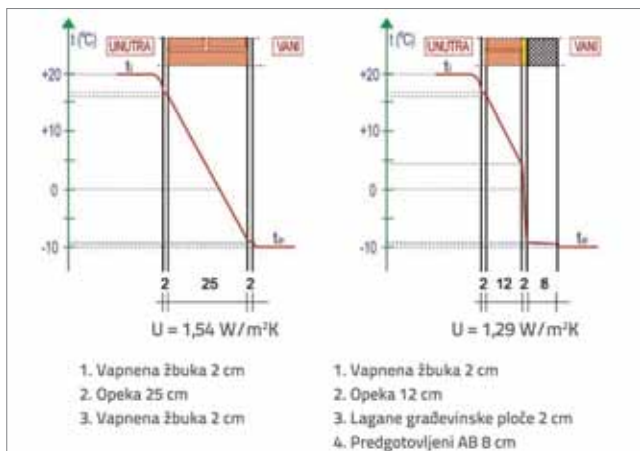
Uobičajena konstrukcija vanjskog zida debljine jedne i pol opeke smanjila se sa 45 na 38 cm debljine nakon uvođenja opeke novog formata oko 1930. godine.



Slika 3. Tipični vanjski zidovi od 1901. do 1945. godine

2.1.3. Period izgradnje 1946.-1975. godine

Daljnji tehnički i tehnološki napredak u izgradnji zgrada, te široka primjena armiranog betona, rezultirali su iskorištenjem materijala, u statičkom smislu, do krajnjih granica. Posljedice su bile izvedbe vrlo tankih konstrukcija nosivih zidova koje su u toplinskom smislu vrlo loše. Takve izvedbe obodnih konstrukcija, najčešće bez ikakve toplinske izolacije, bile su posljedica vrlo jeftine energije potrebne za zagrijavanje zgrada i nepostojanje primjerenih propisa iz područja fizike zgrada.



Slika 4. Tipični vanjski zidovi od 1946. do 1975. godine

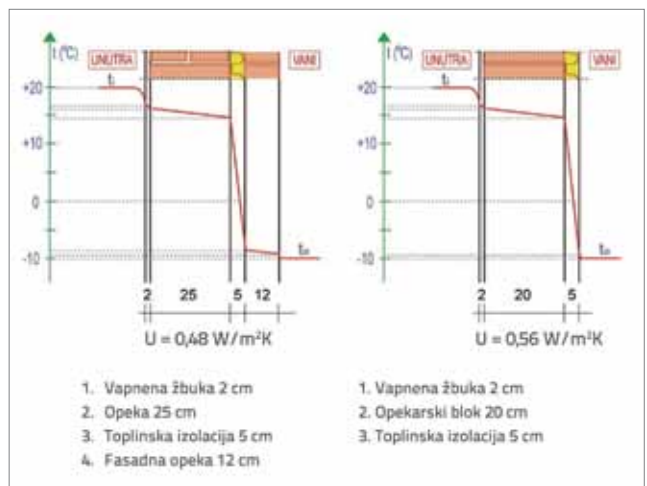
Ishod ovakvog načina gradnje bio je niz izvedenih zgrada s vrlo lošim toplinskoizolacijskim svojstvima. Na slici 4. prikazane su temperaturne krivulje i vrlo visoki koeficijent prolaska topline "U" najčešće izvedenih vanjskih zidova. Drugi primjer predstavlja često izvođeni montažni parapetni zid u višestambenim zgradama. Ostale obodne konstrukcije izvođene u tom periodu također su bile vrlo loše u toplinskom smislu. Tijekom 60-ih i do sredine 70-ih godina prošlog stoljeća izgrađen je velik broj stambenih zgrada s lošim toplinskoizolacijskim svojstvima. Produkcija zgrada upravo je u tom periodu bila na vrlo visokim razinama. Značajan

udjel u potrošnji energije za grijanje imaju stambene zgrade starije od 50 godina. Te zgrade prema procjenama godišnje troše 230-250 kWh/m² energije, a čine oko 20 % ukupnog stambenog fonda [4].

Velik problem je u tome što će te zgrade još dugi niz godina biti u uporabi. Ako se na njima ne obavi rekonstrukcija, odnosno izvedba dodatnih slojeva toplinske izolacije, svaka od tih zgrada trošiti će nepotrebno vrlo velike količine energije za grijanje u zimskom i hlađenje u ljetnom periodu. Vanjski zidovi zgrada iz tog perioda imaju u prosjeku čak 4 do 5 puta lošiju toplinsku izolaciju u odnosu na onu koja se izvodi danas. Mali broj tih zgrada do danas je rekonstruiran s bitnim poboljšanjem toplinske izolacije. To svakako upućuje na zaključak da se sustavnom obnovom omotača ovih zgrada u toplinskom smislu mogu ostvariti vrlo velike uštede energije, čime se može značajno pridonijeti racionalnoj potrošnji energije kojom raspolazemo.

2.1.4. Period izgradnje 1976.-1985. godine

Porast cijena energije uzrokovan prvim i drugim naftnim šokom tijekom sedamdesetih godina i pojava prvih sustavnih propisa s obveznom primjenom iz područja toplinske zaštite zgrada uvjetovali su primjerenije izvedbe zgrada u ovom periodu [2]. Iako je predmetni Pravilnik donesen 1970., još uvijek su se sve do 1975. godine zbog započete procedure izdavanja dozvola realizirale stambene zgrade gotovo bez toplinske izolacije. Prikladnija izvedba vanjskih zidova u ovom periodu neizostavno uključuje postavu zasebnih slojeva toplinske izolacije od pogodnih materijala. Najčešće su to ekspanzirani polistireni, kamena ili staklena vuna s koeficijentom toplinske provodljivosti λ približno 0,041 W/mK.

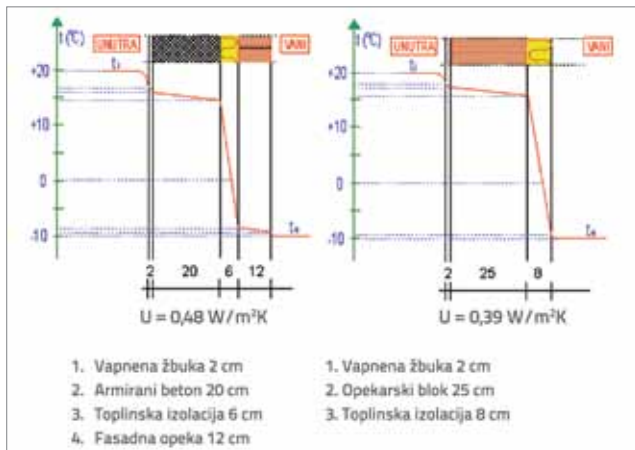


Slika 5. Tipični vanjski zidovi od 1976. do 1985. godine

2.1.5. Period izgradnje 1986.-2000. godine

Ovaj period izgradnje karakterizira daljnji skokovit rast cijena energije i sustavno donošenje sve zahtjevnijih propisa iz

područja toplinske zaštite zgrada. Tijekom ovog perioda dolazi do podizanja svijesti investitora o neupitnoj potrebi izvođenja toplinske zaštite obodnih konstrukcija zgrade. To je često značilo realizaciju zgrada s uvelike, u toplinskom smislu, primjerenijim obodnim elementima od onih propisanih zakonskim odrednicama. Uzrok tome bili su sve skuplji energenti i nestašice goriva sredinom 80-ih godina prošlog stoljeća.



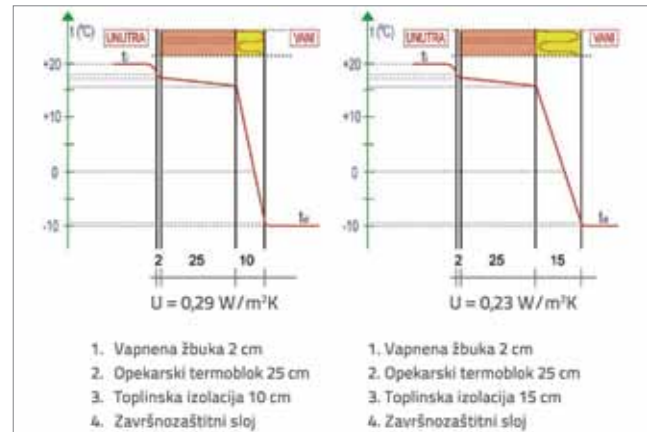
Slika 6. Tipični vanjski zidovi od 1986. do 2000. godine

2.1.6. Period izgradnje 2001. do danas

Zadnjih desetak godina u izgradnji zgrada u regiji znatno se podigla razina kvalitete izvedbe obodnih elemenata zgrade u toplinskom smislu. Na to je značajno utjecao novi Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama iz 2005. [6] koji, osim sveobuhvatno propisane toplinske zaštite zgrada, prvi put uvodi i izračun toplinskih dobitaka od Sunčevog zračenja i unutarnjih izvora topline koji smanjuju potrebu za toplinskom energijom zgrade u jednoj prosječnoj sezoni grijanja.

Europski propisi i norme motivirali su veći broj investitora i projekatnata zgrada da projektiraju i izvedu zgrade mnogo boljih toplinskoizolacijskih svojstava od onih koje propisuje Tehnički propis iz 2005. To se prije svega odnosi na izvedbu niskoenergetskih i pasivnih kuća koje predstavljaju početne korake u izvedbi energetski vrlo učinkovitih zgrada. Obodne konstrukcije takvih zgrada imaju zasebne slojeve toplinske izolacije debljine od 15 do 30 cm, što višestruko premašuje propisane minimalne uvjete toplinske zaštite. Na slici 7. prikazane su temperaturne krivulje za najviše izvođene sastave vanjskih zidova u ovom periodu izgradnje.

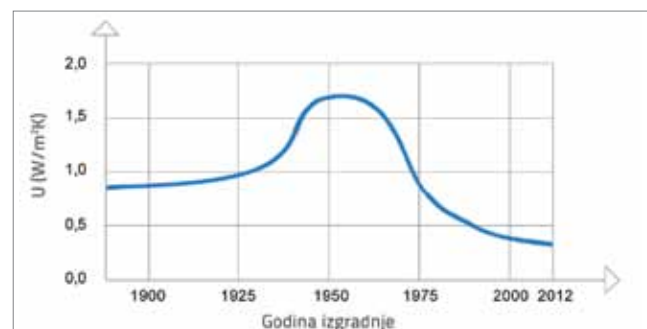
Pojedine realizacije iz ovog perioda predstavljaju prve primjere novog sveobuhvatnog multidisciplinarnog projektantskog pristupa u izvedbi zgrada s vrlo malom ili nikakvom potrošnjom energije potrebne za grijanje. U takvim se zgradama po prvi put sustavno projektira ovojnica zgrade u pogledu zrakopropusnosti, što je osnovni preduvjet kontrolirane ventilacije.



Slika 7. Tipični vanjski zidovi od 2001. do danas

U ovom periodu izgradnje počinje se izvoditi sve više zgrada koje koriste različite vrste obnovljivih izvora energije, čime započinje nova era u projektiranju i izvedbi energetski vrlo učinkovitih stambenih zgrada. Takvim pristupom u izgradnji zgrada značajno se doprinosi osnovnim zahtjevima održivog razvitka, štednji energije i zaštiti čovjekova okoliša.

Analiza toplinske kvalitete izvedenih vanjskih zidova zgrada u zadnjih stotinjak godina na prethodnim primjerima pokazuje vrlo velike oscilacije. Grafički prikaz promjene prosječne kvalitete toplinske zaštite vanjskih zidova kroz različite periode izgradnje predočen je na slici 8.



Slika 8. Promjena toplinske kvalitete vanjskih zidova

2.2. Toplinska kvaliteta prozirnih dijelova omotača stambenih zgrada

Pod pojmom prozirnih obodnih konstrukcija zgrade, osim prozora, misli se na sve elemente omotača zgrade koji propuštaju svjetlo (fiksna ostakljenja, nadsvjetla, balkonska vrata i sl.). Na toplinsku kvalitetu prozora najviše utječu sljedeći elementi:

- broj staklenih ploha i debljine zračnih slojeva između prozirnih materijala (transmisijski gubitak topline)
- materijal od kojeg je napravljen okvir i način spajanja elemenata okvira (transmisijski gubitak topline)
- prianjanje pokretnih elemenata uz fiksne elemente ili dobro brtvljenje (ventilacijski gubici topline)

Toplinska kvaliteta prozora ugrađivanih u stambene zgrade zadnjih stotinjak godina značajno se mijenjala. To se posebno odnosi na zadnjih nekoliko desetljeća tijekom kojih je koeficijent prolaska topline "U" za prozore smanjen s prosječnih 3,0 na 0,7 W/m²K, što je norma za pasivne i niskoenergetske kuće. U tehničkom usavršavanju izvedbe prozora značajnu su ulogu imali i materijali za izvedbu okvira prozora, vrste stakla i njihova obrada, te zatvoreni zračni prostori između staklenih ploha kasnije punjeni raznim vrstama plinova. Pregled različitih tipova prozora ugrađivanih u stambene zgrade koji slijedi, ilustrira veliku razliku u toplinskoj kvaliteti i zrakopropusnosti. Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [7] propisuje razrede zrakopropusnosti prozora, vrata i krovnih prozora prema normi HRN EN 12207.

2.2.1. Jednostruki prozor

Ugradnja prozora s jednostrukim ostakljenjem u stambenim zgradama vrlo je rijetka, a izvodila se samo u vrlo malim i pomoćnim objektima. Ta vrsta prozora također se može naći u starijim zgradama u sklopu pomoćnih prostorija (izbe, spremišta, zahodi i sl.). Toplinska kvaliteta jednostrukih prozora je vrlo slaba, a koeficijent prolaska topline "U" varira od 5,0 do 6,0 W/m²K zavisno od materijala upotrijebljenog za okvir i vrste stakla (slika 9).



Slika 9. Horizontalni presjek jednostrukog dvokrillnog prozora s jednostrukim ostakljenjem

2.2.2. Dvostruki prozor

Dvostruki prozor s drvenim okvirom bio je standardni način izvedbe prozora u stambenim zgradama sve do sredine 20. stoljeća. Dvostruki prozor sastoji se od dvaju jednostrukih prozora s po jednim staklom, spojenih u cjelinu pomoću sastavljenog doprozornika. Krila se otvaraju prema unutra, iako su se kod prvih konstrukcija unutrašnja krila otvarala prema unutra, a vanjska prema van, što je vidljivo na starijim zgradama. Toplinska kvaliteta dvostrukih prozora je slaba, a najčešće je $U=2,4$ W/m²K. Materijal upotrebljen za izradu doprozornika izvodio se gotovo isključivo od drva (slika 10.).



Slika 10. Horizontalni presjek dvostrukog dvokrillnog prozora

2.2.3. Spojni prozor (krilo na krilo)

Prozor sa spojenim krilima je prijelazni oblik između dvostrukog i jednostrukog IZO prozora. Ugrađivan je u različitim varijantama tijekom 60-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća u vrlo velikom broju stambenih zgrada. Toplinska kvaliteta jednostrukih prozora je slaba, a koeficijent prolaska topline "U" varira od 2,7 do 3,3 W/m²K [5] zavisno od materijala za okvir i vrste stakla (slika 11.).



Slika 11. Horizontalni presjek spojnog dvokrillnog prozora

2.2.4. Jednostruki prozor s IZO (dvostrukim) staklom

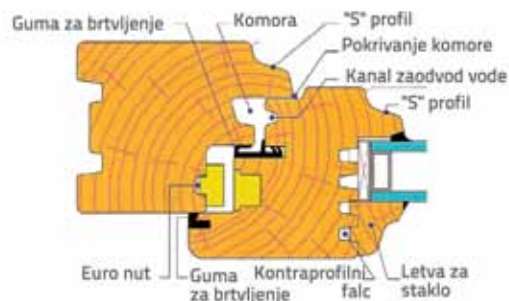
Jednostruki prozor s IZO (dvostrukim) staklom je novija konstrukcija koja je nastala kao odgovor na sve veće zahtjeve u pogledu toplinske zaštite zgrada koji se sustavnije donose u dva navrata 1980. i 1987. godine (slika 12.).



Slika 12. Horizontalni presjek jednostrukog prozora s IZO ostakljenjem

Većina se ovakvih prozora ugrađivala u stambene zgrade tijekom 80-ih i 90-ih godina prošlog stoljeća. Toplinska kvaliteta je varirala zavisno od kvalitete okvira i kvalitete materijala upotrijebljenih za ostakljenje. Najviše ugrađivani spojni prozor imao je drveni okvir i dvostruko IZO staklo sa zatvorenim zračnim slojem (4+12+4). Koeficijent prolaska topline "U" za ugrađeni prozor iznosio je od 2,9 do 3,4 W/m²K što je ovisilo o materijalu okvira [5].

Intenzivan razvoj tehnologije proizvodnje prozora rezultirao je značajnim podizanjem ukupne kvalitete, što se posebno odnosi na brtvljenje, odnosno veliko smanjenje ventilacijskih gubitaka topline kroz spojnice prozora (slika 13.).



Slika 13. Detalj drvenog prozora s IZO staklima

Današnje izvedbe drvenih prozora s dvostrukim IZO ostakljenjem značajno su poboljšane u smislu toplinske

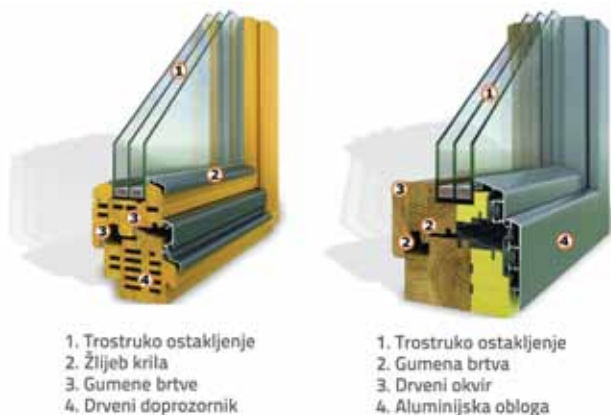
kvalitete. Novi propisi nalažu zasebnu provjeru toplinske kvalitete ostakljenja prozora i okvira, ali i distancera, odnosno letvica za IZO staklo. U posljednje je vrijeme, radi sprječavanja prekomjernih gubitaka topline iz zgrada, došlo do značajnih poboljšanja u izvedbi prozora. Primjenom novih materijala, kao što su niskoemisijски (low-e) premazi i ispune inertnim plinovima, koeficijent prolaska topline U_g za staklene površine smanjio se na prihvatljivih 1,2 do 1,4 W/m²K [1]. Važnu ulogu u postizanju dobrih toplinskoizolacijskih svojstava imaju okviri prozorskih krila i doprozornici. Na slici 14. prikazan je presjek kroz suvremeni drveni prozor s dvostrukim IZO ostakljenjem čija je vrijednost koeficijenta prolaska topline $U = 1,2$ W/m²K.



Slika 14. Detalj drvenog prozora s IZO ostakljenjem

2.2.5. Prozori s trostrukim ostakljenjem

Tehnološki napredak u proizvodnji prozora dodatno su poticali zahtjevi za izvedbom niskoenergetskih i pasivnih kuća. Pri tome je ustanovljeno da klasično ostakljenje dvoslojnim staklom ne može osigurati stroge zahtjeve toplinske izolacije takvih zgrada. Za izvedbu pasivnih kuća posebno su proizvedeni prozori s troslojnim toplinskoizolacijskim ostakljenjem (slika 15.a) s U_g do najviše 0,7 W/m²K. Prolazak topline stakla U_g mjeri se u sredini vrlo velike površine tako da na izmjerenu vrijednost ne utječu učinci rubova stakla, prozorski okvir i način ugradnje. Zračne šupljine unutar doprozornika i drvenog okvira prozorskog krila dodatno doprinose njihovom smanjenom vođenju topline.



Slika 15. Detalj drvenog prozora s trostrukim ostakljenjem: a) bez toplinskog zaštitnog okvira; b) s toplinskom zaštitom okvira

Poboljšanje toplinskoizolacijskih svojstava ostakljenja postiglo se tako da prostor između dva stakla ispunjava plemeniti plin, najčešće argon ili kripton. Poboljšanja okvira prozora (doprozornik i okvir krila) izvode se ugradnjom dodatanih slojeva toplinske izolacije koja s vanjske strane štiti okvire od drva, aluminijske ili PVC-a (slika 15.b). Za tu namjenu koriste se celulozna ili drvena vlakna, poliuretanska pjena i slični materijali.

2.2.6. Prozori s četverostrukim ostakljenjem

Daljnji razvoj u proizvodnji stvorio je i prozore s četverostrukim ostakljenjem. Jedan od takvih primjera prikazan je na slici 16. Nešto prošireni vanjski zračni sloj kod ovog prozora omogućuje ugradnju venecijaner aluminijskih roleta kao zaštite od sunca koja se postavlja između staklenih ploha.

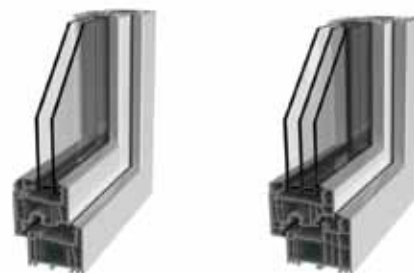


1. Četverostruko ostakljenje
2. Aluminijska žaluzija
3. Gumene brtve
4. Drveni okvir
5. Aluminijska obloga

Slika 16. Drveni prozor s četverostrukim ostakljenjem

2.2.7. Prozori s PVC okvirima

Tijekom dvadesetak godina u stambenim su zgradama ugrađivani i prozori od PVC okvira. U početku bili su to prozori samo manjih dimenzija s lošim toplinskoizolacijskim svojstvima. Uporabom primjerenijih materijala i kombiniranjem PVC profila sa metalnim ojačanjima, te uporaba profila sa prekinutim toplinskim mostovima doveli su do široke primjene PVC prozora danas. Toplinske karakteristike mijenjale su se i neprestano usavršavale. Tehnički podaci jednog referentnog domaćeg proizvođača PVC prozora pokazuju da prozor s dvostrukim ostakljenjem ima ukupni $U_w = 1,0$ W/m²K, a prozor s trostrukim ostakljenjem ima $U_w = 0,83$ W/m²K (slika 17.).

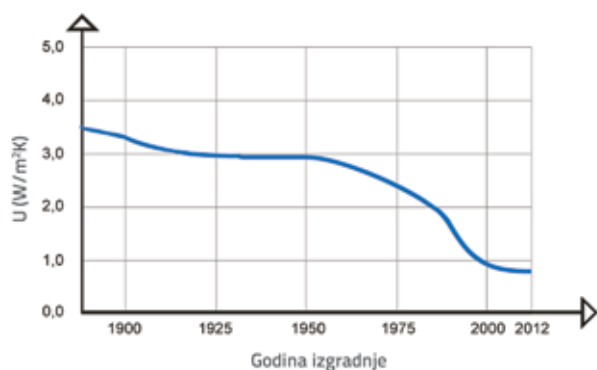


Slika 17. Detalji PVC prozora

Svi prethodni primjeri prozora sa svojim pripadajućim vrijednostima koeficijenta prolaska topline "U" navedeni su

teorijski. Situacija u stvarnosti je lošija jer se drvo okvira s vremenom rasuši, prozorska krila i doprozornici više dobro ne brtve, a može i puknuti staklo ili se odvojiti od okvira pa se toplinska kvaliteta dosta umanjuje. Procjenjuje se da dugotrajna uporaba prozora s vremenom može izazvati manja oštećenja koja povećavaju koeficijent prolaska topline "U" i do 20 %.

Analiza toplinske kvalitete prozora ugrađenih u stambene zgrade tijekom zadnjih stotinjak godina pokazuje na prethodnim primjerima pokazuje kontinuirani trend poboljšanja, što se posebno odnosi na zadnja dva desetljeća. Aproximativni grafički prikaz promjene prosječne toplinske kvalitete prozora kroz različite periode izgradnje prikazan je na slici 18.



Slika 18. Promjena toplinske kvalitete prozora

2.3. Utjecaj položaja i orijentacije stambene jedinice u zgradi

Mjerenje zrakopropusnosti u višestambenim zgradama može se provesti za cijelu zgradu ili pojedinačno za svaku stambenu jedinicu. Pri tome je dosta bitan položaj stana u odnosu na ovojnicu zgrade. Stan u zgradi može biti smješten tako da ima samo jedan vanjski zid, a može biti čak 4 ili 5 obodnih konstrukcija stana koje dijele vanjski ili negrijani prostor od unutrašnjeg grijanog prostora (slika 19.).



Slika 19. Prostorni položaj stana u zgradi

Za potrebe mjerenja zrakopropusnosti najbolje je izračunati koliki postotak ukupne površine ovojnice stana čine obodne konstrukcije koje dijele grijani od negrijanog prostora. Teorijski kod samostojeće obiteljske kuće s negrijanim podrumom to može iznositi i sto posto

Za zrakopropusnost pojedine stambene jedinice važna je i orijentacija prema stranama svijeta. Izloženost vjetru pojedinih obodnih elemenata stana može bitno utjecati na izmjerene vrijednosti zrakopropusnosti. Tijekom mjerenja potrebno je voditi računa o temperaturnoj razlici i brzini vjetra i napraviti korekcije dobivenih rezultata, ako je potrebno, sukladno normi [12]. Pojava vjetra ne mora biti uzrokovana samo mjesnim klimatskim prilikama. Uzrok vjetra odnosno pojačanog strujanja zraka može biti i visina pojedine etaže kao i položaj susjednih zgrada u neposrednoj blizini, kao i konfiguracija terena.

3. Mjerenje zrakopropusnosti u zgradama

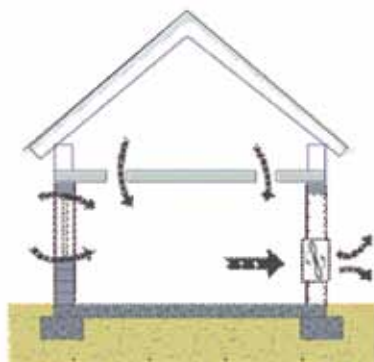
Pojam zrakopropusnosti označava intenzitet nekontroliranog protjecanja zraka kroz ovojnicu u zgradu ili izvan nje zbog razlike tlakova unutarnjeg i vanjskog zraka. Nekontrolirano protjecanje zraka može se ostvariti kroz reške, spojeve različitih materijala, dilatacije i na drugim propusnim mjestima u ovojnici zgrade. Pouzdano mjerenje zrakopropusnosti u zgradama najčešće se izvodi pomoću dvije različite metode: metodom razlike tlakova ("Blower door") i metodom "Tracer gas".

3.1. Metoda razlike tlakova ("Blower door")

Za mjerenje zrakopropusnosti najčešće se primjenjuje metoda razlike tlakova ("Blower door"), a primjena metode je detaljno opisana normom HRN EN 13829:2002 koju propisuje Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 110/08) [7]. Istraživanja navode da zrakopropusnost pokazuje karakteristike sezonske varijabilnosti. Najveće propuštanje zraka objekti pokazuju zgrade zimi i u rano proljeće, a najmanje u kasno ljeto [8]. Utjecaj varijabilnih vanjskih čimbenika na propuštanje zraka iz zgrada i u zgrade u prirodnim uvjetima dovodi do niza značajnih problema. Izmjereni rezultati su teško ponovljivi i nije ih moguće usporediti s rezultatima mjerenja koji nisu napravljeni u istim vremenskim uvjetima. Iz tog razloga je uvedeno mjerenje u uvjetima pozitivne ili negativne razlike tlakova, jer razlika tlakova smanjuje utjecaj vanjskih čimbenika na rezultate mjerenja.

Ime metode ("Blower door") proizlazi iz činjenice da se tehnologija mjerenja bazira na primjeni jakog ventilatora (blower) koji se montira na okvir ulaznih vrata (door) i najčešće usisava (ispuhuje) zrak iz unutrašnjeg prostora zgrade stvarajući podtlak (slika 20.), ali moguća je i primjena stvaranjem nadtlaka u mjernom području. Prva mjerenja zrakopropusnosti primjenom razlike tlakova napravljena su

u Švedskoj [10], ali ventilator je bio montiran na okvir prozora, a ne na okvir vrata. Oprema za metodu "Blower door", kakva se načelno koristi i danas, usavršio je znanstveni tim na Princeton University [10].



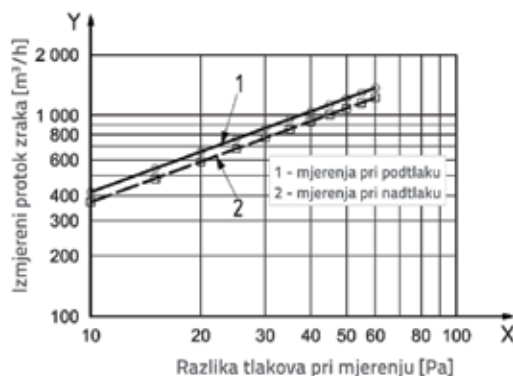
Slika 20. "Blower door" metoda [9]

Mjerenja protoka zraka izvode se u nekoliko točaka razlike tlakova u rasponu od minimalno 10 Pa do 100 Pa. Za pojedinačne stanove i manje zgrade potrebno je napraviti mjerenja pri razlikama tlakova do barem 50 Pa, ali preporuka je da se naprave mjerenja i za veće tlačne razlike (do 100 Pa), jer daju veću točnost izmjerenih rezultata. Za velike zgrade u kojima se ne može postići propisana razlika tlakova (50 Pa), minimalno su prihvatljivi rezultati mjerenja pri tlačnoj razlici od 25 Pa [12]. Normizacija metode mjerenja [12] i preporučena razlika tlakova koja se smatra referentnom, iako nije obvezna (u Švicarskoj i Francuskoj primjenjuju se manje razlike tlakova), usvojena je s ciljem da rezultati mjerenja budu usporedivi i ponovljivi. Pri maloj razlici tlakova rezultati mjerenja volumnog protoka zraka pokazuju značajnu osjetljivost na vanjske vremenske karakteristike. Razlika tlakova od 50 Pa odabrana je zato što visoka tlačna razlika minimizira utjecaje vanjskih karakteristika na mjerne rezultate kao što su utjecaj sezonske varijabilnosti i vjetra [10].

Rezultati mjerenja na terenu pokazuju da će izmjereni protok zraka pri standardnoj razlici tlakova za zgrade slične kvalitete vanjske ovojnice, ali različite veličine, biti različit [10]. Da bi se izbjegla moguća pogreška u ocjeni, uvodi se normizacija, odnosno računa se protok zraka po jedinici površine ovojnice, što omogućava direktnu usporedbu zgrada različite veličine. Sukladno normi [12] preporuka je napraviti dva skupa izmjerenih podataka protoka zraka na istoj zgradi (stambenoj jedinici) i to pri podtlaku i nadtlaku, ali prihvatljiv je i jedan skup izmjerenih podataka pri podtlaku ili nadtlaku. Primjer grafičke interpretacije izmjerenih rezultata protoka zraka prikazan je na slici 21.

Metodom "Blower door" mjeri se zrakopropusnost zgrade ili njezinih dijelova, a može poslužiti za usporedbu različitih zgrada ili usporedbu projektirane i izvedene zrakopropusnosti ovojnice zgrada. Također može poslužiti za dijagnosticiranje problema nekontroliranog protoka zraka, ali ovom metodom

taj protok nije direktno mjerljiv. Za određivanje mjesta najveće propusnosti potrebno je primijeniti dodatne ispitne metode (kao što je dim, infracrvena kamera i dr.).



Slika 21. Primjer grafičke interpretacije rezultata mjerenja [12]

3.2. "Tracer gas" test

"Tracer gas" test služi kao dijagnostička metoda različite primjenjivosti, a u ovom slučaju za posredno određivanje nekontroliranog protoka zraka u promatranim stambenim jedinicama. "Tracer gas" test provodi se u normalnim uporabnim uvjetima zgrade, pa se rezultati mogu interpretirati i uspoređivati samo uz navedene vrijednosti utjecajnih vanjskih parametara, kao što su vjetar, insolacija, temperatura [11].

"Tracer gas" test baziran je na mjerenju koncentracije plina. Odabrani plin mora zadovoljiti sljedeće uvjete:

- sigurnost: ne smije biti opasan za ljude i imovinu i ne smije utjecati na aktivnosti koje se obavljaju u blizini zone mjerenja, što znači da mora biti nezapaljiv, neotrovan i hipoalergijski
- inertnost (nereaktivnost): ne smije stupati u kemijske ili fizikalne reakcije ni sa čime u području mjerenja ili izvan njega
- nesenzibilnost: ne smije utjecati na one pokazatelje koji su predmet mjerenja, kao što su protok zraka ili gustoća zraka
- unikatnost: ne smije biti plin kojega ima u normalnim okolnostima u atmosferi, da bi se mogla detektirati njegova prisutnost i u malim koncentracijama
- mjerljivost: koncentracija mora biti mjerljiva postojećim uređajima.

Uspješna primjena "Tracer gas" testa i korištenje dobivenih rezultata u funkciji je ispunjenosti osnovnih preduvjeta. Mjerna zona ne smije biti u direktnoj vezi s otvorenim prostorom (otvoreni prozori, vrata itd.). Plin koji se koristi u testu mora biti dobro raspršen i homogen što znači da njegova koncentracija u zoni mjerenja mora biti ujednačena. Osnovni razlog koji dovodi do pogrešaka u mjerenju je nedovoljna izmiješanost i raspršenost plina čija se koncentracija u mjernoj zoni detektira.

Mjerenje protoka zraka u promatranoj stambenoj jedinici ili zgradi izvodi se najčešće primjenom jedne od ovih metoda:

- postigne se određena koncentracija plina i mjeri se opadanje koncentracije plina u funkciji vremena
- konstantnim priljevom plina mjeri se povećanje koncentracije plina u funkciji vremena
- održava se konstantna koncentracija plina, a mjeri se količina plina u funkciji vremena koja je potrebna za održavanje konstantne koncentracije.

Iz dobivenih rezultata mjerenja koncentracije plina dobiva se količina zraka koja se infiltrirala u mjernu zonu u promatranom vremenu.

4. Diskusija

Postavljena je hipoteza da je zrakopropusnost u korelaciji s toplinskom kvalitetom vanjskih zidova i prozora koji su analizirani u ovom radu. Toplinska kvaliteta pokazuje značajnu varijabilnost za spomenute elemente ovojnice zgrada u različitim periodima izgradnje koji su karakteristični za građevinsko nasljeđe u lokalnim uvjetima. Dosadašnja istraživanja su pokazala da na zrakopropusnost (koeficijent infiltracije) utječu konstrukcijske karakteristike zgrade, okoliš, starost zgrade i klimatski uvjeti [13]. Mjerenja su pokazala da manju zrakopropusnost imaju masivne nego li drvene i lagane konstrukcije zgrada [14]. Prema analizama, napravljenim u ovom radu, toplinske kvalitete dijelova ovojnice zgrada u različitim periodima izgradnje opisane su kroz koeficijente prolaska topline U (W/m^2K) za vanjske zidove zgrada, prikaz u dijagramu na slici 8., a za prozore u dijagramu na slici 18.

Kako bi se omogućio realan uvid u postojeće stanje energetske karakteristike zgrada koje se koriste i u današnjim uvjetima, neophodno je provesti terensko mjerenje zrakopropusnosti karakterističnih stambenih jedinica. Mjerenje je potrebno provesti na reprezentativnom uzorku, koji će najbolje predstavljati karakteristike gradnje u lokalnoj sredini. Nakon provedenih mjerenja zrakopropusnosti i nakon analize rezultata moći će se izraditi kvalitetne smjernice za rekonstrukciju određenih kategorija zgrada radi povećanja energetske učinkovitosti.

Pri planiranju eksperimentalnog dijela istraživanja potrebno je razmotriti nekoliko metoda za odabir optimalnog reprezentativnog uzorka na kome će biti provedeno mjerenje zrakopropusnosti. Za provedbu ispitivanja potrebno je odabrati ulazne parametre (faktore) koji su u korelaciji sa zrakopropusnošću. Promatrani parametri su koeficijenti prolaska topline neprozirnih i prozirnih elemenata ovojnice zgrada i položaj stambene jedinice u odnosu na vanjsku ovojnicu zgrade. Za odabrane ulazne parametre, prema rezultatima analize koja je prikazana u okviru ovog rada, definirane su donje i gornje razine koeficijenta prolaska topline za promatrane periode

izgradnje, kao što je vidljivo iz tablice 1. Položaj promatrane stambene jedinice u odnosu na ovojnicu zgrade opisuje se izrazom $P_v/P_u \cdot 100$ (%), pri čemu je P_v površina vanjske ovojnice koju ima stambena jedinica, a P_u ukupna površina ovojnice promatrane stambene jedinice.

Na temelju odabranih graničnih vrijednosti (razina) parametara definiranih u tablici 1. može se odabrati optimalni plan eksperimentalnog terenskog istraživanja kako bi se uz što manji broj provedenih terenskih mjerenja dobio što veći broj pouzdanih informacija na kojima će se temeljiti model promatrane zrakopropusnosti. Za predikciju zrakopropusnosti potrebno je istražiti i mogućnost primjene neuralnih mreža.

Tablica 1. Odabrani ulazni parametri i pretpostavljene granične vrijednosti za planiranje eksperimenta

Ulazni parametri	Granične vrijednosti
Koeficijent prolaska topline za vanjske zidove U (W/m^2K)	0,25 – 1,8
Koeficijent prolaska topline prozora U (W/m^2K)	0,7 – 3,5
Položaj stambene jedinice u odnosu na ovojnicu zgrade	10 - 100 %

5. Zaključak

Kontrolirana izmjena zraka je vrlo važan element u postizanju energetske učinkovitosti nisko-energetskih zgrada, kojima se u današnjim uvjetima teži. Za osiguranje odgovarajuće kontrolirane ventilacije značajna je karakteristika zrakopropusnosti stambenih jedinica u zgradama. U radu je napravljena analiza i rekapitulacija toplinske kvalitete za različite periode izgradnje, opisane kroz koeficijent prolaska topline U (W/m^2K) za odabrane dijelove omotača stambenih zgrada i građevinskog nasljeđa u lokalnoj sredini. Temeljem rezultata analize odabrani su ulazni parametri za koje je postavljena hipoteza da su u korelaciji sa zrakopropusnošću. Odabrani parametri i ukupne donje i gornje razine osnova su za planiranje eksperimenta kroz matematičko modeliranje odabranih parametara i optimizaciju broja mjerenja zrakopropusnosti.

Na osnovi analize odabranih parametara (omotač zgrade i položaj stambene jedinice) ukazalo se na potrebu stvaranja kriterija za odabir reprezentativnog uzorka stambenih jedinica za koje je potrebno provesti mjerenje zrakopropusnosti *in situ*, uz minimalnu potrošnju raspoloživih resursa.

Stvorena baza podataka izmjerenih rezultata dati će polazište za oblikovanje modela predikcije zrakopropusnosti i analizu obnove stambenih zgrada koju je potrebno poduzeti s ciljem povećanja energetske učinkovitosti, toplinske udobnosti i približavanja zahtjevima EU Direktive vezane za energetska svojstva zgrada.

LITERATURA

- [1] Zbašnik Senegačnik, M.: Pasivna kuća, SUN ARH, 2009.
- [2] Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada, Službeni list SFRJ 35/70.
- [3] JUS U.J5.600 – Toplinska tehnika u građevinarstvu- Tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada, 1980.
- [4] Marđetko-Škoro N., Fučić L., Bertol-Vrčec J.: Tehnički propisi o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Građevinar 57 (2005), 485-493
- [5] HRN U.J5.600 Koeficijenti prolaska topline k za prozore i balkonska vrata u zavisnosti od ostakljenja i materijala okvira, Tehnički uvjeti za projektiranje i građenje zgrada iz 1987.
- [6] Tehnički propis o uštedi toplinske energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 079/2005.)
- [7] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 110/2008.)
- [8] Kim, A. K.; Shaw, C. Y.: Seasonal variation in air tightness of two detached houses, Authorized, Reprint from Special Technical Publication ASTM STP 904, Measured Air Leakage of Buildings (1986), pp. 17-32, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
- [9] Ontario Power Authority: A Guide to EnerGuide: What's Involved? Dostupno na (02. 03. 2012.): <https://saveonenergy.ca/Consumer/Programs/New-Residential-Construction>
- [10] Sherman, M.H.: The use of blower-door data, Indoor Air 5 (1995), 215-224
- [11] Sherman, M.H.: Tracer-gas Techniques For Measuring Ventilation in a Single Zone, Building and Environment, 25(1990), 4, 365-374
- [12] HRN EN 13829 Toplinske značajke zgrada - Određivanje propusnosti zraka kod zgrada - Metoda razlike tlakova (ISO 9972:1996, preinačena; EN 13829:2000), Hrvatski zavod za norme, veljača 2002.
- [13] Sfakianaki, A., Pavlou, K., Santamouris, M., Livada, I., Assimakopoulos, M.N., Mantas, P., Christakopoulos, A.: Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece, Building and Environment 43 (2008) 398-405
- [14] Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T., Vinha, J.: Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses, Building and Environment 44 (2009) 377- 387
- [15] DIRECTIVE 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, 2010, 153/13 - 34, <http://www.energy.eu/directives/2010-31-EU.pdf>