



VPLIV SKLOPITVE ZUNANJIH DEJAVNIKOV IN LASTNOSTI GRADBENIH MATERIALOV NA POSLABŠANJE BIVALNIH POGOJEV V NIZKOENERGIJSKIH OBJEKTIH

Jana Mlakar

Doktorska disertacija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija, december 2012

Komisija za oceno doktorske disertacije:

prof. dr. Boštjan Zalar, predsednik, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

prof.dr. Aleksander Zidanšek, član, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

*prof. dr. Martina Zbašnik Senegačnik, član, Fakulteta za arhitekturo, Univerza v Ljubljani,
Ljubljana*

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL



Jana Mlakar

**VPLIV SKLOPITVE ZUNANJIH DEJAVNIKOV
IN LASTNOSTI GRADBENIH MATERIALOV NA
POSLABŠANJE BIVALNIH POGOJEV V
NIZKOENERGIJSKIH OBJEKTIH**

Doktorska disertacija

**EFFECT OF COUPLING BETWEEN EXTERNAL
FACTORS AND BUILDING MATERIALS'
PROPERTIES ON LIVING CONDITIONS
DETERIORATION IN LOW-ENERGY
BUILDINGS**

Doctoral Dissertation

Mentor: prof. dr. Janez Štrancar

Ljubljana, Slovenija, december 2012

Kazalo

Povzetek	VII
Abstract	VIII
Seznam kratic	IX
1 Uvod	1
1.1 Zdravje in udobje uporabnikov	3
1.2 Trajnost stavb	4
1.3 Energijska učinkovitost	5
1.4 Raziskovalne teme.....	6
1.4.1 Temperatura v hišah	6
1.4.1.1 Uravnavanje temperature v stavbah.....	6
1.4.1.2 Senčenje in nočno zračenje.....	7
1.4.1.3 Kontrolni sistem.....	8
1.4.2 Vlaga v hišah	8
1.4.2.1 Parna zapora ali ovira	9
1.4.2.2 Uravnavanje vlage v stavbah	10
2 Namen dela	13
3 Material in metode	17
3.1 Testne hiše.....	17
3.1.1 Testna hiša v Limbušu	17
3.1.1.1 Opis hiše	17
3.1.1.2 Senzorsko-kontroli sistem.....	19
3.1.2 Majhne testne hiše	20
3.1.2.1 Pomanjšanje	20
3.1.2.2 Opis majhnih testnih hiš	21
3.1.2.3 Senzorsko-kontrolni sistem.....	23
3.1.2.3.1 Izračun sončnih dobitkov skozi okna.....	24
3.1.2.3.2 Nadzor ogrevalnega sistema	24
3.1.2.3.3 Nadzor vlaženja.....	25
3.1.3 Testna hiša v Repnjah.....	25
3.1.3.1 Opis hiše	25
3.1.3.2 Senzorski sistem	26
3.2 Modeliranje	27
3.2.1 Modeliranje strategij za preprečitev pregrevanja	27
3.2.1.1 Opis modela	27
3.2.1.2 Simulacije notranje temperature	29

3.2.1.3 Določanje koeficienta efektivnih toplotnih izgub, toplotne kapacitete in notranjih virov s prilagajanjem odziva hiše pozimi	30
3.2.1.4 Določanje efekta hlajenja s prilagajanjem odziva hiše poleti	30
3.2.2 Modeliranje v majhnih testnih objektih	31
3.2.2.1 Modeliranje temperature v gradbenih konstrukcijah majhnih testnih objektov	31
3.2.2.2 Simulacija energijskega ravnovesja hiše	32
4 Rezultati in razprava.....	37
4.1 Temperatura v hišah.....	38
4.1.1 Modeliranje temperaturnih profilov v majhnih testnih hišah.....	39
4.1.2 Toplotna kapaciteta gradbenih materialov	42
4.1.3 Tip fasade	52
4.1.4 Senčenje in nočno zračenje	53
4.1.4.1 Določitev parametrov testne hiše	53
4.1.4.2 Hlajenje hiše poleti	55
4.1.5 Kontrolni sistem	57
4.2 Vlaga v hišah	59
4.2.1 Razlika v vlažnosti	59
4.2.2 Parna ovira ali parna zapora	60
4.2.3 Uravnavanje vlažnosti	62
5 Zaključki	65
6 Zahvale	69
7 Literatura in viri.....	71
Kazalo slik.....	77
Kazalo tabel	81
Priloga A.....	83
Priloga B.....	87

Povzetek

Stavbe so kompleksni sistemi, kjer so zunanji dejavniki sklopljeni z lastnostmi stavbe. V doktorski disertaciji je sklopitev med zunanjimi dejavniki ter lastnostmi stavb, ki vplivajo na bivalno okolje, trajnost stavbe ter energijsko učinkovitost, nizkoenergijskih (vključno pasivnih) stavb, podrobno preučena. Raziskani so pasivni načini zagotavljanja ustrezne temperature in relativne vlažnosti v stavbah in vpliv različnih dejavnikov na bivalne pogoje in energijsko bilanco stavbe: način gradnje, uporabljeni materiali, nadzorni sistem ogrevanja, zračenje in senčenje. Navedeno je bilo preučeno s pomočjo izmerjenih temperaturnih in vlažnostnih profilov v gradbenih konstrukcijah testnih hiš, z energijsko bilanco testnih hiš ter simulacijami. Rezultati raziskave jasno pokažejo, da različni gradbeni materiali z različnimi toplotnimi prehodnostmi, specifično toplotno kapaciteto in gostoto povzročijo različne fazne zamike prehoda toplote skozi gradbeno konstrukcijo in tako različne pogoje v gradbeni konstrukciji in v notranjosti, kar vpliva na udobje in porabo energije, vendar so omenjene razlike bolj izrazite v prehodnih obdobjih. Na toplotno udobje v stavbi pomembno vpliva poleg lastnosti gradbenih materialov tudi kontrola ogrevalnega sistema. Tudi poletno udobje je zelo pomembno, saj lahko visoke zunanje temperature in močno sončno obsevanje v poletnih mesecih vodijo do pregrevanja v nizkoenergijskih (predvsem pasivnih) hišah, ki so zaradi dobre izolacije slabo sklopljene z zunanjim okoljem. V podnebjih z dnevnimi nihanjem temperature za 15 K je mogoče ustrezno temperaturo v nizkoenergijskih hišah vzdrževati s hlajenjem hiše z nočnim zračenjem z odpiranjem oken, medtem ko je nujno potrebno z učinkovitim senčenjem oken preprečiti vstop sončnemu obsevanju. Za zagotavljanje ustrezne vlažnosti v gradbenih konstrukcijah se je izkazala za najbolj primerno vgradnja parne ovire ter uporaba higroskopičnih izolacijskih materialov. Na ta način se odvečna vlaga v stavbi, ki je posledica aktivnosti ljudi, lahko sprosti skozi toplotni ovoj ter začasno absorbira v higroskopičnih materialih. V nasprotnem primeru lahko vlažnost zelo naraste, kar lahko vpliva na zdravje uporabnikov ali vodi do poškodb v gradbenih konstrukcijah in tako vpliva na trajnost stavbe. Tako številni zunanji in notranji dejavniki preko lastnosti stavbe vplivajo na bivalno ugodje, trajnost stavbe in njeno energijsko učinkovitost. Pri načrtovanju nizkoenergijskih stavb je zato potrebno optimizirati vse komponente, hkrati pa izkoristiti naravne higratermalne procese in lastnosti materialov, da poleg energijske učinkovitosti zagotovimo tudi ustrezno bivalno okolje. Smiselno je uravnavati temperaturo in relativno vlažnost z uporabo materialov z visoko toplotno kapaciteto in dobrimi higroskopičnimi lastnostmi v kombinaciji z difuzijsko odprtimi strukturami. Ogrevalni in prezračevalni sistem lahko z uporabo teh pasivnih načinov za zagotavljanje bivalnega udobja razbremenimo. Rezultat skrbnega načrtovanja bi morala biti funkcionalna, udobna in zdrava hiša, ki ščititi pred vplivi zunanjega okolja, hkrati pa predstavlja kar najmanjšo obremenitev za okolje.

Abstract

Buildings are complex systems as external factors are linked to, and have an effect on the characteristics of a building. In this dissertation, the focus is on the connection between external factors and the building's characteristics, which have an impact on the living conditions, durability and energy efficiency of a building: especially on a low energy (including passive) building. Passive means of ensuring appropriate indoor temperatures and relative humidity were studied, as were the impact of different factors on living conditions and the energy balance of buildings: the thermal and other properties of construction materials, the type of construction, the heating control system, ventilation, and solar protection. These were studied using the temperature measurements and relative humidity profiles of test houses, the energy balance data of test houses and the use of simulation techniques. The results clearly show that the use of different building materials, with different thermal properties, specific heat capacities, and densities, results in differences in conductivity and heat transference, which has an impact on the external and internal conditions of a building, which in turn, have an impact on comfort and energy consumption, especially during transitional periods. The heating control system of a building also has an important impact on thermal comfort. High ambient temperatures and strong solar radiation during the summer months can lead to overheating in low-energy houses, which due to their good insulation have limited ability to lose heat into the environment. In climates with large differences between their highest and lowest daily temperature (15 K), it is possible to keep internal temperatures in low-energy houses within the comfort zone with cooling through -windows at night and the effective shading of windows during the day. Indoor humidity levels can be kept within the comfortable range with the use of vapour retarders and hygroscopic insulation materials. By these means, excess moisture, produced by the activities of people, can be released through the thermal envelope of a building and temporarily absorbed in the hygroscopic building materials. Otherwise, humidity levels can rise too high and have a negative impact on the health of occupants or cause structural damage to the building with consequences on its durability. Therefore, there are many external and internal factors related to the characteristics and properties of a building that have a direct impact on a building's durability, energy efficiency, and the degree of comfort it provides to its occupants. When planning a low-energy building, all components must be optimized and hygrothermal processes and the properties of the materials taken into account to ensure a high level of energy efficiency and comfort. It is practical to regulate temperature and humidity levels using materials with a high thermal capacity and good hygroscopic and moisture diffusion properties. There is reduced pressure on a building's heating and ventilation system if these passive means are used to keep living conditions comfortable. Careful planning should result in a house that is healthy, functional, and comfortable, and which provides protection from external elements while having a low impact on the environment.

Seznam kratic

CEST	=	srednjeevropski poletni čas
CET	=	srednjeevropski čas
EPS	=	ekspandirani polistiren
HVAC	=	ogrevanje, prezračevanje in hlajenje (heating, ventiation, airconditioning)
OSB	=	plošča z usmerjenim iverjem (oriented strand board)
PHPP	=	program za načrtovanje pasivnih hiš (Passive House Planning Package)
RH	=	relativna vlažnost
T	=	temperatura
U	=	toplotna prehodnost
UTC	=	univerzalni koordinirani čas

1 Uvod

Stavbe so kompleksni sistemi, v katerih sklopitev (medsebojna povezanost) zunanjih dejavnikov in lastnosti stavbe oziroma gradbenih materialov vpliva na bivalne pogoje v stavbi, energijsko učinkovitost stavbe ter življenjsko dobo oziroma trajnost stavbe. Tako bi morala biti vsaka stavba v času načrtovanja optimizirana, tako da bi bila prilagojena specifičnim zunanjim dejavnikom, ki so odvisni od klimatskih podatkov lokacije, v katero bo stavba umeščena, in posebnosti točne lokacije stavbe, kot tudi navadam njenih uporabnikov. Optimizirane bi morale biti prav vse komponente stavbe: oblika, orientacija, senčenje, zračenje, uporaba gradbenih materialov, sestava konstrukcij itd. Prava kombinacija vseh teh komponent lahko ustvari stabilno notranje okolje. Stabilni notranji pogoji pa omogočijo udobje in zdravo bivalno okolje, kot tudi trajnost stavb. Poleg zdravega notranjega bivalnega okolja bi morali načrtovalci stavb pomisliti tudi na čim manjšo bremenitev zunanjega okolja in tako skrbeti za zdravo okolje tudi izven stavb.

Slednjemu se v gradbenem sektorju v zadnjem času posveča vedno več pozornosti zaradi vedno večje okoljske zavesti, sprememb globalnih podnebnih razmer, onesnaženja okolja ter problemov s pomanjkanjem in problemi z distribucijo goriv. Z različnimi mednarodnimi sporazumi in dokumenti ter finančnimi spodbudami se v Evropski uniji in tudi Sloveniji spodbuja gradnjo nizkoenergijskih in pasivnih stavb (Operativni program zmanjševanja emisij toplogrednih plinov do leta 2012, 2009, Direktiva 2006/32/ES, 2006, Direktiva 2010/31/EU, 2010, Nacionalni akcijski načrt za energetske učinkovitost za obdobje 2008–2016, 2008, Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, 2010). Nizkoenergijske hiše, katerih gradnja je v Sloveniji uzakonjena, porabijo manj kot 50 kW h/(m² a), medtem ko pasivne hiše manj kot 15 kW h/(m² a) energije za ogrevanje. Standard pasivne hiše združuje energijsko učinkovitost, bivalno udobje in ekonomičnost (Feist et al., 2005). Ime pasivna hiša izvira iz dejstva, da ne potrebuje več aktivnega ogrevalnega sistema.

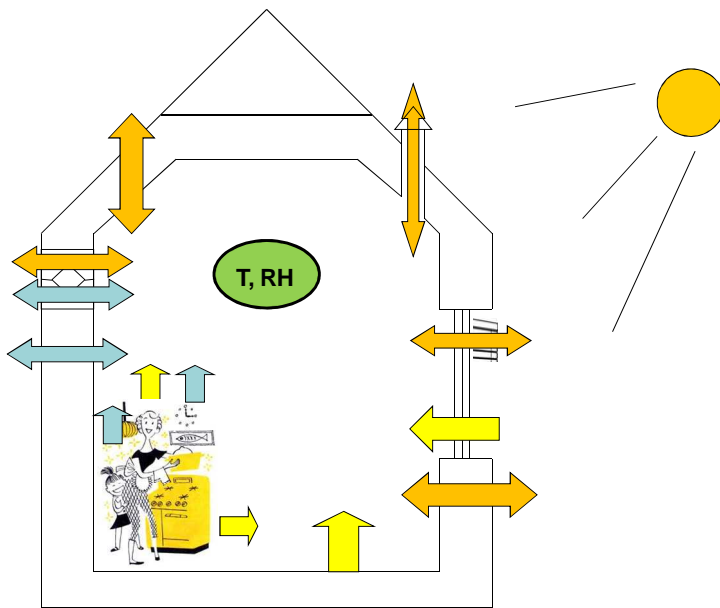
S pojmom »nizkoenergijska hiša« pa v tem raziskovalnem delu označujemo dobre nizkoenergijske in pasivne hiše, katerih poraba energije za ogrevanje je manjša od 25 kW h/(m² a). To so hiše, ki:

- so dobro izolirane in imajo toplotno prehodnost sten $U \leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ oziroma pogosto $U \leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (kot velja za standard pasivne hiše),
- imajo nizko toplotna prehodnost oken $U \leq 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, oziroma pogosto $U \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (kot velja za standard pasivne hiše),
- so brez toplotnih mostov (kot velja za standard pasivne hiše),
- imajo zrakotesnost $n_{50} \leq 1,5/\text{h}$ pri 50 Pa nadtlaka ali podtlaka (za standard pasivne hiše velja $n_{50} \leq 0,6/\text{h}$),
- imajo sistem kontroliranega prezračevanja z vračanjem toplote odpadnega zraka (rekuperacija) in izkoristkom, večjim od 75 % (kot velja za standard pasivne hiše),
- del potrebe po ogrevanju pokrijejo z energijo sončnega sevanja, ki vstopa v stavbo skozi okna in internimi viri, ki jih oddajajo naprave ali uporabniki (kot velja za standard pasivne hiše).

Zaradi omenjenih značilnosti takih stavb so take nizkoenergijske hiše slabo sklopljene z zunanjim okoljem in se tako drugače odzivajo na spremembe zunanjih dejavnikov.

Zaradi slabe sklopitve imajo majhni vnosi energije, pogosto stohastični, velik vpliv na energijsko bilanco in notranje pogoje. Rezultati raziskav veljajo tako za dobre nizkoenergijske hiše in predvsem hiše, grajene po standardu pasivne hiše, saj so raziskave opravljene na konstrukcijah, primernih za pasivne hiše, pasivnih hišah ali dobrih nizkoenergijskih hišah (potreba po ogrevanju ustreza zahtevi standarda pasivne hiše, le izmerjena zrakotesnost je nekoliko višja).

V tem delu smo preučili sklopitve med zunanjimi dejavniki ter lastnostmi stavb, ki vplivajo na bivalno okolje, trajnost stavbe ter energijsko učinkovitost. Osredotočili smo se predvsem na dva dejavnika udobja v stavbah: temperaturo in relativno vlažnost. V kompleksnih sistemih, kot so stavbe, na notranjo temperaturo vplivajo številni viri in ponori toplote (Slika 1). Po drugi strani pa viri vlage (Slika 1) vplivajo preko lastnosti stavbe in drugih dejavnikov na notranjo relativno vlažnost.



Slika 1: Vpliv virov in ponorov toplote in vlage na notranje bivalne pogoje: temperaturo (T) in relativno vlažnost (RH). Prikazani so izmenjava toplote (oranžno), pasivni viri energije (rumeno) in transport vlage (modro).

Z meritvami na realnih testnih objektih, pomanjšanih testnih objektih, kot tudi računalniškimi simulacijami smo preverili vpliv sklopitve zunanjih dejavnikov in lastnosti stavbe, predvsem gradbenih materialov, na notranje okolje ter pogoje v gradbenih konstrukcijah. Raziskali smo vpliv: zunanje temperature, sončnega obsevanja, senčenja stavbe, zračenja stavbe, kontrolnega sistema, sposobnosti materialov za uravnavanje temperature, tipa fasade, na notranjo bivalno temperaturo, s tem na bivalno okolje v stavbi ter na njeno trajnost oziroma trajnost posameznih komponent stavbe, kot tudi na energijsko učinkovitost stavbe. Prav tako smo raziskali vpliv sposobnosti materialov za uravnavanje relativne vlažnosti in vgradnje parne ovire na relativno vlažnost v stavbi in konstrukciji, s tem na bivalno okolje ter na trajnost stavbe. Omenjene pojave smo opazovali na nizkoenergijskih objektih. V literaturi so nekateri omenjeni vplivi že raziskani, vendar v večini na energijsko potratnih objektih. Manj pa je raziskav, opravljenih ravno na nizkoenergijskih objektih in dobro izoliranih gradbenih konstrukcijah.

1.1 Zdravje in udobje uporabnikov

Poleg zagotavljanja majhne porabe energije v stavbah bi morale hiše na prvem mestu zagotavljati zdrave bivalne pogoje, saj v industrializiranih državah večina ljudi preživi več kot 90 % življenja v stavbah (Straube in deGraauw, 2001). Že dolgo je znano, da bivalni pogoji v stavbah vplivajo na udobje in zdravje, kvaliteto življenja in produktivnost njihovih uporabnikov, vendar je bilo veliko več pozornosti med načrtovalci stavb umerjene v nosilnost in zaščito pred zunanjimi dejavniki. Dodatno pa je usmerjenost v hitro in cenovno ugodno gradnjo povzročila probleme, ki vplivajo na kvaliteto stavbe in bivanja. Dokazano je bilo, da na udobje in zdravje uporabnikov vplivajo notranja temperatura, površinske temperature, relativna vlažnost, razvoj patogenih organizmov, kakovost zraka, vsebnost toksičnih spojin. V nizkoenergijskih hišah, katerih namen je tudi izboljšanje udobja, se toplotno udobje zaradi dobre izoliranosti in toplotnih mostov pozimi izboljša. Dobra je tudi kakovost zraka zaradi prezračevanja. V nekaterih primerih pa še vedno lahko pride do toplotnega neudobja, na primer poleti, saj se hiša zaradi dobre izoliranosti težje ohladi. Problemom z relativno vlažnostjo v nizkoenergijskih hišah še vedno ni posvečene posebne pozornosti, zato so še vedno prisotni.

Fanger in kolegi so razvili model toplotnega udobja telesa in model prepiha, ki združujeta dejavnike, ki vplivajo na toplotno udobje: temperatura zraka, površinske temperature, hitrost zraka, preprih, relativna zračna vlažnost, oblačila, stopnja aktivnosti uporabnikov in intenzivnost vrtnčenja zraka (Charles, 2002). Na prvem modelu temeljita tudi standarda ASHRAE standard 55 (ASHRAE, 1992) in EN ISO 7730, ki definirata temperaturne razpone, s katerimi bi moralo biti zadovoljnih 80 % uporabnikov (Boerstra, 2010). Glede na literaturo je optimalna temperatura pozimi 22 °C in sprejemljivo območje 20 do 23 °C ter poleti optimalna temperatura 24,5 °C ter sprejemljivo območje 23 do 26 °C ter relativna vlažnost v prostorih med 30 in 60 % oziroma v prostorih z invalidnimi, bolnimi, mladimi otroki in starejšimi osebami med 30 in 50 % (Charles, 2002, Hameury in Lundström, 2004, prEN 15251, 2006).

Neprimerni gradbeni materiali, neprimerne sestave gradbenih konstrukcij in nepravilna izvedba lahko privedejo do neustreznih bivalnih pogojev in tako do različnih bolezni. Vplivajo pa tudi na produktivnost in imajo s tem tudi ekonomski učinek (Burge, 2004). Bolezenska znamenja povezana z izjemno nekvalitetno gradnjo, privedejo do sindroma bolnih stavb (Jones, 1999, Burge, 2004). V povprečju velja, da višja kot je poraba energije v stavbi, več je s stavbo povezanih simptomov (Roulet, 2001), zato se v nizkoenergijskih hišah taki problemi ne pojavljajo.

Spremembe temperature direktno vplivajo na absorpcijo vodne pare v zrak in tako na relativno vlažnost. Indirektne spremembe temperature pa vplivajo na spremembe fiziologije kože, žilnega sistema, sluznic in imunskega odziva. Relativna vlažnost direktno vpliva na fiziološke funkcije organizma, medtem ko indirektno vpliva na rast in razvoj patogenih organizmov in tudi adsorpcijo in učinek različnih kemičnih spojin, zaradi česar je naše telo izpostavljeno različnim patološkim pogojem (Arudel, 1986). Ljudje težko zaznavamo razlike v relativni vlažnosti, ker nimamo receptorjev za vlažnost (Wolkoff in Kjaergaard, 2007), ampak zaznavamo posledice neustrezne vlažnosti, saj ta vpliva na razvoj oziroma potenciranje različnih bolezenskih znakov oziroma stanj. Dokazano je bilo, da spremembe v zračni vlažnosti vplivajo na sezonsko poslabšanje kožnih obolenj, kot so atopijski dermatitis, psoriaza, hiperplazija epidermisa in vnetja, saj spremembe okoljske vlažnosti pomembno vplivajo na zaščitno funkcijo kože (občutljivost kože na fizični in kemični stres). Poleg tega nizka relativna vlažnost povzroča drugačno zaznavanje temperature (zniža temperaturo kože), izsuši očesno in nosno sluznico in povzroča vnetje oči (Sunwoo et al., 2006). Veliko študij po zraku prenosljivih patogenov je pokazalo, da sta njihova infektivnost in preživetje nižja pri relativni vlažnosti med 40 in

70 %. Infektivnost bakterij in virusov je visoka pri nizkih ali visokih vlažnostih, medtem ko je infektivnost gliv in pršic visoka le pri višjih vlažnostih (Arudel et al., 1986, Sunwoo et al., 2006). Tako so okužbe z virusi bolj pogoste pozimi, ko je relativna vlažnost nizka in vnetje nosne in žrelne sluznice zaradi vdihavanja hladnega zraka olajša vstop virusom. Po drugi strani so alergijske bolezni, kot so alergijski rinitis, astma in druge, ki prizadenejo dihalne poti, povezane s plesnijo, živalskim prhljajem ali pršicami, katerih velikost populacije je povezana z relativno vlažnostjo (Baughman in Arens, 1996). Še posebej je ta učinek pomemben v spalnicah, kjer uravnavanje vlage v posteljah vpliva na razvoj plesni in pršic in s tem na razvoj alergij (Svennberg, 2006).

Bivalne pogoje lahko izboljšamo z različnimi ukrepi. Študija vpliva vlažilcev na bivalne pogoje je pokazala, da vlažilci izboljšajo bivalno udobje (Hashiguchi et al., 2008), vendar so zračni vlažilci omejeni na eno področje, medtem ko klasični prezračevalni sistemi zaradi temperaturnih sprememb lahko povzročajo nastanek kondenzata v njihovih ceveh, kar je idealno okolje za razvoj mikroorganizmov. S preprostimi vendar energijsko potratnimi sistemi sicer lahko deloma izboljšamo udobje, po drugi strani pa s pravilnim načrtovanjem in optimizacijo lahko s pasivnimi metodami dosežemo veliko boljše pogoje.

Skrbno načrtovanje, izvedba in upravljanje so tako nujni za zagotavljanje udobja in zdravega bivalnega okolja. Zato v delu preučimo, kateri dejavniki poslabšajo bivalno okolje v nizkoenergijskih hišah, ki se lahko drugače odzivajo na različne dejavnike kot energijsko potratne hiše. Poiščemo rešitve, kako je mogoče preprečiti pregrevanje, nihanja notranje temperature, visoke in nizke vlažnosti.

1.2 Trajnost stavb

Poleg zagotavljanja čim manjšega vpliva stavbe na okolje ter zdravja in udobja uporabnikov pa morajo pogoji v stavbi zagotavljati tudi trajnost stavbe. Udobje in zdravje uporabnikov v veliki meri korelira z zdravjem in trajnostjo zgradbe. Na slednjo poleg preobremenitev vplivajo različni fizikalni, biološki, kemijski in mehanski procesi, ki so pogosto posledica neustreznega načrtovanja in gradnje (Nofal in Kumaran, 1999). Približno 90 % poškodb v stavbah, poleg mehanskih obremenitev, je posledica učinkov temperature in vlažnosti (Nofal in Kumaran, 1999, Morrell, 2002).

Visoke temperaturne razlike v konstrukcijah pa povzročijo tudi raztezanje/krčenje materialov, ki lahko poškodujejo strukturo in sestavne dele stavbe in tako vplivajo na trajnost stavbe (Al-Homoud, 2005).

Najpogosteje nastanejo v stavbah problemi, povezani z vlažnostjo. Problemi lahko nastanejo, kadar relativna vlažnost naraste in lahko pride do kondenzacije. To se lahko v nizkoenergijskih hišah zgodi zaradi poškodovane parne ovire, zaradi vgradnje parnih zapor, ki preprečijo izsuševanje gradbenih konstrukcij, ali pa kadar je les obdan z materiali z nizko prestopnostjo vlage (Smulski, 1999, Morrell, 2002). Najpogosteje pa v energijsko potratnih stavbah nastajajo problemi na mestih toplotnih mostov, za ovirami, v kotih, kjer so površinske temperature nižje in s tem relativna vlažnost višja. Teh problemov ni v nizkoenergijski hiši, kjer so toplotni mostovi preprečeni in površinske temperature zaradi dobre izolacije višje.

Spremembe v vsebnosti vlage materialov lahko zaradi raztezanja/krčenja povzročijo pokanje, na primer obloge iz mavca (Carll et al., 2007). OSB plošče in vezan les se dimenzijsko spremenijo, ko se zmočijo (Nofal in Kumaran, 1999). Spremembe vlage pravokotno na smer vlaken lahko povzročijo razpoke in zmanjšajo nosilnost posameznih elementov ali celotne konstrukcije (Häglund, 2007). Naravni materiali lahko pri nizki vlažnostih postanejo togi in težje prenašajo strižne sile med plastmi (Padfield, 1998).

Visoka vlažnost povzroči razvoj plesni, obarvanje, luščenje oblog, gnitje, razpadanje različnih delov stavbe (okna, vrata, obloge) (Smulski, 1999). Voda je omejitveni faktor za

rast plesni (Oreszczyn in Pretlove, 1999), saj so spore, kisik in hrana, ki jih plesen poleg vode potrebuje za rast in razmnoževanje, vedno prisotni v zadostni meri. Meja površinske relativne vlažnosti za rast plesni na površinah je 100 % za steklo in kovine, 97 in 98 % za čisti EPS in mineralno volno, 88 do 90 % za beton in nad 78–80 % za organske materiale in klasične gradbene materiale, kot so omet ali tapete, ter 73 % za higroskopske materiale (Oreszczyn in Pretlove, 1999, Viitanen in Ojanen, 2007). Na rast plesni vplivajo tudi prezračevanje, način ogrevanja, sestava gradbenih konstrukcij, zrakotesnost, proizvodnja vlage, spremembe v temperaturi in vlagi, izoliranost stavbe.

Preprečevanje rasti plesni je še posebej pomembno v stavbah, grajenih iz lesa ali lesenih materialov, saj so ti materiali v določenih pogojih bolj dovzetni za biološko razgradnjo (glive, plesni, bakterije, insekti) (Nofal in Kumaran, 1999, Svennberg, 2006). Glive in plesni zaradi razgradnje lignoceluloze, lignina in celuloze zmanjšajo nosilnost lesa in materialov na osnovi lesa (na primer iverne plošče, OSB plošče) (Nofal in Kumaran, 1999).

Izkaže se, da je preventiva cenovno učinkovitejša kot sanacija poškodb (Nofal in Kumaran, 1999). Zato je pomembno, da v fazi načrtovanja in izvedbe izdelamo ovoj s pravilno sestavo gradbenih konstrukcij. Do omenjenih problemov lahko prihaja tudi v gradbenih sklopih nizkoenergijskih hiš, če se jih ne izdelata pravilno: nepravilna kombinacija materialov, nepravilna izvedba, poškodbe gradbenih sklopov. V delu smo raziskali dejavnike, ki lahko vplivajo na trajnost stavbe.

1.3 Energijska učinkovitost

Vedno večja okoljska zavest, spremembe globalnih podnebnih razmer, onesnaženje okolja, višji stroški goriva in vedno pogostejši problemi z njegovo distribucijo nas opozarjajo na pomen energijske učinkovitosti na različnih področjih. Rešitve, ki manj obremenjujejo okolje in omogočajo večjo neodvisnost gospodinjstev od oskrbe z energijo, iščejo tudi v gradbenem sektorju, saj gradbeni sektor v Evropi porabi kar 40 % primarne energije (Mlečnik et al., 2008). Reševanja so se v gradbenem sektorju lotili s spremembo gradbene zakonodaje, ki vedno bolj spodbuja gradnjo nizkoenergijskih objektov. Tudi iz tega razloga smo opravili raziskave na nizkoenergijskih objektih.

Preučevali smo različne dejavnike, ki vplivajo na bivalno okolje in trajnost stavbe. Hkrati pa jih večina vpliva tudi na porabo energije. Za zagotavljanje ustreznih temperature in relativne vlažnosti smo preučili pasivne načine oziroma načine, ki izkoriščajo naravne fizikalne procese in ne porabljajo energije za zagotavljanje udobja. Tako smo preučili možnosti preprečevanja poletnega pregrevanja v nizkoenergijskih hišah na pasivne načine: senčenje in nočno zračenje skozi okna. Nekatere raziskave v energijsko potratnih objektih so v preteklosti pokazale, da je mogoče z ustrežno izbiro gradbenih materialov energijo za ogrevanje zmanjšati, pri čemer igra pomembno vlogo predvsem toplotna masa stavb. Ker pa imajo nizkoenergijske hiše debelo toplotno izolacijo in so fazni zamiki zidu že sami daljši kot v energijsko potratnih objektih, je vpliv toplotne mase na porabo energije lahko drugačen. Zato smo preučili tudi vpliv uporabe različnih gradbenih materialov na toplotno udobje in porabo energije v nizkoenergijskih hišah, saj podobnih raziskav v literaturi ni omenjenih. Poleg zagotavljanja toplotnega udobja pa je v hišah pomembno zagotavljati tudi ustrežno relativno vlažnost. To je mogoče zagotavljati, sicer v mnogih pogledih z ne najbolj ustreznimi rešitvami, kot so vlažilci zraka ali razvlaževalci, ki poleg tega, da delujejo zelo lokalno, porabijo veliko energije, zato bi bilo smiselno v nizkoenergijskih hišah iskati pasivne rešitve za zagotavljanje ustreznih relativnih vlažnosti. Zato smo preučili tudi možnost zagotavljanja ustreznih relativnih vlažnosti v notranjosti in v konstrukcijah z uporabo higroskopičnih materialov v kombinaciji s parno oviro.

Pri načrtovanju nizkoenergijskih hiš bi morala biti večja pozornost posvečena tudi izbiri gradbenih materialov in sestavam konstrukcij, saj posredno z izbiro materialov vplivamo na porabo energije in s tem vplivamo na okolje. Pri proizvodnji in uporabi različnih gradbenih materialov se porabi različna količina energije. Večina zgradb se še vedno izolira z anorganskimi vlaknenimi materiali – mineralno volno in organskimi penastimi materiali – ekspanzirani in ekstrudirani polistiren. Ti materiali v življenjski dobi porabijo manj primarne energije. Manj energije pa porabijo naravni gradbeni materiali, kot so celulozna izolacija, leseno vlaknene plošče in tudi ovčja volna (Waltjen et al., 2009). Tudi potencial segrevanja ozračja in potencial zakisanja je pri naravnih izolacijskih materialih manjši (Waltjen et al., 2009). Tudi iz tega razloga smo se v raziskavah vpliva različnih materialov na bivalno okolje osredotočili na primerjavo konvencionalnih izolacijskih materialov in bolj naravnih materialov.

1.4 Raziskovalne teme

Bivalni pogoji, trajnost stavb in njihova energijska učinkovitost so močno odvisni od notranje temperature in vlažnosti, še posebej zaradi njihovih sprememb v času. Jasno je, da nizke in visoke temperature in vlažnosti v stavbah poslabšajo bivalno udobje v stavbah in trajnost stavbe. Namen tega dela je prikazati, da lahko uporaba primernih gradbenih materialov, gradbenih konstrukcij ter nekaterih drugih ukrepov bistveno vplivajo na temperaturo in relativno vlažnost ter izboljšajo kvaliteto bivanja v nizkoenergijskih hišah, hkrati pa preprečijo njene poškodbe. Obenem pa predstavljajo nizko obremenitev za okolje zunaj nje, saj tudi to vpliva na zdravje in zadovoljstvo ljudi. Vpliv različnih dejavnikov na temperaturo in relativno vlažnost je delno raziskan, malo pa je objavljenih raziskav ravno na nizkoenergijskih objektih, pri katerih je zaradi slabe sklopitve z zunanjim okoljem, vpliv lahko drugačen.

1.4.1 Temperatura v hišah

Temperatura v stavbah pomembno vpliva na udobje, trajnost in energijsko učinkovitost stavb. Ustrezno temperaturo lahko zagotovimo na različne načine. V nizkoenergijskih pa je še posebej smiselno poiskati pasivne načine za zagotavljanje stabilnih pogojev v stavbi in njenih elementih ter na ta način najti ravnovesje med udobjem, kvaliteto in energijsko učinkovitostjo. Na notranjo temperaturo lahko vplivajo zunanja temperatura, zaradi katere, če je nizka, v okolje uhaja toplota iz stavbe. Tudi nihanja zunanje temperature lahko povzročijo nihanja notranje temperature. Na notranjo temperaturo in njena nihanja vpliva toplota, ki vstopi v stavbo zaradi sončnega sevanja skozi okna, toplota, ki v stavbi nastaja zaradi delovanja naprav in aktivnosti ljudi. Obe se spreminjata na izjemno kratki časovni skali. Kot so nekateri že pokazali, pa na vpliv teh zunanjih dejavnikov na notranjo temperaturo lahko vpliva izbira materialov, sestava gradbenih konstrukcij ter ustrezna kontrola ogrevalnega sistema. Vpliv omenjenih dejavnikov pa je lahko drugačen v nizkoenergijskih hišah, saj so te slabo sklopljene z zunanjim okoljem. V takih stavbah lahko v odvisnosti od različnih dejavnikov hitreje naraste notranja temperatura.

1.4.1.1 Uravnavanje temperature v stavbah

Veliko raziskovalcev je preučevalo prenos in shranjevanje toplote v gradbenih konstrukcijah. Dokazano je bilo, da lastnosti materialov in razporeditev materialov v gradbenih konstrukcijah vplivajo na zmanjšanje temperaturnih nihanj in tako bivalno udobje in porabo energije (Kossecka in Kosny, 2002, Simonson et al., 2001).

Tako materiali z visoko gostoto in visoko specifično toplotno kapaciteto absorbirajo toploto in jo sprostijo zvečer (Florides et al., 2002, Al-Homoud, 2005). To zmanjša

vrhove notranje temperature in prestavi čas maksimalne obremenitve (fazni zamik). Manjša nihanja temperature prinesejo prihranke energije pri ogrevanju (več kot 11 %) in še večje pri hlajenju, še posebej v prehodnih obdobjih (Kossecka in Kosny, 2002, Asan, 2006, Gregory et al., 2008, Aste et al., 2009, Zhu et al., 2009). Tako sta amplituda in frekvenca temperaturnih nihanj na notranjih površinah masivnih sten mnogo nižji kot pri srednje težki ali lahki konstrukciji (Burch et al., 1982, Feng, 2004, Zhu et al., 2009, Givoni, 2009). Ker ima že majhno povečanje toplotne kapacitete velik učinek in se ta manjša z večanjem mase, ima podoben učinek kot beton tudi masivni les (Simonson et al., 2001, Hameury, 2006).

Največjo vlogo igra toplotna kapaciteta v zmernih podnebnih predvsem v prehodnih obdobjih, ko zunanja temperatura niha okoli nastavljene notranje temperature, pri čemer se obrača smer toka toplote, zato se zmanjša potreba po ogrevanju (Burch et al., 1982, Hameury, 2006). Vpliva toplotne kapacitete na temperaturo pa ni v bolj ekstremnih podnebnih (vročih ali hladnih), kjer se smer toka toplote v konstrukcijah ne obrača (Hameury, 2006, Al-Homoud, 2005, Florides et al., 2002).

Na učinek toplotne kapacitete vpliva tudi položaj toplotne izolacije. Če je izolacija na zunanji strani masivne stene (opečne, betonske), ima toplotna kapaciteta večji vpliv, (Burch et al., 1982, Al-Homoud, 2005). Pri občasnem ogrevanju stavb pa je za zagotavljanje ustrezne temperature bolj primerno, če je izolacija nameščena na notranji strani (Kossecka in Kosny, 2002, Bojič in Loveday, 1997).

Za uravnavanje vpliva nihanj zunanje temperature na notranje okolje naj bi bil fazni zamik za vsako orientacijo stene in strehe drugačen. Na severu fazni zamik ni potreben, na vzhodu dobitki toplote ne smejo biti zamaknjeni, na jugu in zahodu pa se dobitke zamakne s faznim zamikom 8 h (Al-Homoud, 2005). Streha potrebuje dolg fazni zamik in nizko toplotno prehodnost, saj prejema sončno obsevanje cel dan (Al-Homoud, 2005, Florides et al., 2002).

Vse omenjene raziskave so bile opravljene na slabše izoliranih objektih, tako da rezultatov teh raziskav ne moremo direktno prenesti na zelo dobro izolirane stavbe. Poleg tega je večina primerjav v literaturi osredotočenih na primerjavo med masivno in lahko gradnjo, med različnimi tipi lahke gradnje pa ni opravljene primerjave. Zato smo raziskali vpliv specifične toplotne kapacitete materialov na temperaturo v stavbi, v gradbeni konstrukciji in vpliv na porabo energije v nizkoenergijski hiši.

1.4.1.2 Senčenje in nočno zračenje

V vročih poletnih dneh, ko so hiše izpostavljene visokemu sončnem obsevanju, ki vpliva na visok vnos energije, in visokim zunanjim temperaturam, temperatura v nizkoenergijskih hišah naraste. Debela izolacija in posledično šibka sklopitev hiše z njenim okoljem prepreči, da bi hiša oddala toploto s kondukcijo. Zato imajo majhni dotoki energije velik vpliv na notranjo temperaturo. Z nastavljanjem prezračevalnega sistema, odpiranjem oken, senčenjem in ustvarjanjem internih virov s svojo prisotnostjo in uporabo električnih naprav (kuhalna plošča, TV, hladilnik, osvetljava, pralni stroj, pomivalni stroj) uporabniki vplivajo na notranjo temperaturo (Papakostas in Sotiropoulos, 1997). To je odvisno od njihovih navad in življenjskega stila, zato je lahko vpliv različen v različnih delih sveta ali različnih državah, kar je potrebno upoštevati pri načrtovanju in interpretaciji rezultatov raziskav (Al-Mumin et al., 2003). Interni viri v nizkoenergijski hiši pokrijejo v ogrevalni sezoni del potrebe po ogrevanju, poleti pa v določenih pogojih vodijo do pregrevanja in tako manjšega toplotnega udobja in potrebe po hlajenju, kot so pokazali in diskutirali že mnogi (Papakostas in Sotiropoulos, 1997, Shaviv et al., 2001, Orme et al., 2003, Lehmann et al., 2007, Artmann et al., 2008). Badescu et al. (2010) so ugotovili, da je pregrevanje pomemben problem v nizkoenergijskih hišah, še posebej v

južni Evropi.

Nekatere raziskave so potrdile, da je odpiranje oken ponoči učinkovito pri zmanjšanju pregrevanja in potrebe po hlajenju (7 %) v slabo izoliranih stavbah (Shaviv et al., 2001, Florides et al., 2002, Artmann et al., 2008). Učinkovitost zračenja je odvisna od: temperaturne razlike, hitrosti vetra, razlike v vlažnosti, velikosti oken, položaja oken, sklopljenosti s toplotno maso (Shaviv et al., 2001, Wang et al., 2009, Givoni, 2009). Tudi za nizkoenergijsko stavbo je bilo dokazano, da je naravno nočno prezračevanje veliko bolj učinkovito kot zemeljsko-zračni toplotni izmenjevalec pri zagotavljanju primernih temperatur (Breesch et al., 2005).

Pri preprečevanju pregrevanja je poleg prezračevanja, prognostične kontrole, zmanjševanja internih virov energije z nizkoenergijskimi napravami in naravno svetlobo, uporabe toplotne kapacitete pomembno tudi senčenje, ki se je izkazalo kot zelo učinkovito, saj lahko prihrani 8–20 % energije za hlajenje, več pri večji debelini izolacije (Florides et al., 2000, Roulet, 2001, Sakellari et al., 2006, Givoni, 2009).

Glede na omenjeno je problem pregrevanja v nizkoenergijskih hišah pomemben, vendar ne dovolj raziskan. Poleg tega je močno odvisen od podnebja, zato iz rezultatov raziskav v eni državi ne moremo sklepati, da bo enako veljajo v drugi državi. V Bolgariji so na primer dokazali, da hlajenje zraka s toplotnim izmenjevalcem in senčenje oken ne zadostujeta za preprečevanje pregrevanja v pasivni hiši (Badescu et al., 2010). Pojav pregrevanja smo zato preučili na dobri nizkoenergijski hiši v Sloveniji, kjer imamo vroča poletja in bi tako lahko prihajalo do pregrevanja. Ker je bistvo nizkoenergijskih hiš nizka poraba energije, smo želeli preučiti in kvantificirati vpliv pasivnih načinov zagotavljanja ustrezne temperature, senčenja in nočnega zračenja.

1.4.1.3 Kontrolni sistem

Poleg prej omenjenih dejavnikov vpliva na notranjo temperaturo ter še nekaterih drugih, ki se tičejo načrtovanja stavb ter podnebja, v kateri se hiša nahaja, ima kontrola ogrevalnega sistema (avtomatsko uravnavanje) velik vpliv na notranje pogoje. Ustrezna kontrola notranje temperature ne zagotavlja le bolj stabilnega notranjega toplotnega udobja, ampak tudi v določenih okoliščinah prepreči pregrevanje in ohlajevanje in tako prispeva k prihranku energije (Roulet, 2001, Sakellari et al., 2006). Na tržišču obstajajo od izjemno preprostih, ki upoštevajo le notranjo temperaturo v prostoru, do bolj sofisticiranih nadzornih sistemov, ki simulirajo in napovedujejo toplotno obnašanje stavbe ter upoštevajo sončno obsevanje, zunanje temperature, interne vire osvetlitve in naprav, vremenske razmere, vpliv vetra, geometrijo stavbe, toplotno kapaciteto, toplotno prehodnost (Roulet, 2001, Armstrong et al., 2006, Sakellari et al., 2006).

Pri nizkoenergijskih hišah, kjer imajo majhni vnosi energije velik vpliv na energijsko bilanco, ima nadzorni sistem pomembno vlogo in bi tako moral uravnavati ogrevanje glede na natančne podatke o zunanjih in notranjih pogojih ter o delovanju strojnih sistemov. V delu smo preučili vpliv nastavitve kontrolnega sistema ogrevanja na notranjo temperaturo.

1.4.2 Vlaga v hišah

Pri načrtovanju in gradnji stavb je veliko pozornosti usmerjene v ustvarjanje toplotnega udobja, veliko manj pozornosti pa zagotavljanju ustrezne vlažnosti. Vendar to ne pomeni, da je vlažnost nepomembna, nasprotno, pomembna je za zagotavljanje zdravja uporabnikov in stavbe, kot tudi predmetov, s katerimi delimo bivalne prostore, saj so lahko izjemno občutljivi na visoke in nizke vlažnosti (na primer glasbeni inštrumenti, slike, pohištvo) (Padfield, 1998). Vlažnost v stavbah je odvisna od številnih dejavnikov,

kot so: prezračevanje, zunanji klimatski pogoji, razlika med notranjimi in zunanjimi pogoji, gibanje vlage, viri in ponori vlage, ogrevanje, učinkovitost toplotnega ovoja stavbe, gradbeni materiali, gradbene konstrukcije, način gradnje, zrakotesnost in dejavnost uporabnikov, kot tudi sposobnost materialov za uravnavanje vlage (Yoshino et al., 2009, Svennberg, 2006, Al-Homoud, 2005).

V stavbah se količina vlage konstantno spreminja na urni, dnevni in sezonski časovni skali (Svennberg, 2006). Zaradi človeške aktivnosti v stavbi, kot so kuhanje, pranje, tuširanje, lahko notranja relativna vlažnost zelo visoko naraste v izjemno kratkem času (TenWolde in Pilon, 2007), pri čemer lahko relativna vlažnost doseže tudi 100 % (Straube in deGraauw, 2001). V stavbi z 1 do 4 stanovalci se dnevno sprosti 8 do 15 litrov vode. Vlago oddajajo ljudje in živali z dihanjem in potenjem (0,8 in 1,7 kg/dan), rastline (39–101 g/dan), velike količine vlage pa se sprostijo pri tuširanju (2,6 kg/h), kopanju (0,7 kg/h), pomivanju posode (0,25 kg) in kuhanju (0,24 kg/obrok) (TenWolde in Pilon, 2007). Zaradi difuzije vodne pare se vsebnost vlage spreminja tudi v gradbenih konstrukcijah, sezonsko in odvisno od proizvodnje vlage v stavbah ter zunanjih vremenskih razmer.

Velik problem predstavlja suh zrak v stavbah pozimi, ker hladen zrak vsebuje majhno količino vlage. Neustrezne vlažnosti ter nihanja relativne vlažnosti se pojavljajo tudi v nizkoenergijskih hišah, zato smo preučili vpliv uporabe različnih gradbenih materialov (higroskopičnih in nehigroskopičnih) ter parne ovire ali parne zapore na relativno vlažnost v prostoru in relativno vlažnost v konstrukcijah.

1.4.2.1 Parna zapora ali ovira

V zmernem podnebnju vlaga difundira iz notranjosti proti zunanosti. Parna ovira ali zapora nadzira prehod vodne pare skozi gradbene konstrukcije, v lesenih nizkoenergijskih hišah pa zagotavlja tudi zrakotesnost. Prehod vodne pare je potrebno uravnati, saj bi v nasprotnem primeru vlažen topel zrak kondenziral na hladnih površinah. Lokacija in tip parne ovire sta izjemnega pomena za dobro notranje okolje in učinkovitost gradbenih konstrukcij (Simonson et al., 2002). Parna ovira/zapora je običajno izdelana iz papirja, umetnih materialov ali kovine, običajno v obliki folij. Glede na upornost difuziji vodne pare ločimo (Al-Homoud, 2005):

- Parne zapore, ki skorajda ne prepuščajo vodne pare. V to skupino spadajo polietilenske folije, aluminijaste folije, barve na oljni osnovi, vinilne stenske obloge, kovine, steklo in gumijaste membrane.
- Parne ovire, ki delno prepuščajo vodno paro. Mednje spada vezan les, ekspanzirani polistiren, papir, z bitumnom prevlečena stekleno vlaknena izolacija, barve na osnovi lateksa.
- Paroprepustni materiali, ki vodno paro prepuščajo. Mednje spadajo nebarvane mavčne plošče, stekleno vlaknena izolacija, celulozna izolacija, cement in drugi podobni gradbeni materiali.

Še vedno obstajajo dileme, ali je bolje vgraditi parno zaporo, oviro ali pa izdelati gradbeno konstrukcijo brez parne ovire. Rezultati različnih raziskav se namreč precej razlikujejo. Nekateri raziskave so pokazale, da se pri uporabi celulozne izolacije v gradbeni konstrukciji parno oviro lahko izpusti, medtem ko drugi tega ne priporočajo (Levin in Gudmundsson, 2000, Nicolajsen, 2005). Nekateri so dokazali, da je pri vgradnji parnih zapor večja verjetnost za kondenzacijo kot pri vgradnji parnih ovir ali celo gradnji brez parne ovire (Staube in deGraauw, 2001, Karagiozis, 2006, Simonson et al., 2002, Smulski, 1999, Morrell, 2002).

Ker še vedno obstajajo nejasnosti smo želeli v raziskavi primerjati, kako se različni lahki gradbeni sklopi razlikujejo pri povečevanju vlažnosti, kot se dogaja v hišah ob

aktivnostih, pri katerih nastajajo večje količine vlage. Z meritvami profilov relativne vlažnosti smo želeli prikazati in kvantificirati razliko v relativni vlažnosti v gradbeni konstrukciji in v hiši, če je vgrajena parna ovira v kombinaciji s higroskopičnimi materiali in če je vgrajena parna zapora v kombinaciji z nehigroskopičnimi materiali. Zadnja kombinacija je namreč še vedno pogosta pri gradnji objektov.

1.4.2.2 Uravnavanje vlage v stavbah

Nekateri materiali so sposobni zaradi paroprepustnosti in visoke higroskopičnosti absorbirati vodno paro, ko relativna vlažnost naraste, in jo oddati, ko relativna vlažnost pade (Straube in deGraauw, 2001). Na ta način se znižajo ekstremi notranje relativne vlažnosti (Padfield, 1998, Simonson et al., 2002, Hameury, 2006, Svennberg, 2006, Yoshino et al., 2009, Steeman et al., 2007). V času toplega in vlažnega zunanjskega okolja higroskopski materiali znižajo vrhove vlažnosti tudi za 35 % (Osanyintola in Simonson, 2006). Nihanja relativne vlažnosti so tako v stavbah s higroskopičnimi materiali majhna (pod 20 %), v stavbah z nehigroskopičnimi materiali pa večja (do 50 %) (Simonson et al., 2002, Kunzel et al., 2005). Tako na primer v spalnici z zaprtimi okni zaradi nočnega mraza relativna vlažnost zaradi dihanja hitro naraste, higroskopična stena pa jo lahko absorbira in sprosti med dnevnim prezračevanjem (Padfield, 1998). Poleg tega, ker sta transport toplote in vlage povezana, se notranja temperatura dvigne ob vezavi vlage na higroskopski material, kar na primer poveča udobje v kopalnici (Padfield, 1998, Simonson et al., 2002).

Preprečevanje nizkih in visokih vlažnosti ugodno vpliva na notranje okolje, saj je manjša verjetnost za kondenzacijo, razvoj pršic, gliv v prostorih, kjer sicer nastaja velika količina vlage, kot so kopalnice, kuhinje ter tudi spalnice (Padfield, 1998, Straube in deGraauw, 2001, Simonson et al., 2002, Svennberg et al., 2004, Salonvaara et al., 2004, Kunzel et al., 2005, Al-Homoud, 2005, Svennberg, 2006, Mortensen et al., 2005). S higroskopičnimi materiali lahko uravnamo vlago tudi v gradbenih konstrukcijah, na primer, kjer bi lahko zaradi poškodb parne zapore prišlo do kondenzacije (Padfield, 1998) ali pa da je zaradi higroskopičnih materialov sploh ni potrebno več vgraditi (Carll et al., 2007, Pavlik in Černy, 2009). Poleg tega uporaba higroskopskih gradbenih materialov vodi k prihrankom energije za ogrevanje in hlajenje do 5 % ob dobro kontroliranem HVAC sistemu (Osanyintola in Simonson, 2006).

Sposobnost uravnavanja vlažnosti je odvisna od sestave materiala, njegove strukture, aktivne površine, paroprepustnosti, kapacitete shranjevanja vlage, kapacitete uravnavanja vlage (vrednost definirana in standardiziran postopek testiranja v projektu NORDTEST), ravnovesne vsebnosti vlage, temperature, ogrevanja, stopnje vlažnosti, prezračevanja, hitrosti zraka, končnih slojev, namestitve parne ovire, vremenskih sprememb, mikroklimatskih pogojev, sestave gradbenih konstrukcij, časovne skale procesov (Padfield, 1999, Mortensen et al., 2005, Osanyintola in Simonson, 2006, Salonvaara et al., 2004, Simonson et al., 2001, Svennberg, 2006, Hameury, 2006, Yoshino et al., 2009, Hoang et al., 2010).

Številni znanstveniki so dokazali dobro sposobnost uravnavanja vlage celulozne izolacije (Padfield, 1998, Mortensen et al., 2005, Cerolini et al., 2009, Peuhkuri in Hansen, 2005, Svennberg et al., 2004). Poleg tega imajo dobro sposobnost uravnavanja les – najbolj brezov, borov, smrekov, najmanj pa mahagonijev (Arens in Baughman, 1996, Simonson et al., 2001, Rode, 2005, Padfield, 1998, Padfield, 1999, Salonvaara et al., 2004, Svennberg, 2006, Svennberg, 2007), glineni omet (Padfield, 1999), celični beton (Rode, 2005, Peuhkuri in Hansen, 2005), natrijev poliakrilat (Cerolini et al., 2009), lan (Peuhkuri in Hansen, 2005), betonitna glina s perlitom (Padfield, 1998).

Slabo pa vlago uravnavajo perlit, steklena in kamena volna, poliester, polipropilen

(Padfield, 1998, Mortensen et al., 2005, Peuhkuri in Hansen, 2005, Svennberg et al., 2004).

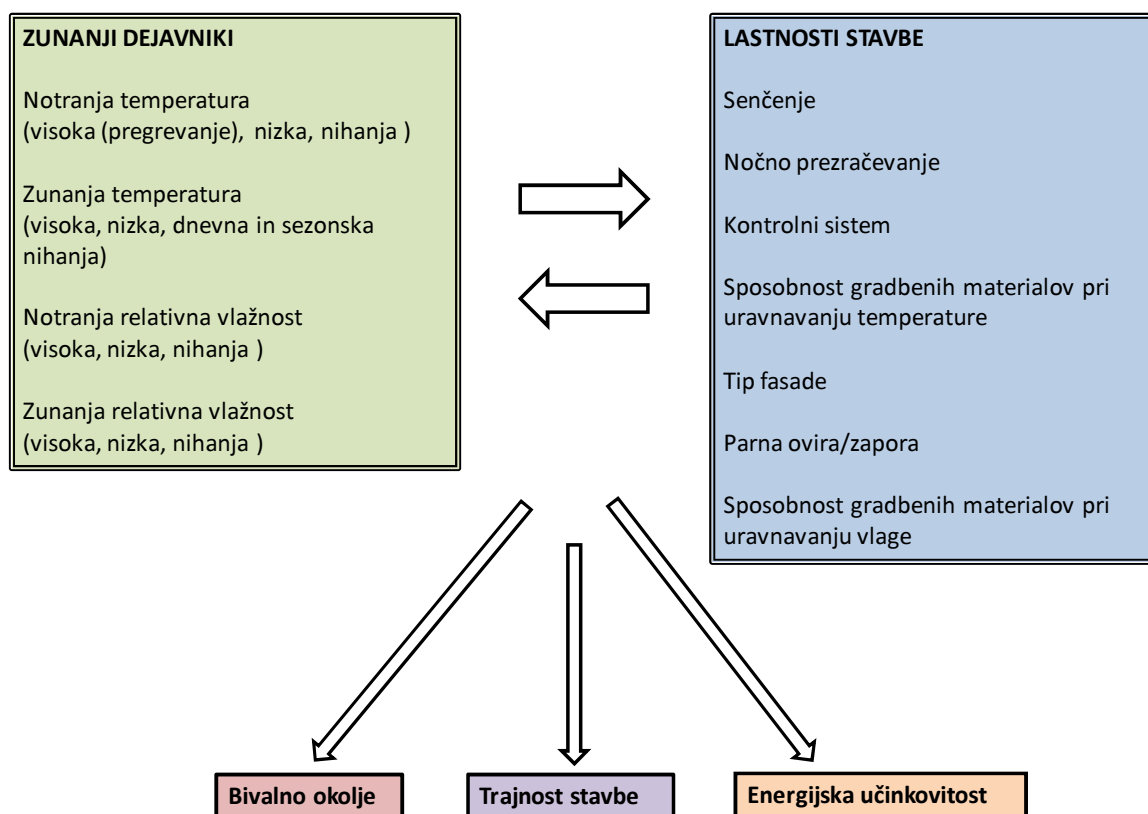
Ker so v realnosti higroskopični materiali pogosto proti notranjem zraku obloženi z drugimi materiali, je pomembno dejstvo, da nekateri površinski materiali zmanjšajo njihov učinek. Najbolj ga zmanjšajo difuzijsko zaprte barve (tudi 75 %), paroprepustne barve pa manj (25 %) (Simonson et al., 2002, Salonvaara et al., 2004, Svennberg, 2006, Svennberg, 2007, Hameury, 2006, Straube in deGraauw, 2001, Peuhkuri in Rode, 2005). Nekateri raziskovalci so potrdili, da mavčne plošče preprečijo učinek uravnavanja vlage materialov za njimi (Padfield, 1998, Svennberg et al., 2004, Svennberg, 2006, Svennberg in Wadsö, 2008, Hameury, 2006), medtem ko so drugi dokazali, da imajo kapaciteto dnevnega uravnavanja vlage tudi materiali za mavčno ploščo (Salonvaara et al., 2004).

Poleg gradbenih materialov pa vlago uravnavajo tudi pohištvo in oprema v stanovanju in tudi tekstil in papir, katerih uravnavanje dnevnih nihanj vlage je veliko zaradi velike kapacitete in hitre absorpcije in desorpcije vlage v primerjavi z drugimi površinskimi materiali (Svennberg, 2006, Svennberg in Wadsö, 2008).

Stene, ki uravnavajo vlago, so dokazano zelo učinkovite v stavbah z nizko izmenjavo zraka, kot so arhivi in skladišča, ali pa v kombinaciji z mehanskim prezračevanjem v stavbah, kjer je potrebna zmerna izmenjava zraka in stabilna relativna vlažnost, na primer muzeji (Padfield, 1998). Tudi v nizkoenergijskih hišah zaradi nizke stopnje prezračevanja prezračevanje ne more vedno zagotavljati odstranitve odvečne vlage iz hiše, pozimi pa v hišo vnaša suh zrak. V nizkoenergijskih hišah so pretoki zraka v prezračevalnem sistemu nizki (število stanovalcev \times 30 m³/h). Tako se na primer v stavbi z 250 m³ zraka in štirimi stanovalci polovica zraka zamenja v eni uri. Zato bi lahko imeli higroskopični materiali v nizkoenergijskih hišah pomembno vlogo ohranjanja ustrezne vlažnosti, saj je to pasivni način zagotavljanja ustreznih bivalnih pogojev, ki v določenih okoliščinah lahko tudi zmanjša potrebo po ogrevanju. Ker je bilo veliko omenjenih raziskav opravljenih na specifičnih sestavah gradbenih sklopov, smo sami želeli primerjati dva najpogosteje uporabljena gradbena sklopa pri nizkoenergijskih hišah (enega z vgrajeno higroskopično izolacijo in drugega z nehigroskopično izolacijo) ter preučiti, kaj to pomeni za notranjo relativno vlažnost in relativno vlažnost v gradbenem sklopu.

2 Namen dela

Veliko raziskav je bilo namenjenih prej omenjenim temam, vendar kljub temu ostajajo nerešena vprašanja. V naših raziskavah smo se osredotočili na v današnjem času vse pogosteje grajene dobre nizkoenergijske hiše, na katerih prej omenjene raziskovalne teme niso bile dovolj raziskane. Zaradi dobre izoliranosti, se zmanjšuje sklopitev objektov z okolico. Posledica tega je vedno večja občutljivost notranjega sistema od različnih zunanjih dejavnikov. Osredotočili smo se na temo sklopitve med zunanjimi dejavniki ter lastnostmi stavb, ki vplivajo na bivalno okolje, trajnost stavbe ter energijsko učinkovitost (Slika 2).



Slika 2: Sklopitev zunanjih dejavnikov in lastnosti stavbe ter njihov vpliv na bivalno okolje, trajnost stavbe in energijsko učinkovitost.

Namen dela je identifikacija zunanjih dejavnikov, ki lahko sprožijo nenadno ali trajno izrazito poslabšanje notranjih pogojev. Obenem pa smo želeli pojasniti vlogo materialov v konstrukcijah in poiskati strategije za zmanjšanje tveganja pojavljanja neustreznih pogojev.

Veliko študij v literaturi primerja toplotno učinkovitost masivne in lahke gradnje, medtem ko smo mi želeli primerjati različne lahke sestave ter najpogosteje uporabljene izolacijske materiale z alternativnimi. Raziskovali smo pasivne načine zagotavljanja ustrezne temperature v stavbah z uporabo gradbenih materialov z različno toplotno kapaciteto in toplotno prevodnostjo. Poleg tega smo želeli kvantificirati problem

pregrevanja v nizkoenergijski hiši v vročem poletju, ki je pogosto v Sloveniji. Naš cilj je bil ugotoviti splošni odziv hiše in določiti uspešnost zagotavljanja ustrezne notranje temperature s preprostimi strategijami: hlajenjem hiše z nočnim odpiranjem oken in senčenjem.

Poleg temperature pa smo spremljali tudi profile relativne vlažnosti v stavbah ter preučili vpliv uporabljenih materialov (njihovih lastnosti), sestav gradbenih konstrukcij na vlažnost v notranjosti stavbe ter v gradbenih konstrukcijah.

Glavne hipoteze so:

- Toplotna izolativnost, toplotna kapaciteta materialov, gostota so pomembne lastnosti gradbenih materialov, ki vplivajo na zmanjšanje temperaturnih nihanj v nizkoenergijskih hišah.
- K zmanjševanju temperaturnih nihanj v nizkoenergijski hiši bistveno prispevata tako način gradnje in uporabljeni materiali, kot tudi nadzorni sistem ogrevanja.
- Zunanji dejavniki, kot so visoka poletna temperatura, visoka gostota toka sončnega sevanja in notranji viri, lahko vodijo v pregrevanje nizkoenergijskih objektov.
- Obstajajo preproste rešitve, ki brez dodatne energije preprečijo pregrevanje v dobri nizkoenergijski hiši v severovzhodni Sloveniji.
- Z vgradnjo difuzijsko odprtih konstrukcij in materialov na osnovi lesa, ki delujejo kot začasni/trajni absorber zračne vlage, lahko uravnamo nihanja relativne vlage v zelenem območju brez aktivnih nadzornih in strojnih sistemov.

Za preverjanje hipotez smo uporabili meritve na petih testnih hišah in različne modele:

1. Projektiranje majhnih testnih hiš – pomanjšanje: Uporaba modela energijske bilance za pravilno izvedeno pomanjšanje testnih hiš. Za preverjanje pravilnosti pomanjšanja majhnih testnih hiš smo primerjali izmerjene profile temperature in relativne vlažnosti v steni majhne testne hiše A in testni hiši v Repnjah.
2. Računanje izgub v realnem času: Uporaba modela energijske bilance za izračun potrebne moči ogrevanja realne testne hiše v Limbušu in majhnih testnih hiš.
3. Modeliranje temperaturnih profilov: Uporaba modela prehoda toplote za primerjavo izmerjenih temperaturnih profilov s simuliranimi temperaturnimi profili.
4. Vpliv toplotne kapacitete gradbenih materialov na pogoje v hišah: Meritve temperaturnih profilov na majhnih testnih objektih. Primerjava teoretičnih in izmerjenih faznih zamikov.
5. Vpliv gradbenih materialov na porabo energije za ogrevanje: Meritve moči ogrevanja majhnih testnih objektov za ugotavljanje vpliva uporabe gradbenih materialov na energijo za ogrevanje. Uporaba modela za določitev vpliva uporabe različnih gradbenih materialov v gradbenih konstrukcijah na pogoje v hišah in v gradbenih konstrukcijah.
6. Vpliv tipa fasade na temperaturo v gradbenih konstrukcijah: Meritve na majhnih testnih hišah A in C z različnima fasadama: tankoslojni fasadni omet,

- lesena prezračevana fasada.
7. Analiza zimskih podatkov: Uporaba modela energijske bilance in meritev na testni hiši v Limbušu za določanje koeficienta efektivnih toplotnih izgub stavbe, toplotne kapacitete stavbe in notranjih virov ogrevanja.
 8. Analiza pregrevanja: Uporaba modela energijske bilance in meritev na testni hiši v Limbušu za napoved pregrevanja v okoliščinah, ki niso nastopile v realni testni hiši, bi pa, če ne bi uporabili senčenja ali če hiše ne bi hladili z nočnim odpiranjem oken.
 9. Vpliv kontrolnega sistema na pogoje v hiši: Uporaba meritev na majhnih testnih hišah, ko so nastavljeni različni parametri v kontrolnem sistemu (ki temelji na modelu energijske bilance hiš).
 10. Profili relativne vlažnosti v gradbenih konstrukcijah: Uporaba meritev relativne vlažnosti v gradbenih konstrukcijah majhnih testnih hiš ter primerjava profilov različnih hiš med seboj (uporaba higroskopičnih in nehigroskopičnih materialov v gradbenih konstrukcijah, uporaba ene ali dveh OSB plošč, uporaba parne ovire ali parne zapore).
 11. Relativna vlažnost v hišah: Eksperimenti z vlaženjem v majhnih testnih hišah. Uporaba meritev relativne vlažnosti v majhnih testnih hišah ob izvajanju vlažnostnih eksperimentov za ugotavljanje vpliva sestave gradbenih konstrukcij na notranjo relativno vlažnost (uporaba higroskopičnih in nehigroskopičnih materialov, uporaba parne ovire ali parne zapore).

3 Material in metode

Da bi ustrezno preverili omenjene hipoteze smo opravili raziskave na različnih testnih objektih. Nekaj raziskav smo opravili na realnih naseljenih dobrih nizkoenergijskih hišah. Ker pa ni bilo moč opraviti vseh raziskav na teh objektih in ker je neracionalno izgraditi objekte realnih dimenzij le za poskuse, smo za potrebe raziskav izdelali več pomanjšanih testnih objektov. Da bi preverili pravilnost pomanjšanja, smo vgradili senzorsko nadzorni sistem tudi v realno testno stavbo, ki ima enako sestavo stene kot ena od majhnih hiš. Meritve na testnih objektih smo podprli s simulacijami na razvitih modelih energijske bilance hiš ter na njih preizkusili različne scenarije.

3.1 Testne hiše

Testne hiše, na katerih smo opravili preiskave, so dobre nizkoenergijske hiše z izjemno dobro izoliranim toplotnim ovojem in energijsko varčnimi okni. V realnih hišah je vgrajen tudi prezračevalni sistem z rekuperacijo toplote, v pomanjšanih testnih objektih ga ni, saj je glavna vloga prezračevalnega sistema odvajanje CO₂ in dovajanje O₂. Realni testni objekti so v večini izolirani s celulozno izolacijo, medtem ko smo na enem od pomanjšanih testnih objektov vgradili konvencionalno izolacijo – mineralno volno in polistiren, da bi preverili vpliv različnih gradbenih materialov in izvedbe gradbenih konstrukcij na pogoje v notranjosti hiše ter v gradbeni konstrukciji. Lastnosti uporabljenih gradbenih materialov, ki pomembno vplivajo na toplotno obnašanje gradbenih konstrukcij, so predstavljene v Tabeli A1. V vseh testnih hišah je vgrajen podoben senzorsko kontrolni sistem, ki temelji na USB mikrokontrolerju, ki s pomočjo programa na računalniku zbira podatke s senzorjev, jih delno obdela ter hkrati kontrolira delovanje strojnih sistemov v hišah.

3.1.1 Testna hiša v Limbušu

3.1.1.1 Opis hiše

Testna hiša v Limbušu (Slika 3) v okolici Maribora je enodružinska dobra nizkoenergijska (potreba po energiji za ogrevanje ustreza zahtevi standarda pasivne hiše, le zrakotesnost je previsoka). Zgrajena je bila leta 2006, naseljena pa je od julija 2006. V pritličju in mansardi je izdelana v leseni skeletni izvedbi nad betonsko kletjo, ki ni vključena v toplotni ovoj stavbe. Hiša ima 113 m² neto ogrevane tlorisne površine in približno 260 m³ ogrevane prostornine. Sleme stavbe je usmerjeno v smeri vzhod-zahod, streha pa je nagnjena z naklonom 40 °.



Slika 3: Testna hiša v Limbušu.

Toplotni ovoj stavbe, stene, streha in tla proti kleti, je zelo dobro izoliran s toplotno prehodnostjo približno $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Stene so sestavljene od zunanosti proti notranosti iz:

- tankoslojni fasadni omet,
- leseno vlaknena fasadna plošča Pavatherm 6 cm (toplotna prevodnost $0,042 \text{ W}/(\text{m K})$)
- celulozna izolacija Trendisol 34 cm (toplotna prevodnost $0,039 \text{ W}/(\text{m K})$) med leseno skeletno konstrukcijo 16 cm x 16 cm,
- mavčno-kartonska plošča.

Izračunana toplotna prehodnost stene znaša $0,103 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ vključno z leseno konstrukcijo.

Streha je sestavljena od zunanosti proti notranosti iz:

- strešna kritina,
- zračni kanal,
- sekundarna kritina iz leseno vlaknenih plošč Agepan DWD 1,6 cm (toplotna prevodnost $0,09 \text{ W}/(\text{m K})$),
- celulozna izolacija Trendisol 41 cm med leseno konstrukcijo 10 cm x 20 cm,
- mavčno-kartonska plošča.

Izračunana toplotna prehodnost strehe je $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Sestava tal proti kleti je:

- keramične ploščice 1 cm,
- cementni estrih 9,5–6,5 cm (toplotna prevodnost $1,2 \text{ W}/(\text{m K})$),
- izolacija iz polistirena kot reflektor talnega ogrevanja 2–5 cm (toplotna prevodnost $0,035 \text{ W}/(\text{m K})$),
- OSB plošča,
- celulozna izolacija Trendisol 30 cm v leseni skeletni konstrukciji 8 cm x 20 cm,
- mavčno-kartonska plošča.

Okna so troslojna z dvema nizkoemisijiskima nanosoma in kriptonom med stekli. Toplotna prehodnost oken znaša $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Večina steklenih površin je usmerjenih

proti jugu, da hiša izkoristi čim več sončne toplote pozimi. Nadstrešek (Slika 3) nad južnimi okni pa je dimenzioniran, da prepreči sončne dobitke med majem in septembrom. Vzhodna in zahodna okna so senčena z zunanji ročno nastavljivimi žaluzijami. Severna fasada ima le dve manjši okni.

Izmerjena zrakotesnost hiše je $n_{50} < 1/h$ pri 50 Pa podtlaka ali nadtlaka. Zračni tok prezračevalnega sistema znaša $80 \text{ m}^3/h$, ki ga poganjata dva ventilatorja (Sunonwealth Electric Machine Industry Co. Ltd. A2175-HBT TC.GN, 26W, 160Pa pri $80 \text{ m}^3/h$). Protitočni rekuperator (dve zaporedni enoti Ving d.o.o. TOP-AL-NO-300-200/200-3; 58 % nominalna rekuperacija) deluje s 83 % učinkovitostjo. Za zaščito pred zmrzovanjem prezračevalni sistem vključuje dva infrardeča predgrelca s 100 W in 200 W moči (volframovi žarnici z nominalno napetostjo 110 V, 98 % IR svetlobe). Predgrelca sta individualno kontrolirana, da omogočata tristopenjsko zaščito pred zmrzovanjem v območju med $0 \text{ }^\circ\text{C}$ in $-12 \text{ }^\circ\text{C}$. Prezračevalni sistem se ugasne pod $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, ki je povprečna minimalna zimska temperatura v tej regiji. Dovodni zrak pa za protitočnim toplotnim rekuperatorjem ogreje še vodno-zračni toplotni izmenjevalec (IMP GV 16 IV 20 3 C 250/2 1 P C 6/Cu Al 15; 170 W), povezan s talnim ogrevalnim sistemom (nominalna temperatura pritoka $30 \text{ }^\circ\text{C}$, nominalna temperatura odtoka $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$, tok vode 100 l/h). Dogreje ga za $2,8 \text{ K}$, tako da doseže zeleno notranjo temperaturo $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hiša je opremljena s talnim ogrevalnim sistemom z maksimalno temperaturo $29 \text{ }^\circ\text{C}$ in maksimalno močjo 1800 W , izračunano, da ohranja pozimi notranjo temperaturo $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Vse mehanske strojne komponente, kot so črpalke, ventile talnega ogrevanja in ogrevanja tople vode nadzoruje senzorsko-kontrolni sistem in računalniški program, ki prav tako shranjuje merjene podatke vsako minuto.

3.1.1.2 Senzorsko-kontroli sistem

Stavba ima vgrajene številne senzorje, katerih podatki se zbirajo za nadziranje in uravnavanje strojnih sistemov v hiši. To vlogo opravlja USB mikrokontroler PMD 1208LS, povezan z računalnikom.

Mikrokontroler ima osem analognih vhodov, dva 12-bitna analogna izhoda, 16 digitalnih vhodno-izhodnih povezav in en 32-bitni zunanji števec. Napaja ga $+5$ voltno USB napajanje računalnika. PMD-1208LS analogni vhodi so programsko nastavljivi za osem 11-bitnih enojnih vhodov ali štiri 12-bitne diferencialne vhode. V senzorsko-kontrolnem sistemu v testni hiši v Limbušu so analogni vhodni kanali nastavljeni enostransko. PMD-1208LS je bil inštaliran, kalibriran in testiran s programskim orodjem InstaCal.

Senzorsko kontrolni sistem napaja napajalec Astec LPX 25. Signali s senzorjev potujejo skozi štiri multiplekserje in 8-kanalni ojačevalec. Kontrolo opravlja 8-kanalna relejna kartica Velleman K8056.

Senzorsko kontrolni sistem zajema naslednje podatke:

- Zunanja temperatura – Text [$^\circ\text{C}$]; senzor je nameščen na severno fasado pod nadstrešek, da je zaščiten pred direktno svetlobo in da nanj ne vplivajo hitra nihanja zaradi hitrega ogrevanja tal; temperaturni senzor je Zennerjeva dioda LM335, ki je kalibrirana proti absolutni temperaturi in dosega absolutno natančnost $0,3 \text{ K}$.
- Notranja temperatura – Tint [$^\circ\text{C}$]; senzor je nameščen v sredini odprtega stopnišča v severnem osrednjem delu stavbe, da je zaščiten pred direktno svetlobo in direktnimi internimi viri v kuhinji, kopalnici in drugimi elektronskimi napravami in tudi pred direktnim hlajenjem skozi glavni vhod v hišo; uporabljen je enak temperaturni senzor kot za zunanjo temperaturo.
- Gostota toka sončnega sevanja – j [W/m^2]; fotodioda (Silicon PIN Photodiode)

BPW34, Vishay) je nameščena na strehi z normalo vektorja usmerjeno z azimutom 183° in naklonom 50° . Realna gostota toka sončnega sevanja, ki vstopi v hišo skozi vsa okna, se izračuna iz izmerjene gostote toka sončnega sevanja toka, ki pade na fotodiodo, nameščeno na strehi, upoštevajoč smer glede na datum in čas ter občutljivost fotodiode. Kalibrirana je glede na maksimalno gostoto moči sončnega sevanja, definirano ob sončnem opoldnevu 21. junija. Smer gostote toka sončnega sevanja z enourno natančnostjo je izračunana z modelom gibanja Zemlje pred Soncem, upoštevajoč položaj Slovenije (46° severno in 16° vzhodno), podatke naklona, kot tudi lokalni solarni čas z ustrezno pretvorbo v UTC (univerzalni koordinirani čas), CET (srednjeevropski čas) or CEST (srednjeevropski poletni čas). Bolj natančno je model razložen v prilogah članka (Mlakar in Štrancar, 2011).

- Drugi temperaturni senzorji merijo temperaturo v ceveh strojnih sistemov (talno ogrevanje, hranilnik toplote itd.) in imajo enake lastnosti kot senzor za zunanjo temperaturo.

3.1.2 Majhne testne hiše

Z namenom raziskati vpliv različnih gradbenih materialov in izvedbe gradbenih konstrukcij smo izdelali majhne testne hiše z različnimi sestavami gradbenih konstrukcij in različnimi vgrajenimi materiali. Da bi bili rezultati kar najbolj reprezentativni in aplikabilni na hišah realnih dimenzij, smo jih skrbno načrtovali.

3.1.2.1 Pomanjšanje

Majhne testne hiše smo morali skrbno načrtovati, da bi bili rezultati uporabni na realnih testnih objektih. Hiše so bile pomanjšane z dimenzij normalne enodružinske hiše, na primer testne hiše v Limbušu.

Glede na osnovno enačbo ohranjanja energije v stavbah ponori (izgube skozi ovoj in prezračevalni sistem – prvi del enačbe) in viri energije (sončni viri – drugi del enačbe, ogrevanje P_{heat} , interni viri P_{int}) preko toplotne kapacitete (mc) stavbe vplivajo na notranjo temperaturo.

$$mc \frac{dT_{int}}{dt} = \Lambda S (T_{ext} - T_{int}) + \sum_i \alpha_g \alpha_{shad} \bar{S}_j \cdot \bar{j} + P_{heat} + P_{int} \quad (1)$$

Iz enačbe o ohranjanju energije v stavbi izpeljemo enačbo notranje temperature:

$$\dot{T} = \frac{\Lambda}{\rho dc} (T_{ext} - T_{int}) + \frac{\sum_i \alpha_g \alpha_{shad} \bar{S}_j \cdot \bar{j}}{\rho S dc} + \frac{P_{heat}}{\rho V c} + \frac{P_{int}}{\rho V c} \quad (2)$$

Toplotne izgube stavbe so odvisne od lastnosti uporabljenih materialov (λ -toplotna prevodnost, ρ -gostota, c -toplotna kapaciteta), njihov volumen V in površina konstrukcij S kot tudi temperaturne razlike med zunanjo (T_{ext}) in notranjo temperaturo (T_{int}). Pri pomanjšanju stavbe, ki je izpostavljena enakim robnim pogojem, ostane temperaturna razlika med notranjostjo in zunanostjo enaka, prav tako ostanejo enake lastnosti materialov. Glede na zgornjo enačbo mora zato ostati v pomanjšanih objektih enaka tudi debelina gradbenih konstrukcij d . Tako ostane enak tudi fazni zamik prenosa toplote skozi stene kot v hiši normalnih dimenzij. Zato smo pri pomanjšanih testnih objektih ohranili enake debeline zunanjih sten kot pri relanih hišah (v smeri toka toplote), vse dimenzije pravokotno na tok toplote pa smo približno 10x zmanjšali v primerjavi z realno hišo.

Sončni toplotni dobitki skozi okna so enaki kot v hiši realnih dimenzij (α_g -faktor prehodnosti sončne toplote in α_{shad} -faktor senčenja), kot tudi gostota toka sončnega sevanja j . Med normalno in pomanjšano hišo je moralo zato ostati enako razmerje med površino oken S_j in površino gradbenih konstrukcij S . Tako je bila površina oken dimanzionirana glede na dimenzionirano površino gradbenih konstrukcij.

Tudi razmerje med močjo drugih virov energije in volumnom gradbenih konstrukcij je moralo ostati približno enako po pomanjšanju, hkrati pa je moral biti ogrevalni sistem sposoben ohranjati notranjo temperaturo na 22 °C.

3.1.2.2 Opis majhnih testnih hiš

Majhne testne hiše (Slika 4) smo postavili na severu Slovenije, v vasi Doslovče. Vse tri hiše imajo enako leseno skeletno konstrukcijo, razlikujejo pa se v sestavi gradbenih konstrukcij sten in strehe. Hiši A in B sta izolirani s celulozo in leseno vlaknenimi ploščami in imata različni toplotni prehodnosti sten. Hiša C pa je izolirana s stekleno volno in polistirenom s toplotno prehodnostjo stene in strehe podobno hiši A. Natančne sestave gradbenih konstrukcij so predstavljene v Tabelah 1 in 2.



Slika 4: Fotografija majhnih testnih objektov v Doslovčah. Levo stoji hiša C, v sredini zgoraj hiša B, v sredini spodaj merilno nadzorni sistem in desno hiša A. Slikano z zahodne smeri.

Tabela 1: Sestava sten majhnih testnih hiš A, B in C. Sestava stene je prikazana od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).

	Hiša A U=0,099 W/(m ² K)	Hiša B U=0,122 W/(m ² K)	Hiša C U=0,109 W/(m ² K)
Notri	Mavčno-kartonska plošča 0,015 m Celulozna izolacija Trendisol 0,14 m Agepan OSB/3 plošča 0,015 m Celulozna izolacija Trendisol 0,18 m med leseno konstrukcijo 0,18 m Leseno vlaknena izolacija Agepan THD 0,08 m Tankoslojni fasadni omet 0,008	Mavčno-kartonska plošča 0,015 m Leseno vlaknena izolacija Agepan THD 0,08 m Agepan OSB/3 plošča 0,015 m Celulozna izolacija Trendisol 0,18 m med leseno konstrukcijo 0,18 m Leseno vlaknena izolacija Agepan THD 0,08 m Vetrna ovira Prezračevan zračni kanal 0,02 m Lesena fasada 0,015 m	Mavčno-kartonska plošča 0,015 m Steklena volna Ursa FDP1 0,05 m Parna zapora Airstop Sd=18 m Agepan OSB/3 plošča 0,015 m Steklena volna Ursa FDP1 0,2 m med leseno konstrukcijo 0,18 m Agepan OSB/3 plošča 0,015 m Polistiren EPS 100 0,12 m Tankoslojni fasadni omet 0,008
Zunaj			

Tabela 2: Sestava streh majhnih testnih hiš A, B in C. Sestava strehe je prikazana od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).

	Hiša A in B U=0,095 W/(m ² K)	Hiša C U=0,098 W/(m ² K)
Notri	Mavčno-kartonska plošča 0,015 m Parna ovira Ekonatur Sd=6,45 m Celulozna izolacija Trendisol 0,4 m med leseno konstrukcijo 0,18 m	Mavčno-kartonska plošča 0,015 m Parna ovira Ekonatur Sd=6,45 m Steklena volna FDP1 0,4 m med leseno konstrukcijo 0,18 m
Zunaj	Leseno vlaknena plošča Agepan DWD 0,016 m	Leseno vlaknena plošča Agepan DWD 0,016 m

Testni objekti se nekoliko razlikujejo v dimenzijah zaradi različne sestave gradbenih konstrukcij. Dimenzije so predstavljene v Tabeli 3.

Tabela 3: Dimenzije majhnih testnih objektov A, B in C.

Dimenzije	A	B	C
Notranja povprečna višina [m]	1,045	1,05	1,04
Notranja dolžina [m]	0,54	0,64	0,71
Notranja širina [m]	0,45	0,56	0,63
Notranja površina [m ²]	0,254	0,376	0,465
Notranji volumen [m ³]	0,254	0,376	0,465
Zunanja povprečna višina [m]	1,68	1,63	1,63
Zunanja dolžina [m]	1,42	1,52	1,52
Zunanja širina [m]	1,33	1,43	1,44
Širina južnega okna [m]	0,39	0,33	0,4
Višina južnega okna [m]	0,45	0,38	0,47
Površina južnega okna [m ²]	0,176	0,125	0,188
Globina južnega okna [m]	0,09	0,14	0,145
Oddaljenost južnega okna od strehe [m]	0,51	0,52	0,53
Širina zahodnega okna [m]	0,21	0,16	0,21
Višina zahodnega okna [m]	0,45	0,39	0,46
Površina zahodnega okna [m ²]	0,094	0,06	0,094
Globina zahodnega okna [m]	0,9	0,14	0,15
Oddaljenost zahodnega okna od strehe [m]	0,64	0,65	0,64

Testne hiše so proti terenu izolirane od notranjosti proti tlom z 1,5 cm debelo Agepan OSB/3 ploščo in 20 cm ekstrudiranega polistirena. Naklon strehe je 10°. Večja okna so usmerjena proti jugu, manjša pa proti zahodu, da omogočijo učinek pregrevanja kot v realnih hišah. Steklo je troslojno z dvema antirefleksnima nanosoma (REFLEX RX WARM 0,5 C, 4/12KR/4/12KR/4), plastičnimi distančniki, termorobom in kriptonom med stekli. Toplotna prehodnost zasteklitve je 0,49 W/(m² K). Servisna vrata so nameščena na vzhodu stavbe.

Hiše imajo vgrajen ogrevalni sistem, ki temelji na žarnicah, ki oddajajo IR svetlobo in so pokrite s keramično posodo, da simulirajo zamik prehoda toplote. Žarnice so zaporedno vezane v parih. Ogrevalni sistem ima več stopenj ogrevanja: 3, 7, 10, 15, 18, 22, 25 W. Ogrevalni sistem nadzira senzorsko-kontrolni sistem. Učinek toplotne mase tal v normalni hiši smo simulirali z 20 l vode v črnih kanticah na notranji okenski polici južnih oken. Tako je bila toplotna kapaciteta podvojena oziroma je narasla za 22 W h.

Različni detajli izdelave testnih objektov so prikazani na Sliki A1.

3.1.2.3 Senzorsko-kontrolni sistem

Senzorsko-kontrolni sistem je podoben sistemu v realni hiši v Limbušu. Analogni vhodni kanal USB mikrokontrolerja PMD-1028FS je nastavljen na enojni način. Sistem napaja napajalnik Astec LPT 25. Signali se s 191 senzorjev prenesejo skozi 24 primarnih multiplekserjev in nato 5 sekundarnih multiplekserjev na 8-kanalni ojačevalac. Kontrolo opravlja 8-kanalna relejna kartica Velleman K8056.

Senzorsko kontrolni sistem zbira naslednje podatke vsake 3 minute:

- Temperatura – T [°C]; senzori so nameščeni v severni, južni in zahodni steni in v strehi majhnih testnih hiš večinoma med plastmi gradbenih materialov ali pa tudi v sredini debelih plasti, čim dlje od konstrukcijskih elementov hiše. Položaj senzorjev je prikazan v dodatku. Zunanji senzori so zaščiteni pred dežjem s toplotnoskrčljivo bužirko in pred sončnim sevanjem z aluminijasto folijo. Temperaturni senzori so diode LM335, kalibrirane na absolutno temperaturo z

natančnostjo 0,3 K. V vseh testnih hišah skupaj je nameščenih 89 temperaturnih senzorjev.

- Relativna vlažnost – RH [%]; tudi senzori za RH so nameščeni tako kot temperaturni senzori. Kjer je ustrezno, so nameščeni skupaj, izjema je postavitve vlažnostnih senzorjev na obeh straneh parnih ovir, pri čemer je temperaturni senzor nameščen le na eni strani zaradi majhne razdalje. Položaj senzorjev je prikazan v dodatku. Vlažnostni senzori so HIH-4000 (Honeywell) z natančnostjo 3,5 %. V vseh testnih hišah skupaj je nameščenih 95 vlažnostnih senzorjev.
- Gostota toka sončnega sevanja – j [W/m^2]; v vseh testnih objektih skupaj je nameščenih 7 fotodiod. Ena izmed fotodiod je nameščena na strehi z normalnim vektorjem z azimutom 180° in naklonom 52° in kalibriranimi na gostoto toka sončnega sevanja. Po ena fotodiode je nameščena na južni fasadi vseh treh hišk tik nad južnim oknom, da izmerijo lokalno gostoto toka sončnega sevanja na vsako hišo – majhna odstopanja v gostoti toka sončnega sevanja na hiše obstajajo zaradi različnega senčenja okoliških dreves. Ostale tri diode so nameščene na notranji strani oken v hiši C: v spodnjem levem in desnem kotu južnega okna in spodnjem levem kotu zahodnega okna, ki pomagajo pri določanju gostote toka sončnega sevanja, ki vstopi v hiše, vključno s senčenjem zaradi okenskih špalet.

Položaji senzorjev v stenah in strehah majhnih testnih hiš so prikazani na Sliki A2 in Sliki A3.

3.1.2.3.1 Izračun sončnih dobitkov skozi okna

Realna moč sončnega obsevanja, ki vstopi v hišo (P_{sol}) skozi južna (P_{solS}) in zahodna okna (P_{solW}), je izračunana iz merjene gostote toka sončnega obsevanja zunaj nad okni (normalizacija na lokalne pogoje posamezne hiše), kot tudi znotraj hiše.

$$P_{sol} = P_{solS} + P_{solW} \quad (3)$$

Pri čemer se upošteva izračunana smer toka sončnega sevanja glede na datum in uro, ki določa kot absorpcije ter občutljivost fotodiode. Kalibrirana je glede na maksimalno gostoto toka sončnega sevanja na solarno poldne 21. junija. Smer toka z enourno natančnostjo je izračunana kot pri testnem objektu v Limbušu.

Komponente vektorja toka sončnega sevanja se izračuna vsako polno uro in interpolira za čas med polnimi urami. Upošteva se senčenje (širina špalet w) južnih in zahodnih oken (S in W) v vseh smereh (y in z smer določata zahodno-vzhodno in južno-severno smer), ki se projicira kot senca na okno. Moč sončnih virov se izračuna za vsako hišo upoštevajoč sončne dobitke skozi okna v hiši C (P_{CSa} , P_{SCb} , P_{CWb} , kjer podpis pomeni hišo C, S južna, W zahodna okna, a nad oknom, b znotraj okna), normalizirano na lokalno gostoto toka sončnega sevanja, ki se izmeri nad okni na južni fasadi vsake hiše.

$$P_{solS} = \frac{P_{Sa}}{P_{CSa}} (w_{Sy} - s_y)(w_{Sz} - s_z)P_{CSb} + (w_{Sy}w_{Sz} - (w_{Sy} - s_y)(w_{Sz} - s_z))P_{CSb} \quad (4)$$

$$P_{solW} = \frac{P_{Sa}}{P_{CSa}} (w_{Wy} - s_y)(w_{Wz} - s_z)P_{CWb} + (w_{Wy}w_{Wz} - (w_{Wy} - s_y)(w_{Wz} - s_z))P_{CSb} \quad (5)$$

3.1.2.3.2 Nadzor ogrevalnega sistema

Ogrevalni sistem v testnih objektih je moral biti kontroliran tako, da je ohranjal nastavljeno notranjo temperaturo. Podatki s senzorjev so se zapisovali vsake 3 minute, istočasno pa se je prilagodila moč ogrevalnega sistema. Moč ogrevanja P_{heat} se je

izračunala iz 24-urnega povprečja notranje temperature T_{intavg} , ki vpliva na notranje toplotne dobitke P_{int} . Slednji se izračunajo iz pričakovanih notranjih dobitkov toplote P_{intset} in so popravljeni glede na sproščeno toploto iz toplotne mase (C) hiše (drugi del enačbe). Približek toplotne mase se določi glede na odstopanja notranje temperature T_{intset} in njenih 24-urnih integralov (T_{intavg}) iz notranje nastavljene temperature po enačbi, ki je bila optimizirana iz spremljanja delovanja testne hiše v Limbušu v obdobju 2006–2009:

$$P_{int} = P_{intset} + C(T_{intavg} - T_{intset}) \left(1 - e^{\frac{-(T_{int} - T_{intset})}{(T_{intavg} - T_{intset})}}\right) \quad (6)$$

Ker temperaturna nihanja z ene strani gradbene konstrukcije na drugo potujejo zelo počasi, so toplotne izgube proporcionalne s povprečnim temperaturnim gradientom. Moč ogrevalnega sistema se izračuna upoštevajoč določene specifične toplotne izgube H_{spec} in razliko med notranjo nastavljeno temperaturo in zunanjo povprečno temperaturo (T_{extavg}), popravljen z močjo notranjih P_{int} in sončnih dobitkov P_{sol} :

$$P_{heat} = H_{spec} (T_{intset} - T_{extavg}) - P_{int} - P_{sol} \quad (7)$$

Notranja temperatura je nastavljena na 22 °C. Nastavljene in ocenjene specifične toplotne izgube so 1 W/K ter toplotna kapaciteta hiše 10 Wh/K. Vrednosti sta bili določeni z izračunom ter obnašanjem testnih objektov. Za vse testne objekte so bile nastavljene iste vrednosti, čeprav se med hišami vrednosti nekoliko razlikujejo. Majhne razlike je krmilnik obvladoval preko prilagajanja »internih virov« (kot kaže enačba 6).

3.1.2.3.3 Nadzor vlaženja

Z vlažnostnimi poskusi smo simulirali aktivnost ljudi v hiši, kot so kuhanje, tuširanje, pranje, ki v kratkem času sprostijo veliko količino vodne pare v zrak in povzročijo hitro povečanje relativne vlažnosti, ki lahko naraste tudi do 100 %, kar lahko na nekaterih površinah povzroči kondenzacijo. S tem eksperimentom smo želeli preučiti odziv različnih gradbenih konstrukcij na nihanja notranje relativne vlažnosti. Ultrazvočni vlažilci AIR O SWISS AOS 7146 so bili vgrajeni v hiše in priklopljeni na senzorsko-kontrolni sistem. V programskem orodju smo nastavili časovni interval vlaženja (1 ura) ob določeni uri. Vlaženje je potekalo nekaj dni zapovrstjo. Potek vlažnosti so zaznavali senzorji, vgrajeni v notranjosti in v gradbenih konstrukcijah majhnih testnih objektov. Moč vlaženja je bila nastavljena v vseh treh testnih objektih na enako stopnjo. V naseljenih realnih stavbah je dnevno vlaženje ocenjeno na 8–15 litrov, v majhnih testnih hišah pa se je v eni uri sprostito približno 0,04 litre.

3.1.3 Testna hiša v Repnjah

Da bi preverili, ali so rezultati meritev na majhnih testnih hišah primerljivi z rezultati v realni hiši, smo spremljali temperaturo in relativno vlažnost v steni pasivne hiše v Repnjah.

3.1.3.1 Opis hiše

Testna hiša (Slika 5) je enodružinska pasivna hiša v osrednji Sloveniji, v vasi Repnje. Hiša je bila zgrajena in naseljena leta 2010. Ima betonsko pritličje, ki delno meji na zemljo, in leseno skeletno konstrukcijo v prvem in drugem nadstropju. Neto ogrevana površina znaša 283 m² in neto ogrevana prostornina 706 m³. Površina toplotnega ovoja znaša 724 m². Glavne steklene površine so usmerjene proti jugovzhodu. Stene in streha so izolirani s celulozno izolacijo. Sestava sten v prvem in drugem nadstropju je enaka kot pri

majhni testni hiši A. Proti tlom je hiša izolirana z izolacijo iz polistirena. Sestava stene v pritličju in talne plošče je prikazana v Tabeli 4.



Slika 5: Testna hiša v Repnjah. Fotografirana z juga.

Tabela 4: Sestava stene v pritličju in talne plošče hiše v Repnjah. Sestavi sta prikazani od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).

	Stena v pritličju $U=0,151 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Talna plošča $U=0,165 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Notri	Mavčno kartonske plošče 0,015 m	Ploščice 0,02 m
	Parna zapora	Cementni estrih 0,06 m
	Celulozna izolacija 0,12 m	Polietilenska folija
	Beton 0,2 m	Ekstrudirani polistiren 0,2 m
	Hidroizolacija	Hidroizolacija
	Ekstrudirani polistiren 0,1 m	Beton 0,1 m
Zunaj	Tankoslojni fasadni omet 0,008 m	Gramoz 0,4 m

Okna so troslojna s skupno površino 39 m^2 . U vrednost stekla znaša $0,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, U vrednost okvirjev fiksnih oken $0,63 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ in ostalih okvirjev $0,73 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Izmerjena zrakotesnost hiše znaša 0,4 izmenjave zraka na uro pri 50Pa. Kompaktna enota D&W X2 skrbi za prezračevanje in ogrevanje. Njena učinkovitost je 83 % in moč do 3,5 kW.

3.1.3.2 Senzorski sistem

Senzorski sistem je sestavljen podobno kot v majhnih testnih hišah. Meri temperaturo in relativno vlažnost v severozahodni steni drugega nadstropja in notranjem delu zunanje stene v pritličju, kot tudi notranjo in zunanjo temperaturo in relativno vlažnost.

Senzorsko kontrolni sistem zbira naslednje podatke vsake 3 minute:

- Temperatura – T [°C]; senzori so nameščeni v severozahodni steni večinoma med plastmi gradbenih materialov ali pa tudi v sredini debelih plasti, čim bolj stran od konstrukcijskih elementov hiše. Zunanji senzor je zaščiten pred dežjem s

toplotnoskrčljivo bužirko. Temperaturni senzori so diode LM335, kalibrirane na absolutno temperaturo z natančnostjo 0,3 K.

- Relativna vlažnost – RH [%]; tudi senzori za RV so nameščeni tako kot temperaturni senzori. Kjer je ustrezno, so nameščeni skupaj, izjema je postavitve vlažnostnih senzorjev na obeh straneh parnih ovir, pri čemer je temperaturni senzor nameščen le na eni strani zaradi majhne razdalje. Vlažnostni senzori so HIH-4000 (Honeywell) z natančnostjo 3,5 %.

Sistem temelji na USB mikrokontrolerju tako kot v ostalih testnih objektih. Analogni vhodni kanali so nastavljeni diferencialno. Sistem napaja napajalec Astec LPX 25. Signali z 20 senzorjev (10 temperaturnih in 10 vlažnostnih) se prenesejo skozi 4 multiplekserje na 8-kanalni ojačevalce.

3.2 Modeliranje

Meritve na testnih objektih smo podkrepili s simulacijami. Izdelali smo model energijske bilance hiše za testno hišo Limbuš ter model za modeliranje energijske bilance modelnih objektov ter simulacijo prenosa toplote skozi gradbene konstrukcije. S simulacijami smo preverili različne izvedbe gradbenih konstrukcij ter različne scenarije v testnih objektih.

3.2.1 Modeliranje strategij za preprečitev pregrevanja

S simulacijami smo si pomagali pri ovrednotenju problema pregrevanja v nizkoenergijskih hišah. Primerjali smo izmerjeno in simulirano notranjo temperaturo v testnem objektu. Razlika simulirane in izmerjene temperature je razkrila vire pregrevanja v času.

3.2.1.1 Opis modela

Na notranjo temperaturo (T) preko toplotne kapacitete (C) vplivajo vse moči ogrevanja in hlajenja (P) znotraj toplotnega ovoja:

$$C \frac{dT}{dt} = \sum P \quad (8)$$

Toplotno kapaciteto smo določili s prilagajanjem odziva hiše pozimi. Glavni viri hlajenja v hladnem obdobju leta so transmisijske in prezračevalne izgube (P_{loss}). Odvisne so od razlike med notranjo T_{int} in zunanjo T_{ext} temperaturo ter koeficienta specifičnih toplotnih izgub (Λ v W/K):

$$P_{loss} = \Lambda [T_{ext}(t) - T_{int}(t)] \quad (9)$$

Koeficient specifičnih toplotnih izgub združuje koeficient transmisijskih toplotnih izgub (Λ_T), koeficient izgub prezračevanja (Λ_V), zaradi neidealne učinkovitosti rekuperatorja prezračevalnega sistema. Poleg tega pa vključuje še koeficient nekontroliranih izgub (Λ_{UNCON}), na primer zaradi nekontroliranega odpiranja vrat. Ker so vse tri komponente odvisne od temperaturnega gradienta med notranjostjo in zunanostjo, so združene in določene skupno v postopku prilagajanja odziva hiše v zimskem času kot koeficient učinkovitih toplotnih izgub (Λ).

$$\Lambda = \Lambda_T + \Lambda_V + \Lambda_{UNCON} \quad (10)$$

Energijo v stavbo v večini dovaja sistem talnega ogrevanja z močjo P_{heat} . Da je

mogoča čim bolj direktna analiza ogrevanja, toploto v testni hiši v Limbušu dovajajo trije električni grelci z 300 W, 600 W in 900 W, ki so nameščeni v dovodnih ceveh talnega ogrevalnega sistema in digitalno kontrolirani in frekvenčno modulirani s kontrolnim sistemom na računalniku. Vključitev moči ogrevanja v simulacijo je enostavna, saj kontrolni sistem beleži moč vklopljenih grelcev ob določenem času. Vmesne vrednosti ogrevalne moči so mogoče s kombiniranjem grelcev na urni časovni skali, pri čemer se upošteva zamik sproščanja toplote zaradi počasnega časovnega odziva talnega ogrevanja zaradi toplotne mase v tleh. Slednje služi kot kondenzator in spremeni spreminjajoče gretje v konstantno.

Poleg tega se nizkoenergijska hiša ogreva tudi pasivno, torej z nekontrolirano absorpcijo sončnega sevanja skozi steklo in z internimi viri toplote. Ti so posledica sproščanja energije pri kuhanju, metabolne aktivnosti teles uporabnikov, sproščanja energije zaradi delovanja neidealno učinkovitih električnih naprav predvsem toplotnih črpalk (hladilnik) in drugih (multimediji, računalniki, ki sproščajo energijo, da zmanjšajo entropijo). Količina internih virov se konstantno spreminja v času. Na primer, nobena od oseb, ki odda v povprečju 80 W, ni stalno prisotna v hiši. To naredi simulacije v realni hiši bolj zahtevne, saj ni mogoče natančno spremljati prisotnosti stanovalcev. Poleg tega je sproščanje energije pri kuhanju stohastičen in diskreten proces, saj se energija ne sprošča kontinuirano, ampak v velikih količinah, kar otežuje simulacije. Analizo smo poenostavili, tako da je moč notranjih virov določena kot povprečna vrednost, ki je bila določena eksperimentalno s prilagajanjem nihanj v zimskem času.

Pasivni solarni viri so eden izmed glavnih virov energije v nizkoenergijski hiši. Natančnost njihove moči je zato zaželeno v simulacijah. Moč sončnih virov P_{sol} je bila izračunana direktno iz podatkov o arhitekturi stavbe in izmerjene gostote toka sončnega sevanja j :

$$P_{sol} = \sum_i \alpha_g \alpha_{shad,i}(t) \begin{cases} \bar{S}_i \cdot \bar{j}(t); & > 0 \\ 0; & < 0 \end{cases} \quad (11)$$

α_g je faktor prehodnosti sončne toplote, ki znaša 0,5 za steklo, uporabljeno v testni hiši. $\alpha_{shad,i}$ je efektivna, časovno odvisna prestopnost vsakega i -tega okna zaradi senčenja, ki je odvisna od smeri toka sončnega sevanja in oblike stavbe. S_i je površina prosojnega dela vsakega i -tega okna, medtem ko j pomeni gostoto toka sončnega sevanja, ki pada v smeri sončnih žarkov. Slednjo določata gostota in smer toka sončnega sevanja. Gostoto meri fotodioda na strehi v realnem času (vsako minuto), medtem ko je smer toka sončnega sevanja izračunana vsako minuto, kot je prikazano v Appendixu A (Mlakar in Štrancar, 2011). Gostota toka sončnega sevanja je merjena v smeri proti jugu (azimut 183°) z naklonom 50° na strehi in se kasneje preračuna v realno gostoto vpadnega toka sončnega sevanja z uporabo kota med normalo fotodiode in izračunano smerjo toka sončnega sevanja. Izračunana maksimalna gostota toka sončnega sevanja se uporabi za referenco in kalibracijo fotodiode. Sončno energijo omejujejo senčila: na južni fasadi fiksni nadstrešek senči okna, na zahodni in vzhodni strani pa zunanje ročno nastavljive žaluzije. Senčenje se upošteva z izračunom senčenega področja vsakega okna in ustreznega zmanjšanja toka sončnega sevanja. Pri ročno nastavljenih žaluzijah, ki ne senčijo oken konstantno, je senčenje izračunano glede na strategije senčenja, ki jih uporabljajo stanovalci hiše. Ti upoštevajo preprosto pravilo: z žaluzijami se senči le v vročih mesecih, da se prepreči jutranje sonce na vzhodnih oknih in popoldansko sonce na zahodnih. Izjeme niso zabeležene in tako niso upoštevane v simulaciji.

Dodatni viri energije so v prezračevalnem sistemu zaradi predgrevanja pred rekuperatorjem in dodatnega grelca za njim. Prvi prepreči zmrzovanje kondenzata na izhodu, medtem ko drugi dogreva vhodni zrak na sobno temperaturo pred vstopom v

sobe. Zrak predgrevata dva infrardeča grelca 100 W in 200 W s tristopenjsko preprečitvijo zmrzali v območju med 0 °C in -12 °C. Dodatno pa zrak ogreva še 280 W vodno-zračni izmenjevalec, povezan s talnim ogrevalnim sistemom. Tudi podatke o moči in delovanju teh grelcev beleži kontrolni sistem. Poleti ta dva tipa dogrevanja ne delujeta in tako ne prispevata energije v energijsko bilanco stavbe. Pozimi pa predstavljata dodatno moč ogrevanja s 100–480 W, ki dogrejejo za 2–9 K. Kljub temu da namen teh grelcev ni ogrevanje, pač pa zaščita prezračevalnega sistema in povečanje toplotnega udobja, prispevata pomembno količino toplote. Neupoštevanje bi pomenilo neujemanje simulirane in izmerjene temperature.

Neravnovesje med toplotnim izgubami (P_{loss}) in sončnimi toplotnimi dobitki (P_{sol}), ogrevanjem (P_{heat}), notranjimi viri (P_{int}), predgrevanjem zraka (P_{pre}) in dodatnim ogrevanjem z vodno-zračnim izmenjevalcem (P_{add}) vpliva na notranjo temperaturo preko toplotne kapacitete:

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = P_{loss}(t) + P_{sol}(t) + P_{heat}(t) + P_{int}(t) + P_{pre}(t) + P_{add}(t) \quad (12)$$

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = \Lambda(T_{ext} - T_{int}) + \sum_i \alpha_g \alpha_{shad,i}(t) \left\{ \begin{array}{l} \bar{S}_i \cdot \bar{j}(t); > 0 \\ 0; < 0 \end{array} \right\} + P_{heat}(t) + P_{int}(t) + P_{pre}(t) + P_{add}(t) \quad (13)$$

Model temelji na delih Badescu et al. (2003 in 2010), kjer model vključuje bolj natančno opisane interne vire, kot tudi notranji zrak, energijo in tok toplote v stavbi. Da bi določili parametre v testnem objektu iz eksperimentalnih podatkov in se izognili natančnemu določanju notranjih parametrov, ki bi otežili prilagajanje, je bil model internih virov in akumuliranja energije poenostavljen do mere, da je še mogoče opisati vzorce nihanja notranje temperature. Eksperimentalni argument za take poenostavitve leži v notranji arhitekturi hiše z velikimi prostori in načinom rabe hiše. Spodnje nadstropje je skorajda en velik prostor, z izjemo majhnega vhodnega prostora. V zgornjem nadstropju pa so vrata v hiši odprta skoraj ves čas. Oboje skupaj s prezračevalnim sistemom zmanjša notranje temperaturne gradientne skoraj do natančnosti eksperimentalnih podatkov. Temu ustrezno je tudi merjenje notranje temperature, ki je mogoče z enim samim senzorjem.

3.2.1.2 Simulacije notranje temperature

Z identifikacijo časovnega poteka sprememb posameznih komponent smo zmanjšali zahtevnost izračuna.

Zunanja temperatura se spreminja na urni časovni skali, vendar vpliva na notranje okolje z 20 h časovnim zamikom zaradi debeline izolacije in toplotne kapacitete stavbe. Gostota toka sončnega sevanja se spreminja na minutni časovni skali, energija pa vpliva na notranjo temperaturo z nekajurnim zamikom zaradi absorpcije v tleh in drugih masivnih elementih v stavbi. Ogrevanje hiše ima dolge časovne zamike zaradi nizkotemperaturnega ogrevanja in toplotne prehodnosti skozi plasti tal. Časovni zamik je tako na urni časovni skali. Notranji viri se spreminjajo na minutni časovni skali in se spreminjajo najhitreje, kar je tudi končna časovna skala simulacij. Zato so se tudi podatki v hiši zbirali vsako minuto.

Ker so količine kvazikonstantne na minutni časovni skali, se zgornjo diferencialno enačbo pretvori v diferenčno enačbo, kar bistveno poenostavi reševanje:

$$T_{int}(t+1) = T_{int}(t) + \frac{\Delta t}{C} \sum_i P_i(t) \quad (14)$$

Rezultat so izračunane vrednosti notranje temperature T_{int} za vsako minuto iz podatkov, ki jih beleži in preračuna senzorsko-kontrolni sistem. Efektivne lastnosti stavbe, ki vplivajo na notranjo temperaturo, so bile določene s prilagajanjem simulirane notranje temperature, merjene v zimskem času.

3.2.1.3 Določanje koeficienta efektivnih toplotnih izgub, toplotne kapacitete in notranjih virov s prilagajanjem odziva hiše pozimi

Da bi čim bolj natančno določili koeficient efektivnih toplotnih izgub, toplotno kapaciteto in notranje vire, morajo biti toplotne izgube največje. Splošni odziv stavbe je tako določen pozimi. Največja razlika med notranjo in zunanjo temperaturo zagotavlja dobro občutljivost metode za določanje koeficienta efektivnih toplotnih izgub. Dobro definirana nihanja zunanje temperature in dobro blažena nihanja notranje temperature omogočajo dobro določitev toplotne kapacitete. Primerjava energijske bilance hiše v obdobju počitnic, ko ni nikogar v hiši in ko so, pa omogoča dobro določitev internih virov.

Koeficient transmisijskih toplotnih izgub, koeficient izgub prezračevanja in koeficient nekontroliranega prezračevanja ne morejo biti določeni ločeno, ampak kot njihova vsota, saj za vse velja linearna odvisnost od razlike med zunanjo in notranjo temperaturo. Eksperimentalno določen koeficient toplotnih izgub lahko rahlo presega izračunanega zaradi neidealne izvedbe gradbenih konstrukcij, kot tudi zaradi nihanj toka zraka zaradi zapiranja notranjih vrat, kar je povezano tudi s spremembami učinkovitosti toplotne izmenjave in rekuperacije.

V primeru toplotne kapacitete bo prilagajanje določilo nižjo vrednost v primerjavi z izračunano. Razlog za to je, da vsa masa, kot so cementni estrih, ploščice, les, izolacija, mavčno-kartonske plošče, ki sestavlja toplotni ovoj, v realnosti ne opravlja funkcije akumuliranja toplote.

Določanje internih virov pa zahteva bolj drastične približke zaradi pomanjkljivih podatkov o prisotnosti in aktivnosti oseb v hiši. Tako so interni viri določeni povprečno in so časovno neodvisni. Določi se lahko le razmerje med internimi viri, povezanimi z aktivnostjo uporabnikov, in internimi viri, ki jih stalno oddajajo električne naprave. Slednja komponenta je določena v obdobju, ko so stanovalci na počitnicah v primerjavi z obdobjem, ko so doma.

3.2.1.4 Določanje efekta hlajenja s prilagajanjem odziva hiše poleti

Odziv hiše, definiran preko koeficienta specifičnih toplotnih izgub, notranjih virov energije in toplotne kapacitete, določen pozimi s prilagajanjem notranje temperature, je bil uporabljen pri analizi poletnih notranjih temperatur, s čimer je bilo mogoče določiti poletne pojave. Pri visoki zunanji temperaturi in skoraj ničelnih toplotnih izgubah s kondukcijo ali prisilnim prezračevanjem in pri visokem sončnem toku, ko je toplotna moč ogrevanja zaradi vpadnega sončnega sevanja veliko višja od hlajenja, je energijska bilanca močno odvisna od hlajenja in senčenja, ki prepreči vstop sončnega toka v stavbo. Najpreprostejši in najcenejši način hlajenja je z odpiranjem oken ponoči. V analizi smo uporabili mesece, v katerih je pregrevanje najbolj verjetno.

Ročno senčenje, s katerim so stanovalci senčili hišo, je bilo vključeno v simulacijo poleg odpiranja oken ponoči. Stalno se je senčilo južna okna s skrbno načrtovanim nadstreškom. Žaluzije na vzhodnih in zahodnih oknih so se strogo uporabljale, ko je bila zunanja temperatura višja od notranje. To je preprečilo sončne pritoke skozi senčena okna. Izračunan je bil tudi časovni potek notranje temperature za hipotetične primere, ko bi bila hiša izpostavljena enakim zunanjim pogojem, senčenja in odpiranja oken pa ne bi bilo.

Učinek nočnega zračenja skozi okna, ko zunanja temperatura pade pod notranjo

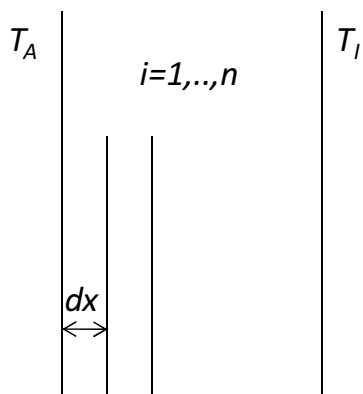
temperaturo, je bil učinkovito določen z dodatnim koeficientom toplotnih izgub 590 W/K vsako noč, ko so bila okna odprta. To je povprečje mešanja zunanega in notranjega zraka znanih temperatur (merjeno) z izmenjavo zraka 1600 kg/h. Prezračevalni sistem pa deluje z izmenjavo 130 kg/h pri manjših temperaturnih razlikah, kar ne zadostuje za odvajanje odvečne toplote iz nizkoenergijske hiše.

3.2.2 Modeliranje v majhnih testnih objektih

Želeli smo preveriti, v kolikšni meri meritve korelirajo s teoretičnimi tj. idealnimi modelnimi vrednostmi oziroma obratno in ali lahko s simulacijami napovemo pogoje v gradbenih konstrukcijah in tudi energijsko bilanco stavb. Zanima nas tudi, če lahko z modelom prikažemo razlike med gradbenimi konstrukcijami in njihov vpliv na porabo energije in bivalne pogoje.

3.2.2.1 Modeliranje temperature v gradbenih konstrukcijah majhnih testnih objektov

V kolikšni meri so izmerjene temperature enake teoretičnim temperaturam v gradbenih konstrukcijah, smo preverili s simulacijami. Model izračuna temperaturne profile sten majhnih testnih hiš. Modelna hiša je nekoliko poenostavljena, je preprosta kocka z notranjo stranico (d_I), izračunano iz notranje prostornine majhnih testnih hiš (V). Pri modelni stavbi določimo gradbene konstrukcije, učinkovite lastnosti stavbe ter robne pogoje. Model razdeli gradbeno konstrukcijo na tanke plasti (Slika 6).



Slika 6: Shema modelirane stene. Določeni sta notranja (T_I) in zunanja temperatura (T_A). Stena je razdeljena na n plasti z debelino dx .

Temperature med plastmi se izračunajo po naslednjih diferencialnih enačbah (od zunanosti proti notranosti):

$$\text{Ko je } i=1 \quad \frac{\partial T_1^f}{\partial t} = \frac{1}{\rho_1 c_1 dx^2} [\lambda_1^{ef} (T_A - T_1^f) + \lambda_1 (T_2 - T_1^f)] \quad (15)$$

$$\text{Ko je } i=2, \dots, n-1 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i c_i dx^2} [T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i] \quad (16)$$

$$\text{Ko je } i=n \quad \frac{\partial T_n^f}{\partial t} = \frac{1}{\rho_n c_n dx^2} [\lambda_n^{ef} (T_I - T_n^f) + \lambda_n (T_{n-1}^f - T_n^f)] \quad (17)$$

Temperatura v posameznih plasteh (n je število plasti) je odvisna od toplotne prevodnosti (λ_i), specifične toplotne kapacitete (c_i) in gostote (ρ_i) materiala v posamezni plasti ter notranje (λ_I) in zunanje toplotne prevodnosti zraka (λ_A), specifične toplotne

kapacitete (c_I) in gostote (ρ_I) zraka, zato je potrebno navedene lastnosti določiti v modelu. Efektivna toplotna prevodnost (λ_{ef}) vsake rezine je določena po:

$$\lambda_1^{ef} = 2(\lambda_A^{-1} + \lambda_1^{-1})^{-1} \quad (18)$$

$$\lambda_n^{ef} = 2(\lambda_n^{-1} + \lambda_1^{-1})^{-1} \quad (19)$$

Razlika v temperaturi med eno in drugo stranjo plasti vpliva na smer in moč toka toplote. Izmerjena notranja in zunanja temperatura na gradbeni konstrukciji stene v posamezni majhni testni hiši sta bili uporabljene v simulaciji. V začetku simulacije je notranja temperatura enaka izmerjeni povprečni notranji temperaturi in temperatura v različnih plasteh se izračuna po sledeči enačbi.

$$T_I(t=0) = T_{A,0} + (T_{I,0} + T_{A,0}) \frac{(i-0,5)}{n} \quad (20)$$

Začetna temperatura tal je izračunana po enačbi. Zunanja temperatura tal (T_A^{floor}) je bila v simulaciji nastavljena na konstantno vrednost.

$$T_i^{floor}(t=0) = T_A^{floor} + (T_i^f(t=0) - T_A^{floor}) \frac{i-0,5}{n} \quad (21)$$

Na notranjo temperaturo pa poleg lastnosti uporabljenih materialov vplivajo notranje površinske temperature na posameznih gradbenih konstrukcijah (4 stene, streha, tla), moč ogrevanja (P^{heat} podatek, ki ga je zabeležil nadzorni sistem v majhnih testnih objektih), kot tudi izračunana moč sončnega sevanja (P^{pas}), ki vstopi v hišo (podatek izračunal nadzorni sistem):

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \frac{1}{\rho_I c_I d_I dx} \left[\lambda_n^{ef} (\sum_{f=1}^4 T_n^f - 4T_I) + \lambda_{n,roof}^{ef} (T_n^{roof} - T_I) + \lambda_{n,floor}^{ef} (T_n^{floor} - T_I) + \frac{1}{\rho_I c_I} \frac{P^{heat} + P^{pas}}{d_N^3} \right] \quad (22)$$

Rezultat simulacije je časovni potek notranje temperature ter temperature v različnih plasteh gradbenih konstrukcij.

3.2.2.2 Simulacija energijskega ravnovesja hiše

Poleg modeliranja temperaturnih profilov smo s podobnim modelom modelirali tudi energijsko bilanco modelne hiše. Tudi ta modelna hiša je preprosta kocka z notranjo stranico (dI), izračunano iz notranje prostornine majhnih testnih hiš (V). Sestavljena je iz šestih enakih gradbenih konstrukcij, ki jih model razdeli na tanke plasti. Temperatura prve plasti od zunanosti proti notranosti se izračuna po:

$$\text{Ko je } i=1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{\rho_1 c_1 dx^2} \left[\lambda_1^{ef} (T_A - T_1) + \lambda_1 (T_2 - T_1) \right] + \frac{1}{\rho_1 c_1} (P_A^{sol} + P_A^{rad}) \quad (23)$$

Na temperaturo v prvi zunanji plasti poleg lastnosti gradbenih materialov vpliva zunanja temperatura. Povprečna temperatura zunanjega zraka ($T_{A,0}$), dnevno nihanje zunanje temperature (T_S) in notranja nastavljena temperatura (T_I) so bili v modelu določeni glede na klimatske podatke za Slovenijo za posamezni mesec. Zunanja temperatura (T_A) je izračunana iz povprečne zunanje temperature in sinusa dnevnih nihanj zunanje temperature z začetkom sinusnega nihanja od 8. ure zjutraj:

$$T_A = T_{A,0} + T_S \sin(2\pi(t - 0,3)) \quad (24)$$

Na temperaturo v prvi plasti pa vpliva tudi sončno sevanje, ki pade na fasado P_A^{sol} , ter sevalna moč P_A^{rad} . Maksimalno gostoto sončnega toka $P_A^{sol\ max}$, ki pade na fasado, in čas obsevanja je potrebno v modelu določiti (od t_1 , do t_2). Sončno obsevanje ima v modelu obliko pozitivnih vrednosti sinusne funkcije. Podatka smo pridobili iz klimatskih podatkov za Slovenijo za vsak posamezni mesec.

$$P_A^{sol} = \frac{P_{A\ max}^{sol}}{5d_I^2 dx} F \sin(t_1, t_2) \quad (25)$$

Sevalna moč, ki segreva fasado, je izračunana iz razlike med izsevanim energijskim tokom zraka in prve plasti. Izsevan energijski tok se izračuna po Stefan-Boltzmannovem zakonu (σ Stefan-Boltzmannova konstanta).

$$P_A^{rad} = \frac{\sigma}{dx} (T_A^4 - T_1^4) \quad (26)$$

Na temperaturo v vmesnih plasteh vplivajo lastnosti določenih gradbenih materialov. Te smo v modelu definirali za vsako plast v gradbeni konstrukciji.

$$\text{Ko je } i=2, \dots, n-1 \quad \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i c_i dx^2} [T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i] \quad (27)$$

$$\text{Ko } i=n \quad \frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{1}{\rho_n c_n dx^2} [\lambda_n^{ef} (T_I - T_n) + \lambda_n (T_{n-1} - T_n)] \quad (28)$$

Na temperaturo v notranjosti modelne hiše vpliva notranja nastavljena temperatura. V začetku simulacije je notranja temperatura enaka notranji nastavljeni temperaturi.

$$\text{Znotraj} \quad \frac{\partial T_I}{\partial t} = \frac{1}{\rho_I c_I d_N^2} (T_n - T_I) + \frac{1}{\rho_I c_I} (P_I^{int} + P_I^{sol} + P_I^{vent} + P_I^{win} + P_I^{heat}) \quad (29)$$

Na potek notranje temperature pa vplivajo tudi pritoki in odtoki energije. Za modelno stavbo določimo želene interne vire P_I^{int} (c označuje konstantne dobitke, p periodične). Periodični interni viri se vklopijo ob času t_1 in izklopijo ob času t_2 (to določa funkcija FOI). V simulacijah so bile uporabljene čim bolj realne vrednosti, in sicer podobne, kot so bile določene za testno hišo v Limbušu.

$$P_I^{int} = \frac{1}{d_I^2} (P_I^{int,c} + P_I^{int,p} FOI(t_1, t_2)) \quad (30)$$

Tako kot v realni hiši ima v modelirani hiši veliko vlogo sončno sevanje, ki vstopi v hišo (moč sončnega sevanja, ki vstopi v hišo P_I^{sol}), saj ima modelirana hiša tudi okna, katerih površina in toplotna prehodnost sta nastavljeni na vrednosti kot v testni hiši v Limbušu. Maksimalno gostoto sončnega toka $P_I^{sol\ max}$ in čas obsevanja je potrebno v modelu določiti (od t_1 , do t_2). Sončno obsevanje ima v modelu obliko pozitivnih vrednosti sinusne funkcije. Podatka smo pridobili iz klimatskih podatkov za Slovenijo za vsak posamezni mesec.

$$P_I^{sol} = \frac{P_{lm}^{sol}}{d_I^2} F \sin(t_1, t_2) \quad (31)$$

Poleg dobitkov pa na bilanco vplivajo tudi toplotne izgube: prezračevalne izgube P_I^{vent} in izgube skozi okna P_I^{win} (A_{win} – toplotne izgube skozi okna, S_{win} – površina oken) se izračunajo po naslednjih enačbah:

$$P_I^{vent} = \Lambda^{vent} (T_A - T_I) \quad (32)$$

$$P_I^{win} = \frac{\Lambda^{win} S_{win}}{d_I^2} (T_A - T_I) FOI(t_1, t_2) \quad (33)$$

Izgube skozi okna se izračuna za časovno obdobje od t_1 do t_2 (to določa funkcija FOI).

Za modelno stavbo se izračuna potrebna moč za ogrevanje, da ohranjamo v stavbi nastavljeno notranjo temperaturo, povprečno notranjo temperaturo ter nihanja notranje temperature, saj vse to vpliva na učinkovitost stavbe ter toplotno udobje v stavbi. Z modelom smo želeli ugotoviti vpliv različnih dejavnikov, predvsem izbire gradbenih materialov na bivalne pogoje in rabo energije v stavbi. Potrebna moč za ogrevanje se izračuna po sledeči enačbi, v kateri se upošteva nastavljeno notranjo temperaturo (T_{IS}), toplotne izgube skozi steno (A_{wall}) in izgube prezračevalnega sistema (A_{vent}). Prezračevalne izgube se izračuna iz pretoka zraka (Φ_V) in učinkovitosti rekuperatorja (η).

$$P_I^{heat} = \begin{cases} \frac{5}{d_I} (\Lambda^{wall} + \Lambda^{vent}) (T_{IS} - T_A) - P_I^{int} - P_I^{sol} + \alpha \rho_I c_I (T_{IS} - T_I) \\ 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$\Lambda^{wall} = \left(\sum_{j=1}^J \frac{d_j}{\lambda_j} \right)^{-1} \quad (35)$$

$$\Lambda^{vent} = \frac{\Phi_V}{d_I^2} \rho_{air} c_{air} \eta \quad (36)$$

S simulacijami smo primerjali različne gradbene konstrukcije. Pri masivni gradbeni konstrukciji smo upoštevali betonsko steno (20 cm), na vsaki strani apneno malto (1,5 cm), ustrezno debelino toplotne izolacije iz stiropora EPS70 (da je toplotna prehodnost stene dosegla zeleno vrednost) ter fasadni sloj. Pri lahki gradnji smo izdelali sestave, podobne sestavam sten majhnih testnih hiš A in C. Pri višjih toplotnih prehodnostih lahkih sten smo pri sestavi z mineralno izolacijo odstranili eno OSB ploščo ter stiropor. Stiropor v hiši C in lesno vlakneno ploščo Agepan THD v hiši A smo nadomestili z leseno vlakneno fasadno ploščo Agepan DWD. Pri največji toplotni prehodnosti (0,6 W/(m² K)) so iz sestave odstranili še OSB ploščo. Lastnosti uporabljenih materialov so navedene v Tabeli A2.

Pri primerjavi samo izolacijskih materialov smo uporabili lastnosti materialov, ki so predstavljene v Tabeli A2.

Nastavitve parametrov pri primerjavi gradbenih materialov in gradbenih konstrukcij so predstavljene v Tabeli 5 in Tabeli 6 in so podobne pogojem v testni hiši v Limbušu.

Tabela 5: *Klimatski podatki, uporabljeni v simulaciji.* V simulaciji primerjave različnih gradbenih materialov smo uporabili parametre, predstavljene v tej tabeli, pridobljene iz klimatskih podatkov za Slovenijo.

Mesec	Zunanja temperatura T_A [°C]	Dnevno nihanje zunanje temperature T_S [K]	Maksimalna moč sončnega sevanja v notranjost $P_{I_{max}^{sol}}$ [W/m ²]	Časovno obdobje sončnega obsevanja t [h]	Maksimalna moč sončnega sevanja na fasado $P_{A_{max}^{sol}}$ [W/m ²]	Časovno obdobje sončnega obsevanja t [h]
1	1	6	440	9–13	500	9–13
2	2	9	540	9–13	590	8–14
3	7	10	500	8–14	680	7–15
4	11	11	420	8–14	730	6–16
5	16	11	320	8–14	820	6–16
6	19	11	320	9–13	860	6–16
7	21	12	360	9–13	850	6–16
8	21	12	400	8–14	810	6–16
9	16	10	490	8–14	720	6–16
10	11	8	510	8–14	660	7–15
11	6	5	450	9–13	510	8–14
12	1	5	420	9–13	470	9–13

Tabela 6: *Podatki, uporabljeni v simulaciji.* V simulaciji primerjave različnih gradbenih materialov smo uporabili parametre, predstavljene v tej tabeli, pridobljene iz klimatskih podatkov za Slovenijo.*Med 16h in 7h zjutraj.

Parameter	Nastavljena vrednost
Stranica hiše [m]	8
Notranja nastavljena temperatura [°C]	22
Notranja kapaciteta [J/(kg K)]	30048
Površina oken [m ²]	15
Faktor prehodnosti sončne toplote []	0,5
Stalni notranji viri [W]	50
Dodatni notranji viri [W]	350*
Toplotna prehodnost oken [W/(m ² K)]	0,8
Pretok zraka [m ³ /h]	80
Izkoristek rekuperatorja [%]	85

4 Rezultati in razprava

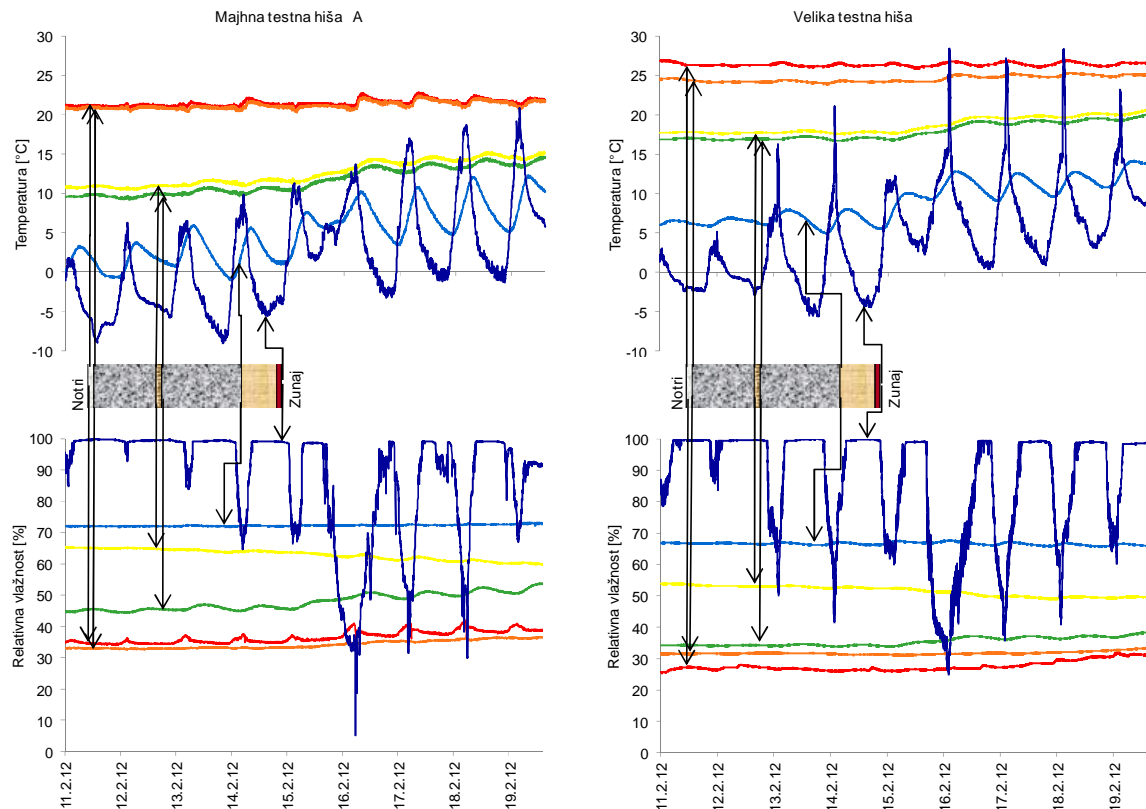
Sklopitev zunanjih dejavnikov in lastnosti gradbenih materialov vpliva na bivalne pogoje, hkrati pa tudi trajnost in energijsko učinkovitost v nizkoenergijskih objektih, ki so zaradi debeline izolacije slabo sklopljeni z zunanjim okoljem. Pri bivalnih pogojih smo se osredotočili na temperaturo in relativno vlažnost, ki posledično vplivata na druge dejavnike bivalnega udobja. Pregledali smo, kateri zunanji dejavniki in lastnosti gradbenih materialov vplivajo na notranje bivalne pogoje. Vpliv pa smo želeli tudi kvantificirati. V ta namen smo spremljali temperaturne in vlažnostne profile v gradbenih konstrukcijah testnih objektov ter energijsko bilanco testnih hiš: kaj vpliva na temperaturo v gradbenih konstrukcijah in hišah ter kaj na relativno vlažnost v objektih ter kaj oboje pomeni za notranje bivalno okolje, trajnost stavbe ter energijsko učinkovitost.

Ker je veliko poskusov izvedenih na majhnih testnih hišah, smo preverili, ali smo majhne testne hiše pomanjšali, tako da lahko rezultate verodostojno prenesemo tudi na prave bivalne objekte. To lahko dokažemo s primerjavo temperaturnih in vlažnostnih profilov, ki morajo biti podobni profilom v testnih objektih pravih dimenzij. Če so profili primerljivi, testne hiše lahko uporabimo za izvajanje poskusov ter sklepamo na pravilnost rezultatov, ki jih lahko prenesemo na hiše realnih dimenzij. Pomanjšanje smo preverili tako, da smo primerjali temperaturne in vlažnostne profile severne stene testne hiše v Repnjah in severne stene majhne testne hiše A, saj imata enaki sestavi stene. Obe testni hiši sta izolirani s celulozno izolacijo med leseno konstrukcijo in v inštalacijskem kanalu ter z leseno vlaknenimi ploščami pod tankoslojnim fasadnim ometom.

Primerjava pokaže, da sta kljub veliki razliki v masi hiš, dinamiki temperaturnih in vlažnostnih profilov zelo podobni, čeprav so odstopanja nekoliko višja v majhni testni hiši (Slika 7). Poleg tega so tudi temperaturni in vlažnostni gradienti zelo podobni v obeh stenah, malenkost so manjši v realnem testnem objektu. Izvor majhnih odstopanj je v večjih razdaljah med konstrukcijskimi elementi v veliki hiši, kar vodi v drugačne robne pogoje za prehod toplote. V majhnem testnem objektu je več motenj toplotnega toka zaradi konstrukcijskih elementov, zato je večji tudi učinek elementov na toplotni tok. Poleg tega so različni temperaturni gradienti skozi sloj izolacije možni, ker je bila v realnih hišah celulozna izolacija vgrajena strojno, zaradi česar ima predpisano gostoto, medtem ko v majhnih testnih hišah zaradi majhnih prostorov ni bila vpihana strojno in je lahko gostota nekoliko drugačna.

Pri testni hiši v Repnjah lahko opazimo vrhove zunanje temperature zaradi sončnega sevanja, ki v kratkem času (v približno 15 minutah temperatura naraste in v 15 minutah pade) dopoldne pade na pred sončnim sevanjem nepopolno svetlobno zaščiten zunanji temperaturni senzor in ga segreje. Poleg tega je opaziti različno notranjo temperaturo, ki je v majhni hiši nastavljena na 22 °C, v veliki pa je približno 25 °C. Zato so tudi vse ostale temperature približno 3 do 5 °C višje v realni testni hiši. Odstopanja v dinamiki notranje temperature v realni testni hiši so posledica tudi človeške aktivnosti v njej, saj ljudje s svojo prisotnostjo in uporabo električnih naprav v hišo sproščajo toploto, ki vpliva poleg drugih dejavnikov na potek notranje temperature. Zaradi različnih temperatur in zaradi človeške aktivnosti, kot so na primer pranje, tuširanje, kuhanje, se v veliki testni hiši pojavi tudi drugačna notranja relativna vlažnost. Čeprav sta hiši locirani v vaseh 35 km narazen, so zunanji pogoji razmeroma podobni. Lahko bi bili bolj različni

zaradi različne oblikovanosti terena in zavetrovanosti. Podobna dinamika temperaturnih in vlažnostnih profilov ter njihovi gradienti dokazujejo, da lahko s pomanjšanjem pridobimo zanesljive podatke o vplivu sestave gradbenih konstrukcij na dinamiko njenih temperaturnih in vlažnostnih profilov.



Slika 7: Primerjava profilov temperature in relativne vlažnosti v severni steni majhne testne hiše A in velike testne hiše. Prikazani so časovni profili temperature (zgornja grafa) in relativne vlažnosti (spodnja grafa) v devetih dneh februarja 2012 pri majhni testni hiši A (leva grafa) in veliki testni hiši (desna grafa) od notranjosti (T1 in H1 rdeča črta) proti zunanosti (T6 in H6 temno modra črta)

Poleg tega je bilo tudi pomanjšanje ogrevalnega sistema pravilno izvedeno, saj smo z ogrevalnim sistemom v majhnih testnih hišah uspeli vzdrževati stabilno notranje okolje, poleg tega pa je bilo mogoče določiti razlike v porabi energije med različnimi hišami zaradi ustreznih korakov med stopnjami ogrevanja v majhnih testnih hišah. Ogrevalni sistem v majhnih testnih hišah je bil 7-stopenjski (3, 7, 10, 15, 18, 22, 25 W), v najbolj mrzlem obdobju meritev v začetku februarja 2012 je moč ogrevanja v najhladnejših dneh segla do 25 W, kar kaže na izredno dobro dimenzioniran ogrevalni sistem. Zato je mogoče tudi iz dinamike obnašanja testnih objektov sklepati na obnašanje realnih testnih objektov.

4.1 Temperatura v hišah

Pomemben faktor, ki vpliva na udobje uporabnikov in trajnost stavbe ter energijsko učinkovitost, je temperatura v notranjosti hiše in v gradbenih konstrukcij. Preverili smo, ali izmerjeni temperaturni profili korelirajo s modeliranim profilom. Če modelirani profili ustrezajo izmerjenim, lahko z njimi preizkušamo različne scenarije vpliva različnih dejavnikov na temperaturne profile. Z modeliranjem smo preverili, kako materiali z

različnimi lastnostmi, predvsem različno specifično toplotno kapaciteto in gostoto, vplivajo na energijsko bilanco stavb ter na notranjo temperaturo v stavbah. To smo preverili tudi z meritvami na majhnih testnih objektih, kjer smo primerjali energijsko bilanco objektov z različnimi sestavami gradbenih konstrukcij, torej z različno specifično toplotno kapaciteto in gostoto izolacijskih materialov. Primerjali smo tudi vpliv tipa fasade, klasičnega tankoslojnega fasadnega ometa in lesene prezračevane fasade na toplotno obremenitev toplotnega ovoja. Raziskali smo vpliv senčenja in nočnega zračenja na pregrevanje v nizkoenergijskih hišah v Sloveniji ter kvantitativno ocenili njun pomen.

4.1.1 Modeliranje temperaturnih profilov v majhnih testnih hišah

Razvili smo model za simulacijo temperaturnih profilov v majhnih testnih hišah. Simulacija temelji na meritvah zunanje temperature, lastnosti (toplotna prevodnost, specifična toplotna kapaciteta, gostota, debelina) uporabljenih materialov, moči ogrevanja, pasivnih solarnih virih, internih virih, ki se sproščajo iz gradbenih materialov, in toplotni kapaciteti hiše (upoštevajoč zrak in dve 10-litrski kantici vode na notranjih okenskih policah testnih hiš). Edina spremenljivka, ki ni direktno izmerjena ali posredno izračunana, je temperatura tal. Ta je zato ocenjena, da je pri vseh treh pomanjšanih testnih hišah enaka, in sicer 15 °C. Potek modelirane notranje temperature razkrije posebnosti hiš, ki vplivajo na potek notranje temperature.

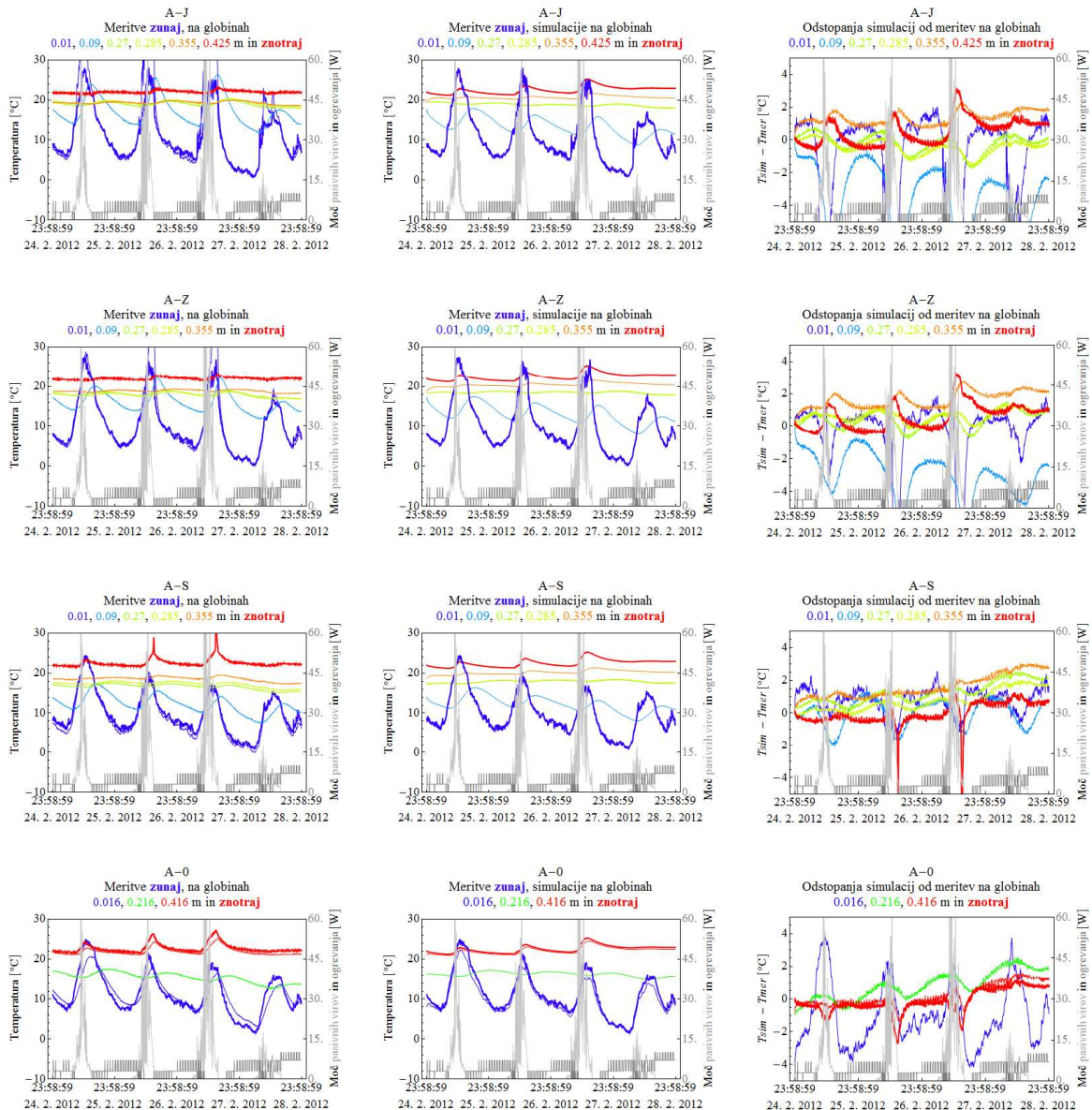
Rezultati kažejo, da v hišah A in B simulirana notranja temperatura rahlo narašča v štirih dneh (1–2 °C), kar pomeni, da je v realnosti več toplotnih izgub ali manj toplotnih virov, kot ocenjeno (Sliki 8 in 9). V hiši C simulirana notranja temperatura ne naraste (Slika 10). Zelo je podobna meritvam, z izjemo faznih zamikov, ki se razlikujejo. Če primerjamo pasivne solarne vire v grafih, je jasno videti, da hiša A prejme več pasivnih solarnih virov, zato obstaja verjetnost, da so ti precenjeni. V krajših obdobjih (časovnih intervalih meritev 3 min) gostota toka sončnega sevanja močno naraste, tudi do 10-krat v primerjavi z drugima dvema hišama, to je bodisi posledica napake fotodiode ali pa zelo specifičnih lokalnih pojavov. Izjemno težko je namreč v zunanjem okolju zagotoviti povsem enake pogoje, že pri sami izvedbi hiš lahko nastanejo razlike, ki vplivajo na energijsko bilanco stavb. Na primer točna orientacija posamezne fasade, točna orientacija senzorja. Največje razlike v okolju so prav v gostoti toka sončnega sevanja, saj je ta odvisna od kota, pod katerim je senzor nameščen, in senčenja ter različnih odbojev svetlobe v okolici. Zaradi listavcev v okolici hiš, nekoliko različnih dimenzij in tudi morda malenkost različnih položajev senzorjev je bilo nemogoče izmeriti povsem realen oziroma zagotoviti povsem enak tok sončnega sevanja. Poleg tega senca lahko pade na primer le na senzor, medtem ko skozi okna vstopi še vedno polna gostota sončnega sevanja. Mogoče pa je tudi, da je efektivna toplotna prevodnost uporabljenih materialov v hišah A in B nekoliko nižja od podane v tehnični dokumentaciji gradbenih materialov. V majhnih testnih hišah celuloze namreč ni bilo mogoče strojno vgraditi, zato lahko gostote lokalno odstopajo od predpisanih vrednosti.

Najvišje razlike v temperaturnih profilih so v bližini zunanjega okolja (pod tankoslojnim fasadnim ometom in prvim slojem izolacije), še posebej na južni in zahodni fasadi, ki prejmeta več sončnega obsevanja, ki ju segreje. Izmerjena nihanja temperature na teh mestih so pri vseh treh testnih hišah višja od simuliranih temperatur. Model namreč ne upošteva absorpcije sevanja, ki segreje fasado. Fasada je temne barve in absorbira več sončnega sevanja, kot bi ga fasada bele barve. Ta razlika v merjeni in simulirani temperaturi tik pod fasadnim slojem in pod prvim slojem toplotne izolacije ni tako očitna pri hiši B, kjer je nameščena lesena prezračevana fasada namesto rdeče obarvanega tankoslojnega fasadnega ometa.

Tudi fazni zamiki se nekoliko razlikujejo med meritvami in simulacijami. Izmerjeni

fazni zamik je 2 uri krajši od določenega s simulacijami, kar velja za vse tri testne hiše.

Najmanjše razlike v temperaturnih profilih so v severni fasadi, saj tam ni direktnega sončnega obsevanja, ki vpliva na temperaturne profile tik pod fasadnim slojem in prvim slojem izolacije zaradi absorpcije. V severnih stenah testnih objektov pa je tudi manj strukturnih elementov, saj ni oken ali vrat, ki bi lahko spremenili prehod toplote.

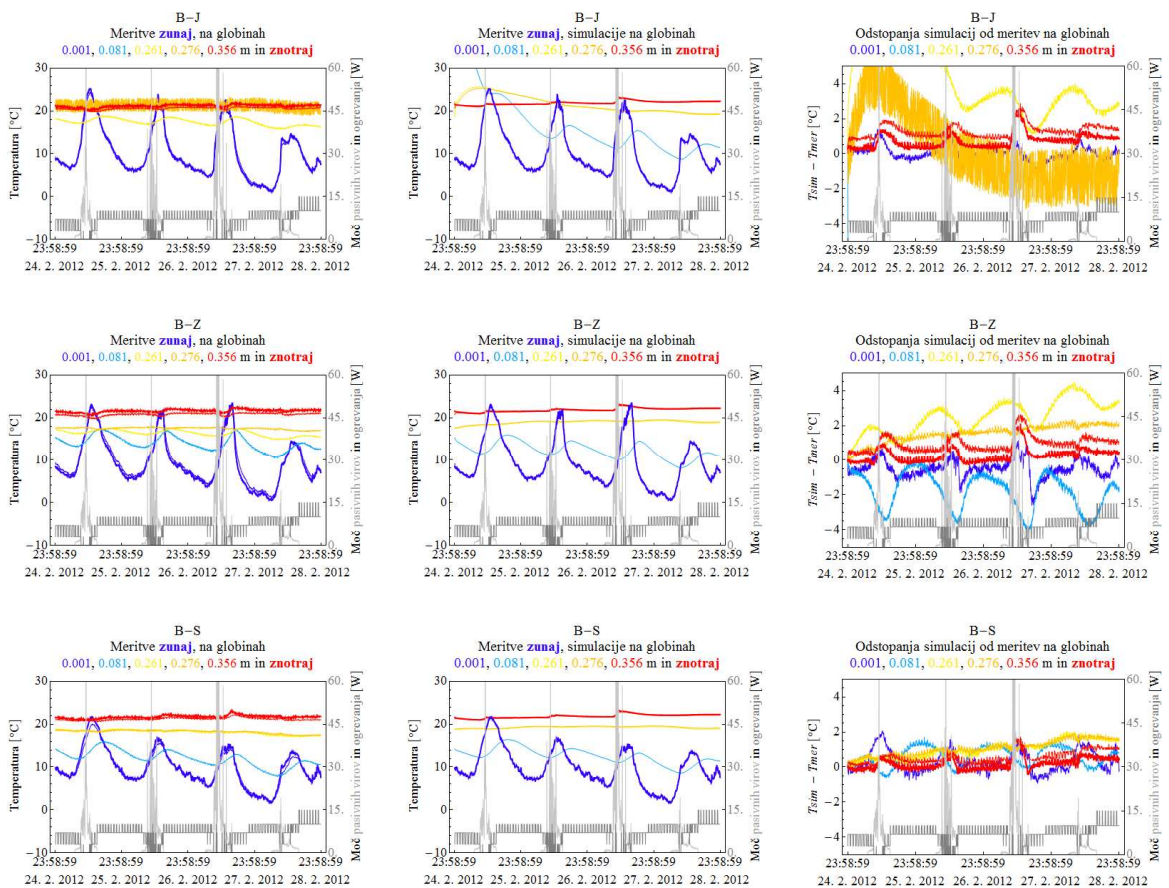


Slika 8: Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah in strehi majhne hiše A ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica) ter strehi (četrti stolpec) majhne testne hiše A ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečemu na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.

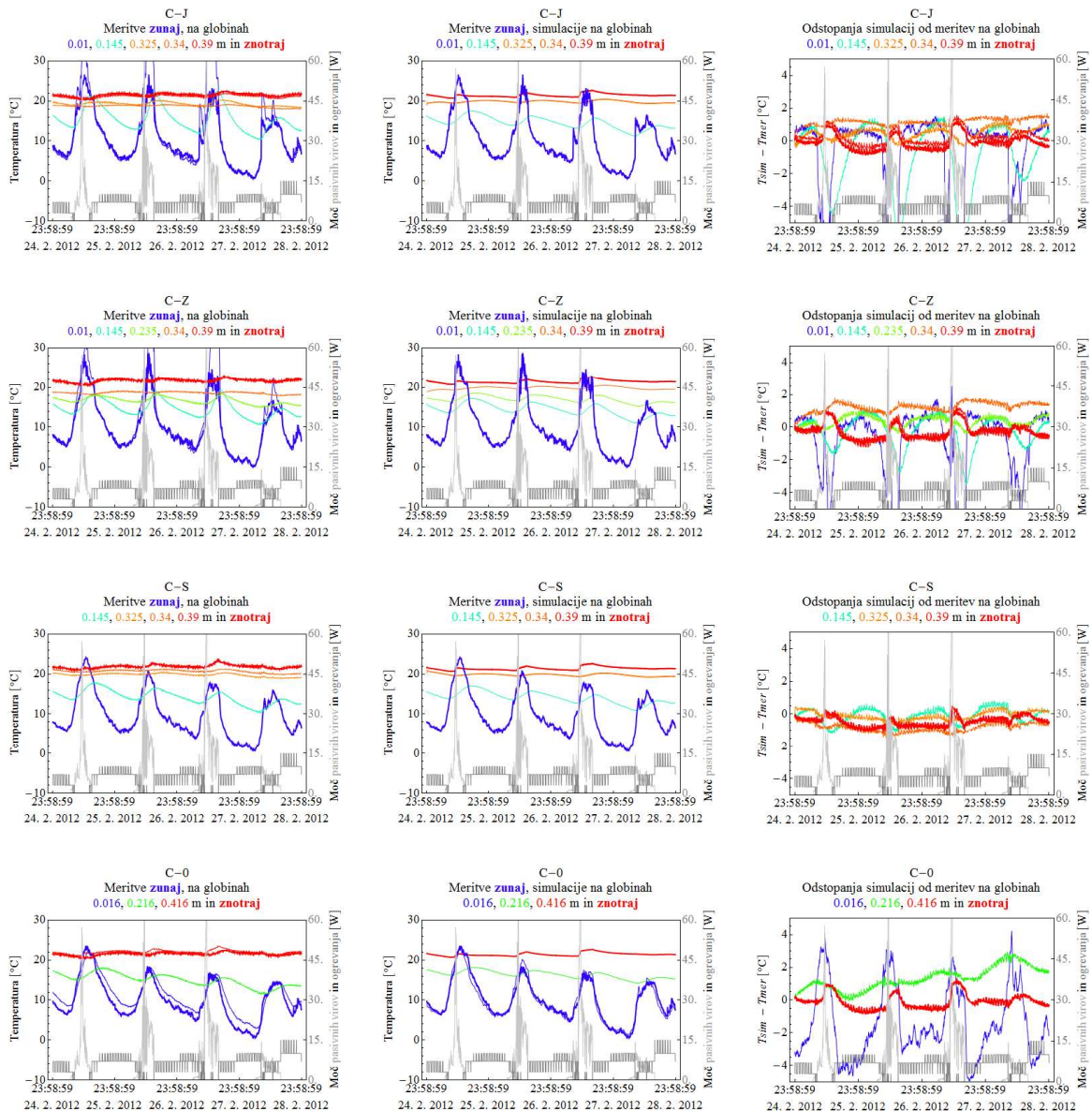
Tudi simulacije temperaturnih profilov strehe dajo podobne rezultate kot meritve. Odstopanja so zaradi faznega zamika, ki je daljši pri merjenih profilih. Tudi amplituda nihanj v hišah A in C v sredini gradbene konstrukcije strehe je višja pri merjenih rezultatih.

Z modelom temperaturnih profilov je mogoče dobro simulirati dejanske pogoje v stavbah, najboljše v severni steni, kjer odstopanja od meritev znašajo le ± 2 °C. Ta majhna

odstopanja v severni steni pa so lahko posledica razlike med realnim in teoretičnim faznim zamikom. Tudi v ostalih fasadah so profili dobro simulirani, le v zunanjih plasteh je amplituda nihanj višja v izmerjenih temperaturnih profilih zaradi sevanja, ki v modelu ni upoštevan. Če bi tudi to upoštevali bi lahko zelo dobro simulirali temperaturne profile. Poleg tega lahko trdimo, da so kljub manjšim testnim objektom, kjer je več strukturnih elementov, ki motijo tok toplote, in ročno montirani celulozni izolaciji izmerjeni temperaturni profili zelo podobni teoretičnim, zato se rezultate iz pomanjšanih testnih objektov lahko aplicira na realne objekte.



Slika 9: Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah majhne hiše B ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica majhne testne hiše B ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečem na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.



Slika 10: Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah in strehi majhne hiše C ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica) ter strehi (četrti stolpec) majhne testne hiše C ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečemu na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.

4.1.2 Toplotna kapaciteta gradbenih materialov

Nekateri raziskovalci so pokazali, da obstajajo razlike v porabi energije in učinkovitosti stavbe zaradi uporabe različnih gradbenih materialov in njihove razporeditve v gradbenih konstrukcijah (Kossecka in Kosny, 2002, Asan, 2006, Gregory et al., 2008, Aste et al., 2009). Večina raziskovalcev se je pri tem osredotočila na primerjavo masivne in lahke gradnje pri visokih U vrednostih gradbenih konstrukcij, ki niso primerne za nizkoenergijske hiše, zato rezultati ne morejo biti direktno uporabljeni pri razvoju in optimizaciji nizkoenergijskih hiš. V naši študiji smo želeli primerjati različne lahke sestave z nizkimi toplotnimi prehodnostmi in različno toplotno kapaciteto, primernimi za nizkoenergijske hiše in njihov vpliv na energijsko bilanco stavb.

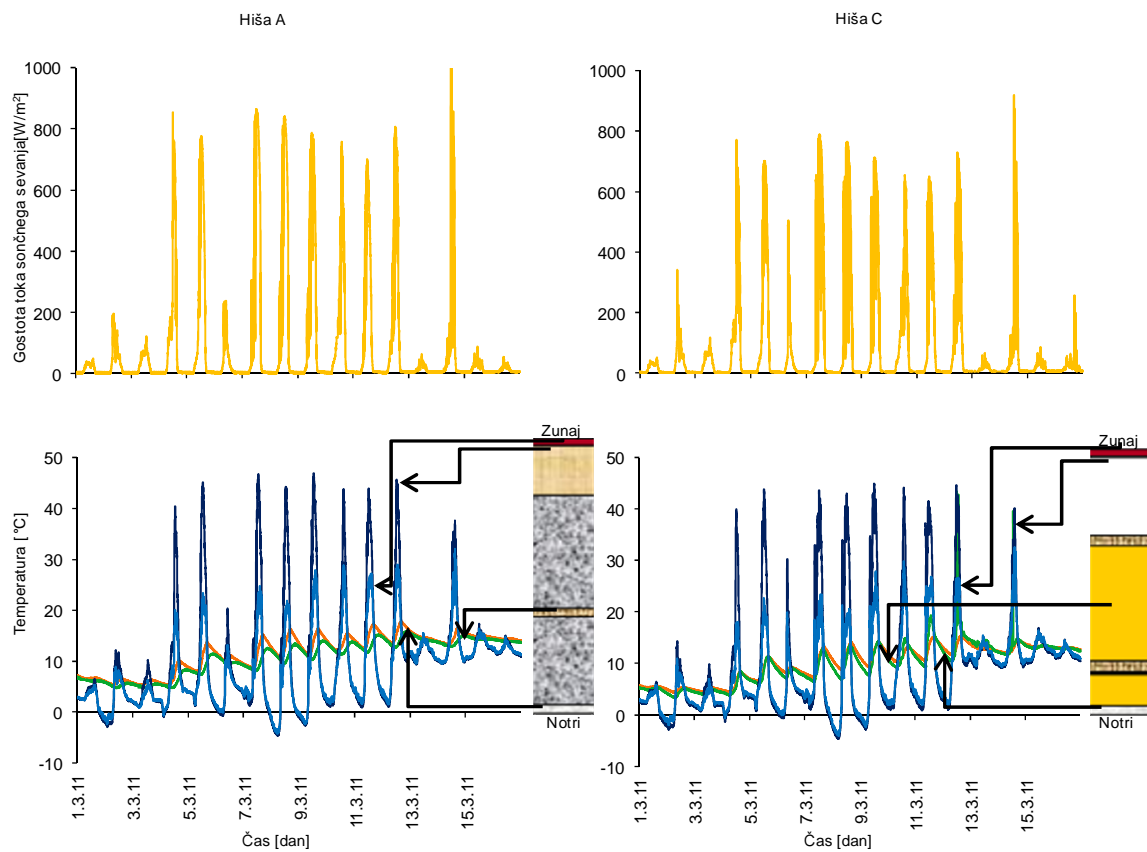
Fizikalne lastnosti gradbenih materialov opišejo običajno tri fizikalne količine, in sicer gostoto, specifično toplotno kapaciteto in toplotno prevodnost. Vse tri lastnosti vplivajo na prehod toplote skozi gradbene konstrukcije, grajene iz različnih gradbenih materialov, in sicer vplivajo na toplotno prehodnost, fazni zamik in faktor zmanjšanja amplitude. Materiali z nizko toplotno prevodnostjo, visoko toplotno kapaciteto in gostoto absorbirajo toploto in povzročijo, da toplotni dobitki v stavbo vstopijo z zamikom, kar zmanjša vrhove notranje temperature in prestavi čas maksimalne obremenitve. To pa vpliva na notranje udobje, saj je tako temperatura v stavbi bolj konstantna, in tudi na porabo energije. Izračunani so bili fazni zamiki za vse tri majhne testne hiše in izračunani iz merjenih podatkov. Teoretični fazni zamik (D_i) gradbene konstrukcije je vsota faznih zamikov vsakega materiala, prisotnega v gradbeni konstrukciji. Izračun upošteva debelino (d_i), specifično toplotno kapaciteto (c_i), gostoto (ρ_i) in toplotno prevodnost (λ_i) vsakega uporabljenega materiala

$$D_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{2} \sqrt{\frac{\rho_i c_i}{\pi \lambda_i}} \right) \quad (37)$$

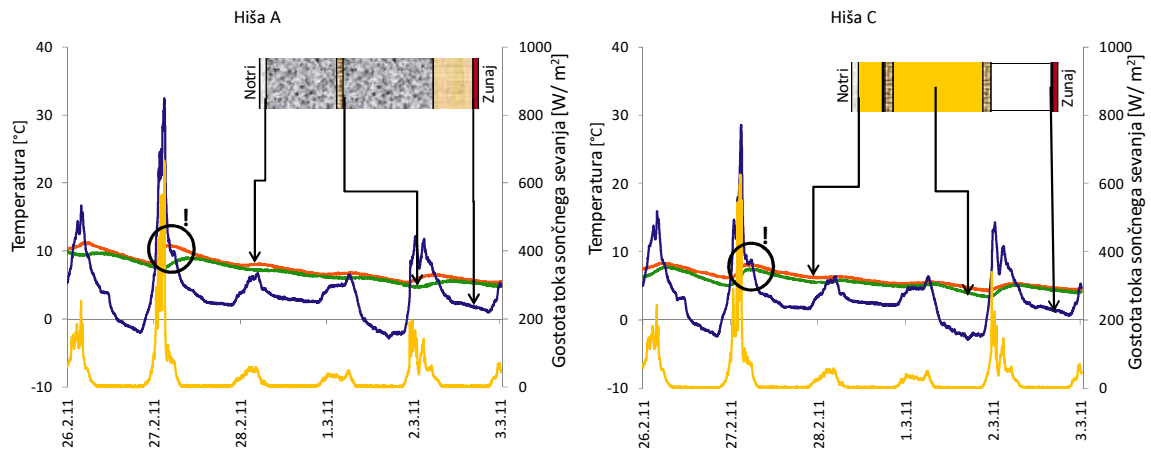
Fazni zamik je bil izračunan tudi iz izmerjenih podatkov iz realnih gradbenih konstrukcij, in sicer tako, da je bil čas med vrhovi temperature med različnimi plastmi izmerjen ter potem ocenjen fazni zamik celotne gradbene konstrukcije. Velika testna hiša v Repnjah in majhna testna hiša A imata enako gradbeno konstrukcijo in tako enak fazni zamik. Hiši A in B imata enak izračunani fazni zamik sten, ki znaša 21 h, hiša C pa 9 h. Fazni zamik strehe hiše A znaša 16 h, hiše C pa 8 h. Fazne zamike se opazi tudi na grafih merjenih temperaturnih profilov. Temperatura blizu zunanje površine močno korelira z vpadnim sončnim tokom na fasado. Podobnemu vzorcu sledi tudi temperatura blizu notranje površine zaradi toplotnega toka, ki vstopi v stavbo skozi okna. Zaradi pasivnih solarnih dobitkov ne moremo opaziti vpliva zunanje temperature po prehodu skozi steno na notranjo temperaturo ter tako opazovati vpliva faznega zamika gradbenih konstrukcij na notranjo temperaturo. Fazni zamik lahko izmerimo za polovico gradbene konstrukcije med temperaturo na površini fasade in temperaturo v sredini gradbene konstrukcije. Iz tega kasneje izračunamo fazni zamik celotne konstrukcije. Fazni zamiki, ocenjeni iz meritev, znašajo za severno steno v hiši A $18 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, za severno steno hiše C pa $10 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$. Fazni zamiki strehe v hiši A so $17 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, v hiši C pa $11 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$. Izmerjeni fazni zamiki so tako za hišo A nekoliko krajši od teoretičnih. Razlika je morda v tem, da gostote vgrajene celuloze v majhnih testnih objektih ne poznamo, saj je bila vgrajena ročno. V severni steni testne hiše v Repnjah je namreč fazni zamik daljši in ustreza teoretičnemu faznemu zamiku. Izmerjeni fazni zamik v strehi hiše C je daljši od teoretičnega. Nekateri raziskovalci (Al-Homoud, 2005) so mnenja, da na vseh fasadah ni potreben enako dolg fazni zamik. Na severni in vzhodi fazni zamik ni potreben, na južni steni pa mora biti dolg vsaj 8 h. Tako obe sestavi stene s celulozno izolacijo in tudi mineralno izolacijo zadostita temu pogoju in s tem tudi večina sestav gradbenih konstrukcij, ki so primerne za nizkoenergijske hiše. Po drugi strani pa kratkega zamika, ki naj bi bil primeren za severno in vzhodno fasado, ne moremo doseči, saj bi bila v tem primeru toplotna prehodnost neprimerna za nizkoenergijsko hišo. Z debelinami izolacije v strehi, primernimi za nizkoenergijske hiše, in izolacijo iz naravnega materiala, kot je celulozna izolacija z daljšim faznim zamikom, lahko dosežemo dovolj dolge fazne zamike. Čeprav Al-Homoud, 2005 in Florides et al., 2002 trdijo, da to ni običajno, ker so materiali z visoko toplotno kapaciteto težki in dragi.

Ko primerjamo profil na površini s profilom globoko v gradbeni konstrukciji, lahko opazimo razlike med gradbenimi konstrukcijami različnih testnih hiš, ki so posledica uporabljenih materialov (Slika 11 in Slika 12). V majhni testni hiši A, izolirani s celulozo,

temperatura v sredini stene ne sledi hitrim spremembam zunanje temperature zaradi nihanj gostote toka sončnega sevanja, obratno pa temperatura v majhni testni hiši C, izolirani s stekleno volno in polistirenom, hitro sledi spremembam temperature na površini. Tako je jasno videti fazni zamik prehoda toplote, ki je skoraj še enkrat daljši pri hiši, izolirani s celulozno izolacijo, kot pri hiši, izolirani s stekleno volno in polistirenom.

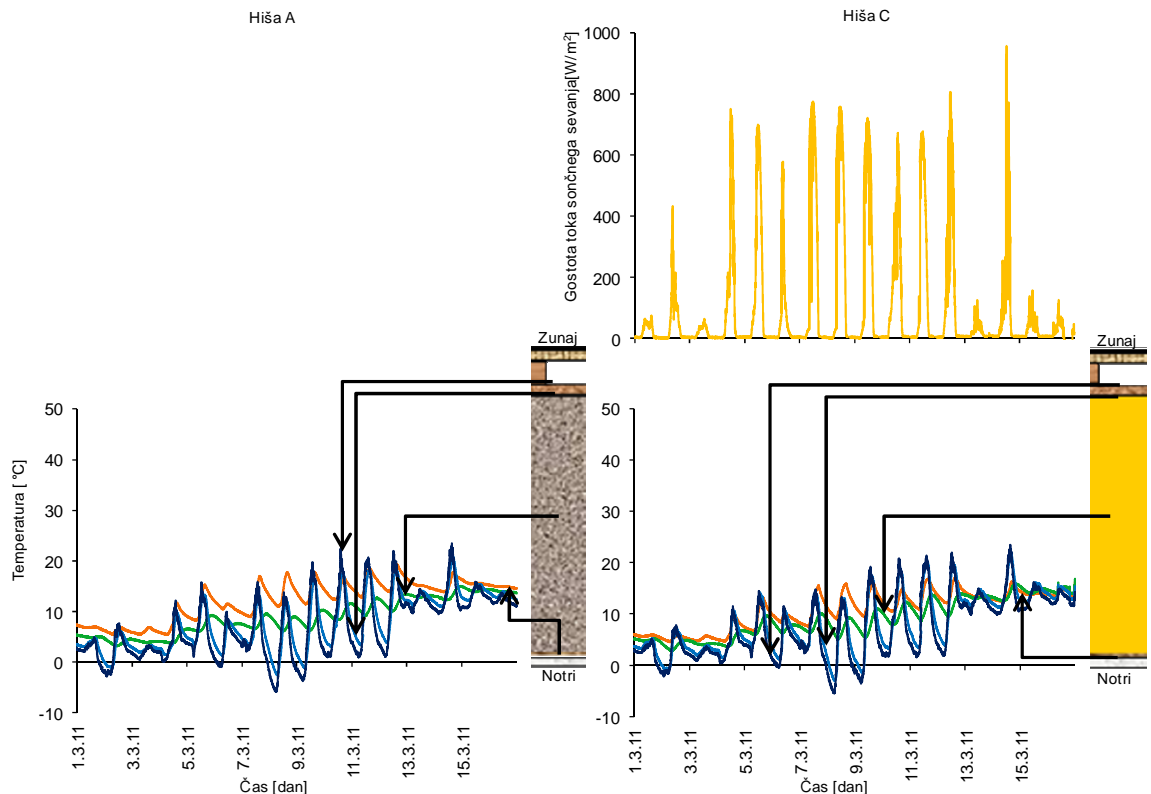


Slika 11: Temperaturna profila južnih sten majhnih testnih hiš A in C. Sončni tok na južno fasado (zgornja grafa) in temperaturni profili, izmerjeni na različnih globinah gradbenih konstrukcij (označeno s puščicami) južnega stene hiše A (leva grafa) in C (desna grafa).



Slika 12: Temperaturna profila južnih sten majhnih testnih hiš A in C v petih dneh. Časovno nihanje sončnega toka padlega na južno fasado (črna prekinjena črta) in temperature, izmerjene (polna črta) na različnih globinah južne stene (označeno s puščicami) hiše A (levi graf) in C (desni graf).

Daljši fazni zamik pri hiši, izolirani s celulozno izolacijo, je opaziti tudi v strehi (Slika 13). Tudi v strehi hiše C je fazni zamik krajši od faznega zamika strehe hiše A.



Slika 13: Temperaturna profila strehe majhnih testnih hiš A in C. Sončni tok streho (zgornji graf) in temperaturni profili, izmerjeni na različnih globinah gradbenih konstrukcij (označeno s puščicami) strehe hiše A (levi graf) in C (desni graf).

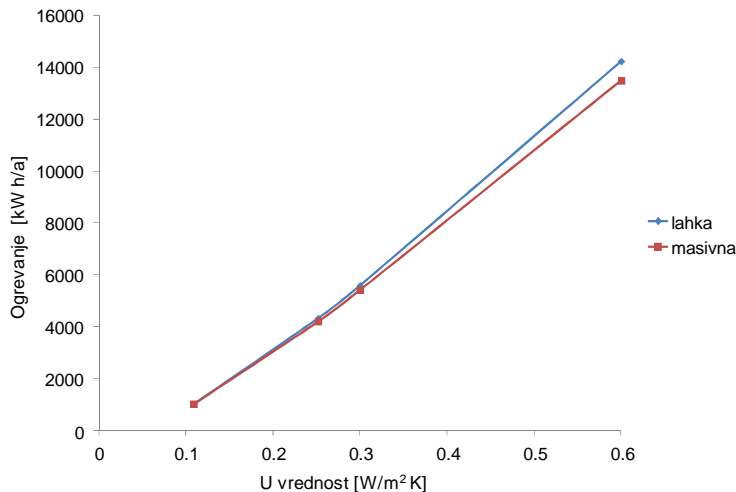
Poleg faznega zamika prehoda toplote pa je opaziti tudi zmanjšanje amplitude nihanja temperature. Ta v zunanosti niha v prikazanih grafih tudi do 25 K pred južno fasado, v približni sredini gradbene konstrukcije pa je nihanje le še približno 5 K. V strehi je znižanje približno 3-krat manjše, saj zunanja temperatura v zračnem kanalu strehe ne niha

v tolikšni meri kot v bližini fasade, kjer ta oddaja toploto v okoliški zrak tudi s sevanjem. Če se v podobni meri zmanjša tudi nihanje od sredine gradbene konstrukcije do notranjosti, nihanja zunanje temperature ne vplivajo na nihanja notranje temperature, saj bi temperatura v notranjosti nihala za manj kot 1 K. Vpliv nihanj zunanje temperature se tako ne pozna na notranji temperaturi. Bistveno bolj na notranjo temperaturo vplivajo pasivni sončni dobitki, ki vstopijo v hišo skozi okna, zaradi teh notranja temperatura v neogrevani stavbi lahko niha tudi za 5 K. Opazimo pa lahko tudi različno amplitudo nihanja v sredini gradbenih konstrukcij zaradi različnih gradbenih materialov. Nihanja temperature v sredini gradbene konstrukcije so za stopinjo ali dve nižja v testni hiši A. Celulozna izolacija zgladi nihanja temperature, kar ustvari bolj stabilne pogoje v gradbeni konstrukciji.

Ker so meritve jasno pokazale, da različni gradbeni materiali povzročijo različne fazne zamike in tako različne pogoje v gradbeni konstrukciji, smo želeli preveriti, ali fazni zamik in faktor znižanja amplitude temperature vpliva tudi na porabo energije in notranje pogoje, saj v temperaturnih profilih vpliva zunanje temperature na notranjo ni opaziti. To smo preverili s spremljanjem energijske bilance v majhnih testnih objektih in s primerjavo simulacij energijske bilance pri hišah z enakimi toplotnimi prehodnostmi, vendar z gradbenimi materiali z različno specifično toplotno kapaciteto in gostoto ter tako primerjali različne izolacijske materiale med seboj.

V simulacijah smo upoštevali modelno hišo z notranjo stranico dolgo 8 m in 15 m² južnih oken. Upoštevali smo povprečno mesečno zunanjo temperaturo, mesečna nihanja zunanje temperature in povprečno mesečno sončno obsevanje južnih oken in fasade v slovenskem podnebju. Efektivna toplotna kapaciteta je bila upoštevana enaka, kot je bila določena za testno hišo v Limbušu. Najprej smo primerjali, če obstajajo razlike med lahko in masivno konstrukcijo z enako toplotno prehodnostjo, saj so druge študije napovedale razlike. Primerjava je bila narejena za stene z različnimi U vrednostmi, in sicer od 0,109 W/(m² K), kar je tipično za pasivno hišo, do 0,6 W/(m² K), kar se pojavlja v izjemno neučinkovitih, potratnih hišah. Za višje U vrednosti je tudi opisanih največ študij v literaturi, medtem ko za nizke toplotne prehodnosti, primerne za nizkoenergijske hiše, ni podatkov v literaturi.

Rezultati simulacij kažejo, da ni razlik v porabi energije med lahko in masivno konstrukcijo, ko je toplotna prehodnost gradbenih konstrukcij nizka kot pri nizkoenergijskih hišah (Slika 14). Pri višjih toplotnih prehodnostih postanejo razlike v porabi energije opazne. Glede na simulacije je razlika v porabi energije med lahko in masivno konstrukcijo pri toplotni prehodnosti 0,6 W/(m² K) več kot 5 %. Večje so razlike pomladi in jeseni, ko so nihanja zunanje temperature visoka.

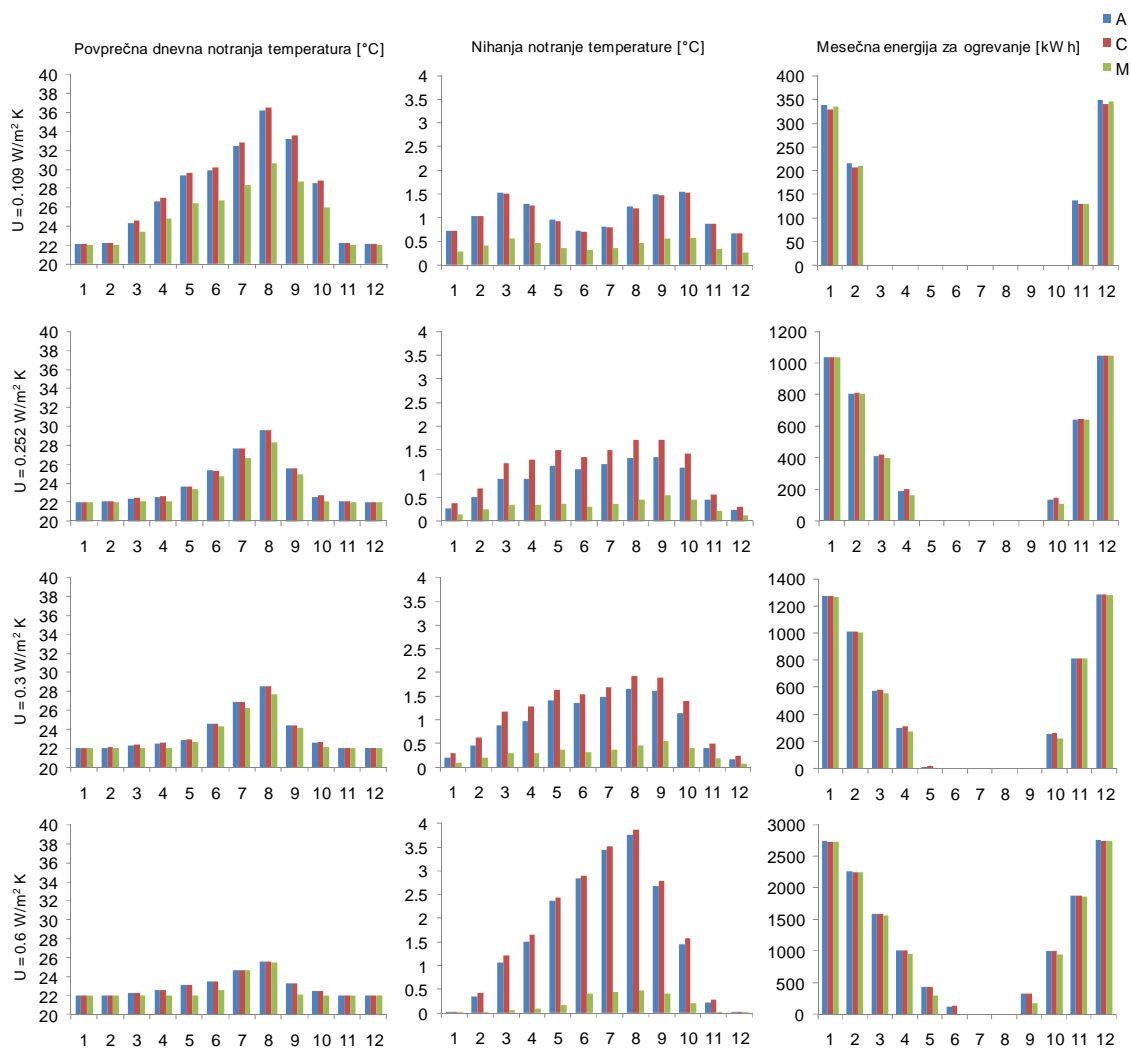


Slika 14: Poraba energije za ogrevanje pri lahki in masivni konstrukciji pri različnih U vrednostih. Prikazana je letna poraba energije za lahko (modra črta) in masivno (rdeča črta) pri različnih U vrednostih gradbenih konstrukcij.

Največje razlike v povprečni dnevni temperaturi med različnimi gradbenimi konstrukcijami je opaziti pri nizkih toplotnih prehodnostih toplotnega ovoja (Slika 15). Majhno razliko je opaziti tudi med sestavo s celulozno izolacijo in mineralno izolacijo, kar nakazuje, da imajo stavbe z višjo toplotno kapaciteto ovoja bolj ugodne toplotne pogoje v hiši. V tem primeru so najbolj udobni pogoji poleti v masivni hiši, kjer temperature narastejo le do 30 °C, medtem ko v lahki hiši tudi do 36 °C. Pri višjih toplotnih prehodnostih ovoja pa se razlike v povprečni dnevni temperaturi manjšajo.

Po drugi strani so dnevna nihanja temperature najvišja v hišah z visoko toplotno prehodnostjo toplotnega ovoja in sežejo do 4 °C v poletnih mesecih, vendar le v lahki konstrukciji (Slika 15). V dobro izoliranih hišah, kot so nizkoenergijske, so nihanja notranje temperature največja pomladi in jeseni in v lahki konstrukciji dosežejo do 1,5 °C. Pri vseh toplotnih prehodnostih so nihanja v masivni hiši izjemno nizka in dosežejo maksimalno 0,5 °C. Tako je največja razlika v nihanjih dnevne temperature med masivno in lahko gradnjo, ko so toplotne prehodnosti visoke. Tudi drugi raziskovalci so dokazali, da sta amplituda in frekvenca temperaturnih nihanj na notranjih površinah masivnih sten mnogo nižji kot pri srednje težki ali lahki konstrukciji, vendar pri hišah z visokimi toplotnimi prehodnostmi (Feng, 2004, Zhu et al., 2009, Givoni, 2009). Največja razlika med lahkimi sestavami pa je pri toplotni prehodnosti 0,252 W/(m² K) v prid sestave s celulozno izolacijo, vendar ta razlika znaša le 0,5 °C. V realnih pogojih, kjer so nihanja zunanje temperature višja (v simulacijah so bila upoštevana povprečna dnevna nihanja zunanje temperature) je tudi učinek na nihanja notranje temperature lahko večji.

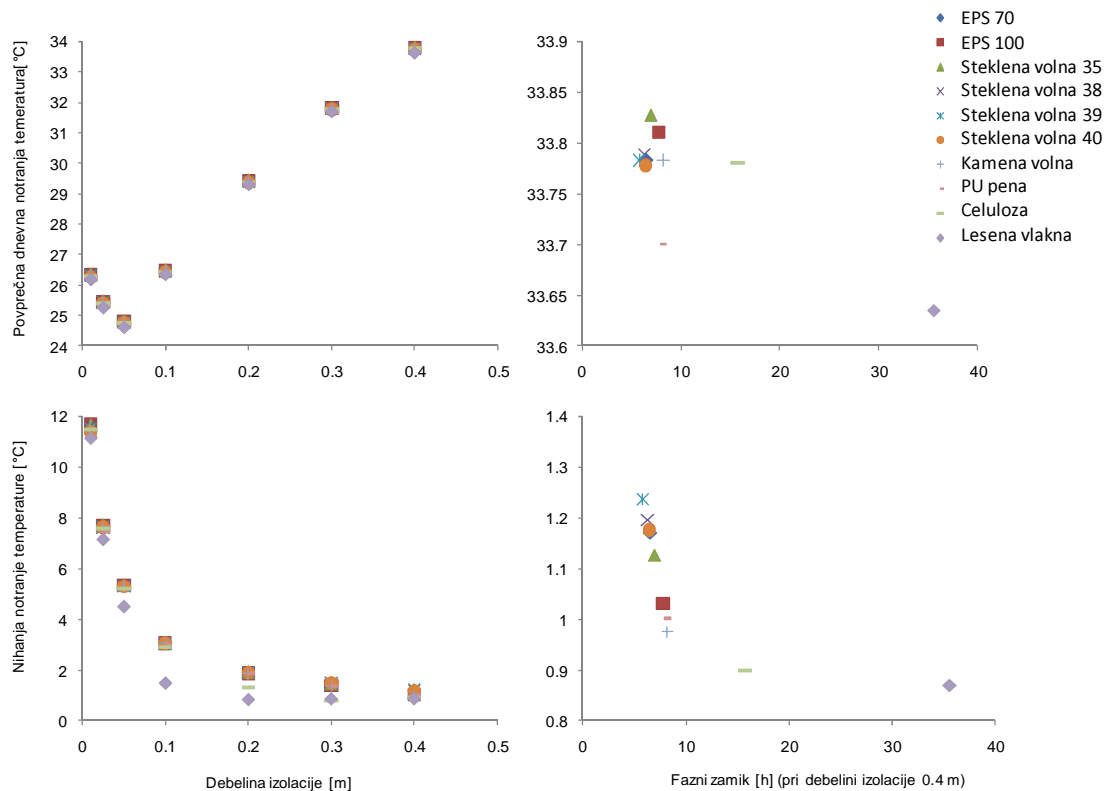
Tudi pri potrebi po energiji za ogrevanje nastajajo pri različnem tipu gradnje razlike (Slika 15). Te so najvišje pomladi in jeseni pri višjih toplotnih prehodnostih. Masivne hiše imajo najnižjo potrebo po ogrevanju zaradi visoke toplotne kapacitete in tako stabilnosti stavbe. V realnosti so razlike zaradi večjih nihanj zunanje temperature lahko večje.



Slika 15: Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevni nihanji notranje temperature in potrebe po energiji za ogrevanje za vsak mesec v letu za dva tipa lahke gradnje in masivno gradnjo pri različnih toplotnih prehodnostih. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prvi stolpec), dnevna nihanja notranje temperature (drugi stolpec) in potreba po energiji za ogrevanje (tretji stolpec) za dve lahki hiši (A s celulozno izolacijo – modra barva, C s stekleno izolacijo – rdeča barva) in masivno hišo (zelena barva) pri različnih toplotnih prehodnostih ovoja hiše (prva vrstica najmanjša U vrednost, zadnja vrstica najvišja toplotna prehodnost).

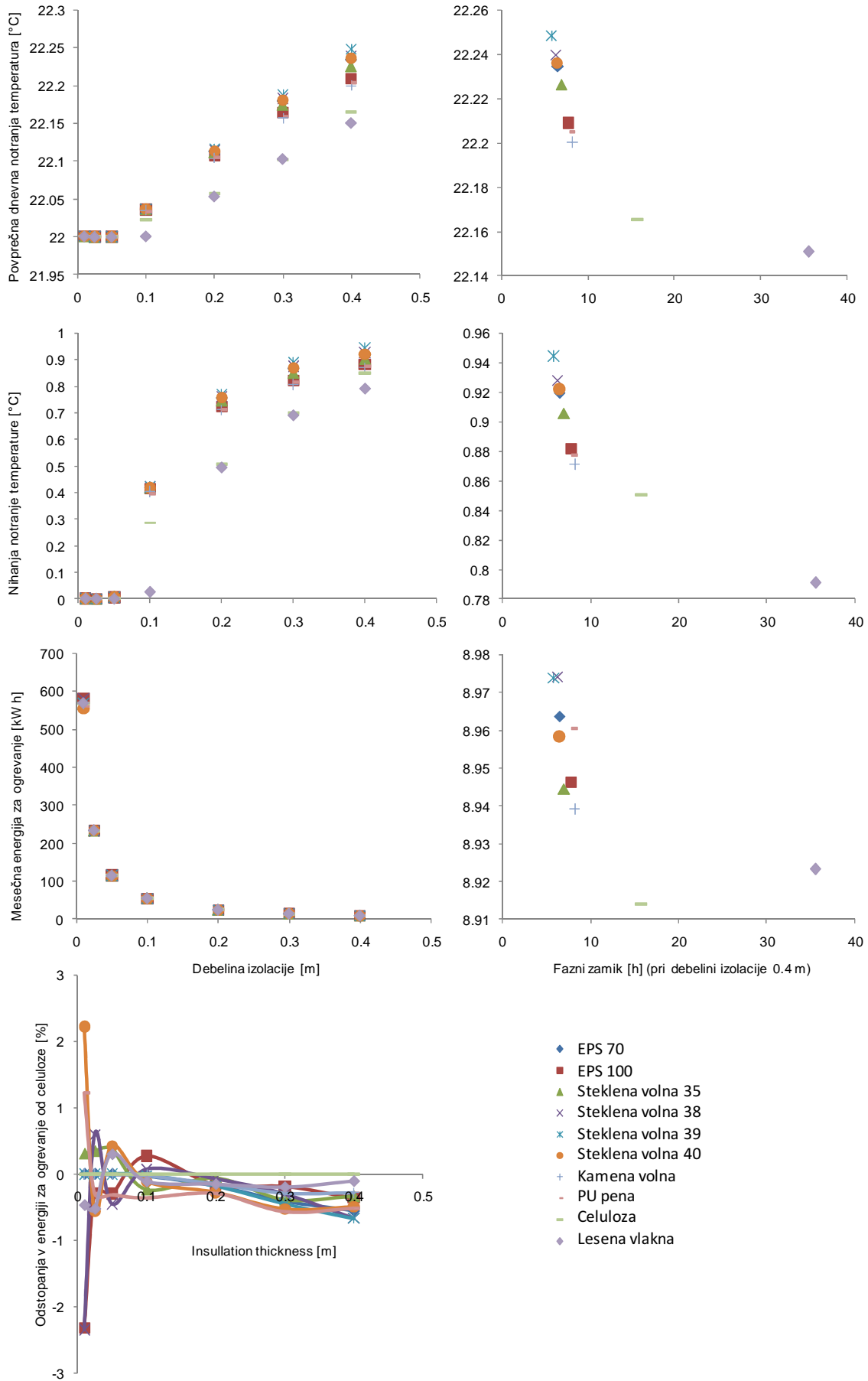
Poleg modeliranja dveh lahkih in ene masivne sestave smo opravili tudi simulacije na stavbi s toplotnim ovojem, sestavljenim le iz izolacijskih materialov, saj smo želeli primerjati, kako se različni izolacijski materiali sami po sebi z različnimi specifičnimi toplotnimi kapacitetami in gostotami vplivajo na energijsko bilanco hiše in notranje temperature. Vse primerjave so narejene pri debelinah, ki imajo enake toplotne prehodnosti.

Razlike v povprečni dnevni temperaturi v poletnem času med različnimi izolacijskimi materiali so izjemno majhne (Slika 16). Višje razlike med materiali so pri nihanjih dnevne temperature, vendar ne več kot 1 °C. Iz grafa odvisnosti ni opaziti jasne odvisnosti povprečne temperature od faznega zamika, medtem ko je odvisnost bolj očitna pri nihanjih notranje temperature, vendar ta ne presežejo 0,5 °C pri steni, debeli 0,4 m, kot pri nizkoenergijski hiši.



Slika 16: Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevni nihanji notranje temperature za različne izolacijske materiale pri različnih debelinah ter različnih faznih zamikih za poletne mesece. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prva vrstica), dnevna nihanja notranje temperature (druga vrstica) v odvisnosti od debeline (levi stolpec) in faznega zamika 0,4 m debelega toplotnega ovoja za različne izolacijske materiale (ovoj stavbe sestavlja le toplotna izolacija).

Zimske razlike med izolacijskimi materiali v povprečni notranji temperaturi so manjše za tanjše stene in večje za debelejše stene, vendar še vedno izjemno majhne (Slika 17). Debelejša stena ima višjo povprečno notranjo temperaturo. Podobno velja tudi za temperaturna nihanja: debelejše kot je stena, višja so temperaturna nihanja v hiši, medtem ko so razlike med materiali manjše. Poleg tega je tudi potreba po energiji za ogrevanje zelo podobna med materiali. Pri debelini 0,2 m je potreba po energiji za ogrevanje zelo različna pri različnih materialih, vendar je pri debelejšem potreba po energiji za ogrevanje pri celulozni izolaciji manjša, za 0,5 %. Vsi trije parametri, povprečna dnevna temperatura, dnevna nihanja temperature in mesečna poraba energije za ogrevanje, so razločno odvisni od faznega zamika, vendar so razlike med materiali izjemno majhne. Med izbranimi izolacijskimi materiali dajo najboljše rezultate za notranje okolje celulozna izolacija in leseno vlaknena izolacija.



Slika 17: Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevnih nihanj notranje temperature in potrebe po energiji za ogrevanje za različne izolacijske materiale pri različnih debelinah ter različnih faznih zamikih za zimske mesece. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prva vrstica), dnevna nihanja notranje temperature (druga vrstica) in potreba po energiji za ogrevanje (tretja vrstica) v odvisnosti od debeline (levi stolpec) in faznega zamika 0,4 m debelega toplotnega ovoja za različne izolacijske materiale (ovoj stavbe sestavlja le toplotna izolacija). Spodnji graf prikazuje odstopanja v potrebi energije za ogrevanje hiše, izolirane s celulozno izolacijo.

Z omenjenimi simulacijami nismo popolnoma simulirali realnih pogojev, saj se ti bolj stohastično spreminjajo kot je v simulacijah predvideno nihanje dnevne temperature. Tudi pasivni sončni viri v realnosti niso konstantni ves čas, pač pa se spreminjajo na minuti časovni skali, kot tudi notranji viri, ki v realni hiši niso predvidljivi. V primeru stohastičnih pojavov in velikih nihanj v moči ogrevanja (minutnih, urnih) toplotna masa in materiali z dolgo toplotno kapaciteto igrajo večjo vlogo. Med faktorji, ki vplivajo na večjo porabo energije so: nižja efektivna toplotna kapaciteta stavbe, višja nihanja zunanje temperature, manj oken, manjši notranji viri, manjši sončni viri in sevanje na fasado, višji pretok zraka, nizka učinkovitost rekuperacije in manjša prehodnost oken za sončno sevanje.

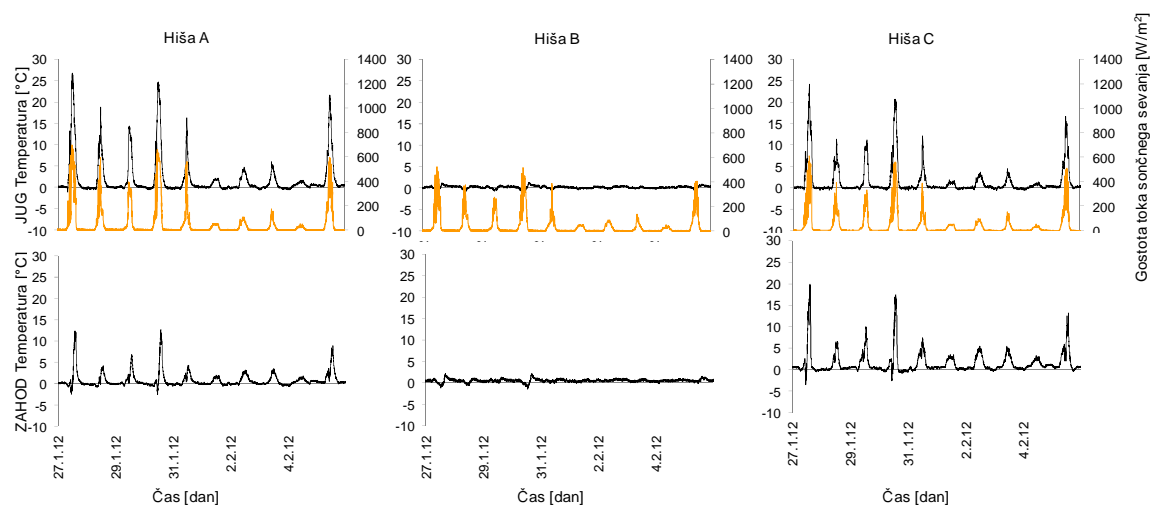
Vpliv uporabe različnih gradbenih materialov v gradbenih konstrukcijah na pogoje v hišah in gradbenih konstrukcijah ter na potrebo po energiji za ogrevanje smo preverili tudi z meritvami na testnih objektih. Zato smo v kratkih časovnih intervalih, ko ni bilo pasivnih sončnih virov, saj lahko njihova moč v mikrolokalnih pogojih zelo niha zaradi senčenja drevja v okolici (in ker smo opazili nenavadne viške sončnega obsevanja v hiši A v primerjavi z drugima dvema hišama), primerjali moč ogrevanja pri treh hišah. V najbolj hladnem obdobju februarja 2012 je bila poraba energije za ogrevanje hiše A 12 % manjša od porabe hiše C, od tega je 9 % moč pripisati 9 % razliki v toplotni prehodnosti gradbenih konstrukcij. Po drugi strani je bila razlika v energiji za ogrevanje med hišama B in C le 1 %, čeprav ima hiša B 11 % slabšo toplotno prehodnost od hiše C. Razlika v porabi energije med hišama A in C pa seže tudi do 27 % novembra, ko zunanja temperatura niha med 11 in 21 °C. Razlika v drugih obdobjih brez sončnega obsevanja znaša tudi 13 %, 14 %, 15 % in 18 %, pri čemer razlika ne korelira povsem z nihanji zunanje temperature ali višino zunanje temperature. Po drugi strani razlika v porabi energije med hišama B in C seže od 1 % do 4 %, pri čemer ima manjšo porabo hiša C, medtem ko ima hiša C 11 % nižjo toplotno prehodnost od hiše B. V enem obdobju ima hiša B za 1 % nižjo porabo od hiše C. V najtoplejšem pregledanem obdobju na začetku novembra pa ima hiša C 13 % manjšo porabo energije za ogrevanje. Glede na opisane rezultate lahko igra sestava gradbene konstrukcije oziroma uporaba materialov z daljšim faznim zamikom oziroma višjo toplotno kapaciteto in gostoto pomembno vlogo v porabi energije, predvsem v prehodnih obdobjih, ko moč ogrevanja niha med 0 in ostalimi vrednostmi – kumulativna razlika je zato v teh obdobjih nekoliko večja. Razlike v moči ogrevanja lahko jasno vidimo na grafih (Slika 22), kjer površina pod grafi predstavlja energijo, potrebno za ogrevanje. Tudi študija v Koloradu (Boonyartikarn in Spiegle, 1990) je dokazala, da hiše, izolirane s celulozno izolacijo, porabijo 22 % manj energije za ogrevanje, vendar nekateri (Nicolajsen, 2005) trdijo, da predvsem na račun višje zrakotesnosti, saj hiše v osnovi niso bile dobro zatesnjene in je tako bolj gosta izolacija prispevala k boljši zrakotesnosti. V pasivnih hišah je zrakotesnost zelo dobra, zato se vpliv na račun povečanja zrakotesnosti zaradi celulozne izolacije ne bi poznal. Poleg tega testne hiše v tej študiji niso bile tako dobro izolirane kot nizkoenergijske, tako da rezultati ne veljajo nujno tudi za energijsko učinkovite hiše. Tudi drugi so pokazali, da je vpliv visoke toplotne kapacitete in gostote na porabo energije za ogrevanje in hlajenje izrazit v zmernem podnebnju, kjer zunanja temperatura niha okoli nastavljene notranje temperature

(Burch et al., 1982, Hameury, 2006).

4.1.3 Tip fasade

Z različno izvedbo zaključnih slojev fasad majhnih testnih objektov smo želeli ovrednotiti tudi temperaturni odziv različnih tipov fasade, enega klasičnega s tankoslojnim fasadnim ometom pri hišah A in C ter po drugi strani leseno prezračevano fasado pri hiši B. Fasada hiš A in C je obarvana temno rdeče, zato je indeks absorpcije relativno visok, zato rezultati ne morejo biti direktno preneseni na fasade drugih barv.

Rezultati kažejo, da je tankoslojni fasadni omet izpostavljen veliko višjim toplotnim obremenitvam pri podobnem sončnem toku (Slika 18). Temperature v tej fasadi zelo močno narastejo, tudi nad $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ v zimskem času, zato so te fasade izpostavljene visokim temperaturnim razlikam. Temperaturni gradient pri tankoslojnim fasadnim ometu pozimi znaša do 20 K na zahodni fasadi, na južni pa še nekoliko več (25 K). Tudi poleti temperatura na površini fasade in pod tankoslojnim fasadnim ometom bistveno bolj naraste kot pod leseno fasado. Hiša z leseno prezračevano fasado ni izpostavljena takim nihanjem temperature in ohranja stalne pogoje na površini fasade. Visoka temperaturna nihanja lahko zmanjšajo trajnost gradbenih materialov in povečajo toplotno obremenitev stavbe v poletnem času. Tudi Al-Homoud (2005) trdi, da lahko velike temperaturne razlike povzročijo nezaželene premike, ki lahko poškodujejo strukturo stavbe in njene sestavne dele. Hiše z leseno prezračevano fasado so zaradi manjših temperaturnih obremenitev hladnejše in bolj udobne v poletnem času. To dokazujejo tudi izmerjene notranje temperature v majhnih testnih hišah A, B in C. Poleti je notranja temperatura v hiši B za približno 3 K nižja kot v hišah A in C, tudi v tednu dni, ko so bila okna senčena in ni bilo direktnih pasivnih virov ogrevanja skozi okna, ki bi lahko vplivali na notranjo temperaturo v testnih hišah.



Slika 18: Primerjava razlik temperaturnih profilov na površini in pod prvim slojem pri majhnih testnih hišah A in C s tankoslojnim fasadnim ometom in testni hiši B s prezračevano leseno fasado. Temperaturni gradienti (črno) pri hiši A (levi graf) in pri hiši B (srednji graf) in pri hiši C (desni graf). Temperatura izmerjena pod površino pri hišah A in C pod tankoslojnim fasadnim ometom in pri hiši B za vetrno oviro v desetih zimskih dneh. Prikazana je tudi gostota toka sončnega sevanja na južno fasado (oranžna). Prikazani so temperaturni gradienti za južno (zgoraj) in zahodno fasado (spodaj).

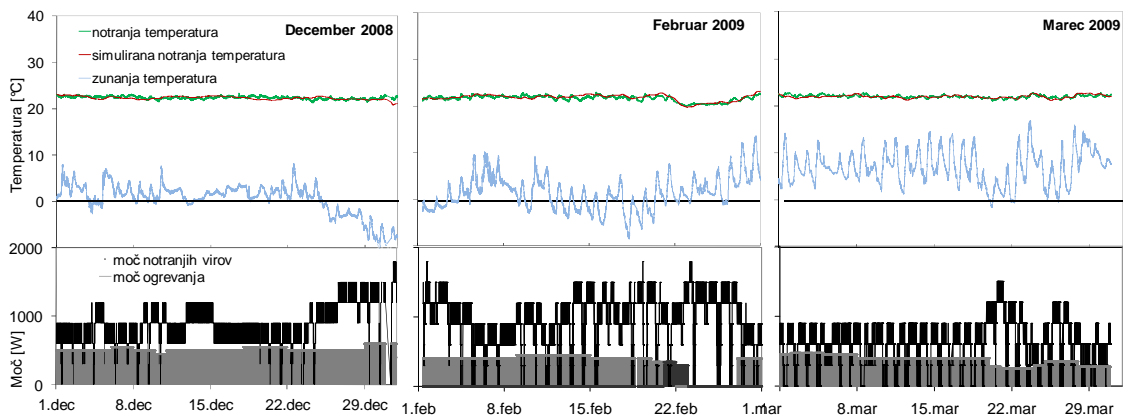
4.1.4 Senčenje in nočno zračenje

Visoke temperature se lažje pojavijo v nizkoenergijskih hišah, še posebej v področjih z vročimi poletji in/ali jesenmi, kot na primer v Sloveniji. V vročih poletnih dneh so nizkoenergijske hiše izpostavljene visokemu sončnem obsevanju in visokim zunanjim temperaturam. Na to vpliva visok vnos energije, medtem ko debela izolacija in posledično šibka sklopitev z njenim okoljem prepreči, da bi hiša oddala toploto s kondukcijo. Zato imajo majhni vložki energije velik vpliv na notranjo temperaturo. Kvantitativna ocena pokaže, da popoldanski pasivni solarni dobitki skozi eno nesenčeno zahodno okno z lahko dosežejo 500 W. Če je koeficient specifičnih toplotnih izgub hiše 60 W/K, mora biti temperaturni gradient vsaj 9 K, da se ta energija sprosti v enem dnevu. Tak gradient pa ni mogoč v takem podnebju. Zaradi energijske učinkovitosti stavb je smiselno iskati pasivne rešitve za preprečevanje pregrevanja v nizkoenergijskih hišah. Nekateri raziskovalci so spoznali, da je nočno zračenje pomembno za ohranjanje notranje temperature, dokazano je bilo pa, da hladilno moč prihranimo tudi z ustreznim senčenjem (Florides et al., 2000, Artmann et al., 2008, Givoni, 2009, Badescu et al., 2010).

Vpliv senčenja in nočnega zračenja smo preučili s pomočjo meritev in simulacij na testnem objektu v Limbušu, kjer smo v celoti spremljali energijsko bilanco hiše. Da bi lahko s simulacijami preverili različne scenarije, smo morali najprej okarakterizirati splošni odziv hiše.

4.1.4.1 Določitev parametrov testne hiše

Da bi določili splošni odziv testne hiše v Limbušu (koeficient specifičnih toplotnih izgub, moč notranjih virov energije in efektivna toplotna kapaciteta) na zunanje in notranje pogoje z visoko natančnostjo, smo prilagajali odziv hiše v zimskih mesecih 2008/2009 (Slika 19). Poletje ni primerno za določitev teh dejavnikov, ker majhni temperaturni gradienti zmanjšajo občutljivost stavbe na prehod toplote, ki ga določa izolacija, toplotna kapaciteta in notranji viri energije.



Slika 19: Odziv hiše pozimi. Zgornji grafi: Izmerjena notranja temperatura (zelena) je prikazana skupaj s simulirano notranjo temperaturo (rdeča). Prikazana je tudi zunanja temperatura (svetlo modra). Spodnji grafi: Moč ogrevanja (črna črta) je prikazana z močjo internih virov (sivo območje). Moč ogrevanja niha med dvema vrednostma na urni časovni skali, zato moč ogrevanja izgleda kot pas. (Mlakar in Štrancar, 2011)

Ko so razlike med notranjo in zunanjo temperaturo najvišje, je energijska bilanca hiše odvisna od toplotnih izgub skozi steno, streho, tla, okna in vrata ter prezračevalni sistem. Pritok energije pa jasno določa talno ogrevanje in podnevi natančno določeni sončni dobitki. Vsako energijsko neravnovesje se pokaže v poteku notranje temperature.

Tabela 7: Prilagojene vrednosti koeficienta toplotnih izgub, toplotne kapacitete in notranji viri toplote v različnih obdobjih. (Mlakar in Štrancar, 2011)

Časovno obdobje	Koeficient toplotnih izgub A [W/K]	Toplotna kapaciteta C [MJ/K]	Notranji viri toplote P_{int} [W]
December 2008, Februar 2009, Marec 2009; Julij 2007, 2008 in 2009	60	20	400
Junij/Julij 2010	60	20	50

Koeficient specifičnih toplotnih izgub, ki vključuje koeficient transmisijskih toplotnih izgub, in koeficient izgub prezračevanja (zaradi neidealne rekuperacije toplote prezračevalnega sistema) in koeficient nekontroliranih izgub prezračevanja (predvsem skozi glavna vrata) znaša 58–62 W/K (Tabela 7). Podobno vrednost koeficienta specifičnih toplotnih izgub lahko izračunamo s programskimi orodji za računanje gradbene fizike hiše (na primer PHPP ali drugi). Ti programi ocenijo koeficient transmisijskih toplotnih izgub okoli 45 W/K in koeficient izgub prezračevanja okoli 15 W/K.

Toplotna kapaciteta igra pomembno vlogo pri uravnavanju učinka nihanj zunanje temperature na notranjo temperaturo ter učinka sprememb notranjih virov energije. Toplotna kapaciteta in toplotna prehodnost določata zmanjšanje amplitude in fazni zamik temperaturnega profila, ki določa višino nihanj notranje temperature. Ker je amplituda nihanj zaradi opisanega efekta proporcionalna s temperaturnim gradientom, je zima najbolj primeren čas za prilagajanje toplotne kapacitete. Dnevno nočne temperaturne razlike so do 15 K, zato se temperaturna nihanja poznajo tudi v hiši.

Efektivna toplotna kapaciteta je bila s prilagajanjem določena 20 MJ/K (Tabela 7), kar je nekoliko manj, kolikor jo predvidi PHPP program za lahko konstrukcijo (24,4 MJ/K). Eksperimentalna vrednost, določena s prilagajanjem efektivne toplotne kapacitete, zazna le maso, ki je efektivna v toplotnem ovoju. Tako del izolacije in gradbenih materialov ne prispeva k toplotni kapaciteti in ne more biti določen z zamikom nihanj temperature in zmanjšanja amplitude.

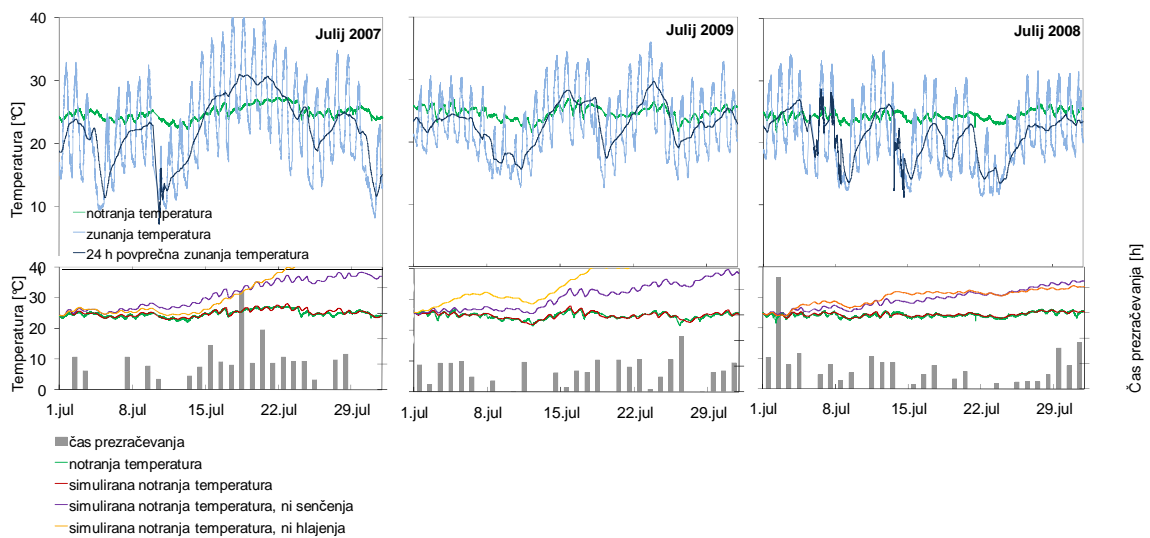
Notranje vire energije je mogoče določiti s primerjavo energijske bilance, ko so stanovalci prisotni v hiši in ko jih ni v hiši (počitnice). Slednje se uporabi kot referenčno obdobje, ko se preostali interni viri konstantno sproščajo – na primer hladilnik ali naprave v stanju pripravljenosti. V tem času ni stohastičnih pojavov, zato je razlika med obdobjem, ko so ljudje prisotni in ko jih ni, bolj opazna in se lahko določi vire, ki so posledica aktivnosti stanovalcev.

Določeno je bilo, da moč notranjih dobitkov znaša 400 W (Tabela 7). Ta vrednost je višja od standardne vrednosti v programu PHPP (2,1 W/m² ali za 113 m² ogrevane površine 237 W), pri upoštevanju večje ogrevalne površine in enakem številu oseb je gostota internih virov manjša. Ta preprosta analiza kaže, da morajo biti interni viri določeni na osebo in število električnih naprav in ne na enoto površine. Toplota, ki jo sprošča ena odrasla oseba, v povprečju znaša 80 W, pri otroku polovico manj. Sproščena toplota je močno odvisna od aktivnosti stanovalca, bodisi od njegove telesne aktivnosti ali pa energije, ki jo oddajo naprave, ko jih stanovalec uporablja na primer pri kuhanju, pranju, osvetljevanju, uporabi multimedijских naprav. Povprečni interni viri so rezultat aktivnosti in prisotnosti stanovalcev v hiši.

4.1.4.2 Hlajenje hiše poleti

Nizkoenergijska hiša je dobro izolirana hiša z izjemno majhnimi izgubami toplote, tudi pozimi, ko so temperaturni gradienti veliki. Poleti, ko zunanja temperaturo pogosto preseže notranjo temperaturo v nizkoenergijski hiši, hiša ne izgublja toplote. Vsak notranji vir energije direktno prispeva k ogrevanju hiše.

Učinek pregrevanja smo preučili v poletnih mesecih, ko so poletne zunanje temperature izjemno visoke, včasih presegajo celo 35 °C in tako močno prekoračijo želeno notranjo temperaturo (Slika 20). Julija 2007 in 2009, v obdobju, krajšem od tedna, je 24 h povprečna zunanja temperatura narasla za skoraj 10 K, kar je velika toplotna obremenitev za nizkoenergijsko hišo, ki bi morala vzdrževati notranjo temperaturo pod 26 °C brez aktivnega hlajenja. Problem pregrevanja smo preučili s simulacijami, pri čemer smo upoštevali ali pa ne senčenje oken in nočno zračenje skozi okna. Pri prilagajanju smo uporabili parametre, določene v prilagajanju odziva hiše v zimskem času.



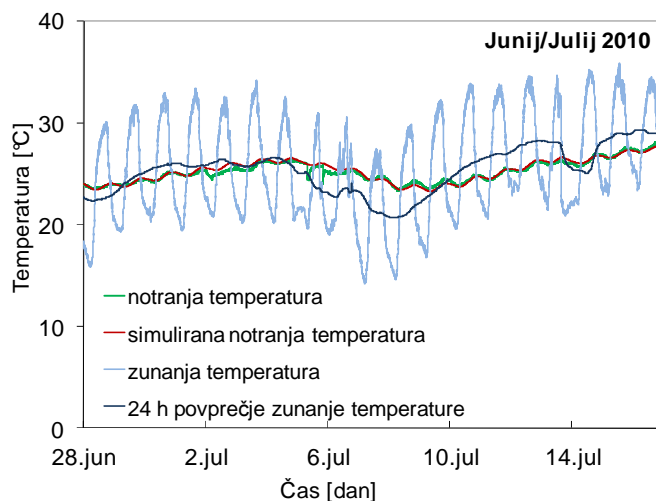
Slika 20: *Odziv hiše poleti*. Zgornji grafi: Časovni potek notranje (zeleno) in zunanje temperature (svetlo modra) skupaj s 24-urnim integralom zunanje temperature (temno modra), ki jo kontrolni sistem uporabi za določitev dnevnih sprememb vremena. Spodnji grafi: Simulirana notranja temperatura (rdeča), prilagojena na izmerjeno notranjo temperaturo (zeleno) v realnih pogojih upoštevajoč realno senčenje in odpiranje oken, predstavljen kot čas zračenja (stolpci). Za isto hišo je prikazana napovedana notranja temperatura, če hiša ne bi bila senčena (vijolična) ali če hiše ne bi zračili z odpiranjem oken (oranžna), kar jasno vodi v pregrevanje hiše. (Mlakar in Štrancar, 2011)

Izpostavljanje hiše visokim zunanjim temperaturam v dveh tednih vodi v povečanje notranje temperature za 10 in več K. Da bi ohranili udobno okolje v hiši, je potrebno učinkovito senčiti vzhodna in zahodna okna in ponoči zračiti stavbo z odpiranjem oken. Dnevna nihanja temperature za 15 K omogočajo hlajenje hiše z zračenjem, medtem ko učinkovito senčenje prepreči vstop sončnemu obsevanju skozi vzhodna okna dopoldan, skozi južna okna cel dan in popoldan skozi zahodna okna. Ponoči temperatura pade dovolj, da je nižja od notranje, kar omogoča hlajenje notranjosti hiše, vsaj nekaj ur ponoči. Čas hlajenja s popolnoma odprtimi okni je prikazan v grafih s stolpci. Stanovalci so intuitivno povečali zračenje v vročih obdobjih. Poleg tega so izkoristili hladne dni po vročih obdobjih tudi za dnevno hlajenje, če so zunanje temperature to omogočale, da so znižali notranjo temperaturo. Kvaliteta preprostega modela kaže, da lahko model razloži časovna nihanja notranje temperature, celo za tako kompleksen sistem, kot je nizkoenergijska hiša, kar lahko pojasni dejstvo, da je nizkoenergijska hiša sistem, slabo sklopljen z zunanjim okoljem.

Model je bil uporabljen tudi za napoved odziva hiše, če vzhodna in zahodna okna ne bi bila senčena. Simulirana notranja temperatura bi v enem tednu narasla do pregrevanja. V enem mesecu pa bi temperatura narasla za 15 K, kar je močno nad cono udobja.

Visoke temperature in pregrevanje bi se pojavilo tudi, če hiše ne bi hladili z odpiranjem oken ponoči, kar je pokazano z enakim modelom pri hiši v enakih pogojih, le brez nočnega zračenja. To pomeni, da je poleg preprečitve solarnega toka potrebno sprostiti energijo, ki odstrani toploto, ki izvira iz notranjih virov, ki jih sproščajo stanovanjci s svojo aktivnostjo in se jim je nemogoče v popolnosti izogniti.

Preproste strategije, kot je senčenje in nočno hlajenje z odpiranjem oken, lahko preprečijo resno pregrevanje. Z obema ukrepoma je v vremenskih razmerah, pogostih poleti v Sloveniji, mogoče? popolnoma zmanjšati hladilno moč. Nekateri raziskovalci sicer poročajo o delnem zmanjšanju s posameznimi ukrepi na slabše izoliranih objektih v drugačnih podnebnih pogojih (Florides et al., 2000, Artmann et al., 2008, Givoni, 2009, Badescu et al., 2010). Modeliranje je tako dokazalo, da morajo biti stanovanjci poučeni in prilagoditi način življenja v nizkoenergijski hiši, da zagotovijo ustrezne bivalne pogoje v vročih obdobjih.



Slika 21: *Odziv hiše poleti, ko stanovanjcev ni v hiši.* Simulirana notranja temperatura (rdeča) je prikazana skupaj z izmerjeno notranjo temperaturo (zelena) v realnih pogojih in upoštevajoč realno senčenje. Zunanja temperatura (svetlo modra) in 24-urni integral zunanje temperature (temno modra) sta tudi prikazana. Ker stanovanjcev ni bilo doma, je moč internih virov konstantna in znaša 50 W (vrednost, določena s prilagajanjem). Med 6. in 17. julijem je bilo rahlo odprto eno okno v zgornjem nadstropju, kar vodi ponoči v konstantne toplotne izgube 50 W. (Mlakar in Štrancar, 2011)

Da bi dokončno potrdili model, smo uporabili prilagojene parametre hiše za simulacijo notranje temperature poleti (28. 6. 2010–2. 7. 2010), ko ni bilo nikogar v hiši in je bila hiša senčena (Slika 21). Simulirana notranja temperatura se zelo lepo ujame z izmerjeno temperaturo. V tem času je moč internih virov le 50 W zaradi hladilnika in električnih naprav v pripravljenosti. Med 6. 7. 2010 in 16. 7. 2010 je bilo eno okno rahlo odprto – zato smo upoštevali 50 W toplotnih izgub ponoči v tem obdobju. Tudi v tem obdobju so temperature dobro simulirane. Ker je bilo okno odprto tudi podnevi in se hiša ni dovolj ponoči hladila, je notranja temperatura narasla za nekaj K.

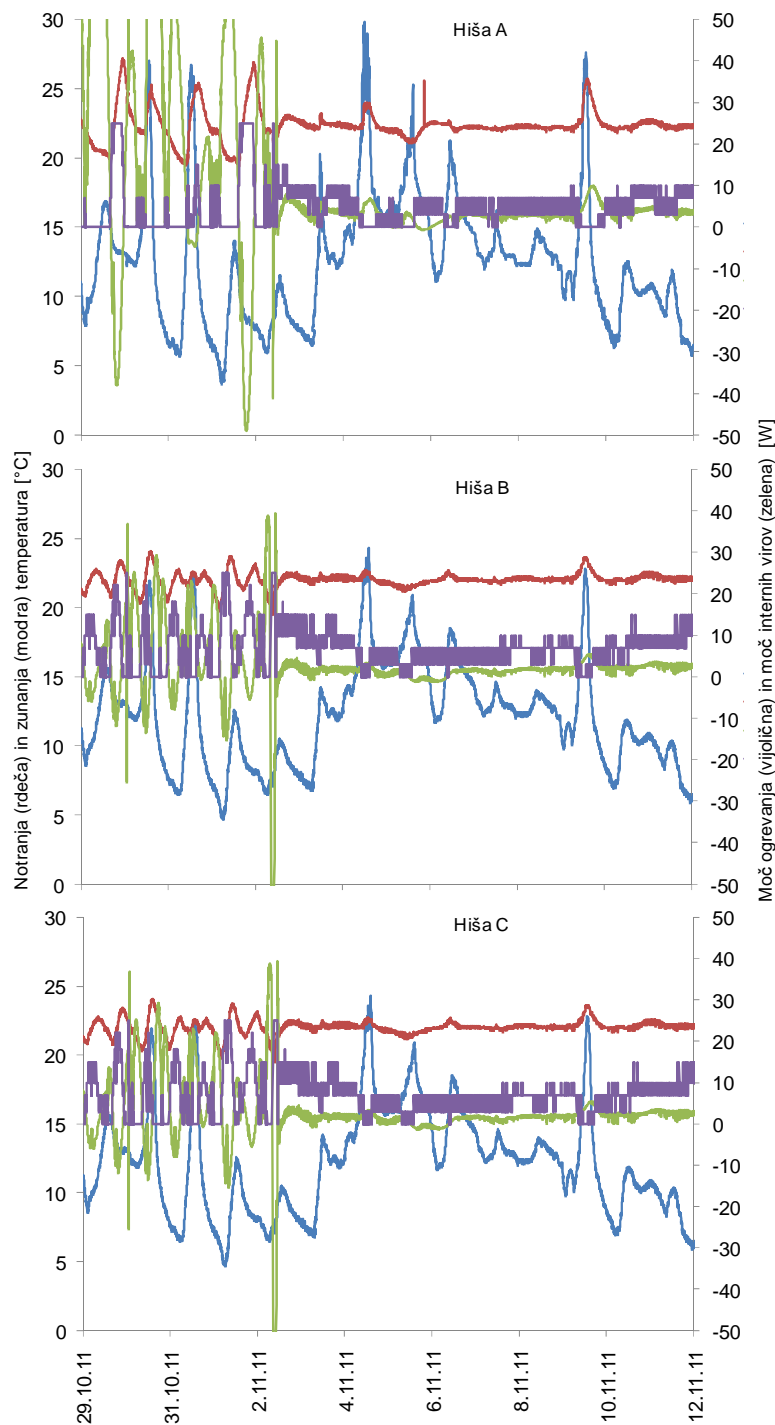
Naše simulacije in rezultati raziskav drugih raziskovalcev kažejo, da je zaščito pred pregrevanjem potrebno pazljivo načrtovati, saj lahko v nasprotnem primeru postanejo pogoji v nizkoenergijski hiši neudobni. Pri načrtovanju je potrebno upoštevati in skrbno pretehtati vse dejavnike, kot so orientacija, velikost oken, gradbeni elementi, prisiljeno in

naravno prezračevanje, skozi njihov vpliv na energijsko bilanco stavbe v vseh mogočih pogojih. Zaščita pred soncem, sončni dobitki, toplotna masa, toplotna izolacija, interni dobitki, nočno hlajenje, stopnja prezračevanja, lastnosti stekel (razmerje, prehodnost, orientacija) so pomembni dejavniki, ki vplivajo na pregrevanje. Zato je izjemno pomembno pravilno senčiti okna in sprostiti odvečno notranjo energijo čim hitreje, kot je mogoče z zračenjem. S tem morajo biti seznanjeni tudi uporabniki dobrih nizkoenergijskih hiš.

4.1.5 Kontrolni sistem

Poleg vpliva uporabljenih materialov v stavbah na toplotno udobje v stavbi pomembno vpliva tudi kontrola ogrevalnega sistema. Če ta ni pravilno nastavljena, lahko notranja temperatura izjemno niha, kar je neudobno za uporabnike take hiše. Spremljali smo potek notranje temperature v hiši, ko so bili nastavljeni različni parametri kontrolnega sistema (Slika 22). Ogrevalna moč je bila glede na algoritem nastavljena na izračunano vrednost vsake 3 minute. Izračun moči ogrevanja temelji na 24-urnem povprečju notranje in zunanje temperature, ki vpliva na dobitke toplote. Te se izračuna iz internih virov in toplote, sproščene iz kapacitete stavbe. V našem eksperimentu je bila toplotna kapaciteta sprva nastavljena na 100 W h/K, kasneje pa na 10 W h/K. Na grafu lahko jasno vidimo, da temperatura v hiši bolj niha, ko je toplotna kapaciteta hiše nastavljena na 100 W h/K. V hiši A je temperatura nihala dnevno do 8 °C, medtem ko v hiši B do 4 °C, v hiši C pa 5 °C, kar je odvisno od toplotnih izgub, ki so najvišje v hiši B. Pri 10-krat višji toplotni kapaciteti je bila moč internih virov, ki so rezultat sproščanja energije iz toplotne mase stavbe (dela gradbenih konstrukcij, ki je del učinkovite toplotne kapacitete), previsoka (zeleno črta na grafu). Ustrezna kontrola notranje temperature ne zagotavlja le bolj stabilnega in s tem udobnega in zdravega notranjega okolja, ampak s tem prispeva tudi k prihranku energije tako v zimskem času, kot tudi v poletnem, kar so ugotovili nekateri raziskovalci (Roulet, 2001, Sakellari et al., 2006).

Po drugi strani se je način kontrole, ki temelji na energijski bilanci stavbe, uporabi senzorjev v stavbi, ki spremljajo notranjo temperaturo v stavbah, zunanjo temperaturo, ter fotodiod, ki merijo gostoto toka sončnega sevanja, izkazal za izjemno uspešnega pri zagotavljanju stabilne notranje temperature, potem ko so učinkovite lastnosti stavbe ustrezno določene z nastavljanjem odziva hiše. Dokaz za to lahko najdemo na grafih izmerjene notranje temperature v testni hiši v Limbušu ter majhnih testnih hišah, kjer je uporabljen zelo podoben krmilno-nadzorni sistem ogrevanja, in notranja temperatura izjemno malo niha (3 °C v realni testni hiši ter 6 °C v majhnih hišah na račun pasivnih solarnih virov) in tako zagotavlja udobno bivalno okolje. To je tudi najboljši način za ohranjanje stabilne notranje temperature, saj upošteva dejanske izmerjene lokalne klimatske pogoje ter učinkovite lastnosti stavbe, pri čemer upošteva specifične lastnosti stavbe.



Slika 22: Časovni potek notranje in zunanje temperature, moči ogrevanja in internih virov energije. V grafih so prikazani časovni poteki notranje (rdeča črta) in zunanje temperature (zunanja črta), moči ogrevanja (vijolična črta) in internih virov energije (zelena črta) za tri majhne testne objekte (A-zgornji graf, B-srednji graf, C-spodnji graf).

Zato je tudi izjemno pomembno pravilno določiti efektivno toplotno kapaciteto, toplotne izgube hiše ter pravilno izračunati pasivne solarne vire, notranje vire energije ter pravilno določiti časovne konstante virov in ponorov energije že na začetku delovanja hiše. Slabo optimizirana kontrola ogrevalnega sistema poleg neudobja poveča potrebo po energiji za ogrevanje.

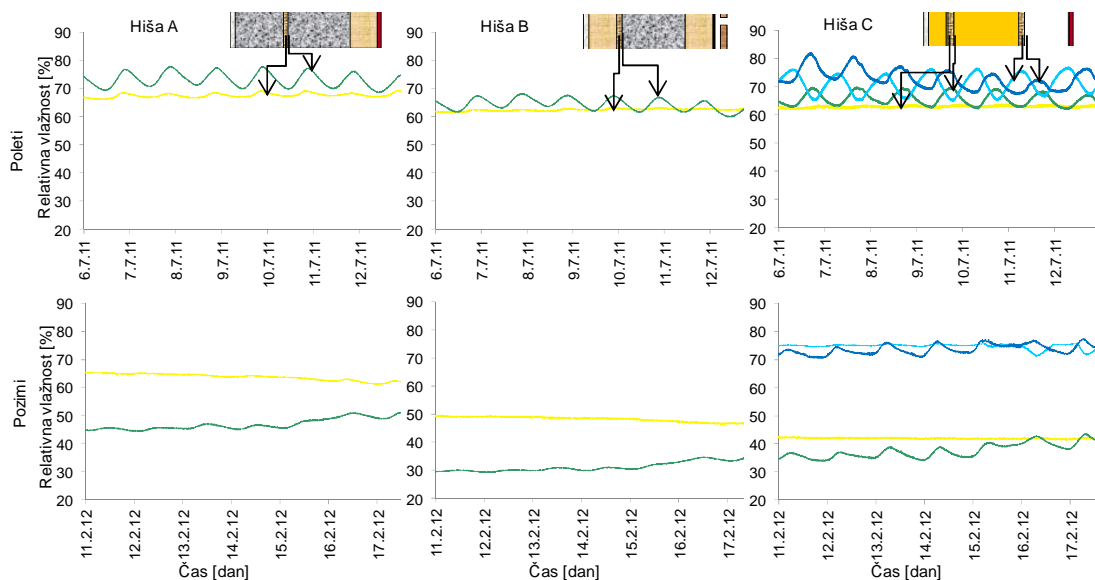
4.2 Vлага v hišah

Poleg temperature je pomemben faktor, ki vpliva na udobje in zdravje hiš, tudi vlažnost v stavbah. Poskuse s spreminjanjem vlažnosti smo izvedli na pomanjšanih testnih objektih, saj so grajeni iz materialov, ki se različno odzivajo na vlažnost, tako da je bila lahko narejena primerjava. Simulacij pri preučevanju vlažnostnih profilov nismo uporabili, saj programi, namenjeni simuliranju vlažnosti v stavbah, ne upoštevajo toplotne kapacitete materialov in tako ne vodijo do faznega zamika temperature, zaradi česar so tudi profili relativne vlažnosti neustrezni in ne v celoti realni ter ni opaznih razlik pri uporabi različnih materialov.

4.2.1 Razlika v vlažnosti

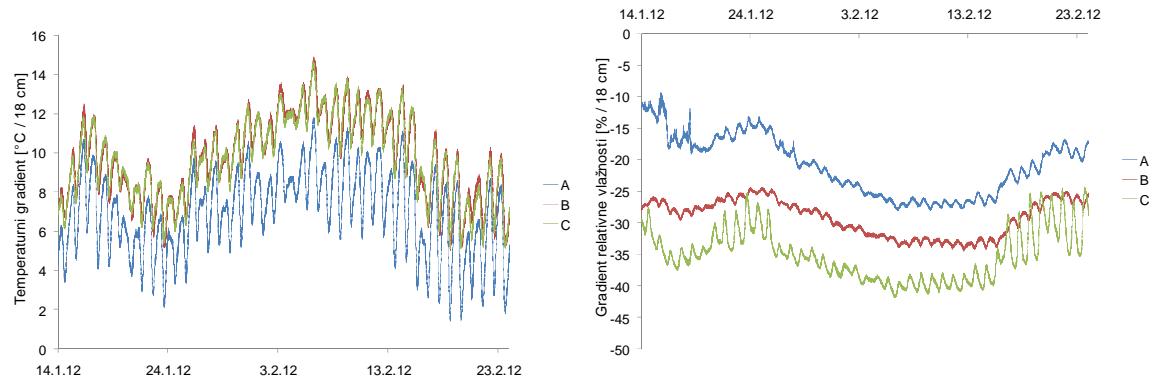
Primerjali smo temperaturne in vlažnostne gradiente skozi različne gradbene materiale v stene v obdobju enega tedna poleti in enega tedna pozimi, da bi videli, ali obstajajo razlike med testnimi objekti zaradi različne sestave gradbenih konstrukcij. V splošnem so temperaturni in vlažnostni gradienti nižji poleti, vendar absolutne vrednosti ne presegajo za več kot nekaj stopinj ali odstotkov na centimeter.

Najvišji gradienti so preko ene od OSB plošč v testni hiši C (Slika 23). Testna hiša A ima le eno OSB ploščo, hiša C pa ima dve, na vsaki strani izolacijsko konstrukcijskega sloja eno. OSB plošči sta izpostavljeni povsem različnim pogojem v zimskem in v poletnem času s spremembo gradienta relativne vlažnosti s 35 % na 0 %. To lahko povzroči dimenzijske spremembe plošč in tako strižne sile. Dimenzijske spremembe uporabljenih OSB/3 plošč znašajo glede na podatke iz tehničnega lista pri spremembi relativne vlažnosti s 30 % na 85 % pri 20 °C 0,30 %. O tem, da spremembe v vsebnosti vlage lahko zaradi dimenzijskega gibanja obloge povzročijo tudi pokanje na primer obloge iz mavca, poročajo tudi Carll et al., 2007. Vse to lahko povzroči več statičnih problemov v hiši C v primerjavi s hišo A, kjer je vgrajena le ena OSB plošča in so vlažnostni gradienti preko nje manjši.



Slika 23: Primerjava profilov relativne vlažnosti v bližini OSB/3 plošč v stenah majhnih testnih hiš v poletnem in zimskem času. Profil relativne vlažnosti v obdobju 7 dni poleti (zgornji grafi) in sedmih dni pozimi (spodnji graf) za stene majhnih testnih objektov A, B in C za notranjo OSB ploščo pri vseh hišah (rumena črta na notranji strani OSB plošče, zelena črta na zunanji strani OSB plošče) in še zunanjo OSB ploščo pri hiši C (turkizna črta na notranji strani OSB plošče, modra črta na zunanji strani OSB plošče).

Opaziti je tudi razlike v temperaturnih gradientih skozi plast izolacije, ki se nahaja med lesenimi strukturnimi elementi (Slika 24): hiša B ima zelo podobne gradiente kot hiša C, gradienti v hiši A pa so približno za 2 °C manjši. Podobno je gradient relativne vlažnosti v hiši C najvišji in doseže do 40 %/18 cm in tudi njegova nihanja so visoka. Manjši gradient (do 33 %/18 cm) in tudi manjša nihanja so v hiši B. Maksimalni vlažnostni gradient v hiši A je 28 %/18 cm in nihanja so prav tako nizka.



Slika 24: Gradient temperature in relativne vlažnosti v nosilni konstrukcijski plasti v gradbeni konstrukciji. Prikazani so gradienti temperature (levi graf) in relativne vlažnosti (desni graf) v majhnih testnih objektih A (modra črta), B (rdeča črta) in C (zeleno črta) v zimskem času.

Visoki temperaturni in vlažnostni gradienti v konstrukcijski plasti lahko vplivajo na leseno konstrukcijo, ki je na eni strani izpostavljena povsem drugi relativni vlažnosti kot na drugi strani. To lahko povzroči pokanje lesa. Ravno spremembe vlage pravokotno na smer lesnih vlaken lahko povzročijo razpoke in zmanjšajo nosilnost posameznih elementov ali celotne nosilne konstrukcije (Häglund, 2007). Višja vlažnost pa lahko povzroči z vlažnostjo povezane probleme lesa, kot je rast plesni in s tem povezano razpadanje lesa. Manjša nihanja relativne vlažnosti so v gradbenih konstrukcijah, kjer je uporabljena celulozna izolacija, saj ta lahko uravna nihanja relativne vlažnosti in ohranja bolj stabilno okolje, ki s tem podaljša življenjsko dobo lesene konstrukcije. Po drugi strani pa mineralna izolacija, ki je izredno nehigroskopična, vlažnosti ne uravnava, zato se lahko prej pojavijo pogoji, ugodni za rast plesni. Poleg omenjenega višja vlažnost mineralne izolacije poviša toplotno prevodnost izolacije, s čimer se povečajo toplotne izgube skozi gradbeno konstrukcijo.

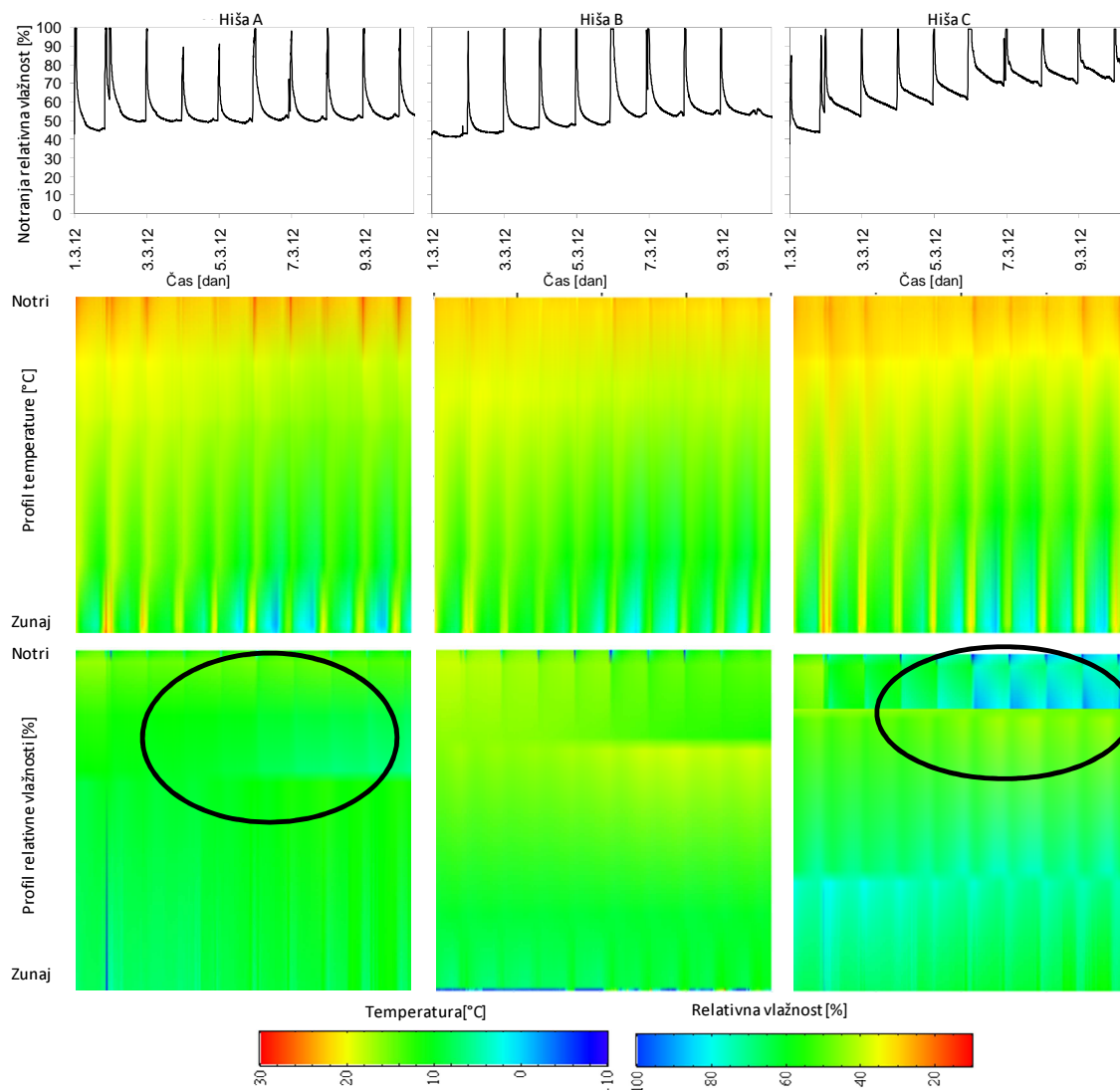
Da bi v gradbenih konstrukcijah preprečili pogoje, ki lahko povzročijo poškodbe v ovojju stavbe ter njegovih statičnih elementih, je smiselno vgraditi le eno parno oviro (OSB ploščo) in s tem zagotoviti hitrejši prehod vlage skozi gradbeno konstrukcijo ter uporabiti higroskopične materiale, ki zmanjšajo gradiente relativne vlažnosti.

4.2.2 Parna ovira ali parna zapora

Majhne testne hiše so bile grajene z različnimi sestavami gradbenih konstrukcij, da smo lahko primerjali učinkovitost različnih izvedb, med drugim tudi vpliv uporabe parne ovire ali parne zapore v gradbeni konstrukciji. Parna ovira je bolj odprta za vodno paro in omogoča počasen prehod odvečne vodne pare, medtem ko druga vodne pare skorajda ne prepušča. Parna ovira v testni hiši A (OSB/3 plošča) ima S_d vrednost 3 m, medtem ko ima parna zapora v hiši C S_d vrednost 18m. V majhnih testnih hišah smo izvedli vlažnostne poskuse z vlažilci, ki so vlažili eno uro na dan, in s tem simulirali aktivnosti ljudi v hiši, pri katerih se sprosti veliko vodne pare, kot je na primer kuhanje in tuširanje. V naseljenih realnih stavbah je dnevno vlaženje ocenjeno na 8–15 litrov, v majhnih testnih hišah pa se je v eni uri sprostil približno 0,04 litre.

Testne hiše so se različno odzvale na vlaženje 10 zaporednih dni (Slika 25). V desetih dneh je relativna vlažnost v hišah A in B narasla za približno 5 %, medtem ko v hiši C za 30 %. Razlika je nastala zaradi različne sestave gradbenih konstrukcij. Hiša C ima vgrajeno parno zaporo, ki prepreči prehod vodne pare v zunanje okolje, zato proizvedena vlaga ostane v prostoru in notranjem delu gradbene konstrukcije. V realni hiši bi to pomenilo odvečno vodno paro, ki bi jo moral odstraniti prezračevalni sistem. V ostalih dveh hišah ni parne zapore, pač pa le OSB/3 plošča kot parna ovira, tako je stena še vedno prepustna za vodno paro. V 2D grafih je razločno videti, kje je nameščena parna zapora (kjer je ostra meja v obarvanosti). Najvišja razlika v barvi je tako pri hiši C. Poleg tega se stavbi razlikujeta tudi v izolacijskih materialih med zrakotesno plastjo in mavčno-kartonsko ploščo.

V gradbenih konstrukcijah je priporočljiva uporaba parne ovire namesto parne zapore, saj se odvečna relativna vlažnost sprosti skozi toplotni ovoj, zato so bivalni pogoji v hiši bolj udobni. Poleg tega so v primeru uporabe parne ovire relativne vlažnosti v toplotnem ovoju nižje, kar zmanjša verjetnost za rast plesni, ki bi lahko resno ogrozila statično sposobnost konstrukcije ter vplivala na zdravje ljudi in trajnost stavbe. Pri nepravilni vgradnji parne zapore in nehigroskopičnih materialih lahko pride do nabiranja vlage v gradbenih konstrukcijah, saj na prebojih zaradi prehoda toplega vlažnega zraka prihaja do kondenzacije (Smulski, 1999) ali pa preveč zatesnjene strukture preprečijo izsuševanje gradbenih konstrukcij in notranjega zraka (Smulski, 1999, Morrell, 2002), kar lahko povzroči razvoj plesni, obarvanje, luščenje oblog. Naši rezultati potrjujejo tudi rezultate drugih raziskav (Padfield, 1998, Staube in deGraauw, 2001, Simonson et al., 2002, Karagiozis, 2006), ki so pokazale, da se vgradnja parne zapore namesto parne ovire veliko slabše obnese. V stavbah s parnimi zaporami se zato pogosto priporoča višja stopnja prezračevanja, da se odstrani odvečno vlago, to pa lahko zopet vpliva na energijsko bilanco hiše in udobje v stavbi.



Slika 25: Primerjava notranje relativne vlažnosti in 2D temperaturnih in vlažnostnih profilov skozi debelino severne stene majhnih testnih hiš, ko je potekalo vlaženje hiš na 1 h/dan. Notranja relativna vlažnost (prva vrstica) ter 10-dnevni časovni profil temperature (srednji graf) in relativne vlažnosti (spodnji graf) skozi debelino stene pozimi je prikazan, ko so bile hiše dnevno vlažene eno uro (z nekaj izjemami), za majhno testno hišo A (levi grafi), B (srednji grafi) in C (desni grafi). Obkrožena področja prikazujejo efekt uravnavanja vlažnosti.

4.2.3 Uravnavanje vlažnosti

Gradbene konstrukcije testnih objektov so bili testirani tudi za sposobnost uravnavanja vlage, saj so nekateri raziskovalci že dokazali dobro sposobnost uravnavanja vlage nekaterih gradbenih materialov. Mi smo primerjali tri najpogosteje uporabljene gradbene konstrukcije. Prej opisani eksperiment je služil tudi za ovrednotenje sposobnosti uravnavanja vlage izolacijskih materialov na notranji strani parne ovire/zapore (Slika 25). V hiši A je med mavčno-kartonsko ploščo in parno oviro vgrajena celulozna izolacija, medtem ko v hiši C tanjša plast mineralne volne. Rezultati kažejo le 5 % povečanje relativne vlažnosti v hišah A in B ter 30 % v hiši C. Ker mineralna volna ni higroskopična, ne more uravnavati notranje relativne vlažnosti, zaradi česar je relativna vlažnost v hiši C bistveno bolj narasla. V hišah A in B je v inštalacijskem prostoru dober higroskopičen material (A celulozna izolacija in B leseno vlaknena plošča), ki uravna

notranjo vlažnost. Plesen na klasičnih gradbenih materialih, kot sta omet in tapete, začne rasti že pri 80 % relativni vlažnosti na površini. Parna ovira in higroskopični materiali tako ohranjajo notranjo relativno vlažnost v hišah A in B v območju udobja. V realnosti bi to pomenilo bolj udobno stopnjo relativne vlažnosti v hiši, izolirani z dobrim higroskopičnim materialom, in parno oviro ter manjšo verjetnost za z vlažnostjo povezano rast plesni, kondenzacijo in razgradnjo gradbenih materialov, kar lahko vpliva na zdravje uporabnikov in trajnost stavbe. Še posebej je sposobnost uravnavanja vlažnosti pomembna v spalnicah, kjer ponoči relativna vlažnost naraste in ustvari idealne pogoje za rast pršic, ki povzročajo alergijske reakcije. V raziskavah je bila dokazana direktna korelacija med relativno vlažnostjo in velikostjo populacije pršic (Baughman in Arens, 1996), zato je smiselno vzdrževati ustrezno vlago v prostorih. Rešitev je zato v higroskopični steni, ki absorbira odvečno vlago in jo sprosti med dnevnim prezračevanjem spalnice (Padfield, 1998). Raziskave kažejo, da higroskopični materiali reagirajo veliko hitreje od normalne stopnje prezračevanja (Straube in deGraauw, 2001). Seveda je pri vsem tem pomembno, da higroskopičnih materialov ne obdamo s parnozapornimi materiali, kot so lateks barve, ki zmanjšajo učinek uravnavanja vlažnosti v prostoru (Peuhkuri in Rode, 2005).

Higroskopični materiali pa, kot je lahko jasno vidno iz grafa, uravnavajo vlažnost tudi v gradbenih konstrukcijah, to zmanjša verjetnost za razvoj plesni na konstrukcijskem lesu, nekateri celo poročajo, da vgradnja parne ovire ni več potrebna pri uporabi higroskopičnih materialov (Carll et al., 2007).

5 Zaključki

Opravljen raziskava bo prispevala k izboljšanju udobja in trajnosti stavb na energijsko varčne pasivne načine, ki izkoriščajo naravne fizikalne lastnosti in pojave. Načini, ki ne porabljajo energije za zagotavljanje bivalnega udobja, so še posebej smiselni v nizkoenergijskih in pasivnih hišah, katerih namen je ravno zmanjšanje vpliva na okolje, hkrati pa zagotoviti udobno in zdravo bivalno okolje.

Na bivalno okolje vplivajo številni zunanji in notranji dejavniki, sklopljeni z lastnostmi stavbe in gradbenih materialov. Da bi preučili vpliv sklopitve zunanjih dejavnikov in lastnosti gradbenih materialov na bivalne pogoje v stavbah in pogoje v gradbenih konstrukcijah, smo razvili naslednje pristope:

- Razvili smo način za *in situ* eksperimentiranje na pomanjšanih testnih hišah. Pomanjšanje testnih hiš je racionalen način za spremljanje vpliva gradbenih materialov na profile temperature in relativne vlažnosti, ki da rezultate, ki jih je moč prenesti na realne objekte. Rezultati so pokazali dobro ujemanje med profili na pomanjšani testni hiši in realni testni hiši ter tudi dobro ujemanje med temperaturnimi profili pomanjšanih testnih hiš in teoretičnimi vrednostmi.
- Tudi *in situ* spremljanje profilov temperature in relativne vlažnosti je izviren pristop za preučevanje vpliva gradbenih materialov na notranje pogoje in pogoje v gradbenih konstrukcijah. Omogoča natančen prikaz razlik med profili temperature in relativne vlažnosti pri različnih sestavah gradbenih konstrukcij.
- V podporo meritvam in njihovem ovrednotenju smo razvili preprost model prehoda toplote. Modelirani temperaturni profili se dobro ujemajo z izmerjenimi temperaturnimi profili. Odstopanja so le zaradi razlike med teoretičnimi in dejanskimi faznimi zamiki in ker model ne upošteva dovolj dobro sevanja fasade. Omenjeno bi morali v prihodnje še izpopolniti.
- Razvili smo izjemno preprost model energijske bilance stavb, s katerim je mogoče dovolj natančno kvantificirati vpliv lastnosti stavbe ter gradbenih konstrukcij in gradbenih materialov na energijsko bilanco stavbe in s tem na bivalne pogoje. Omenjeni model pa lahko predstavlja osnovo za izjemno natančno reguliranje ogrevalnega sistema v hiši.

Z omenjenimi pristopi smo preučevali biofizikalne pojave v nizkoenergijskih (dobrih nizkoenergijskih in pasivnih) hišah, ki se drugače kot slabo izolirane stavbe odzivajo na zunanje in notranje dejavnike. V literaturi so preučeni vplivi zunanjih in notranjih dejavnikov na pogoje v energijsko potratnih stavbah, manj pa je v literaturi zastopanih raziskav, opravljenih na takih nizkoenergijskih stavbah. Glavni namen tega dela je bil preučiti vpliv sklopitve zunanjih dejavnikov in lastnosti gradbenih materialov na poslabšanje bivalnih pogojev v nizkoenergijskih objektih (dobrih nizkoenergijskih in pasivnih) ter ovrednotiti uporabo energijsko varčnih oziroma pasivnih načinov za zagotavljanje ustrezne temperature in relativne vlažnosti v nizkoenergijskih hišah. Hipoteze tega dela smo z raziskavami ovrgli ali potrdili:

- »Toplotna izolativnost, toplotna kapaciteta materialov, gostota so pomembne lastnosti gradbenih materialov, ki vplivajo na zmanjšanje temperaturnih nihanj v nizkoenergijskih hišah.«

Meritve so jasno pokazale, da različni gradbeni materiali povzročijo različne fazne zamike prehoda toplote in tako različne pogoje v gradbeni konstrukciji, to pa vpliva tudi na faktor znižanja amplitude temperature in na porabo energije in notranje pogoje. Tako je bolj primerna uporaba materialov z višjo toplotno kapaciteto in gostoto. Primerjava lahke lesene gradnje in masivne betonske hiše kaže, da ni razlike v porabi energije, ko je toplotna prehodnost gradbenih konstrukcij nizka kot pri nizkoenergijskih hišah. Tako igra toplotna kapaciteta večjo vlogo le pri višjih toplotnih prehodnostih. Razlika v porabi energije med nizkoenergijsko hišo, izolirano s celulozno izolacijo, ter hišo, izolirano z mineralno izolacijo, je izjemno majhna. Razlike v povprečni dnevni temperaturi in nihanjih notranje temperature med različnimi gradbenimi konstrukcijami nakazujejo, da imajo stavbe z višjo toplotno kapaciteto ovoja bolj stabilne temperature, vendar so razlike med lahkimi sestavami izjemno majhne. V realnih pogojih, kjer so nihanja zunanje temperature višja, je vpliv uporabe gradbenih materialov z višjo toplotno kapaciteto na notranjo temperaturo lahko večji. Meritve na majhnih testnih objektih kažejo, da je lahko potreba energije za ogrevanje zaradi uporabe materialov z višjo toplotno kapaciteto in gostoto (izolacijski materiali na osnovi lesa) 3–18 % manjša. Glede na opisane rezultate ima največji vpliv na stabilnost notranje temperature in potrebo po energiji za ogrevanje toplotna izolativnost, majhen, vendar opazen vpliv pa ima toplotna kapaciteta in gostota, predvsem v prehodnih obdobjih (pomlad, jesen), ko moč ogrevanja niha med 0 in ostalimi vrednostmi. Hipoteze tako nismo v celoti potrdili.

- »K zmanjševanju temperaturnih nihanj v nizkoenergijski hiši bistveno prispevata tako način gradnje in uporabljeni materiali, kot tudi nadzorni sistem ogrevanja.«

Na udobno notranjo temperaturo v poletnem času vpliva tudi izvedba fasade: pri leseni prezračevani fasadi je notranja temperatura nižja in manj niha kot pri tankoslojнем fasadnem ometu rdeče barve. Na toplotno udobje v stavbi pomembno vpliva tudi kontrola ogrevalnega sistema. Če ta ni pravilno nastavljena, lahko notranja temperatura izjemno niha. Poleg tega je najboljši način kontrole dobre nizkoenergijske hiše, ki je slabo sklopljena z zunanjim okoljem, tak, ki temelji na energijski bilanci stavbe ter senzorjih, ki spremljajo notranjo temperaturo, zunanjo temperaturo ter gostoto toka sončnega sevanja. Hipoteza je bila s tem potrjena.

- »Zunanji dejavniki, kot so visoka poletna temperatura, visoka gostota toka sončnega sevanja in notranji viri, lahko vodijo v pregrevanje nizkoenergijskih objektov.«

Visoke zunanje temperature in močno sončno obsevanje v poletnih mesecih lahko v nizkoenergijski hiši vodijo do pregrevanja. Simulacije so pokazale, da izpostavljanje hiše visokim zunanjim temperaturam v dveh tednih vodi v povečanje notranje temperature za 10 in več K. S tem smo hipotezo potrdili.

- »Obstajajo preproste rešitve, ki brez dodatne energije preprečijo pregrevanje v dobri nizkoenergijski hiši v severovzhodni Sloveniji.«

Dnevna nihanja zunanje temperature za 15 K omogočajo hlajenje hiše z zračenjem, medtem ko učinkovito senčenje prepreči vstop sončnemu obsevanju skozi vzhodna okna dopoldan, skozi južna okna cel dan in skozi zahodna okna popoldan. Ti preprosti in energijsko nepotratni pasivni strategiji lahko preprečita pregrevanje. Z obema ukrepoma v poletnih vremenskih razmerah v Sloveniji dodatno aktivno hlajenje ni potrebno. Uporabniki morajo biti poučeni, kako je s temi načini mogoče zagotoviti ustrezne bivalne pogoje v vročih obdobjih. Z omenjeno raziskavo smo hipotezo potrdili.

- »Z vgradnjo difuzijsko odprtih konstrukcij in materialov na osnovi lesa, ki delujejo kot začasni/trajni absorber zračne vlage, lahko uravnamo nihanja

relativne vlage v zelenem območju brez aktivnih nadzornih in strojnih sistemov.«

V gradbenih konstrukcijah je priporočljiva uporaba parne ovire namesto parne zapore ter uporaba higroskopičnih izolacijskih materialov namesto materialov, ki slabo uravnavajo relativno vlažnost. Na ta način se odvečna vlaga v stavbi, ki je posledica aktivnosti ljudi (kuhanje, tuširanje, ...), lahko sprosti skozi toplotni ovoj ter začasno absorbira v higroskopičnih materialih. V nasprotnem primeru lahko relativna vlažnost v prostoru in gradbeni konstrukciji zelo naraste, kar lahko vpliva na udobje, zdravje ali pa lahko vodi do z vlago povezanih problemov v gradbenih konstrukcijah. Za preprečitev dimenzijskih sprememb pa je potrebno vzdrževati čim manjše vlažnostne gradiente v bližini nosilnih elementov. Tudi s tem je hipoteza potrjena.

Iz opisanega lahko vidimo, da številni zunanji in notranji dejavniki preko lastnosti stavbe vplivajo na bivalno ugodje, trajnost stavbe in njeno energijsko učinkovitost, zato je načrtovanje nizkoenergijskih stavb, kjer se osredotočimo na vse te komponente in izkoristimo naravne fizikalne procese, priporočljivo. Pri načrtovanju nizkoenergijskih hiš (dobrih nizkoenergijskih in pasivnih) moramo pomisliti tudi na uravnavanje temperature in relativne vlažnosti z uporabo materialov z visoko toplotno kapaciteto, gostoto in dobrimi higroskopičnimi lastnostmi v kombinaciji z difuzijsko odprtimi strukturami. Ogrevalne in prezračevalne sisteme lahko z uporabo teh pasivnih načinov za zagotavljanje bivalnega udobja razbremenimo. Smiselno bi bilo modele za napovedovanje temperature in relativne vlažnosti v gradbenih konstrukcijah nadgraditi z upoštevanjem specifične toplotne kapacitete in higroskopičnih lastnosti materialov, saj vplivajo na prenos toplote in vlage. Rezultat z upoštevanjem navedenih spoznanj bi morala biti funkcionalna, udobna in zdrava hiša, ki ščititi pred vplivi zunanjega okolja, hkrati pa predstavlja kar najmanjšo obremenitev za okolje.

6 Zahvale

Najprej se najlepše zahvaljujem mojemu raziskovalnemu mentorju prof. dr. Janezu Štrancarju za trdno oporo pri moji raziskovalni poti na področju biofizike oziroma gradbene fizike, kamor sem se podala kot biologinja. S svojim navdušenjem nad reševanjem znanstvenih problemov me je popeljal v svet raziskovanja tem, ki mi sprva niso bile povsem blizu. Pokazal je, da je z naravoslovnim dojemanjem okolja moč rešiti probleme, ki se nam pojavijo tekom raziskovalnega dela. Pomagal mi je pri razvoju idej, me motiviral in spodbujal pri raziskovanju ter pokazal, kako pomembno je pri tem verjeti vase. S svojim znanjem fizike in programiranja mi je pomagal pri modeliranju, razvoju merilnega sistema in načrtovanju testnih objektov.

Hvala tudi gospodu Miru Škvorcu kot razvojnemu mentorju, ki mi je prikazal probleme in vprašanja, ki se porajajo v praksi pri gradnji hiš, in mi predal ogromno znanja na področju okolju prijazne gradnje ter omogočil, da sem pridobila še dodatna znanja. Prijazno me je sprejel v Eko produkt d.o.o. ter spodbujal tekom študija ter raziskovalnega in razvojnega dela.

Ker mi je prijazno odstopil prostor za postavitev testnih objektov ter pomagal pri izdelavi in vzdrževanju testnih hiš, se zahvaljujem Luki Gašperšiču. Zahvaljujem se tudi vsem ostalim kolegom, ki so pomagali pri nastajanju in vzdrževanju testnih objektov ter odpravljanju težav. Hvala tudi lastnikom realnih testnih objektov, na katerih so bile opravljene številne raziskave.

Za vso pomoč pri snovanju merilnih sistemov ter odpravljanju številnih težav se zahvaljujem Ivanu Kvasiču in Davorinu Kotniku. Pomagala sta mi s številnimi nasveti ter me vodila pri odpravljanju problemov. Zahvaljujem se tudi vsem ostalim kolegom, ki so pomagali pri nastajanju merilnih sistemov.

Hvala Iztoku Urbančiču za pomoč pri modeliranju, pri načrtovanju merilnega sistema in drugih problemih in vprašanjih. Hvala tudi Ajasji Ljubetiču za pomoč pri nemalo računalniških problemih.

Zahvaljujem se vsem sodelavcem Maji, Sandri, Almi, Iztoku, Ajasji, Zoranu, Tilnu, Marjeti, Marjani, Danieletu, Olegu iz Laboratorija za biofiziko Oddelka F5 na Institutu »Jožef Stefan« za prijetno delovno okolje, za podporo in pomoč ter številne diskusije. Hvala za vse lepe trenutke in prijetna druženja ob čaju.

Zahvaljujem se tudi vsem ostalim sodelavcem iz Eko produkta za podporo in pomoč: Almi, Sabini, Saši, Vanji, Borutu, Gregi, Klemnu, Sandiju, Zvonetu.

Hvala zaposlenim na MPŠ, prof. dr. Aleksandru Zidanšku, prof. dr. Boštjanu Zalarju, Sergeji in Tadeji za vso pomoč tekom študija ekotehnologije na podiplomski šoli in pri pripravi disertacije.

Velika zahvala pa velja mojim staršem, Mitji, bratu z družino, in prijateljicam Maji, Ani, Barbari, Bojani in Tanji, ker mi vedno stojijo ob strani, me podpirajo in verjamejo vame.

Za finančno podporo se zahvaljujem Evropski uniji, Evropskemu socialnemu skladu.

7 Literatura in viri

- Al-Homoud, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment* **40**, 353–366 (2005).
- Al-Mumin, A.; Khattab, O.; Sridhar, G. Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences. *Energy and Buildings* **35**, 549–559 (2003).
- ANSI/ASHRAE Standard 55-1992: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, Atlanta, 1992).
- Arens, E.; Baughman, A. Indoor humidity and human health – Part II: Buildings and their systems. *ASHRAE Transactions* **102**, 212–221 (1996).
- Armstrong, P. R.; Leeb, S. B.; Norford, L. K. Control with building mass – Part I: Thermal response model. *ASHRAE Transactions* **112**, 449–461 (2006).
- Artmann, N.; Manz, H.; Heiselberg, P. Parameter study on performance of building cooling by night-time ventilation. *Renewable Energy* **33**, 2589–2598 (2008).
- Arundel A. V.; Sterling E. M.; Biggin J. H.; Sterling T. D. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives* **65**, 351–361 (1986).
- Asan, H. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment* **41**, 615–620 (2006).
- Aste, N.; Angelotti, A.; Buzzetti, M. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings* **41**, 1181–1187 (2009).
- Badescu, V.; Laaser, N.; Crutescu, R. Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). *Energy* **35**, 3284–3300 (2010).
- Badescu, V.; Sicre, B. Renewable energy for passive house heating: II. Model. *Energy and Buildings* **35**, 1085–1096 (2003).
- Baughman, A.; Arens, E. Indoor humidity and human health: - Part I: Literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants. *ASHRAE Transactions* **102**, 193–211 (1996).
- Boerstra, A. Personal control in future thermal comfort standards? V: *Adapting to Change: New Thinking on Comfort: Network for Comfort and Energy Use in Buildings*. 8 (NCEUB, London, 2010).
- Bojic, M.; Loveday, D. L. The influence on building thermal behaviour of the insulation/masonry distribution in a three-layered construction. *Energy and Buildings* **26**, 153–157 (1997).
- Boonyartikarn, S.; Spiegle, S. R. *Fiber glass vs cellulose installed performance* (Research University of Colorado School of Architecture and Planning, Denver, 1990).
- Breesch, H.; Bossaer, A.; Janssens, A. Passive cooling in a low-energy office building. *Solar Energy* **79**, 682–696 (2005).
- Burch, D. M.; Remmert, W. E.; Krintz, D. F.; Barnes, C. S. A field study of the effect of

- wall mass on the heating and cooling loads of residential buildings. *Proceedings of the Building Thermal Mass Seminar*. (Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, TN, 1982).
- Burge P. S. Sick building syndrome. *Occupational and Environmental Medicine* **61**, 185–190 (2004).
- Carll, C.; TenWolde, A.; Munson, R. Moisture performance of a contemporary wood-frame house operated at design indoor humidity levels. *Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X*, (ASHRAE, Atlanta, 2007).
- Cerolini, S.; D'Orazio, M.; Di Perna, C.; Stazi, A. Moisture buffering capacity of highly absorbing materials. *Energy and Buildings* **41**, 164–168 (2009).
- Charles, K. E. *Fanger's thermal comfort and draught models: IRC Research Report RR-162* (National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa, 2002).
- Direktiva 2006/32/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 5. aprila 2006 o učinkovitosti rabe končne energije in o energetskih storitvah ter o razveljavitvi Direktive sveta 93/76/EGS. *Uradni list Evropske unije* 27. 4. 2006.
- Direktiva 2010/31/EU Evropskega parlamenta in sveta z dne 19. maja 2010 o energetski učinkovitosti stavb. *Uradni list Evropske unije* 18. 6. 2010.
- Feist, W.; Schnieders, J.; Dorer, V.; Haas, A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings* **37**, 1186–1203 (2005).
- Feng, Y. Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. *Energy and Buildings* **36**, 1309–1312 (2004).
- Florides, G. A.; Kalogirou, S. A.; Tassou, S. A.; Wrobel, W. C. Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis. *Energy* **25**, 915–937 (2000).
- Florides, G. A.; Tassou, S. A.; Kalogirou, S. A.; Wrobel, L. C. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, **73** 299–328 (2002).
- Givoni, B. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar energy* **85**, 1692–1726 (2009).
- Gregory, K.; Moghtaderi, B.; Sugo, H.; Page, A. Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems. *Energy and Buildings* **40**, 459–465 (2008).
- Häglund, M. Moisture content penetration in wood elements under varying boundary conditions. *Wood Science and Technology* **41**, 477–490 (2007).
- Hameury S. Lundström T. Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. *Energy and Buildings* **36**, 281–292 (2004).
- Hameury, S. *The hygrothermal inertia of massive timber constructions*, Doctoral Thesis. (KTH Architecture and the Built Environment, Stockholm, Sweden 2006).
- Hashiguchi N.; Hirakawa M.; Tochihiro Y.; Kaji Y.; Karaki C. Effects of setting up of humidifiers on thermal conditions and subjective responses of patients and staff in a hospital during winter. *Applied Ergonomics* **39**, 158–165 (2008).
- Hoang, C. P.; Kinney, K. A.; Corsi, R. L.; Szanniszlo, P. J. Resistance of green building materials to fungal growth. *International Biodeterioration & Biodegradation* **64**, 104–113 (2010).

- Jones, A. P. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment* **33**, 4535–4564 (1999).
- Karagiozis, A. *The hygrothermal performance of exterior wall systems: key points of the Oak Ridge National Laboratory NET Facilities Research Project* (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2006).
- Kossecka, E.; Kosny, J. Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used buildings. *Energy and Buildings* **34**, 321–331 (2002).
- Künzel, H. M.; Holm, A.; Zirkelbach, D.; Karagiozis, A.N. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy* **78**, 554–561 (2005).
- Lehmann, B.; Dorer, V.; Koschenz, M. Application range of thermally activated building system tabs. *Energy and Buildings* **39**, 593–598 (2007).
- Levin, P., Gudmundsson, K. Moisture in constructions with loose-fill insulation and no vapor barrier. *Nordic Journal of Building Physics* **2**, (2000).
- Mlakar, J., Štrancar, J. Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. *Energy and Buildings* **43**, 1443–1451 (2011).
- Mlecnik, E.; Van Loon, S.; Hasselaar, E. Indoor climate systems in passive houses. V: *Proceedings of AIVC 29th Conference: Advanced building ventilation and environmental technology for addressing climate change issues*. 119–124 (AIVC, Kyoto, Japan, 2008).
- Morrell, J. J. Wood-based building components: what have we learned? *International Biodeterioration & Biodegradation* **49**, 253–258 (2002).
- Mortensen, H. L.; Rode, C.; Peuhkuri, R. Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials. *Nordic biophysics symposium 2005*. 8 (IBRI, Reykjavík, Iceland, 2005).
- Nacionalni akcijski načrt za energetska učinkovitost za obdobje 2008–2016*. (Republika Slovenija, Vlada Republike Slovenije, 36000-1/2008/13, 31. 1. 2008).
- Nicolajsen, A. Thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material. *Building and Environment* **40**, 907–914 (2005).
- Nofal, M.; Kumaran, M. K. Durability assessments of wood-frame construction using the concept of damage-functions: NRCC-42643. V: *Proceedings of 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 14 (NRC, Vancouver, 1999).
- Operativni program za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov do leta 2012*, (Republika Slovenija, Vlada Republike Slovenije, 35405-2/2009/9, 30. 7. 2009).
- Oreszczyn, T.; Pretlove, S. E. C. Condensation targeter 11: Modelling surface relative humidity to predict mould growth in dwellings. *Building Service Engineering Research and Technology* **20**, 143–153 (1999).
- Orme, M.; Palmer, J.; Irving, S. Control of overheating in well-insulated housing (FaberMaunsell Ltd.). V: *Proceedings of the CIBSE/ASHRAE Conference Building Sustainability, Value and Profit*. 24–26 (CIBSE, Edinburgh, 2003).
- Osanyintola O. F.; Simonson, C. J. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings* **38**, 1270–1282 (2006).
- Padfield, T. *Humidity buffering of interior spaces by porous, absorbent insulation: Part*

- of Hygrothermal properties of alternative insulation materials*. Series R, No. 61 (Department of structural engineering and materials technical university of Denmark, 1999). <http://www.conservationphysics.org/altisol/woolbuff.pdf> (dostop: november 2012).
- Padfield, T. *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity: Doctoral thesis*. (The Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, 1998).
- Papakostas, K. T.; Sotiropoulos, B. A. Occupational and energy behaviour patterns in Greek residences. *Energy and buildings* **26**, 207–213 (1997).
- Pavlík, Z.; Černý, R. Hygrothermal performance study of an innovative interior thermal insulation system. *Applied Thermal Engineering* **29**, 1941–1946 (2009).
- Peuhkuri, R.; Rode, C. Using dynamic moisture loading tests for determination of moisture buffer value. *Annex 41 Working Meeting* (IEA, Montreal, 2005)
- Peuhkuri, R. H.; Hansen, K. K. Response of insulation materials on non-isothermal moisture transport: Final results. V: *Proceedings of 7th Nordic Symposium on Building Physics*. 1080–1087 (NSB, Reykjavik, 2005).
- prEN 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings. addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* (CEN, Brussels, 2006).
- Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. *Uradni list RS*, št. 52/2010.
- Rode, C. Moisture buffering of building materials. *Report BYG DTU R-126* (Department of civil engineering, Technical University of Denmark, Nordisk Innovations Center, Kongens Lyngby, 2005).
- Roulet, C. Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. *Energy and Buildings* **33**, 183–191 (2001).
- Sakellari, D.; Forsen, M.; Lundqvist, P. Investigating control strategies for a domestic low-temperature heat pump heating system. *International Journal of Refrigeration* **29**, 547–555 (2006).
- Salonvaara, M.; Ojanen, T.; Holm, A.; Kunzel, H. M.; Karagiozis, A. N. Moisture buffering effects on indoor air quality – experimental and simulation results. V: *Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX*, (ASHRAE, Atlanta, 2004).
- Shaviv, E.; Yezioro, A.; Capeluto, I. G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy* **24**, 445–454 (2001).
- Simonson, C. J.; Salonvaara, M.; Ojanen, T. *Improving indoor climate and comfort with wooden structures*. VTT Publications 431 (Building and Transport, Technical research centre of Finland, ESPOO, Laskut, 2001).
- Simonson, C. J.; Salonvaara, M.; Ojanen, T. The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. *Indoor Air* **12**, 243–251 (2002).
- Smulski, S. Durability of energy-efficient wood.frame houses. *Forest Products Journal* **49**, 8 (1999).
- Steeman, M.; Janssens, A.; De Paepe, M. Performance evaluation of indirect evaporative cooling by means of measured and dynamic simulations. V: *The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings IAQVEC 2007*. 8 (IAQVEC, Sendai, Japan, 2007).

- Straube, J. F.; deGraauw, J. P. Indoor air quality and hygroscopically active materials. *ASHRAE Transactions* **107**, (2001).
- Sunwoo, Y.; Chou, C.; Takeshita, J.; Murakami, M.; Tochiara, Y. Physiological and subjective responses to low relative humidity. *Journal of Physiological Anthropology* **25**, 7–14 (2006).
- Svennberg, K. *Moisture Buffering in the Indoor Environment*, Doctoral Thesis. (Building Physics LTH, Lund University, 2006).
- Svennberg, K.; Hedegaard, L.; Rode, C. Moisture buffer performance of a fully furnished room. V: *Proceedings Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX*. 11 (ASHRAE, Atlanta, 2004).
- Svennberg, K.; Lengsfeld, K.; Harderup, L. E.; Holm, A. Previous experimental studies and field measurements on moisture buffering by indoor surface materials. *Journal of building physics* **30**, 261–274 (2007).
- Svennberg, K.; Wadsö, L. Sorption isotherms for textile fabrics, foams and batting used in the indoor environment. *The Journal of the Textile Institute* **99**, 125–132 (2008).
- Ten Wolde, A.; Pilon, C. L. The effect of indoor humidity on water vapor release in homes. *Building X*. 9 (ASHRAE, Atlanta, 2007).
- Viitanen, H., Ojanen, T. Improved model to predict mold growth in building materials. *Building X*. 8 (ASHRAE, Atlanta, 2007).
- Waltjen, T. et al. *Details for Passive Houses: A catalogue of ecologically rated constructions*. (IBO-Austrian Institute for Healthy and Ecological Building, Springer, Wien, NewYork, 2009).
- Wang, X.; Kendrick, C.; Ogden, R. Influences of lighting control and natural ventilation on energy use and overheating for a day-lit industrial building. *Eleventh International IBPSA Conference, Building Simulation*. 1650–1654 (IBPSA, Glasgow, Scotland, 2009).
- Wolkoff, P.; Kjaergaard, S.K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International* **33**, 850–857 (2007).
- Yoshino, H.; Mitamura, T.; Hasegawa, K. Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions. *Buildings and Environment* **44**, 1418–1425 (2009).
- Zhu, L.; Hurt, R.; Correia, D.; Boehm, R. Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy and Buildings* **41**, 303–310 (2009).

Kazalo slik

Slika 1: <i>Vpliv virov in ponorov toplote in vlage na notranje bivalne pogoje: temperaturo (T) in relativno vlažnost (RH). Prikazani so izmenjava toplote (oranžno), pasivni viri energije (rumeno) in transport vlage (modro).</i>	2
Slika 2: <i>Sklopitev zunanjih dejavnikov in lastnosti stavbe ter njihov vpliv na bivalno okolje, trajnost stavbe in energijsko učinkovitost.</i>	13
Slika 3: <i>Testna hiša v Limbušu.</i>	18
Slika 4: <i>Fotografija majhnih testnih objektov v Doslovčah. Levo stoji hiša C, v sredini zgoraj hiša B, v sredini spodaj merilno nadzorni sistem in desno hiša A. Slikano z zahodne smeri.</i>	21
Slika 5: <i>Testna hiša v Repnjah. Fotografirana z juga.</i>	26
Slika 6: <i>Shema modeliranega stene. Določeni sta notranja (T_I) in zunanja temperatura (T_A). Stena je razdeljen na i plasti z debelino dx.</i>	31
Slika 7: <i>Primerjava profilov temperature in relativne vlažnosti v severni steni majhne testne hiše A in velike testne hiše. Prikazani so časovni profili temperature (zgornja grafa) in relativne vlažnosti (spodnja grafa) v devetih dneh februarja 2012 pri majhni testni hiši A (leva grafa) in veliki testni hiši (desna grafa) od notranjosti (T_1 in H_1 rdeča črta) proti zunanosti (T_6 in H_6 temno modra črta)</i>	38
Slika 8: <i>Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah in strehi majhne hiše A ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica) ter strehi (četrti stolpec) majhne testne hiše A ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečem na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.</i>	40
Slika 9: <i>Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah majhne hiše B ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica majhne testne hiše B ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečem na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.....</i>	41
Slika 10: <i>Izmerjeni in simulirani temperaturni profili v stenah in strehi majhne hiše C ter odstopanja simulacij od meritev. Prikazani so izmerjeni (prvi stolpec) in simulirani (drugi stolpec) temperaturni profili v stenah (južna-prva vrstica, zahodna-druga vrstica, severna-tretja vrstica) ter strehi (četrti stolpec) majhne testne hiše C ter odstopanja simulacij od meritev (tretji stolpec). Temperaturni profili so prikazani od temno modrega na zunanji strani proti rdečem na notranji strani. Globine posameznih profilov so napisane nad vsakim grafom.</i>	42

Slika 11: <i>Temperaturna profila južnih sten majhnih testnih hiš A in C. Sončni tok na južno fasado (zgornja grafa) in temperaturni profili, izmerjeni na različnih globinah gradbenih konstrukcij (označeno s puščicami) južnega stene hiše A (leva grafa) in C (desna grafa).</i>	44
Slika 12: <i>Temperaturna profila južnih sten majhnih testnih hiš A in C v petih dneh. Časovno nihanje sončnega toka padlega na južno fasado (črna prekinjena črta) in temperature, izmerjene (polna črta) na različnih globinah južne stene (označeno s puščicami) hiše A (levi graf) in C (desni graf).</i>	45
Slika 13: <i>Temperaturna profila strehe majhnih testnih hiš A in C. Sončni tok streho (zgornji graf) in temperaturni profili, izmerjeni na različnih globinah gradbenih konstrukcij (označeno s puščicami) strehe hiše A (levi graf) in C (desni graf).</i>	45
Slika 14: <i>Poraba energije za ogrevanje pri lahki in masivni konstrukciji pri različnih U vrednostih. Prikazana je letna poraba energije za lahko (modra črta) in masivno (rdeča črta) pri različnih U vrednostih gradbenih konstrukcij.</i>	47
Slika 15: <i>Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevnih nihanj notranje temperature in potrebe po energiji za ogrevanje za vsak mesec v letu za dva tipa lahke gradnje in masivno gradnjo pri različnih toplotnih prehodnostih. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prvi stolpec), dnevna nihanja notranje temperature (drugi stolpec) in potreba po energiji za ogrevanje (tretji stolpec) za dve lahki hiši (A s celulozno izolacijo – modra barva, C s stekleno izolacijo – rdeča barva) in masivno hišo (zeleno barva) pri različnih toplotnih prehodnostih ovoja hiše (prva vrstica najmanjša U vrednost, zadnja vrstica najvišja toplotna prehodnost).</i>	48
Slika 16: <i>Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevnih nihanj notranje temperature za različne izolacijske materiale pri različnih debelinah ter različnih faznih zamikih za poletne mesece. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prva vrstica), dnevna nihanja notranje temperature (druga vrstica) v odvisnosti od debeline (levi stolpec) in faznega zamika 0,4 m debelega toplotnega ovoja za različne izolacijske materiale (ovoj stavbe sestavlja le toplotna izolacija).</i>	49
Slika 17: <i>Primerjava povprečne dnevne notranje temperature, dnevnih nihanj notranje temperature in potrebe po energiji za ogrevanje za različne izolacijske materiale pri različnih debelinah ter različnih faznih zamikih za zimske mesece. Prikazani so modelirana povprečna dnevna notranja temperatura (prva vrstica), dnevna nihanja notranje temperature (druga vrstica) in potreba po energiji za ogrevanje (tretja vrstica) v odvisnosti od debeline (levi stolpec) in faznega zamika 0,4 m debelega toplotnega ovoja za različne izolacijske materiale (ovoj stavbe sestavlja le toplotna izolacija). Spodnji graf prikazuje odstopanja v potrebi energije za ogrevanje hiše, izolirane s celulozno izolacijo.</i>	51
Slika 18: <i>Primerjava razlik temperaturnih profilov na površini in pod prvim slojem pri majhnih testnih hišah A in C s tankoslojnim fasadnim ometom in testni hiši B s prezračevano leseno fasado. Temperaturni gradienti (črno) pri hiši A (levi graf) in pri hiši B (srednji graf) in pri hiši C (desni graf). Temperatura izmerjena pod površino pri hišah A in C pod tankoslojnim fasadnim ometom in pri hiši B za vetrno oviro v desetih zimskih dneh. Prikazana je tudi gostota toka sončnega sevanja na južno fasado (oranžna). Prikazani so temperaturni gradienti za južno (zgoraj) in zahodno fasado (spodaj).</i>	52

- Slika 19: Odziv hiše pozimi. Zgornji grafi: Izmerjena notranja temperatura (zelena) je prikazana skupaj s simulirano notranjo temperaturo (rdeča). Prikazana je tudi zunanja temperatura (svetlo modra). Spodnji grafi: Moč ogrevanja (črna črta) je prikazana z močjo internih virov (sivo območje). Moč ogrevanja niha med dvema vrednostma na urni časovni skali, zato moč ogrevanja izgleda kot pas. (Mlakar in Štrancar, 2011)..... 53
- Slika 20: *Odziv hiše poleti*. Zgornji grafi: Časovni potek notranje (zelena) in zunanje temperature (svetlo modra) skupaj s 24-urnim integralom zunanje temperature (temno modra), ki jo kontrolni sistem uporabi za določitev dnevnih sprememb vremena. Spodnji grafi: Simulirana notranja temperatura (rdeča), prilagojena na izmerjeno notranjo temperaturo (zelena) v realnih pogojih upoštevajoč realno senčenje in odpiranje oken, predstavljen kot čas zračenja (stolpci). Za isto hišo je prikazana napovedana notranja temperatura, če hiša ne bi bila senčena (vijolična) ali če hiše ne bi zračili z odpiranjem oken (oranžna), kar jasno vodi v pregrevanje hiše. (Mlakar in Štrancar, 2011) 55
- Slika 21: *Odziv hiše poleti, ko stanovalcev ni v hiši*. Simulirana notranja temperatura (rdeča) je prikazana skupaj z izmerjeno notranjo temperaturo (zelena) v realnih pogojih in upoštevajoč realno senčenje. Zunanja temperatura (svetlo modra) in 24-urni integral zunanje temperature (temno modra) sta tudi prikazana. Ker stanovalcev ni bilo doma, je moč internih virov konstantna in znaša 50 W (vrednost, določena s prilagajanjem). Med 6. in 17. julijem je bilo rahlo odprto eno okno v zgornjem nadstropju, kar vodi ponoči v konstantne toplotne izgube 50 W. (Mlakar in Štrancar, 2011) 56
- Slika 22: *Časovni potek notranje in zunanje temperature, moči ogrevanja in internih virov energije*. V grafih so prikazani časovni poteki notranje (rdeča črta) in zunanje temperature (zunanja črta), moči ogrevanja (vijolična črta) in internih virov energije (zelena črta) za tri majhne testne objekte (A-zgornji graf, B-srednji graf, C-spodnji graf)..... 58
- Slika 23: *Primerjava profilov relativne vlažnosti v bližini OSB/3 plošč v stenah majhnih testnih hiš v poletnem in zimskem času*. Profil relativne vlažnosti v obdobju 7 dni poleti (zgornji grafi) in sedmih dni pozimi (spodnji graf) za stene majhnih testnih objektov A, B in C za notranjo OSB ploščo pri vseh hišah (rumena črta na notranji strani OSB plošče, zelena črta na zunanji strani OSB plošče) in še zunanjo OSB ploščo pri hiši C (turkizna črta na notranji strani OSB plošče, modra črta na zunanji strani OSB plošče). 59
- Slika 24: *Gradient temperature in relativne vlažnosti v nosilni konstrukcijski plasti v gradbeni konstrukciji*. Prikazani so gradienti temperature (levi graf) in relativne vlažnosti (desni graf) v majhnih testnih objektih A (modra črta), B (rdeča črta) in C (zelena črta) v zimskem času. 60
- Slika 25: *Primerjava notranje relativne vlažnosti in 2D temperaturnih in vlažnostnih profilov skozi debelino severne stene majhnih testnih hiš, ko je potekalo vlaženje hiš na 1 h/dan*. Notranja relativna vlažnost (prva vrstica) ter 10-dnevni časovni profil temperature (srednji graf) in relativne vlažnosti (spodnji graf) skozi debelino stene pozimi je prikazan, ko so bile hiše dnevno vlažene eno uro (z nekaj izjemami), za majhno testno hišo A (levi grafi), B (srednji grafi) in C (desni grafi). Obkrožena področja prikazujejo efekt uravnavanja vlažnosti. 62

Kazalo tabel

Tabela 1: <i>Sestava sten majhnih testnih hiš A, B in C. Sestava stene je prikazana od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).....</i>	22
Tabela 2: <i>Sestava streh majhnih testnih hiš A, B in C. Sestava strehe je prikazana od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).....</i>	22
Tabela 3: <i>Dimenzije majhnih testnih objektov A, B in C.</i>	23
Tabela 4: <i>Sestava stene v pritličju in talne plošče hiše v Reprnjah. Sestavi sta prikazani od notranjosti proti zunanosti z izračunanimi toplotnimi prehodnostmi (U vrednost).....</i>	26
Tabela 5: <i>Klimatski podatki, uporabljeni v simulaciji. V simulaciji primerjave različnih gradbenih materialov smo uporabili parametre, predstavljene v tej tabeli, pridobljene iz klimatskih podatkov za Slovenijo.</i>	35
Tabela 6: <i>Podatki, uporabljeni v simulaciji. V simulaciji primerjave različnih gradbenih materialov smo uporabili parametre, predstavljene v tej tabeli, pridobljene iz klimatskih podatkov za Slovenijo.*Med 16h in 7h zjutraj.</i>	35
Tabela 7: <i>Prilagojene vrednosti koeficienta toplotnih izgub, toplotne kapacitete in notranji viri toplote v različnih obdobjih. (Mlakar in Štrancar, 2011)</i>	54

Priloga A

Podrobnosti testnih hiš

Lastnosti gradbenih materialov uporabljenih v testnih hišah

Tabela A1: *Lastnosti gradbenih materialov, uporabljenih v testnih hišah.* V tabeli so predstavljene gostota, toplotna prevodnost in specifična toplotna kapaciteta uporabljenih podatkov. Podatki so iz tehničnih listov uporabljenih materialov ali splošne baze lastnosti gradbenih materialov.* Gostota celulozne izolacije se specifično nastavlja za posamezne primere pri vpihovanju glede na debelino izolacije po tabeli proizvajalca izolacije. V pomanjšanih testnih objektih je njena gostota neznana, saj zaradi majhnih volumnov izolacija ni bila strojno vpihana, pač pa ročno natlačena v prostore.

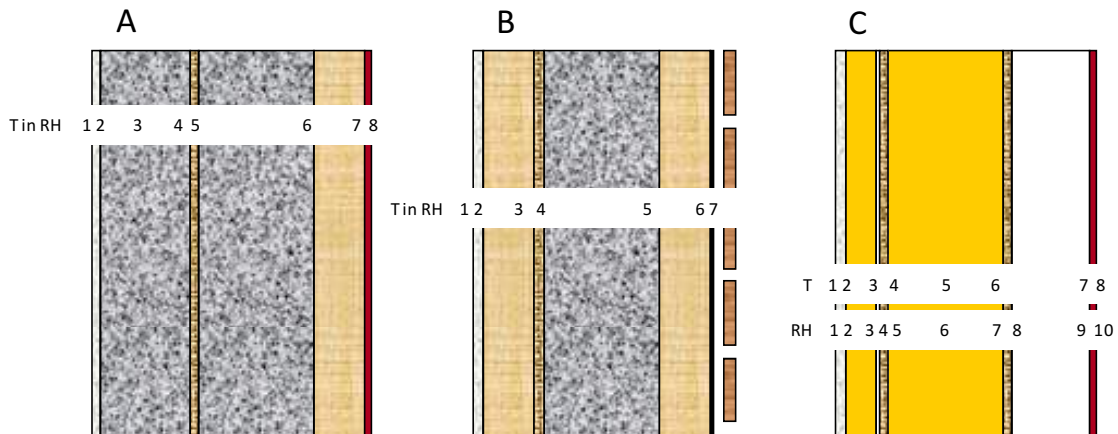
Material	Gostota kg/m ³	Toplotna prevodnost W/(m K)	Specifična toplotna kapaciteta J/(kg K)
Mavčno kartonska plošča	900	0,21	810
Celulozna izolacija Trendisol	60*	0,039	1900
Agepan OSB/3 plošča	600	0,13	2100
Leseno vlaknena plošča Agepan THD	230	0,047	2100
Tankoslojni fasadni omet	1850	0,7	1050
Vetrna ovira Stamisol FA	867	1,17	960
Steklena volna v inštalacijskem kanalu in strehi Ursa FDP 1	18	0,04	1030
Steklena volna FDP 1	20	0,04	1030
Parna zapora Airstop	450	0,17	1200
Polistiren EPS 70	15	0,039	1300
Polistirene XPS	35	0,034	1500
Leseno vlaknena plošča Agepan DWD	560	0,09	2100
Parna ovira Ekonatur	770	0,17	1200

Detajli izdelave majhnih testnih hiš

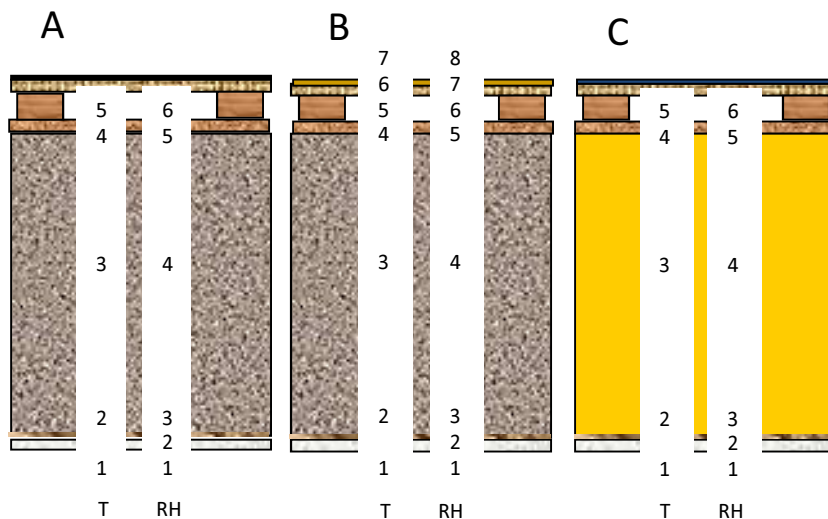


Slika A1: *Detalji izdelave majhnih testnih hiš.* Slike prikazujejo: 1 – vgradnja steklene volne, zunanje OSB/3 plošče in okna ; 2 – vgradnja polistirena in zatesnitev stikov; 3 – vgradnja celulozne izolacije; 4 – zatesnitev parne ovire z lepilnim trakom Airstop in butilnim trakom; 5 – vgradnja leseno vlaknenih plošč; 6 – vgradnja steklene volne v inštalacijsko ravnino, vgradnja mavčno kartonskih plošč, razvod senzorjev; 7 – zatesnitev parne ovire; 8 – zrakotesna vgradnja okna; 9 – vgradnja okna; 10 – zatesnitev mavčno kartonske plošče in namestitev notranjega senzorja; 11- servisna odprtina; 12 – vgradnja senzorjev v leseno vlakneno ploščo; 13 – izdelava okenskih polic in vgradnja senzorja v leseno vlakneno ploščo; 14 – zaščita zunanjih senzorjev pred vremenskimi vplivi; 15 – izdelava merilno nadzornega sistema; 16 – testna hiša A brez fasade; 17 – testna hiša B brez lesene fasade, črno je vetrna ovira; 18 – hiša C brez fasade; 19 – merilno nadzorni sistem; 20 – razvod elektro inštalacij; 21 – zaščita zunanjih senzorjev pred sončnim sevanjem.

Postavitev senzorjev v gradbenih konstrukcijah majhnih testnih objektov



Slika A2: *Postavitev temperaturnih senzorjev v stenah majhnih testnih hiš A, B in C.* Prikazani so položaji senzorjev za temperaturo (T) in relativno vlažnost (RH) v stenah majhnih testnih hiš.



Slika A3: *Postavitev temperaturnih in vlažnostnih senzorjev v strehah majhnih testnih hiš A, B in C.* Prikazani so položaji senzorjev za temperaturo (T) in relativno vlažnost (RH) v strehah majhnih testnih hiš.

Lastnosti gradbenih materialov uporabljenih v simulacijah

Tabela A2: Lastnosti uporabljenih gradbenih materialov v simulacijah. V tabeli so predstavljene gostota, toplotna prevodnost in specifična toplotna kapaciteta uporabljenih podatkov. Podatki so iz tehničnih listov materialov ali splošne baze lastnosti gradbenih materialov.

Material	Gostota kg/m ³	Toplotna prevodnost W/(m K)	Specifična toplotna kapaciteta J/(kg K)
EPS 70	15	0,039	1300
EPS 100	20	0,036	1500
Steklena volna 35	24	0,035	1030
Steklena volna 38	18	0,038	1030
Steklena volna 39	15	0,039	1030
Steklena volna 40	18	0,04	1030
Kamena volna	30	0,039	1030
PU pena	15	0,05	1500
Celuloza	60	0,039	1900
Lesena vlakna	15	0,039	1300
Apnena malta	1600	0,81	1050
Beton	2400	2,5	1000

Priloga B

Objave

Izvirni znanstveni članki:

- Mlakar, J.; Štrancar, J. Overheating in residential passive house : solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. *Energy and buildings* **43**, 1443–1451 (2011).
- Mlakar, J.; Štrancar, J. Temperature and humidity profiles in passive-house building blocks. *Buildings and environment* **60**, 185–193 (2013).

Objavljeni znanstveni prispevek na konferenci:

- Mlakar, J.; Štrancar, J. Temperaturni in vlažnostni profili v različnih gradbenih sklopih pasivnih hiš. V: *Zbornik prispevkov 3. študentske konference Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana*. 30–35 (MPŠ, Ljubljana, 2011).
- Mlakar, J.; Štrancar, J.. Overheating problem in single family passive house. V: *Building performance simulation in a changing environment : Third German-Austrian IBPSA Conference*. 274–280 (IBPSA, Vienna, 2010).

Objavljeni povzetek znanstvenega prispevka na konferenci:

- Mlakar, J.; Štrancar, J. Real time temperature and humidity profiles in passive house building blocks. V: *Conference proceedings of 15th International Passive House Conference*. 587–588 (PHI, Innsbruck, 2011).

Prispevek na konferenci brez natisa:

- Mlakar, J.; Štrancar, J. Projektiranje energetike pasivne in aktivne solarne hiše. Predstavljeno na seminarju: *Pasivna gradnja – iz teorije v prakso* (Eko produkt d.o.o., Ljubljana, 2008).