

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Grega Zrim

Preizkus izvedbe novega nanotehnološkega toplotno izolacijskega materiala Spaceloft v gradbene konstrukcije

Diplomska naloga št.: 3090

Mentor:
prof. dr. Aleš Krainer

Somentor:
asist. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 23. 12. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **GREGA ZRIM** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
**»PREIZKUS UVEDBE NOVEGA NANOTEHNOLOŠKEGA TOPLOTNO IZOLACIJSKEGA
MATERIALA SPACELOFT V GRADBENE KONSTRUKCIJE«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, 24.11.2009

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|--|
| UDK: | 699.86(043.2) |
| Avtor: | Grega Zrim |
| Mentor: | prof. dr. Aleš Krainer |
| Somentor | asist. dr. Mitja Košir |
| Naslov: | Preizkus uvedbe novega nanotehnološkega toplotno izolacijskega materiala Spaceloft v gradbene konstrukcije |
| Obseg in oprema: | 118 str., 57 pregl., 56 graf., 147 sl. |
| Ključne besede: | aerogel, toplotni odziv konstrukcijskih sklopov, eno- in dvo-dimenzionalna analiza , prihranki energije, pridobitev tlorisne površine |

Izveček

Predmet diplomskega dela je analiza vpliva uvedbe novega nanotehnološkega toplotno izolacijskega materiala v gradbene konstrukcije. Delo je razdeljeno v tri module, vsak izmed teh pa predstavlja različen nivo obravnave materiala. Prvi modul je posvečen spoznavanju materiala in njegovih karakteristik, narejena je tudi osnovna primerjava le-tega s tehničnimi karakteristikami dveh drugih toplotno izolacijskih materialov. Drugi modul obravnava obsežnejšo stacionarno analizo odziva konstrukcijskih sklopov ter njihovih križanj z računalniškima programskima orodjema TEDI ter ABAQUS za opečno, armiranobetonsko ter nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih plošč v kombinaciji s toplotno izolacijskimi materiali, kot so aerogel, polistiren in kamena volna. Orodje TEDI, razvito an Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente, je bilo uporabljeno za izračun parametrov, ki opisujejo odziv sklopa (toplotna prehodnost, pojav kondenzacije, temperaturna zakasnitev ter temperaturno dušenje). Poleg omenjenih parametrov sta bili obravnavani tudi masa konstrukcijskega sklopa in temperatura notranje površine. Drugi program je zahtevnejše komercialno orodje za izvajanje numeričnih analiz poljubnih fizikalnih problemov, s katerim je bil opravljen izračun dvodimenzionalnega temperaturnega polja ter, kjer je smiselno za argumentacijo, polje gostote toplotnega toka. V modulu je predstavljeno teoretično ozadje prenosa toplote ter računske metode za izračun obravnavanih parametrov, povzete po slovenskih in mednarodnih standardih, navedenih v uvodu. Narejena je tudi krajša analiza vpliva spremembe površinske temperature na toplotno udobje človeka. Zadnji, tretji modul, je

namenjen analizi toplotnih prihrankov v primeru enake debeline aerogelne toplotne izolacije, kakor je potrebna v primeru uporabe manj učinkovite izolacije, ter osnovni analizi tlorisnih prihrankov v primeru uporabe enakovredne debeline aerogelne toplotne izolacije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 699.86(043.2)
Author: Grega Zrim
Supervisor: prof. dr. Aleš Krainer
Cosupervisor: asist. dr. Mitja Košir
Title: Applicability test of new nanotechnology thermal insulation material Spacloft into building constructions
Notes: 118 p., 57 tab., 56 gr., 147 pic.
Key words: aerogel, thermal response of constructional complexes, one- and two-dimensional analysis, energy savings, ground plan area gains

Abstract

The subject of the thesis is influence analysis of aerogel thermal insulation material implementation into constructional complexes. The work is separated into three modules, each of them represents a different scale of observation. First one is dedicated to technical characteristics of the material and a short comparison with the characteristics of two other insulation materials. Second module introduces a more vast stationary thermal analysis of the constructional complexes with different combinations of insulation materials and materials of carrying structure, such as brick, cross laminated wood panels and reinforced concrete. The calculations are done with TEDI and ABAQUS software. In one dimensional analysis the response to implementation of new insulation material is described by parameters like thermal transmittance, condensation, mass, surface temperature, thermal time delay and thermal chocking. In the second/other dimensional analysis of constructional crossings temperature and, where needed, heat flux field are presented. A short example of thermal comfort analysis is also given. The third and final module consists of heat savings analysis in case of the same thickness of aerogel insulation as required when other two materials are used and also ground plan area gains analysis when an equal thickness of aerogel insulation is used.

ZAHVALA

Zahvaljujem se celotni katedri za stavbe in konstrukcijske elemente, še posebej mentorju prof. dr. Alešu Krainerju ter asist. dr. Mitji Koširju za pridobljeno znanje, sodelovanje in spodbudo skozi vsa leta študija.

Hvala tudi staršema za izjemno priložnost strokovnega izpopolnjevanja v podjetju Aerogel CARD, d. o. o., centru za aplikativne raziskave in dizajn.

KAZALO VSEBINE

| | | |
|---------|---|----|
| 0 | UVOD – SPLOŠNO O ENERGETSKI UČINKOVITOSTI..... | 1 |
| 1 | MODUL 1..... | 5 |
| 1.1 | Opis proizvoda..... | 5 |
| 1.2 | Funkcionalna analiza materiala..... | 7 |
| 1.3 | Tehnične karakteristike..... | 7 |
| 1.3.1 | Določitev koeficienta difuzijske upornosti vodni pari po standardu SIST EN ISO 12572:2002 – Higrotermalno obnašanje gradbenih materialov in proizvodov..... | 8 |
| 1.4 | Primerjava tehničnih karakteristik..... | 9 |
| 1.5 | Komentar..... | 9 |
| 2 | MODUL 2..... | 11 |
| 2.1 | Prenos toplote..... | 11 |
| 2.1.1 | Splošno..... | 11 |
| 2.1.2 | Načini prenosa toplote..... | 12 |
| 2.1.2.1 | Kondukcija..... | 12 |
| 2.1.2.2 | Radiacija..... | 12 |
| 2.1.2.3 | Konvekcija..... | 13 |
| 2.1.3 | Glavne oblike toplotne zaščite in njen položaj glede na nosilno konstrukcijo..... | 13 |
| 2.2 | Difuzija vodne pare..... | 14 |
| 2.3 | Računski model in stacionarna analiza..... | 14 |
| 2.3.1 | Računski model prenosa toplote s kondukcijo..... | 15 |
| 2.3.2 | Računski model prenosa toplote z radiacijo in konvekcijo..... | 16 |
| 2.3.3 | Računski model toplotnega toka..... | 17 |
| 2.3.4 | Robni pogoji..... | 17 |
| 2.4 | Zasnova osnovnega vzorca..... | 18 |
| 2.5 | Izpeljava konstrukcijskih sklopov..... | 19 |
| 2.6 | Sestave analiziranih konstrukcijskih sklopov zunanjih sten..... | 21 |
| 2.7 | Analiza konstrukcijskih sklopov – 1D analiza..... | 22 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 2.7.1 | Določitev parametrov in računskih metod | 22 |
| 2.7.1.1 | Masa konstrukcijskega sklopa..... | 23 |
| 2.7.1.2 | Toplotna prehodnost skozi konstrukcijo | 23 |
| 2.7.1.3 | Pojav kondenzacije | 25 |
| 2.7.1.4 | Temperaturni zamik..... | 27 |
| 2.7.1.5 | Temperaturno dušenje | 27 |
| 2.7.1.6 | Temperatura notranje površine | 28 |
| 2.7.2 | Programsko orodje TEDI | 29 |
| 2.7.3 | Rezultati in komentar | 29 |
| 2.7.3.1 | Opečna zunanja stena..... | 30 |
| 2.7.3.2 | Zunanja stena iz lesenih križno lepljenih plošč | 40 |
| 2.7.3.3 | Armiranobetonska zunanja stena | 48 |
| 2.7.3.4 | Primerjava izbranih optimalnih konstrukcijskih sklopov..... | 55 |
| 2.7.3.5 | Ocena toplotnega udobja | 56 |
| 2.8 | Analiza križanj konstrukcijskih sklopov – 2D analiza..... | 58 |
| 2.8.1 | Določitev parametrov | 58 |
| 2.8.2 | Programsko orodje ABAQUS | 59 |
| 2.8.3 | Model in kontrola modela | 59 |
| 2.8.3.1 | Test modela – A..... | 59 |
| 2.8.3.2 | Test modela – B..... | 60 |
| 2.8.4 | Dodatna razdelitev vzorca | 62 |
| 2.8.5 | Rezultati in komentar | 62 |
| 2.8.5.1 | Križanje L..... | 62 |
| 2.8.5.1.1 | Opečna nosilna konstrukcija | 63 |
| 2.8.5.1.2 | Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč | 66 |
| 2.8.5.1.3 | Armiranobetonska nosilna konstrukcija..... | 70 |
| 2.8.5.2 | Križanje T..... | 71 |
| 2.8.5.2.1 | Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije..... | 72 |
| 2.8.5.2.1.1 | Opečna nosilna konstrukcija | 72 |
| 2.8.5.2.1.2 | Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč | 73 |
| 2.8.5.2.1.3 | Armiranobetonska nosilna konstrukcija..... | 75 |
| 2.8.5.2.2 | Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije | 76 |
| 2.8.5.2.2.1 | Opečna nosilna konstrukcija | 76 |
| 2.8.5.3 | Križanje X | 80 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 2.8.5.2.1 | Opečna nosilna konstrukcija..... | 81 |
| 2.8.5.2.2 | Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč..... | 84 |
| 2.8.5.2.3 | Armiranobetonska nosilna konstrukcija | 86 |
| 4 | MODUL 3..... | 89 |
| 3.1 | Energetska bilanca | 89 |
| 3.2 | Zasnova vzorca | 90 |
| 3.3 | Analiza vpliva uvedbe aerogelne izolacije na lastnosti stavbe | 91 |
| 3.3.1 | Analiza prihrankov energije | 91 |
| 3.3.1.1 | Določitev parametrov in računske metode | 92 |
| 3.3.1.2 | Rezultati in komentar | 93 |
| 3.3.1.2.1 | Opečna zunanja stena | 93 |
| 3.3.1.2.2 | Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč..... | 96 |
| 3.3.1.2.3 | Armiranobetonska zunanja stena..... | 100 |
| 3.3.2 | Analiza prihrankov toplotne površine..... | 102 |
| 3.3.2.1 | Določitev parametrov in računske metode | 103 |
| 3.3.2.2 | Rezultati in komentar | 104 |
| 3.3.2.2.1 | Opečna zunanja stena | 104 |
| 3.3.2.2.2 | Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč..... | 107 |
| 3.3.2.2.3 | Armiranobetonska zunanja stena..... | 110 |
| 5 | ZAKLJUČKI | 114 |
| VIRI | | 117 |

KAZALO SLIK

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1: | Shema razčlenitve dela | 3 |
| Slika 2: | Optično mikroskopiranje v razvojnem oddelku BSH (100 x povečava)..... | 6 |
| Slika 3: | Elektronsko mikroskopiranje na KI (levo 316 x povečava; sredina 16630 x povečava; desno: 102260 x povečava) | 6 |
| Slika 4: | Shema osnovnega vzorca primerov | 18 |
| Slika 5: | Funkcionalna zasnova konstrukcijskih sklopov | 20 |
| Slika 6: | Shema vzorca s poimenovanjem primerov | 29 |
| Slika 7: | Načrt primerjave rezultatov enodimenzionalne analize | 30 |
| Slika 8: | Psihrometrična karta PI s prikazom PMV faktorja | 57 |
| Slika 9: | Psihrometrična karta PV s prikazom PMV faktorja | 57 |
| Slika 10: | Skica kontrolnih točk | 60 |
| Slika 11: | Prikaz rezultata z obarvanimi polji | 60 |
| Slika 12: | Prikaz rezultata | 60 |
| Slika 13: | Skica kontrolnega elementa B | 60 |
| Slika 14: | Prikaz rezultata z obarvanimi polji | 61 |
| Slika 15: | Prikaz rezultata z izotermami | 61 |
| Slika 16: | Kontrolno mesto – L križanje | 62 |
| Slika 17: | Polistiren - PI | 63 |
| Slika 18: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII | 63 |
| Slika 19: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PIII | 63 |
| Slika 20: | Aerogelna izolacija - PIV | 63 |
| Slika 21: | Potek kritične temperature – IV | 64 |
| Slika 22: | Potek kritične temperature – PII | 64 |
| Slika 23: | Potek kritične temperature – PI | 64 |
| Slika 24: | Potek kritične temperature – PIII | 64 |
| Slika 25: | Temperaturno polje PI | 65 |
| Slika 26: | Temperaturno polje PII | 65 |
| Slika 27: | Temperaturno polje PIII | 65 |
| Slika 28: | Temperaturno polje PIV | 65 |
| Slika 29: | Polistiren – PI | 66 |
| Slika 30: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PII | 66 |
| Slika 31: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII | 66 |
| Slika 32: | Aerogelna izolacija – PIV | 66 |
| Slika 33: | Detajl PV | 67 |
| Slika 34: | Potek kritične temperature – PI | 67 |
| Slika 35: | Potek kritične temperature – PII | 67 |
| Slika 36: | Potek kritične temperature – PIII | 67 |
| Slika 37: | Potek kritične temperature – IV | 67 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 38: | Temperaturno polje PI..... | 68 |
| Slika 39: | Temperaturno polje PII | 68 |
| Slika 40: | Temperaturno polje PIII..... | 68 |
| Slika 41: | Temperaturno polje PIV..... | 68 |
| Slika 42: | Razporeditev gostote toplotnega polja – PI | 69 |
| Slika 43: | Razporeditev gostote toplotnega polja - PII..... | 69 |
| Slika 44: | Razporeditev gostote toplotnega polja – PIII..... | 69 |
| Slika 45: | Razporeditev gostote toplotnega polja - PIV | 69 |
| Slika 46: | Polistiren – PI..... | 70 |
| Slika 47: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PII | 70 |
| Slika 48: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII..... | 70 |
| Slika 49: | Aerogelna izolacija – PIV | 70 |
| Slika 50: | Potek kritične temperature – PI..... | 70 |
| Slika 51: | Potek kritične temperature – PII | 70 |
| Slika 52: | Potek kritične temperature – PIII | 70 |
| Slika 53: | Potek kritične temperature – PIV | 70 |
| Slika 54: | Temperaturno polje PI..... | 71 |
| Slika 55: | Temperaturno polje PII | 71 |
| Slika 56: | Temperaturno polje PIII..... | 71 |
| Slika 57: | Temperaturno polje PIV..... | 71 |
| Slika 58: | Kontrolna mesta – T križarjenje..... | 71 |
| Slika 59: | Kontrolna mesta – T križarjenje..... | 71 |
| Slika 60: | Polistiren - PI..... | 72 |
| Slika 61: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII..... | 72 |
| Slika 62: | Aerogelna izolacija - PIII | 72 |
| Slika 63: | Potek kritične temperature – PI..... | 73 |
| Slika 64: | Potek kritične temperature – PII | 73 |
| Slika 65: | Potek kritične temperature – PIII | 73 |
| Slika 66: | Temperaturno polje PI..... | 73 |
| Slika 67: | Temperaturno polje PII | 73 |
| Slika 68: | Temperaturno polje PIII..... | 73 |
| Slika 69: | Polistiren – PI..... | 73 |
| Slika 70: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII..... | 73 |
| Slika 71: | Aerogelna izolacija - PIII | 73 |
| Slika 72: | Potek kritične temperature – PI..... | 74 |
| Slika 73: | Potek kritične temperature – PII | 74 |
| Slika 74: | Potek kritične temperature – PIII | 74 |
| Slika 75: | Temperaturno polje PI..... | 74 |
| Slika 76: | Temperaturno polje PII | 74 |
| Slika 77: | Temperaturno polje PIII..... | 74 |

| | | |
|------------|---|----|
| Slika 78: | Polistiren – PI | 75 |
| Slika 79: | Aerogelna izolacija – PII | 75 |
| Slika 80: | Potek kritične temperature – PI | 76 |
| Slika 81: | Potek kritične temperature – PII | 76 |
| Slika 82: | Temperaturno polje PI | 76 |
| Slika 83: | Temperaturno polje PII | 76 |
| Slika 84: | Polistiren - PI | 76 |
| Slika 85: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII | 76 |
| Slika 86: | T Aerogelna izolacija - PIII | 76 |
| Slika 87: | Potek kritične temperature – PI | 77 |
| Slika 88: | Potek kritične temperature – PII | 77 |
| Slika 89: | Potek kritične temperature – PIII | 77 |
| Slika 90: | Temperaturno polje PI | 77 |
| Slika 91: | Temperaturno polje PII | 77 |
| Slika 92: | Temperaturno polje PIII | 77 |
| Slika 93: | Polistiren – PI | 78 |
| Slika 94: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PII | 78 |
| Slika 95: | Aerogelna izolacija – PIII | 78 |
| Slika 96: | Aerogelna izolacija – PIV | 78 |
| Slika 97: | Aerogelna izolacija – PV | 78 |
| Slika 98: | Potek kritične temperature – PI | 79 |
| Slika 99: | Potek kritične temperature – PII | 79 |
| Slika 100: | Potek kritične temperature – PIII | 79 |
| Slika 101: | Potek kritične temperature – PIV | 79 |
| Slika 102: | Potek kritične temperature – PV | 79 |
| Slika 103: | Temperaturno polje PI | 80 |
| Slika 104: | Temperaturno polje PII | 80 |
| Slika 105: | Temperaturno polje PIII | 80 |
| Slika 106: | Temperaturno polje PIV | 80 |
| Slika 107: | Temperaturno polje PV | 80 |
| Slika 108: | Kontrolna mesta – križanje X | 80 |
| Slika 109: | Polistiren – PI | 81 |
| Slika 110: | Polistiren – PII | 81 |
| Slika 111: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII | 81 |
| Slika 112: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIV | 81 |
| Slika 113: | Aerogelna izolacija – PV | 81 |
| Slika 114: | Potek kritične temperature – PI | 82 |
| Slika 115: | Potek kritične temperature – PII | 82 |
| Slika 116: | Potek kritične temperature – PIII | 82 |
| Slika 117: | Potek kritične temperature – PIV | 82 |

| | | |
|------------|--|----|
| Slika 118: | Potek kritične temperature – PV | 83 |
| Slika 119: | Temperaturno polje PI..... | 83 |
| Slika 120: | Temperaturno polje PII | 83 |
| Slika 121: | Temperaturno polje PIII..... | 83 |
| Slika 122: | Temperaturno polje PIV..... | 83 |
| Slika 123: | Temperaturno polje PV | 83 |
| Slika 124: | Polistiren – PI..... | 84 |
| Slika 125: | Aerogelna izolacija PII..... | 84 |
| Slika 126: | Potek kritične temperature – PI..... | 85 |
| Slika 127: | Potek kritične temperature – PII | 85 |
| Slika 128: | Temperaturno polje PI..... | 85 |
| Slika 129: | Temperaturno polje PII | 85 |
| Slika 130: | Gostota toplotnega toka PI..... | 85 |
| Slika 131: | Gostota toplotnega toka PII..... | 85 |
| Slika 132: | Polistiren – PI..... | 86 |
| Slika 133: | Polistiren – PII..... | 86 |
| Slika 134: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII..... | 86 |
| Slika 135: | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIV..... | 86 |
| Slika 136: | Aerogelna izolacija – PV | 86 |
| Slika 137: | Potek kritične temperature – PI..... | 87 |
| Slika 138: | Potek kritične temperature – PII | 87 |
| Slika 139: | Potek kritične temperature – PIII | 87 |
| Slika 140: | Potek kritične temperature – PIV | 87 |
| Slika 141: | Potek kritične temperature – PIV | 88 |
| Slika 142: | Temperaturno polje PI..... | 88 |
| Slika 143: | Temperaturno polje PI..... | 88 |
| Slika 144: | Temperaturno polje PIII..... | 88 |
| Slika 145: | Temperaturno polje PIV..... | 88 |
| Slika 146: | Temperaturno polje PV | 88 |
| Slika 147: | Oblikovna zasnova vzorca | 90 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Tehnične karakteristike aerogelne izolacije Spaceloft..... | 7 |
| Preglednica 2: Prikaz izračuna koeficienta difuzijskega upora vodne pare..... | 8 |
| Preglednica 3: Tehnične karakteristike toplotno izolacijskih materialov | 9 |
| Preglednica 4: Termična difuzivnost toplotno izolacijskih materialov | 10 |
| Preglednica 5: Sestave analiziranih konstrukcijskih sklopov zunanjih sten..... | 21 |
| Preglednica 6: Vhodni klimatski podatki za analizo konstrukcijskih sklopov | 26 |
| Preglednica 7: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – opečna zunanja stena | 31 |
| Preglednica 8: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov opečne zunanje stene | 34 |
| Preglednica 9: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – opečna zunanja stena..... | 36 |
| Preglednica 10: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala | 39 |
| Preglednica 11: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč | 40 |
| Preglednica 12: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov z nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih plošč | 43 |
| Preglednica 13: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč | 44 |
| Preglednica 14: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala | 47 |
| Preglednica 15: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – armiranobetonska zunanja stena..... | 48 |
| Preglednica 16: Primerjava rezultov analize konstrukcijskih sklopov armiranobetonske zunanje stene..... | 51 |
| Preglednica 17: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – armiranobetonska zunanja stena | 52 |
| Preglednica 18: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala | 54 |
| Preglednica 19: Primerjava lastnosti izbranih optimalnih sklopov..... | 55 |
| Preglednica 20: Vhodni podatki za analizo toplotnega ugodja..... | 56 |
| Preglednica 21: Rezultati analize toplotnega udobja | 57 |
| Preglednica 22: Temperatura v kontrolnih točkah – kontrolni model A | 60 |
| Preglednica 23: Materiali uporabljeni v kontrolnem modelu B..... | 61 |
| Preglednica 24: Robni pogoji – kontrolni model B | 61 |
| Preglednica 25: Temperatura v kontrolnih točka – kontrolni model B..... | 61 |
| Preglednica 26: Število analiziranih variant križanj konstrukcijskih sklopov | 62 |
| Preglednica 27: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]..... | 63 |
| Preglednica 28: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]..... | 66 |

| | |
|---|-----|
| Preglednica 29: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 70 |
| Preglednica 30: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 72 |
| Preglednica 31: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 74 |
| Preglednica 32: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 75 |
| Preglednica 33: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 77 |
| Preglednica 34: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 78 |
| Preglednica 35: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 82 |
| Preglednica 36: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 84 |
| Preglednica 37: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 87 |
| Preglednica 38: Izhodiščne dimenzije objekta | 91 |
| Preglednica 39: Vhodni podatki za izračun toplotnih izgub | 93 |
| Preglednica 40: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z opečno zunanjo steno | 94 |
| Preglednica 41: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z opečno zunanjo steno | 96 |
| Preglednica 42: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z zunanjo steno iz križno lepljenih lesenih plošč | 97 |
| Preglednica 43: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z zunanjo steno iz križno lepljenih lesenih plošč | 99 |
| Preglednica 44: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z armiranobetonsko zunanjo steno | 100 |
| Preglednica 45: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z armiranobetonsko zunanjo steno | 102 |
| Preglednica 46: Vhodni podatki – opečna zunanja stena | 104 |
| Preglednica 47: Strošek 1 m ² potrebne izolacije | 104 |
| Preglednica 48: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – opečna zunanja stena | 105 |
| Preglednica 49: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – opečna zunanja stena | 106 |
| Preglednica 50: Začetni podatki – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč | 107 |
| Preglednica 51: Strošek 1 m ² potrebne izolacije | 107 |
| Preglednica 52: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč | 108 |
| Preglednica 53: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč | 109 |
| Preglednica 54: Začetni podatki – armiranobetonska zunanja stena | 110 |
| Preglednica 55: Izračun stroškov 1m ² potrebne izolacije | 110 |
| Preglednica 56: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – armiranobetonska zunanja stena | 112 |
| Preglednica 57: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – armiranobetonska zunanja stena | 113 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|---|----|
| Grafikon 1: Toplotna prehodnost v odvisnosti od debeline | 2 |
| Grafikon 2: Primerjava tehničnih karakteristik toplotno izolacijskih materialov | 9 |
| Grafikon 3: Primerjava variant z aerogelno izolacijo | 33 |
| Grafikon 4: Primerjava variant s polistirenom | 33 |
| Grafikon 5: Primerjava variant s kameno volno | 33 |
| Grafikon 6: Primerjava variant z enako debelino aerogelne mase | 34 |
| Grafikon 7: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena | 35 |
| Grafikon 8: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne | 36 |
| Grafikon 9: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije | 38 |
| Grafikon 10: Toplotna izolacija v plašču a | 38 |
| Grafikon 11: Toplotna izolacija v plašču b | 38 |
| Grafikon 12: Toplotna izolacija v plašču c | 39 |
| Grafikon 13: Primerjava variant z izolacijo na osnovi aerogela | 42 |
| Grafikon 14: Primerjava variant s polistirenom | 42 |
| Grafikon 15: Primerjava variant s kameno volno | 42 |
| Grafikon 16: Primerjava variant z enako debelino aerogelne mase | 43 |
| Grafikon 17: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena | 44 |
| Grafikon 18: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne | 44 |
| Grafikon 19: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije | 46 |
| Grafikon 20: Toplotna izolacija v plašču a | 46 |
| Grafikon 21: Toplotna izolacija v plašču b | 46 |
| Grafikon 22: Toplotna izolacija v plašču c | 47 |
| Grafikon 23: Primerjava variant z aerogelno izolacijo | 50 |
| Grafikon 24: Primerjava variant s polistirenom | 50 |
| Grafikon 25: Primerjava variant s kameno volno | 50 |
| Grafikon 26: Primerjava variant z enako debelino aerogelne izolacije | 51 |
| Grafikon 27: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena | 52 |
| Grafikon 28: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne | 52 |
| Grafikon 29: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije | 53 |
| Grafikon 30: Toplotna izolacija v plašču a | 53 |
| Grafikon 31: Toplotna izolacija v plašču b | 53 |
| Grafikon 32: Toplotna izolacija v plašču c | 54 |
| Grafikon 33: Toplotne izgube v stolpnici | 95 |
| Grafikon 34: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici | 95 |
| Grafikon 35: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR) | 95 |
| Grafikon 36: Toplotne izgube v bloku | 95 |
| Grafikon 37: Sprememba toplotnih izgub v bloku | 95 |

| | |
|--|-----|
| Grafikon 38: Prihranek energije v bloku (izražen v EUR) | 95 |
| Grafikon 39: Toplotne izgube v stolpnici | 98 |
| Grafikon 40: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici | 98 |
| Grafikon 41: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR) | 98 |
| Grafikon 42: Toplotne izgube v bloku | 98 |
| Grafikon 43: Sprememba toplotnih izgub v bloku | 98 |
| Grafikon 44: Prihranek energije v bloku (izražen v EUR) | 98 |
| Grafikon 45: Toplotne izgube v stolpnici | 101 |
| Grafikon 46: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici | 101 |
| Grafikon 47: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR) | 101 |
| Grafikon 48: Toplotne izgube v stolpnici | 101 |
| Grafikon 49: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici | 101 |
| Grafikon 50: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR) | 101 |
| Grafikon 51: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etaž v stolpnici | 105 |
| Grafikon 52: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – opečna zunanja stena | 106 |
| Grafikon 53: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etaž stolpnice – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč | 108 |
| Grafikon 54: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč | 109 |
| Grafikon 55: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etaž stolpnice – armiranobetonska zunanja stena | 111 |
| Grafikon 56: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – armiranobetonska zunanja stena | 112 |

KAZALO PRILOG

Priloga A: Rezultati analize konstrukcijskih sklopov

- 1. Opečna zunanja stena**
- 2. Zunanja stena iz lesenih križno lepljenih plošč**
- 3. Armiranobetonska zunanja stena**

0 UVOD – SPLOŠNO O ENERGETSKI UČINKOVITOSTI

V sodobnem času se spoprijemamo z vse večjo potrošnjo energije na vseh področjih, kot so na primer industrija, transport in stavbni sektor. Evropska komisija vlaga veliko sredstev v raziskave potrošnje energije, segmentacijo le-te ter raziskave in razvoj novih trajnostnih energijskih virov, ki bi zmanjšali negativni vpliv na okolje s strani proizvodnje energije. Eno glavnih vprašanj tega trajnostnega razvoja v širšem pomenu besede pa je, kako doseči neodvisnost ekonomskega in socialnega razvoja od propadanja okolja ter izrabe obstoječih in novih energetskih virov.

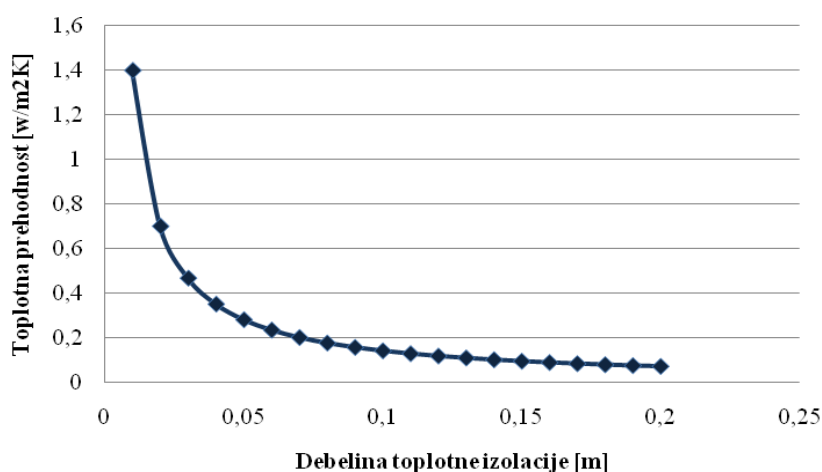
Alternativni in enakovredni ukrep učinkovitemu izkoriščanju energetskih virov predstavlja zmanjšanje same potrebe po energiji. V šestem odstavku direktive o energetski učinkovitosti stavb lahko preberemo podatek, da stanovanjski in terciarni sektor, katerih največji del predstavljajo stavbe, obsegata več kot 40 % končne porabe energije v Evropski skupnosti. Za doseganje svojega cilja omenjena direktiva navaja različne zahteve in ukrepe. Izpostavil bi le najpomembnejšega za raziskovanje v okviru tega diplomskega dela, to je uporaba minimalnih zahtev glede energijske učinkovitosti novih in obstoječih stavb. Nadalje, energetsko učinkovitost stavb lahko zagotavljamo na več načinov z:

- arhitekturnim načrtovanjem morfologije objekta, kar obsega predvsem obliko stavbe ter njeno kompaktnost, orientacijo, velikost odprtih oziroma transparentnih predelov stavbnega ovoja;
- izbiro ustreznih učinkovitejših materialov, ki opravljajo med drugimi tudi funkcijo toplotne izolacije;
- ustreznimi sistemi za regulacijo ogrevanja, hlajenja, prezračevanja oziroma zagotavljanje kvalitete zraka v prostorih.

Najpomembnejše vprašanje pri tem pa je, kako to storiti, da ne poslabšamo kvalitete bivalnih razmer v stavbi.

Kadar obravnavamo energetske učinkovitost v holističnem smislu, moramo obravnavati še en vidik, to je, koliko energije potrošimo za samo proizvodnjo materialov, ki opravljajo funkcijo toplotne zaščite. To energijo imenujemo tudi primarna energija.

Problem, ki ga obravnavam v diplomskem delu, je pretežno povezan z drugim od navedenih načinov izpolnjevanja minimalnih zahtev glede porabe energije v stavbah. Toplotna izolacija je nepogrešljivi sestavni element stavbnega ovoja, da pa bi kar se da optimalno opravljala svojo funkcijo, mora biti ustrezno dimenzionirana ter tudi pravilno vgrajena. Standardna napaka pri nestrokovnem določanju debeline toplotne izolacije je mišljenje, da več kot je izolacije, boljše je. Že enostavni grafikon (Grafikon 1), ki prikazuje odnos med toplotno prehodnostjo in debelino homogenega sloja toplotne izolacije, nam razkrije, da zveza med tema dvema količinama ni linearna. Za vsako enakomerno povečanje debeline toplotne izolacije pomanjšanje toplotne prehodnosti ni enako. Za obstojnost toplotne izolacije pa je prav tako pomembno, kako in kam je vgrajena.

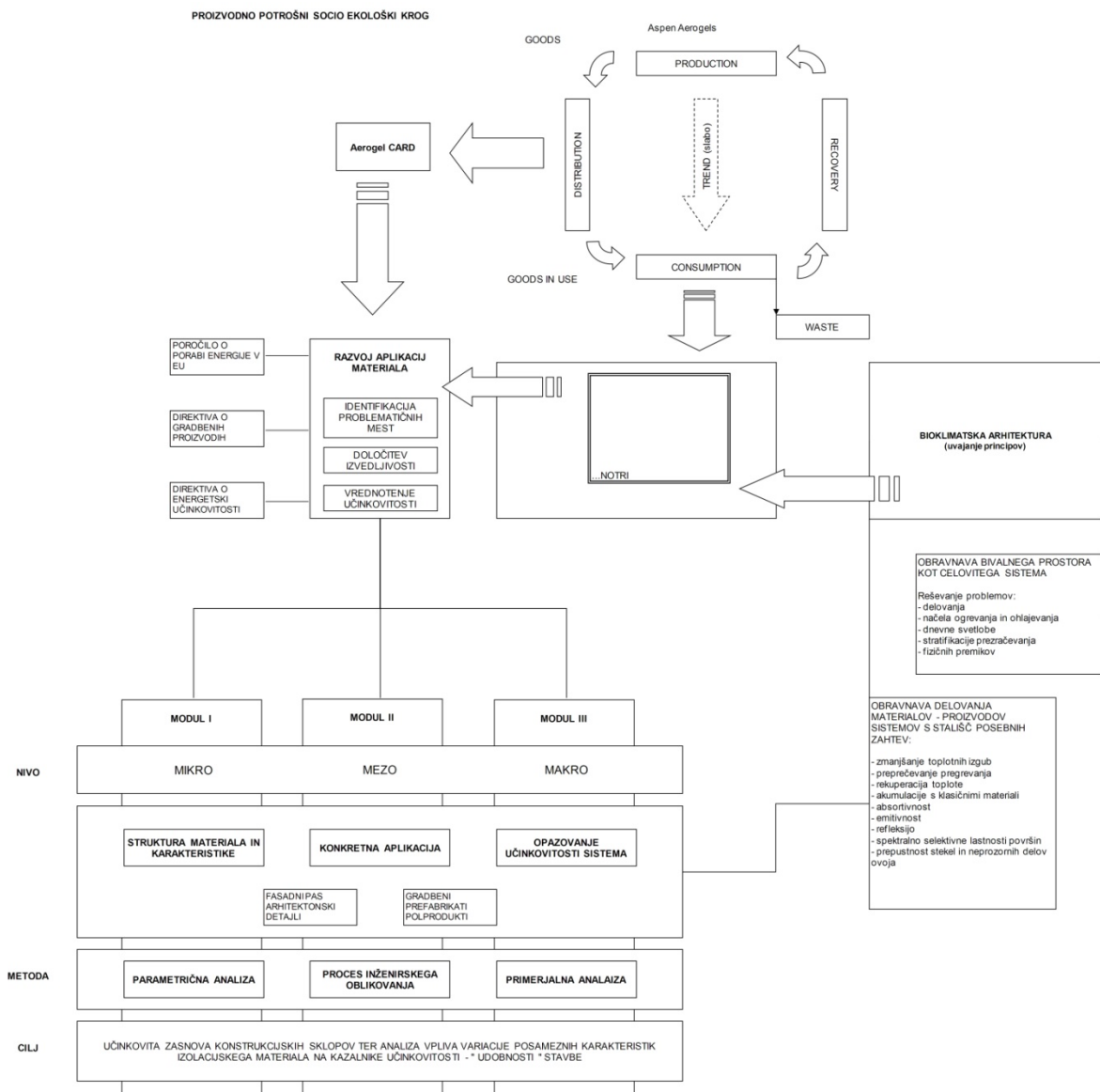


Grafikon 1: Toplotna prehodnost v odvisnosti od debeline

Uvajanje novega nanotehnološkega izolacijskega materiala v gradbene aplikacije, med katere spadajo tako prefabricirani elementi kot in-situ izvedeni arhitektonski detajli, lahko razumemo tudi kot distribucijo materiala v gradbeni sektor, vendar ne v zgolj posredniškem smislu, ampak v smislu iskanja rešitev ter kritične presoje le-teh s ciljem zadostitve zahtev končnega uporabnika stavbe po udobnem počutju. Sestavni del tega razvoja je obravnava delovanja materialov ter določitev njihovega vpliva na delovanje stavbnega ovoja.

Glavni namen diplomske naloge je prikazati primernost uvedbe novega nanotehnološkega izolacijskega materiala v konstrukcijskih sklopih zunanjih sten s ciljem določiti metodologijo dela, kriterije ter postopke izračuna vrednosti parametrov za opis vplivov na delovanje ovoja in stavbe, oziroma vrednotenje uvedbe materiala v obravnavane konstrukcijske sklope. Hkrati bo ta postopek dela mogoče uporabiti tudi pri nadaljnjem razvoju aplikacij v gradbenem sektorju.

Nalogo sem tako razdelil v tri module, razdelitev je prikazana na shemi (Slika 1).



Slika 1: Shema razčlenitve dela

Prvi modul diplomske naloge sestavljajo:

- predstavitev večnamenskega izolacijskega materiala,
- funkcionalna analiza materiala,
- analiza tehničnih karakteristik,
- primerjava v nadaljnji analizi potrebnih tehničnih karakteristik s karakteristikami še dveh drugih toplotno izolacijskih materialov.

Drugi modul je sestavljen iz enodimenzionalne in dvodimenzionalne analize toplotnega odziva konstrukcijskih sklopov. Prva obravnava predvsem parametre, ki so vezani na konstrukcijski sklop (masa, toplotna prehodnost, kondenzacija vodne pare, temperaturni zamik, temperaturno dušenje, temperatura notranje površine), druga pa vpliv morfologije križanja konstrukcijskih sklopov na razpored temperaturnega polja ter v nekaterih primerih tudi gostote toplotnih tokov.

V zadnjem, tretjem modulu, sta obravnavana parametra, ki opišeta vpliv uvedbe aerogelne izolacije na odziv stavbe. To sta prihranek pri porabi energije za ogrevanje pri enaki debelini aerogelne izolacije ter prihranek tlorisne površine pri uporabi enakovredne debeline aerogelne izolacije, kot je potrebna v primeru uporabe polistirena ali kamene volne, da izpolnimo zahteve pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah. Delo sem izvedel po določenih naslednjih slovenskih in mednarodnih standardov ter slovenskih pravilnikov:

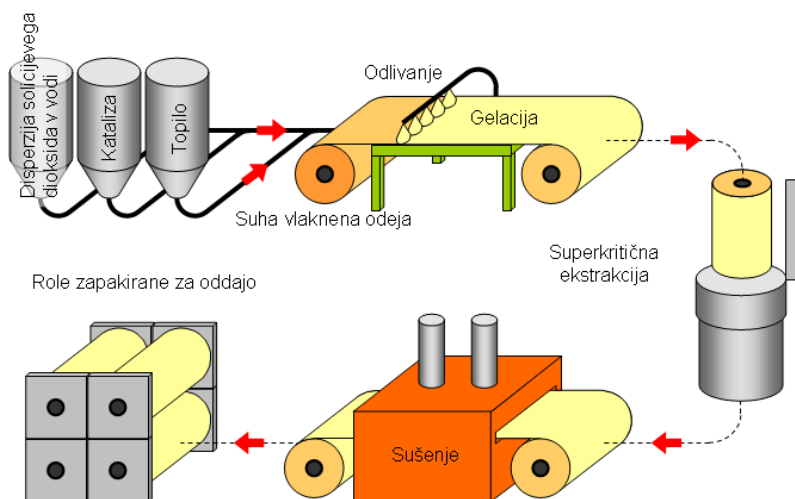
- Pravilnik o toplotni zaščiti in učinkoviti rabi energije v stavbah,
- Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah,
- SIST 1025:2002,
- SIST EN ISO 13790:2008,
- SIST EN ISO 6946:2008,
- SIST EN ISO 10211:2008,
- SIST EN ISO 12572:2002,
- SIST EN ISO 13788:2002,
- SIST EN ISO 13789:2008,
- ISO 7730:1993,
- JUS U. J5. 600.

1 MODUL 1

Primarni cilj prvega modula je osvojiti vedenje o tehničnih karakteristikah aerogelne izolacije, predvsem tistih, ki vplivajo na toplotni odziv stavbnega ovoja (gostota, specifična toplota ter toplotna prevodnost). S pomočjo primerjalne analize teh karakteristik treh različnih izolacijskih materialov želim napraviti prvo oceno, ali je nova aerogelna izolacija primerna za uvedbo v konstrukcijske sklope. Poglavje obravnava tudi teme, kot sta opis proizvodnje izolacije ter funkcionalna analiza le-te.

1.1 Opis proizvoda

Produkti ameriškega proizvajalca Aspen Aerogels predstavljajo novo družino visoko zmogljivih nanotehnoloških izolacij, ki jih je možno uporabiti v mnogih industrijskih sektorjih, med drugim tudi v gradbeništvu. Vsi proizvodi so sestavljeni iz nosilnega dela, ki ga tvori polimerna iglana vlaknovina ter silikatni aerogel, ki daje odeji izjemne izolacijske lastnosti.



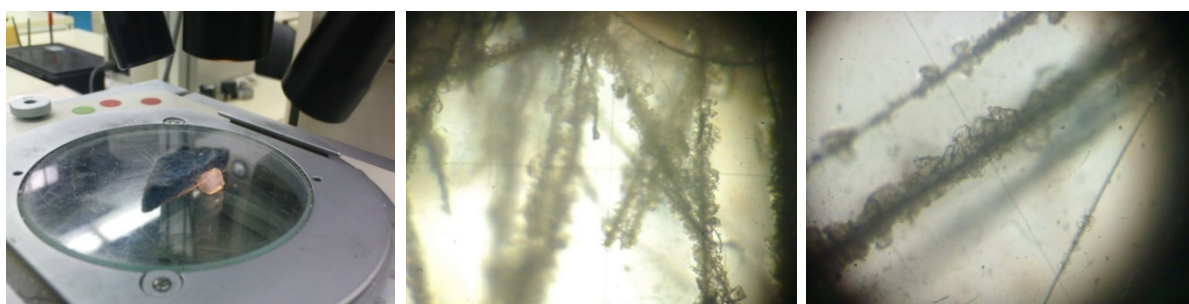
Postopek proizvodnje aerogelne odeje (http://www.aerogel.si/1_nastanek.htm)

Z aerogelom v splošnem pojmuemo material, ki nastaja neposredno iz tekočega gela v procesu, ki nadomesti tekočo fazo z zrakom. Postopek ustvarjanja raztopine, imenovane sol, iz katere nastane poltrdna sestavina, imenovana gel, imenujemo sol-gel postopek. Polimerizacija molekul tvori v raztopini razpršene delce nano velikosti, kateri se pod vplivom

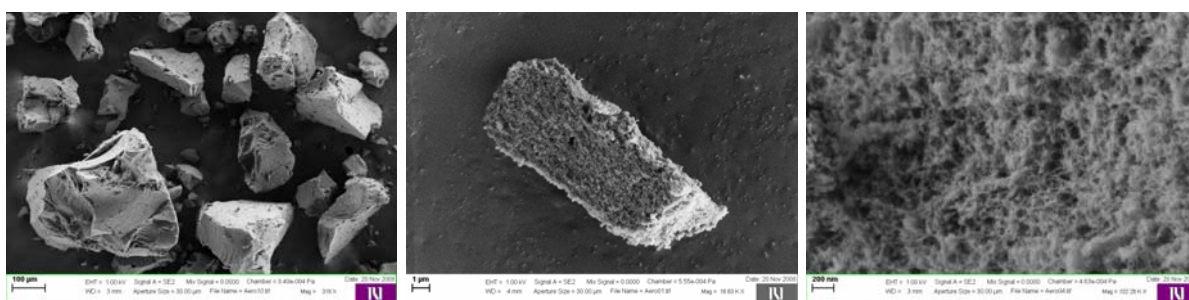
katalizatorjev začnejo s procesom meddelčne kondenzacije povezovati v verige, ki ustvarijo mrežo med seboj povezanih nano por. V fazi gela je doseženo poltrdno stanje, v katerem se tekočina ne more več svobodno širiti po njegovi strukturi. Tekočo fazo se nato odstrani s procesom super kritičnega sušenja. Celotni proces nastanka aerogela je integriran v samo proizvodnjo izolacijske odeje, kjer najprej impregnirajo iglano vlaknovino z opisanim gelom, nato šele, ko je ta popolnoma prepojena, sprožijo postopek odstranitve tekoče faze. Proizvodni proces je shematsko prikazan na prejšnji strani.

Iz povedanega lahko zaključimo, da beseda aerogel predstavlja bolj strukturo oziroma morfološko opredelitev materiala kakor njegovo kemijsko sestavo in bi ga lahko opisali kot amorfno odprto nano celično peno. Beseda nano se nanaša na velikost zračnih por v aerogelu, njihova velikost pa se giblje med 1 nm ter 100 nm, v povprečju 10 nm.

Makroskopsko gledano je celotni izolacijski produkt kompozit, mešanica med odprto celičnim ter vlaknastim izolacijskim materialom, kar pri njegovi klasifikaciji povzroča mnogo preglavic, saj še ni splošnega konsenza, po katerih standardih naj bi ga obravnavali. Na spodnjih slikah (Slika 2 in 3) je prikazana struktura kompozita pri različnih povečavah ter struktura samega aerogela.

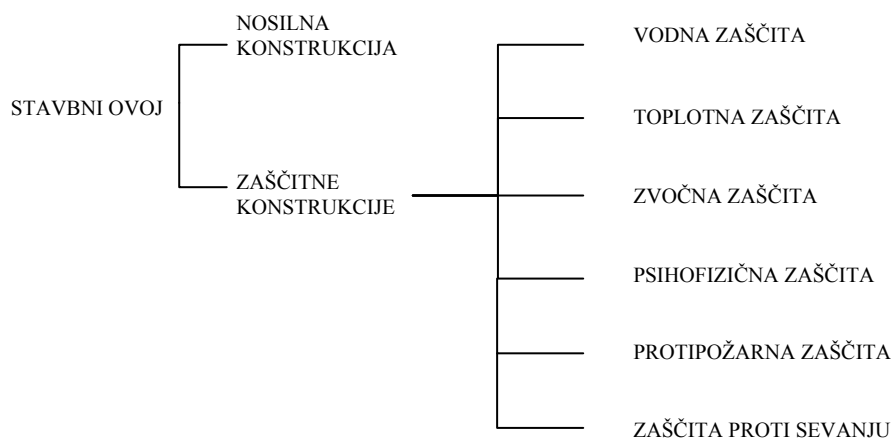


Slika 2: Optično mikroskopiranje v razvojnem oddelku BSH (100 x povečava)



Slika 3: Elektronsko mikroskopiranje na KI (levo 316 x povečava; sredina 16630 x povečava; desno: 102260 x povečava)

1.2 Funkcionalna analiza materiala



Struktura funkcionalnih plasti (povzeto po Krainer, A., 2002)

V splošnem lahko nanotehnološke izolacijske odeje proizvajalca Aspen Aerogels ob pravilni aplikaciji opravljajo večino funkcij zaščite, prikazanih na zgornjem dendrogramu, vendar prevladujejo toplotna, požarna in zvočna zaščitna funkcija. Konkretno za Spaceloft, v gradbenem sektorju najbolj uporabljen tip izolacije, pri uvedbi v konstrukcijske sklope klasično obravnavamo le toplotno in zvočno zaščitno funkcijo, za kar so zahtevane ustrezne vrednosti tehničnih karakteristik, prikazanih v Tabeli 1.

1.3 Tehnične karakteristike

Uporaba tega tipa izolacije je predvidena v vseh konstrukcijskih sklopih, to je strešnih, zunanje stenskih, talnih, medetažnih konstrukcijskih sklopih ter notranjih predelitvah.

Preglednica 1: Tehnične karakteristike aerogelne izolacije Spaceloft

| | Vrednost | Enota |
|--------------------------------|----------|------------------------|
| Debelina | 0,01 | m |
| Gostota | 150 | kg/m ³ |
| Toplotna prevodnost | 0,014 | W/m.K |
| Specifična toplotna kapaciteta | 1046 | J/kg.K |
| Prehod vodne pare | 4,51 | ng/Pa.s.m ² |
| Požarna klasifikacija | C | - |
| Tlačna trdnost | 70 | kPa |
| Dinamična togost | 23,7 | MN/m ³ |

V nadaljevanju diplomskega dela sem se osredotočil le na funkcijo, povezano s prenosom toplote, to je toplotno zaščitno funkcijo, kateri tudi proizvajalec pripisuje primarni pomen. Zato so v nadaljevanju obravnavane samo štiri bistvene karakteristike, povezane s prenosom toplote in prehodom vodne pare. To so gostota, toplotna prevodnost, specifična toplotna kapaciteta in koeficient difuzijske upornosti vodni pari, ki ga dobimo iz prehoda vodne pare, kot je prikazano v točki 1.3.1.

1.3.1 Določitev koeficienta difuzijske upornosti vodni pari po standardu SIST EN ISO 12572:2002 – Higrotermalno obnašanje gradbenih materialov in proizvodov

Koeficient difuzijske upornosti vodni pari sem določil po standardu SIST EN ISO 12572:2002 s pomočjo podatka o prehodu vodne pare, ki ga je predložil proizvajalec. Iz tega standarda dobimo naslednje definicije in enačbe:

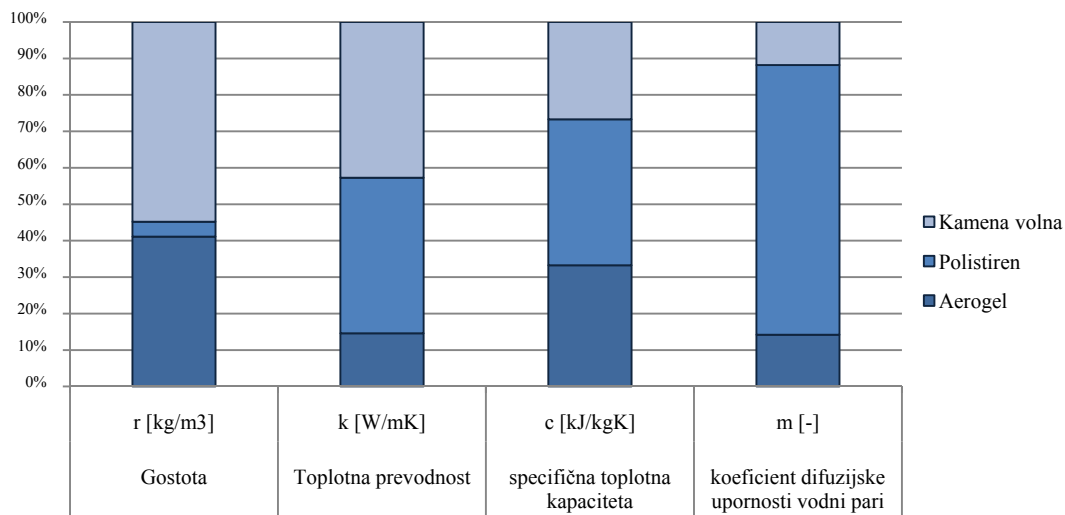
$$\mu = \delta_a / \delta \quad (1)$$

$$\delta_a = 0,083 \cdot p_0 / (R_v \cdot T \cdot p) \sqrt[1,81]{(T/273)} \quad (2)$$

Preglednica 2: Prikaz izračuna koeficienta difuzijskega upora vodne pare

| | | | |
|---|----------|--------------|-------------|
| Standardni barometrični tlak | p0 | [hPa] | 1013,25 |
| Tlak | p | [hPa] | 1013,25 |
| Prehod vodne pare | W | [kg/Pa.s.m2] | 4,51E-09 |
| Debelina | D | [m] | 0,009 |
| Plinska konstanta vodne pare | Rv | [N.m/kg.K] | 462 |
| Temperatura | T | [K] | 296 |
| Paroprepustnost materiala | d | [kg/m.s.Pa] | 4,059E-11 |
| Paroprepustnost zraka | da | [kg/m.s.Pa] | 1,95E-10 |
| Koeficient difuzijskega upora vodne pare | μ | - | 4,80 |

1.4 Primerjava tehničnih karakteristik



Grafikon 2: Primerjava tehničnih karakteristik toplotno izolacijskih materialov

Preglednica 3: Tehnične karakteristike toplotno izolacijskih materialov

| | | Aerogel | Polistiren | Kamena volna |
|---|-----------------------------|---------|------------|--------------|
| Gostota | ρ [kg/m ³] | 150 | 15 | 200 |
| Toplotna prevodnost | k [W/mK] | 0,014 | 0,041 | 0,041 |
| specifična toplotna kapaciteta | c [kJ/kgK] | 1,046 | 1,26 | 0,84 |
| koeficient difuzijske upornosti vodni pari | μ [-] | 4,8 | 25 | 4 |

1.5 Komentar

Aerogelna izolacija ima 10x večjo gostoto kakor polistiren ter za eno četrtno manjšo od kamene volne. Toplotna prevodnost aerogelne izolacije je skoraj 3-krat manjša od ostalih dveh materialov, specifična toplota pa je skoraj na sredini.

Oprelitev vpliva zgoraj navedenih lastnosti na toplotni odziv konstrukcijskih sklopov je natančneje predstavljena v drugem modulu. Tu pa naj le navedem količino, imenovano termična difuzivnost, ki predstavlja lastnost materiala in pomembno vpliva na toplotno

stabilnost sklopov. Definirana je z razmerjem med toplotno prevodnostjo in produktom gostote in specifične toplote, kar lahko dobimo s poenostavitvijo enačbe (3). Njene vrednosti so podane v tabeli 4. Aerogelna izolacija ima na račun zelo majhne toplotne prevodnosti in razmeroma visoke gostote najmanjšo termično difuzivnost, kar vpliva ugodno, saj to pomeni, da je časovni gradient temperature najmanjši.

Preglednica 4: Termična difuzivnost toplotno izolacijskih materialov

| | Aerogel | Polistiren | Kamena volna |
|--|----------|------------|--------------|
| Termična difuzivnost [m ² /s] | 8,9 E-08 | 217 E-08 | 24,4 E-08 |

Koeficient difuzijske upornosti vodni pari nam pove, da je aerogelna izolacija difuzijsko odprta zanemarljivo manj kakor kamena volna ter nekoliko bolj kakor polistiren. To pomeni, da vodna para lažje prehaja oziroma da se kondenz lažje izsušuje skozi ti izolaciji v primeru ustreznih aplikacij. V nekaterih primerih, še posebej tistih, kjer je toplotna izolacija na notranji strani nosilne konstrukcije, pa je potrebno obvezno zaščititi s parno oviro ali zaporo. Zaradi majhnega difuzijskega upora notranjih vrhnih plasti prehaja skozi toplotno izolacijo velika količina vlage. Hkrati imamo v območju toplotne izolacije negativni temperaturni gradient, ki je lahko dovolj velik, da so delni parni tlaki višji od nasičenega. Posledica tega je nabiranje kondenza na notranji strani nosilne konstrukcije v hladni sezoni, ki pa se zaradi relativno visokega difuzijskega upora vseh ostalih plasti proti zunanosti težje izsušuje.

2 MODUL 2

V drugem modulu sem se, kot je prikazano že v uvodu, posvetil uvedbi izolacijskega materiala Spaceloft v stavbni ovoj ter analizi odziva le-tega na omenjeni ukrep. Naloga obsega določitev:

- teoretičnih izhodišč analize,
- parametrov za eno in dvodimenzionalno analizo,
- metod izračuna parametrov,
- eno- in dvodimenzionalnega računskega modela,
- analizo rezultatov.

Teoretično ozadje sem raziskal z namenom, da si ustvarim dobro osnovno za razumevanje termodinamičnih pojavov v stavbnem ovoju. Hkrati je značilnost programskega okolja ABAQUS ta, da je potrebno obravnavani problem modelirati v celoti, saj ni pred-nastavljenih modulov za toplotno analizo konstrukcijskih sklopov, kjer bi lahko podal le osnovno sestavo. Ta pristop predstavlja tudi uvod v princip modeliranja zahtevnejših termodinamičnih ter drugih problemov, ki jih je mogoče reševati s pomočjo omenjenega orodja.

2.1 Prenos toplote

2.1.1 Splošno

Prenos toplote poimenujemo pojav transporta ene od oblik energije z enega medija na drug medij kot posledico temperaturne razlike. V 19. stoletju so znanstveniki opredelili toploto in delo kot obliki energije oziroma kot procesa izmenjave energije med dvema sistemoma ali sistemom in njegovim okoljem; takšen primer je tudi sistem konstrukcijskega sklopa, ki deli stavbni ovoj, skozi katerega poteka izmenjava toplote med notranjim in zunanjim okoljem. Fizikalna zakona, ki vodita in nadzorujeta procesa dela in prenosa toplote, sta poznana kot 1. in 2. zakon termodinamike. Prvi govori o ohranjanju energije, kar pomeni, da energije ne moremo ne ustvariti ne uničiti, spremenimo lahko le njeno obliko. To dejstvo velja neposredno tudi za spremembo dela v toploto in obratno. Drugi zakon termodinamike pa nam pove, da prehod toplote s hladnega telesa na vroče telo sam po sebi ni mogoč. Za opis in ovrednotenje tega procesa izmenjave energije pa poleg omenjenih dveh zakonov potrebujemo

še dodatno vejo fizike, ki se imenuje prenos toplote. Razlog se skriva v dejstvu, da se klasična veda termodinamike ukvarja predvsem z ravnotežnimi stanji (prvi zakon termodinamike), pri prenosu toplote pa gre že za definiciji stanja izven območja ravnotežja.

2.1.2 Načini prenosa toplote

Poznamo tri osnovne načine prenosa toplote: kondukcijo, radiacijo ter konvekcijo.

2.1.2.1 *Kondukcija*

Kondukcija se pojavlja v stacionarnem mediju (medij v katerem ni oziroma so zanemarljivi kovekcijski tokovi). Najpogosteje jo v inženirskih problemih obravnavamo kot pojav prenosa toplote v trdnem mediju, medtem ko jo mnogokrat zanemarimo v kapljevinah in plinih. Kondukcija se prav tako razlikuje po samem mehanizmu prenosa toplote glede na agregatno stanje medija, v katerem proces poteka. V trdnem mediju se pojavi prenos toplote na račun vibracij mreže atomov in potovanja prostih elektronov. V plinastem mediju se z zvišanjem temperature poveča povprečna hitrost molekul ter s tem njihova kinetična energija. Molekule s področja z višjo kinetično energijo zaidejo v področje molekul z nižjo kinetično energijo, kjer med seboj trčijo, pri čemer se prenese del energije. Mehanizem v kapljevinah je soroden slednjemu, le nekoliko bolj kompleksen.

Splošno kondukcijsko enačbo (3) tu navajam le z namenom boljše ponazoritve predpostavk, ki jih je potrebno sprejeti za v nadaljevanju prikazano analizo odziva stavbnega ovoja na temperaturno obtežbo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q'_g = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

2.1.2.2 *Radiacija*

Radiacija je fenomen prenosa toplote med telesi z elektromagnetnim valovanjem v območju valovnih dolžin $10^{-7} < \lambda < 10^{-4}$ m in je zato neodvisna od vrste medija, se pravi, da poteka tudi v vakuumu. Nazorni primer predstavlja ogrevanje zemlje s sončno energijo. V splošnem se v

vseh telesih, ki imajo temperaturo nad absolutno ničlo ($-273,15^{\circ}\text{C}$), pojavljajo molekularne in atomske vibracije, katerih posledica je emitiranje dela energije kot toplotne radiacije.

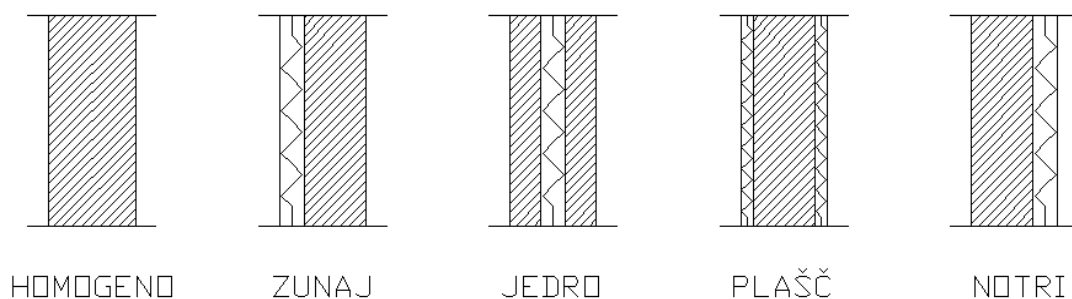
2.1.2.3 Konvekcija

Konvekcija je kompleksen pojav s katerim opisujemo premik mase neke tekočine in ni povezana z gibanjem molekul znotraj tekočine. Pri obravnavi konstrukcijskih sklopov upoštevamo prosto ali naravno konvekcijo, ki je posledica temperaturnih razlik oziroma posledica vzgona pri različnih gostotah medija. Med segrevanjem zraka ob topli vertikalni površini se spreminja poleg njegove temperature tudi njegova gostota, posledično hladni težji zrak izpodrine segretega, tako pride do prenosa toplote z enega dela površine na drugega.

2.1.3 Glavne oblike toplotne zaščite in njen položaj glede na nosilno konstrukcijo

Transmisijske energijske izgube skozi stavbni ovoj v hladnem obdobju ter toplotno pregrevanje notranji prostorov v toplen obdobju lahko zmanjšamo s tremi načini toplotne zaščite. Prvi način predstavlja zaščita s toplotnim uporom, katerega določata debelina posameznih slojev ter njihova toplotna prevodnost. S tem načinom predvsem omejujemo pojav kondukcije oziroma omejujemo toplotni tok, ki potuje skozi ovoj. Drugi način je zaščita z refleksijo, kjer igra glavno vlogo material na notranji in zunanji površini oziroma lastnosti njegove površine. Karakteristiki, ki opisujeta refleksijo, sta absorptivnost in emisivnost. Ta način predvsem prerečuje absorbiranje radiacijske energije na površini, zaradi katere bi se površina dodatno segrela, od tam pa bi se v notranjost konstrukcijskega sklopa toplota prevajala s kondukcijo v kolikor bi bili vsi sloji v tesnem kontaktu. To predvsem pomaga ščititi stavbo pred pregrevanjem v vročem obdobju. V hladnem pa bi bile zaradi absorbirane sončne energije toplotne izgube nekoliko manjše, saj bi bila temperaturna razlika med notranjo in zunanjo površino manjša. Tretji način, to je akumulacija toplote, pa je za razliko od prvih dveh, ki sta bolj stacionarne narave, izrazito dinamične narave. Za opis akumulativnosti potrebujemo poleg toplotne prevodnosti, debeline slojev, absorptivnosti in emisivnosti še gostoto ter specifično toplotno kapaciteto. Pri akumulaciji toplote gre za tako imenovani "flywheel" učinek oziroma učinek toplotne vztrajnosti, ki jo nudi konstrukcijski sklop. V osnovi gre za to, da se izkoristi čas, ki ga potrebuje toplotni tok, da preide s toplejše zunanje na hladnejšo notranjo stran konstrukcije (poleti) ter da se v hladejšem obdobju zaradi akumulirane toplote v konstrukciji ogrevani prostor počaseneje ohlaja.

Na spodnji sliki so prikazane možne pozicije toplotne zaščite glede na nosilno konstrukcijo.



Pozicije toplotne izolacije glede na nosilno konstrukcijo (Sistem, Modul 1, Konstrukcijski sklopi1, A. Krainer)

2.2 Difuzija vodne pare

Difuzija vodne pare je pojav, ki lahko močno vpliva na kvaliteto ter obstojnost materialov v konstrukcijskih sklopih, saj ob pravih pogojih, ko delni parni tlak preseže nasičeni parni tlak, ta v sklopu kondenzira. Kondenz v navlaženih materialih se ob napačni zasnovi sklopa ne izsušuje, kar posledično pomeni znižanje vrednosti toplotnega upora, možnost rasti mahov, plesni in gliv ter s tem propadanje samega materiala. Natančna napoved prehoda vodne pare skozi konstrukcijo je skoraj nemogoča, saj je podvržena nehomogenostim v vgrajenih materialih, netesnosti stikovanja, stalnemu spreminjanju robnih pogojev, spremembam tehničnih karakteristik zaradi možnosti ter spreminjanja vsebnosti vlage, kapilarnemu srku ter prenosu znotraj materialov in izmenjavi latentne toplote (povzeto po SIST EN ISO 13788:2002. Higrotermalno obnašanje sestavnih delov stavb in elementov stavb: 4).

2.3 Računski model in stacionarna analiza

Konstrukcijski sklop je v splošnem večplasten kompleksen sistem, v katerem potekajo mnogi fizikalni procesi pri stalno časovno in krajevno spreminjajočih se robnih pogojih, kot so notranja in zunanja temperatura, vlažnost zraka znotraj in zunaj stavbe ter atmosferskega tlaka. Hkrati so tudi nekatere tehnične karakteristike odvisne od temperature, navlaženosti ter tlaka oziroma njihovega časovnega spreminjanja. Če želimo popisati osnovno obnašanje elementov stavbnega ovoja pri prenosu toplote, moramo za to sprejeti nekatere poenostavitve ter vpeljati ustrezen računski model.

Prva predpostavka, ki sem jo sprejel, je, da so vse tehnične karakteristike, vključno s toplotnimi, za vse materiale časovno in prostorsko neodvisne. To pomeni, da se toplotna prevodnost in specifična toplotna kapaciteta ne spreminjata s temperaturnim in tlačnim gradientom po debelini sloja. Predpostavimo tudi, da imamo opravka z izotropnim materialom, kar pa pomeni, da material prevaja oziroma shranjuje toploto v vseh smereh enako.

Bistveno poenostavitev problema predstavlja predpostavka o stacionarnem stanju. Stacionarno stanje pomeni, da so vse spremenljivke in vsi robni pogoji neodvisni od časa. Obtežba je trenutna, toplotni tok, ki prehaja skozi sklop, pa konstanten.

2.3.1 Računski model prenosa toplote s kondukcijo

Ob upoštevanju opisanih predpostavk se splošna kondukcijska enačba enačba (3) poenostavi v naslednjo t. i. Laplacevo obliko:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Makroskopsko gledano, prenos toplote s kondukcijo opišemo s Fourierjevim zakonom, ki ima pri obravnavi ene dimenzije naslednjo obliko:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

Ta je upoštevana v splošni kondukcijski enačbi za vse smeri in se v primeru stacionarne analize še dodatno poenostavi v

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Če obravnavamo homogeno plast materiala dx , predstavlja kar debelino tega sloja. Iz te oblike je razvidna povezava s toplotnim uporom plasti oz. njeno toplotno prehodnostjo. Tu prikazujem le osnovni enačbi, kako pa ti količini izračunamo za konkretni večplastni primer konstrukcijskega sklopa pa je prikazano v nadaljevanju.

$$R = \frac{d}{k} \quad (7)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (8)$$

2.3.2 Računski model prenosa toplote z radiacijo in konvekcijo

Na stiku zraka, se pravi plinastega medija, z mirujočo trdno steno se predpostavi, da ni relativnega premika, kar lahko poimenujemo tudi »no-slip condition« (Long, C., 1999. Essential heat transfer: 7). Ta predpostavka je zelo pomembna, saj zato lahko sklepamo, da toplota prestopi na plinasti medij s kondukcijo, čim pa se le malo oddaljimo od stika, to ne velja več in toploto odnese konvekcijski tok. Kot robni pogoj slednje izrazimo z izenačenjem toplotnih tokov na stiku plasti, kar prikažemo z naslednjo enačbo:

$$-k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{stik} = h(T_s - T_{ref}) \quad (9)$$

Nadalje se pri modeliranju prenosa toplote skozi konstrukcijski sklop predpostavi, da je kondukcija prevladujoči način znotraj tesno stikajočih se trdnih materialov, v robnih plasteh zraka pa se upošteva vpliv radiacije in konvekcije. To vrsto plasti obravnava teorija mejnih plasti, ki nam v makroskopskem merilu omogoči, da jo v primeru stacionarne analize obravnavo kot dodatni homogeni sloj materiala s konstantnimi lastnostmi.

V analizi zanemarimo vpliv direktnega kratkovalovnega sevanja sonca na zunanjo površino, rosenja, radiacije v nočno nebo ter vpliv sosednjih površin. Če bi na primer želel upoštevati vpliv direktnega sevanja sonca v stacionarni analizi, bi to simulirali z dvigom temperature zunanjega zraka.

V standardu SIST EN ISO 6946:2008 je zgoraj povedano opisano z upornostjo površine, za katero sem predpostavil, da je v vseh obravnavanih primerih konstrukcijskih sklopov ravna. Ta model na poenostavljen način upošteva vpliva radiacije in konvekcije in je določen s spodaj navedenim obrazcem, ki ga najdemo v prilogi A k omenjenemu standardu:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (10)$$

kjer so:

$$h_r = \varepsilon h_{ro} \quad (11) \quad h_{ro} = 4\sigma T_m^3 \quad (12) \quad \sigma = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} \quad (13)$$

2.3.3 Računski model toplotnega toka

V enostavnem primeru, ko obravnavamo toplotni tok le v eni smeri, lahko zapišemo, da je premo sorazmeren s površino z normalo v smeri toka ter gradientom temperature v smeri iste normale.

$$P = -kA \frac{dT}{dx} [W] \quad (14)$$

V nadaljevanju naloge uporabimo za opis odziva konstrukcijskih sklopov tudi njegovo gostoto, ki pa je definirana z naslednjim izrazom:

$$q = -k \frac{dT}{dx} [W/m^2] \quad (15)$$

2.3.4 Robni pogoji

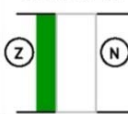

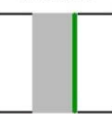



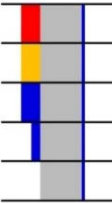




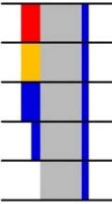




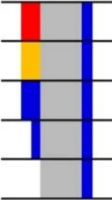



V knjigi Essential heat transfer (Long, C. 1999) so definirani robni pogoji prvega, drugega in tretjega reda, katerih matematična kompleksnost narašča z redom. Prvi red robnih pogojev definira robno temperaturo eksplicitno, npr. $T(x,t) = 100^\circ\text{C}$. Drugi red definira temperaturo implicitno, izraženo preko toplotnega toka, npr. $q(x,t) = 1\text{kW/m}^2$. Zadnji, tretji red, definira

temperaturni gradient na površini v obliki koeficienta prenosa toplote, površinsko temperaturo in pa temperaturo tekočine, na katero površina meji, kot je zapisano z enačbo (9) na prejšnji strani.

Pojem stacionarna analiza se nanaša tudi na robne pogoje, kar pomeni, da so količine, kot na primer notranja in zunanja temperatura, vlažnost zraka znotraj in zunaj stavbe ter atmosferski tlak, konstantne. V analizah sem uporabil prvi red robnih pogojev.

2.4 Zasnova osnovnega vzorca

Za namen analize odziva konstrukcijskih sklopov z uvedeno nanotehnološko toplotno izolacijo na temperaturno obremenitev sem si izoblikoval testni vzorec. Vzorec predstavlja matrika (Slika 4) znotraj katere po njenih koordinatah variramo tip oziroma material toplotne izolacije, njeno debelino ter položaj, kakor je prikazano.

| | ZUNANJA TI  | brez notranje TI  | AEROGEL  | POLISTIREN  | KAMENA VOLNA  |
|--|---|---|--|--|---|
| POLISTIREN KAMENA VOLNA AEROGEL - enaka debelina AEROGEL - ekv. debelina brez zunanje TI |  |  |  |  |  |
| POLISTIREN KAMENA VOLNA AEROGEL - enaka debelina AEROGEL - ekv. debelina brez zunanje TI |  |  |  |  |  |
| POLISTIREN KAMENA VOLNA AEROGEL - enaka debelina AEROGEL - ekv. debelina brez zunanje TI |  |  |  |  |  |

Slika 4: Shema osnovnega vzorca primerov

Za oceno primernosti uporabe novega tipa toplotne izolacije je potrebno imeti za enake situacije podatke o odzivu konstrukcijskih sklopov ob uporabi obstoječih standardnih toplotnoizolacijskih materialov. Zato sem izvedel izračune pri vsaki poziciji toplotne zaščite za tri materiale: aerogel, polistiren in kameno volno.

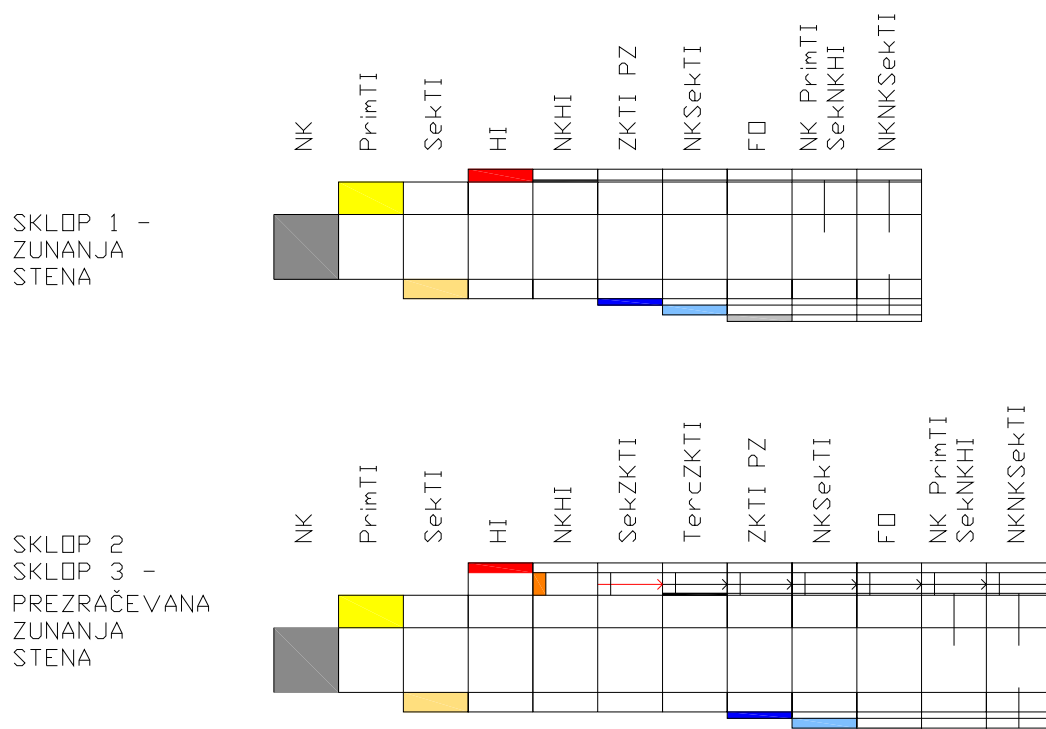
Debelino toplotne izolacije sem variral le v primeru aerogela, saj sem želel dobiti rezultat za enako debelino ter enakovredno debelino ostalih dveh izolacij (enakovredna debelina je tista pri kateri dosežemo enako toplotno prehodnost kakor v primeru uporabe polistirena ali kamene volne). Analiza tega ukrepa je bila izvedena za potrebe tretjega modula.

Položaj toplotne izolacije sem spreminjal postopoma, da bi ugotovil, kaj se dogaja z v nadaljevanju predstavljenimi parametri, ki sem jih izbral za opis odziva konstrukcijskega sklopa. Glavni cilj takega vzorca je bil zajeti čim širši spekter situacij, ki se pojavljajo v stavbah. Upošteval sem tri izmed petih pozicij, predstavljenih na strani 13, toplotne zaščite (Slika 6), in sicer notri, zunaj in plašč, medtem ko sem toplotno zaščito v jedru ter homogeno zaščito izpustil. Homogena toplotna zaščita bi predstavljala neracionalno porabo predvidenih materialov za nosilno konstrukcijo ter tlorisne površine zaradi predpisane minimalne toplotno izolacijske učinkovitosti stavbnega ovoja. Hkrati bi bila taka rešitev za obravnavane klimatske razmere ne optimalna, saj so tudi v najtoplejših predelih Slovenije v hladnem obdobju temperature prenizke oziroma je jakost sončnega sevanja premajhna, da bi se učinek z omenjenim sevanjem segrete mase bistveno poznal pri energijski bilanci objekta. Nosilne konstrukcije z izolacijo v jedru so manj razširjene in tudi zahtevajo ločeno obravnavo.

2.5 Izpeljava konstrukcijskih sklopov

Konstrukcijske sklope ekso-skeletnih zunanjih sten sem zasnoval po postopku inženirskega oblikovanja, kot ga obravnavamo pri predmetu Stavbarstvo II, ter s pomočjo funkcionalne analize uporabljenih materialov. Pri analizi sem, kot že opisano, spreminjal le položaj, material in debelino toplotne zaščite, vsi ostali elementi pa so konstantni skozi celotno nalogo. Parno zaporo sem zato namestil na zunanjo stran mavčne plošče, ki je tudi stična ravnina s toplotno izolacijo v primeru, da le to namestimo tudi na notranji strani primarne nosilne konstrukcije. Primeri, kjer imamo toplotno izolacijo samo na zunanji strani nosilne

konstrukcije in parno zaporo na njeni notranji strani, morda niso zelo pogosti, vendar sem z navedenim želel izključiti dodatno spremenljivko in s tem zagotoviti primerljivost med variantami konstrukcijskih sklopov. Zato bom prikazal le splošno izpeljavo za vsak tip konstrukcijskega sklopa zunanje stene.



Slika 5: Funkcionalna zasnova konstrukcijskih sklopov

En od ciljev diplomske naloge je poiskati oziroma izoblikovati metodologijo dela in pristop k reševanju problema uvedbe aerogelne izolacije v stavbni ovoj. Za prikaz postopka analize sem izbral konstrukcijske sklope zunanjih sten v primeru ekso skeletne nosilne konstrukcije. V nalogi ne obravnavam ostalih konstrukcijskih sklopov zaradi obvaldjivega obsega dela v okviru diplomske naloge. V splošnem je postopek dela podoben tudi za ostale konstrukcijske sklope. Enako velja za endo skeletne konstrukcije, ki jih potrebno tudi nekoliko drugače obravnavati.

2.6 Sestave analiziranih konstrukcijskih sklopov zunanjih sten

Preglednica 5: Sestave analiziranih konstrukcijskih sklopov zunanjih sten

| | Funkcija | Debelina [m] | Gostota [kg/m ³] | Specif. toplota [kJ/kgK] | Toplotna prevodnost [W/mK] | Difuzijska upornost vodni pari - |
|---|---------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|
| Sklop 1 | | | | | | |
| Lahka mavčna malta - izravnalni kit | FO | 0,003 | 1000 | 0,92 | 0,47 | 4 |
| Mavčna kartonska plošča do debeline 15 mm | NKSecTI, NKFO | 0,0125 | 900 | 0,84 | 0,21 | 12 |
| Alu parna zapora | ZKTI | 0,0001 | 2700 | 0,94 | 203 | 600000 |
| Aluminijasti profili točkovno pritrjeni na zid | NK NKSecTI | - | - | - | - | - |
| Polistirenske plošče | Sek TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Sek TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Sek TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Opečni zid - mrežasti opečni votlak | NK | 0,3 | 1200 | 0,92 | 0,52 | 4 |
| Polistirenske plošče | Prim TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Prim TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Prim TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Sidra | NKTI | - | - | - | - | - |
| Armirna mrežica | NK HI, ZK HI | - | - | - | - | - |
| Apneni omet (armirani) | HI | 0,02 | 1600 | 1,05 | 0,81 | 10 |
| Sklop 2 | | | | | | |
| Lahka mavčna malta | FO | 0,003 | 1000 | 0,92 | 0,47 | 4 |
| Mavčno kartonska plošča | NKSecTI, NKFO | 0,0125 | 900 | 0,84 | 0,21 | 12 |
| Alu parna zapora | ZKTI | 0,0001 | 2700 | 0,94 | 203 | 600000 |
| Polistirenske plošče | Sek TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Sek TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Sek TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Masivna križno lepljena stena iz smrečnega lesa | NK | 0,095 | 500 | 2,09 | 0,14 | 70 |
| Polistirenske plošče | Prim TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Prim TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Prim TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Sekundarna HI, veterna ovira | SekHI | 0,0003 | 660 | 2,09 | 0,14 | 100 |
| Sidra | NKPrimTI | - | - | - | - | - |
| Prezračevani sloj | ZKTI | - | - | - | - | - |
| Lesena podkonstrukcija - vertikalno | NKHI | - | - | - | - | - |
| Vijaki pritrjeni v leseno ploščo | NKHI | - | - | - | - | - |
| Lesene letve - horizontalno | HI | - | - | - | - | - |

| Sklop 3 | | | | | | |
|--|---------------|--------|------|-------|-------|--------|
| Lahka mavčna malta | FO | 0,003 | 1000 | 0,92 | 0,47 | 4 |
| Mavčna kartonska plošča do debeline 15 mm | NKSecTI, NKFO | 0,0125 | 900 | 0,84 | 0,21 | 12 |
| Alu parna zapora | ZKTI | 0,0001 | 2700 | 0,94 | 203 | 600000 |
| Aluminijasti profili točkovno pritrjeni na zid | NK NKSecTI | - | - | - | - | - |
| Polistirenske plošče | Sek TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Sek TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Sek TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Armiran beton | NK | 0,3 | 2500 | 0,96 | 2,33 | 90 |
| Polistirenske plošče | Prim TI | x | 15 | 1,26 | 0,041 | 25 |
| Steklena volna | Prim TI | x | 200 | 0,84 | 0,041 | 4 |
| Aerogel SL10 | Prim TI | x | 150 | 1,046 | 0,014 | 4,8 |
| Sekundarna HI, veterna ovira | Terc ZKTI | 0,0003 | 660 | 2,09 | 0,14 | 100 |
| Sidra | NKTI | - | - | - | - | - |
| Prezračevani sloj | Sek ZKTI | - | - | - | - | - |
| Podkonstrukcija iz HOP profilov | NKHI | - | - | - | - | - |
| Kamnite fasadne plošče | HI | - | - | - | - | - |

2.7 Analiza konstrukcijskih sklopov – 1D analiza

Cilj enodimenzionalne analize je ugotoviti, ali je uvedba aerogelne toplotne izolacije Spaceloft v konstrukcijske sklope upravičena z vidika tehničnih parametrov, določenih v nalogi, katerih vrednosti sem izračunal po postopkih, predstavljenih v nadaljevanju.

2.7.1 Določitev parametrov in računskih metod

Za opis odziva konstrukcijskih sklopov na razmere v notranjem in zunanem okolju ter njihovo medsebojno primerjavo sem izbral naslednje parametre:

- masa konstrukcijskega sklopa,
- toplotna prehodnost,
- pojav kondenzacije,
- temperaturni zamik,
- temperaturno dušenje,
- temperaturo notranje površine.

2.7.1.1 Masa konstrukcijskega sklopa

Masa konstrukcijskega sklopa je v primeru stacionarne analize pomembna za klasifikacijo konstrukcijskih sklopov med lahke ali težke. Za lahke konstrukcijske sklope priloga 1 k Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah opredeli tiste, ki imajo maso manjšo od 150 kg/m^2 , pravilnik pa določa strožji pogoj toplotne prehodnosti kot za ostale elemente. Razlog za to se skriva v dejstvu, da lahke konstrukcije niso zmožne akumulirati toplote v taki meri kakor masivne in tudi ne ščititi notranjega okolja pred pregrevanjem v poletnem času. V primeru prezračevanih konstrukcijskih sklopov upoštevam sloje do tistega, ki je prezračevan, saj so razmere predvidoma take kot zunaj. Vpliv direktnega sončnega sevanja zanemarimo. Izračunamo jo na m^2 konstrukcijskega sklopa po obrazcu:

$$m = \sum \rho_i d_i \quad [\text{kg/m}^2] \quad (16)$$

2.7.1.2 Toplotna prehodnost skozi konstrukcijo

Računska metoda za izračun toplotne upornosti in toplotne prehodnosti za potrebe obravnave gradbenih komponent je definirana v standardu SIST EN ISO 6946:2008. Kako izračunamo toplotno upornost posamezne homogene plasti, sem že navedel (str. 16) tu pa navajam le še obrazec za račun celotne toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa, sestavljenega iz homogenih plasti. Omenjeni obrazec najdemo pod točko 6.1 obravnavanega standarda.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (17)$$

Metodo za izračun toplotne upornosti notranje površine R_{si} ter toplotne upornosti zunanje površine R_{se} sem prikazal v poglavju z opisom računskega modela. V preglednici z naslovom Površinske upornosti so navedene vrednosti R_{si} in R_{se} , ki jih upošteva uporabljeni računalniški program TEDI za analizirane konstrukcijske sklope. Čeprav se smer toplotnega toka v stenah in strehah razlikuje, v prvem primeru je horizontalen v drugem pa je usmerjen navzgor, standard dovoljuje, da privzamemo enake vrednosti R_{si} in R_{se} za oba položaja konstrukcijskega sklopa, kar je (pred)nastavljeno tudi v omenjenem programu. Razlika v standardnih vrednostih nastopi le v primeru tal na terenu, kjer predpostavimo, da je stik med

zunanjo površino tal na terenu in zemljino tesen ter moker. Zato tam površinske upornosti ne upoštevamo.

Površinske upornosti — (povzeto po SIST EN ISO 6946:2008)

| | Konstrukcijski sklopi | | |
|-----------------|-----------------------|-------|---------------|
| | Streha | Stena | Tla na terenu |
| R _{si} | 0,13 | 0,13 | 0,17 |
| R _{se} | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Enačba za račun toplotne prehodnosti je definirana v točki 7 istega standarda kot enačba za toplotni upor in se glasi:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n R_{si} + R_k + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (18)$$

Za potrebe diplome sem zanemaril vpliv nepopolnosti izdelave in nisem korigiral vrednosti toplotne prehodnosti, kot je definirano v prilogi D standarda SIST EN ISO 6946:2008. Omenjena priloga definira korekcije toplotne prehodnosti na račun zračnih reg, kot posledice slabega stikovanja elementov toplotne izolacije, prebojev toplotne izolacije zaradi pritrdilnih sredstev ter izpostavljenosti toplotne izolacije direktni vlagi v primeru obrnjene strehe. Slednjih ne obravnavam zato zadnje od naštetih korekcij ne upoštevam. Prvi izmed naštetih scenarijev napak pri izvedbi zajema rege, ki potekajo skozi celotno toplotno izolacijo. Tako tudi to korekcijo lahko zanemarim, saj pri izvedbi, različne sloje med seboj zamaknemo. Korekcija povezano s pritrdilnimi sredstvi pa je potrebno upoštevati kadar je toplotna prevodnost pritrdilnih sredstev večja od 1 W/mK. Za potrebe diplome predpostavim, da je ta manjša od podane vrednosti, saj bi v nasprotnem primeru opraviti numerično analizo točkovnih toplotnih mostov, kar pa presega okvir te naloge.

Predpisana toplotna prehodnost (povzeto po Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah – priloga 1)

| | Toplotna prehodnost [W/m ² K] | | |
|--|--|-------|------|
| | Streha | Stena | Tla |
| Konstrukcije pod 150 kg/m ² | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Ostale konstrukcije | 0,20 | 0,28 | 0,30 |

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah podaja tudi minimalne sprejemljive vrednosti. Za konstrukcijske sklope, ki jih obravnavam v diplomski, podaja vrednosti, navedene v zgornji tabeli.

Debelino toplotne izolacije sem dimenzioniral tako, da sem uporabil prvo debelino, ki izpolni pogoj toplotne prehodnosti ter je sestavljiva iz elementarnih debelin izolacijskih produktov. Debelino sem določal na 1 cm natančno. Predpostavil sem tudi, da dimenzioniram konstrukcijske sklope za stanovanjski objekt.

2.7.1.3 Pojav kondenzacije

Metoda za izračunavanje gostote difuzijskega toka vodne pare skozi gradbene konstrukcije, izračun količine kondenzata in sušenja gradbene konstrukcije pri uporabi stavbe, ki jo podaja standard SIST 1025:2002, je poenostavljena metoda izračuna. Glavna poenostavitev od splošnejših metod je ta, da delni parni tlaki padajo skozi konstrukcijo linearno. Enako velja za nasičene vrednosti parnih tlakov, saj so le ti odvisni od temperature, račun katere pa je prav tako lineariziran, saj imamo opravka s stacionarno analizo. Bolj natančno analizo prenosa vlage bi lahko izvedli z numeričnim modelom izračuna, ki ga podaja standard SIST EN 15026:2007.

Navajam le postopek izračuna brez enačb (SIST 1025:2002), saj te niso bistvene za diplomsko delo, bralec pa jih lahko poišče v omenjenem standardu.

- a) Izračun temperature na meji dveh slojev gradbene konstrukcije in na površinah, ki mejijo na zrak;

- b) doličitev tlaka nasičenja vodne pare na notranji in zunanji površini ter na poljubnem stiku dveh slojev;
- c) izračun relativnih uporov difuziji vodne pare;
- d) izračun gostote difuzijskega toka vodne pare;
- e) izračun količine kondenzata;
- f) izračun gostote difuzijskega toka vodne pare, ki izpareva iz gradbene konstrukcije;
- g) izračun časa, potrebnega za izsušitev gradbene konstrukcije.

Metoda ima nato vgrajeni dve kontroli, ki povesta ali je analizirana sestava konstrukcijskega sklopa primerna ali ne. Prva kontrola spremlja ali se nabrani kondenz izsuši v predpisanem času difuzijskega navlaževanja, ki je definiran v Pravilniku o toplotni zaščiti stavb in učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 42/2002) in ima vrednost 60 dni za neklimatizirane stavbe, ki je trenutno še veljaven. Druga kontrola primernosti sestave konstrukcijskega sklopa pa spremlja ali je prekoračena dovoljena meja navlaženosti v sloju materiala, kjer kondenz nastaja.

Za zgoraj prikazani postopek izračuna je potrebno definirati naslednje robne pogoje:

Preglednica 6: Vhodni klimatski podatki za analizo konstrukcijskih sklopov

| | |
|--|----------|
| Notranja temperatura zraka T_n | 20 [°C] |
| Zunanja temperatura zraka T_z | -10 [°C] |
| Relativna vlažnost notri | 65 [%] |
| Relativna vlažnost zunaj | 90 [%] |

Vrednosti v preglednici 6 odgovarjajo tretji klimatski coni. V primerjalni analizi rezultatov so upoštevani primeri z rešenim problemom kondenzacije. V kolikor ne bi uvedel parne zapore v konstrukcijske sklope, bi še posebej v primerih z notranjo toplotno izolacijo prekoračili mejo navlaževanja materialov kot posledično tudi mejo časa izsušitve kondenza.

2.7.1.4 Temperaturni zamik

Temperaturni zamik predstavlja čas, ki preteče od trenutka, ko zunanja temperatura doseže maksimum, pa do časa, ko doseže maksimum notranja temperatura. Za večslojni zid ga izračunamo po obrazcu (19).

$$\eta = \frac{1}{15} \left[\frac{180}{\pi\sqrt{2}} D - \arctg \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_i + U_i\sqrt{2}} \right) + \arctg \left(\frac{U_e}{U_e + \alpha_e\sqrt{2}} \right) \right] \quad (19)$$

Priporočene vrednosti, ki naj bi jih konstrukcijski sklop izpolnil, podaja sedaj neveljavni standard JUS U.J5.600, kjer zasledimo, da je najstrožja vrednost temperaturne zakasnitve za zunanje zidove 8^h. Navedena vrednost velja sicer za zidove, ki so orientirani proti jugu in jugozahodu, za potrebe diplome pa bom ta pogoj posplošil, saj obravnavam konstrukcijske sklope v splošnem.

Stare jugoslovanske standarde sem uporabil zato, ker današnji predpisi in pravilniki ne podajajo zahtev glede temperaturnega zamika. Enako velja za temperaturno dušenje, ki je obravnavano v naslednji toči 2.7.1.5.

2.7.1.5 Temperaturno dušenje

Temperaturno dušenje je definirano kot količnik med amplitudo spreminjajoče se temperature zunanjega zraka in amplitudo temperature na notranji površini zidu. Za večplastni zid ga izračunamo z enačbo (20):

$$v = 0,9 \exp \left(\frac{D}{\sqrt{2}} \right) \left(1 + \frac{S_1}{\alpha_e} \right) \prod_{m=1}^n \frac{S_m + U_{m+1}}{S_m + U_m} \quad (20)$$

Enako kakor za temperaturno zakasnitev podaja za temperaturno dušenje priporočene vrednosti standard JUS U.J5.600. Za kriterij privzamem vrednost $v > 15$.

2.7.1.6 Temperatura notranje površine

Temperatura notranje površine konstrukcijskega sklopa mora biti višja od kritične temperature površine, da preprečimo možnost kondenzacije ob njej. Postopki, kako izračunati kritično temperaturo, so definirani v mednarodnem standardu SIST EN ISO 13788:2002. Za potrebe diplome sem izbral postopek B.2, definiran v prilogi B omenjenega standarda. Ta postopek predvideva konstantno relativno vlažnost notranjega zraka, kar sovpada z mojim izborom stacionarne analize. Končni rezultat je neodvisen od tipa konstrukcijskega sklopa in zato za vse elemente enak, izračun pa sem izvedel s programskim orodjem Microsoft Excel. Kot robne pogoje je potrebno definirati notranjo in zunanjo temperaturo zraka in relativno vlažnost notranjega zraka, ki jih najdemo v preglednici 6 v točki 2.7.1.3 te diplomske naloge.

Tlak nasičenja vodne pare izračunamo pri $T > 0^{\circ}\text{C}$ po naslednjem obrazcu:

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{17,269T}{237,3+T}} = 610,5 e^{\frac{17,269 \cdot 20}{237,3+20}} = 2336,95 \text{ Pa} \quad (21)$$

Nadalje določimo notranji parcialni tlak vodne pare iz enačbe (22), pri tem pa predhodno povečamo relativno vlažnost zraka za 0,05 oziroma 5 %:

$$p_i = \varphi_i p_{sat,i} = (0,65 + 0,05) 2336,95 = 1635,9 \text{ Pa} \quad (22)$$

Določiti moramo še parcialni tlak na notranji površini, ki pa ga določimo z upoštevanjem maksimalne dovoljene vlažnosti notranje površine, ki je 80 %.

$$p_s(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8} = \frac{1635,9}{0,8} = 2044,9 \text{ Pa} \quad (23)$$

Minimalni sprejemljivo temperaturo notranje površine izračunam s pomočjo naslednje enačbe:

$$T_{i,min} = \frac{237,3 \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \log_e\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)} = \frac{237,3 \log_e\left(\frac{2044,9}{610,5}\right)}{17,269 - \log_e\left(\frac{2044,9}{610,5}\right)} = 17,86 = 17,9^{\circ}\text{C} \quad (24)$$

2.7.2 Programsko orodje TEDI

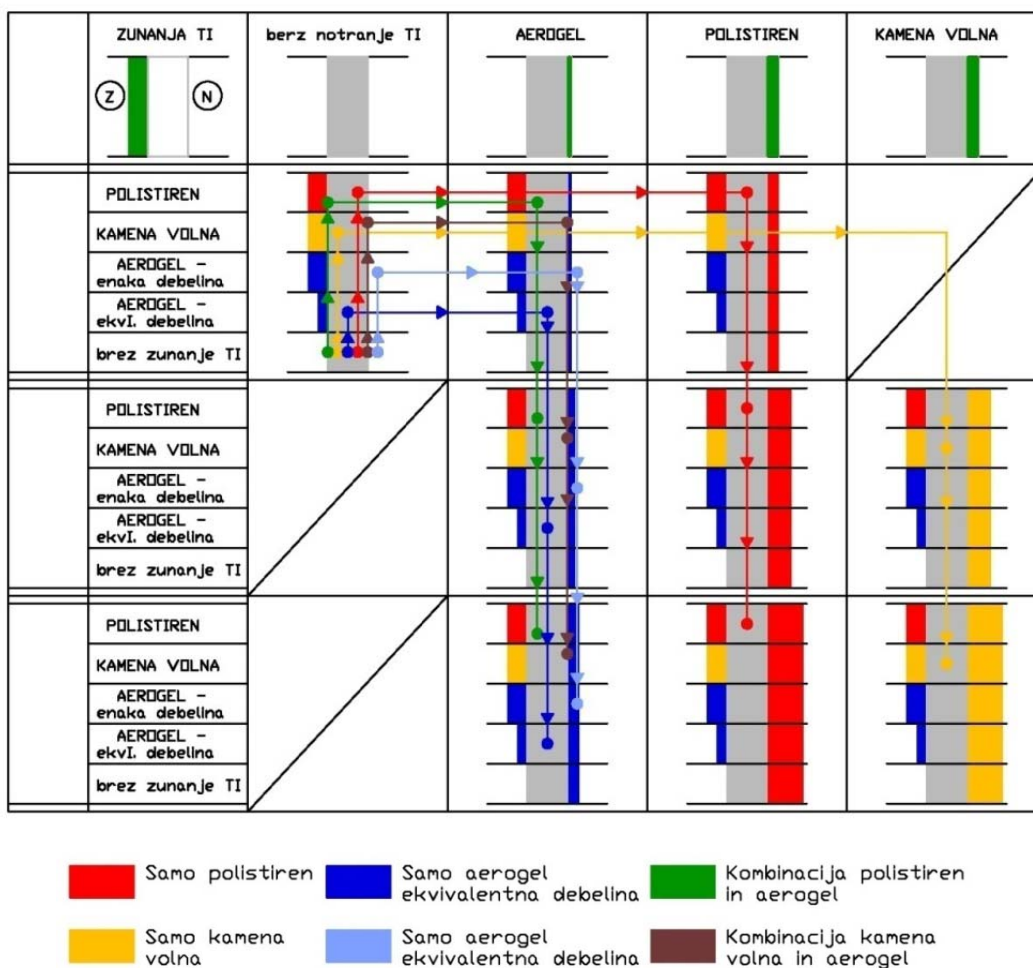
Programsko orodje TEDI je bilo razvito na katedri za stavbe in konstrukcijske elemente za namen raziskave in analizo odziva konstrukcijskih sklopov na stacionarno toplotno bremenitev. S pomočjo tega orodja sem izračunal vrednosti štirih od šestih parametrov. To so: toplotna prehodnost, pojav kondenzacije, temperaturni zamik in temperaturno dušenje.

2.7.3 Rezultati in komentar

| | ZUNANJA TI | berz notranje TI | AEROGEL | POLISTIREN | KAMENA VOLNA |
|--|--------------------------|----------------------|-------------|----------------|------------------|
| | | | | | |
| | POLISTIREN | 0_A | 1a_A | 2a_A | / |
| | KAMENA VOLNA | 0_B | 1a_B | 2a_B | |
| | AEROGEL – enaka debelina | 0_C | 1a_C | 2a_C | |
| | AEROGEL – ekvI. debelina | 0_D | 1a_D | 2a_D | |
| | brez zunanje TI | 0_E | 1a_E | 2a_E | |
| | POLISTIREN | / | 1b_A | 2b_A | 3b_A |
| | KAMENA VOLNA | | 1b_B | 2b_B | 3b_B |
| | AEROGEL – enaka debelina | | 1b_C | 2b_C | 3b_C |
| | AEROGEL – ekvI. debelina | | 1b_D | 2b_D | 3b_D |
| | brez zunanje TI | | 1b_E | 2b_E | 3b_E |
| | POLISTIREN | / | 1c_A | 2c_A | 3c_A |
| | KAMENA VOLNA | | 1c_B | 2c_B | 3c_B |
| | AEROGEL – enaka debelina | | 1c_C | 2c_C | 3c_C |
| | AEROGEL – ekvI. debelina | | 1c_D | 2c_D | 3c_D |
| | brez zunanje TI | | 1c_E | 2c_E | 3c_E |

Slika 6: Shema vzorca s poimenovanjem primerov

Vsi obravnavani konstrukcijski sklopi so izpeljani korektno v skladu s pravilnikom o učinkoviti rabi energije v stavbah. Vrednosti vseh izračunanih parametrov so prikazane v tabelah in spremljajočih grafih pod poglavjem priloge. Zaradi obširnosti vzorca sem v namen lažje primerjalne analize izbral spodaj prikazane (Slika 7) poteke ukrepov oziroma primerov, katere sem primerjal med seboj. Potek je enak za vse tri variante konstrukcijskih sklopov z različno nosilno konstrukcijo.



Slika 7: Načrt primerjave rezultatov enodimenzionalne analize

2.7.3.1 Opečna zunanja stena

Preglednice 7,11,15 so organizirane po vzoru sestavljene matrike primerov pozicije ter kombinacije toplotno izolacijskih materialov. Debelina sekundarne toplotne izolacije se nanaša na njeno debelino na notranji strani nosilne konstrukcije, med tem ko debelina primarne toplotne izoalcije na njeno debelino an zunanji strani nosilne konstrukcije, kot prikazano pri izpeljavi sklopov v točki 2.5. V matriki po rzadeljeni primeri glede na material (označeno z 0,1,2,3) ter debelino sekundarne toplotne izolacije (označeno z malimi črkami a,b,c). materialih oz Dodatno je za vsak primer navedene tudi debelina celotnega konstrukcijskega sklopa.

Iz preglednice 8 je razvidno, da je toplotno neizolirani konstrukcijski sklop z oznako 0_E popolnoma nesprejemljiv, saj poleg previsoke toplotne prehodnosti, izračun prehoda vodne pare pokaže, da konedenz nastaja na notranji površini.

Primerjava mase konstrukcijskih sklopov pokaže, da so tisti izolirani z ekvivalentno debelino aerogelne izolacije (primeri D) je težji le za 1 % od izoliranega s polistirenom, kljub desetkrat večji gostoti, ter 4 % lažji od izoliranega s kameno volno. V primerjavi deležev teža nosilne konstrukcije prevlada.

Preglednica 7: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – opečna zunanja stena

| | Debelina Sek. TI = 0m | | Aerogel | | Polistiren | | Kamena volna | |
|----------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,01m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | |
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | 0,46 | 0,12 | 0,45 | 0,10 | 0,47 | 0,10 | - | - |
| B | 0,46 | 0,12 | 0,45 | 0,10 | 0,47 | 0,10 | - | - |
| C | 0,46 | 0,12 | 0,45 | 0,10 | 0,47 | 0,10 | - | - |
| D | 0,38 | 0,04 | 0,38 | 0,03 | 0,40 | 0,03 | - | - |
| E | 0,34 | 0,00 | 0,35 | 0,00 | 0,37 | 0,00 | - | - |

| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,02m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | - | - | 0,42 | 0,06 | 0,46 | 0,06 | 0,46 | 0,06 |
| B | - | - | 0,42 | 0,06 | 0,46 | 0,06 | 0,46 | 0,06 |
| C | - | - | 0,42 | 0,06 | 0,46 | 0,06 | 0,46 | 0,06 |
| D | - | - | 0,38 | 0,02 | 0,42 | 0,02 | 0,42 | 0,02 |
| E | - | - | 0,36 | 0,00 | 0,40 | 0,00 | 0,40 | 0,00 |

| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | |
|----------|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | - | - | 0,41 | 0,04 | 0,47 | 0,04 | 0,47 | 0,04 |
| B | - | - | 0,41 | 0,04 | 0,47 | 0,04 | 0,47 | 0,04 |
| C | - | - | 0,41 | 0,04 | 0,47 | 0,04 | 0,47 | 0,04 |
| D | - | - | 0,38 | 0,01 | 0,44 | 0,01 | 0,44 | 0,01 |
| E | - | - | 0,37 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | 0,43 | 0,00 |

Primerjavo sem zasnoval tako, da v osnovi primerjam ekvivalentno debelino izolacije, iz česar izhaja dejstvo, da je toplotna prehodnost v večini primerov konstantna, kar velja tudi za temperaturo notranje površine. Hkrati velja, da je neodvisna od pozicije toplotne izolacije. V

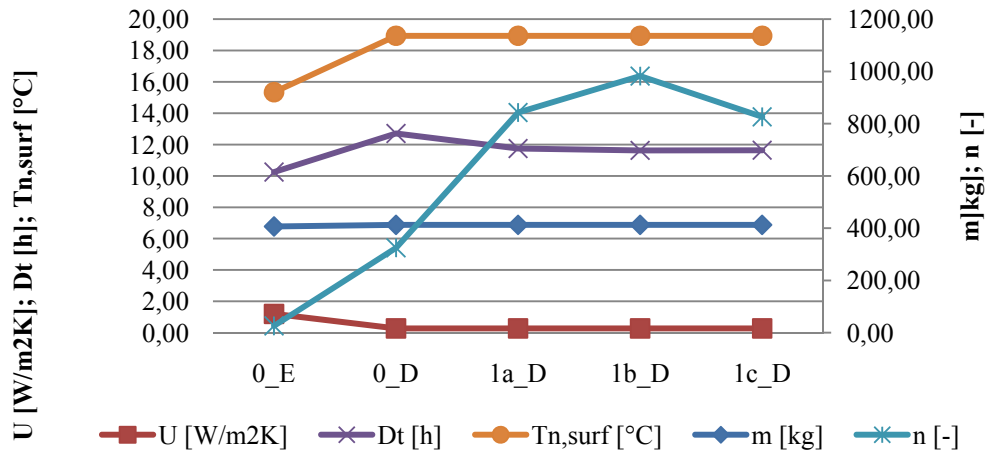
primerih 2c_A in 3c_B se pojavi manjše odstopanje, saj sem za najmanjšo debelino polistirena in kamene volne na zunanji strani nosilne konstrukcije izbral 4cm.

Vrednosti v preglednicah z rezultati analize, ki ne ustrezajo predpisom oziroma izbranim kriterijem, so ozančene z rdečo barvo.

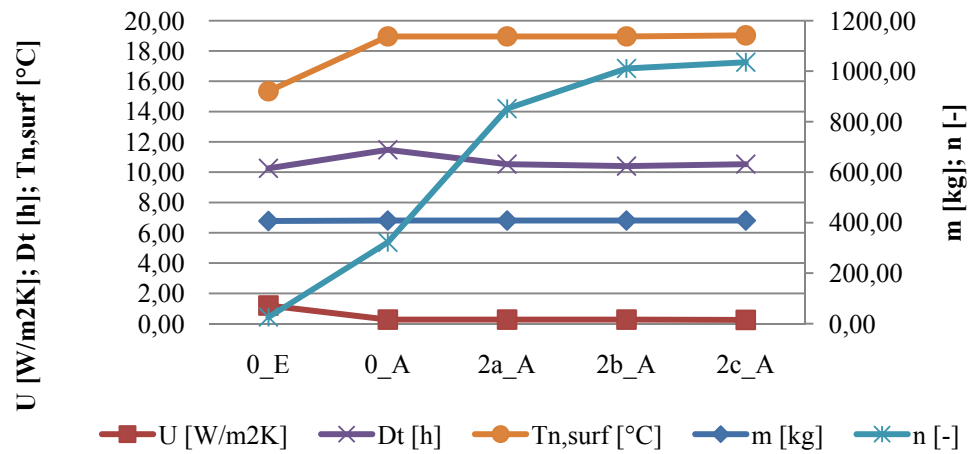
Toplotna prehodnost se močno zmanjša (slabih 60 %) v primeru uporabe enake debeline aerogelne izolacije.

Do pojava kondenzacije vodne pare v konstrukcijskem sklopu je prišlo v večini obravnavanih primerov. V vseh primerih 1c, 2c, 3c, kjer je pretežni del toplotne izolacije na notranji strani nosilne konstrukcije, je bila kondenzacija kritična. Čas, potreben za izsušitev nabrane vlage v sklopih, je prekoračil predpisano vrednost šestdesetih dni. V teh primerih je temperaturni gradient velik že na notranji strani nosilne konstrukcije, kar pomakne rosišče bolj proti notranjosti, hkrati pa več slojev materialov oteži izsuševanje navzven. Zato sem uporabil aluminijasto parno zaporo, ki je preprečila kondenzacijo v vseh primerih, razen tistih brez toplotne izolacije, kjer je toplotno izolativni prispevek notranjega zračnega sloja velik in se je vlaga kondenzirala na notranji površini .

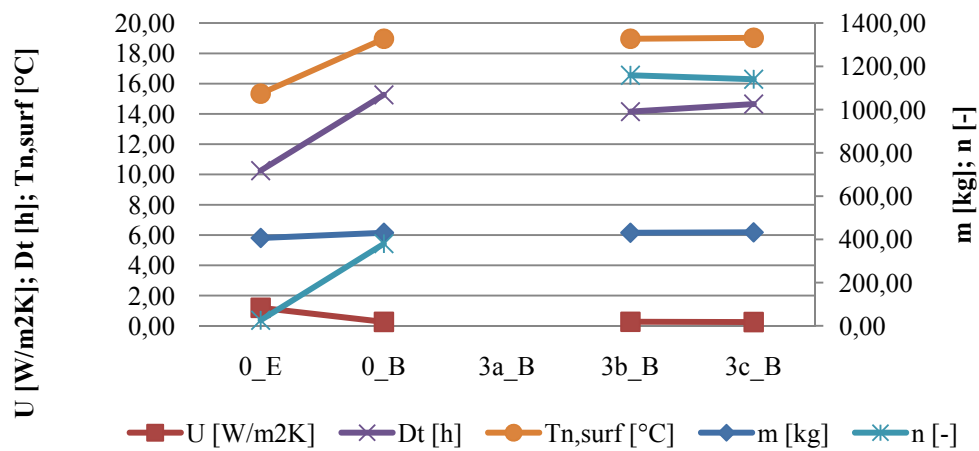
Temperaturni zamik je v primeru vseh izolacij najvišji, če je vsa toplotna izolacija nameščena na zunanji strani nosilne konstrukcije. V primeru pomika polistirena navznoter temperaturni zamik pade skoraj na vrednost, ko konstrukcijski sklop sploh ni izoliran, kar ne predstavlja optimalne rešitve glede na izbrane kriterije. Sklopi, izolirani z ekvivalentno debelino aerogelne izolacije, imajo temperaturni zamik za 1 uro daljši kakor sklopi s polistirenom in 2,5 uri krajši od sklopov, izoliranih s kameno volno pri tretjini njene debeline. Če pa uporabimo enako debelino aerogelne izolacije (primer 0_C), pa temperaturni zamik preseže smiselno mejo, saj želimo, da bi notranji maksimum dosegli, ko je zunaj minimalna temperatura. Največ vpliva imata pri tem toplotna prevodnost in pa debelina toplotne izolacije, saj se le-ti dve spremenljivki drastično spreminjata s spremembo toplotne izolacije.



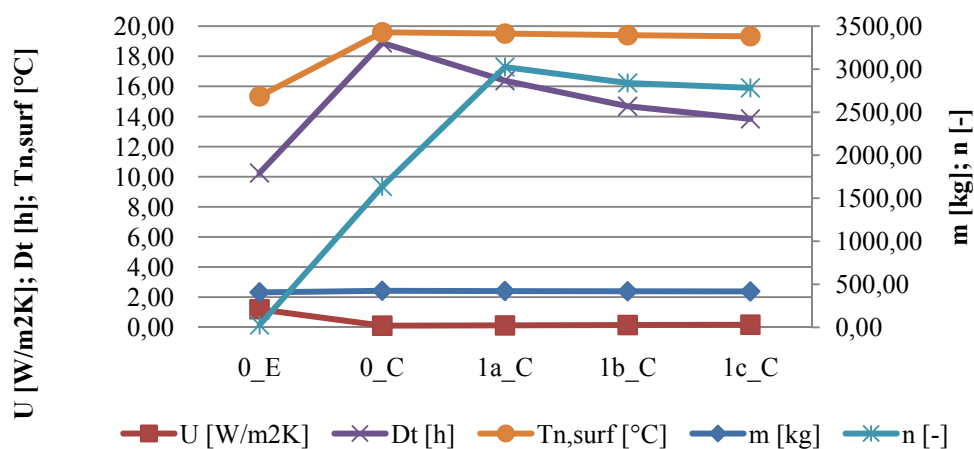
Grafikon 3: Primerjava variant z aerogelno izolacijo



Grafikon 4: Primerjava variant s polistirenom



Grafikon 5: Primerjava variant s kameno volno



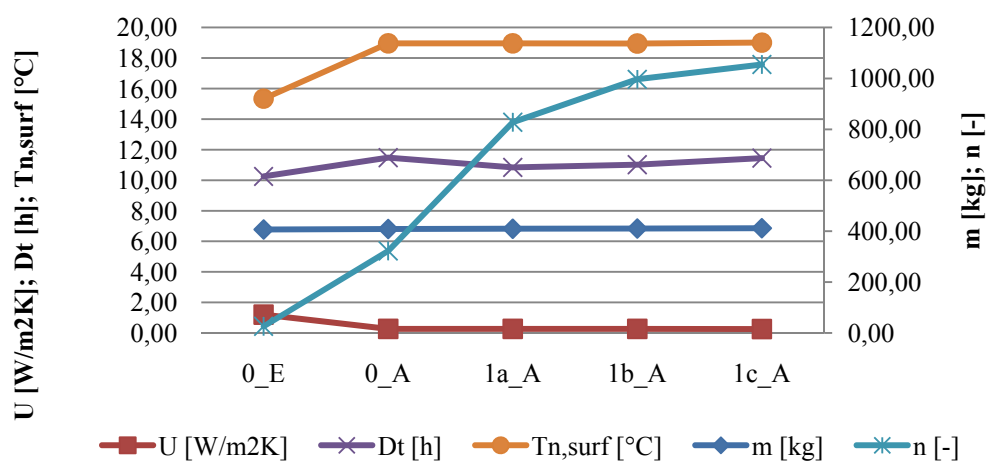
Grafikon 6: Primerjava variant z enako debelino aerogelne mase

Preglednica 8: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov opečne zunanje stene

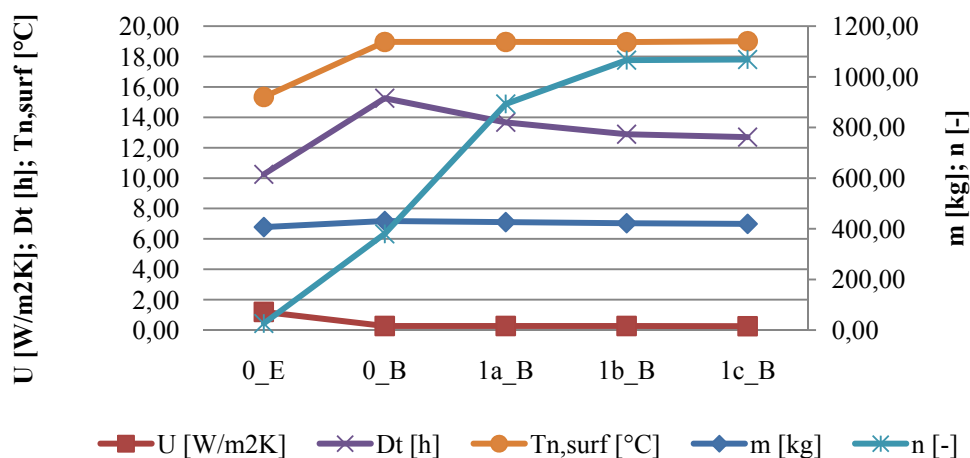
| <u>Aerogelna izolacija</u> | | | | | | | <u>Polistiren</u> | | | | | | |
|----------------------------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|---|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 | 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 |
| 0_D | 412,52 | 0,27 | ni | 12,71 | 324,71 | 18,94 | 0_A | 408,32 | 0,27 | ni | 11,48 | 322,11 | 18,96 |
| 1a_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,75 | 842,79 | 18,94 | 2a_A | 408,32 | 0,27 | ni | 10,53 | 851,30 | 18,96 |
| 1b_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,63 | 982,10 | 18,94 | 2b_A | 408,32 | 0,27 | ni | 10,40 | 1010,54 | 18,96 |
| 1c_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,64 | 826,24 | 18,94 | 2c_A | 408,47 | 0,25 | ni | 10,53 | 1035,35 | 19,03 |
| <u>Kamena volna</u> | | | | | | | <u>Aerogelna izolacija – enaka debelina</u> | | | | | | |
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 | 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 |
| 0_B | 430,52 | 0,27 | ni | 15,26 | 379,89 | 18,96 | 0_C | 424,52 | 0,11 | ni | 18,89 | 1637,54 | 19,59 |
| 3a_B | - | - | - | - | - | - | 1a_C | 421,52 | 0,13 | ni | 16,38 | 3025,85 | 19,51 |
| 3b_B | 430,52 | 0,27 | ni | 14,15 | 1158,53 | 18,96 | 1b_C | 418,52 | 0,15 | ni | 14,68 | 2839,73 | 19,40 |
| 3c_B | 432,52 | 0,25 | ni | 14,65 | 1140,13 | 19,03 | 1c_C | 417,02 | 0,17 | ni | 13,84 | 2783,68 | 19,33 |

Pri temperaturnem dušenju lahko opazimo, da je najnižje v primeru, ko je izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije. Zanimivo je, da je dušenje v primerih uporabe aerogela v ekvivalentni debelini polistirena in kamene volne največje, ko je debelina toplotne izolacije na obeh straneh nosilne konstrukcije enaka. V primeru polistirena je dušenje največje, ko je večina toplotne izolacije na notranji strani, pri uporabi enake debeline aerogela pa obratno, ko je večina izolacije na zunanji strani.

Primeri z oznako C imajo enako debelino zunanje toplotne izolacije kot enak primer z uporabljeno izolacijo iz polistirena ali kamene volne. Tako se skupna debelina toplotne izolacije v teh primerih spreminja. Kot optimalno rešitev bi predlagal primer 1b_C, ko imamo 6 cm na zunanji ter 2 cm aerogelne izolacije na notranji strani nosilne konstrukcije. Masa tega konstrukcijskega sklopa je še zmeraj za 2,5 % lažja od vseh primerov s kameno volno ter težja za 1,5 % od primerov s polistirenom. Toplotna prehodnost je za 40 % manjša, temperaturni zamik je praktično enak z variantami s kameno volno, temperaturno dušenje je višje od vseh ostalih ter ima za dobro polovico °C višjo temperaturo notranje površine.



Grafikon 7: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena



Grafikon 8: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne

Preglednica 9: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – opečna zunanja stena

| | Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena | | | | | | Kombinacija aerogelne izolacije in kamene volne | | | | | | |
|------|--|------------------------|-------------|--------|---------|--------------|---|------------------------|-------------|-----------|-------|--------------|-------|
| | m [kg] | U [W/m ² K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | m [kg] | U [W/m ² K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | |
| 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 | 0_E | 406,52 | 1,20 | mavč. pl. | 10,25 | 25,96 | 15,34 |
| 0_A | 408,32 | 0,27 | ni | 11,48 | 322,11 | 18,96 | 0_B | 430,52 | 0,27 | ni | 15,26 | 379,89 | 18,96 |
| 1a_A | 409,37 | 0,27 | ni | 10,84 | 827,87 | 18,96 | 1a_B | 426,02 | 0,27 | ni | 13,67 | 892,87 | 18,96 |
| 1b_A | 410,42 | 0,27 | ni | 11,02 | 996,62 | 18,95 | 1b_B | 421,52 | 0,27 | ni | 12,89 | 1065,86 | 18,95 |
| 1c_A | 411,62 | 0,25 | ni | 11,45 | 1054,79 | 19,01 | 1c_B | 419,02 | 0,25 | ni | 12,70 | 1068,39 | 19,01 |

Preglednica 9 in grafikon 8 prikazujeta odziv konstrukcijskega sklopa, izoliranega s kombinacijo aerogelne izolacije na notranji ter polistirena na zunanji strani. Izolacija je dimenzionirana tako, da je toplotna prehodnost enaka primerom s samo enim tipom izolacije. Kot optimalnega bi izbral primer 1c_A, ki je en najlažjih primerov, toplotno prehodnost ima enako, temperaturna zakasnitev je za dobro uro daljša od neizoliranega primera, dušenje pa je enako najboljšemu med variantami sklopov samo s polistirenom.

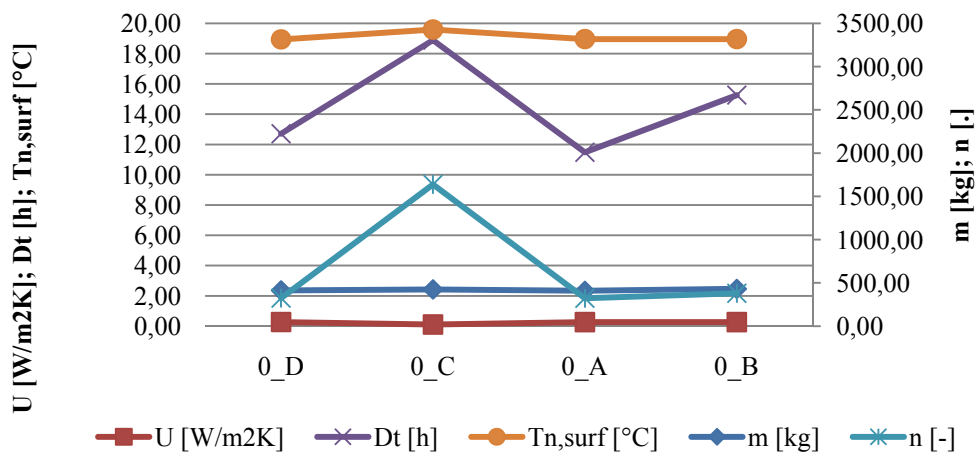
V primeru uporabe kombinacije aerogelne izolacije in kamene volne so konstrukcijski sklopi 1-2 % lažji od primera s samo kameno volno. Temperaturni zamik se ob dodajanju aerogela in odvzemanju kamene volne skrajša. Zanimivo je, da je razlika med primeroma 1b_B ter 1c_B minimalna. K temu nekoliko pripomore tudi že omenjeno dejstvo, da je najtanjši sloj izolacije

na zunanji strani nosilne konstrukcije debel 4 cm. Kot optimalnega pa bi izbral primer 1b_B, v katerem je uporabljena kombinacija steklene volne kot primarne toplotne izolacije na zunanji ter sekundarna aerogelna toplotna izolacija na notranji strani nosilne konstrukcije. Izbrani sklop ima srednje veliko maso, ustrezno toplotno prehodnost, visok temperaturni zamik ter ugodno temperaturno dušenje. Nevarnosti za rast mahov ali nastajanja plesni na notranji površini ni, saj je temperatura le te za 1 °C višja od kritične. Hkrati je tudi opazno tanjši kakor sklop 3b_B, ki je izoliran samo s kameno volno ter cenovno ugodnejši kakor sklop 1b_D, kateri je izoliran z ekvivalentno debelino aerogelne izolacije.

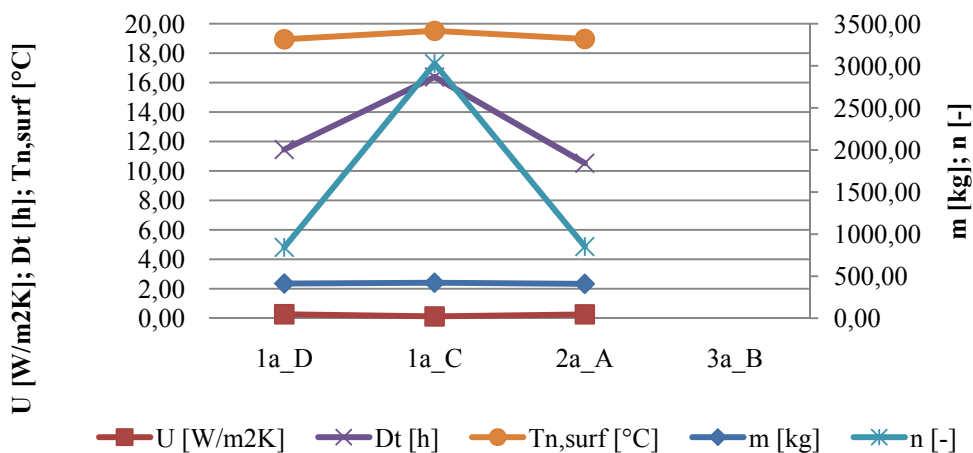
V preglednici 10 so za lažjo primerjavo zbrane skupaj variante, kjer je vsa toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije. Tu se bolj nazorno vidi, kar sem opisal že v prvem delu komentarja. Izpostavil bi le, da se v primeru enake debeline aerogela kakor debeline polistirena ali kamene volne vsem parametrom, razen masi, močno izboljšajo vrednosti.

Če primerjamo med seboj variante z nameščeno toplotno izolacijo v plašču, kjer je večina toplotne izolacije na zunanji strani, lahko opazimo, da ponovno prevlada konstrukcijski sklop z enako debelino zunanje izolacije. V tem primeru tudi najbolj pade temperaturni zamik, faktor dušenja pa najbolj naraste v primeru, izoliranem s polistirenom. Variante s kameno volno ni, saj sem za začetno debelino privzel 4 cm, kakor je navedeno v katalogih proizvajalcev.

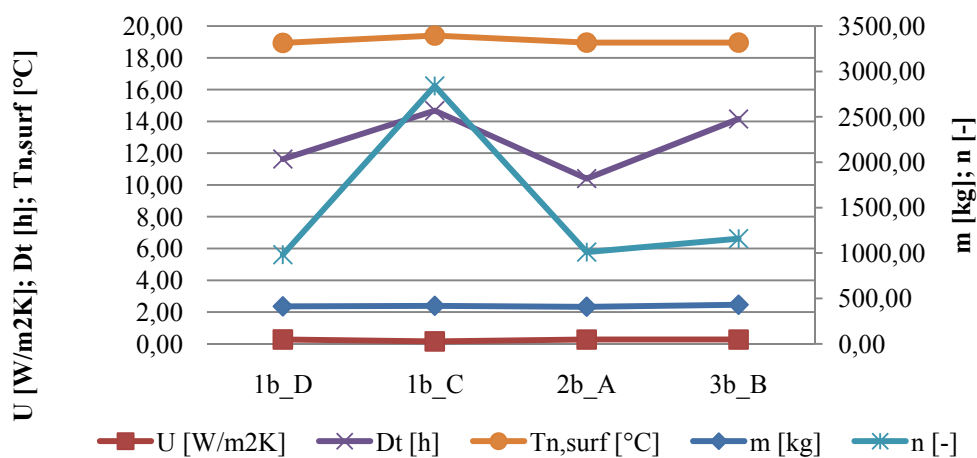
V primerih, kjer je debelina toplotne izolacije enaka na obeh straneh nosilne konstrukcije, vidimo, da se temperaturni zamik v primeru uporabe kamene volne močno približa varianti z enako debelino zunanje izolacije, saj absolutna količina aerogelne izolacije že dovolj pade. Še zmeraj pa je dušenje za več kot enkrat višje ter temperatura notranje površine višja za skoraj polovico °C. Varianta z ekvivalentno debelino aerogelne izolacije ima primerljivo dušenje in pa še zmeraj opazno višjo temperaturno zakasnitev kakor varianta s polistirenom.



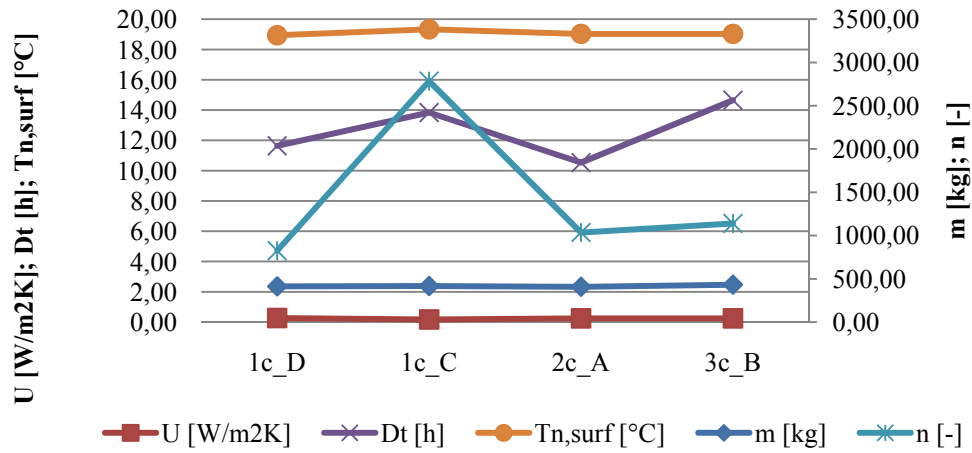
Grafikon 9: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije



Grafikon 10: Toplotna izolacija v plašču a



Grafikon 11: Toplotna izolacija v plašču b



Grafikon 12: Toplotna izolacija v plašču c

Preglednica 10: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala

| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| 0_D | 412,52 | 0,27 | ni | 12,71 | 324,71 | 18,94 | 1a_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,45 | 842,79 | 18,94 |
| 0_C | 424,52 | 0,11 | ni | 18,89 | 1637,54 | 19,59 | 1a_C | 421,52 | 0,13 | ni | 16,38 | 3025,85 | 19,51 |
| 0_A | 408,32 | 0,27 | ni | 11,48 | 322,11 | 18,96 | 2a_A | 408,32 | 0,27 | ni | 10,53 | 851,30 | 18,96 |
| 0_B | 430,52 | 0,27 | ni | 15,26 | 379,89 | 18,96 | 3a_B | | | | | | |
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 1b_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,63 | 982,10 | 18,94 | 1c_D | 412,52 | 0,27 | ni | 11,64 | 826,24 | 18,94 |
| 1b_C | 418,52 | 0,15 | ni | 14,68 | 2839,73 | 19,40 | 1c_C | 417,02 | 0,17 | ni | 13,84 | 2783,68 | 19,33 |
| 2b_A | 408,32 | 0,27 | ni | 10,40 | 1010,54 | 18,96 | 2c_A | 408,47 | 0,25 | ni | 10,53 | 1035,35 | 19,03 |
| 3b_B | 430,52 | 0,27 | ni | 14,15 | 1158,53 | 18,96 | 3c_B | 432,52 | 0,25 | ni | 14,65 | 1140,13 | 19,03 |

2.7.3.2 Zunanja stena iz lesenih križno lepljenih plošč

Masa nosilne konstrukcije iz lesenih križno lepljenih plošč je majhna, zato so ti konstrukcijski sklopi bistveno lažji od opečnih zunanjih sten, kar lahko posledično predstavlja problem pri toplotni stabilnosti. Zaradi mnogo manjše gostote in manjše debeline nosilne konstrukcije je posledično kljub njeni relativno visoki specifični toplotni kapaciteti, toplotna kapaciteta, ki jo tvori produkt omenjenih spremenljivk, manjša. Posledično je temperaturni zamik manjši, kar je razvidno iz v nadaljevanju predstavljenih rezultatov. Manjša toplotna kapaciteta torej pomeni, da je učinek sklopa oziroma v tem primeru zunanje stene kot vztrajnika zmanjšan. Princip delovanja vztrajnika je predstavljen že v točki 2.1.3.

Sklop z aerogelno toplotno izolacijo je težji za 8,8 % lastne mase od sklopa s polistirenom in za polovico lastne mase lažji kakor sklop s kameno volno.

Preglednica 11: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

| | Debelina Sek. TI = 0m | | Aerogel | | Polistiren | | Kamena volna | |
|----------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,01m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | |
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | 0,33 | 0,18 | 0,31 | 0,15 | 0,33 | 0,15 | - | - |
| B | 0,33 | 0,18 | 0,31 | 0,15 | 0,33 | 0,15 | - | - |
| C | 0,33 | 0,18 | 0,31 | 0,15 | 0,33 | 0,15 | - | - |
| D | 0,21 | 0,06 | 0,21 | 0,05 | 0,23 | 0,05 | - | - |
| E | 0,15 | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,18 | 0,00 | - | - |

| | Debelina Sek. TI = 0,02m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | | | |
|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|------|------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,02m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | | | |
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | | |
| A | - | - | 0,29 | 0,12 | 0,33 | 0,12 | 0,33 | 0,12 |
| B | - | - | 0,29 | 0,12 | 0,33 | 0,12 | 0,33 | 0,12 |
| C | - | - | 0,29 | 0,12 | 0,33 | 0,12 | 0,33 | 0,12 |
| D | - | - | 0,21 | 0,04 | 0,25 | 0,04 | 0,25 | 0,04 |
| E | - | - | 0,17 | 0,00 | 0,21 | 0,00 | 0,21 | 0,00 |

| | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | | | |
|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|------|------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | | | |
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | | |
| A | - | - | 0,27 | 0,09 | 0,33 | 0,09 | 0,33 | 0,09 |
| B | - | - | 0,27 | 0,09 | 0,33 | 0,09 | 0,33 | 0,09 |
| C | - | - | 0,27 | 0,09 | 0,33 | 0,09 | 0,33 | 0,09 |
| D | - | - | 0,21 | 0,03 | 0,27 | 0,03 | 0,27 | 0,03 |
| E | - | - | 0,18 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 0,24 | 0,00 |

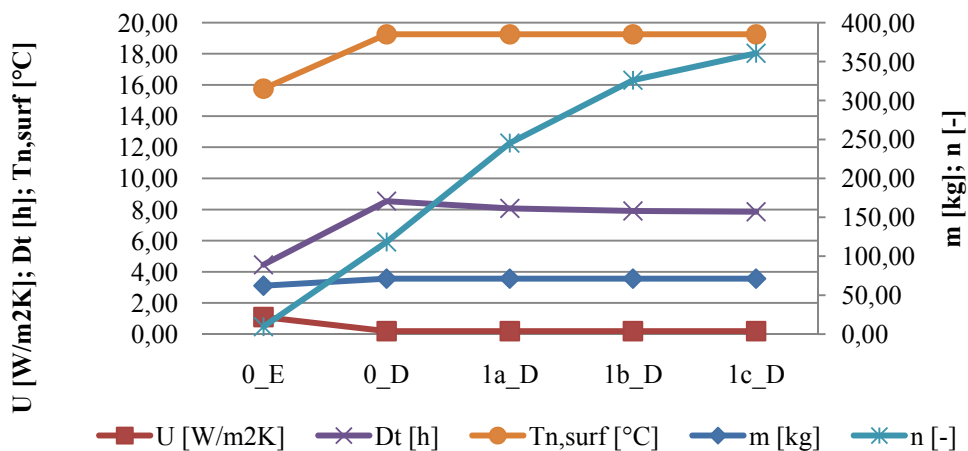
Kot je že pojasnjeno v prejšnjem segmentu analize, je ta zasnovana tako, da je toplotna prehodnost enaka za vse primere, razen za primer uporabe enake debeline aerogelne izolacije. Vse obravnavane variante konstrukcijskih sklopov z nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih plošč imajo maso pod 150 kg/m^2 in spadajo med lahke gradbene konstrukcije. Za te je v prilogi 1 pravilnika o energetske učinkovitosti stavb predpisan strožji pogoj toplotne prehodnosti ($U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) kakor za konstrukcije nad 150 kg/m^2 ($U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Iz preglednice 12 je razvidno, da je omenjeni pogoj o toplotni prehodnosti izpolnjen. V primerih kjer je uporabljena enaka debelina aerogelne toplotne izolacije, kakor je potrebna pri drugih dveh materialih pja je toplotna prehodnost že zelo nizka.

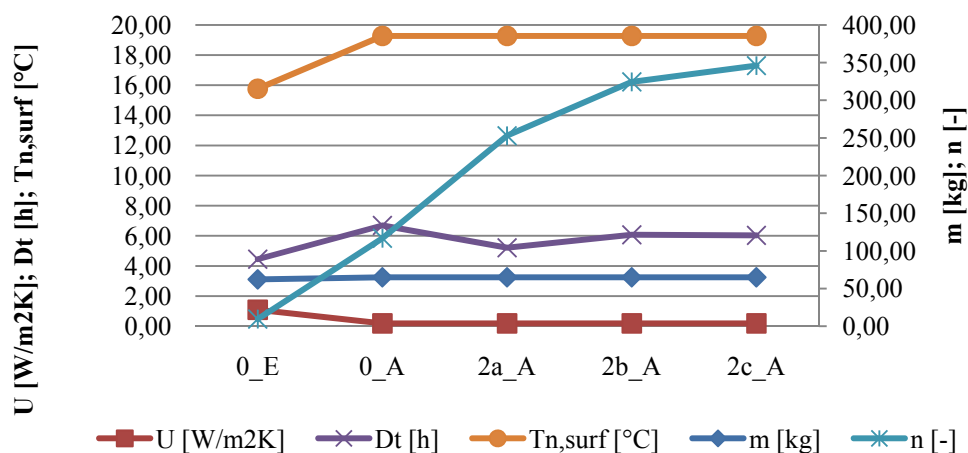
Neizolirani sklop zopet ni primeren, ne le zaradi previsoke toplotne prehodnosti, ampak tudi zaradi močno preizkega temperaturnega časovnega zamika. Iz slednjega razloga prav tako niso primerni sklopi z uporabo polistirena, saj imajo prenizek čas temperaturne zakasnitve ter tudi od vseh sklopov najnižje temperaturno dušenje, kar je predvsem posledica manjše specifične teže lesa od specifične teže modularnega opečnega bloka. Zaključek temelji na starem jugoslovanskem standardu JUS U.J5.600 in predpostavki iz točke 2.7.1.4, vrednosti v njem pa še zmeraj veljajo kot strokovno priporočilo. Tudi prirastek mase je v deležu skoraj desetkrat večji kot v primeru opečne nosilne konstrukcije, izvirajoč iz istega razloga.

Temperaturno dušenje neizoliranega sklopa je prenizko glede na predpostavko iz točke 2.7.1.5, ki je narejena na podlagi ne več veljavnega JUS standarda, saj trenutni slovenski predpisi ne obravnavajo tega parametra. Sklopi z enakovredno debelino aerogelne izolacije imajo temperaturno dušenje le malenkost višje kakor sklopi s polistirenom, medtem ko sklopi s kameno volno pred premikom izolacije navznoter za več kot 50 % višje; v zadnjem primeru, ko je večina toplotne izolacije na notranji strani, pa 20 %. Sklopi z enako debelino aerogelne izolacije, kakor je potrebna pri drugih dveh toplotnoizolacijskih materialih, pa imajo močno višje dušenje.

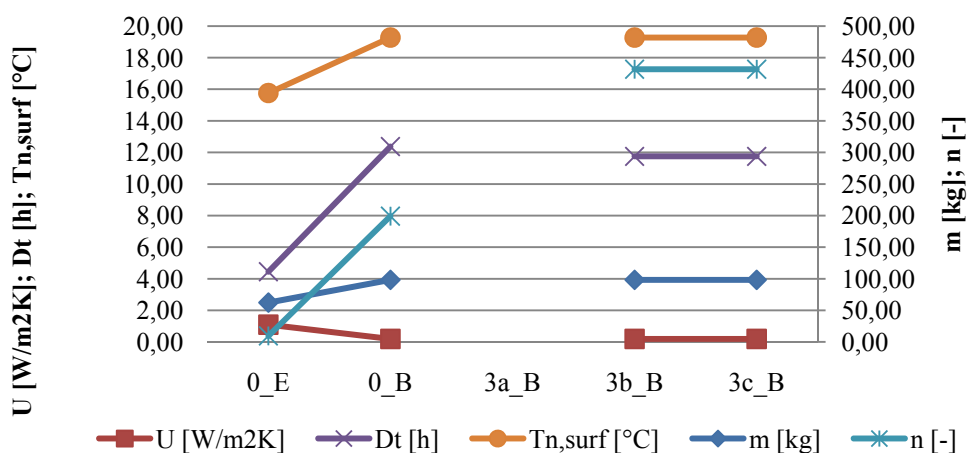
Temperaturno dušenje v primeru polistirena in enakovredne debeline aerogelne izolacije strmo narašča s pomikanjem toplotne izolacije na notranjo stran nosilne konstrukcije. Pri sklopu, izoliranem s kameno volno, se ta vrednost stabilizira, ko je 1/3 izolacije na notranji



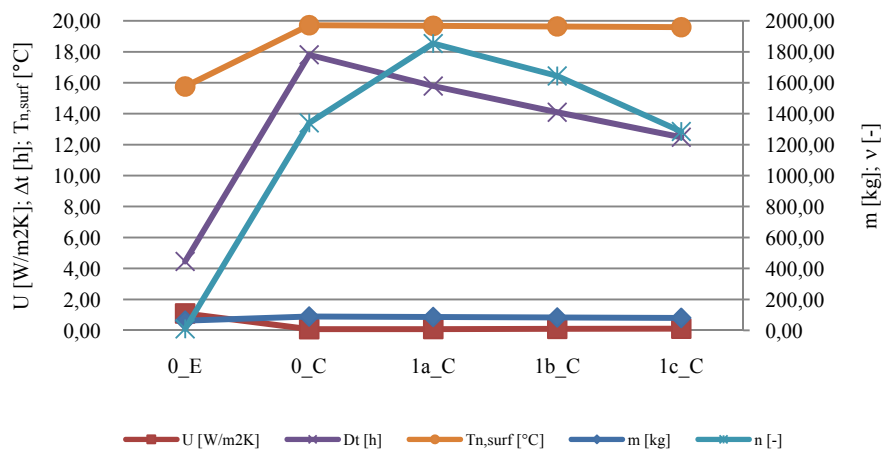
Grafikon 13: Primerjava variant z izolacijo na osnovi aerogela



Grafikon 14: Primerjava variant s polistirenom



Grafikon 15: Primerjava variant s kameno volno



Grafikon 16: Primerjava variant z enako debelino aerogelne mase

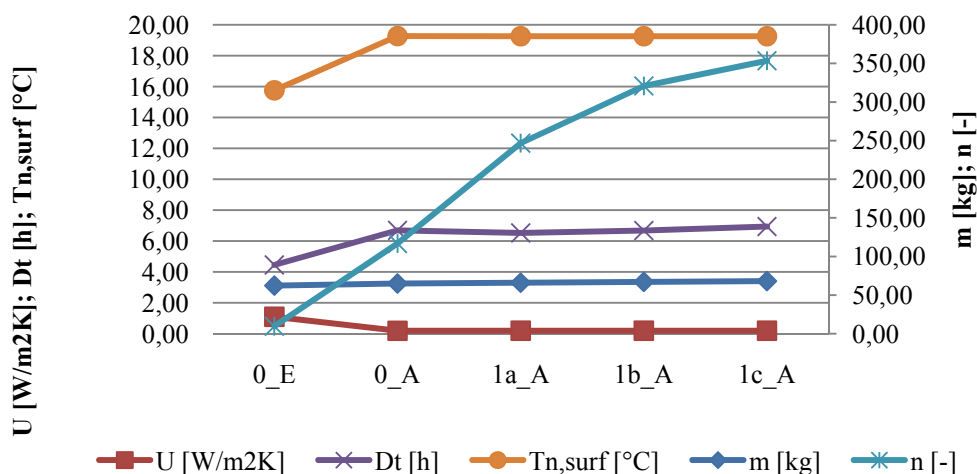
Preglednica 12: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov z nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih plošč

| Aerogelna izolacija | | | | | | | Polistiren | | | | | | |
|---------------------|--------|-----------|-------------|--------|--------|--------------|------------|--------|-----------|-------------|--------|--------|--------------|
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 | 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 |
| 0_D | 71,22 | 0,19 | ni | 8,54 | 118,34 | 19,25 | 0_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,69 | 116,81 | 19,27 |
| 1a_D | 71,22 | 0,19 | ni | 8,07 | 245,25 | 19,25 | 2a_A | 64,92 | 0,19 | ni | 5,21 | 252,93 | 19,27 |
| 1b_D | 71,22 | 0,19 | ni | 7,91 | 325,99 | 19,25 | 2b_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,07 | 324,33 | 19,27 |
| 1c_D | 71,22 | 0,19 | ni | 7,86 | 360,61 | 19,25 | 2c_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,03 | 345,96 | 19,27 |

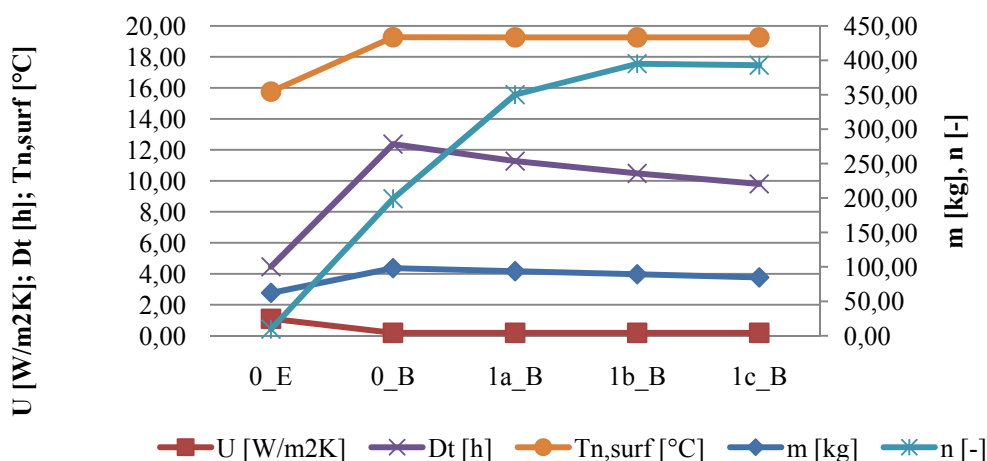
| Kamena volna | | | | | | Aerogelna izolacija enaka debelina | | | | | | | |
|--------------|--------|-----------|-------------|--------|--------|------------------------------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 | 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 |
| 0_B | 98,22 | 0,19 | ni | 12,37 | 199,08 | 19,27 | 0_C | 89,22 | 0,07 | ni | 17,81 | 1340,24 | 19,72 |
| 3a_B | - | - | - | - | - | - | 1a_C | 86,22 | 0,08 | ni | 15,79 | 1853,49 | 19,68 |
| 3b_B | 98,22 | 0,19 | ni | 11,75 | 431,68 | 19,27 | 1b_C | 83,22 | 0,09 | ni | 14,09 | 1643,98 | 19,64 |
| 3c_B | 98,22 | 0,19 | ni | 11,75 | 431,68 | 19,27 | 1c_C | 80,22 | 0,11 | ni | 12,48 | 1285,08 | 19,59 |

strani. Če pa uporabimo enako debelino aerogelne izolacije temperaturno dušenje sprva ob premiku navznoter za 1 cm močno naraste s 1340,24 na 1853,49, v naslednjih dveh korakih pa pade pod prvotno vrednost izoliranega sklopa. Diagrami temperaturne zakasnitve in dušenja so precej različni od primerov z opečno nosilno konstrukcijo. Na rezultat vpliva tako zaporedje oziroma pozicija slojev kot same vrednosti tehničnih karakteristik, kot so gostota, toplotna prevodnost ter specifična toplotna kapaciteta. Kot optimalno rešitev bi ponovno

izbral sklop 1b_C, pri katerem dobimo dobro razmerje temperaturnega dušenja in temperaturne zakasnitve ter zelo nizko toplotno prehodnost. Dodal bi še, da se lahko zadovoljimo s temperaturno zakasnitvijo 14^h, v splošnem pa je potrebna vrednost zelo odvisna od lokalnih klimatskih razmer ter letnega časa. Ugoden zamik je tisti, katerega posledica je maksimalna temperatura na notranji površini takrat, ko je temperatura zunanjega zraka najnižja. Po navadi je to v obravnavani klimi nekje med 4h in 6h zjutraj.



Grafikon 17: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena



Grafikon 18: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne

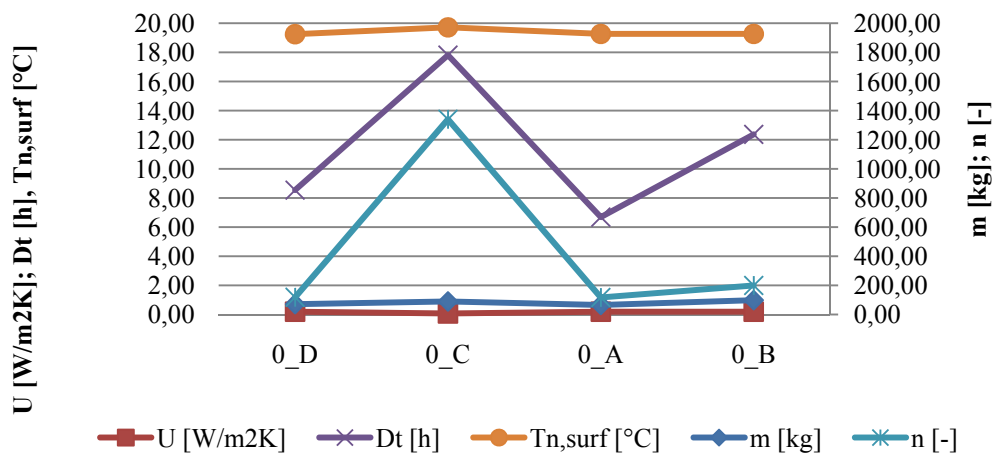
Preglednica 13: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

| <u>Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena</u> | | | | | | | <u>Kombinacija aerogelne izolacije in kamene volne</u> | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------|----------------|--------|--------|-----------------|--|-----------|---------------------------|----------------|--------|--------|-----------------|
| | m [kg] | U [W/m ² K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m ² K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 | 0_E | 62,22 | 1,09 | ni | 4,45 | 9,54 | 15,76 |
| 0_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,69 | 116,81 | 19,27 | 0_B | 98,22 | 0,19 | ni | 12,37 | 199,08 | 19,27 |
| 1a_A | 65,97 | 0,19 | ni | 6,52 | 246,79 | 19,26 | 1a_B | 93,72 | 0,19 | ni | 11,27 | 350,20 | 19,26 |
| 1b_A | 67,02 | 0,19 | ni | 6,68 | 320,83 | 19,26 | 1b_B | 89,22 | 0,19 | ni | 10,48 | 395,10 | 19,26 |
| 1c_A | 68,07 | 0,19 | ni | 6,94 | 353,43 | 19,26 | 1c_B | 84,72 | 0,19 | ni | 9,80 | 392,84 | 19,26 |

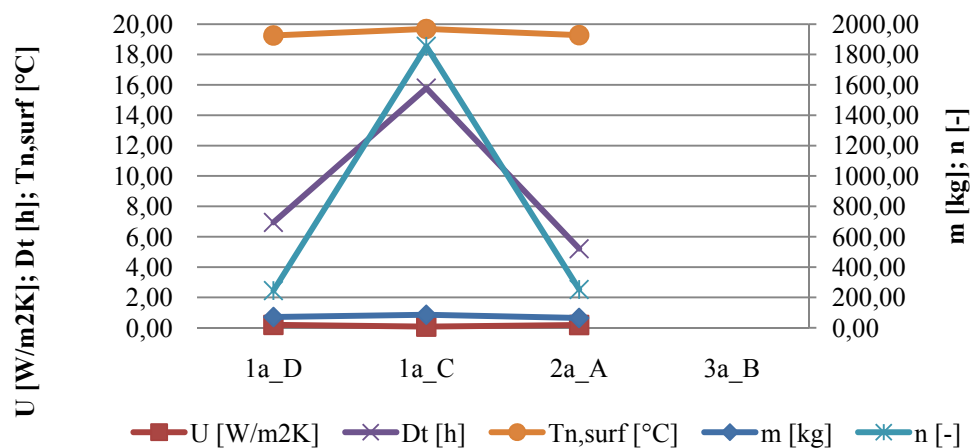
Sprememba dušenja med primeroma 1a_C in 1b_C je v praksi zanemarljiva. Hkrati je varianta 1b_C cenovno bolj sprejemljiva. Dodal bi še, da se lahko zadovoljimo s temperaturno zakasnitvijo 14^h, v splošnem pa je potrebna vrednost zelo odvisna od lokalnih klimatskih razmer ter letnega časa. Sprememba dušenja med primeroma 1a_C in 1b_C je v praksi zanemarljiva. Hkrati je varianta 1b_C cenovno bolj sprejemljiva.

Obravnavane kombinacije aerogelne in polistirenske toplotne izolacije, kjer je polistiren na zunanji, aerogel pa na notranji strani, ne zadostijo pogoju minimalne temperaturne zakasnitve, medtem ko kombinacije kamene volne z aerogelno izolacijo izpolnijo vse zahteve. V primeru 1a_A, ki bi ga izbral za optimalnega, temperaturna zakasnitev sicer nekoliko pade (9 %) glede na varianto, kjer je vsa izolacija, t.j. kamena volna, na zunanji strani, vendar temperaturno dušenje naraste za 75,9 %. Temperatura notranje površine ostaja praktično enaka, v primeru enake debeline aerogela pa je maksimalno večja za 0,45 °C, kar je manj kakor v primeru opečne nosilne konstrukcije. To lahko pojasnimo z dejstvom, da je toplotni upor samega sklopa večji in je zato delež upora, ki odpade na notranjo zračno plast, manjši, kar pa posledično pomeni manjšo temperaturno razliko med notranjo zračno plast, temperaturo notranjega zraka in temperaturo notranje površine.

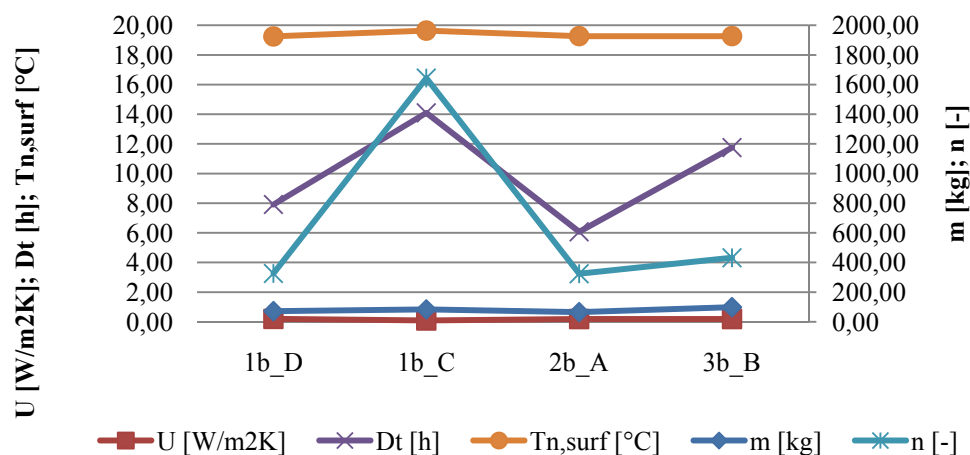
Na grafih 19 do 22 so ponovno prikazani primeri z enim uporabljenim toplotno izolacijskim materialom sortirani glede na pozicijo toplotne izolacije. Vidimo, da je potek grafov podoben tistim iz analize opečne zunanje stene, le številke so bistveno drugačne. Lepo se razbere tudi vpliv izolacije iz aerogela na iskane parametre, na primer temperaturni časovni zamik ter temperaturno dušenje, ki je veliko večji v primeru lesene nosilne konstrukcije, ne le deležno, ampak tudi v absolutnih razlikah vrednosti.



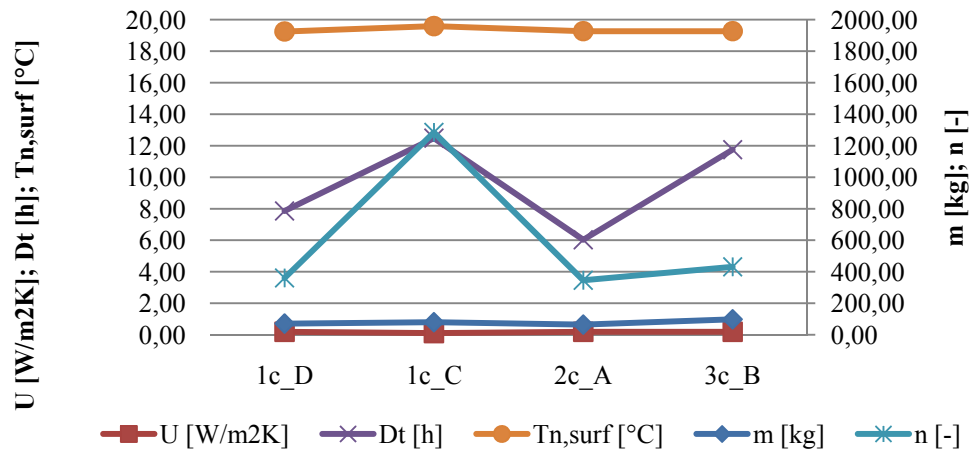
Grafikon 20: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije



Grafikon 19: Toplotna izolacija v plašču a



Grafikon 21: Toplotna izolacija v plašču b



Grafikon 22: Toplotna izolacija v plašču c

Preglednica 14: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala

| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| 0_D | 71,22 | 0,19 | ni | 8,54 | 118,34 | 19,25 | 1a_D | 71,22 | 0,19 | ni | 6,94 | 245,25 | 19,25 |
| 0_C | 89,22 | 0,07 | ni | 17,81 | 1340,24 | 19,72 | 1a_C | 86,22 | 0,08 | ni | 15,79 | 1853,49 | 19,68 |
| 0_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,69 | 116,81 | 19,27 | 2a_A | 64,92 | 0,19 | ni | 5,21 | 252,93 | 19,27 |
| 0_B | 98,22 | 0,19 | ni | 12,37 | 199,08 | 19,27 | 3a_B | - | - | - | - | - | - |
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 1b_D | 71,22 | 0,19 | ni | 7,91 | 325,99 | 19,25 | 1c_D | 71,22 | 0,19 | ni | 7,86 | 360,61 | 19,25 |
| 1b_C | 83,22 | 0,09 | ni | 14,09 | 1643,98 | 19,64 | 1c_C | 80,22 | 0,11 | ni | 12,48 | 1285,08 | 19,59 |
| 2b_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,07 | 324,33 | 19,27 | 2c_A | 64,92 | 0,19 | ni | 6,03 | 345,96 | 19,27 |
| 3b_B | 98,22 | 0,19 | ni | 11,75 | 431,68 | 19,27 | 3c_B | 98,22 | 0,19 | ni | 11,75 | 431,68 | 19,27 |

2.7.3.3 Armiranobetonska zunanja stena

V zadnjem delu analize sem obravnaval konstrukcijske sklope z armiranobetonsko nosilno konstrukcijo. Poleg osnovnega neizoliranega konstrukcijskega sklopa so problematični tudi sklopi, ki imajo polistirensko toplotno izolacijo v poziciji plašča, saj je temperaturni časovni zamik premajhen.

Preglednica 15: Debelina konstrukcijskih sklopov ter toplotne izolacije – armiranobetonska zunanja stena

| | Debelina Sek. TI = 0m | | Aerogel | | Polistiren | | Kamena volna | |
|----------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina Sek. TI = 0,01m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,03m | |
| | | | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | 0,56 | 0,14 | 0,54 | 0,12 | 0,56 | 0,11 | - | - |
| B | 0,56 | 0,14 | 0,54 | 0,12 | 0,56 | 0,11 | - | - |
| C | 0,56 | 0,14 | 0,54 | 0,12 | 0,56 | 0,11 | - | - |
| D | 0,47 | 0,05 | 0,47 | 0,04 | 0,49 | 0,04 | - | - |
| E | 0,42 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | 0,45 | 0 | - | - |

| | Debelina Sek. TI = 0,02m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | | Debelina Sek. TI = 0,06m | |
|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | - | - | 0,51 | 0,08 | 0,56 | 0,08 |
| B | - | - | 0,51 | 0,08 | 0,56 | 0,08 |
| C | - | - | 0,51 | 0,08 | 0,56 | 0,08 |
| D | - | - | 0,47 | 0,03 | 0,51 | 0,03 |
| E | - | - | 0,44 | 0 | 0,48 | 0 |

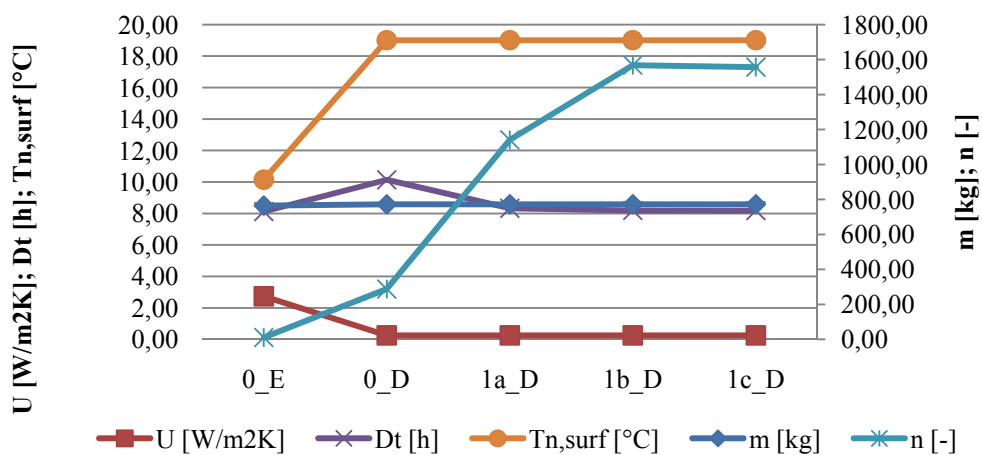
| | Debelina Sek. TI = 0,03m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | | Debelina Sek. TI = 0,09m | |
|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] | Debelina sklopa [m] | Debelina prim TI [m] |
| A | - | - | 0,49 | 0,05 | 0,56 | 0,05 |
| B | - | - | 0,49 | 0,05 | 0,56 | 0,05 |
| C | - | - | 0,49 | 0,05 | 0,56 | 0,05 |
| D | - | - | 0,47 | 0,02 | 0,53 | 0,02 |
| E | - | - | 0,45 | 0 | 0,51 | 0 |

Masa konstrukcijskih sklopov se na račun prevladujoče gostote armiranega betona skoraj ne spremeni v deležu. Če obravnavamo sklop z enakovredno debelino aerogelne izolacije, potem je povečanje glede na sklop s polistirenom manjše od 1 % mase sklopa z aerogelom. Če zamenjamo enakovredno debelino aerogelne izolacije s kameno volno, se masa poveča za 2,7 %.

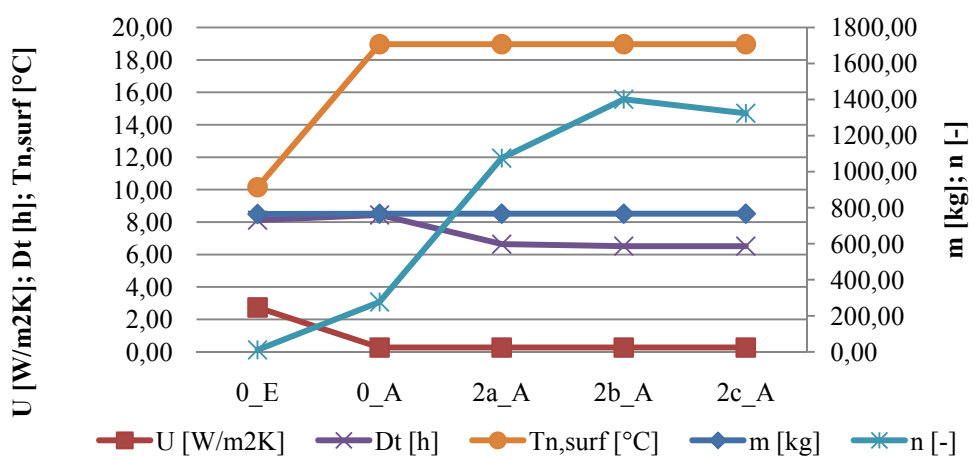
Razlika v toplotni prehodnosti med primeri s polistirenom, kameno volno ter enakovredno debelino aerogela izvira iz uporabe razpoložljivih debelin izolacije. Toplotna stabilnost variant z enakovredno debelino toplotne izolacije je primerna v vseh obravnavanih sklopih. V primeru armiranobetonske konstrukcije je dušenje višje kakor v primeru opečne zunanje stene, temperaturni zamik pa je višji v slednjem. Na podlagi teh rezultatov lahko zaključim, da v primeru uporabe enakovredne debeline aerogela gostota nosilne konstrukcije bistveno vpliva na temperaturno dušenje, medtem ko njena toplotna prevodnost predvsem na zakasnitev. Podobno velja v vseh ostalih primerih uporabe polistirena, kamene volne ali aerogelne izolacije. Oblika grafov vseh rezultatov je bolj podobna med primeroma armiranobetonske in opečne nosilne konstrukcije kakor v primeru nosilne konstrukcije iz lesenih križno lepljenih plošč.

Ob prvem premiku toplotne izolacije navznoter se temperaturna zakasnitev zmanjša enako za 1,8^h v primeru enakovredne debeline aerogela polistirenu in primeru uporabe polistirena. Ob drugem in tretjem premiku je ta razlika še zmeraj skoraj enaka. Enako se spreminja temperaturna zakasnitev v primeru kamene volne. Spremembe so skoraj enake, čeprav se same vrednosti zakasnitve močno razlikujejo. To lahko pojasnim z dejstvom, da so ukrepi enakovredni, v vsakem primeru naredim relativno gledano isto stvar. Če bi na spremembe gledali v deležu, bi te bile različne, saj je osnova drugačna. Za temperaturno dušenje povedano ne velja, te vrednosti se spreminjajo drugače. V primeru uporabe enake debeline aerogelne izolacije je oblika grafikona, ki povezuje vrednosti za različne pozicije toplotne izolacije bolj strma od primerov uporabe polistirena, kamene volne ali njima enakovredne debeline aerogelne izolacije. K dušenju doprinese predvsem toplotna izolacij. Neizolirani konstrukcijski sklop imajo zelo nizko dušenje v primerjavi z izoliranim.

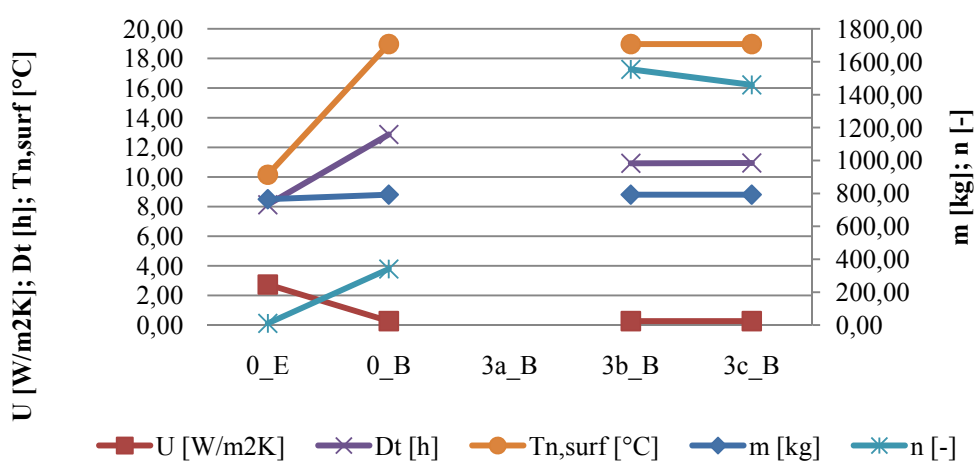
V splošnem imajo sicer sklopi s kameno volno nekoliko višjo temperaturno zakasnitev kakor tisti z aerogelno izolacijo, medtem ko imajo ostali parametri podobne vrednosti. Kljub temu bi za optimalni sklop z vidika obravnavanih parametrov še tretjič izbral 1b_C, kjer je aerogelna izolacija nameščena kot plašč. Na notranji strani nosilne konstrukcije je v tem primeru 2 cm na zunanji pa 8 cm izolacije. Primerjava izbranih optimalnih rešitev je predstavljena v nadaljevanju.



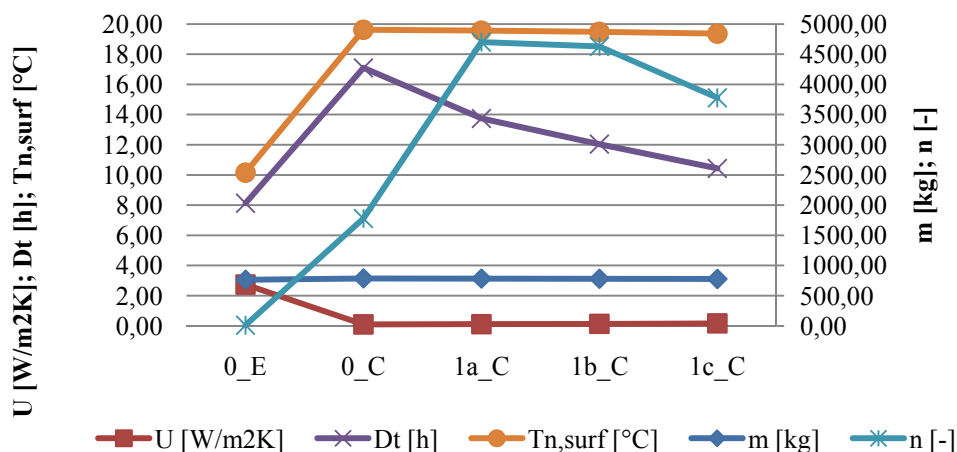
Grafikon 23: Primerjava variant z aerogelno izolacijo



Grafikon 24: Primerjava variant s polistirenom



Grafikon 25: Primerjava variant s kameno volno

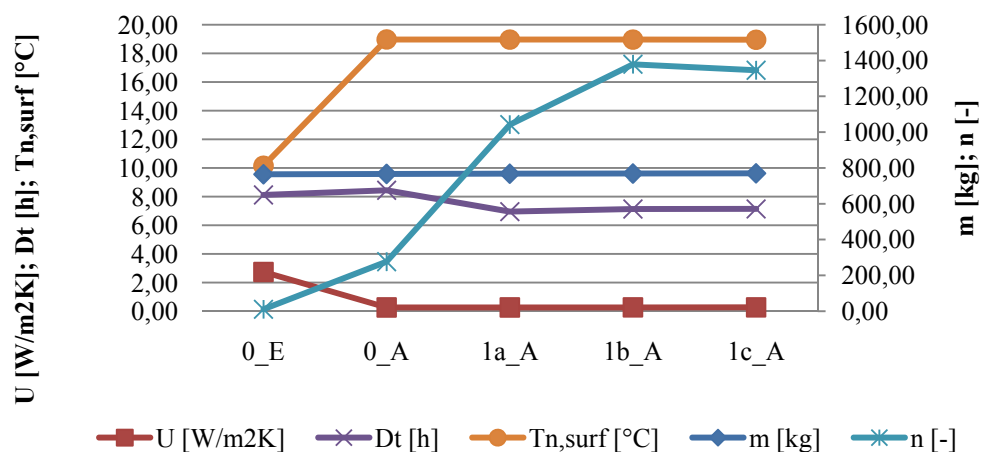


Grafikon 26: Primerjava variant z enako debelino aerogelne izolacije

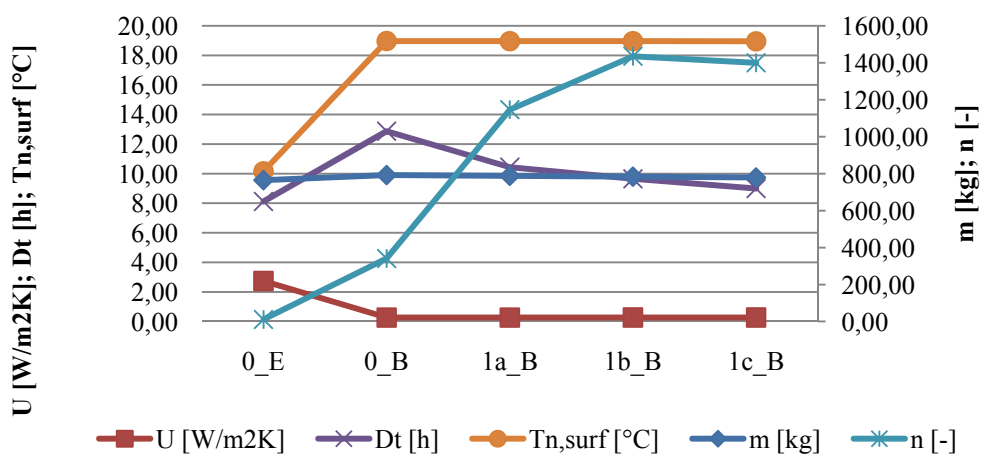
Preglednica 16: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov armiranobetonske zunanje stene

| <u>Aerogel</u> | | | | | | | <u>Polistiren</u> | | | | | | |
|---------------------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|-------------------------------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 764,7 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 | 0_E | 764,7 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 |
| 0_D | 772,2 | 0,25 | ni | 10,14 | 287,95 | 19,01 | 0_A | 766,8 | 0,27 | ni | 8,44 | 276,61 | 18,97 |
| 1a_D | 772,2 | 0,25 | ni | 8,33 | 1140,86 | 19,01 | 2a_A | 766,8 | 0,27 | ni | 6,64 | 1074,69 | 18,97 |
| 1b_D | 772,2 | 0,25 | ni | 8,19 | 1568,16 | 19,01 | 2b_A | 766,8 | 0,27 | ni | 6,52 | 1401,63 | 18,97 |
| 1c_D | 772,2 | 0,25 | ni | 8,18 | 1556,52 | 19,01 | 2c_A | 766,8 | 0,27 | ni | 6,52 | 1323,83 | 18,97 |
| <u>Kamena volna</u> | | | | | | | <u>Aerogel enaka debelina</u> | | | | | | |
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 0_E | 764,72 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 | 0_E | 764,72 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 |
| 0_B | 792,72 | 0,27 | ni | 12,87 | 340,76 | 18,97 | 0_C | 785,72 | 0,10 | ni | 17,09 | 1777,66 | 19,62 |
| 3a_B | - | - | - | - | - | - | 1a_C | 782,72 | 0,11 | ni | 13,74 | 4699,96 | 19,56 |
| 3b_B | 792,72 | 0,27 | ni | 10,92 | 1553,54 | 18,97 | 1b_C | 779,72 | 0,13 | ni | 12,04 | 4627,82 | 19,48 |
| 3c_B | 792,72 | 0,27 | ni | 10,94 | 1459,47 | 18,97 | 1c_C | 776,72 | 0,16 | ni | 10,43 | 3777,04 | 19,36 |

V primeru kombinacije polistirena na zunanji strani ter aerogelne izolacije na notranji opazim, da celo znižamo temperaturno zakasnitev konstrukcijskega sklopa glede na neizoliranega. Kar pomeni, da je ta ukrep precej slaba rešitev. Sicer bistveno izboljšamo temperaturno dušenje, vendar je zakasnitev tako ali tako pod kriterijem 8h. Do enakega pojava pride pri kombinaciji kamene volne in aerogelne izolacije. Pri premikanju navznoter temperaturni zamik pade, vendar tokrat ne pod določeno mejo. Kljub temu menim, da taka rešitev ni ugodna, a sprejemljivo pa bi izbral 1a_B, pri kateri je 1 cm aerogelne izolacije na notranji strani nosilne konstrukcije, na zunanji pa 12 cm kamene volne.



Grafikon 27: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in polistirena

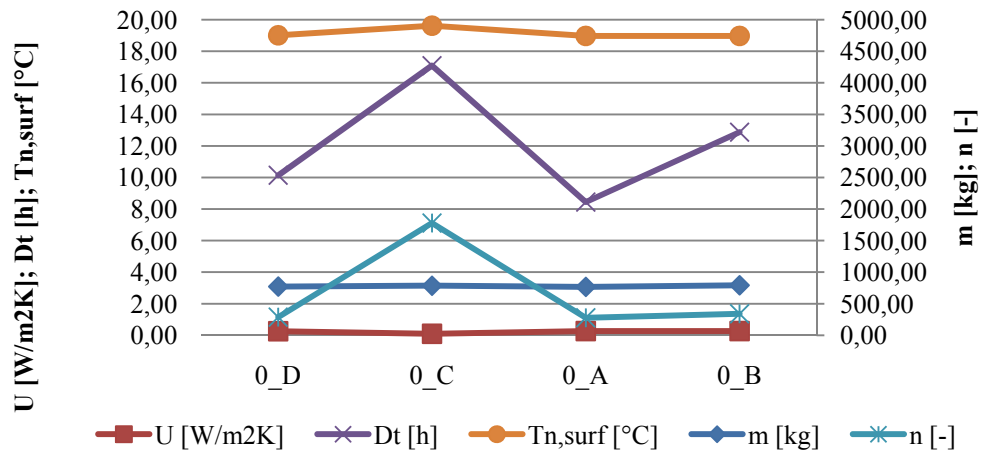


Grafikon 28: Primerjava variant s kombinacijo aerogelne izolacije in kamene volne

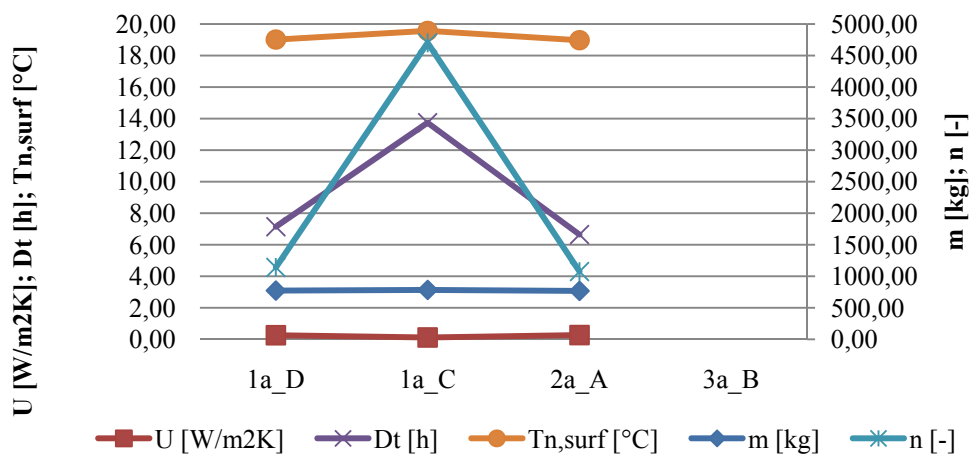
Preglednica 17: Primerjava rezultatov analize konstrukcijskih sklopov s kombiniranimi izolacijami – armiranobetonska zunanja stena

| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| 0_E | 764,72 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 | 0_E | 764,72 | 2,74 | NI OK | 8,12 | 10,85 | 10,15 |
| 0_A | 766,82 | 0,27 | ni | 8,44 | 276,61 | 18,97 | 0_B | 792,72 | 0,27 | ni | 12,87 | 340,76 | 18,97 |
| 1a_A | 767,87 | 0,27 | ni | 6,95 | 1042,03 | 18,96 | 1a_B | 788,22 | 0,27 | ni | 10,44 | 1145,98 | 18,96 |
| 1b_A | 768,92 | 0,27 | ni | 7,13 | 1378,99 | 18,96 | 1b_B | 783,72 | 0,27 | ni | 9,65 | 1435,28 | 18,96 |
| 1c_A | 769,97 | 0,27 | ni | 7,14 | 1345,81 | 18,95 | 1c_B | 779,22 | 0,27 | ni | 8,99 | 1399,80 | 18,95 |

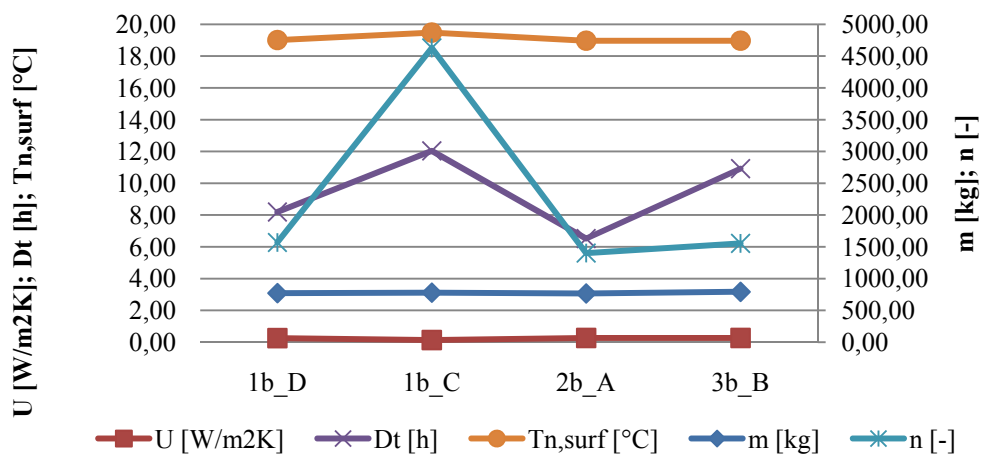
Neizolirani sklop je popolnoma neprimeren, saj je temperatura notranje površine prenizka in pride do pojava kondenzacije. Mejo rosišča na notranji površini sem izračunal v točki 2.7.1.6 in znaša 17,86 °C.



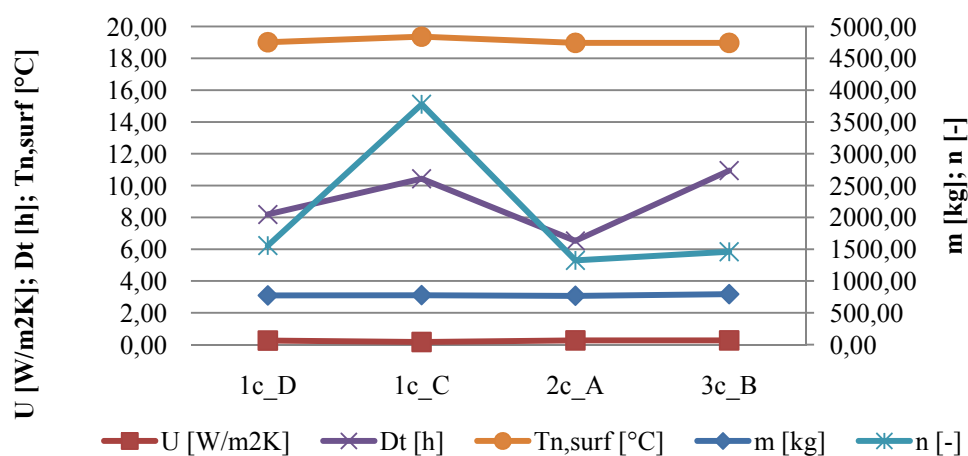
Grafikon 29: Toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije



Grafikon 30: Toplotna izolacija v plašču a



Grafikon 31: Toplotna izolacija v plašču b



Grafikon 32: Toplotna izolacija v plašču c

Preglednica 18: Primerjava sklopov z isto pozicijo toplotne izolacije in drugo vrsto materiala

| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|------|--------|-----------|-------------|--------|---------|--------------|
| 0_D | 772,22 | 0,25 | ni | 10,14 | 287,95 | 19,01 | 1a_D | 772,22 | 0,25 | ni | 7,14 | 1140,86 | 19,01 |
| 0_C | 785,72 | 0,10 | ni | 17,09 | 1777,66 | 19,62 | 1a_C | 782,72 | 0,11 | ni | 13,74 | 4699,96 | 19,56 |
| 0_A | 766,82 | 0,27 | ni | 8,44 | 276,61 | 18,97 | 2a_A | 766,82 | 0,27 | ni | 6,64 | 1074,69 | 18,97 |
| 0_B | 792,72 | 0,27 | ni | 12,87 | 340,76 | 18,97 | 3a_B | - | - | - | - | - | - |
| | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] | | m [kg] | U [W/m2K] | Konden. [-] | Δt [h] | v [-] | Tn,surf [°C] |
| 1b_D | 772,22 | 0,25 | ni | 8,19 | 1568,16 | 19,01 | 1c_D | 772,22 | 0,25 | ni | 8,18 | 1556,52 | 19,01 |
| 1b_C | 779,72 | 0,13 | ni | 12,04 | 4627,82 | 19,48 | 1c_C | 776,72 | 0,16 | ni | 10,43 | 3777,04 | 19,36 |
| 2b_A | 766,82 | 0,27 | ni | 6,52 | 1401,63 | 18,97 | 2c_A | 766,82 | 0,27 | ni | 6,52 | 1323,83 | 18,97 |
| 3b_B | 792,72 | 0,27 | ni | 10,92 | 1553,54 | 18,97 | 3c_B | 792,72 | 0,27 | ni | 10,94 | 1459,47 | 18,97 |

2.7.3.4 Primerjava izbranih optimalnih konstrukcijskih sklopov

Preglednica 19: Primerjava lastnosti izbranih optimalnih sklopov

| | m [kg] | U [W/m ² K] | t [h] | v [-] | T _{n,surf} [°C] |
|---|--------|------------------------|-------|---------|--------------------------|
| Opečna nosilna konstrukcija | 418,52 | 0,15 | 14,68 | 2839,73 | 19,4 |
| Nosilna konstrukcija iz lesenih križnolepljenih plošč | 83,22 | 0,09 | 14,09 | 1643,98 | 19,64 |
| Armiranobetonska nosilna konstrukcija | 776,72 | 0,13 | 12,04 | 4627,82 | 19,48 |

Legenda: **Zelena** – najbolj ugodno ; **Modra** – srednje ugodno ; **Rdeče** – najmanj ugodno

Če pogledamo rezultate, zbrane v preglednici 21, lahko zaključimo, da je sklop z leseno nosilno konstrukcijo iz križno lepljenih plošč najbolj ugoden, saj ima:

- najnižjo maso,
- najnižjo toplotno prehodnost,
- srednje velik temperaturni zamik,
- najnižje dušenje ter
- najvišjo temperaturno notranje površine.

Temperaturno dušenje se po definiciji nanaša na zmanjšanje notranje amplitude temperature od srednje vrednosti. Po starem jugoslovanskem standardu je bila vrednost najstrožjega pogoja $v > 15$. To pomeni, da je najmanjše dušenje v tem primeru še zmeraj tisočkrat večje od predpisanega v sedaj neveljavnem JUS standardu.. Najnižja toplotna prehodnost pomeni tudi največji toplotni upor sklopa in posledično tudi najmanjši vpliv notranje zračne plasti. Najnižja masa lahko konstrukcijsko pomeni velik prihranek pri drugih konstrukcijskih izzivih, pri ohranjeni toplotni stabilnosti. Temperaturna zakasnitev je velika in zadostna, čeprav ne največja in pomeni, da je konstrukcijskih sklop odporen proti pregrevanju. Rešitev 1b_C je prav tako cenejša v vseh primerih nosilne konstrukcije kakor rešitvi 0_C ter 1a_C, zaradi manj uporabljenih slojev aerogelne izolacije. Površinska temperatura je le za malenkost večja od ostalih dveh, kar je zanemarljivo malo, kot je lahko razvidno iz naslednje točke 2.7.3.5. Glede na metodo opredelitve še zmeraj da pozitiven končen rezultat.

2.7.3.5 Ocena toplotnega udobja

Poleg samih vrednosti iskanih parametrov enodimenzionalne analize za presojo vpliva uvedbe aerogelne izolacije v konstrukcijske sklope me je zanimalo, kako kvalitativno opredeliti spremembo temperature notranje površine. Način, kako določiti toplotno udobje, ki je še zmeraj v vsakdanji praksi prevečkrat zanemarjeno, predstavljata statistični metodi t. i. »Predicted mean vote, kratko PMV« metoda in t. i. »Percentage of people dissatisfied, kratko PPD«, ki sta definirani v mednarodnem standardu ISO 7730:1993, ki bazira na metodi, ki jo je razvil Fanger leta 1970. V diplomskem delu se v teoretično ozadje teh metod nisem poglobil.

Človekovo toplotno udobje je zelo kompleksen pojem dinamične narave. Nanj vplivajo spremenljivke, kot so temperatura zraka, hitrost gibanja zraka, relativna vlažnost, srednja sevalna temperatura obodnih površin, telesna aktivnost in toplotna upornost oblačil. Iz svoje enodimenzionalne analize sem pridobil podatke o temperaturi notranje površine, kar predstavlja izhodišče za nadaljnje delo. Ostale parametre bom predpostavil in jih skozi analizo zaradi primerljivosti rezultatov ne bom spreminjal. Preizkusni vzorec sem dobil na podlagi najvišje in najnižje temperature površine iz stacionarne analize konstrukcijskih sklopov. Temperaturo površine se izračunal s pomočjo razmerja uporov. Ostale temperature sem dobil z razdelitvijo spremembe na 5 intervalov. Na pravilnost rezultatov vpliva predvsem natančnost začetnih podatkov, zato smatram tudi rezultate te ocene za približne.

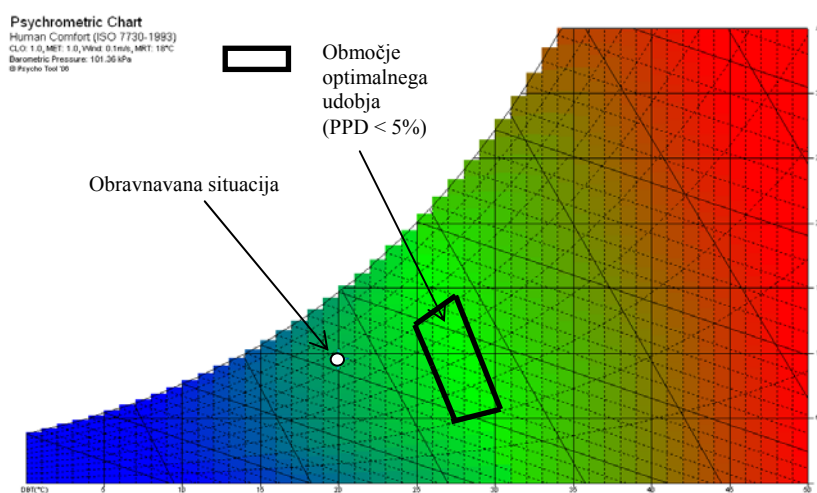
Preglednica 20: Vhodni podatki za analizo toplotnega ugodja

| | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------|
| Temperatura zraka [°C] | 20 | |
| Relativna vlažnost [%] | 65 | |
| Toplotna upornost oblačil [clo] | 1,0 (lahka poslovna obleka) | |
| Stopnja aktivnosti [met] | 1,0 (aktivnost v sedečem položaju) | |
| Hitrost premikanja zraka [m/s] | 0,1 | |
| Temperatura okoliških površin [°C] | Primeri | |
| | V1 | 18,9 |
| | V2 | 19,1 |
| | V3 | 19,3 |
| | V4 | 19,5 |
| | V5 | 19,7 |

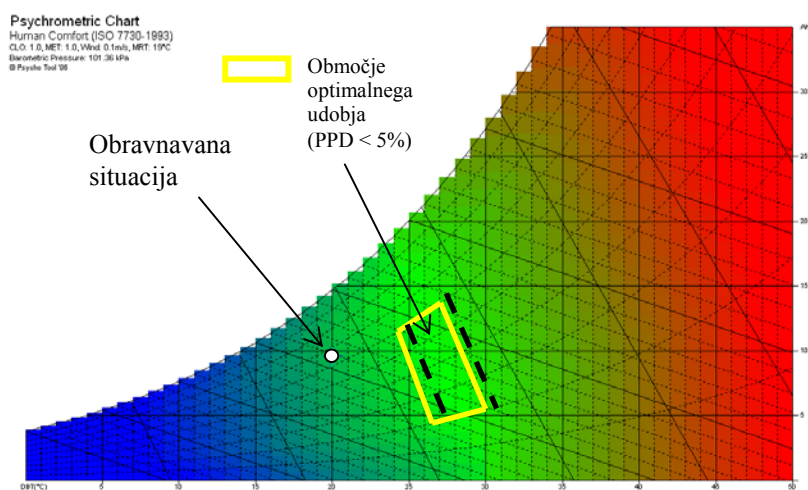
Za analizo sem uporabil programsko orodje Psychrometric Tool, ki ga je razvilo podjetje Square One.

Preglednica 21: Rezultati analize toplotnega udobja

| | Temperatura obodnih površin [°C] | PMV [-] | PPD [%] |
|----|----------------------------------|---------|---------|
| V1 | 18,9 | -0,94 | 23 |
| V2 | 19,1 | -0,9 | 22 |
| V3 | 19,3 | -0,89 | 21 |
| V4 | 19,5 | -0,85 | 20 |
| V5 | 19,7 | -0,83 | 19 |



Slika 8: Psihrometrična karta PI s prikazom PMV faktorja



Slika 9: Psihrometrična karta PV s prikazom PMV faktorja

Iz preglednice 21 je razvidno, da sprememba temperature notranje površine za 0,8 °C pri danih razmerah pomeni, da bo odstotek nezadovoljnih ljudi za 4 % manjši, relativno pa to pomeni 27 % izboljšanje. Zmanjšanje deleža nezadovoljnih ljudi z izhodiščne vrednosti 23 % za četrtno na 19% je opazna sprememba in z vidika zagotavljanja toplotnega udobja tudi pomembna. Kaj ta sprememba pomeni z vidika ekonomske upravičenosti ukrepa uporabe enake debeline aerogelne toplotne izolacije pa je zelo težko oceniti. Omejil se bom na globalno oceno, da je učinek omenjenega ukrepa pozitiven in doprinaša k vrednosti aplikacije aerogelne odeje.

Iz slike 9 je razvidno, kako se pri obravnavanem ukrepu s katerim povišamo temperaturo notranje površine stene premaknejo meje območja toplotnega udobja proti točki, ki predstavlja dane razmere v prostoru. Da bi bil delež zadovoljnih ljudi višji bi morali prostor ali ogrevati ali pa adiabatno povišati temperaturo s tem, da bi hkrati zmanjšali relativno vlago s kemičnim sušenjem oziroma absorberji vlage.

2.8 Analiza križanj konstrukcijskih sklopov – 2D analiza

Cilj analize dvodimenzionalnega temperaturnega polja je ugotoviti, ali uporaba učinkovitejše toplotne izolacije v enaki debelini običajne toplotne izolacije na kritičnih mestih toplotnih mostov zmanjša možnost nastajanja plesni in rasti mahov in v kakšnem obsegu zadostuje nadomestitev standardne toplotne izolacije (razdalja od kritične točke). Hkrati je namen ugotoviti tudi vpliv takšnega posega v okolici kritičnega mesta.

2.8.1 Določitev parametrov

Osnovni parameter za opis vpliva je sicer temperatura notranje površine, vendar za bolj celovito oceno potrebujemo kar celotno temperaturno polje ter tudi polje gostote toplotnega toka. Le tako lahko prikažem, da ima uvedba enake debeline učinkovitejšega toplotno izolacijskega materiala vpliv na toplotno odziv konstrukcijskega sklopa, kljub morda zelo majhnim razlikam v površinski temperaturi na kritičnem mestu. Omenjeno je prišlo prišlo v upoštevanju pri križanju sklopov nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih masivnih plošč oblike L ter X.

2.8.2 Programsko orodje ABAQUS

Za simulacijo ravninskega temperaturnega polja ter gostote toplotnega toka sem uporabil programski paket ABAQUS, ki temelji na metodi končnih elementov. Program v splošnem predstavlja orodje, v katerem je mogoče modelirati in raziskovati najzahtevnejše naravne pojave in tehnične probleme. Uporabnik mora biti pred uporabo programa dodobra seznanjen s fizikalnim pojavom ter teoretično podlago za njegovo modeliranje.

Analizo prenosa toplote opravimo z modulom ABAQUS Standard, osnovno modeliranje pa z grafičnim vmesnikom ABAQUS CAE, v katerem je omogočena tudi končna vizualizacija rezultatov. V primeru stacionarne analize prenosa toplote za pridobitev ravninskega temperaturnega polja zadostuje, da določimo vsem uporabljenim materialom le njihovo toplotno prevodnost. Naj še omenim, da sem za omenjeno analizo uporabil štiri vozliščne končne elemente tipa DS4.

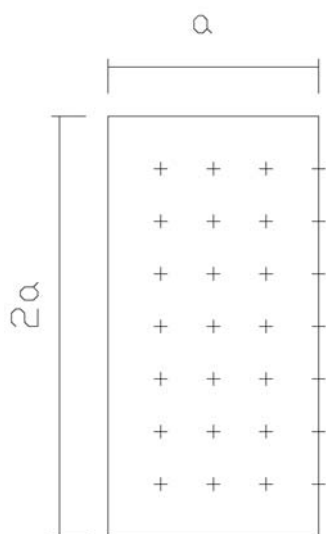
2.8.3 Model in kontrola modela

Standard SIST EN ISO 10211:2008 predpisuje, da je potrebno sestavo križanja konstrukcijskih sklopov modelirati do 1m od opazovanega mesta. Zanimarimo lahko sloje, ki niso kovinski in so tanjši od 1mm, oziroma metalne sloje, katerih vpliv je zanemarljiv (npr. parna zapora). Kot kontrolo korektnosti dvodimenzionalnega modela in mreže končnih elementov predpisuje standard dva standardna preizkusa.

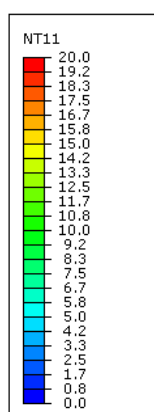
2.8.3.1 Test modela – A

Prvi testni model predstavlja prečni prerez polovice kvadratnega stebra z znanimi površinskimi temperaturami. Analitična rešitev je podana v 28 točkah ekvidistančne mreže. Dovoljena razlika med analitičnim rezultatom in rezultatom, pridobljenim z numeričnim modelom, ne sme preseči 0,1 K.

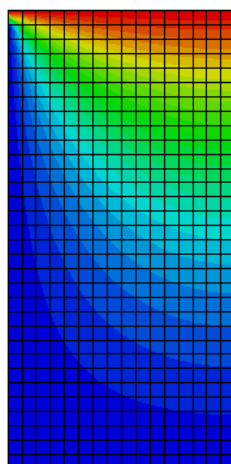
Na sliki 12 je prikazan graf porazdelitve temperature, v preglednici 22 pa so zbrani rezultati v 28 referenčnih točkah iz katerih je možno razbrati, da razlika med temperaturama, izračunanima po analitični in numerični metodi, v nobenem primeru ne preseže 0,1 K.



Slika 10: Skica kontrolnih točk



Slika 11: Prikaz rezultata z obarvanimi polji



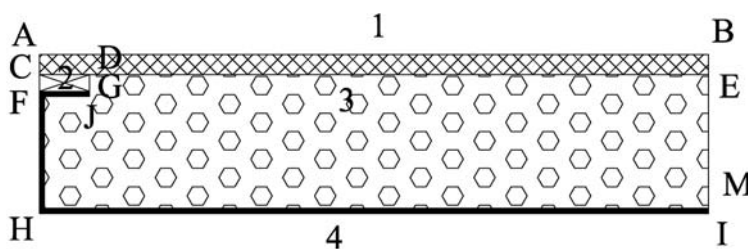
Slika 12: Prikaz rezultata z izotermami

Preglednica 22: Temperatura v kontrolnih točkah – kontrolni model A

| $T_{\text{standard}} [^{\circ}\text{C}]$ | | | | $T_{\text{model}} [^{\circ}\text{C}]$ | | | | $\Delta T [\text{K}]$ | | | |
|--|------|------|------|---------------------------------------|------|------|------|-----------------------|------|-----|-----|
| 9,7 | 13,4 | 14,7 | 15,1 | 9,7 | 13,4 | 14,7 | 15,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 5,3 | 8,6 | 10,3 | 10,8 | 5,3 | 8,7 | 10,3 | 10,8 | 0,0 | -0,1 | 0,0 | 0,0 |
| 3,2 | 5,6 | 7,0 | 7,5 | 3,2 | 5,6 | 7,0 | 7,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2,0 | 3,6 | 4,7 | 5,0 | 2,0 | 3,6 | 4,7 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 1,3 | 2,3 | 3,0 | 3,2 | 1,3 | 2,3 | 3,0 | 3,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 0,7 | 1,4 | 1,8 | 1,9 | 0,7 | 1,4 | 1,8 | 1,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 0,3 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

2.8.3.2 Test modela – B

Na sliki 13 je prikazan drugi testni model z bolj kompleksno sestavo različnih materialov.



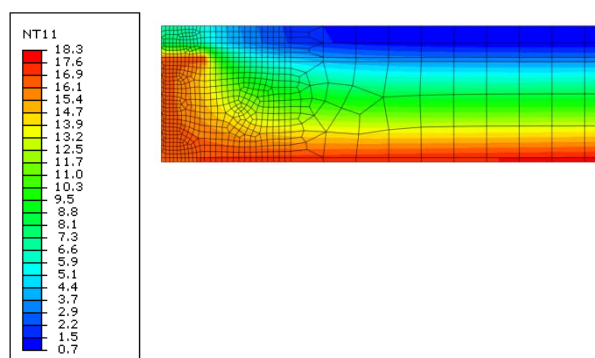
Slika 13: Skica kontrolnega elementa B

Preglednica 23: Materiali uporabljeni v kontrolnem modelu B

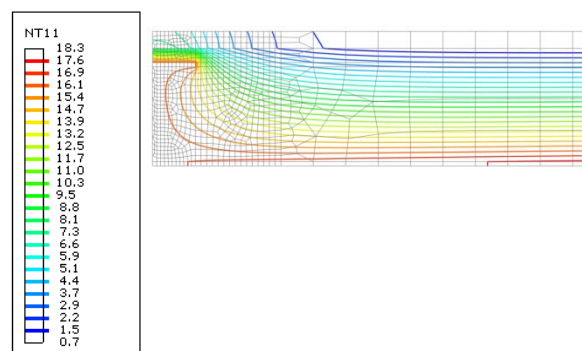
| Oznaka | Material | Debelina [cm] | Toplotna prevodnost [W/mK] |
|--------|--------------------|---------------|----------------------------|
| 1 | beton | 6 | 1,15 |
| 2 | les | 5 | 0,12 |
| 3 | toplotna izolacija | 40 | 0,029 |
| 4 | aluminij | 0,15 | 230 |

Preglednica 24: Robni pogoji – kontrolni model B

| Rob | Temperatura [°C] | Toplotni upor [m ² K/W] |
|-----|------------------|------------------------------------|
| AB | 0 | R _{se} = 0,06 |
| HI | 20 | R _{si} = 0,11 |



Slika 14: Prikaz rezultata z obarvanimi polji



Slika 15: Prikaz rezultata z izotermami

Razlika v temperaturi preseže vrednost 0,1 K le v eni točki. Model vseeno smatram za primeren.

Preglednica 25: Temperatura v kontrolnih točka – kontrolni model B

| Točka | T _{standard} | T _{model} | ΔT |
|-------|-----------------------|--------------------|-------------|
| A | 7,1 | 6,96 | 0,14 |
| B | 0,8 | 0,76 | 0,04 |
| C | 7,9 | 7,81 | 0,09 |
| D | 6,3 | 6,23 | 0,07 |
| E | 0,8 | 0,83 | 0,03 |
| F | 16,4 | 16,39 | 0,01 |
| G | 16,3 | 16,32 | 0,02 |
| H | 16,8 | 16,75 | 0,05 |
| I | 18,3 | 18,33 | 0,03 |

Tudi kontrola skupnega toplotnega toka je izpolnjena, saj standard zahteva, da je integral gostote toplotnega toka na robu HI enak 9,5 W/m, sam pa sem dobil rezultat 9,4 W/m, kar je v mejah dovoljenega odstopanja 0,1 W/m.

2.8.4 Dodatna razdelitev vzorca

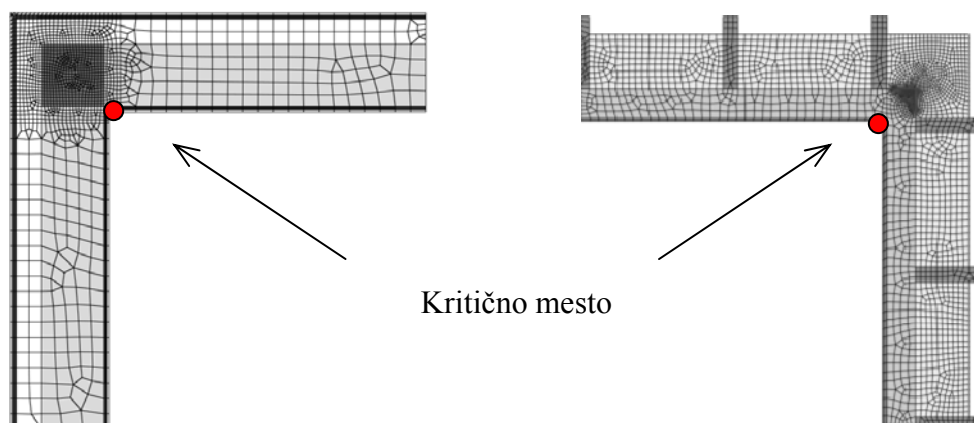
Vzorec primerov za analizo vplivov uvedbe učinkovitejše toplotne izolacije na razporeditev temperature po prečnem prerezu konstrukcijskega sklopa sem določil tako, da sem ponovno za vse že obravnavane materiale za nosilno konstrukcijo (opeka, armirani beton, križno lepljena lesena plošča) zasnoval L, T in X križanja ter za vsak posamezni tip po potrebi določil nekaj pozicij oziroma kombinacij izolacijskih materialov. Privzeti toplotni prevodnosti polistirena in kamene volne sta enaki, zato je tudi vzorec manjši po obsegu.

Preglednica 26: Število analiziranih variant križanj konstrukcijskih sklopov

| | Opeka | Lesena križno lepljena plošča | Armiran beton |
|----------------|-------|-------------------------------|---------------|
| križanje L | 4 | 4 | 4 |
| križanje T - a | 3 | 3 | 2 |
| križanje T - b | 3 | - | 3 |
| križanje K | 5 | 2 | 5 |

2.8.5 Rezultati in komentar

2.8.5.1 Križanje L



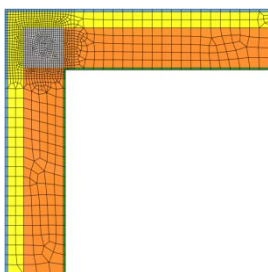
Slika 16: Kontrolno mesto – L križanje

Pri križanjih tipa L (npr. stik zunanjih sten) obravnavamo le eno kritično mesto oziroma območje, to je notranji vogal. To mesto je mnogokrat problematično, ne samo zaradi geometrijskega toplotnega mostu, ampak tudi zaradi tega, ker uporabimo bolj toplotno prevodni material za konstrukcijsko vez v vogalu. V praksi obstajajo mnoge rešitve tega problema, mene pa je zanimalo, ali se da omenjeni problem rešiti preprosteje samo z uporabo učinkovitejše toplotne izolacije v tem območju.

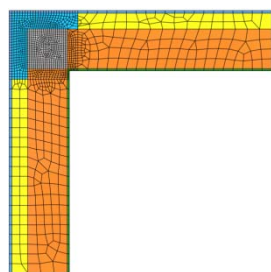
Obravnaval sem le variante z uporabo enake debeline toplotne izolacije iz aerogela, kot je potrebna v primeru uporabe polistirena ali kamene volne. V kolikor bi uporabil ekvivalentno debelino, ne bi spremenil situacije na notranji strani konstrukcije, dobil bi enako absolutno spremembo temperature znotraj nje, vendar z višjim gradientom, saj bi bil sloj tanjši.

Kot kritično temperaturo notranje površine sem vzel njeno predhodno izračunano vrednost po postopku, prikazanem v točki 2.7.1.6 te diplome.

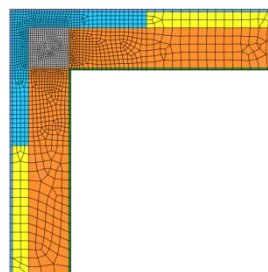
2.8.5.1.1 Opečna nosilna konstrukcija



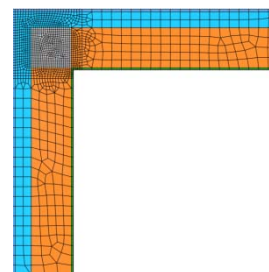
Slika 17: Polistiren - PI



Slika 18: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII



Slika 19: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PIII

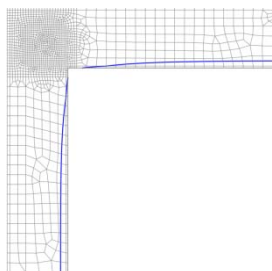


Slika 20: Aerogelna izolacija - PIV

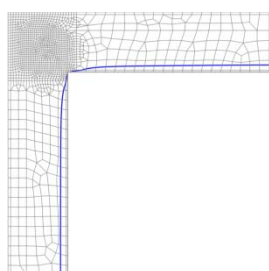
Preglednica 27: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII | PIV |
|---|------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 15,7 | 17,2 | 18,1 | 18,2 |

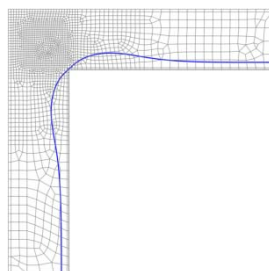
Iz rezultatov, zbranih v zgornji tabeli, lahko zaključim, da je v primeru uporabe polistirena ali kamene volne temperatura na kritičnem mestu precej pod dovoljeno računsko temperaturo površine in je zato detajl podvržen možnosti rasti mahov in plesni. Problem bi teoretično odpravili, če bi vogal zunanje stene izolirali v kombinaciji z aerogelno izolacijo v območju do 0,5 m od notranje kritične točke. Če bi zunanjo steno v celoti izolirali z aerogelno izolacijo, vidimo, da bi bila sprememba temperature v kritični točki zanemarljivo majhna. Kljub temu, pa ne smemo izpustiti ostalih pozitivnih učinkov, ki jih doprinese uvedba enake debeline aerogelne toplotne izolacije. S slike 24 je razvidno, da se kritična temperatura pomakne močno proti zunanosti. Zaradi zmanjšane toplotne prehodnosti je poraba energije manjša, spremenijo pa se tudi ostali parametri, ki opisujejo enodimenzionalni odziv konstrukcijskega sklopa, kot obravnavano v poglavju 2.7.



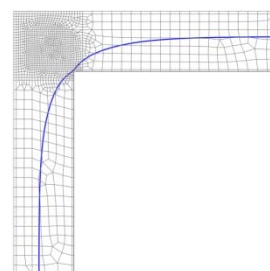
Slika 21: Potek kritične temperature – IV



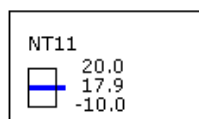
Slika 22: Potek kritične temperature – PII



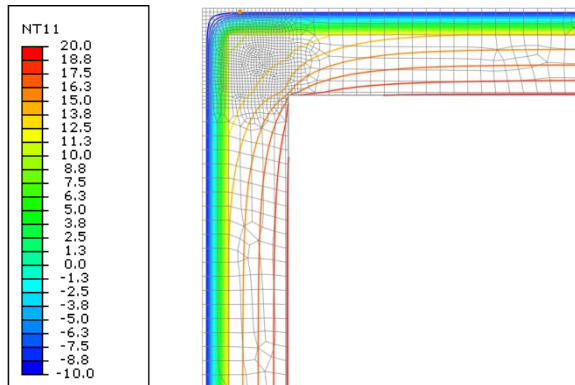
Slika 23: Potek kritične temperature – PI



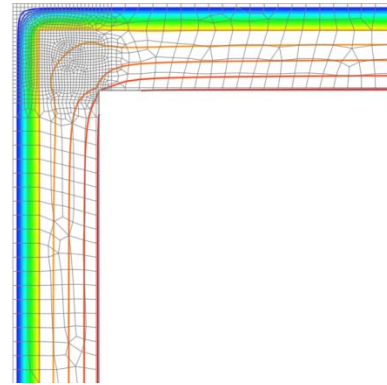
Slika 24: Potek kritične temperature – PIII



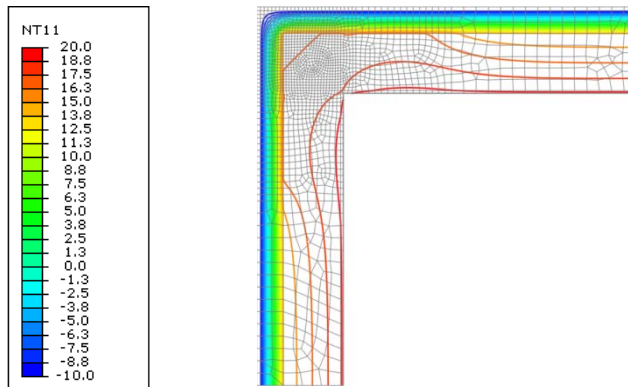
Na slikah 21-24 je prikazan potek kritične površinske temperature, kjer se lepo vidi vpliv izvedenih ukrepov. V primeru uporabe kamene volne ali polistirena se vidi, da je problematično celotno območje ob vogalu. V primeru uporabe aerogelne izolacije samo v območju vogala površinska temperatura pade pod 17,9 °C le v strogi konici vogala.



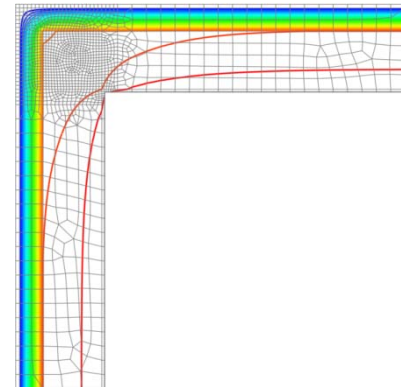
Slika 25: Temperaturno polje PI



Slika 26: Temperaturno polje PII



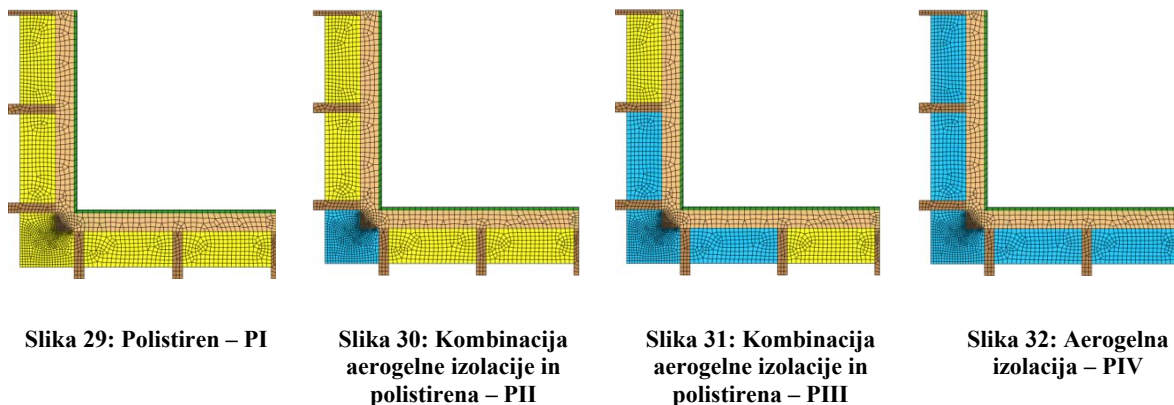
Slika 27: Temperaturno polje PIII



Slika 28: Temperaturno polje PIV

Iz slik 25-28 pa lahko razberemo, da se na mestu, kjer uporabimo enako debelino učinkovitejše izolacije, kakor je potrebna debelina polistirena, izoterme pomaknejo navzven, kar pomeni, da je gradient v toplotni izolaciji še večji. To dejstvo je posledica spremembe razmerij toplotnih uporov posameznih slojev. Največji temperaturni gradient odpade na toplotno izolacijski sloj, saj ima ta največji toplotni upor.

2.8.5.1.2 Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

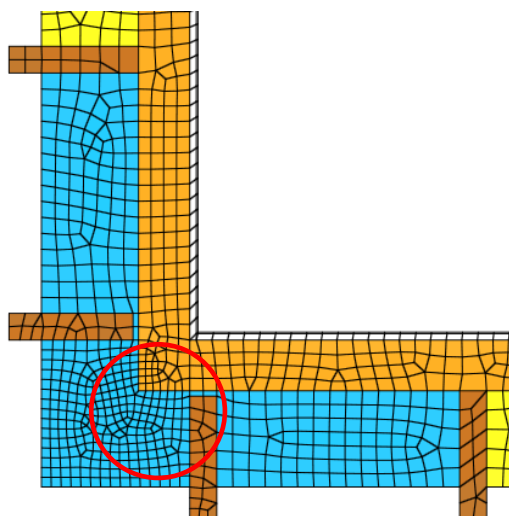


Preglednica 28: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII | PIV |
|---|------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 16,8 | 17,4 | 17,8 | 17,8 |

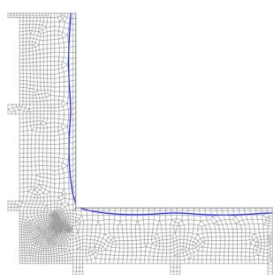
V tem primeru nosilne konstrukcije nastopajo poleg geometrijskega toplotnega mostu še konstrukcijski problemi zaradi načina izvedbe sekundarne nosilne konstrukcije, ki nosi zunanjo fasadno oblogo. Opazimo, da je pri izhodiščni varianti sicer temperatura v kritični točki nekoliko višja kakor v primeru nehomogene opečne nosilne konstrukcije z armirano betonsko vezjo, vendar se zmeraj 1 °C pod računsko kritično temperaturo. Če uporabimo izolacijo iz aerogela samo v vogalnem predelu, temperaturo površine na kritičnem mestu dvignemo za 0,6 °C, če pa to storimo še v dodatnem polju med elementi sekundarne nosilne konstrukcije, sprememba naraste na 1 °C in se močno približa kritični meji.

V primeru, da bi popolnoma nadomestili izolacijo iz polistirena ali kamene volne z aerogelno izolacijo, se iskana temperatura ne spremeni več, kar pomeni, da prevlada vpliv lokalnih konstrukcijskih toplotnih mostov. To lahko prikažem z enostavno spremembo primera PIII, ko pod lesena morala najbližje vogalu namestim 1 cm aerogelne izolacije (slika 33). Temperatura na kritičnem mestu tako naraste na 18 °C. Na podlagi tega rezultata bi predlagal, da se sestava konstrukcijskega sklopa nadgradi z dodatnim slojem aerogelne toplotne izolacije med sekundarno ter primarno nosilno konstrukcijo.

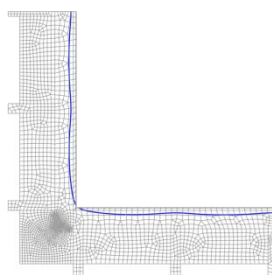


Slika 33: Detajl PV

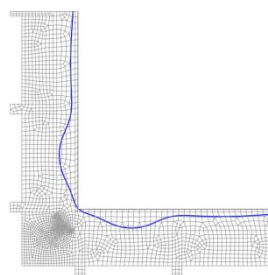
Na slikah 34-37 je lepo razvidno, kako se spreminja vpliv konstrukcijskih prekinitev toplotne izolacije ob postopni uvedbi enake debeline učinkovitejše izolacije. Temperaturni gradient se v izoliranih predelih pomakne proti zunanosti, hkrati pa je zelo neenakomeren ob prekinitvah toplotne izolacije.



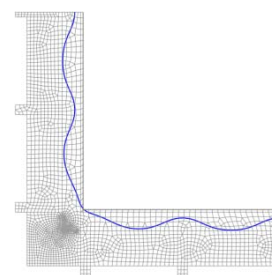
Slika 34: Potek kritične temperature – PI



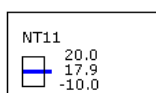
Slika 35: Potek kritične temperature – PII

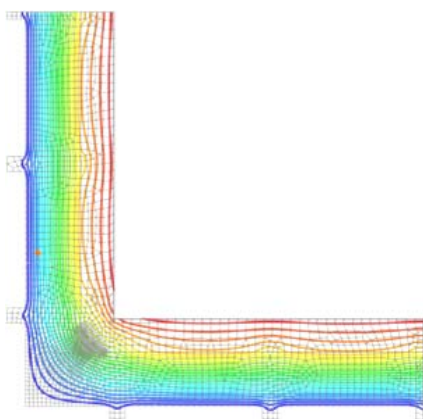
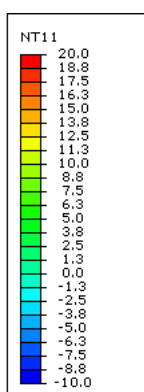


Slika 36: Potek kritične temperature – PIII

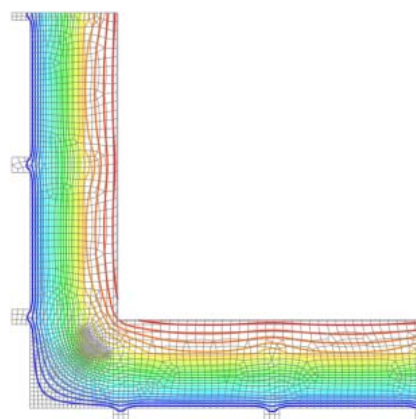


Slika 37: Potek kritične temperature – IV

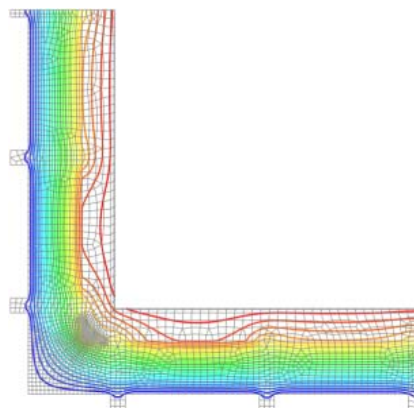
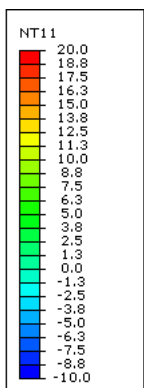




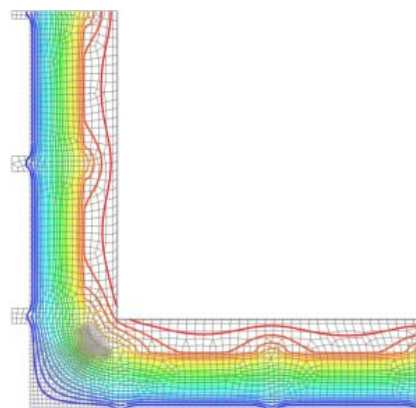
Slika 38: Temperaturno polje PI



Slika 39: Temperaturno polje PII



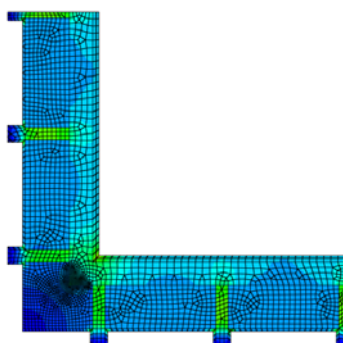
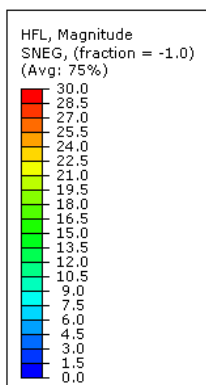
Slika 40: Temperaturno polje PIII



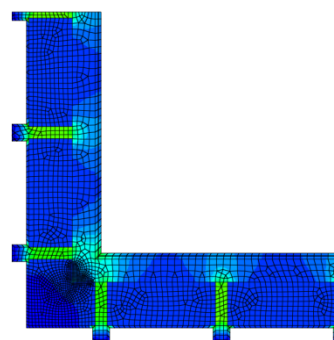
Slika 41: Temperaturno polje PIV

Kako vplivajo prekinitve toplotne izolacije ter hkrati celovita zamenjava polistirena z aerogelno izolacijo, lahko preverimo tudi s pomočjo diagramov toplotnega toka.

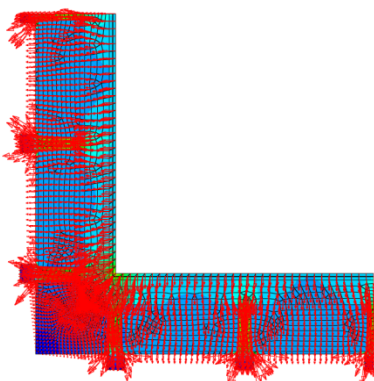
Na slikah 42-45 je razvidno, da se sicer gostota toplotnega toka, izražena v W/m^2 , skozi izolirani del občutno zmanjša, še posebej v vogalnem delu, vendar se toplotni tok, ki teče skozi toplotno oslajljena mesta, nekoliko poveča. Celovito rešitev problema bi zagotovili le, če bi namestili nekaj aerogelne izolacije pod vsak leseni moral.



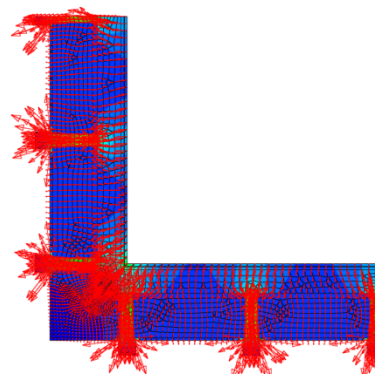
Slika 42: Razporeditev gostote toplotnega polja – PI



Slika 43: Razporeditev gostote toplotnega polja - PII

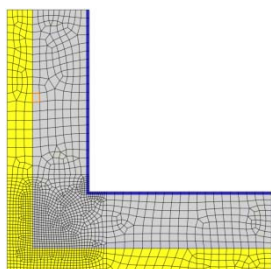


Slika 44: Razporeditev gostote toplotnega polja – PIII

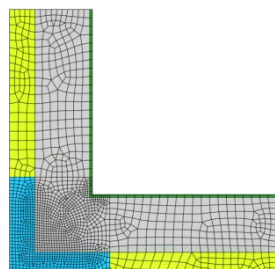


Slika 45: Razporeditev gostote toplotnega polja - PIV

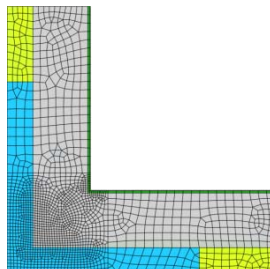
2.8.5.1.3 Armiranobetonska nosilna konstrukcija



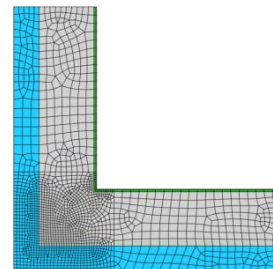
Slika 46: Polistiren – PI



Slika 47: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PII



Slika 48: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII

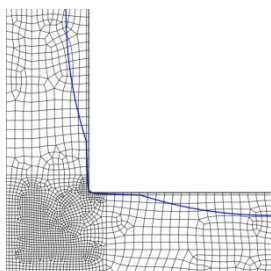


Slika 49: Aerogelna izolacija – PIV

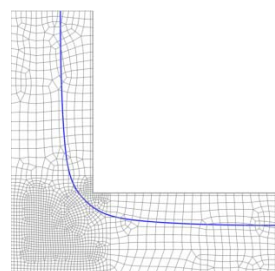
Preglednica 29: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII | PIV |
|---|------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 17,5 | 18,3 | 18,9 | 19,1 |

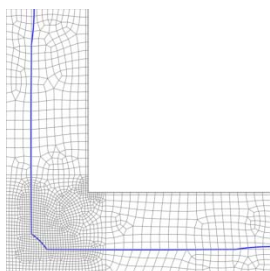
Armiranobetonska konstrukcija ima pri izhodiščni varianti najvišjo temperaturo, ki je posledica tega, da je beton dobro toplotno prevoden in je v splošnem zaradi tega v njem majhen temperaturni gradient. To hkrati pomeni, da skozenj teče višji toplotni tok. Problem geometrijskega toplotnega mostu z vidika računske kritične temperature rešimo že z nadomestilom kamene volne ali polistirena v vogalnem območju, kar ponazarja primer PII. S slik 50-53 je razvidno, da z uvedbo aerogelne izolacije z vsakim korakom potisnemo izotermo, ki ponazarja temperaturo rosišča na notranji površini stene čedalje bolj navzven.



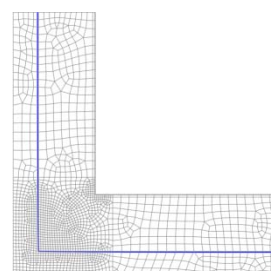
Slika 50: Potek kritične temperature – PI



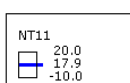
Slika 51: Potek kritične temperature – PII

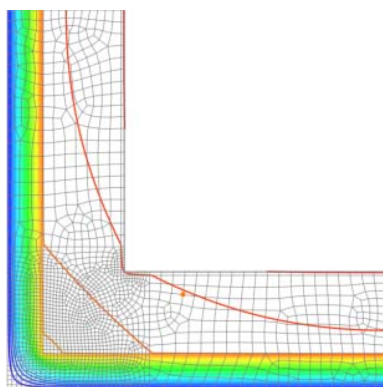
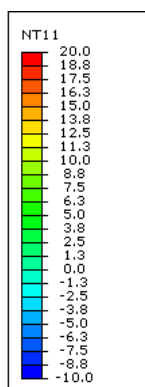


Slika 52: Potek kritične temperature – PIII

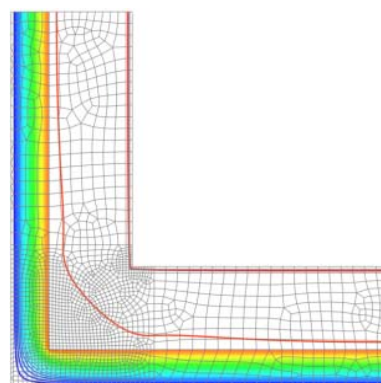


Slika 53: Potek kritične temperature – PIV

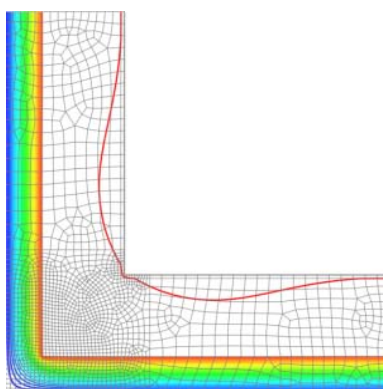
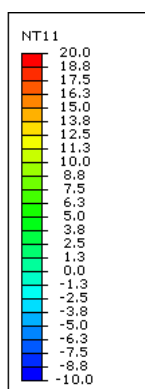




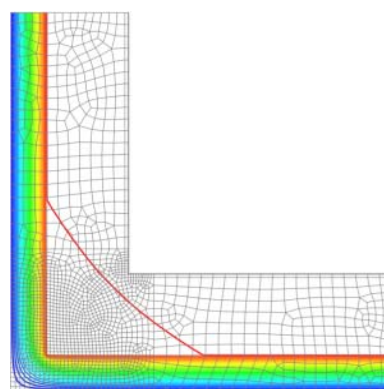
Slika 54: Temperaturno polje PI



Slika 55: Temperaturno polje PII

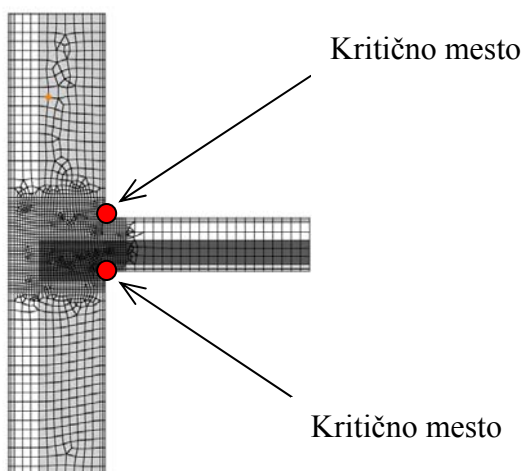


Slika 56: Temperaturno polje PIII

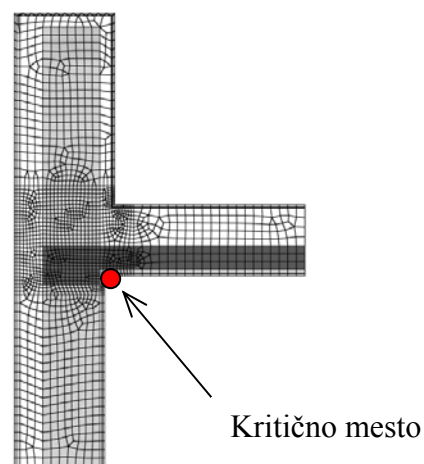


Slika 57: Temperaturno polje PIV

2.8.5.2 Križanje T



Slika 58: Kontrolna mesta – T križarjenje

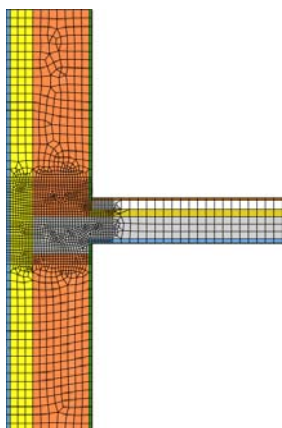


Slika 59: Kontrolna mesta – T križarjenje

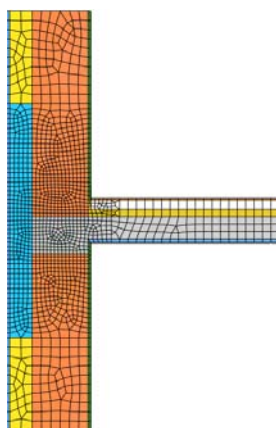
Pri križanju tipa T sem obravnaval dva splošna primera križanja zunanje stene z medetažno konstrukcijo ter križanje z strešno konstrukcijo. V prvem sta kritični mesti dve, vogal na spodnji in zgornji strani medetažne konstrukcije, v drugem pa le en vogal na notranji strani konstrukcije. V obeh primerih je vzrok geometrija ter nehomogena sestava konstrukcijskih sklopov.

2.8.5.2.1 Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije

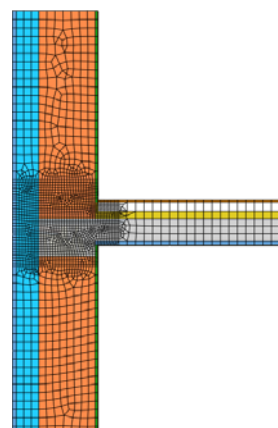
2.8.5.2.1.1 Opečna nosilna konstrukcija



Slika 60: Polistiren - PI



Slika 61: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII

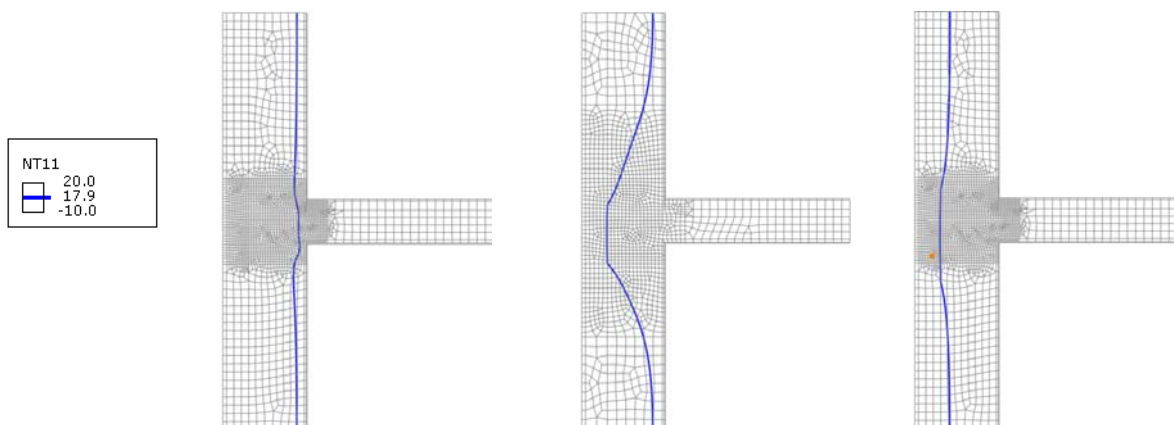


Slika 62: Aerogelna izolacija - PIII

Preglednica 30: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII |
|--|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu zgoraj [°C] | 18,9 | 19,6 | 19,6 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu spodaj [°C] | 18,2 | 19,2 | 19,3 |

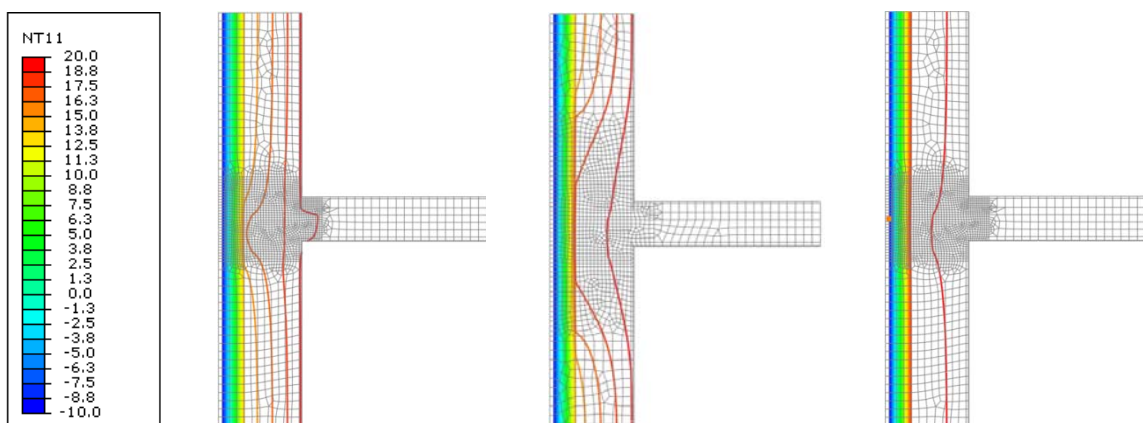
V obravnavanem križanju tudi v izhodiščnem primeru temperatura ne pade pod računsko kritično temperaturo. Zopet med primeroma PII in PIII ni omembe vredne razlike. V primeru uporabe le aerogelne izolacije je razpored temperature po prečnem prerezu že zelo podoben razporeditvi v homogenem konstrukcijskem sklopu.



Slika 63: Potek kritične temperature – PI

Slika 64: Potek kritične temperature – PII

Slika 65: Potek kritične temperature – PIII

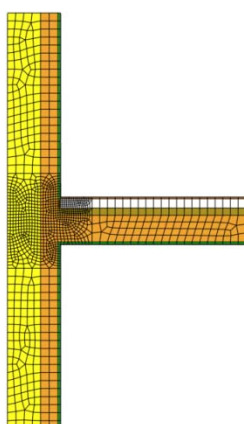


Slika 66: Temperaturno polje PI

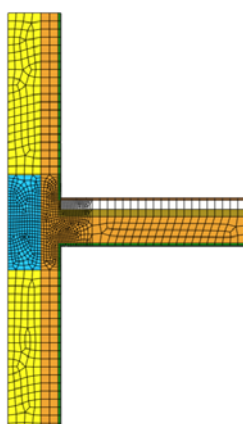
Slika 67: Temperaturno polje PII

Slika 68: Temperaturno polje PIII

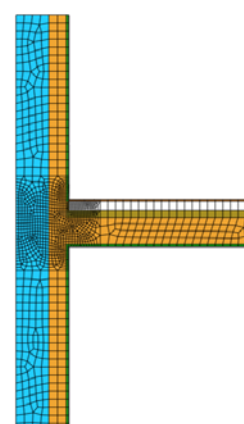
2.8.5.2.1.2 Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč



Slika 69: Polistiren – PI



Slika 70: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII

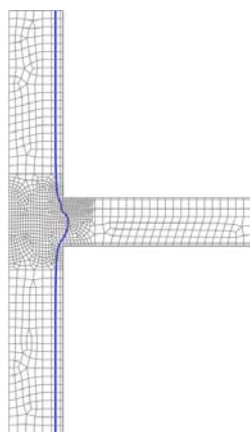
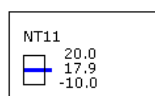


Slika 71: Aerogelna izolacija - PIII

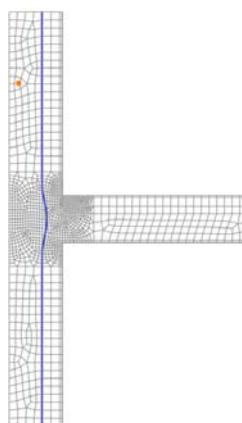
Preglednica 31: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII |
|--|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu zgoraj [°C] | 19,0 | 19,5 | 19,6 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu spodaj [°C] | 18,7 | 19,3 | 19,4 |

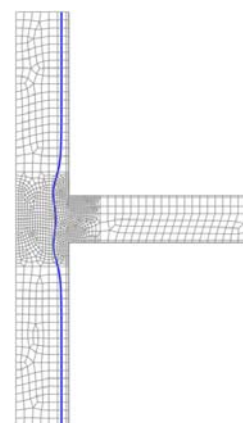
Takšno križanje tipa T prav tako ni problematično. Vsi trije primeri PI, PII, PIII imajo zelo podoben rezultat kakor enaki primeri z uporabo opečne nosilne konstrukcije. Zanimivo je, da ima osnovni konstrukcijski sklop, v katerem je uporabljena lesena križno lepljena plošča, toplotno prehodnost skoraj za tretjino nižjo ($U_{les} = 0,19 \text{ W/m}^2 \text{ K}$) kakor konstrukcijski sklop z opečnim modularnim blokom v funkciji primarne nosilne konstrukcije ($U_{opeka} = 0,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), vendar se temperatura na kritičnih mestih razlikuje le za nekaj desetink K.



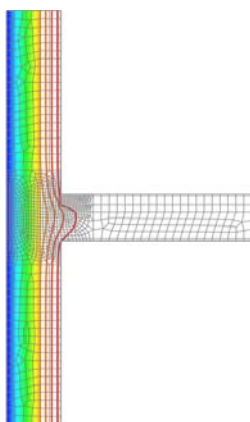
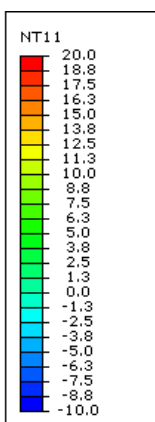
Slika 72: Potek kritične temperature – PI



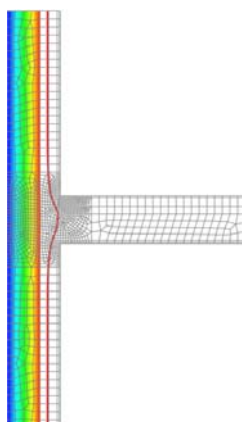
Slika 73: Potek kritične temperature – PII



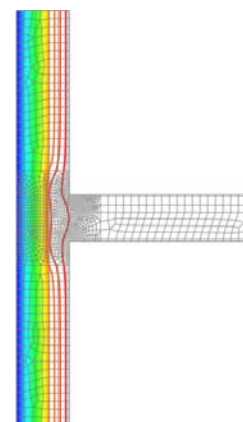
Slika 74: Potek kritične temperature – PIII



Slika 75: Temperaturno polje PI

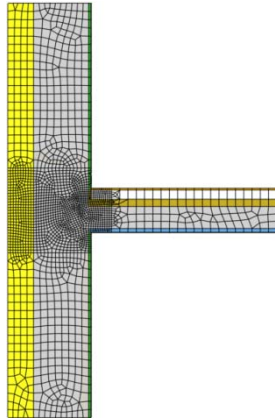


Slika 76: Temperaturno polje PII

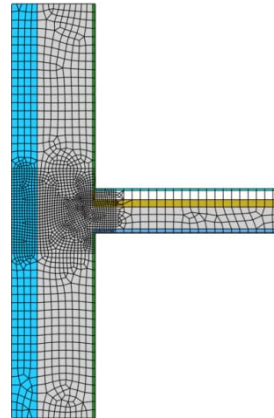


Slika 77: Temperaturno polje PIII

2.8.5.2.1.3 Armiranobetonska nosilna konstrukcija



Slika 78: Polistiren – PI

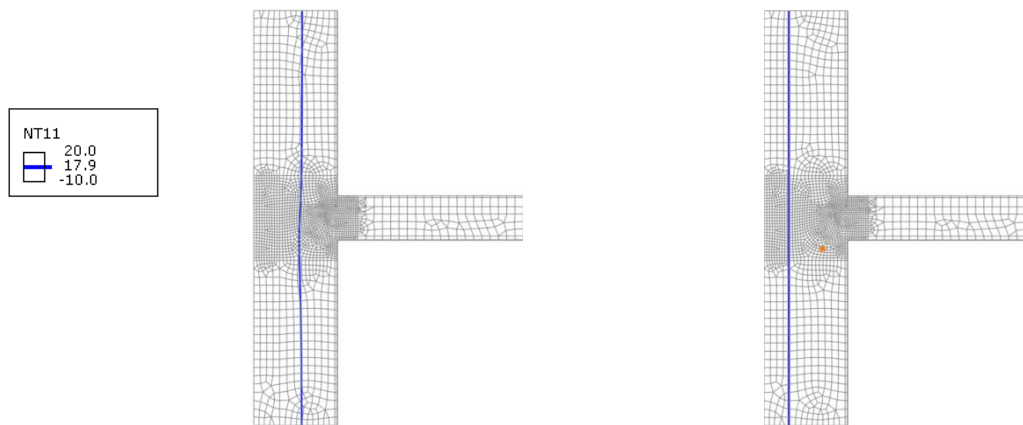


Slika 79: Aerogelna izolacija – PII

Preglednica 32: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

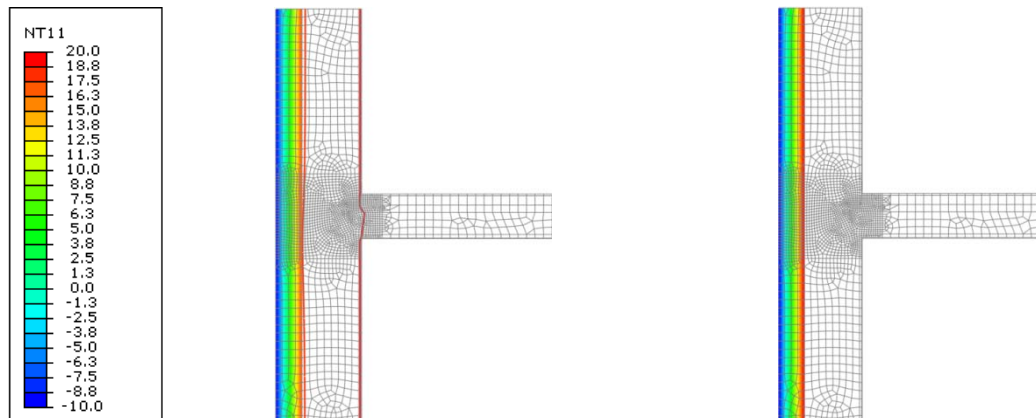
| | PI | PII |
|--|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu zgoraj [°C] | 19,0 | 19,6 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu spodaj [°C] | 18,8 | 19,6 |

V primeru uporabe armiranega betona za nosilno konstrukcijo se izkaže, da je rezultat praktično enak rezultatu v primeru uporabe masivne lesene plošče. Razlika v temperaturi na kontrolnih mestih med različnima izolacijskima materialoma je tudi tu opazna, sama razporeditev temperature po prerezu pa je nekoliko drugačna. Armirani beton je material, ki zlahka prevaja in shranjuje toploto, zato je v stacionarnem stanju temperaturni gradient znotraj tega materiala majhen. Izoterma, ki prikazuje kritično površinsko temperaturo, je pomaknjena močno v notranjost konstrukcijskega sklopa, njena oblika pa se skoraj ne spremeni v območju stika med konstrukcijskima elementoma. Križanje torej z vidika rasti mahov ali nastajanja plesni ni problematično v nobenem primeru uporabe različnih izolacijskih materialov. Variant s kombinacijo materialov nisem obravnaval, saj geometrijski toplotni most ni problematičen, razlika med obravnavanima primeroma je le gostota toplotnega toka.



Slika 80: Potek kritične temperature – PI

Slika 81: Potek kritične temperature – PII

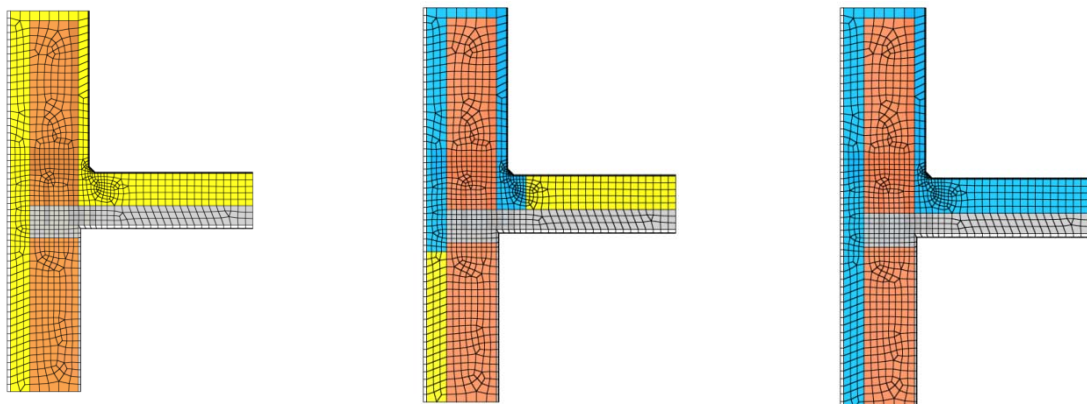


Slika 82: Temperaturno polje PI

Slika 83: Temperaturno polje PII

2.8.5.2.2 Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije

2.8.5.2.2.1 Opečna nosilna konstrukcija



Slika 84: Polistiren - PI

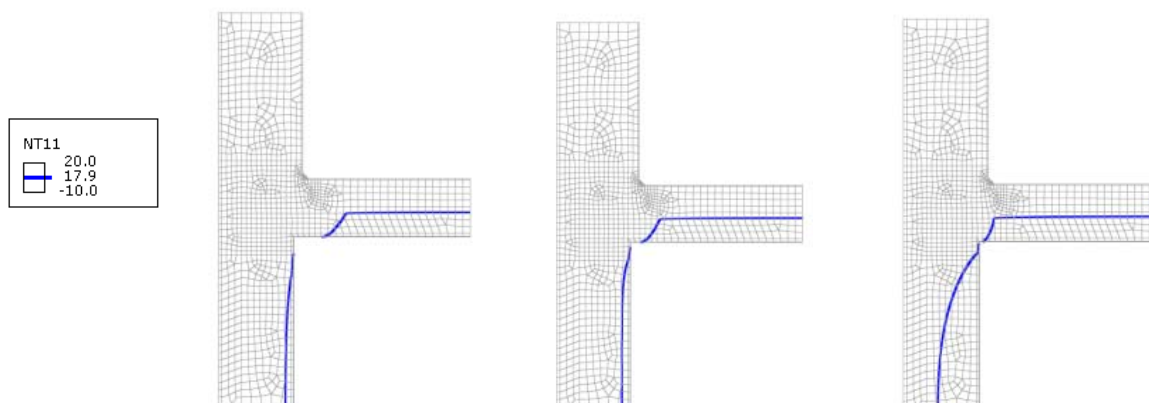
Slika 85: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena - PII

Slika 86: T Aerogelna izolacija - PIII

Preglednica 33: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII | PIII |
|---|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 15,8 | 17,1 | 17,6 |

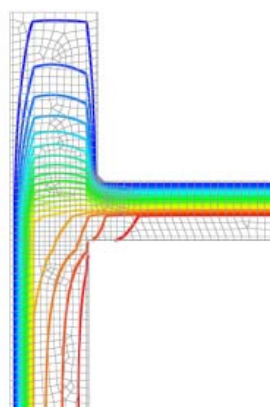
Detajl križanja T med zunanjo steno in strešno konstrukcijo je problematičen. Na kritičnem mestu je v primeru uporabe polistirena temperatura močno pod predpostavljeno kritično temperaturo. Če izolacijo preko kolenčnega zidu nadomestimo z aerogelno izolacijo, situacijo precej izboljšamo, temperatura na kritičnem mestu se dvigne za 1,3 K. Ob polni nadomestitvi polistirenske izolacije se iskana temperatura dvigne še za 0,5 K, vendar še zmeraj ne dovolj, da bi izločili nevarnost nastajanja plesni in mahov v celotnem območju vogala. To je posledica vpliva kolenčnega zidu ter dejstva, da je le ta na eni strani manj izoliran kot na drugi, kar je razvidno tudi na slikah 84-86.



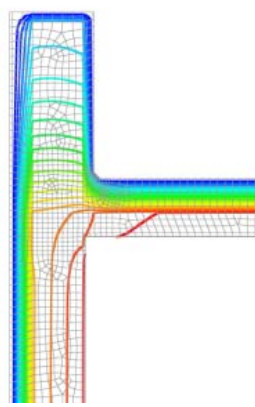
Slika 87: Potek kritične temperature – PI

Slika 88: Potek kritične temperature – PII

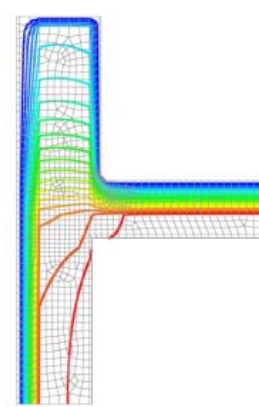
Slika 89: Potek kritične temperature – PIII



Slika 90: Temperaturno polje PI

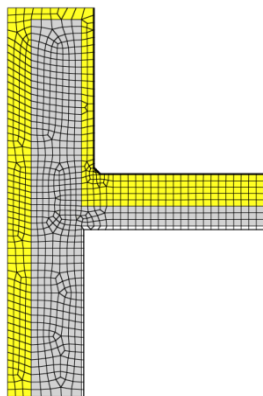


Slika 91: Temperaturno polje PII

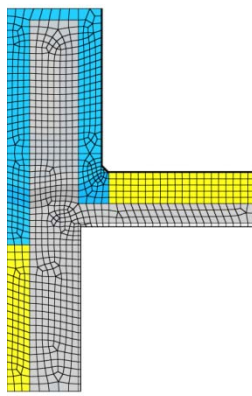


Slika 92: Temperaturno polje PIII

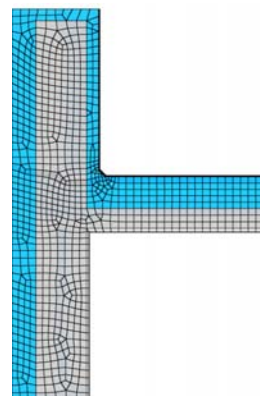
2.8.5.2.2.2 Armiranobetonska nosilna konstrukcija



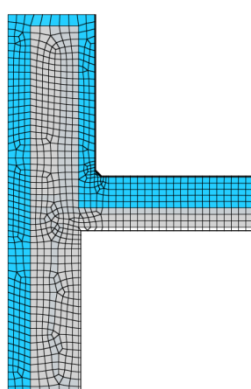
Slika 93: Polistiren – PI



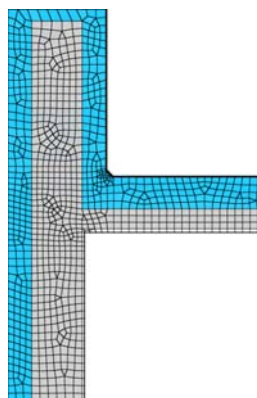
Slika 94: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PII



Slika 95: Aerogelna izolacija – PIII



Slika 96: Aerogelna izolacija – PIV



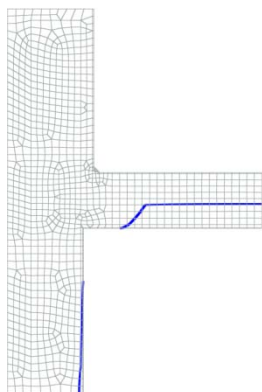
Slika 97: Aerogelna izolacija – PV

Preglednica 34: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

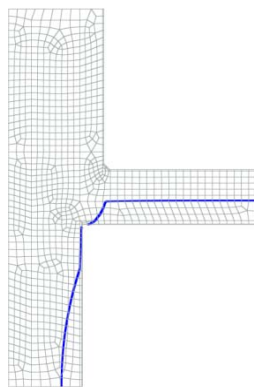
| | PI | PII | PIII | PIV | PV |
|---|------|-------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 15,3 | 17,45 | 17,6 | 17,8 | 17,9 |

Pri tem detajlu sem obravnaval dodatne ukrepe izboljšave temperaturnih razmer na kritičnem mestu. Dodal sem ukrep povečanja debeline izolacije na strani kolenčnega zidu, kjer se priključi strešna konstrukcija, saj sem v prejšnjem primeru detajla z opečno vertikalno

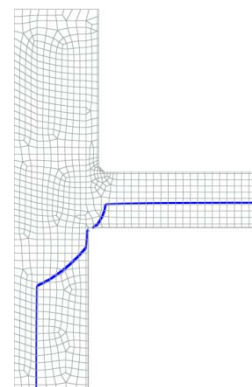
konstrukcijo opazil, da ne presežemo želene temperature 17,9 °C na obravnavanem kritičnem mestu.



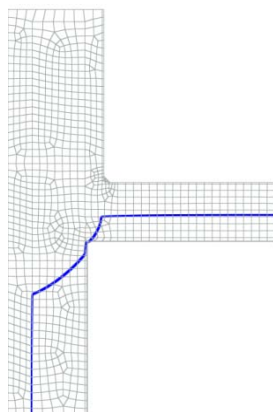
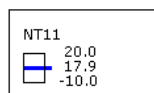
Slika 98: Potek kritične temperature – PI



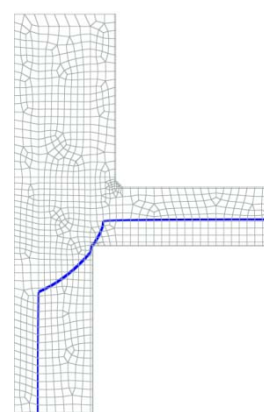
Slika 99: Potek kritične temperature – PII



Slika 100: Potek kritične temperature – PIII

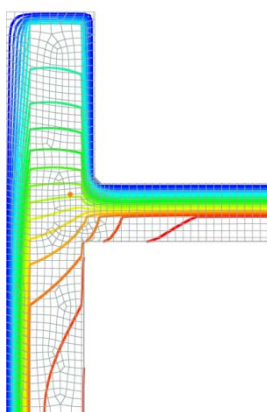


Slika 101: Potek kritične temperature – PIV

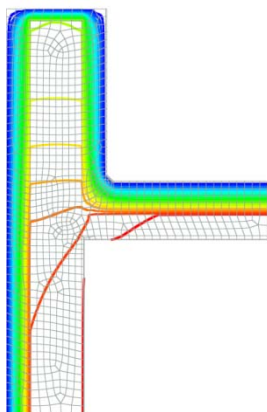


Slika 102: Potek kritične temperature – PV

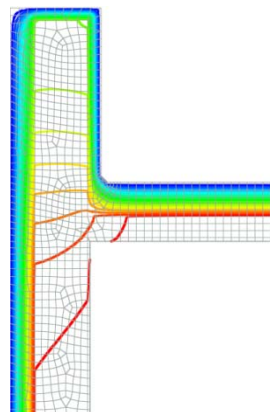
Iz slik s prikazom poteka kritične temperature se lepo razbere, da je v primerih brez odebelitve izolacije celotno območje vogala kritično. Šele ko izenačimo debelino izolacije na obeh straneh kolenčnega, izenačimo temperaturo površine na kritičnem mestu s kritično.



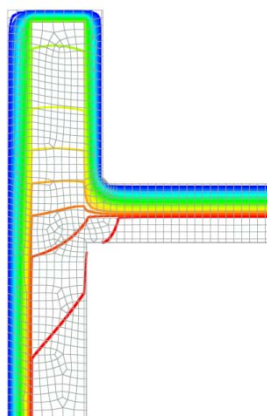
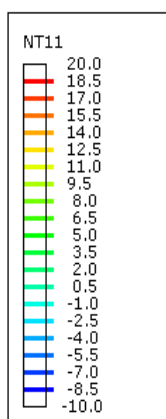
Slika 103: Temperaturno polje PI



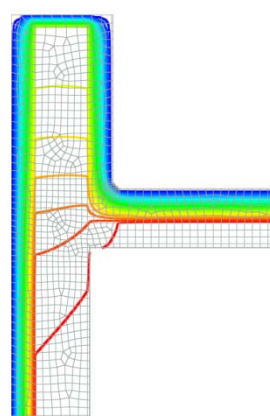
Slika 104: Temperaturno polje PII



Slika 105: Temperaturno polje PIII

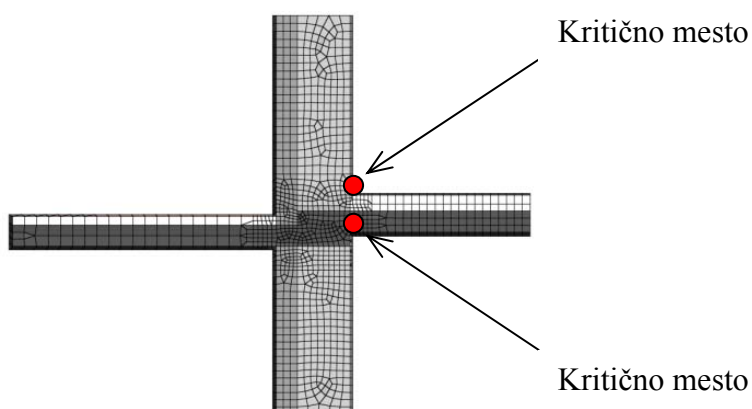


Slika 106: Temperaturno polje PIV



Slika 107: Temperaturno polje PV

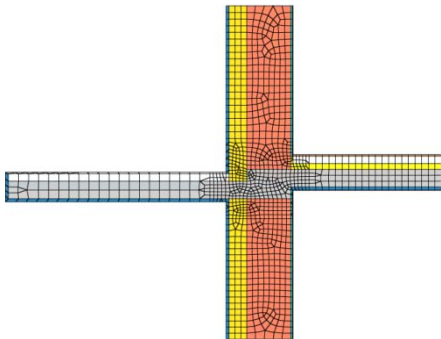
2.8.5.3 Križanje X



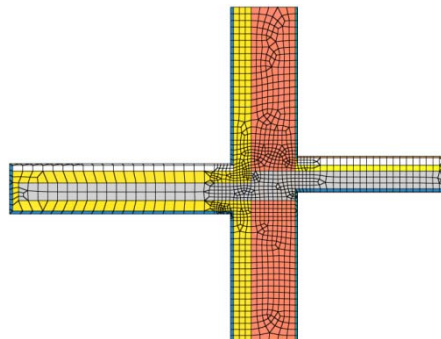
Slika 108: Kontrolna mesta – križanje X

Križanje X v diplomskem delu načeloma ponazarja balkonsko ploščo. Zopet obravnavam dve potencialni kritični mesti enako kakor v primeru križanja T. Pri obravnavi tega detajla sem analiziral najprej primer neizolirane balkonske plošče, kar ima za posledico močen konstrukcijski toplotni most. Nadalje sem za rešitev tega mostu ploščo izoliral po njeni zunanji površini. V praksi sicer že obstajajo druge konstrukcijske rešitve (na primer prefabricirani vgradni element iz jeklene armature z vstavljenotoplotno izolacijo), ki učinkovito rešijo problem toplotnega mosta.

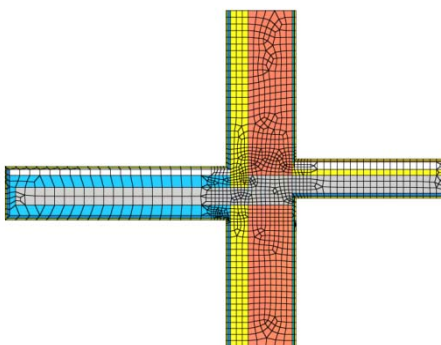
2.8.5.2.1 Opečna nosilna konstrukcija



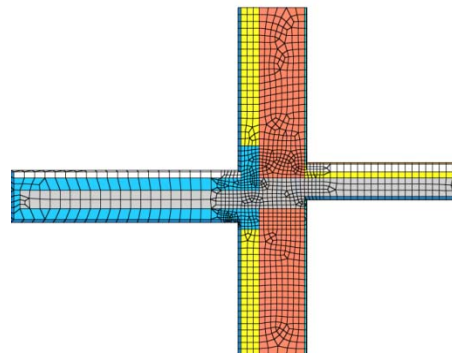
Slika 109: Polistiren – PI



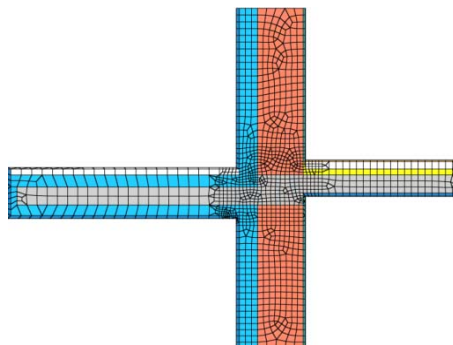
Slika 110: Polistiren – PII



Slika 111: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII



Slika 112: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIV

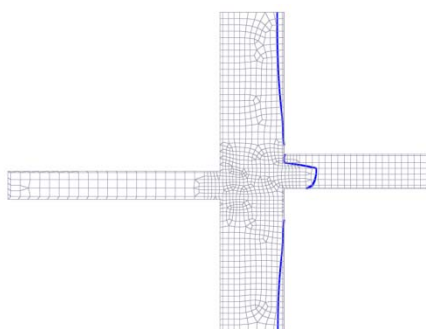


Slika 113: Aerogelna izolacija – PV

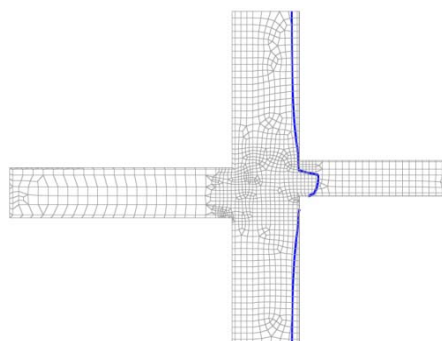
Vogal na zgornji strani medetažne konstrukcije je manj problematičen, saj je temperatura na predpostavljenem kritičnem mestu pod računsko mejo le v prvem primeru, ko balkonska plošča ni izolirana. Razlog za to je dejstvo, da je zgornja stran medetažne konstrukcije izolirana sicer s kameno volno v funkciji zvočne izolacije, ki pa hkrati opravlja sekundarno funkcijo toplotne izolacije. Spodnji notranji vogal pa je zelo kritičen tudi zaradi vertikalnega konstrukcijskega zamika armiranobetonske plošče. Vogal je tako izpostavljen bolj toplotno prevodnemu materialu in toplotni most je vzpostavljen. Iz tabele je razvidno, da z izoliranjem balkonske plošče izboljšamo razmere z ukrepom PII za 2,1 K, preko ukrepov PIII in PIV pa še za 0,9 K. Problem prenizke površinske temperature sem uspel odpraviti šele, ko sem celotno toplotno izolacijo na zunanji strani nosilne konstrukcije zamenjal z aerogelno.

Preglednica 35: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

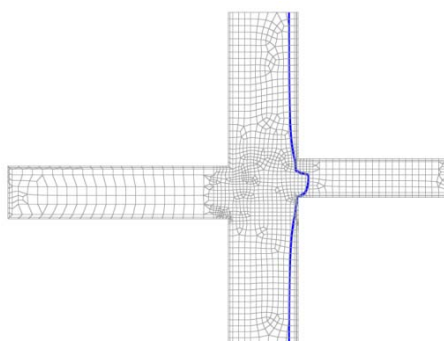
| | PI | PII | PIII | PIV | PV |
|---|------|------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 17,6 | 18,4 | 18,6 | 18,8 | 19,1 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 14,5 | 16,6 | 17,2 | 17,5 | 17,9 |



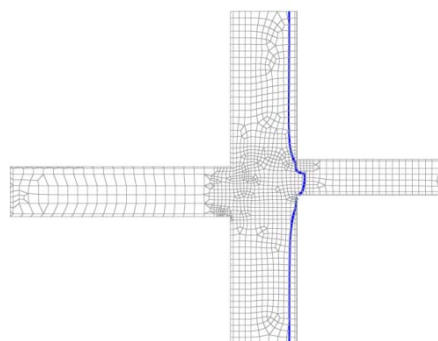
Slika 114: Potek kritične temperature – PI



Slika 115: Potek kritične temperature – PII

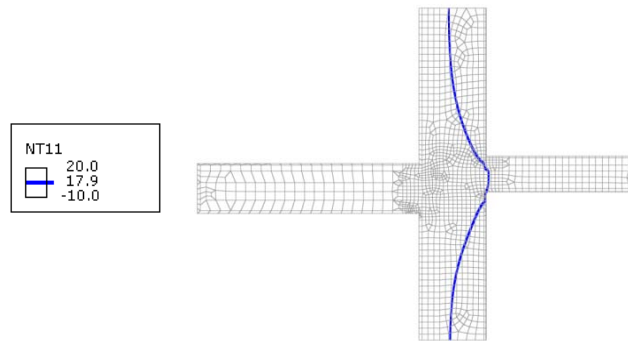


Slika 116: Potek kritične temperature – PIII

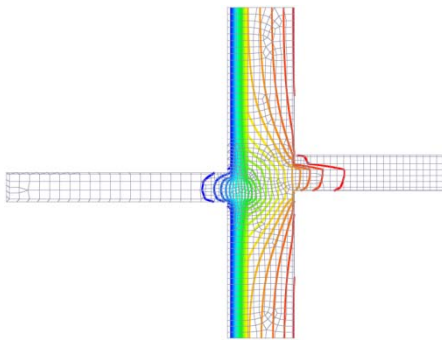


Slika 117: Potek kritične temperature – PIV

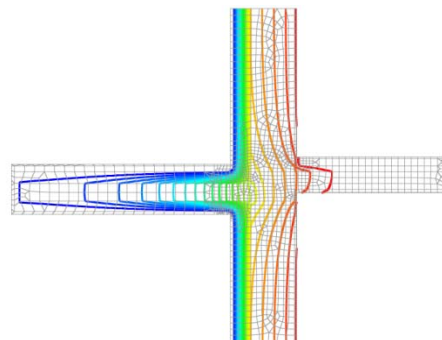
Iz slik 114-118, ki prikazujejo potek kritične temperature, je lepo razvidno, kako velik problem predstavlja neizolirana balkonska plošča, iz slik 119-123 pa, kako vplivata geometrija in stopnja izoliranosti.



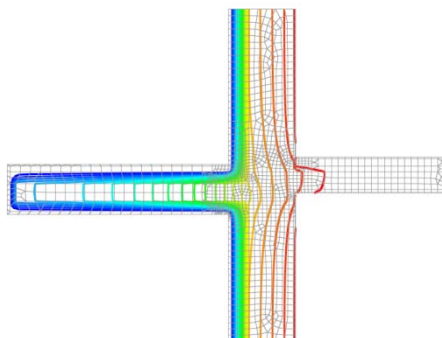
118: Potek kritične temperature – PV



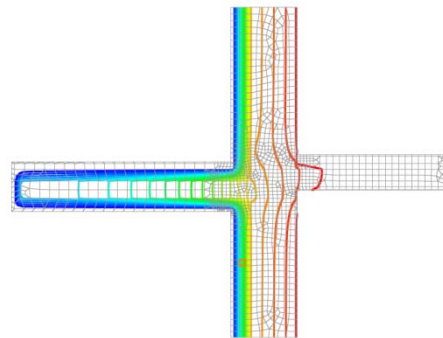
Slika 119: Temperaturno polje PI



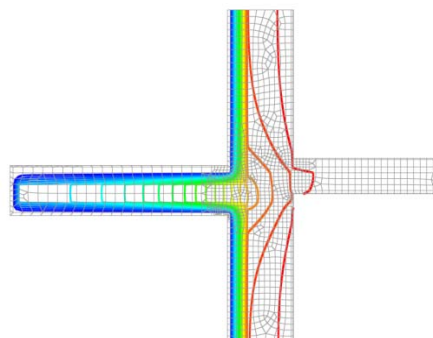
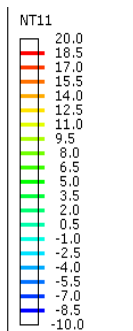
Slika 120: Temperaturno polje PII



Slika 121: Temperaturno polje PIII

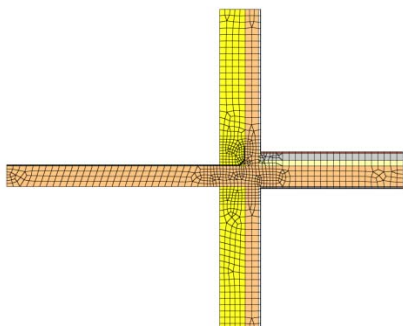


Slika 122: Temperaturno polje PIV

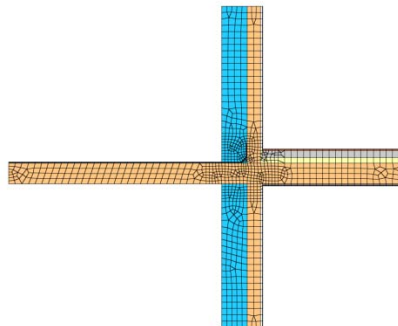


Slika 123: Temperaturno polje PV

2.8.5.2.2 Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč



Slika 124: Polistiren – PI



Slika 125: Aerogelna izolacija PII

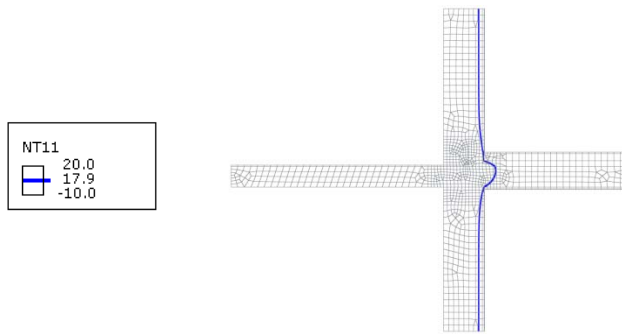
Preglednica 36: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

| | PI | PII |
|--|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu zgoraj [°C] | 18,5 | 18,8 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu spodaj [°C] | 18,1 | 18,4 |

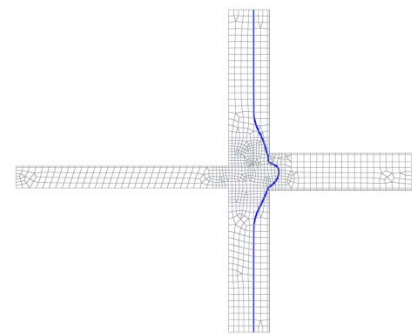
V primeru nosilne konstrukcije iz lesenih križno lepljenih plošč prekinitev toplotne izolacije z vidika temperature na kritičnih mestih ni problematična. Že v izhodiščnem primeru toplotne izolacije iz polistirena ter neizolirane balkonske plošče je problem nastajanja plesni ali rasti mahov omejen.

Kritična površinska temperatura ni nikjer prisotna na notranji površini sklopa, kot je prikazano na slikah 126 in 127. Doprinos aerogelne izolacije je relativno majhen, vendar je potrebno poudariti, da je tudi les sam manj prevoden material.

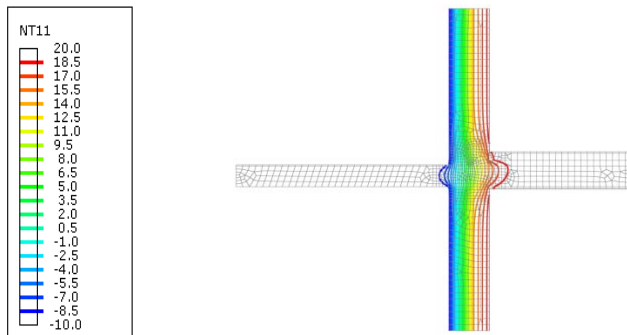
V primeru polistirena se temperaturni gradient bolj porazdeli v razmerju toplotnih uporov med posameznimi sloji konstrukcijskega sklopa, v drugem primeru pa prevlada zopet aerogelna izolacija, kar pa je razvidno iz slik 128 in 129.



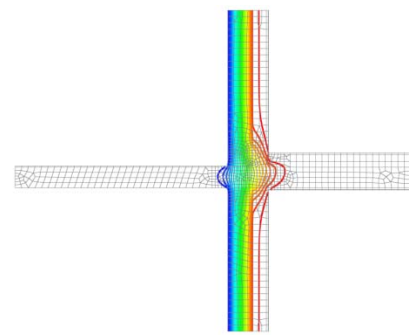
Slika 126: Potek kritične temperature – PI



Slika 127: Potek kritične temperature – PII

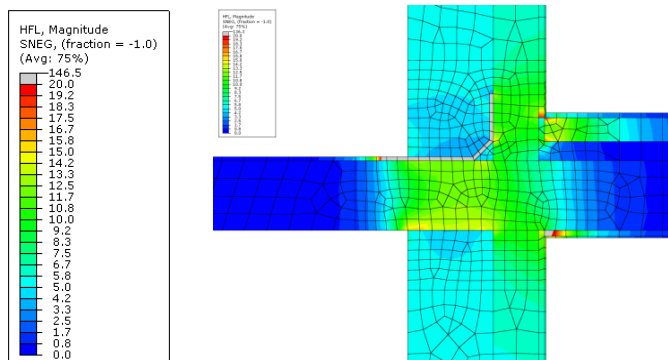


Slika 128: Temperaturno polje PI

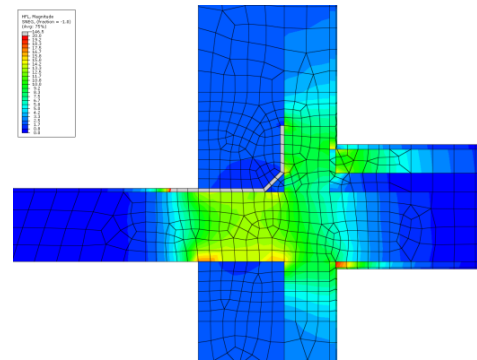


Slika 129: Temperaturno polje PII

Kljub temu, da površinska temperatura notranje površine ni problematična, ostaja problem konstrukcijskega toplotne ga mostu nerešen. Iz primerjave slik 130 in 131 lahko še zaključimo, da se toplotni tok skozi izolirani del sklopa močno zmanjša v primeru uporabe enake debeline aerogelne izolacije.

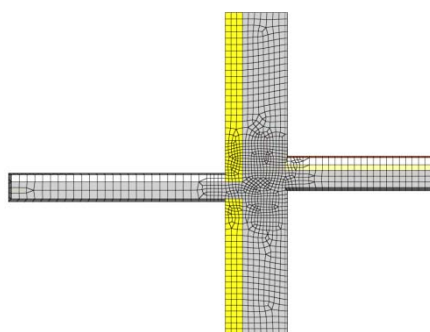


Slika 130: Gostota toplotnega toka PI

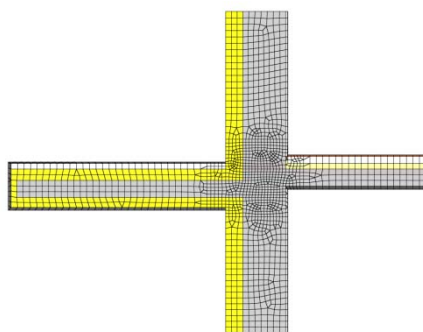


Slika 131: Gostota toplotnega toka PII

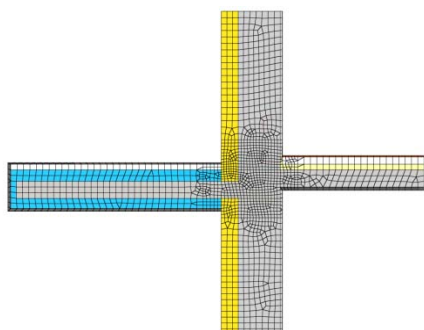
2.8.5.2.3 Armiranobetonska nosilna konstrukcija



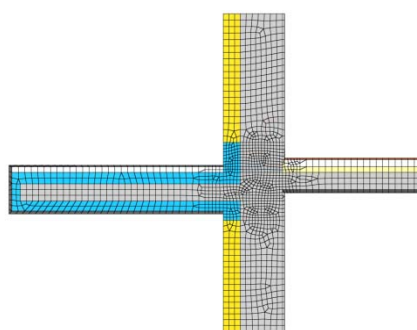
Slika 132: Polistiren – PI



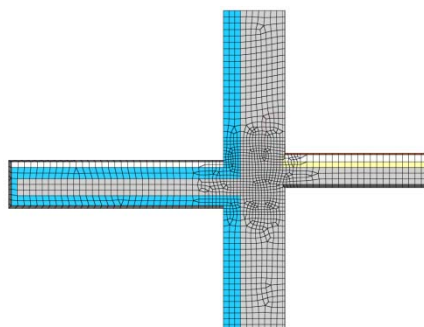
Slika 133: Polistiren – PII



Slika 134: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIII



Slika 135: Kombinacija aerogelne izolacije in polistirena – PIV



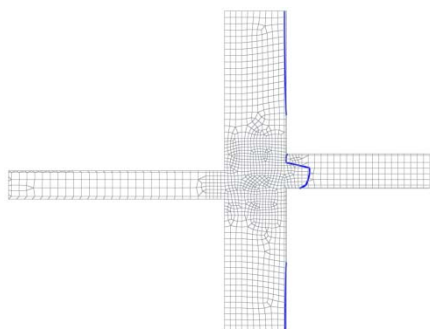
Slika 136: Aerogelna izolacija – PV

Križanje konstrukcijskih sklopov iz armiranega betona je, ko pogledamo rezultate temperature na spodnjem kritičnem mestu, sicer manj problematično kakor na primer v primeru opečne vertikalne nosilne konstrukcije, vendar, če pogledamo še diagrame porazdelitve kritične temperature, vidimo, da je tudi ta vsaj od začetka precej problematičen, saj ni kritičen le vogal, ampak širše območje stene. Razmere v primeru PII so že nekoliko boljše, a še vedno na meji,

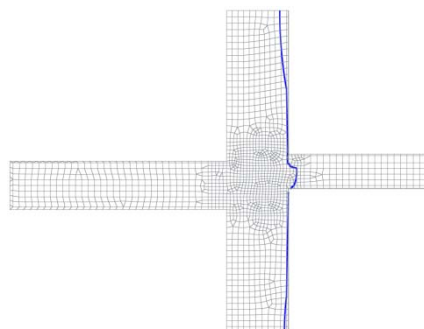
medtem ko v primeru PIII temperatura na izbranih kritičnih mestih preseže računsko mejo nastajanja plesni in mahov. V primeru, ko izoliramo poleg balkonske plošče še manjše območje zunanje stene z aerogelno izolacijo se iskana temperatura že bistveno dvigne. Ob polni nadomestitvi polistirenske izolacije z aerogelno se v zgornjem vogalu od izhodiščnega primera PI temperatura dvigne za 1,7 K v spodnjem pa za kar 2,7 K, kar je manj kakor v primeru križanja z opečno konstrukcijo z opečno zunanjo steno. Je pa končna temperatura spodnjem vogalu pri čisti armiranobetonski konstrukciji za 0,7 K višja. To je predvsem posledica tega, da je opečna vertikalna konstrukcija manj toplotno prevodna in je zato v njej posledično večji temperaturni gradient, kar vpliva na potek temperature v horizontalni armiranobetonski nosilni konstrukciji. V primeru homogene armirano betonske konstrukcije, ki je bolj toplotno prevodna in je v njej posledično manjši temperaturni gradient pa nastopa višja temperatura globlje v sklopu. Tako je tudi površinska temperatura višja.

Preglednica 37: Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C]

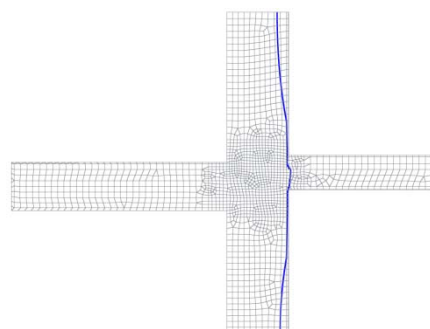
| | PI | PII | PIII | PIV | PV |
|---|------|------|------|------|------|
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 17,4 | 18,3 | 18,6 | 18,8 | 19,1 |
| Temperatura notranje površine na kritičnem mestu [°C] | 15,9 | 17,5 | 17,9 | 18,2 | 18,6 |



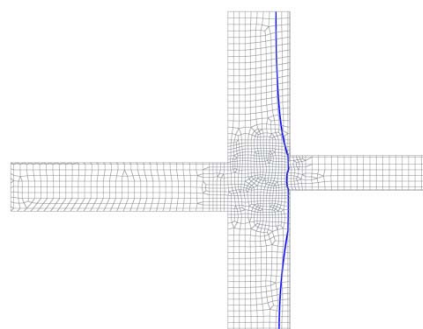
Slika 137: Potek kritične temperature – PI



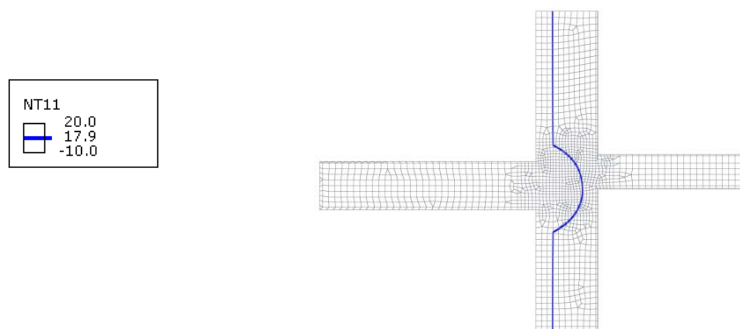
Slika 138: Potek kritične temperature – PII



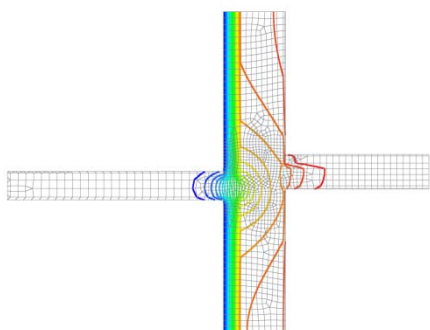
Slika 139: Potek kritične temperature – PIII



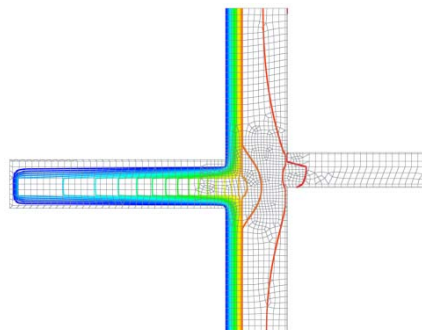
Slika 140: Potek kritične temperature – PIV



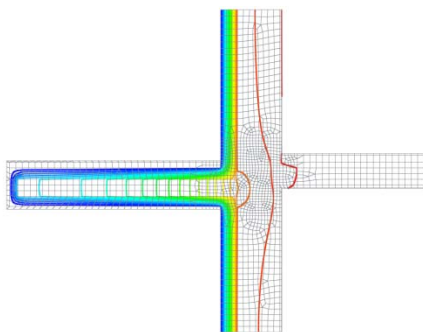
Slika 141: Potek kritične temperature – PIV



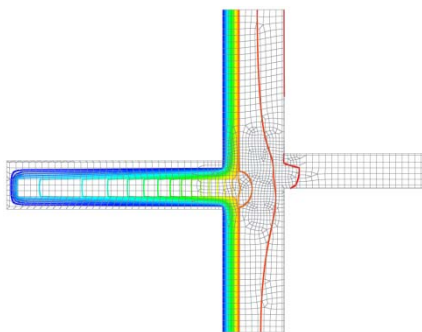
Slika 142: Temperaturno polje PI



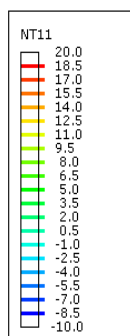
Slika 143: Temperaturno polje PII



Slika 144: Temperaturno polje PIII



Slika 145: Temperaturno polje PIV



Slika 146: Temperaturno polje PV

3 MODUL 3

Glavna cilja tretjega modula sta:

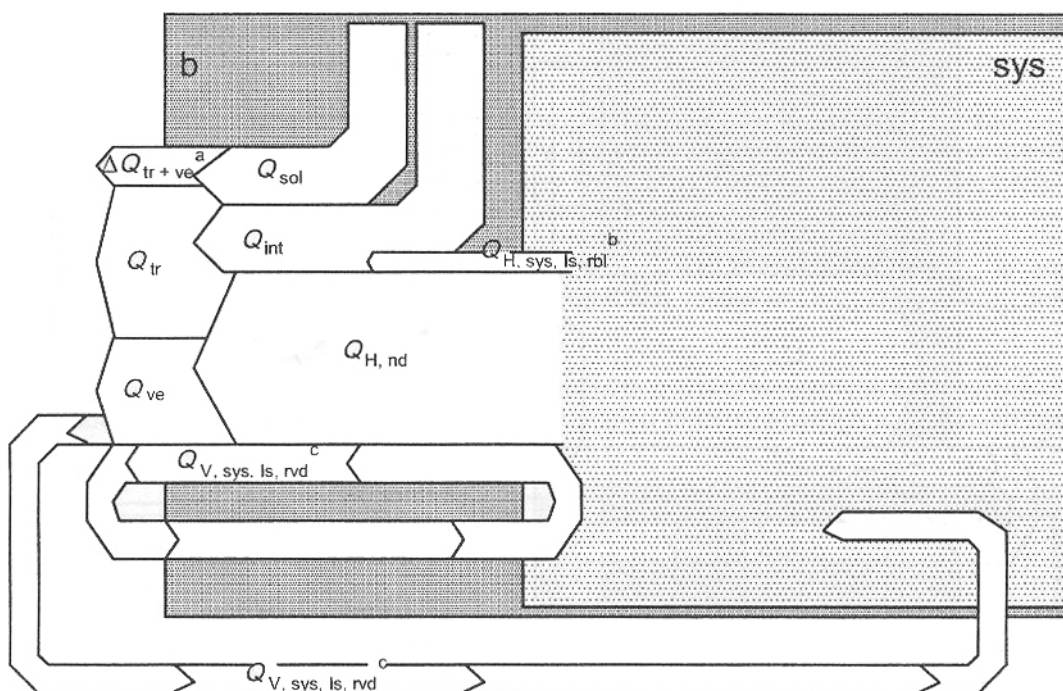
- izračunati, kolikšni so prihranki pri porabi energije za ogrevanje stavbe v primeru uporabe enake debeline aerogelne izolacije, kakor je potrebna debelina polistirena ali kamene volne, ter pridobiti informacijo, ali se v katerem od predvidenih cenovnih razredov aerogelne izolacije opraviči uporaba le-te glede na prihranek energije;
- izračunati, kolikšni so tlorisni prihranki v primeru uporabe ekvivalentne debeline aerogelne izolacije v primeru hipotetčne geometrije in konfiguracije stopnice in bloka., ter pridobiti informacijo, ali se v katerem od predvidenih cenovnih razredov aerogelne izolacije opraviči uporaba le-te glede na prihranek površine.

3.1 Energetska bilanca

Pod tretjo točko priloge K standarda SIST EN ISO 13790:2008 lahko najdemo naslednje postavke energetske bilance na nivoju stavbe:

- transmisijske toplotne izgube iz notranjosti v zunanje okolje kot posledica temperaturne razlike med njima (Q_{tr}),
- ventilacijske toplotne izgube (Q_{ve}),
- izgube zaradi pregrevanja preko želene temperature (ΔQ_{tr+ve}^a)
- rekuperacijski pritoki ($Q_{V,sys,ls,rvd}^c$),
- koristni notranji toplotni dobitki, to je koristna toplotna moč notranjih virov toplote (Q_{int}),
- solarni toplotni dobitki (Q_{sol}),
- Toplotne izgube ogrevalnega sistema, ki jih je mogoče ponovno izkoristiti ($Q_{H,sys,ls,rbl}^b$)
- energija za ogrevanje ($Q_{H,nd}$).

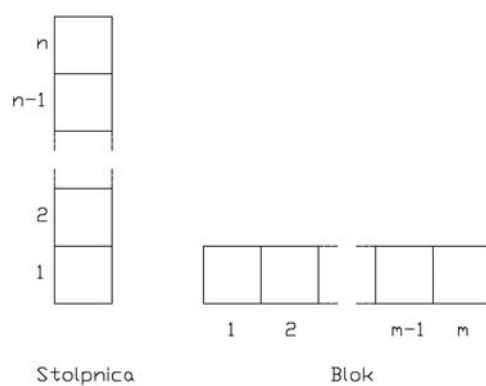
V praksi so razširjene mesečna, sezonska ter letna energetska bilanca. Njen splošni opis, kot je definiran v standardu SIST EN ISO 13790:2008, sem navedel le za splošno opredelitev področja, s katerega so privzeti posamezni parametri v nadaljevanju diplomske naloge.



Energijska bilanca, stavbni del (SIST EN ISO 13790:2008, str. 157)

3.2 Zasnova vzorca

Za prikaz vpliva uvedbe aerogelne izolacije na lastnosti stavbe sem za lažjo analizo izbral enostavni primer kocke, ki ji enkrat spreminjam višino, drugič dolžino, kot je prikazano na sliki 147. Tako dobim v prvem primeru simulacijo stolpnice, v drugem pa simulacijo bloka, analizo pa sem izvedel za tri materiale nosilne konstrukcije, kakor že v drugem modulu. Za dosego ciljev tretjega modula podrobnejša simulacija stavbe ni potrebna.



Slika 147: Oblikovna zasnova vzorca

Energetska učinkovitost stavbe je odvisna od lokacije, orientacije, intenziteta prezračevanje ter med drugim tudi od oblikovnega faktorja stavbe, ki je definiran kot razmerje med površino ovoja stavbe ter volumna stavbe. V diplomski nalogi sem sicer predpostavil, da je konstanten z namenom eliminacije dodatne spremenljivke, vendar omenjena primera simulacije stolpnice in bloka nista enaka. Razlog za to je različna površina konstrukcijskih sklopov zunanjih sten, strehe ter tal, za katere pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah predpisuje različne zahteve o toplotni prehodnosti. Hkrati na rezultat vpliva predpostavljena stopnja zastekljenosti zunanjih površin.

Izhodiščne dimenzije kocke so navedene v tabeli 38, osnovni modul za spreminjanje dimenzij objekta pa je 3 m in predstavlja etažno konstrukcijsko višino ali pa horizontalni raster.

Preglednica 38: Izhodiščne dimenzije objekta

| Višina [m] | Širina [m] | Dolžina [m] |
|------------|------------|-------------|
| 18 | 18 | 18 |

3.3 Analiza vpliva uvedbe aerogelne izolacije na lastnosti stavbe

3.3.1 Analiza prihrankov energije

Energijske prihranke je smiselno izračunati v primeru uporabe enake debeline učinkovitejše aerogelne toplotno izolacijske odeje, kakor je potrebna za zadostitev pogojev pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah v primeru uporabe polistirena ali kamene volne.

Uvedba učinkovitejše toplotne izolacije v konstrukcijske sklope vpliva le na transmisijske toplotne izgube skozi netransparentni del stavbnega ovoja. V diplomski nalogi obravnavam le konstrukcijske sklope zunanjih sten, zato se prihranki nanašajo le na spremembe njihovih lastnosti. Podatke o toplotni prehodnosti sem vzel iz modula 2 za primere, ko je toplotna izolacija na zunanji strani nosilne konstrukcije. Za strehe in tla pa sem predpostavil konstantno toplotno prehodnost, kot je definirana v pravilniku, zato tudi nisem razvil sklopov tal in strehe in je navedena v točki 2.7.1.2.

Kot že omenjeno v uvodni točki tretjega modula, je končni rezultat tudi močno odvisen od stopnje zasteklitve zunanjih obodnih sten, saj ta narekuje delež izgub skozi netransparentni del ovoja glede na celotno energetska bilanco. V diplomskem delu sem privzel vrednost stopnje zasteklitve oziroma delež transparentnega ovoja 20 % zunanjega plašča, brez površine strehe in tal, s toplotno prehodnostjo $U = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. V obravnavani analizi faktor celotnega sončnega sevanja, faktor ovira ter faktor senčenja ne pridejo v upoštevanje. Ta delež je približna ocena, saj je v tako splošni simulaciji nemogoče in brez smisla natančno določiti bivalne površine in posledično zagotoviti pravilniku o minimalnih tehničnih zahtevah za graditev stanovanjskih stavb in stanovanj.

3.3.1.1 Določitev parametrov in računske metode

Definicijo koeficienta transmisijских toplotnih izgub (25) lahko najdemo v mednarodnem standardu SIST EN ISO 13790:2008. Ta v splošnem predstavlja povprečno toplotno prehodnost, vendar se ob spodaj opisanih predpostavkah poenostavi kar v toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa.

$$H_{tr,adj} = H_D + H_G + H_U + H_A \quad (25)$$

Prvi člen v zgornji vsoti predstavlja toplotne izgube iz ogrevanih prostorov, drugi toplotne izgube skozi konstrukcijo v stiku s tlemi, tretji pa toplotne izgube skozi neogrevane prostore. Zadnji člen obravnava prislonjene stavbe. V nadaljevanju upoštevam le prvi člen.

$$H_D = b_{tr,x} \left(\sum_i A_i U_i + \sum_k I_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \right) \quad (26)$$

Ta enačba se še dodatno poenostavi, saj je korekcijski člen $b_{tr,x} = 1$ hkrati pa drugega in tretjega člena, ki predstavljata linijske ter točkovne toplotne mostove v obravnavani analizi, ne upoštevam.

Nadalje lahko izračunam toplotne izgube po obrazcu iz 8. točke standarda SIST EN ISO 13790:2008, ki obravnava račun izgub pri konstantni notranji temperaturi in privzame povprečno zunanjo temperaturo v računskem obdobju. Navedeno sovpada tudi s predpostavko o stacionarni analizi.

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{iint,set,H} - \theta_e)t \quad (27)$$

Ventilacijske toplotne izgube v spodnji enačbi zanemarim, saj na njih toplotna izolacija nima vpliva, na kar se koeficient toplotnih izgub stavbe izenači s koeficientom transmisijskih toplotnih izgub, ki pa je, kot je bilo predhodno izpeljano, kar enak toplotni prehodnosti konstrukcijskih sklopov, pomnoženi s površino le teh.

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (28)$$

Za dokončni izračun toplotnih izgub potrebujem še klimatske podatke. Podatke o trajanju ogrevalne sezone ter temperaturni razliki sem izbral za ljubljansko področje.

Preglednica 39: Vhodni podatki za izračun toplotnih izgub

| | |
|--|---|
| Kraj | Ljubljana, Zem. š.: 46,2 N; Zem. dolž.: 14,5 E; Nadm. viš.: 385 m |
| Šteilo ogrevalnih dni | 235 dni |
| Tarifa - toplotvod - gospodinjski odjem | 38,0987 EUR/MWh |
| Temperaturna razlika ($\theta_i - \theta_e$) | 30 K |

Podatke o ceni energije oziroma toplote ljubljanskega toplovoda sem pridobil na spletni strani javnega holdinga Energetika Ljubljana. Privzel sem ceno z vključenim DDV.

3.3.1.2 Rezultati in komentar

3.3.1.2.1 Opečna zunanja stena

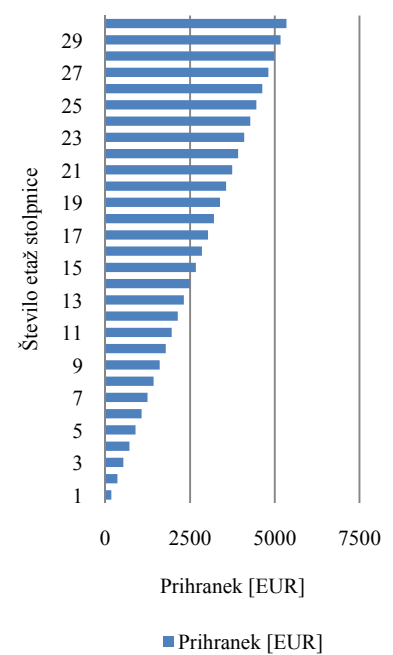
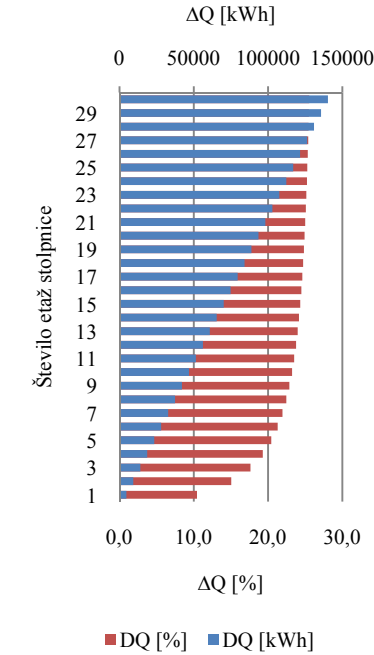
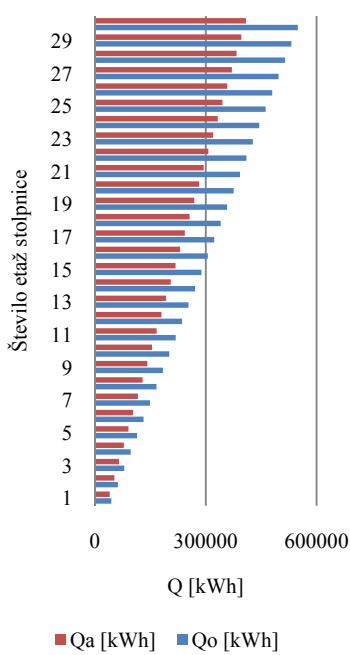
V preglednicah 40 in 41 so navedeni absolutni prihranki energije v 1 ogrevalni sezoni za različne dimenzije podanih dveh vzorčnih objektov, ki jih pridobimo ob uporabi enake debeline aerogela, kakor je potrebna, da izpolnimo zahteve pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah v primeru uporabe polistirena ali kamene volne. Energijski prihranek ne pokrije povečanega izdatka za obravnavano debelino toplotne aerogelne izolacije na letni ravni. Informativni izračun pokaže, da se tudi v 50 letni življenski dobi objekta omenjena investicija ne povrne pri privzeti konstantni ceni energije ter zanemarnjenih ostalih pozitivnih učinkih tega ukrepa.

Prihranek je tudi opazno večji v primeru stolpnice predvsem zaradi kompaktnosti oblike. Stolpnici se v izbranem primeru izhodiščnih dimenzij pri povečanju višine za 1 etažo površina zunanega ovoja poveča manj, kakor se poveča površina zunanega ovoja bloka pri podaljšanju za enak modul. Hkrati se bloku povečuje tudi površina strehe in tal na terenu, medtem ko sta pri stolpnici ti dve površini konstantni. Pravilnost izračuna sem potrdil s primerom, ko so dimenzije stolpnice in bloka enake in je posledično tudi energijski prihranek enak.

Preglednica 40: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z opečno zunanjo steno

| Število etaž | Višina objekta | ΔH_t | Qpolistiren | Qaerogel | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|--------------|----------------|--------------|-------------|----------|------------|------------|--------------|
| | [m] | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR/sezono] |
| 1 | 3 | 27,6 | 44806,9 | 40128,8 | 4678,0 | 10,4 | 178,23 |
| 2 | 6 | 55,3 | 62203,3 | 52847,3 | 9356,1 | 15,0 | 356,45 |
| 3 | 9 | 82,9 | 79599,8 | 65565,7 | 14034,1 | 17,6 | 534,68 |
| 4 | 12 | 110,6 | 96996,3 | 78284,1 | 18712,2 | 19,3 | 712,91 |
| 5 | 15 | 138,2 | 114392,7 | 91002,5 | 23390,2 | 20,4 | 891,14 |
| 6 | 18 | 165,9 | 131789,2 | 103721,0 | 28068,2 | 21,3 | 1069,36 |
| 7 | 21 | 193,5 | 149185,7 | 116439,4 | 32746,3 | 22,0 | 1247,59 |
| 8 | 24 | 221,2 | 166582,1 | 129157,8 | 37424,3 | 22,5 | 1425,82 |
| 9 | 27 | 248,8 | 183978,6 | 141876,2 | 42102,4 | 22,9 | 1604,05 |
| 10 | 30 | 276,5 | 201375,1 | 154594,7 | 46780,4 | 23,2 | 1782,27 |
| 11 | 33 | 304,1 | 218771,5 | 167313,1 | 51458,5 | 23,5 | 1960,50 |
| 12 | 36 | 331,8 | 236168,0 | 180031,5 | 56136,5 | 23,8 | 2138,73 |
| 13 | 39 | 359,4 | 253564,5 | 192749,9 | 60814,5 | 24,0 | 2316,95 |
| 14 | 42 | 387,1 | 270960,9 | 205468,4 | 65492,6 | 24,2 | 2495,18 |
| 15 | 45 | 414,7 | 288357,4 | 218186,8 | 70170,6 | 24,3 | 2673,41 |
| 16 | 48 | 442,4 | 305753,9 | 230905,2 | 74848,7 | 24,5 | 2851,64 |
| 17 | 51 | 470,0 | 323150,3 | 243623,6 | 79526,7 | 24,6 | 3029,86 |
| 18 | 54 | 497,7 | 340546,8 | 256342,1 | 84204,7 | 24,7 | 3208,09 |
| 19 | 57 | 525,3 | 357943,3 | 269060,5 | 88882,8 | 24,8 | 3386,32 |
| 20 | 60 | 553,0 | 375339,7 | 281778,9 | 93560,8 | 24,9 | 3564,55 |
| 21 | 63 | 580,6 | 392736,2 | 294497,3 | 98238,9 | 25,0 | 3742,77 |
| 22 | 66 | 608,3 | 410132,7 | 307215,8 | 102916,9 | 25,1 | 3921,00 |
| 23 | 69 | 635,9 | 427529,1 | 319934,2 | 107595,0 | 25,2 | 4099,23 |
| 24 | 72 | 663,6 | 444925,6 | 332652,6 | 112273,0 | 25,2 | 4277,46 |
| 25 | 75 | 691,2 | 462322,1 | 345371,0 | 116951,0 | 25,3 | 4455,68 |
| 26 | 78 | 718,8 | 479718,5 | 358089,5 | 121629,1 | 25,4 | 4633,91 |
| 27 | 81 | 746,5 | 497115,0 | 370807,9 | 126307,1 | 25,4 | 4812,14 |
| 28 | 84 | 774,1 | 514511,5 | 383526,3 | 130985,2 | 25,5 | 4990,36 |
| 29 | 87 | 801,8 | 531907,9 | 396244,7 | 135663,2 | 25,5 | 5168,59 |
| 30 | 90 | 829,4 | 549304,4 | 408963,2 | 140341,2 | 25,5 | 5346,82 |

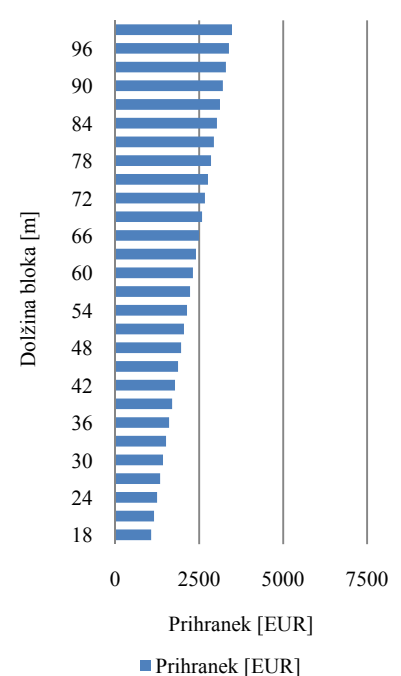
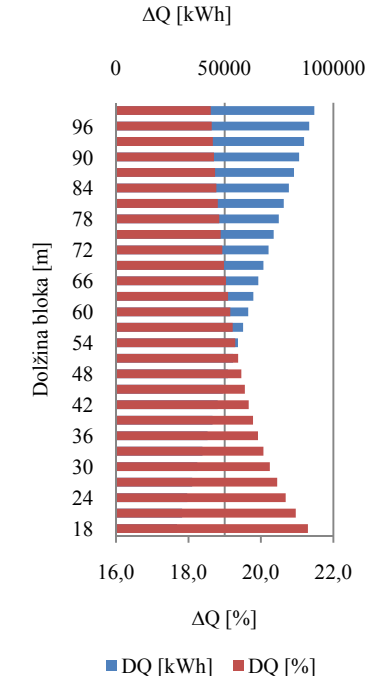
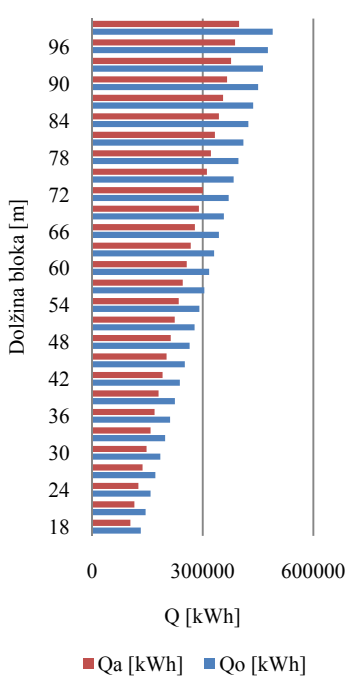
Trend povečevanja toplotnih izgub je ob dejstvu, da je izračun transmisijskih izgub poenostavljen, kakor je prikazano v točki 3.3.1.1, in ga predstavlja enostavna vsota produktov površin posameznih tipov konstrukcijskih sklopov s pripadajočo toplotno prehodnostjo, linearen, kar je razvidno tudi iz diagrama 34. Povedano velja za stolpnico in blok, rezultat se razlikuje le v tem, da razlika med toplotnimi izgubami ob uporabi polistirena ali kamene volne in uporabi aerogelne toplotne izolacije v primeru stolpnice intenzivneje narašča in je tudi večja.



Grafikon 33: Toplotne izgube v stolpnici

Grafikon 34: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici

Grafikon 35: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR)



Grafikon 36: Toplotne izgube v bloku

Grafikon 37: Sprememba toplotnih izgub v bloku

Grafikon 38: Prihranek energije v bloku (izražen v EUR)

Preglednica 41: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z opečno zunanjo steno

| Dolžina objekta | ΔH_t | Q_o | Q_a | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|-----------------|--------------|----------|----------|------------|------------|--------------|
| [m] | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR/sezono] |
| 18 | 165,9 | 131789,2 | 103721,0 | 28068,2 | 21,3 | 1069,36 |
| 21 | 179,7 | 145055,8 | 114648,6 | 30407,3 | 21,0 | 1158,48 |
| 24 | 193,5 | 158322,5 | 125576,2 | 32746,3 | 20,7 | 1247,59 |
| 27 | 207,4 | 171589,1 | 136503,8 | 35085,3 | 20,4 | 1336,70 |
| 30 | 221,2 | 184855,7 | 147431,4 | 37424,3 | 20,2 | 1425,82 |
| 33 | 235,0 | 198122,4 | 158359,0 | 39763,4 | 20,1 | 1514,93 |
| 36 | 248,8 | 211389,0 | 169286,6 | 42102,4 | 19,9 | 1604,05 |
| 39 | 262,7 | 224655,6 | 180214,2 | 44441,4 | 19,8 | 1693,16 |
| 42 | 276,5 | 237922,3 | 191141,9 | 46780,4 | 19,7 | 1782,27 |
| 45 | 290,3 | 251188,9 | 202069,5 | 49119,4 | 19,6 | 1871,39 |
| 48 | 304,1 | 264455,5 | 212997,1 | 51458,5 | 19,5 | 1960,50 |
| 51 | 318,0 | 277722,2 | 223924,7 | 53797,5 | 19,4 | 2049,61 |
| 54 | 331,8 | 290988,8 | 234852,3 | 56136,5 | 19,3 | 2138,73 |
| 57 | 345,6 | 304255,4 | 245779,9 | 58475,5 | 19,2 | 2227,84 |
| 60 | 359,4 | 317522,1 | 256707,5 | 60814,5 | 19,2 | 2316,95 |
| 63 | 373,2 | 330788,7 | 267635,1 | 63153,6 | 19,1 | 2406,07 |
| 66 | 387,1 | 344055,3 | 278562,8 | 65492,6 | 19,0 | 2495,18 |
| 69 | 400,9 | 357322,0 | 289490,4 | 67831,6 | 19,0 | 2584,30 |
| 72 | 414,7 | 370588,6 | 300418,0 | 70170,6 | 18,9 | 2673,41 |
| 75 | 428,5 | 383855,2 | 311345,6 | 72509,6 | 18,9 | 2762,52 |
| 78 | 442,4 | 397121,9 | 322273,2 | 74848,7 | 18,8 | 2851,64 |
| 81 | 456,2 | 410388,5 | 333200,8 | 77187,7 | 18,8 | 2940,75 |
| 84 | 470,0 | 423655,1 | 344128,4 | 79526,7 | 18,8 | 3029,86 |
| 87 | 483,8 | 436921,8 | 355056,0 | 81865,7 | 18,7 | 3118,98 |
| 90 | 497,7 | 450188,4 | 365983,7 | 84204,7 | 18,7 | 3208,09 |
| 93 | 511,5 | 463455,0 | 376911,3 | 86543,8 | 18,7 | 3297,21 |
| 96 | 525,3 | 476721,7 | 387838,9 | 88882,8 | 18,6 | 3386,32 |
| 99 | 539,1 | 489988,3 | 398766,5 | 91221,8 | 18,6 | 3475,43 |

V deležu izraženo zmanjšane toplotnih izgub je v primeru stolpnice v povprečju večje kakor pri bloku. Oblika in trend diagrama pa sta s povečevanjem dimenzij enkrat v višino, drugič v dolžino precej različna. Pri stolpnici se z višino delež prihranka glede na posamezno stanje povečuje ter umiri pri 28 etažah, kjer praktično doseže svojo limitno vrednost 25,5 %. Povečevanje ni enakomerno in je z vsakim korakom manjše. Sprememba deleža skozi celotni vzorec ni zanemarljiva, saj doseže vrednost 15 %. V primeru bloka pa je ravno obratno, delež prihrankov glede na posamezno stanje se z večanjem dolžine objekta z vsakim korakom zmanjša. Padec deleža je v tem primeru na začetku prav tako neenakomeren, vendar postane okoli 60 m dolžine približno konstanten, hkrati pa tudi zanemarljiv v primerjavi s spremembo deleža v primeru stolpnice. V celoti se spremeni le za 2,7 %.

3.3.1.2.2 Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

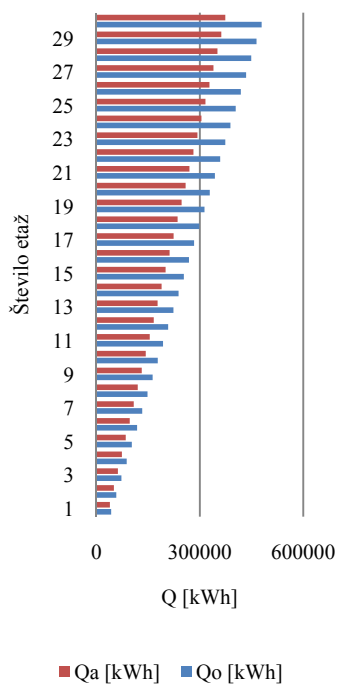
V primeru uporabe lesenih križno lepljenih plošč je sprememba transmisijskih toplotnih izgub za 25 % manjša kakor v primeru opečne ali armiranobetonske nosilne konstrukcija zaradi

strožjih določil pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah za lahke konstrukcijske sklope. Povedano velja za vse dimenzije obeh tipov objektov. Poudaril bi še, da v primeru stolpnice lesena konstrukcija ne predstavlja primarne nosilne konstrukcije, ampak le polnilo, ki nosi ostale sloje stavbnega ovoja.

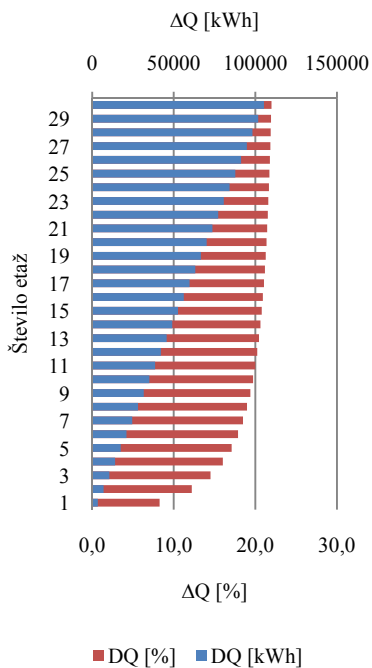
Preglednica 42: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z zunanjo steno iz križno lepljenih lesenih plošč

| Število etaž | ΔH_t | Q_o | Q_a | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|--------------|--------------|----------|----------|------------|------------|--------------|
| | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR/sezono] |
| 1 | 20,7 | 42467,8 | 38959,3 | 3508,5 | 8,3 | 133,67 |
| 2 | 41,5 | 57525,3 | 50508,2 | 7017,1 | 12,2 | 267,34 |
| 3 | 62,2 | 72582,7 | 62057,1 | 10525,6 | 14,5 | 401,01 |
| 4 | 82,9 | 87640,2 | 73606,1 | 14034,1 | 16,0 | 534,68 |
| 5 | 103,7 | 102697,6 | 85155,0 | 17542,7 | 17,1 | 668,35 |
| 6 | 124,4 | 117755,1 | 96703,9 | 21051,2 | 17,9 | 802,02 |
| 7 | 145,2 | 132812,5 | 108252,8 | 24559,7 | 18,5 | 935,69 |
| 8 | 165,9 | 147870,0 | 119801,7 | 28068,2 | 19,0 | 1069,36 |
| 9 | 186,6 | 162927,4 | 131350,6 | 31576,8 | 19,4 | 1203,03 |
| 10 | 207,4 | 177984,9 | 142899,6 | 35085,3 | 19,7 | 1336,70 |
| 11 | 228,1 | 193042,3 | 154448,5 | 38593,8 | 20,0 | 1470,38 |
| 12 | 248,8 | 208099,8 | 165997,4 | 42102,4 | 20,2 | 1604,05 |
| 13 | 269,6 | 223157,2 | 177546,3 | 45610,9 | 20,4 | 1737,72 |
| 14 | 290,3 | 238214,6 | 189095,2 | 49119,4 | 20,6 | 1871,39 |
| 15 | 311,0 | 253272,1 | 200644,1 | 52628,0 | 20,8 | 2005,06 |
| 16 | 331,8 | 268329,5 | 212193,0 | 56136,5 | 20,9 | 2138,73 |
| 17 | 352,5 | 283387,0 | 223742,0 | 59645,0 | 21,0 | 2272,40 |
| 18 | 373,2 | 298444,4 | 235290,9 | 63153,6 | 21,2 | 2406,07 |
| 19 | 394,0 | 313501,9 | 246839,8 | 66662,1 | 21,3 | 2539,74 |
| 20 | 414,7 | 328559,3 | 258388,7 | 70170,6 | 21,4 | 2673,41 |
| 21 | 435,5 | 343616,8 | 269937,6 | 73679,2 | 21,4 | 2807,08 |
| 22 | 456,2 | 358674,2 | 281486,5 | 77187,7 | 21,5 | 2940,75 |
| 23 | 476,9 | 373731,7 | 293035,4 | 80696,2 | 21,6 | 3074,42 |
| 24 | 497,7 | 388789,1 | 304584,4 | 84204,7 | 21,7 | 3208,09 |
| 25 | 518,4 | 403846,6 | 316133,3 | 87713,3 | 21,7 | 3341,76 |
| 26 | 539,1 | 418904,0 | 327682,2 | 91221,8 | 21,8 | 3475,43 |
| 27 | 559,9 | 433961,5 | 339231,1 | 94730,3 | 21,8 | 3609,10 |
| 28 | 580,6 | 449018,9 | 350780,0 | 98238,9 | 21,9 | 3742,77 |
| 29 | 601,3 | 464076,3 | 362328,9 | 101747,4 | 21,9 | 3876,44 |
| 30 | 622,1 | 479133,8 | 373877,9 | 105255,9 | 22,0 | 4010,11 |

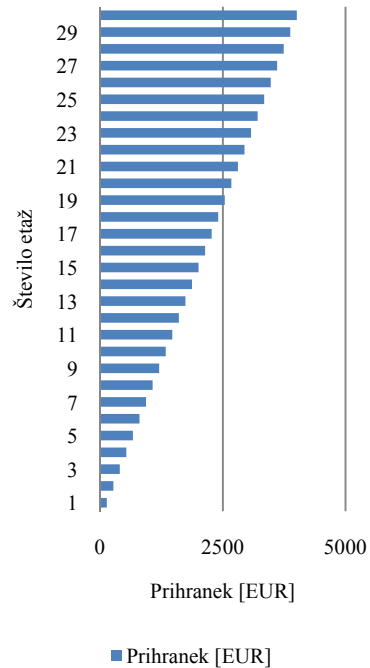
Posledično je tudi razmerje med prihrankom, izraženim v EUR, v primeru stolpnice in bloka enako. Sprememba transmisijskih izgub je manjša kakor v primeru opečne nosilne konstrukcije, saj je razlika v toplotni prehodnosti pri enakih debelinah uporabljenih izolacij v primeru lesene nosilne konstrukcije manjša. Razlika toplotnih prehodnosti pri enaki debelini dveh različno izolativnih materialov se s povečevanjem debeline zmanjšuje, ali z drugimi besedami, nižja toplotna prevodnost izgublja vpliv. Odnos med toplotno prehodnostjo in debelino materiala je prikazan že v uvodu te diplome.



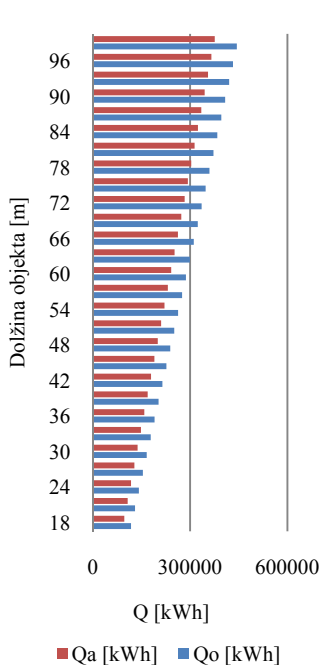
Grafikon 39: Toplotne izgube v stolpnici



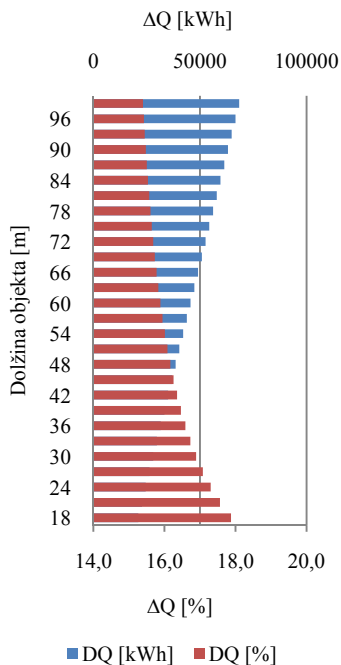
Grafikon 40: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici



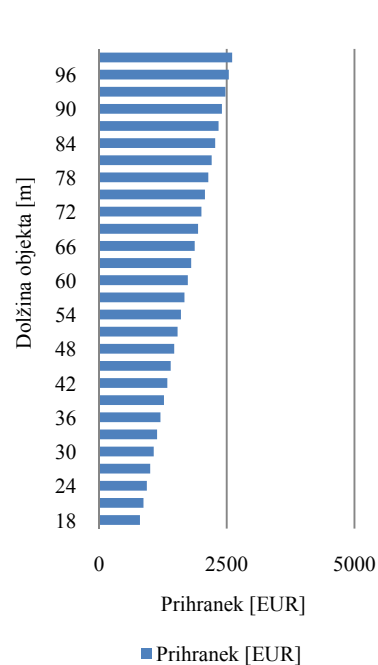
Grafikon 41: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR)



Grafikon 42: Toplotne izgube v bloku



Grafikon 43: Sprememba toplotnih izgub v bloku



Grafikon 44: Prihranek energije v bloku (izražen v EUR)

Preglednica 43: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z zunanjo steno iz križno lepljenih lesenih plošč

| Dolžina objekta | ΔH_t | Q _o | Q _a | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|--------------|
| [m] | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR/sezono] |
| 18 | 124,4 | 117755,1 | 96703,9 | 21051,2 | 17,9 | 802,02 |
| 21 | 134,8 | 129852,2 | 107046,7 | 22805,5 | 17,6 | 868,86 |
| 24 | 145,2 | 141949,3 | 117389,6 | 24559,7 | 17,3 | 935,69 |
| 27 | 155,5 | 154046,4 | 127732,5 | 26314,0 | 17,1 | 1002,53 |
| 30 | 165,9 | 166143,6 | 138075,3 | 28068,2 | 16,9 | 1069,36 |
| 33 | 176,3 | 178240,7 | 148418,2 | 29822,5 | 16,7 | 1136,20 |
| 36 | 186,6 | 190337,8 | 158761,0 | 31576,8 | 16,6 | 1203,03 |
| 39 | 197,0 | 202434,9 | 169103,9 | 33331,0 | 16,5 | 1269,87 |
| 42 | 207,4 | 214532,1 | 179446,8 | 35085,3 | 16,4 | 1336,70 |
| 45 | 217,7 | 226629,2 | 189789,6 | 36839,6 | 16,3 | 1403,54 |
| 48 | 228,1 | 238726,3 | 200132,5 | 38593,8 | 16,2 | 1470,38 |
| 51 | 238,5 | 250823,4 | 210475,3 | 40348,1 | 16,1 | 1537,21 |
| 54 | 248,8 | 262920,6 | 220818,2 | 42102,4 | 16,0 | 1604,05 |
| 57 | 259,2 | 275017,7 | 231161,0 | 43856,6 | 15,9 | 1670,88 |
| 60 | 269,6 | 287114,8 | 241503,9 | 45610,9 | 15,9 | 1737,72 |
| 63 | 279,9 | 299211,9 | 251846,8 | 47365,2 | 15,8 | 1804,55 |
| 66 | 290,3 | 311309,0 | 262189,6 | 49119,4 | 15,8 | 1871,39 |
| 69 | 300,7 | 323406,2 | 272532,5 | 50873,7 | 15,7 | 1938,22 |
| 72 | 311,0 | 335503,3 | 282875,3 | 52628,0 | 15,7 | 2005,06 |
| 75 | 321,4 | 347600,4 | 293218,2 | 54382,2 | 15,6 | 2071,89 |
| 78 | 331,8 | 359697,5 | 303561,0 | 56136,5 | 15,6 | 2138,73 |
| 81 | 342,1 | 371794,7 | 313903,9 | 57890,8 | 15,6 | 2205,56 |
| 84 | 352,5 | 383891,8 | 324246,8 | 59645,0 | 15,5 | 2272,40 |
| 87 | 362,9 | 395988,9 | 334589,6 | 61399,3 | 15,5 | 2339,23 |
| 90 | 373,2 | 408086,0 | 344932,5 | 63153,6 | 15,5 | 2406,07 |
| 93 | 383,6 | 420183,2 | 355275,3 | 64907,8 | 15,4 | 2472,90 |
| 96 | 394,0 | 432280,3 | 365618,2 | 66662,1 | 15,4 | 2539,74 |
| 99 | 404,4 | 444377,4 | 375961,0 | 68416,4 | 15,4 | 2606,57 |

Sprememba toplotnih izgub izražena v deležu v primeru stolpnice naraste za 13,7% na 22,0%, v primeru bloka pa pade za 2,5% s 17,9% na 15,4%. Zaključimo lahko, da je obnašanje omenjene količine podobno kakor v primeru opečne nosilne konstrukcije in da je sprememba toplotne izgube bistvena le v primeru stolpnice.

Stroška uvedbe enake debeline učinkovitejše aerogelne toplotne izolacije tudi v primeru nosilne konstrukcije iz lesenih križno lepljenih plošč ne bi pokrili s prihrankom energije v 50 letni življenski dobi objekta. Poudariti pa je ponovno treba, da enaka debelina aerogelne toplotne izolacije predstavlja trkrat debelješo izolacijo, kakor je potrebna za izpolnitev pogojev, ki jih podaja pravilnik o učinkoviti rabi energije.

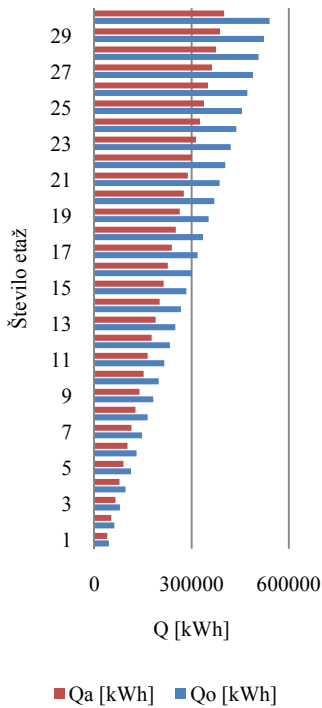
3.3.1.2.3 Armiranobetonska zunanja stena

Ob uporabi armiranega betona za nosilno konstrukcijo je sprememba transmisivskih izgub enaka tistim v primeru opečne nosilne konstrukcije, saj je sprememba toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov enaka, niso pa enake toplotne izgube, saj debelina toplotne izolacije različna pri enaki toplotni prehodnosti. To je posledica različne toplotne prevodnosti materiala nosilne konstrukcije, saj so vsi ostali sloji v obeh primerih enaki.

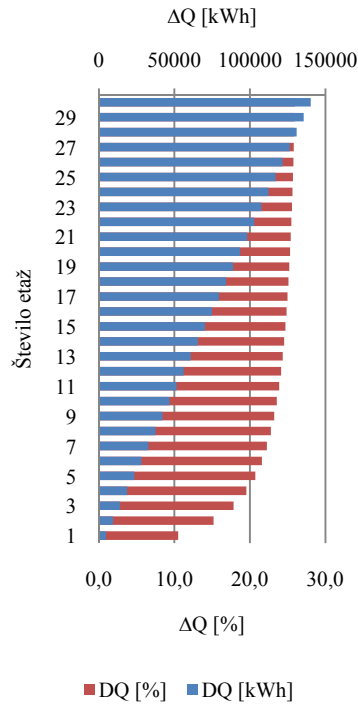
Preglednica 44: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer stolpnice z armiranobetonsko zunanjo steno

| Število etaž | ΔH_t | Q_o | Q_a | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|--------------|--------------|----------|----------|------------|------------|-----------|
| | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR] |
| 1 | 27,6 | 44514,5 | 39836,4 | 4678,0 | 10,5 | 178,23 |
| 2 | 55,3 | 61618,6 | 52262,5 | 9356,1 | 15,2 | 356,45 |
| 3 | 82,9 | 78722,7 | 64688,5 | 14034,1 | 17,8 | 534,68 |
| 4 | 110,6 | 95826,8 | 77114,6 | 18712,2 | 19,5 | 712,91 |
| 5 | 138,2 | 112930,8 | 89540,6 | 23390,2 | 20,7 | 891,14 |
| 6 | 165,9 | 130034,9 | 101966,7 | 28068,2 | 21,6 | 1069,36 |
| 7 | 193,5 | 147139,0 | 114392,7 | 32746,3 | 22,3 | 1247,59 |
| 8 | 221,2 | 164243,1 | 126818,8 | 37424,3 | 22,8 | 1425,82 |
| 9 | 248,8 | 181347,2 | 139244,8 | 42102,4 | 23,2 | 1604,05 |
| 10 | 276,5 | 198451,3 | 151670,9 | 46780,4 | 23,6 | 1782,27 |
| 11 | 304,1 | 215555,4 | 164096,9 | 51458,5 | 23,9 | 1960,50 |
| 12 | 331,8 | 232659,5 | 176523,0 | 56136,5 | 24,1 | 2138,73 |
| 13 | 359,4 | 249763,6 | 188949,0 | 60814,5 | 24,3 | 2316,95 |
| 14 | 387,1 | 266867,7 | 201375,1 | 65492,6 | 24,5 | 2495,18 |
| 15 | 414,7 | 283971,7 | 213801,1 | 70170,6 | 24,7 | 2673,41 |
| 16 | 442,4 | 301075,8 | 226227,2 | 74848,7 | 24,9 | 2851,64 |
| 17 | 470,0 | 318179,9 | 238653,2 | 79526,7 | 25,0 | 3029,86 |
| 18 | 497,7 | 335284,0 | 251079,3 | 84204,7 | 25,1 | 3208,09 |
| 19 | 525,3 | 352388,1 | 263505,3 | 88882,8 | 25,2 | 3386,32 |
| 20 | 553,0 | 369492,2 | 275931,4 | 93560,8 | 25,3 | 3564,55 |
| 21 | 580,6 | 386596,3 | 288357,4 | 98238,9 | 25,4 | 3742,77 |
| 22 | 608,3 | 403700,4 | 300783,5 | 102916,9 | 25,5 | 3921,00 |
| 23 | 635,9 | 420804,5 | 313209,5 | 107595,0 | 25,6 | 4099,23 |
| 24 | 663,6 | 437908,6 | 325635,6 | 112273,0 | 25,6 | 4277,46 |
| 25 | 691,2 | 455012,6 | 338061,6 | 116951,0 | 25,7 | 4455,68 |
| 26 | 718,8 | 472116,7 | 350487,6 | 121629,1 | 25,8 | 4633,91 |
| 27 | 746,5 | 489220,8 | 362913,7 | 126307,1 | 25,8 | 4812,14 |
| 28 | 774,1 | 506324,9 | 375339,7 | 130985,2 | 25,9 | 4990,36 |
| 29 | 801,8 | 523429,0 | 387765,8 | 135663,2 | 25,9 | 5168,59 |
| 30 | 829,4 | 540533,1 | 400191,8 | 140341,2 | 26,0 | 5346,82 |

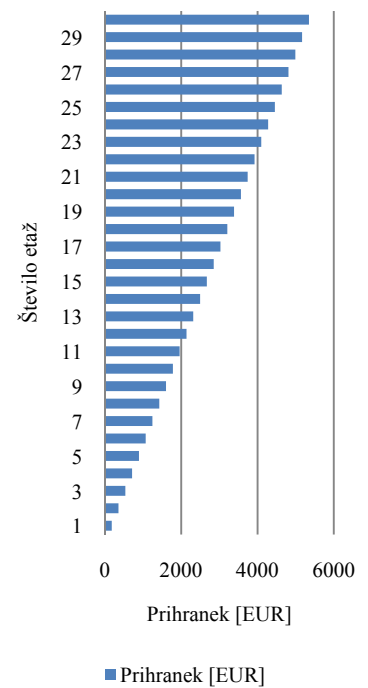
Posledično je tudi končni finančni prihranek enak kakor pri opečni nosilni konstrukciji, medtem ko je delež toplotne spremembe glede na izhodiščni primer različen kot pri opečni nosilni konstrukciji.



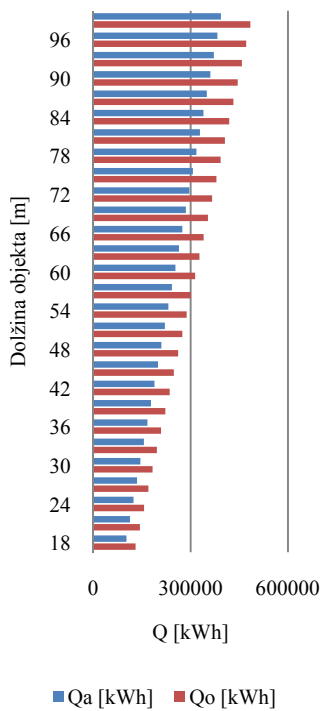
Grafikon 45: Toplotne izgube v stolpnici



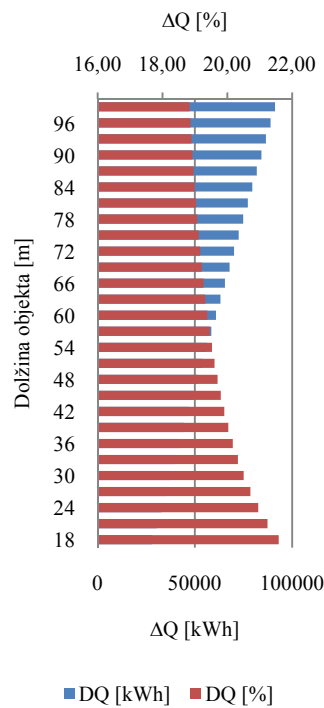
Grafikon 46: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici



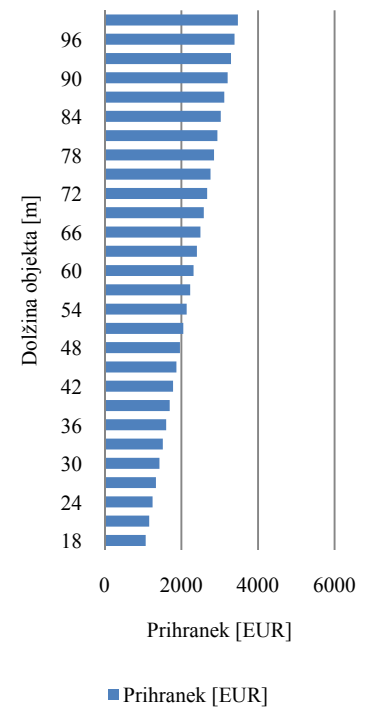
Grafikon 47: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR)



Grafikon 48: Toplotne izgube v stolpnici



Grafikon 49: Sprememba toplotnih izgub v stolpnici



Grafikon 50: Prihranek energije v stolpnici (izražen v EUR)

Preglednica 45: Rezultati izračuna energijskega prihranka za primer bloka z armiranobetonsko zunanjo steno

| Dolžina objekta | ΔH_t | Q _o | Q _a | ΔQ | ΔQ | Prihranek |
|-----------------|--------------|----------------|----------------|------------|------------|--------------|
| [m] | [W/K] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] | [EUR/sezono] |
| 18 | 165,9 | 130034,9 | 101966,7 | 28068,2 | 21,59 | 1069,36 |
| 21 | 179,7 | 143155,4 | 112748,1 | 30407,3 | 21,24 | 1158,48 |
| 24 | 193,5 | 156275,8 | 123529,5 | 32746,3 | 20,95 | 1247,59 |
| 27 | 207,4 | 169396,3 | 134311,0 | 35085,3 | 20,71 | 1336,70 |
| 30 | 221,2 | 182516,7 | 145092,4 | 37424,3 | 20,50 | 1425,82 |
| 33 | 235,0 | 195637,2 | 155873,8 | 39763,4 | 20,33 | 1514,93 |
| 36 | 248,8 | 208757,6 | 166655,2 | 42102,4 | 20,17 | 1604,05 |
| 39 | 262,7 | 221878,1 | 177436,7 | 44441,4 | 20,03 | 1693,16 |
| 42 | 276,5 | 234998,5 | 188218,1 | 46780,4 | 19,91 | 1782,27 |
| 45 | 290,3 | 248118,9 | 198999,5 | 49119,4 | 19,80 | 1871,39 |
| 48 | 304,1 | 261239,4 | 209780,9 | 51458,5 | 19,70 | 1960,50 |
| 51 | 318,0 | 274359,8 | 220562,4 | 53797,5 | 19,61 | 2049,61 |
| 54 | 331,8 | 287480,3 | 231343,8 | 56136,5 | 19,53 | 2138,73 |
| 57 | 345,6 | 300600,7 | 242125,2 | 58475,5 | 19,45 | 2227,84 |
| 60 | 359,4 | 313721,2 | 252906,6 | 60814,5 | 19,38 | 2316,95 |
| 63 | 373,2 | 326841,6 | 263688,0 | 63153,6 | 19,32 | 2406,07 |
| 66 | 387,1 | 339962,1 | 274469,5 | 65492,6 | 19,26 | 2495,18 |
| 69 | 400,9 | 353082,5 | 285250,9 | 67831,6 | 19,21 | 2584,30 |
| 72 | 414,7 | 366202,9 | 296032,3 | 70170,6 | 19,16 | 2673,41 |
| 75 | 428,5 | 379323,4 | 306813,7 | 72509,6 | 19,12 | 2762,52 |
| 78 | 442,4 | 392443,8 | 317595,2 | 74848,7 | 19,07 | 2851,64 |
| 81 | 456,2 | 405564,3 | 328376,6 | 77187,7 | 19,03 | 2940,75 |
| 84 | 470,0 | 418684,7 | 339158,0 | 79526,7 | 18,99 | 3029,86 |
| 87 | 483,8 | 431805,2 | 349939,4 | 81865,7 | 18,96 | 3118,98 |
| 90 | 497,7 | 444925,6 | 360720,9 | 84204,7 | 18,93 | 3208,09 |
| 93 | 511,5 | 458046,1 | 371502,3 | 86543,8 | 18,89 | 3297,21 |
| 96 | 525,3 | 471166,5 | 382283,7 | 88882,8 | 18,86 | 3386,32 |
| 99 | 539,1 | 484286,9 | 393065,1 | 91221,8 | 18,84 | 3475,43 |

3.3.2 Analiza prihrankov tlorisne površine

Zaradi zahtevnosti proizvodnje je aerogelna toplotna izolacija Spaceloft dražja od polistirena ali kamene volne. Cilj tega dela diplomske naloge je poiskati robne pogoje, pri katerih je uvedba omenjene toplotne izolacije v stanovanjske stavbe opravičena. Že vnaprej vemo, da je ta ocena lahko le približna in groba, saj je prava finančna konstrukcija prezapletena in prekomerno odvisna od specifik posameznega objekta. Stroške sem zato izračunal le za primera uporabe polistirena in aerogelne izolacije.

Zaradi boljše toplotne izolativnosti aerogelne odeje so končni konstrukcijski sklopi tanjši, če vzamemo enakovredno debelino aerogelne izolacije, kakor je potrebna v primeru uporabe polistirena ali kamene volne. Enako kot v drugem modulu je osnovna debelina toplotne izolacije tista, ki izpolni zahteve pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah. Tako se na račun manjše debeline konstrukcijskih sklopov zunanjih sten pri enakih zunanjih gabaritih objekta neto tlorisno površina poveča.

3.3.2.1 Določitev parametrov in računske metode

Za izračun tlorisnih prihrankov je pozicija toplotne izolacije nepomembna, saj je pomembna le debelina konstrukcijskega sklopa, da lahko izračunamo neto tlorisno površino za vse primere uporabe različne toplotne izolacije in nadaljne razlike, ki jo predstavljajo. Toplotna prehodnost pa je prav tako neodvisna od mesta namestitve toplotne izolacije glede na nosilno konstrukcijo, zato lahko vzamemo katerokoli od variant posameznih konstrukcijskih sklopov.

Neto tlorisno površino, mišljena je površina tlorisa brez zunanlega ovoja, izračunam preprosto tako, da odštejem tlorisno površino, ki jo zavzame ovoj s posameznim tipom konstrukcijskega sklopa $A_{ovoj}^{material}$, od bruto tlorisne površine A_{bruto} in sem jo označil z A_{neto} . Njeno absolutno razliko med obravnavami primeri pa s pomočjo enačbe (28)

$$\Delta A_{neto} = (A_{bruto} - A_{ovoj}^{aerogel}) - (A_{bruto} - A_{ovoj}^{polistiren}) \quad (29)$$

Ocena, ali je dodatni strošek ob uporabi aerogelne toplotne izolacije opravičen, pa opravimo na podlagi informacije, ali je ta nižji kakor je komercialna cena povečane površine tlorisa. Za namen diplomske naloge sem predpostavil, da v kolikor je strošek za toplotno izolacijo nižji od omenjenega prihodka, je uvedba aerogelne izolacije nesporna. Napako v rezultatu predstavlja odstopanje od izračunanega povečanja tlorisne površine zaradi zanemaritve notranjih sten, nakar bi posledično moral korigirati komercialno ceno 1 m² neto tlorisne površine. V tako splošni nalogi, ko ne obravnavamo konkretnega objekta, je to napako nemogoče natančno določiti, ocenjujem pa jo na 2-5 %. Drugo omejitev predstavlja dejstvo, da obravnavam le strošek materiala brez izvedbe. V opisanem načinu izračuna gre tako le za notranjo prerazporeditev stroškov.

V opravljeni analizi sem upošteval, da je komercialna cena 1 m² neto etažne površine stanovanjske gradnje v mestu 2500 EUR, za material pa sem določil štiri cenovne razrede, ki so v nadaljevanju označeni s PI, PII, PIII in PIV. Material je dostopen le preko poslovnih povezav zato je oblikovanje cen materiala močno podvrženo poslovnim učinkom iskazane potrebe po aerogelni izolaciji. Hkrati je potrebno določiti za vsako širšo uvedbo v objekt ali specifično aplikacijo ali je stroškovno opravičena njena uporaba.

3.3.2.2 Rezultati in komentar

3.3.2.2.1 Opečna zunanja stena

Preglednica 46: Vhodni podatki – opečna zunanja stena

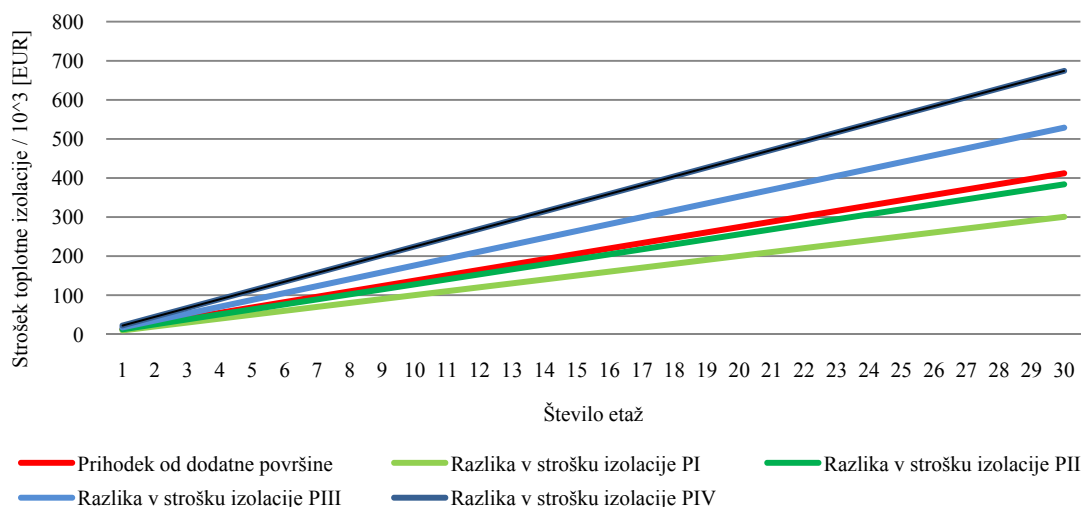
| Stolpnica | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Aneto, etaža | 292,03 | 292,03 | 292,03 | 297,52 |
| Astreha | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Atla, teren | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Ustena | 0,27 | 0,27 | 0,11 | 0,27 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utla na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Uzasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

| Blok | | | | |
|----------------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D |
| Ustena | 0,27 | 0,27 | 0,11 | 0,27 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utla na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Uzasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

Preglednica 47: Strošek 1 m² potrebne izolacije

| | Debelina [cm] | Cena - debelina 1cm [EUR/m ²] | | | | Končna cena [EUR/m ²] | | | |
|------------|---------------|---|------|------|------|-----------------------------------|------|------|------|
| | | PI | PII | PIII | PIV | PI | PII | PIII | PIV |
| Polistiren | 12 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 9,96 | 9,96 | 9,96 | 9,96 |
| Aerogel | 4 | 17 | 21 | 28 | 35 | 68 | 84 | 112 | 140 |

Stavbi z opečnimi zunanjimi stenami imata izmed obravnavanih konstrukcij srednjo dimenzijo toplotne izolacije. Tlorisni prihranki pa so najmanjši, saj je razlika v debelini konstrukcijskega sklopa med primeroma uporabe polistirena in ekvivalentne debeline aerogelne izolacije v tem primeru konstrukcije najmanjša za oba tipa stavbe, stolpnico in blok. Povedano lahko utemeljimo s primeravo delaža povečanja neto tlorisne površine, ki je najmanjši od vseh treh variant obravnavanih materialov nosilne konstrukcije. V primeru stolpnice je delež konstanten in enak 1,9 %, v primeru bloka pa se spreminja in pade z vrednosti 1,9 % na vrednost 1,1 %. So pa omenjeni prihranki v primeru stolpnice v absolutnih številkah do 40 % večji in je zato uporaba učinkovitejše izolacije v njej bolj opravičena. Dodatni stroški so za cenovna razreda aerogel PI in PII popolnoma opravičeni v obeh tipih stavb. V primeru uporabe razreda PI ima investitor glede na narejene predpostavke, kljub skoraj 7-krat višji ceni od polistirenske toplotne izolacije, v stolpnici 27 %, v bloku pa celo do 30 % dobiček. Če uporabimo cenovni razred PII, je ta isti dobiček v primeru stolpnice le še 7 % in v bloku 10 %.

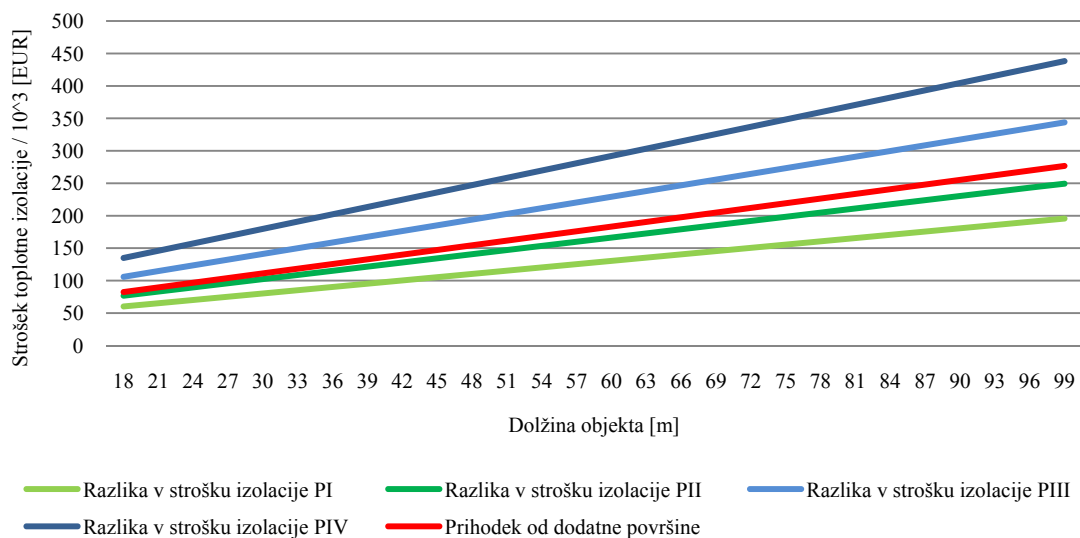


Grafikon 51: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etajž v stolpnici

Preglednica 48: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – opečna zunanja stena

Cena [EUR]

| Št. etajž | Višina objekta [m] | ΔA_{neto} [m ²] | Prihodek [EUR] | Polistiren | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | |
|-----------|--------------------|-------------------------------------|----------------|------------|---------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 3 | 5,49 | 13,74 | 1,72 | 11,75 | 14,52 | 19,35 | 24,19 | 10,03 | 12,79 | 17,63 | 22,47 |
| 2 | 6 | 10,99 | 27,47 | 3,44 | 23,50 | 29,03 | 38,71 | 48,38 | 20,06 | 25,59 | 35,27 | 44,94 |
| 3 | 9 | 16,48 | 41,21 | 5,16 | 35,25 | 43,55 | 58,06 | 72,58 | 30,09 | 38,38 | 52,90 | 67,41 |
| 4 | 12 | 21,98 | 54,94 | 6,88 | 47,00 | 58,06 | 77,41 | 96,77 | 40,12 | 51,18 | 70,53 | 89,88 |
| 5 | 15 | 27,47 | 68,68 | 8,61 | 58,75 | 72,58 | 96,77 | 120,96 | 50,15 | 63,97 | 88,16 | 112,35 |
| 6 | 18 | 32,96 | 82,41 | 10,33 | 70,50 | 87,09 | 116,12 | 145,15 | 60,18 | 76,76 | 105,80 | 134,83 |
| 7 | 21 | 38,46 | 96,15 | 12,05 | 82,25 | 101,61 | 135,48 | 169,34 | 70,21 | 89,56 | 123,43 | 157,30 |
| 8 | 24 | 43,95 | 109,88 | 13,77 | 94,00 | 116,12 | 154,83 | 193,54 | 80,23 | 102,35 | 141,06 | 179,77 |
| 9 | 27 | 49,45 | 123,62 | 15,49 | 105,75 | 130,64 | 174,18 | 217,73 | 90,26 | 115,15 | 158,69 | 202,24 |
| 10 | 30 | 54,94 | 137,35 | 17,21 | 117,50 | 145,15 | 193,54 | 241,92 | 100,29 | 127,94 | 176,33 | 224,71 |
| 11 | 33 | 60,43 | 151,09 | 18,93 | 129,25 | 159,67 | 212,89 | 266,11 | 110,32 | 140,74 | 193,96 | 247,18 |
| 12 | 36 | 65,93 | 164,82 | 20,65 | 141,00 | 174,18 | 232,24 | 290,30 | 120,35 | 153,53 | 211,59 | 269,65 |
| 13 | 39 | 71,42 | 178,56 | 22,37 | 152,76 | 188,70 | 251,60 | 314,50 | 130,38 | 166,32 | 229,22 | 292,12 |
| 14 | 42 | 76,92 | 192,29 | 24,10 | 164,51 | 203,21 | 270,95 | 338,69 | 140,41 | 179,12 | 246,86 | 314,59 |
| 15 | 45 | 82,41 | 206,03 | 25,82 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 150,44 | 191,91 | 264,49 | 337,06 |
| 16 | 48 | 87,90 | 219,76 | 27,54 | 188,01 | 232,24 | 309,66 | 387,07 | 160,47 | 204,71 | 282,12 | 359,53 |
| 17 | 51 | 93,40 | 233,50 | 29,26 | 199,76 | 246,76 | 329,01 | 411,26 | 170,50 | 217,50 | 299,75 | 382,01 |
| 18 | 54 | 98,89 | 247,23 | 30,98 | 211,51 | 261,27 | 348,36 | 435,46 | 180,53 | 230,29 | 317,39 | 404,48 |
| 19 | 57 | 104,39 | 260,97 | 32,70 | 223,26 | 275,79 | 367,72 | 459,65 | 190,56 | 243,09 | 335,02 | 426,95 |
| 20 | 60 | 109,88 | 274,70 | 34,42 | 235,01 | 290,30 | 387,07 | 483,84 | 200,59 | 255,88 | 352,65 | 449,42 |
| 21 | 63 | 115,37 | 288,44 | 36,14 | 246,76 | 304,82 | 406,43 | 508,03 | 210,62 | 268,68 | 370,28 | 471,89 |
| 22 | 66 | 120,87 | 302,17 | 37,86 | 258,51 | 319,33 | 425,78 | 532,22 | 220,64 | 281,47 | 387,92 | 494,36 |
| 23 | 69 | 126,36 | 315,91 | 39,59 | 270,26 | 333,85 | 445,13 | 556,42 | 230,67 | 294,26 | 405,55 | 516,83 |
| 24 | 72 | 131,86 | 329,64 | 41,31 | 282,01 | 348,36 | 464,49 | 580,61 | 240,70 | 307,06 | 423,18 | 539,30 |
| 25 | 75 | 137,35 | 343,38 | 43,03 | 293,76 | 362,88 | 483,84 | 604,80 | 250,73 | 319,85 | 440,81 | 561,77 |
| 26 | 78 | 142,84 | 357,11 | 44,75 | 305,51 | 377,40 | 503,19 | 628,99 | 260,76 | 332,65 | 458,45 | 584,24 |
| 27 | 81 | 148,34 | 370,85 | 46,47 | 317,26 | 391,91 | 522,55 | 653,18 | 270,79 | 345,44 | 476,08 | 606,71 |
| 28 | 84 | 153,83 | 384,58 | 48,19 | 329,01 | 406,43 | 541,90 | 677,38 | 280,82 | 358,24 | 493,71 | 629,19 |
| 29 | 87 | 159,33 | 398,32 | 49,91 | 340,76 | 420,94 | 561,25 | 701,57 | 290,85 | 371,03 | 511,34 | 651,66 |
| 30 | 90 | 164,82 | 412,05 | 51,63 | 352,51 | 435,46 | 580,61 | 725,76 | 300,88 | 383,82 | 528,98 | 674,13 |



Grafikon 52: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – opečna zunanja stena

Preglednica 49: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – opečna zunanja stena

Cena [EUR]

| Dolžina objekta | Δ Aneto | Prihodek | Polistiren | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | |
|-----------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| [m] | [m ²] | [EUR] | | | | | | | | | |
| | | x10 ³ | x10 ³ | x10 ³ | | | | x10 ³ | | | |
| 18 | 32,96 | 82,41 | 10,33 | 70,50 | 87,09 | 116,12 | 145,15 | 60,18 | 76,76 | 105,80 | 134,83 |
| 21 | 35,84 | 89,61 | 11,19 | 76,38 | 94,35 | 125,80 | 157,25 | 65,19 | 83,16 | 114,61 | 146,06 |
| 24 | 38,72 | 96,81 | 12,05 | 82,25 | 101,61 | 135,48 | 169,34 | 70,21 | 89,56 | 123,43 | 157,30 |
| 27 | 41,60 | 104,01 | 12,91 | 88,13 | 108,86 | 145,15 | 181,44 | 75,22 | 95,96 | 132,24 | 168,53 |
| 30 | 44,48 | 111,21 | 13,77 | 94,00 | 116,12 | 154,83 | 193,54 | 80,23 | 102,35 | 141,06 | 179,77 |
| 33 | 47,36 | 118,41 | 14,63 | 99,88 | 123,38 | 164,51 | 205,63 | 85,25 | 108,75 | 149,88 | 191,00 |
| 36 | 50,24 | 125,61 | 15,49 | 105,75 | 130,64 | 174,18 | 217,73 | 90,26 | 115,15 | 158,69 | 202,24 |
| 39 | 53,12 | 132,81 | 16,35 | 111,63 | 137,89 | 183,86 | 229,82 | 95,28 | 121,54 | 167,51 | 213,47 |
| 42 | 56,00 | 140,01 | 17,21 | 117,50 | 145,15 | 193,54 | 241,92 | 100,29 | 127,94 | 176,33 | 224,71 |
| 45 | 58,88 | 147,21 | 18,07 | 123,38 | 152,41 | 203,21 | 254,02 | 105,31 | 134,34 | 185,14 | 235,94 |
| 48 | 61,76 | 154,41 | 18,93 | 129,25 | 159,67 | 212,89 | 266,11 | 110,32 | 140,74 | 193,96 | 247,18 |
| 51 | 64,64 | 161,61 | 19,79 | 135,13 | 166,92 | 222,57 | 278,21 | 115,34 | 147,13 | 202,77 | 258,42 |
| 54 | 67,52 | 168,81 | 20,65 | 141,00 | 174,18 | 232,24 | 290,30 | 120,35 | 153,53 | 211,59 | 269,65 |
| 57 | 70,40 | 176,01 | 21,51 | 146,88 | 181,44 | 241,92 | 302,40 | 125,37 | 159,93 | 220,41 | 280,89 |
| 60 | 73,28 | 183,21 | 22,37 | 152,76 | 188,70 | 251,60 | 314,50 | 130,38 | 166,32 | 229,22 | 292,12 |
| 63 | 76,16 | 190,41 | 23,23 | 158,63 | 195,96 | 261,27 | 326,59 | 135,40 | 172,72 | 238,04 | 303,36 |
| 66 | 79,04 | 197,61 | 24,10 | 164,51 | 203,21 | 270,95 | 338,69 | 140,41 | 179,12 | 246,86 | 314,59 |
| 69 | 81,92 | 204,81 | 24,96 | 170,38 | 210,47 | 280,63 | 350,78 | 145,43 | 185,51 | 255,67 | 325,83 |
| 72 | 84,80 | 212,01 | 25,82 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 150,44 | 191,91 | 264,49 | 337,06 |
| 75 | 87,68 | 219,21 | 26,68 | 182,13 | 224,99 | 299,98 | 374,98 | 155,45 | 198,31 | 273,30 | 348,30 |
| 78 | 90,56 | 226,41 | 27,54 | 188,01 | 232,24 | 309,66 | 387,07 | 160,47 | 204,71 | 282,12 | 359,53 |
| 81 | 93,44 | 233,61 | 28,40 | 193,88 | 239,50 | 319,33 | 399,17 | 165,48 | 211,10 | 290,94 | 370,77 |
| 84 | 96,32 | 240,81 | 29,26 | 199,76 | 246,76 | 329,01 | 411,26 | 170,50 | 217,50 | 299,75 | 382,01 |
| 87 | 99,20 | 248,01 | 30,12 | 205,63 | 254,02 | 338,69 | 423,36 | 175,51 | 223,90 | 308,57 | 393,24 |
| 90 | 102,08 | 255,21 | 30,98 | 211,51 | 261,27 | 348,36 | 435,46 | 180,53 | 230,29 | 317,39 | 404,48 |
| 93 | 104,96 | 262,41 | 31,84 | 217,38 | 268,53 | 358,04 | 447,55 | 185,54 | 236,69 | 326,20 | 415,71 |
| 96 | 107,84 | 269,61 | 32,70 | 223,26 | 275,79 | 367,72 | 459,65 | 190,56 | 243,09 | 335,02 | 426,95 |
| 99 | 110,72 | 276,81 | 33,56 | 229,13 | 283,05 | 377,40 | 471,74 | 195,57 | 249,49 | 343,83 | 438,18 |

3.3.2.2.2 Nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

Preglednica 50: Začetni podatki – nosilna konstrukcija iz lesenih križno lepljenih plošč

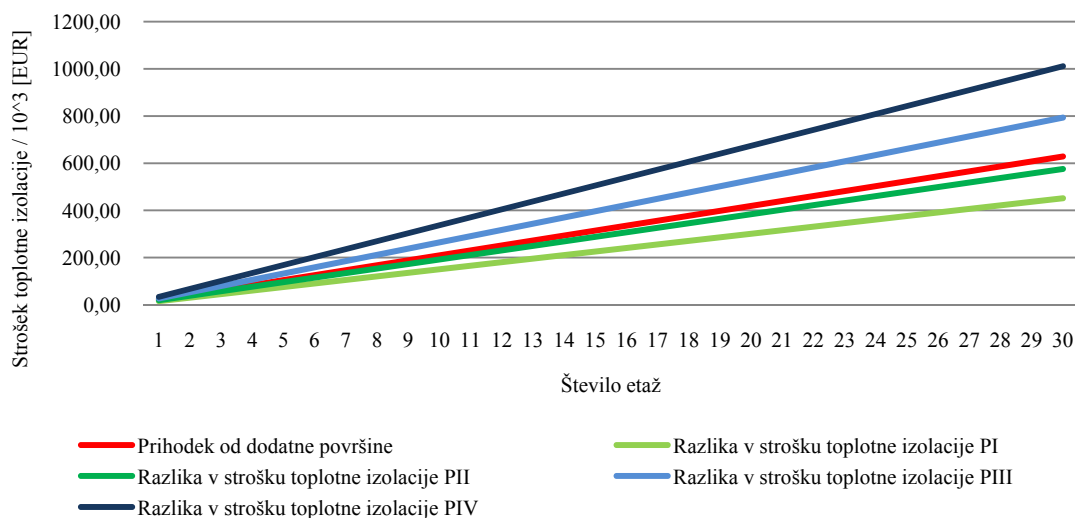
| Stolpnica | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Aneto, etaža | 300,61 | 300,61 | 300,61 | 308,99 |
| Astreha | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Atla, teren | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Ustena | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,19 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utlá na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Uzasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

| Blok | | | | |
|----------------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D |
| Ustena | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,19 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utlá na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Zasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

Preglednica 51: Strošek 1 m² potrebne izolacije

| | Debelina [cm] | Cena - debelina 1cm [EUR/m ²] | | | | Končna cena [EUR/m ²] | | | |
|------------|---------------|---|------|------|------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | | PI | PII | PIII | PIV | PI | PII | PIII | PIV |
| Polistiren | 18 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 14,94 | 14,94 | 14,94 | 14,94 |
| Aerogel | 6 | 17 | 21 | 28 | 35 | 102 | 126 | 168 | 210 |

Tlorisni prihranki so največji ob uporabi lesenih križno lepljenih plošč za nosilno konstrukcijo oziroma polnilo, vendar je tudi strošek najvišji zaradi zahtev pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah in je za polovico višji kakor v primeru opečne zunanje stene. Hkrati se za enak faktor poveča pridobitev neto površine. Uporaba učinkovitejše izolacije v polni debelini je opravičena za cenovna razreda aerogela PI in PII. Tudi za obravnavano leseno nosilno konstrukcijo je dobiček večji za primer stolpnice za dobrih 35 % od tistega v bloku in znaša približno 28 % zneska, ki ga investitor pridobi s prodajo dodatne tlorisne površine v obeh tipih stavb. Če bi vzeli cenovni razred PII, bi bil dobiček visok le še 5–8 % zaslужka. Opazim tudi, da je delež povečanja neto tlorisne površine konstanten s povečevanjem števila etaž pri stolpnici z vrednotjo 2,8 % ter nasprotno spreminjajoč se v primeru bloka, kjer ta delež ob povečanju dolžine objekta pade z 2,8 % na 1,6 %.

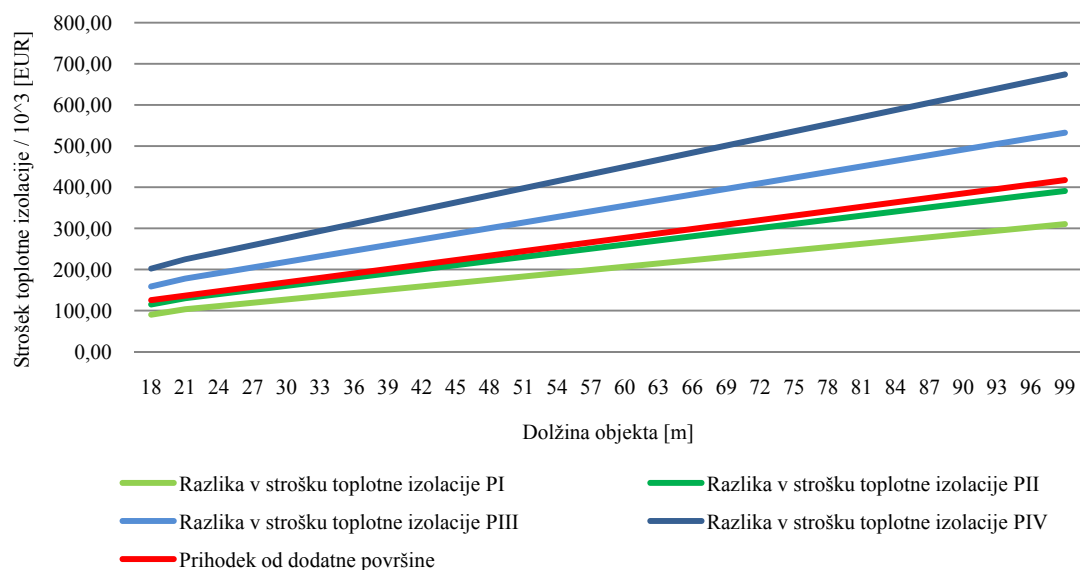


Grafikon 53: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etaž stolpnice – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč

Preglednica 52: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč

Cena [EUR]

| Št etaž | Višina objekta [m] | Δ Aneto [m ²] | Prihodek [EUR] | Polistiren | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | |
|---------|--------------------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|---------|----------------------|--------|--------|---------|
| | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| | | | x10 ³ | x10 ³ | x10 ³ | | | | x10 ³ | | | |
| 1 | 3 | 8,38 | 20,95 | 2,58 | 17,63 | 21,77 | 29,03 | 36,29 | 15,04 | 19,19 | 26,45 | 33,71 |
| 2 | 6 | 16,76 | 41,90 | 5,16 | 35,25 | 43,55 | 58,06 | 72,58 | 30,09 | 38,38 | 52,90 | 67,41 |
| 3 | 9 | 25,14 | 62,85 | 7,74 | 52,88 | 65,32 | 87,09 | 108,86 | 45,13 | 57,57 | 79,35 | 101,12 |
| 4 | 12 | 33,52 | 83,80 | 10,33 | 70,50 | 87,09 | 116,12 | 145,15 | 60,18 | 76,76 | 105,80 | 134,83 |
| 5 | 15 | 41,90 | 104,75 | 12,91 | 88,13 | 108,86 | 145,15 | 181,44 | 75,22 | 95,96 | 132,24 | 168,53 |
| 6 | 18 | 50,28 | 125,70 | 15,49 | 105,75 | 130,64 | 174,18 | 217,73 | 90,26 | 115,15 | 158,69 | 202,24 |
| 7 | 21 | 58,66 | 146,65 | 18,07 | 123,38 | 152,41 | 203,21 | 254,02 | 105,31 | 134,34 | 185,14 | 235,94 |
| 8 | 24 | 67,04 | 167,60 | 20,65 | 141,00 | 174,18 | 232,24 | 290,30 | 120,35 | 153,53 | 211,59 | 269,65 |
| 9 | 27 | 75,42 | 188,55 | 23,23 | 158,63 | 195,96 | 261,27 | 326,59 | 135,40 | 172,72 | 238,04 | 303,36 |
| 10 | 30 | 83,80 | 209,50 | 25,82 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 150,44 | 191,91 | 264,49 | 337,06 |
| 11 | 33 | 92,18 | 230,45 | 28,40 | 193,88 | 239,50 | 319,33 | 399,17 | 165,48 | 211,10 | 290,94 | 370,77 |
| 12 | 36 | 100,56 | 251,40 | 30,98 | 211,51 | 261,27 | 348,36 | 435,46 | 180,53 | 230,29 | 317,39 | 404,48 |
| 13 | 39 | 108,94 | 272,35 | 33,56 | 229,13 | 283,05 | 377,40 | 471,74 | 195,57 | 249,49 | 343,83 | 438,18 |
| 14 | 42 | 117,32 | 293,30 | 36,14 | 246,76 | 304,82 | 406,43 | 508,03 | 210,62 | 268,68 | 370,28 | 471,89 |
| 15 | 45 | 125,70 | 314,25 | 38,72 | 264,38 | 326,59 | 435,46 | 544,32 | 225,66 | 287,87 | 396,73 | 505,60 |
| 16 | 48 | 134,08 | 335,20 | 41,31 | 282,01 | 348,36 | 464,49 | 580,61 | 240,70 | 307,06 | 423,18 | 539,30 |
| 17 | 51 | 142,46 | 356,15 | 43,89 | 299,64 | 370,14 | 493,52 | 616,90 | 255,75 | 326,25 | 449,63 | 573,01 |
| 18 | 54 | 150,84 | 377,10 | 46,47 | 317,26 | 391,91 | 522,55 | 653,18 | 270,79 | 345,44 | 476,08 | 606,71 |
| 19 | 57 | 159,22 | 398,05 | 49,05 | 334,89 | 413,68 | 551,58 | 689,47 | 285,84 | 364,63 | 502,53 | 640,42 |
| 20 | 60 | 167,60 | 419,00 | 51,63 | 352,51 | 435,46 | 580,61 | 725,76 | 300,88 | 383,82 | 528,98 | 674,13 |
| 21 | 63 | 175,98 | 439,95 | 54,21 | 370,14 | 457,23 | 609,64 | 762,05 | 315,92 | 403,01 | 555,42 | 707,83 |
| 22 | 66 | 184,36 | 460,90 | 56,80 | 387,76 | 479,00 | 638,67 | 798,34 | 330,97 | 422,21 | 581,87 | 741,54 |
| 23 | 69 | 192,74 | 481,85 | 59,38 | 405,39 | 500,77 | 667,70 | 834,62 | 346,01 | 441,40 | 608,32 | 775,25 |
| 24 | 72 | 201,12 | 502,80 | 61,96 | 423,01 | 522,55 | 696,73 | 870,91 | 361,06 | 460,59 | 634,77 | 808,95 |
| 25 | 75 | 209,50 | 523,75 | 64,54 | 440,64 | 544,32 | 725,76 | 907,20 | 376,10 | 479,78 | 661,22 | 842,66 |
| 26 | 78 | 217,88 | 544,70 | 67,12 | 458,27 | 566,09 | 754,79 | 943,49 | 391,14 | 498,97 | 687,67 | 876,37 |
| 27 | 81 | 226,26 | 565,65 | 69,70 | 475,89 | 587,87 | 783,82 | 979,78 | 406,19 | 518,16 | 714,12 | 910,07 |
| 28 | 84 | 234,64 | 586,60 | 72,29 | 493,52 | 609,64 | 812,85 | 1016,06 | 421,23 | 537,35 | 740,57 | 943,78 |
| 29 | 87 | 243,02 | 607,55 | 74,87 | 511,14 | 631,41 | 841,88 | 1052,35 | 436,28 | 556,54 | 767,01 | 977,48 |
| 30 | 90 | 251,40 | 628,50 | 77,45 | 528,77 | 653,18 | 870,91 | 1088,64 | 451,32 | 575,74 | 793,46 | 1011,19 |



Grafikon 54: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč

Preglednica 53: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – nosilna konstrukcija iz križno lepljenih lesenih plošč

Cena [EUR]

| Dolžina objekta | Višina objekta | ΔA_{neto} | Prihodek | Polistiren | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | | | |
|-----------------|----------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|--|--|
| | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV | | |
| [m] | [m] | [m ²] | | | | | | | | | | | | |
| | | | x10 ³ | x10 ³ | x10 ³ | | | | x10 ³ | | | | | |
| 18 | 3 | 50,28 | 125,70 | 15,49 | 105,75 | 130,64 | 174,18 | 217,73 | 90,26 | 115,15 | 158,69 | 202,24 | | |
| 21 | 12 | 54,60 | 136,50 | 11,19 | 114,57 | 141,52 | 188,70 | 235,87 | 103,38 | 130,34 | 177,51 | 224,68 | | |
| 24 | 21 | 58,92 | 147,30 | 12,05 | 123,38 | 152,41 | 203,21 | 254,02 | 111,33 | 140,36 | 191,17 | 241,97 | | |
| 27 | 30 | 63,24 | 158,10 | 12,91 | 132,19 | 163,30 | 217,73 | 272,16 | 119,28 | 150,39 | 204,82 | 259,25 | | |
| 30 | 39 | 67,56 | 168,90 | 13,77 | 141,00 | 174,18 | 232,24 | 290,30 | 127,24 | 160,41 | 218,47 | 276,54 | | |
| 33 | 48 | 71,88 | 179,70 | 14,63 | 149,82 | 185,07 | 246,76 | 308,45 | 135,19 | 170,44 | 232,13 | 293,82 | | |
| 36 | 57 | 76,20 | 190,50 | 15,49 | 158,63 | 195,96 | 261,27 | 326,59 | 143,14 | 180,47 | 245,78 | 311,10 | | |
| 39 | 66 | 80,52 | 201,30 | 16,35 | 167,44 | 206,84 | 275,79 | 344,74 | 151,09 | 190,49 | 259,44 | 328,39 | | |
| 42 | 75 | 84,84 | 212,10 | 17,21 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 159,05 | 200,52 | 273,09 | 345,67 | | |
| 45 | 84 | 89,16 | 222,90 | 18,07 | 185,07 | 228,61 | 304,82 | 381,02 | 167,00 | 210,54 | 286,75 | 362,95 | | |
| 48 | 91 | 93,48 | 233,70 | 18,93 | 193,88 | 239,50 | 319,33 | 399,17 | 174,95 | 220,57 | 300,40 | 380,24 | | |
| 51 | 94 | 97,80 | 244,50 | 19,79 | 202,69 | 250,39 | 333,85 | 417,31 | 182,90 | 230,59 | 314,06 | 397,52 | | |
| 54 | 97 | 102,12 | 255,30 | 20,65 | 211,51 | 261,27 | 348,36 | 435,46 | 190,85 | 240,62 | 327,71 | 414,80 | | |
| 57 | 100 | 106,44 | 266,10 | 21,51 | 220,32 | 272,16 | 362,88 | 453,60 | 198,81 | 250,65 | 341,37 | 432,09 | | |
| 60 | 103 | 110,76 | 276,90 | 22,37 | 229,13 | 283,05 | 377,40 | 471,74 | 206,76 | 260,67 | 355,02 | 449,37 | | |
| 63 | 106 | 115,08 | 287,70 | 23,23 | 237,95 | 293,93 | 391,91 | 489,89 | 214,71 | 270,70 | 368,68 | 466,65 | | |
| 66 | 109 | 119,40 | 298,50 | 24,10 | 246,76 | 304,82 | 406,43 | 508,03 | 222,66 | 280,72 | 382,33 | 483,94 | | |
| 69 | 112 | 123,72 | 309,30 | 24,96 | 255,57 | 315,71 | 420,94 | 526,18 | 230,62 | 290,75 | 395,99 | 501,22 | | |
| 72 | 115 | 128,04 | 320,10 | 25,82 | 264,38 | 326,59 | 435,46 | 544,32 | 238,57 | 300,78 | 409,64 | 518,50 | | |
| 75 | 118 | 132,36 | 330,90 | 26,68 | 273,20 | 337,48 | 449,97 | 562,46 | 246,52 | 310,80 | 423,29 | 535,79 | | |
| 78 | 121 | 136,68 | 341,70 | 27,54 | 282,01 | 348,36 | 464,49 | 580,61 | 254,47 | 320,83 | 436,95 | 553,07 | | |
| 81 | 124 | 141,00 | 352,50 | 28,40 | 290,82 | 359,25 | 479,00 | 598,75 | 262,42 | 330,85 | 450,60 | 570,35 | | |
| 84 | 127 | 145,32 | 363,30 | 29,26 | 299,64 | 370,14 | 493,52 | 616,90 | 270,38 | 340,88 | 464,26 | 587,64 | | |
| 87 | 130 | 149,64 | 374,10 | 30,12 | 308,45 | 381,02 | 508,03 | 635,04 | 278,33 | 350,90 | 477,91 | 604,92 | | |
| 90 | 133 | 153,96 | 384,90 | 30,98 | 317,26 | 391,91 | 522,55 | 653,18 | 286,28 | 360,93 | 491,57 | 622,20 | | |
| 93 | 136 | 158,28 | 395,70 | 31,84 | 326,07 | 402,80 | 537,06 | 671,33 | 294,23 | 370,96 | 505,22 | 639,49 | | |
| 96 | 139 | 162,60 | 406,50 | 32,70 | 334,89 | 413,68 | 551,58 | 689,47 | 302,19 | 380,98 | 518,88 | 656,77 | | |
| 99 | 139 | 166,92 | 417,30 | 33,56 | 343,70 | 424,57 | 566,09 | 707,62 | 310,14 | 391,01 | 532,53 | 674,05 | | |

3.3.2.2.3 Armiranobetonska zunanja stena

Preglednica 54: Začetni podatki – armiranobetonska zunanja stena

| Stolpnica | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| Aneto, etaža | 285,21 | 285,21 | 285,21 | 291,32 |
| Astreha | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Atla, teren | 324 | 324 | 324 | 324 |
| Ustena | 0,26 | 0,26 | 0,1 | 0,25 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utlja na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Uzasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

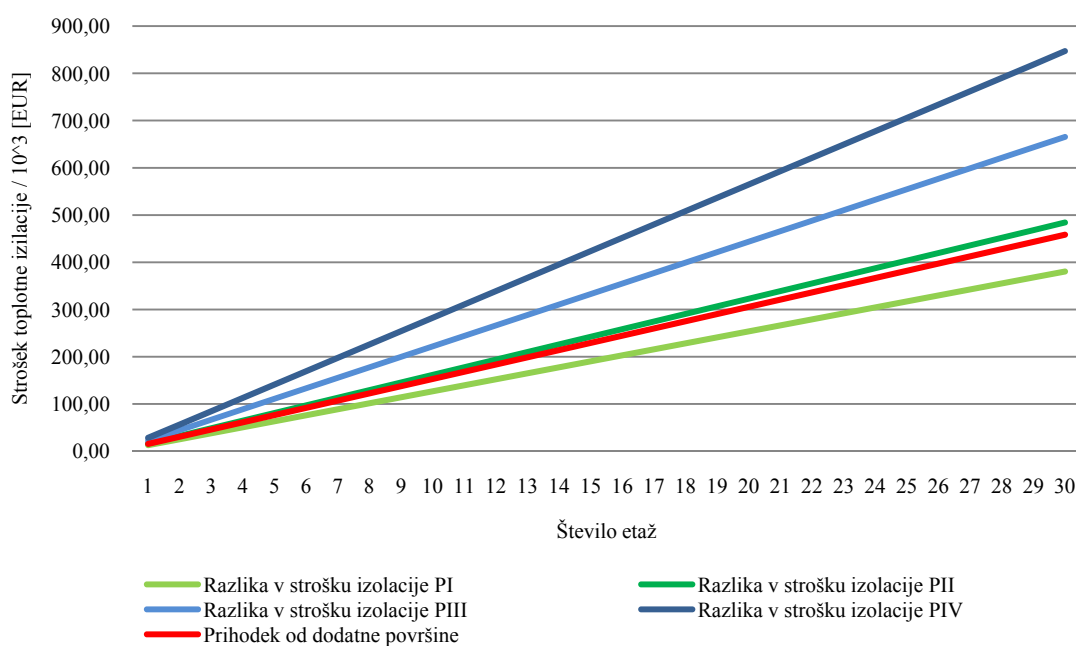
| Blok | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| | A | B | C | D |
| Ustena | 0,26 | 0,26 | 0,10 | 0,25 |
| Ustreha | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Utlja na terenu | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Zasteklitev | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |

Preglednica 55: Izračun stroškov 1m² potrebne izolacije

| | Debelina [cm] | Cena - debelina 1cm [EUR/m ²] | | | | Končna cena [EUR/m ²] | | | |
|------------|---------------|---|------|------|------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| | | PI | PII | PIII | PIV | PI | PII | PIII | PIV |
| Polistiren | 14 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 11,62 | 11,62 | 11,62 | 11,62 |
| Aerogel | 5 | 17 | 21 | 28 | 35 | 85 | 105 | 140 | 175 |

Absolutno gledano je dobiček zaradi povečanje neto kvadrature najmanjši v primeru armiranobetonske konstrukcije kljub dejstvu, da so površinski prihranki večji kakor v primeru opečne zunanje stene, in znaša približno 17 % prodajne cene dodatne kvadrature. Iz grafikona 37 je tudi mogoče razbrati, da je v obravnavanem materialu nosilne konstrukcije uporaba dražje, a učinkovitejše toplotne izolacije iz aerogela, opravičena iz aerogela, opravičena le za prvi cenovni razred pri vgradnji v ovoj stolpnice ter enako kot v prejšnjih primerih nosilne konstrukcije, za oba cenovna razreda pri vgradnji v ovoj bloka. Dodatni 1 cm aerogelne izolacije, ki je potreben, da dosežemo dovolj nizko toplotno prehodnost v primerjavi z opečno zunanjo steno v primeru stolpnice, podraži celotno ceno izolacije v splošnem za 26 %, kar je

več, kakor znaša dodatni prihodek zaradi zvišanja spremembe neto kvadrature pri prehodu z opečne na armiranobetonsko zunanjo steno, t.j. za vse primere dobrih 11 % pri stolpnici in 12 % pri bloku. Omenjena dejstva niso povezana s samo velikostjo neto površine, kar je že obrazloženo na začetku komentarja rezultatov z opečno zunanjo steno. Celotni strošek izolacije v primeru stolpnice je sicer večji kakor pri bloku zaradi večje površine obodnih stenobodnih sten in imamo absolutno gledano več dodatne površine. Relativno gledano je odstotek povečanja neto površine v primeru stolpnice konstanten s spreminjanjem števila etaž in ima vrednost 2,1 % za razliko od bloka kjer se ta odstotek pada z večanjem števila etaž. V priemru armiranobetonske nosilne konstrukcije pade njegova vrednsot ob povečanju dolžine objekta z 2,1 % na 1,2 %.

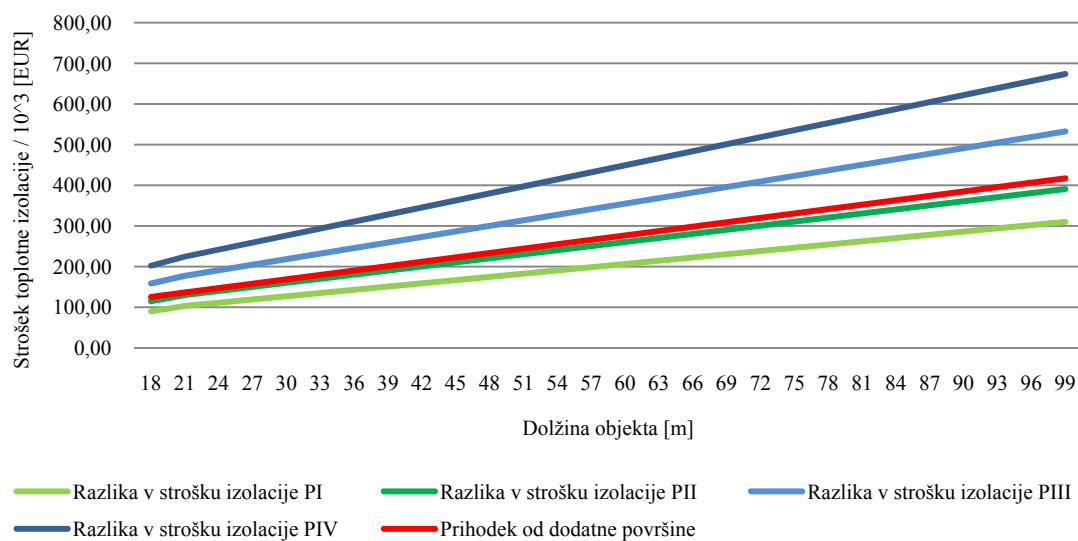


Grafikon 55: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem števila etaž stolpnice – armiranobetonska zunanja stena

Preglednica 56: Izračun stroškov toplotne izolacije za stolpnico – armiranobetonska zunanja stena

Cena [EUR]

| Št. etaž | Višina objekta [m] | ΔA_{neto} [m ²] | Prihodek | Polistiren | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | |
|----------|--------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| | | | x10 ³ | x10 ³ | x10 ³ | | | | x10 ³ | | | |
| 1 | 3 | 6,11 | 15,28 | 2,01 | 14,69 | 18,14 | 24,19 | 30,24 | 12,68 | 16,14 | 22,18 | 28,23 |
| 2 | 6 | 12,22 | 30,56 | 4,02 | 29,38 | 36,29 | 48,38 | 60,48 | 25,36 | 32,27 | 44,37 | 56,46 |
| 3 | 9 | 18,34 | 45,84 | 6,02 | 44,06 | 54,43 | 72,58 | 90,72 | 38,04 | 48,41 | 66,55 | 84,70 |
| 4 | 12 | 24,45 | 61,12 | 8,03 | 58,75 | 72,58 | 96,77 | 120,96 | 50,72 | 64,54 | 88,74 | 112,93 |
| 5 | 15 | 30,56 | 76,40 | 10,04 | 73,44 | 90,72 | 120,96 | 151,20 | 63,40 | 80,68 | 110,92 | 141,16 |
| 6 | 18 | 36,67 | 91,68 | 12,05 | 88,13 | 108,86 | 145,15 | 181,44 | 76,08 | 96,82 | 133,10 | 169,39 |
| 7 | 21 | 42,79 | 106,96 | 14,06 | 102,82 | 127,01 | 169,34 | 211,68 | 88,76 | 112,95 | 155,29 | 197,62 |
| 8 | 24 | 48,90 | 122,24 | 16,06 | 117,50 | 145,15 | 193,54 | 241,92 | 101,44 | 129,09 | 177,47 | 225,86 |
| 9 | 27 | 55,01 | 137,52 | 18,07 | 132,19 | 163,30 | 217,73 | 272,16 | 114,12 | 145,22 | 199,66 | 254,09 |
| 10 | 30 | 61,12 | 152,80 | 20,08 | 146,88 | 181,44 | 241,92 | 302,40 | 126,80 | 161,36 | 221,84 | 282,32 |
| 11 | 33 | 67,23 | 168,08 | 22,09 | 161,57 | 199,58 | 266,11 | 332,64 | 139,48 | 177,50 | 244,02 | 310,55 |
| 12 | 36 | 73,35 | 183,36 | 24,10 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 152,16 | 193,63 | 266,21 | 338,78 |
| 13 | 39 | 79,46 | 198,64 | 26,10 | 190,94 | 235,87 | 314,50 | 393,12 | 164,84 | 209,77 | 288,39 | 367,02 |
| 14 | 42 | 85,57 | 213,93 | 28,11 | 205,63 | 254,02 | 338,69 | 423,36 | 177,52 | 225,90 | 310,58 | 395,25 |
| 15 | 45 | 91,68 | 229,21 | 30,12 | 220,32 | 272,16 | 362,88 | 453,60 | 190,20 | 242,04 | 332,76 | 423,48 |
| 16 | 48 | 97,79 | 244,49 | 32,13 | 235,01 | 290,30 | 387,07 | 483,84 | 202,88 | 258,18 | 354,95 | 451,71 |
| 17 | 51 | 103,91 | 259,77 | 34,13 | 249,70 | 308,45 | 411,26 | 514,08 | 215,56 | 274,31 | 377,13 | 479,95 |
| 18 | 54 | 110,02 | 275,05 | 36,14 | 264,38 | 326,59 | 435,46 | 544,32 | 228,24 | 290,45 | 399,31 | 508,18 |
| 19 | 57 | 116,13 | 290,33 | 38,15 | 279,07 | 344,74 | 459,65 | 574,56 | 240,92 | 306,59 | 421,50 | 536,41 |
| 20 | 60 | 122,24 | 305,61 | 40,16 | 293,76 | 362,88 | 483,84 | 604,80 | 253,60 | 322,72 | 443,68 | 564,64 |
| 21 | 63 | 128,36 | 320,89 | 42,17 | 308,45 | 381,02 | 508,03 | 635,04 | 266,28 | 338,86 | 465,87 | 592,87 |
| 22 | 66 | 134,47 | 336,17 | 44,17 | 323,14 | 399,17 | 532,22 | 665,28 | 278,96 | 354,99 | 488,05 | 621,11 |
| 23 | 69 | 140,58 | 351,45 | 46,18 | 337,82 | 417,31 | 556,42 | 695,52 | 291,64 | 371,13 | 510,23 | 649,34 |
| 24 | 72 | 146,69 | 366,73 | 48,19 | 352,51 | 435,46 | 580,61 | 725,76 | 304,32 | 387,27 | 532,42 | 677,57 |
| 25 | 75 | 152,80 | 382,01 | 50,20 | 367,20 | 453,60 | 604,80 | 756,00 | 317,00 | 403,40 | 554,60 | 705,80 |
| 26 | 78 | 158,92 | 397,29 | 52,21 | 381,89 | 471,74 | 628,99 | 786,24 | 329,68 | 419,54 | 576,79 | 734,03 |
| 27 | 81 | 165,03 | 412,57 | 54,21 | 396,58 | 489,89 | 653,18 | 816,48 | 342,36 | 435,67 | 598,97 | 762,27 |
| 28 | 84 | 171,14 | 427,85 | 56,22 | 411,26 | 508,03 | 677,38 | 846,72 | 355,04 | 451,81 | 621,15 | 790,50 |
| 29 | 87 | 177,25 | 443,13 | 58,23 | 425,95 | 526,18 | 701,57 | 876,96 | 367,72 | 467,95 | 643,34 | 818,73 |
| 30 | 90 | 183,36 | 458,41 | 60,24 | 440,64 | 544,32 | 725,76 | 907,20 | 380,40 | 484,08 | 665,52 | 846,96 |

**Grafikon 56: Prikaz naraščanja stroškov toplotne izolacije z naraščanjem dolžine bloka – armiranobetonska zunanja stena**

Preglednica 57: Izračun stroškov toplotne izolacije za blok – armiranobetonska zunanja stena

Cena [EUR]

| Dolžina objekta | Δ Aneto | Polistiren | | Aerogel | | | | Razlika v ceni [EUR] | | | |
|-----------------|-------------------|------------|-------|------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|
| | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| [m] | [m ²] | | | x10 ³ | | | | x10 ³ | | | |
| 18 | 36,67 | 91,68 | 12,05 | 88,13 | 108,86 | 145,15 | 181,44 | 76,08 | 96,82 | 133,10 | 169,39 |
| 21 | 39,91 | 99,78 | 13,05 | 95,47 | 117,94 | 157,25 | 196,56 | 82,42 | 104,88 | 144,20 | 183,51 |
| 24 | 43,15 | 107,88 | 14,06 | 102,82 | 127,01 | 169,34 | 211,68 | 88,76 | 112,95 | 155,29 | 197,62 |
| 27 | 46,39 | 115,98 | 15,06 | 110,16 | 136,08 | 181,44 | 226,80 | 95,10 | 121,02 | 166,38 | 211,74 |
| 30 | 49,63 | 124,08 | 16,06 | 117,50 | 145,15 | 193,54 | 241,92 | 101,44 | 129,09 | 177,47 | 225,86 |
| 33 | 52,87 | 132,18 | 17,07 | 124,85 | 154,22 | 205,63 | 257,04 | 107,78 | 137,16 | 188,56 | 239,97 |
| 36 | 56,11 | 140,28 | 18,07 | 132,19 | 163,30 | 217,73 | 272,16 | 114,12 | 145,22 | 199,66 | 254,09 |
| 39 | 59,35 | 148,38 | 19,08 | 139,54 | 172,37 | 229,82 | 287,28 | 120,46 | 153,29 | 210,75 | 268,20 |
| 42 | 62,59 | 156,48 | 20,08 | 146,88 | 181,44 | 241,92 | 302,40 | 126,80 | 161,36 | 221,84 | 282,32 |
| 45 | 65,83 | 164,58 | 21,08 | 154,22 | 190,51 | 254,02 | 317,52 | 133,14 | 169,43 | 232,93 | 296,44 |
| 48 | 69,07 | 172,68 | 22,09 | 161,57 | 199,58 | 266,11 | 332,64 | 139,48 | 177,50 | 244,02 | 310,55 |
| 51 | 72,31 | 180,78 | 23,09 | 168,91 | 208,66 | 278,21 | 347,76 | 145,82 | 185,56 | 255,12 | 324,67 |
| 54 | 75,55 | 188,88 | 24,10 | 176,26 | 217,73 | 290,30 | 362,88 | 152,16 | 193,63 | 266,21 | 338,78 |
| 57 | 78,79 | 196,98 | 25,10 | 183,60 | 226,80 | 302,40 | 378,00 | 158,50 | 201,70 | 277,30 | 352,90 |
| 60 | 82,03 | 205,08 | 26,10 | 190,94 | 235,87 | 314,50 | 393,12 | 164,84 | 209,77 | 288,39 | 367,02 |
| 63 | 85,27 | 213,18 | 27,11 | 198,29 | 244,94 | 326,59 | 408,24 | 171,18 | 217,84 | 299,48 | 381,13 |
| 66 | 88,51 | 221,28 | 28,11 | 205,63 | 254,02 | 338,69 | 423,36 | 177,52 | 225,90 | 310,58 | 395,25 |
| 69 | 91,75 | 229,38 | 29,12 | 212,98 | 263,09 | 350,78 | 438,48 | 183,86 | 233,97 | 321,67 | 409,36 |
| 72 | 94,99 | 237,48 | 30,12 | 220,32 | 272,16 | 362,88 | 453,60 | 190,20 | 242,04 | 332,76 | 423,48 |
| 75 | 98,23 | 245,58 | 31,12 | 227,66 | 281,23 | 374,98 | 468,72 | 196,54 | 250,11 | 343,85 | 437,60 |
| 78 | 101,47 | 253,68 | 32,13 | 235,01 | 290,30 | 387,07 | 483,84 | 202,88 | 258,18 | 354,95 | 451,71 |
| 81 | 104,71 | 261,78 | 33,13 | 242,35 | 299,38 | 399,17 | 498,96 | 209,22 | 266,25 | 366,04 | 465,83 |
| 84 | 107,95 | 269,88 | 34,13 | 249,70 | 308,45 | 411,26 | 514,08 | 215,56 | 274,31 | 377,13 | 479,95 |
| 87 | 111,19 | 277,98 | 35,14 | 257,04 | 317,52 | 423,36 | 529,20 | 221,90 | 282,38 | 388,22 | 494,06 |
| 90 | 114,43 | 286,08 | 36,14 | 264,38 | 326,59 | 435,46 | 544,32 | 228,24 | 290,45 | 399,31 | 508,18 |
| 93 | 117,67 | 294,18 | 37,15 | 271,73 | 335,66 | 447,55 | 559,44 | 234,58 | 298,52 | 410,41 | 522,29 |
| 96 | 120,91 | 302,28 | 38,15 | 279,07 | 344,74 | 459,65 | 574,56 | 240,92 | 306,59 | 421,50 | 536,41 |
| 99 | 124,15 | 310,38 | 39,15 | 286,42 | 353,81 | 471,74 | 589,68 | 247,26 | 314,65 | 432,59 | 550,53 |

Kot splošni komentar k tretjemu modulu bi dodal, da bi bilo smiselno razširiti v okviru diplome izvedeno analizo prihrankov pri porabi energije za ogrevanje ter ekonomske upravičenosti ukrepov na uporabo kombinacij debelin različnih toplotno izolacijskih materialov ter vsekakor opredeliti tudi možne prihranke energije za ohlajevanje objekta. Hkrati bi morali nadgraditi oceno vrednosti aplikacije aerogelne izolacijske odeje še s tlorisnim prihrankom. Prav gotovo bi našli ugodno rešitev z vidika gradbene fizike ter tudi povratne dobe dodatnega izdatka za aerogelno izolacijo.

4 ZAKLJUČKI

Prikazani pristop k analizi uvedbe nanotehnološkega toplotnoizolacijskega materiala Spaceloft v konstrukcijske elemente je dokaj zahteven, predvsem zaradi širine problematike, vendar vkljub vsemu primeren proces. Uporabljena metodologija razčlenitve naloge na različne ravni omogoči sistematično obravnavo zadanega problema in predstavlja učinkovit sistem za splošnejšo analizo aplikacij omenjenega materiala. Raziskava je v podjetju Aerogel CARD d.o.o. že razširjena na strešne konstrukcijske sklope ter različne prefabrikate, v prihodnje pa bo sledila analiza talnih konstrukcijskih sklopov.

Parametri, kot so opredeljeni v točki 2.7.1 za presojo vplivov uvedbe aerogelne izolacije, so ustrezni in podajo v primeru enodimenzionalne stacionarne analize vse potrebne podatke za načrtovanje stavbnega ovoja in hkrati lahko služijo kot priloga Slovenskemu tehničnemu soglasju, ki ga je Aerogel, d. o. o. pridobil pri Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Namen take priloge je nuditi osnovne informacije in podporo pri arhitekturnem načrtovanju stavbnega ovoja in ne nadomešča elaborata gradbene fizike. Omenil bi, da ti podatki sami po sebi ne nadomeščajo projektantovega razumevanja na primer principov izkoriščanja toplotne kapacitete konstrukcijskih elementov ter učinkov le te na toplotno udobje, v katerem je zajeto tudi naravno prezračevanje. Zanimiva bi bila nadaljna analiza kako s pridom izkoristiti lastnosti aerogelne izolacije, da bi bile njene aplikacije dosegale zelene projektirane lastnosti.

Pri dvodimenzionalni analizi različnih križanj konstrukcijskih sklopov sem se predvsem skoncentriral na temperaturo notranje površine oziroma na izbranih kritičnih mestih. S tem sem izvedel, katera so najbolj problematična mesta, ter s tem posledično pridobil informacijo, kam usmeriti nadaljnji razvoj aplikacij iz aerogelne izolacije. Pri slednjem bo potrebno detajlneje upoštevati še prameter toplotnega toka skozi geometrijske in konstrukcijske toplotne mostove. Temperatura notranje površine je vsekakor smiselni kriterij, saj ta opisuje nevarnost nastajanja plesni in rasti mahov na površini gradbenih elementov in je morda v nekaterih primerih konstrukcij pomembnejši kakor same toplotne izgube. Na posameznih problematičnih mestih se temperatura notranje površine dvigne celo od 3 do 4 K. Temperatura obodnih površin je tudi en od zelo pomembnih faktorjev za določanje toplotnega udobja v prostoru.

Zgoraj navedena dejstva dodatno ponazorijo rezultati, kot na primer:

- z aerogelno izolacijo je mogoče doseči v primeru enakovredne debeline drugim toplotno izolacijskim proizvodom ustreznost konstrukcijskih sklopov z nosilno konstrukcijo iz lesenih križno lepljenih plošč z vidika gradbene fizike, v primeru uporabe večjih debelin le-te pa izboljšane karakteristike v primerjavi z uporabo kamene volne ali polistirena;
- kot predvideno, kot predvideno, analiza sistema prezračevane fasade v primeru lesene nosilne konstrukcije pokaže, da bi bilo smiselno podložiti sekundarno nosilno konstrukcijo fasadne obloge z enim ali dvema slojema aerogelne toplotne izolacije, s čimer bi zmanjšali vpliv toplotnega mostu.

Medtem, ko drugi modul poda podrobnejšo analizo, so rezultati analize vplivov uvedbe aerogelne izolacije na odziv stavbe v tretjem modulu nekoliko manj natančni, saj je obravnavana geometrija objektov močno poenostavljena, toplotni mostovi in oslABLJENA mesta netransparentnega dela ovoja niso upoštevani, končni rezultat cenovne upravičenosti pa je močno odvisen od cene 1 m² nepremičnine, ki je različna od lokacije do lokacije. Vseeno lahko na podlagi dobljenih rezultatov zaključim, da kljub opaznim energijskim prihrankom energije za ogrevanje na račun transmisijskih izgub (do 25,5 %) v primeru uporabe enake debeline aerogelne izolacije (toplotna prehodnosti $U < 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$) ti finančno ne opravičijo njene cenovne zahtevnosti. Za dokončno oceno povratne dobe investicije bi bilo potrebno vključiti še prihranke energije za ohlajevanje objekta v vročem obdobju.

Drugače je v primeru uporaba enakovredne debeline aerogelne toplotne izolacije, kjer lahko za prvi in drugi cenovni razred opravičimo njeno cenovno zahtevnost za obe obliki stavbe v primeru opečne in masivne lesene nosilne konstrukcije. Za primer armiranobetonske nosilne konstrukcije pa je opravičen prvi cenovni razred.

Pri armiranobetonski nosilni konstrukciji je glede na izhodišča opravičena uporaba prvega in drugega cenovnega razreda v primeru bloka, za primer stopnice pa je opravičen le prvi cenovni razred. Poudaril bi, da je pomanjkljivost analize v tretjem modulu poleg navedenih poenostavitev ta, da ne upošteva pozitivnih učinkov z vidika gradbene fizika, ampak zgolj

ekonomskega. Ponovno izpostavljam tudi smotrnost stroškovne analize uporabe kombinacije izolacijskih materialov, saj imajo nekateri sklupi zunajih sten zelo dobre gradbeno fizikalne lastnosti, kot je razvidno iz preglednic 9, 13 in 17.

Izpostavil bi še, da je bila matrična zasnova vzorca ključnega pomena za tako širok spekter obravnavanih materialov ter njihovih kombinacij. Možno in tudi potrebno nadgradnjo raziskave predstavlja dinamična analiza toplotnega odziva stavbnega ovoja, s katero lahko natančneje preverimo dogajanje v konstrukcijskih sklopih. Še posebej bi opozoril na podrobnejšo analizo ter morebitno izvedbo dinamičnih numeričnih simulacij ter eksperimentov prehoda vodne pare skozi konstrukcijske sklope v realnem okolju, še posebno pri razvoju aplikacij kjer je toplotna izolacija na notranji strani nosilne konstrukcije. To bi bilo potrebno storiti ne le v homogenem delu sklopa ampak tudi na območju stikov ter križanj različnih konstrukcijskih elementov.

Zaključim lahko, da je uvedba aerogelne toplotne izolacije Spaceloft v konstrukcijske elemente stavbnega ovoja glede na opravljeno analizo primerna in upravičena.

VIRI

Long, C. 1999. Essential heat transfer. Brighton, University of Sussex, Longman: 408 str.

Fish, J., Belytschko, T. 2007. A first course in finite elements. Chichester, England, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons: 319 str.

Kladnik, R. 1983. Nestacionarni temperaturni pojavi v ovojnem sklopu zgradbe. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente: 80 str.

Balaras, C.A., Daskalaki, E., Santamouris, M., Gaglia, A. 1993; Indoor Comfort and Environmental Quality: Module 1: design Principles. London, Joint European Project JEP-1802 report: 65 str.

Krainer, A. 2002. Sistem, Modul 1, Konstrukcijski sklopi 1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente: 33 str.

Krainer, A., Perdan, R. Računalniški program TEDI: Uporabniški priročnik: računski program za analizo toplotnega prehoda, toplotne stabilnosti in difuzije vodne pare skozi večplastne KS po JUS U.J5.510, JUS U.J5.520, JUS U.J5. 530, JUS U.J5. 600. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente: 30 str.

Fanger, P.O. 1970. Thermal comfort. Copenhagen, Danish technical press: 244 str.

1978. Physiological principles, comfort and health: ASHRAE Handbook & Product Directory: 1977 Fundamentals. New York, American society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: 8.13.

Abaqus Online Documentation: Version 6.7

Energetika Ljubljana: cenik – toplota.
<http://www.jh-lj.si/index.php?p=2&m=56&k=392> (20.9.2009).

Aerogel morphology.
<http://www.aerogel.com/features/morphology.html> (20.9.2009).

Jordan, S. 1997. Analiza vpliva toplotnih mostov na specifične transmisijske toplotne izgube zgradb. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 120 str.

Direktiva 2002/91/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 16. decembra 2002 o energetski učinkovitosti stavb. Ur. l. EU, št. 12/Zv.2.

Pravilnik o toplotni zaščiti in učinkoviti rabi energije v stavbah. Ur.l. RS, št. 42/2002: 2012.

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Ur.l. RS, št. 93/2008: 3939.

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah – Priloga 1. Ur.l. RS, št. 93/2008.

SIST 1025:2002 – Toplotna tehnika v gradbeništvo – Metoda izračuna difuzije vodne pare v stavbah.

SIST EN ISO 13790:2008 – Toplotne značilnosti stavb – Računanje potrebne energije za ogretje in hlajenje prostora

SIST EN ISO 6946:2008 – Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računska metoda (ISO 6946:2007).

Standard SIST EN ISO 10211:2008 – Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – Podrobni izračuni (ISO 10211:2007).

SIST EN ISO 12572:2002 – Higrotermalno obnašanje gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje lastnosti za prehod vodne pare (ISO 12572:2001).

SIST EN ISO 13788:2002 – Higrotermalno obnašanje sestavnih delov stavb in elementov stavb – Notranja površinska temperatura za preprečevanje kritične vlage ob površini in kondenzacije v konstrukciji – Računska metoda (ISO 13788:2001).

EN ISO 13789:2008 – Toplotne značilnosti stavb – Toplotni koeficienti pri prenosu toplote in prezračevanja – Računska metoda (ISO 13789:2007).

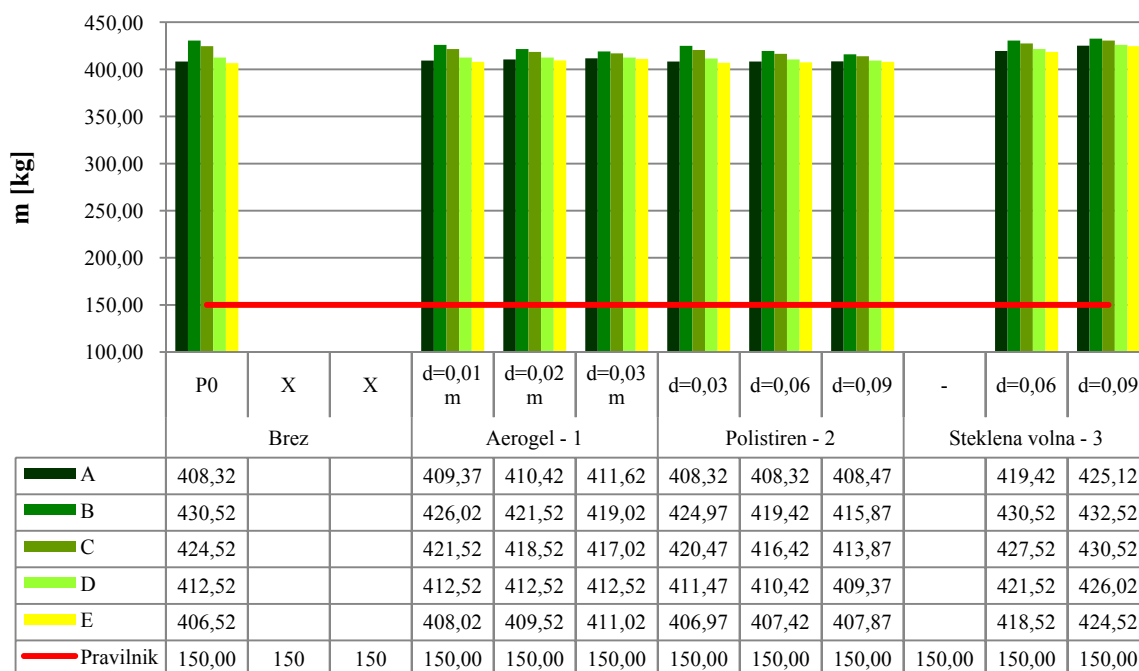
ISO 7730:1993 – ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

JUS U.J5.600 1987 – Toplotna tehnika v gradbeništvo – Tehnične zahteve za projektiranje in gradnjo stavb

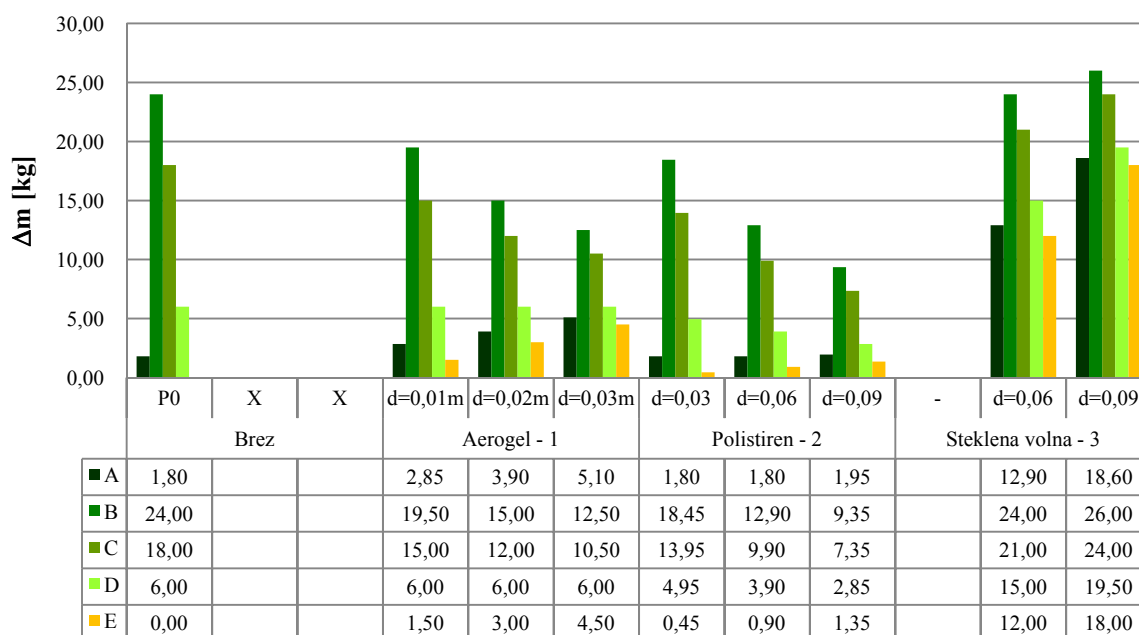
PRILOGA A- Rezultati analize konstrukcijskih sklopov

1. OPEČNA ZUNANJA STENA

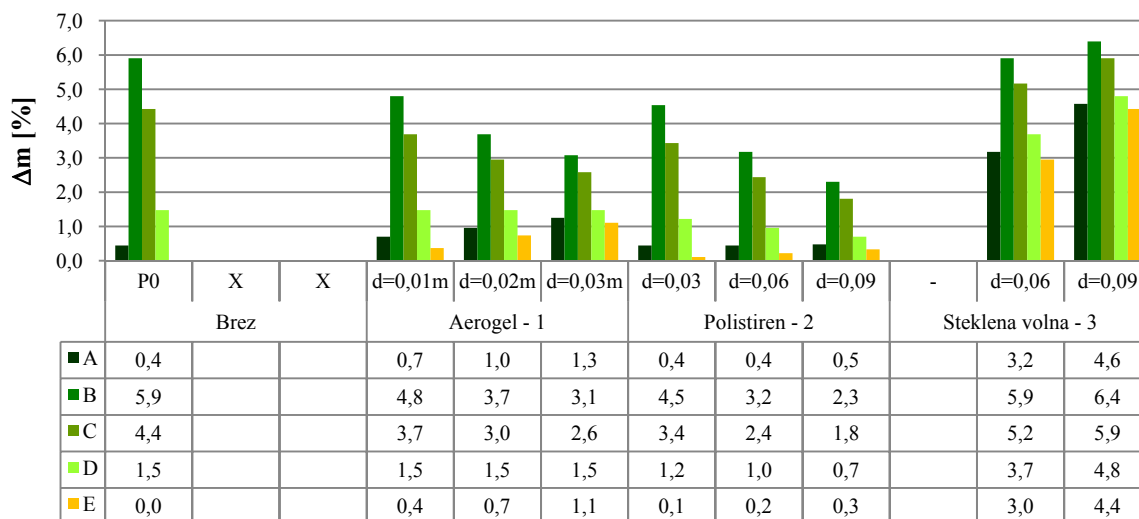
Masa konstrukcijskega sklopa



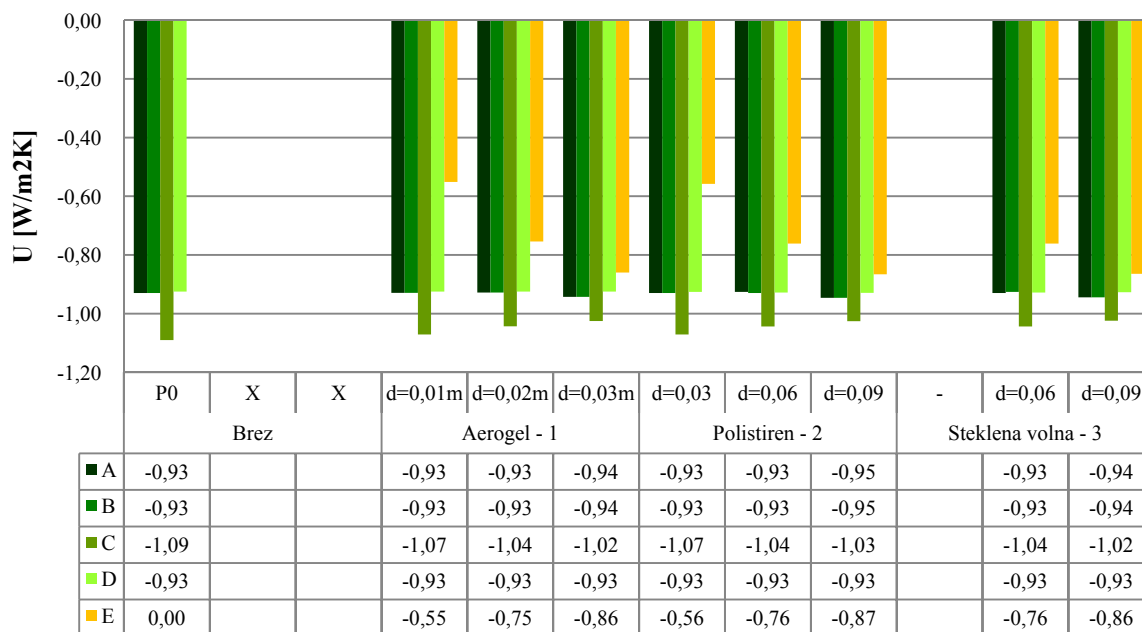
Sprememba mase konstrukcijskega sklopa ob kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



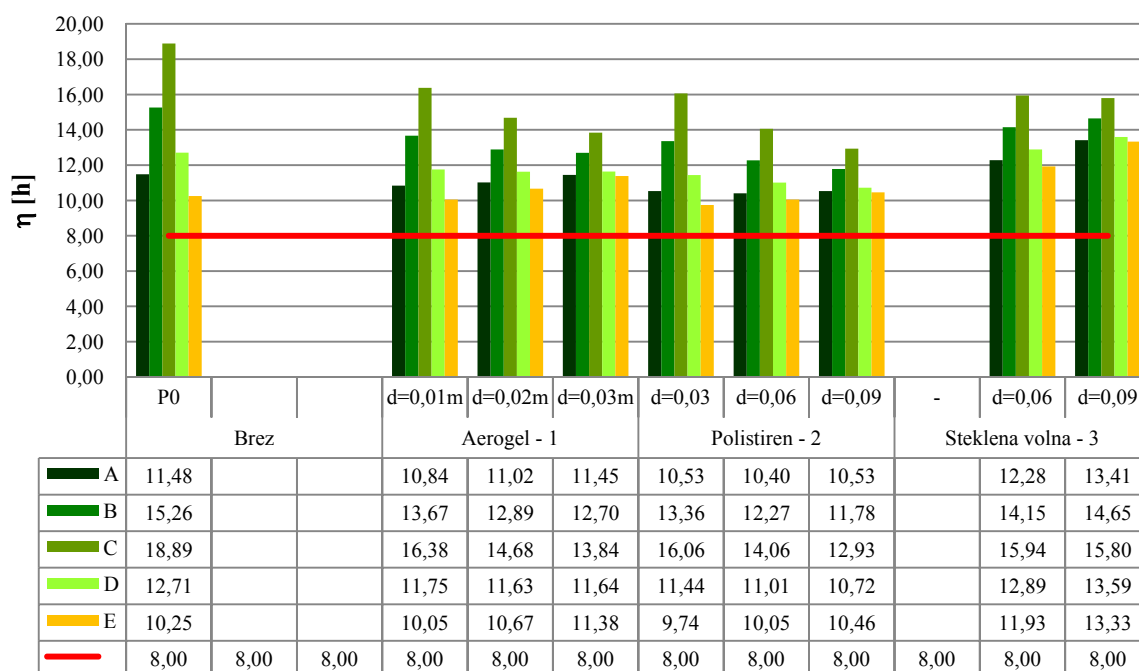
Sprememba mase konstrukcijskega sklopa ob kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



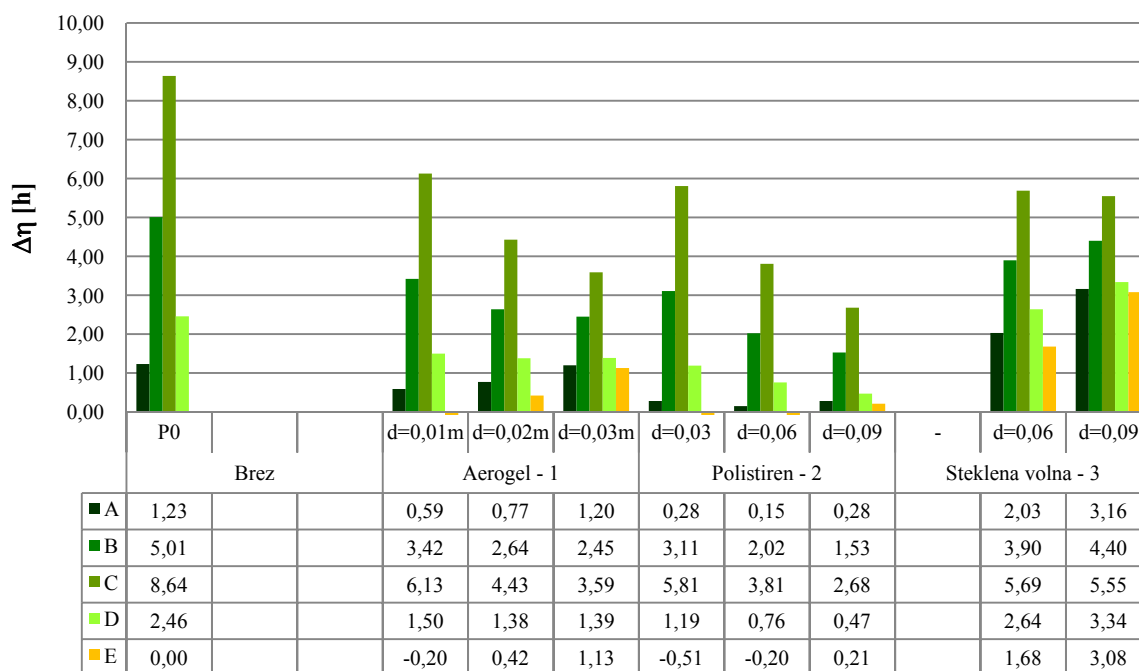
Sprememba toplotne prehodnosti pri kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



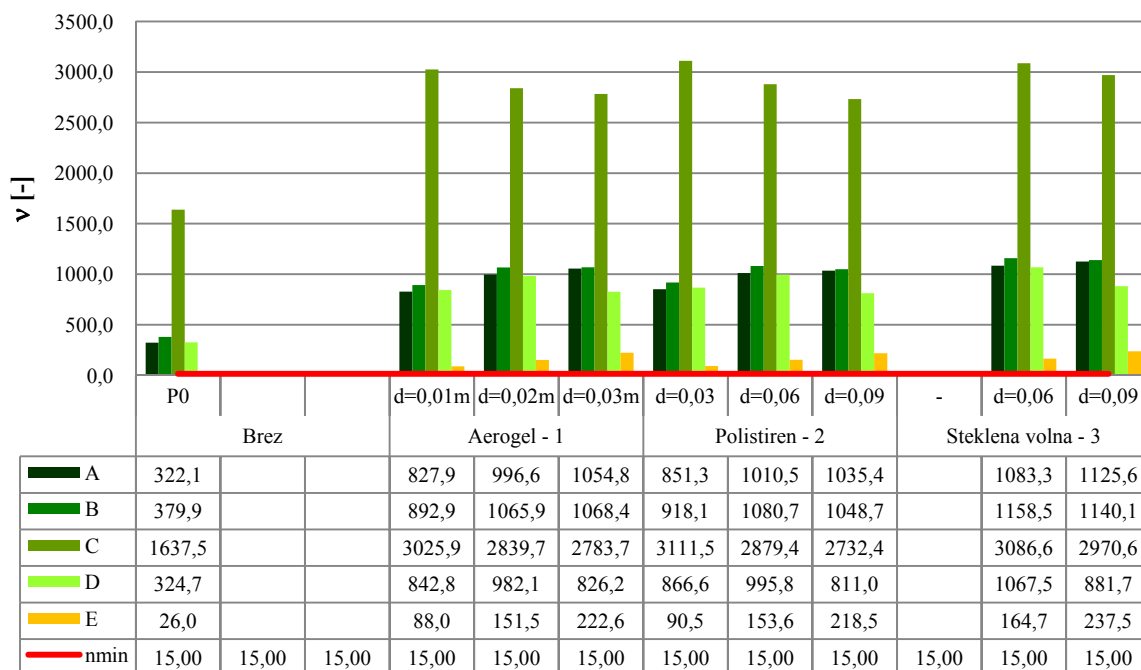
Temperaturna zakasnitev konstrukcijskega sklopa



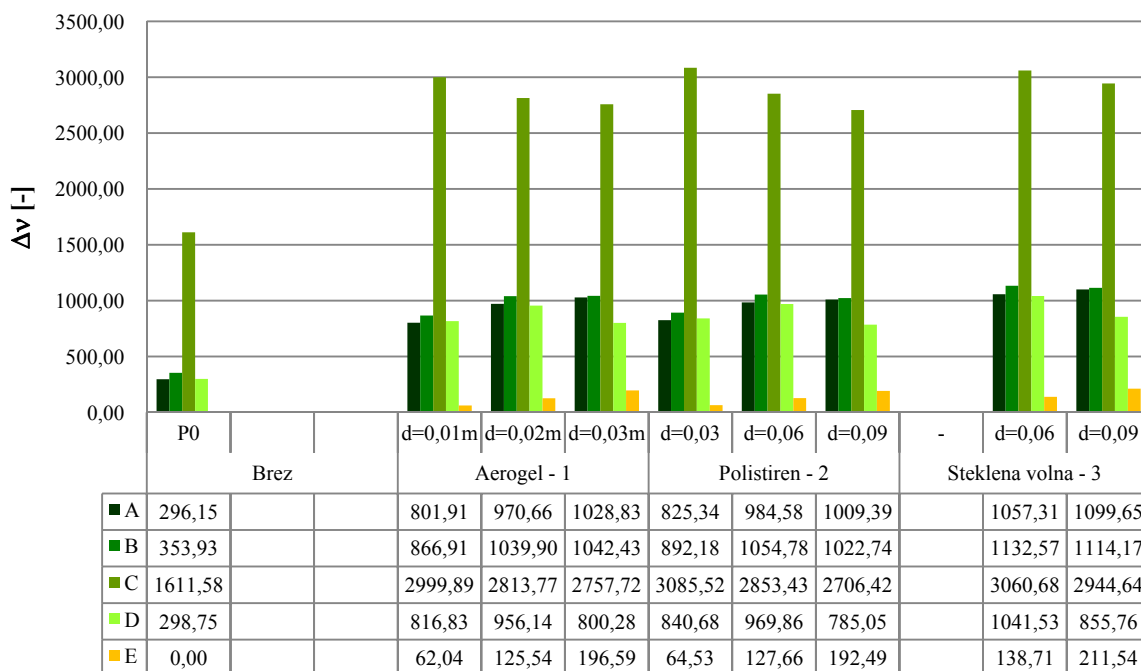
Sprememba temperaturne zakasnitve konstrukcijskega sklopa



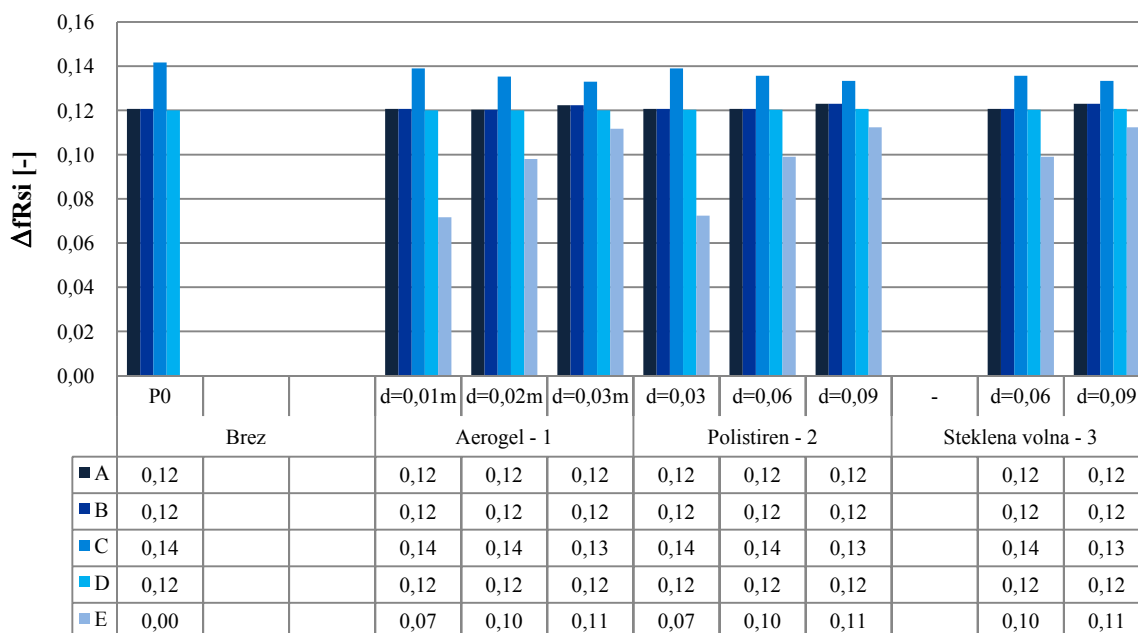
Temperaturno dušenje konstrukcijskega sklopa



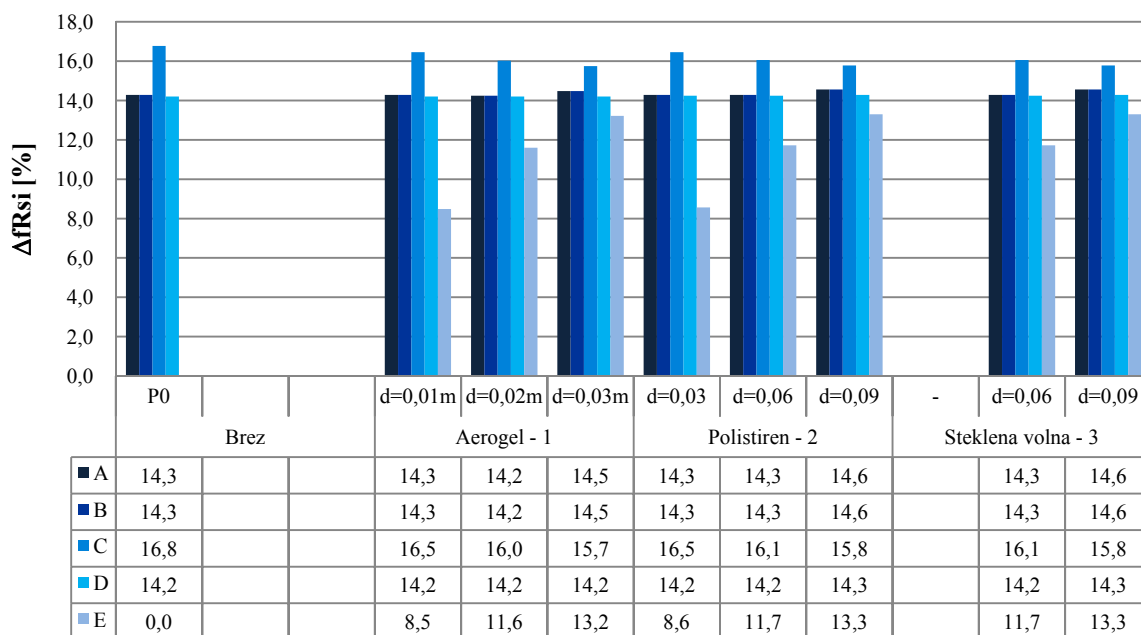
Temperaturno dušenje konstrukcijskega sklopa



Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop

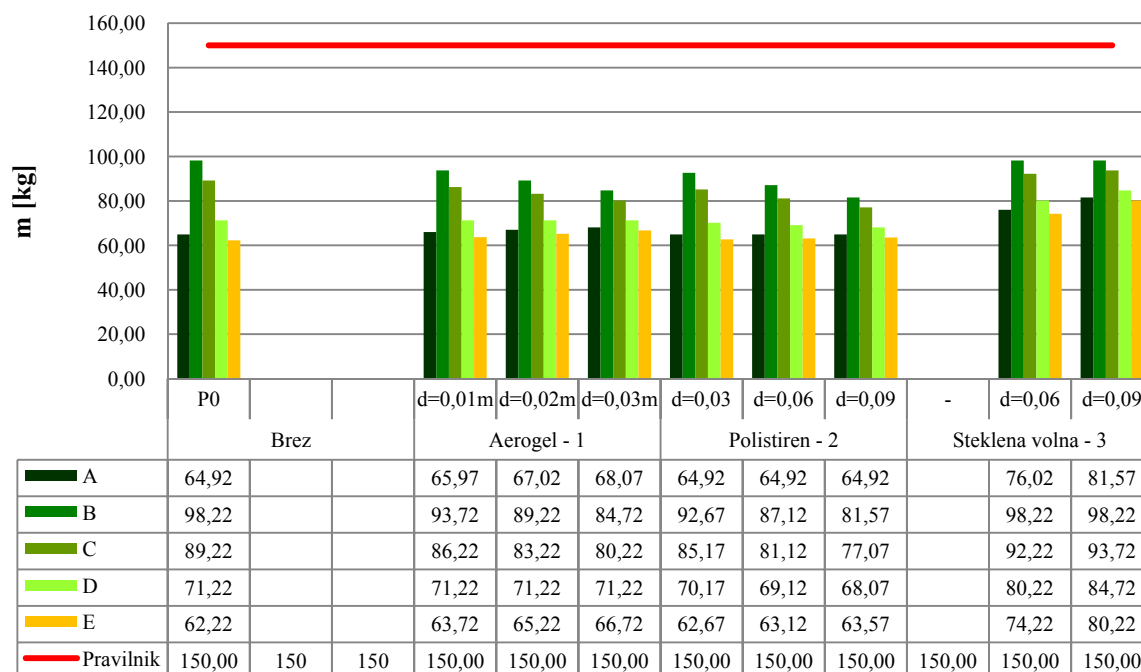


Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop

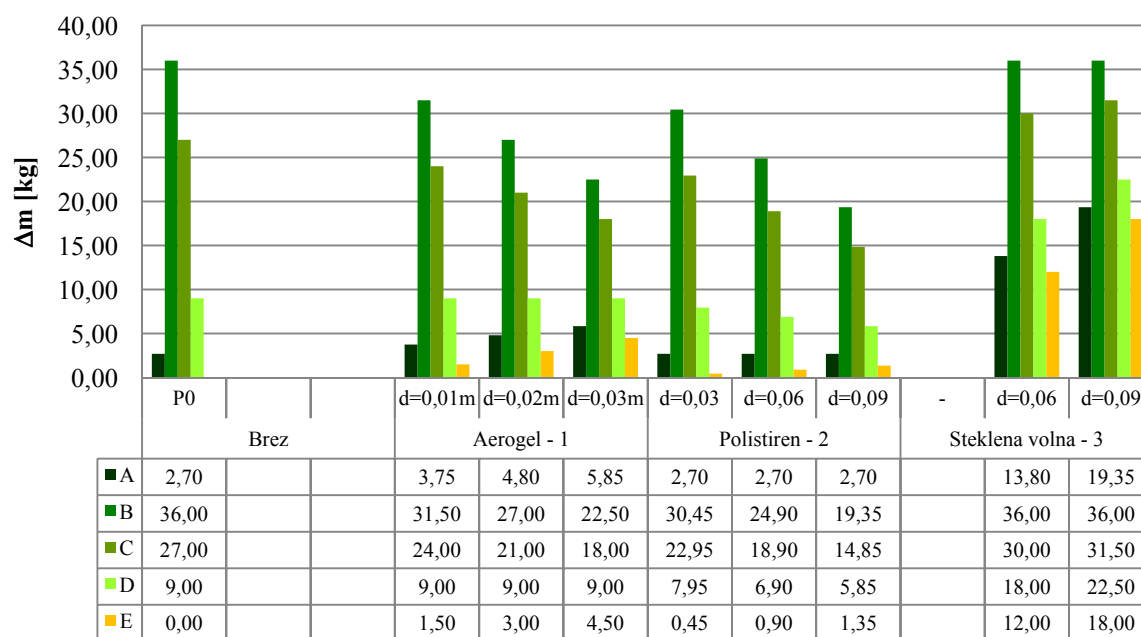


2. ZUNANJA STENA IZ MASIVNIH KRIŽNO LEPLJENIH PLOŠČ

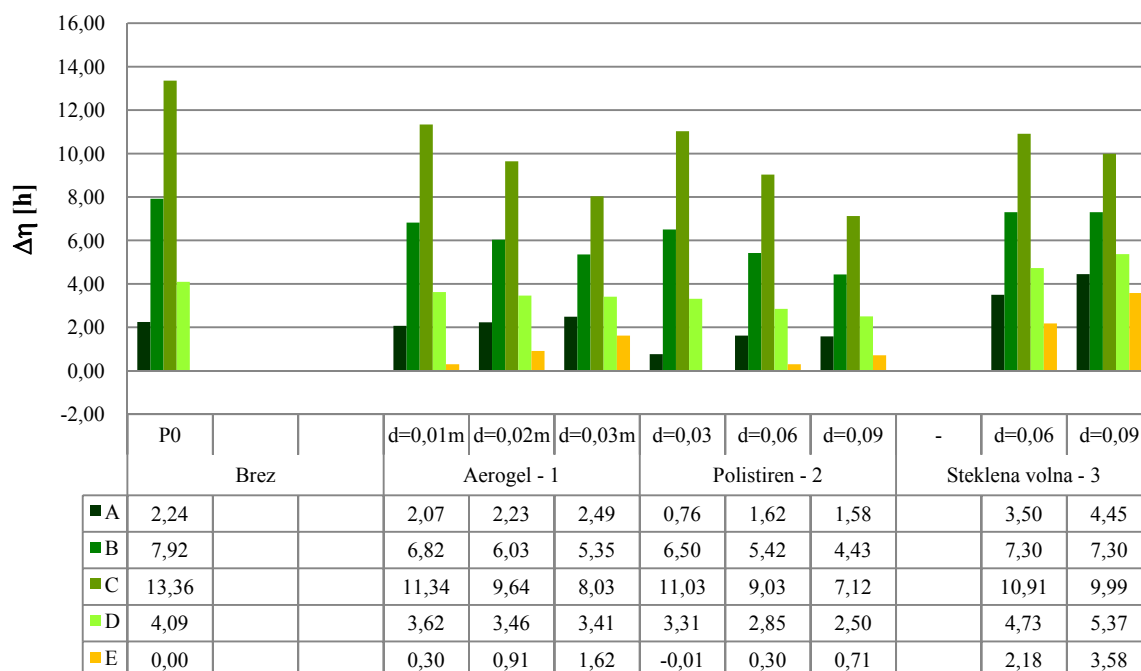
Masa konstrukcijskega sklopa



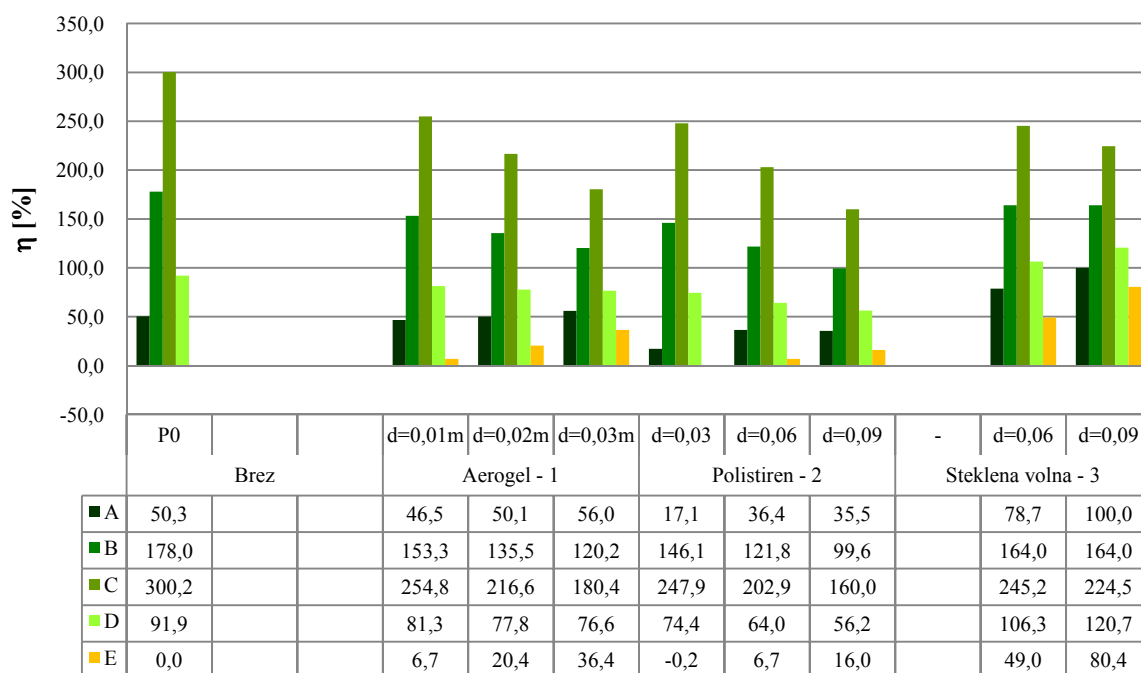
Sprememba mase konstrukcijskega sklopa ob kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



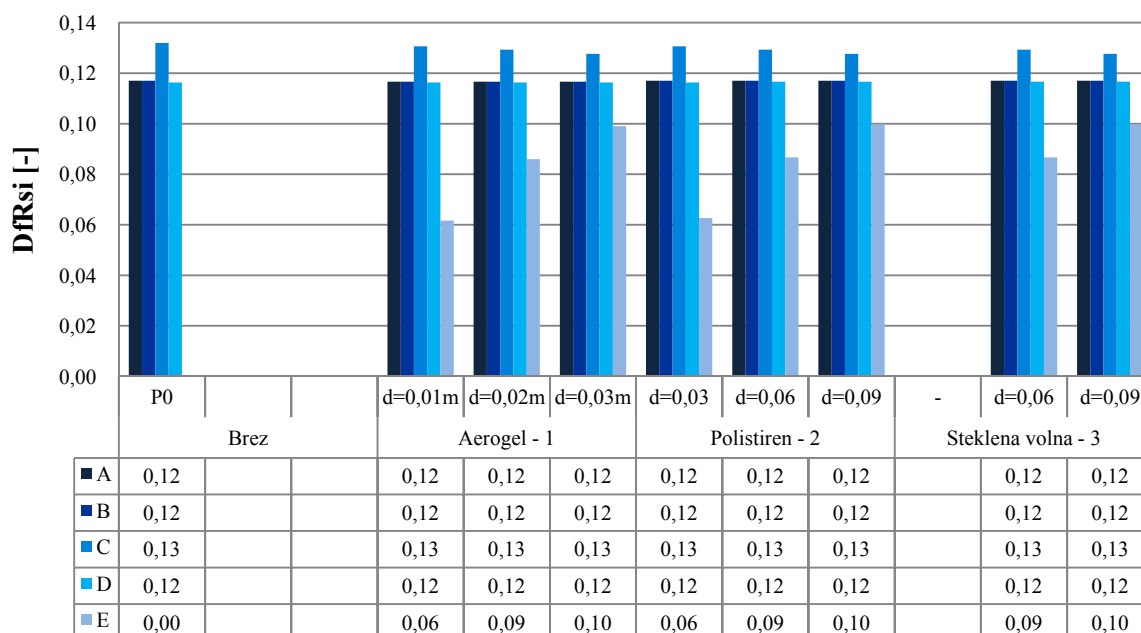
Sprememba temperaturne zakasnitve konstrukcijskega sklopa



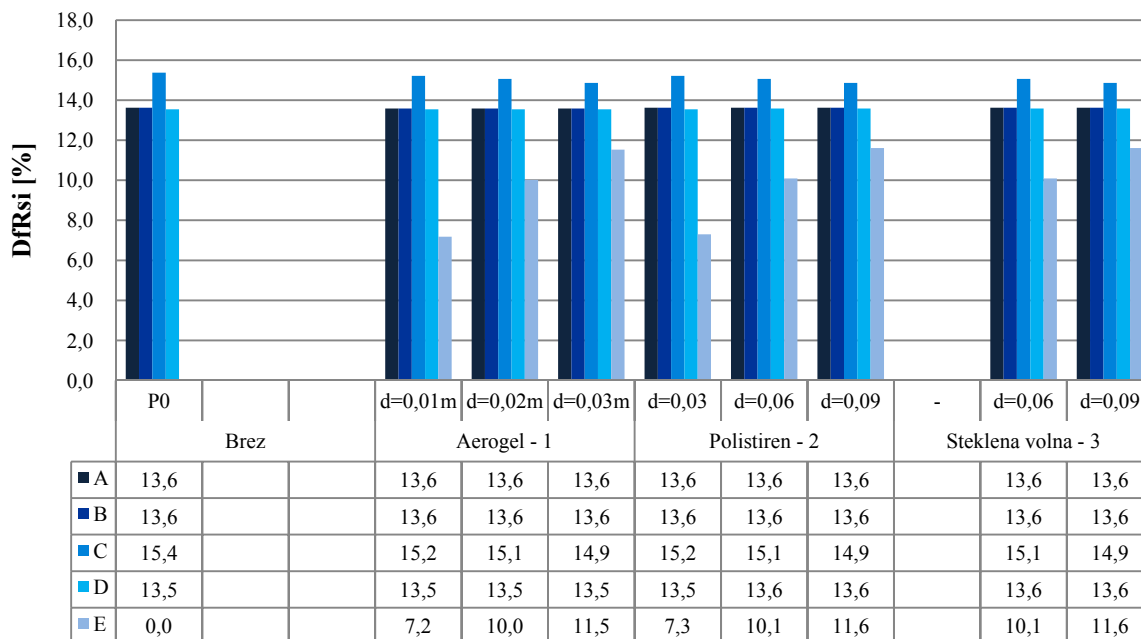
Sprememba temperaturne zakasnitve konstrukcijskega sklopa



Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop

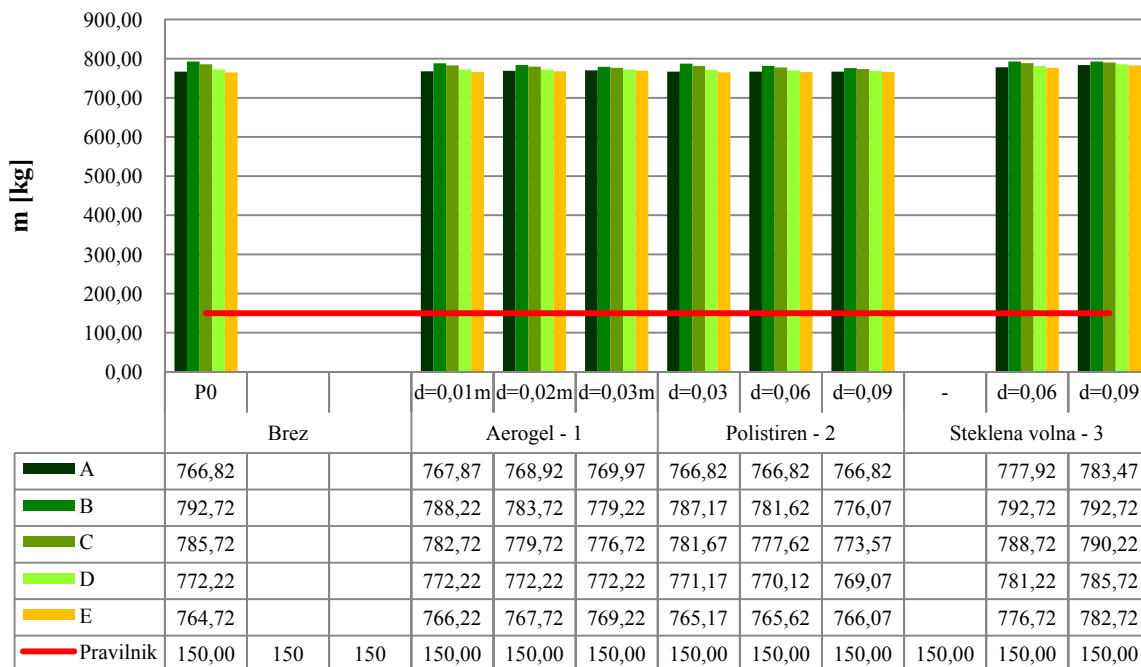


Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop

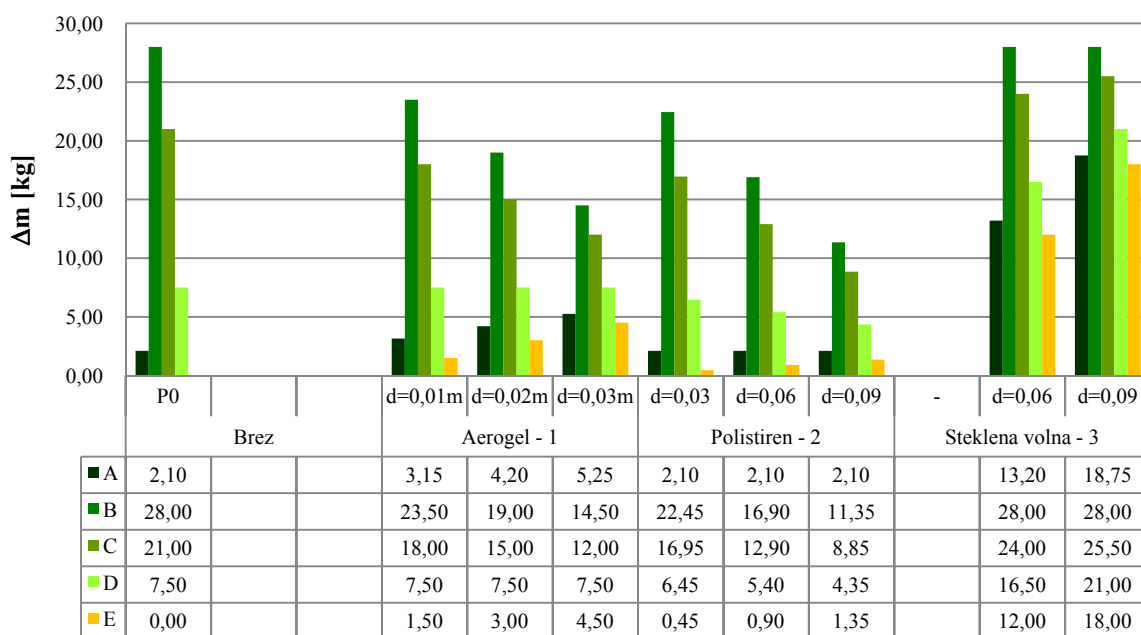


3. ARMIRANO BETONSKA ZUNANJA STENA

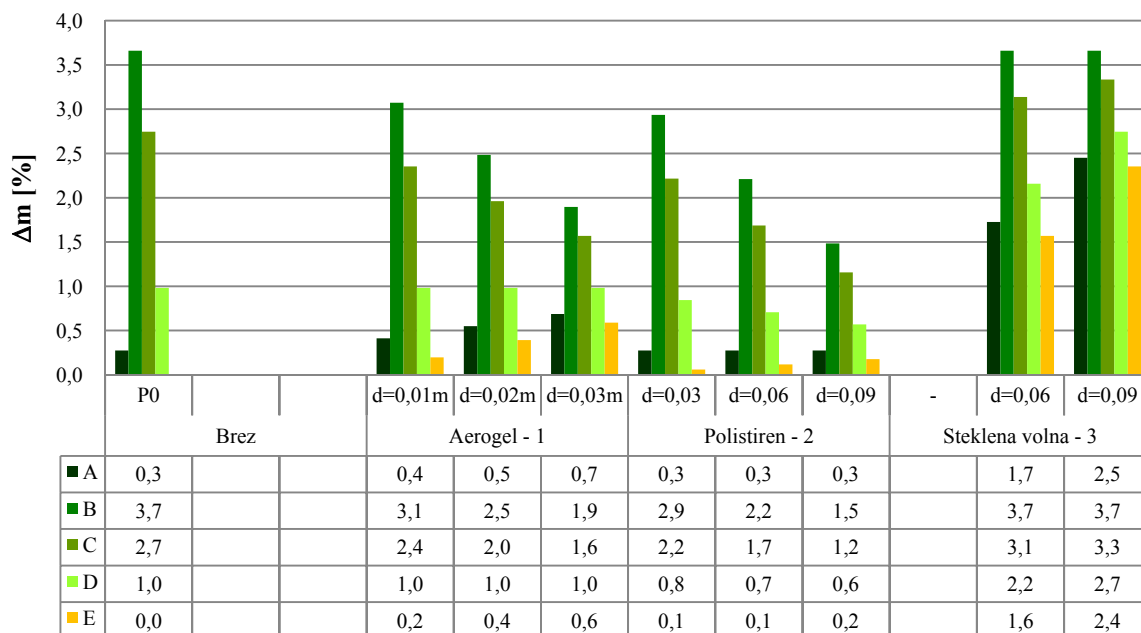
Masa konstrukcijskega sklopa



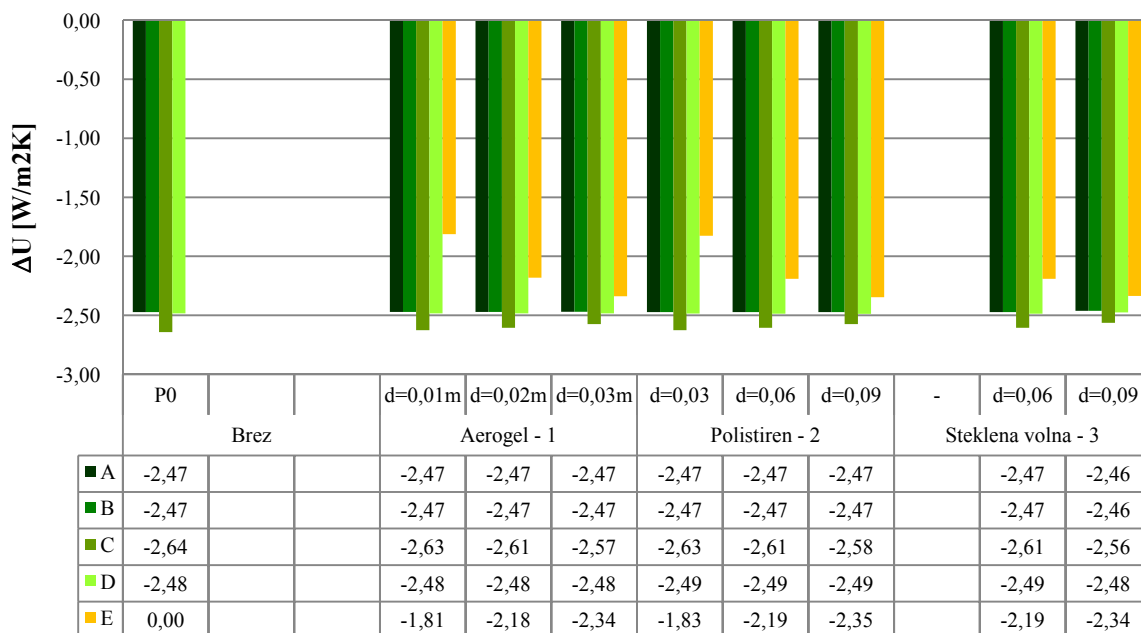
Sprememba mase konstrukcijskega sklopa ob kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



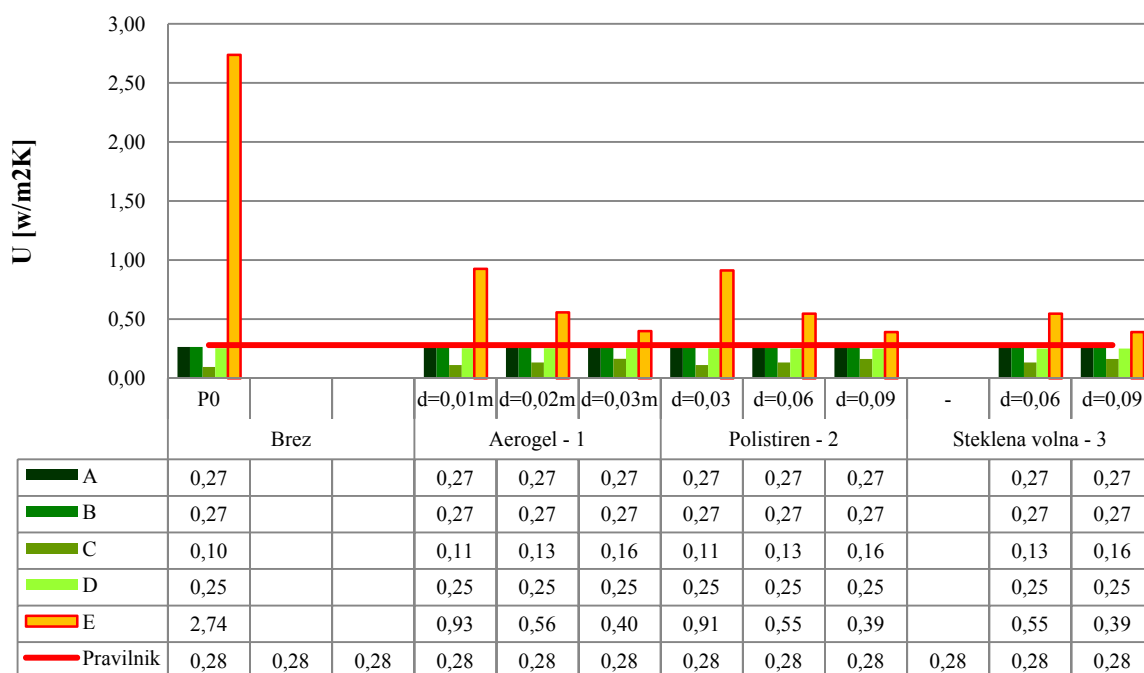
Sprememba mase konstrukcijskega sklopa ob kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



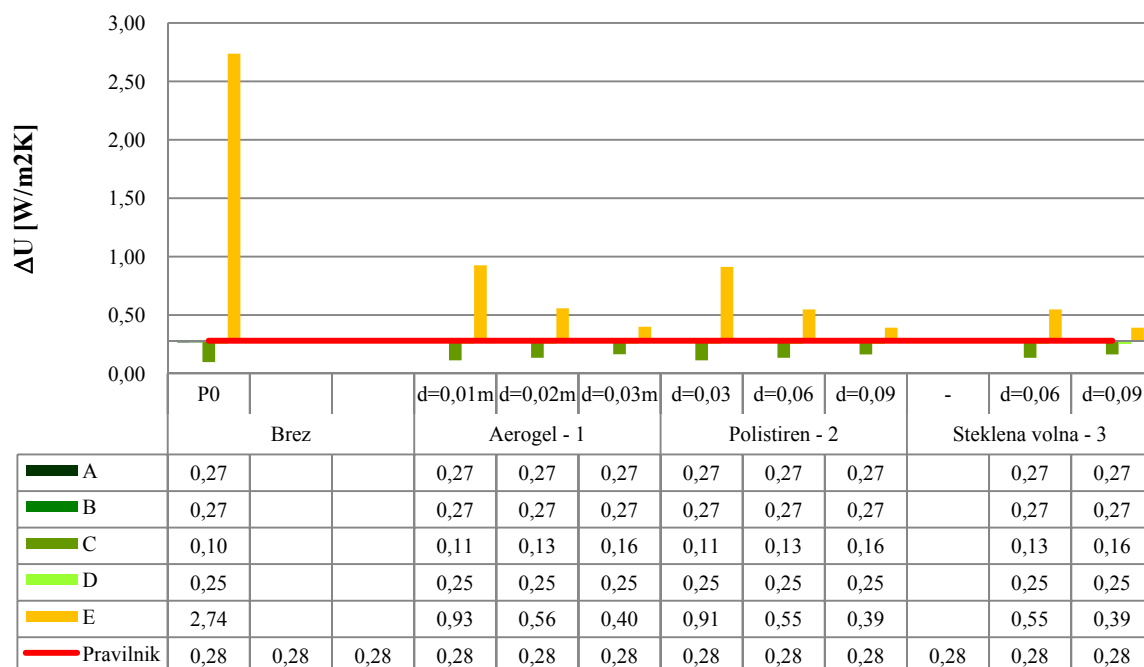
Sprememba toplotne prehodnosti pri kombiniranju pozicije ter tipa toplotne izolacije



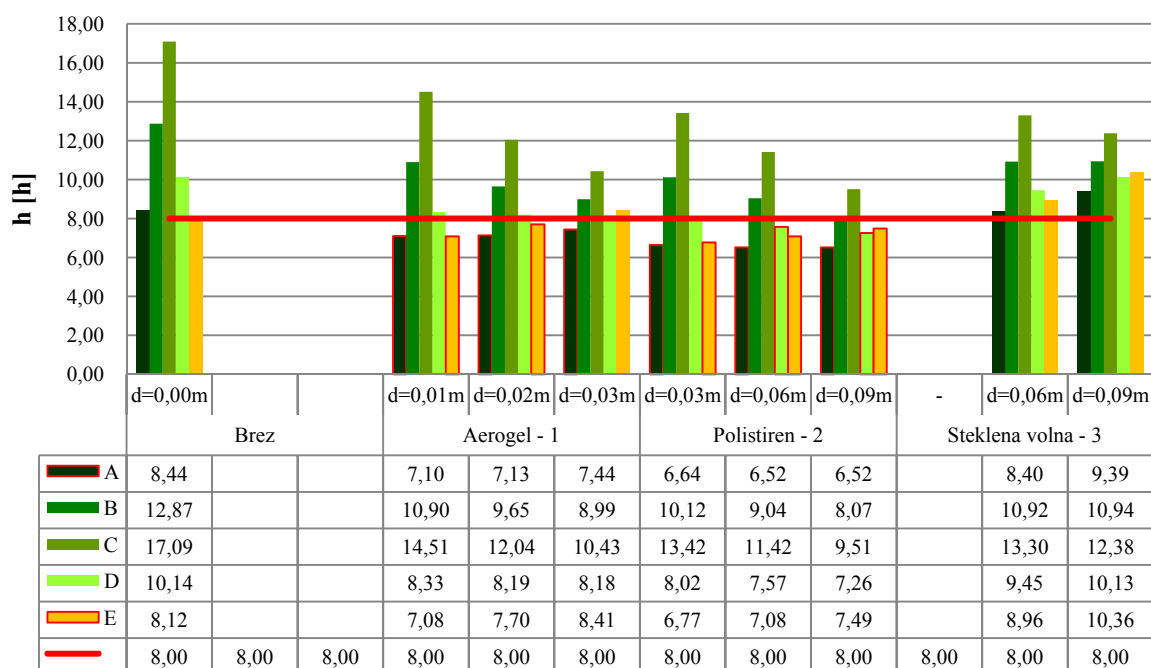
Toplotna prehodnost



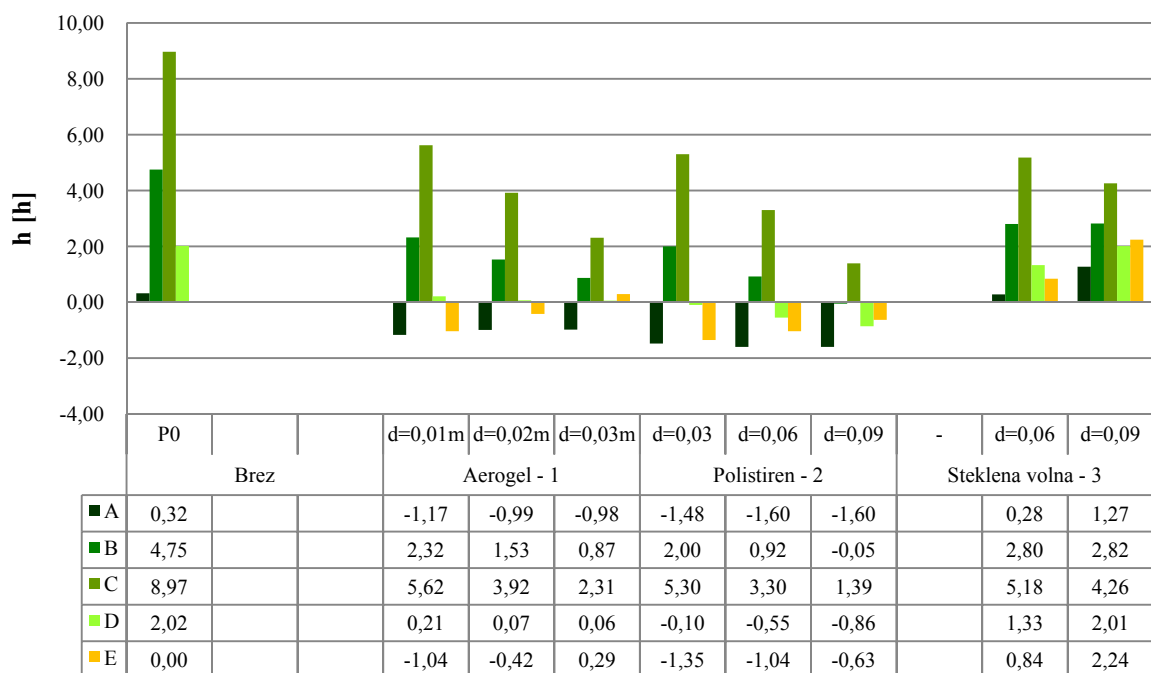
Odstopanje toplotne prehodnosti od predpisane vrednosti



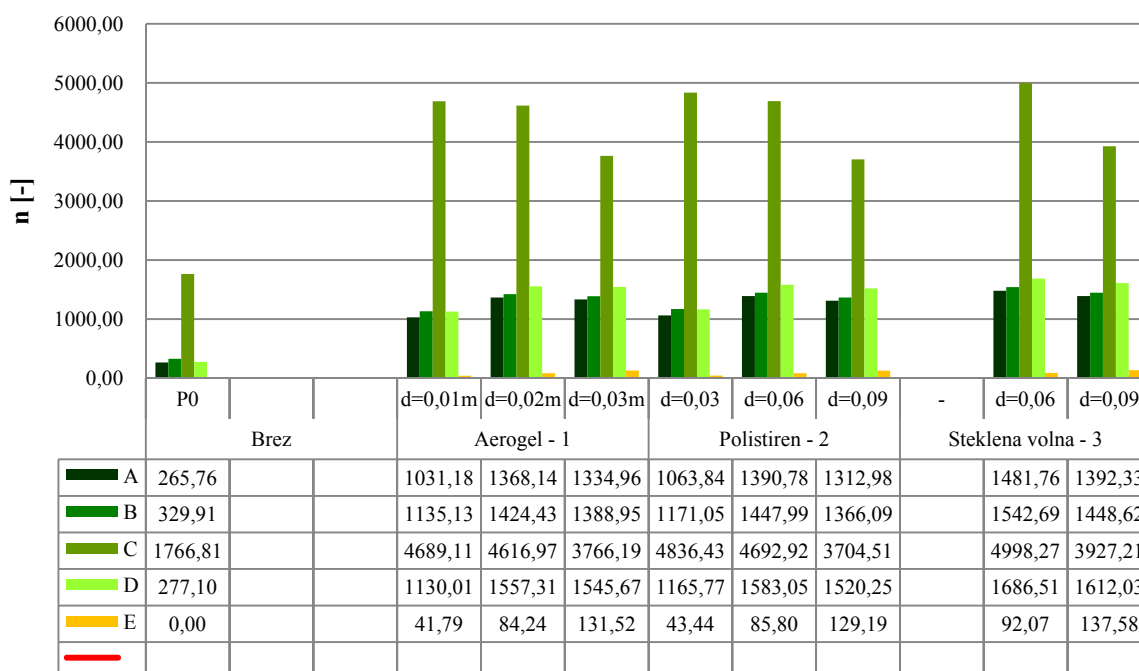
Temperaturna zakasnitev konstrukcijskega sklopa



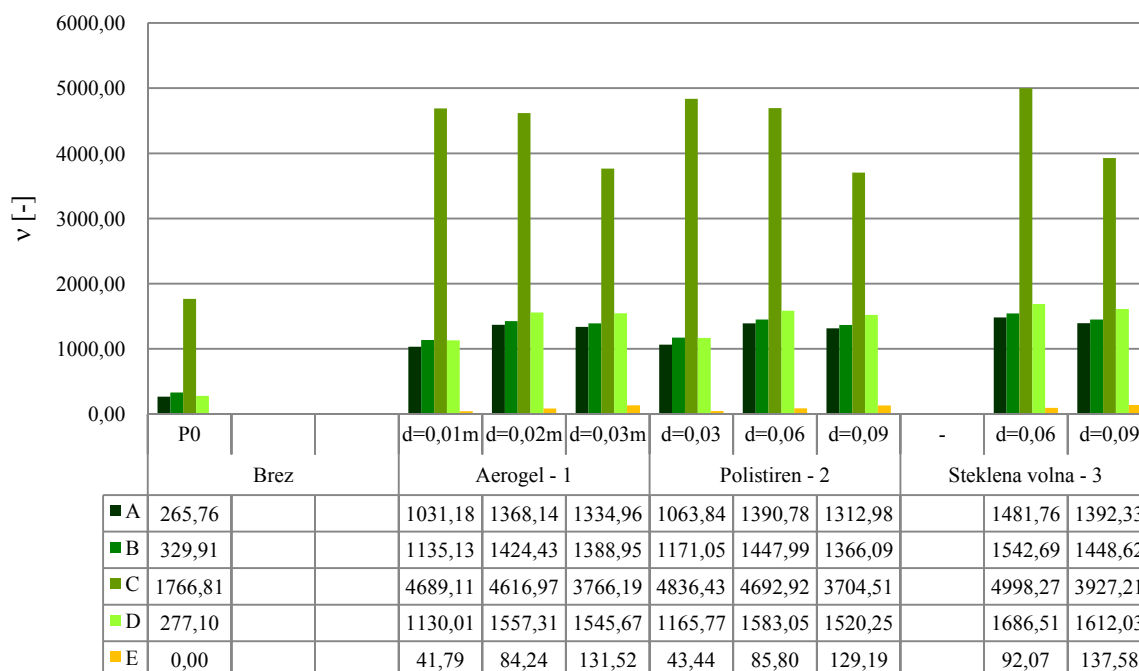
Sprememba temperaturne zakasnitve konstrukcijskega sklopa



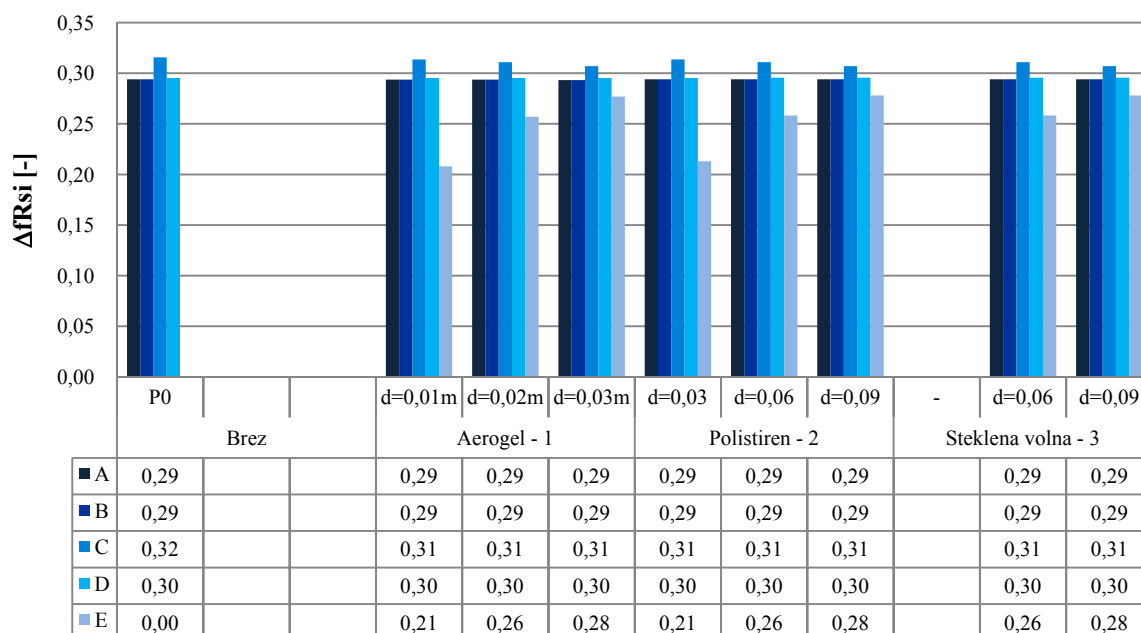
Sprememba temperaturnega dušenja konstrukcijskega sklopa



Sprememba temperaturnega dušenja konstrukcijskega sklopa



Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop



Sprememba temperaturnega faktorja na notranji površini glede na neizoliran konstrukcijski sklop

