

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Knušič, Š., 20014. Možnosti uporabe vakuumske toplotne izolacije v stavbah. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kunič, R., somentorica Kristl, Ž.): 92 str.

Datum arhiviranja: 23-01-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Knušič, Š., 20014. Možnosti uporabe vakuumske toplotne izolacije v stavbah. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kunič, R., co-supervisor Kristl, Ž.): 92 pp.

Archiving Date: 23-01-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

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



**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
STAVBARSTVO**

Kandidatka:

Špela Kunšič

**MOŽNOSTI UPORABE VAKUUMSKE TOPLOTNE
IZOLACIJE V STAVBAH**

Magistrsko delo št.: 3/II. ST

**THE POSSIBILITIES OF USING VACUUM THERMAL
INSULATION IN BUILDINGS**

Master Thesis No.: 3/II. ST

Mentor:

doc. dr. Roman Kunič

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

dr. Živa Kristl

Ljubljana, 22. 10. 2014

»ta stran je namenoma prazna«

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Špela Kunšič izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom »Možnosti uporabe vakuumske toplotne izolacije v stavbah«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 15.10.2014

Špela Kunšič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	699.86:66.03(043.2)
Avtor:	Špela Kunšič
Mentor:	doc. dr. Roman Kunič
Somentor:	dr. Živa Kristl
Naslov:	Možnosti uporabe vakuumske toplotne izolacije v stavbah
Tip dokumenta:	Magistrsko delo – B
Obseg in oprema:	92 str., 44 pregl., 3 graf., 94 sl.
Ključne besede:	Vakuumski izolacijski paneli, stavba FGG, kulturnovarstveni pogoji, toplotni mostovi, toplotne karakteristike stavbe, neto sedanja vrednost

Izvleček:

V magistrskem delu je prikazana uporaba vakuumskih izolacijskih panelov, ki predstavljajo velik tehnološki napredek in dobre toplotnoizolacijske lastnosti. V delu je analizirana stavba Univerze v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Stavba je vpisana v Register kulturne dediščine, zato smo morali upoštevati kulturnovarstvene pogoje. Analiza konstrukcijskih detajlov je bila narejena s programom Therm. Prikazana je uporaba vakuumskih izolacijskih panelov na delih stavbe, kjer se dogajajo toplotne izgube ali obstajajo izraziti linijski toplotni mostovi. Poraba energije oziroma njeni prihranki so bili izračunani s programom TOST. Finančna analiza je bila narejena po metodi neto sedanje vrednosti.

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 699.86:66.03(043.2)
Author: Špela Kunšič
Supervisor: Assist. Prof. Roman Kunič, Ph.D.
Cosupervisor: Živa Kristl, Ph.D.
Title: The possibilities of using vacuum thermal insulation in buildings
Document type: Master Thesis
Notes: 92 p., 44 tab., 3 grafph., 94 fig.
Key words: Vacuum insulation panels, building of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering, cultural heritage conditions, thermal bridges, thermal characteristics of the building, net present value

Abstract:

The master's thesis demonstrates the use of vacuum insulation panel, which is a significant technological advancement characterised by good thermal insulation features. The master's thesis analyses the building of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana. As the building is registered in the Register of Slovene Cultural Heritage, cultural heritage conditions needed to be observed in the process. Construction details were analysed using Therm software. Moreover, the master's thesis provides insight into using vacuum insulation panels on those sections of the building that cause heat losses or where distinct linear thermal bridges can be observed. Energy use and savings were calculated with the programme TOST, while the financial analysis was conducted in line with the net present value method.

ZAHVALA

Za pomoč in strokovno podporo se zahvaljujem mentorju doc. dr. Romanu Kuniču in somentorici dr. Živi Kristl.

Za zanimiv študij in nasvete pri nastajanju tega dela se zahvaljujem vsem zaposlenim na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente.

Zahvala možu Primožu za spodbudne besede in vso izkazano ljubezen.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	I
IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION.....	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO VSEBINE.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	IX
KAZALO GRAFIKONOV.....	XI
KAZALO SLIK.....	XII
1. UVOD.....	1
2. ZASNOVA NALOGE.....	3
2.1. Uporabljeni računalniški program.....	3
2.1.1. THERM.....	3
2.1.2. TOST.....	3
2.2. Zakonodaja.....	3
3. PREGLED TOPLOTNOIZOLACIJSKIH MATERIALOV.....	7
4. ZGODOVINA VAKUUMSKIH IZOLACIJSKIH PANELOV.....	10
5. OPIS DELOVANJA VAKUUMSKIH IZOLACIJSKIH PANELOV.....	11
5.1. Sestava vakuumskih izolacijskih panelov.....	11
5.1.1. Jedro vakuumskih izolacijskih panelov.....	11
5.1.2. Zaščitna ovojna folija.....	14
5.1.3. Adsorbenti plinov in vlage.....	17
5.1.4. Vakuum.....	17
5.2. Življenjska doba vakuumskih izolacijskih panelov.....	18
5.2.1. Staranje vakuumskih izolacijskih panelov.....	18
5.2.2. Vzdržljivost vakuumskih izolacijskih panelov.....	18
5.3. Vpliv vakuumske toplotne izolacije na okolje.....	19
5.4. Požarna odpornost.....	19
5.5. Toplotni mostovi vakuumskih izolacijskih panelov.....	20
5.5.1. Toplotni most, ki nastane zaradi ovoja vakuumskih izolacijskih panelov.....	20
5.5.2. Toplotni most prefabriciranih elementov z vakuumskimi izolacijskimi paneli.....	21

5.5.3.	Toplotni most, ki se pojavi zaradi konstrukcijskih napak pri uporabi vakuumskih izolacijskih panelov	21
5.6.	Izdelava in montaža vakuumskih izolacijskih panelov	22
5.7.	Možne izvedbe z vakuumskimi izolacijskimi paneli in prefabriciranimi vakuumskimi izolacijskimi paneli	23
6.	ANALIZA OBRAVNAVANE STAVBE UNIVERZE V LJUBLJANI, FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO	25
6.1.	Predstavitev obravnavane stavbe	25
6.2.	Zasnova stavbe	27
6.2.1.	Konstrukcijski sklopi stavbe	27
6.2.1.1.	Vertikalni konstrukcijski sklopi	27
6.2.1.2.	Horizontalni konstrukcijski sklopi	29
6.2.1.3.	Transparentni konstrukcijski sklopi	30
6.2.2.	Toplotni mostovi	31
6.3.	Izhodišča analize	34
6.3.1.	Robni pogoji stavbe	36
6.3.2.	Kulturnovarstveni pogoji	37
6.4.	Podrobnejša analiza toplotnih mostov	38
6.4.1.	Križanje stebrov in oken v pritličju V-1	40
6.4.2.	Križanje stebrov in zunanje stene v pritličju V-2	42
6.4.3.	Križanje stebrov in zunanjih sten na južnem delu stavbe V-3	44
6.4.4.	Križanje zunanje stene in okna v kabinetih V-4	46
6.4.5.	Križanje stebrov in oken v kabinetih V-5	48
6.4.6.	Križanje v vogalih stebrov severne strani stavbe V-6	50
6.4.7.	Križanje stebrov in oken v predavalnicah na severni strani stavbe V-7	52
6.4.8.	Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije severne strani stavbe M-154	54
6.4.9.	Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije južne strani stavbe M-2	56
6.4.10.	Križanje ab stene in medetažne konstrukcije v pritličju P-1-1 in P-1-2	58
6.4.11.	Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije S-1	60
6.5.	Ugotovitve	62
7.	UKREPI ZA IZBOLJŠANJE TOPLOTNIH KARAKTERISTIK STAVBE IN OCENA EKONOMSKE UPRAVIČENOSTI	65
7.1.	Ukrepi za izboljšanje toplotnih karakteristik stavbe	65
7.1.1.	Obstoječe stanje stavbe	65
7.1.1.1.	Izhodiščni podatki	65
7.1.1.2.	Rezultati obstoječega stanja	68

7.1.2.	Izboljšano stanje – primer 1	69
7.1.2.1.	Izhodiščni podatki	69
7.1.2.2.	Rezultati.....	70
7.1.2.3.	Strošek investicijsko vzdrževalnih del	70
7.1.3.	Izboljšano stanje – primer 2	71
7.1.3.1.	Izhodiščni podatki	71
7.1.3.2.	Rezultati.....	72
7.1.3.3.	Strošek investicijsko vzdrževalnih del	72
7.1.4.	Izboljšano stanje – primer 3	73
7.1.4.1.	Izhodiščni podatki	73
7.1.4.2.	Rezultati.....	74
7.1.4.3.	Strošek investicijsko vzdrževalnih del	74
7.1.5.	Izboljšano stanje – primer 4	75
7.1.5.1.	Izhodiščni podatki	75
7.1.5.2.	Rezultati.....	76
7.1.5.3.	Strošek investicijsko vzdrževalnih del	77
7.1.6.	Izboljšano stanje – primer 5	77
7.1.6.1.	Izhodiščni podatki	77
7.1.6.2.	Rezultati.....	77
7.1.6.3.	Strošek investicijsko vzdrževalnih del	78
7.1.7.	Primerjava rezultatov porabe energije.....	79
7.1.8.	Primerjava stroškov investicijskih del.....	81
7.2.	Ocena ekonomske upravičenosti	82
7.2.1.	Doba vračanja ali enostavna vračilna doba investicije.....	82
7.2.2.	Investicijski stroški.....	83
7.2.3.	Vzdrževalni stroški.....	83
7.2.4.	Obratovalni stroški	84
7.2.5.	Neto sedanja vrednost.....	85
8.	ZAKLJUČEK	87
VIRI	89

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava konstrukcijskega sklopa parapeta na severni in južni strani stavbe KSV-1.	27
Preglednica 2: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2.	28
Preglednica 3: Sestava fasade v prvem nadstropju KSV-3.	28
Preglednica 4: Sestava konstrukcijskega sklopa medetažne konstrukcije KSH-1.	29
Preglednica 5: Sestava konstrukcijskega sklopa strešne konstrukcije KSH-2.	29
Preglednica 6: Sestava tlakov tla proti terenu, KSH-3.	30
Preglednica 7: Robni pogoji.	36
Preglednica 8: Prikaz rezultatov.	41
Preglednica 9: Prikaz rezultatov.	43
Preglednica 10: Prikaz rezultatov.	45
Preglednica 11: Prikaz rezultatov.	47
Preglednica 12: Prikaz rezultatov.	49
Preglednica 13: Prikaz rezultatov.	51
Preglednica 14: Prikaz rezultatov.	53
Preglednica 15: Prikaz rezultatov.	55
Preglednica 16: Prikaz rezultatov.	57
Preglednica 17: Prikaz rezultatov P-1-1.	59
Preglednica 18: Prikaz rezultatov P-1-2.	59
Preglednica 19: Prikaz rezultatov.	61
Preglednica 20: Linijski toplotni mostovi celotne stavbe.	63
Preglednica 21: Učinkovitost energentov.	66
Preglednica 22: Izhodiščni podatki.	66
Preglednica 23: Vrednosti uporov mejnih zračnih plasti glede na konstrukcijski sklop.	67
Preglednica 24: Energijske lastnosti stavbe, obstoječe stanje.	68
Preglednica 25: Sestava konstrukcijskega sklopa strešne konstrukcije KS H-2 – izboljšano stanje.	69
Preglednica 26: Energijske lastnosti stavbe, primer 1.	70
Preglednica 27: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 1.	70
Preglednica 28: Sestava konstrukcijskega sklopa fasade na severni strani KS V-1 – izboljšano stanje.	71
Preglednica 29: Energijske lastnosti stavbe, primer 2.	72
Preglednica 30: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 2.	72
Preglednica 31: Sestava fasade na južni strani KSV-4 – izboljšano stanje.	73
Preglednica 32: Energijske lastnosti stavbe, primer 3.	74
Preglednica 33: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 3.	74
Preglednica 34: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – vakuumski izolacijski paneli.	75
Preglednica 35: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – ekspanzirani polistiren.	76
Preglednica 36: Energijske lastnosti stavbe, primer 4.	76
Preglednica 37: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 4.	77
Preglednica 38: Energijske lastnosti stavbe, primer 4.	77
Preglednica 39: Višina investicije, letni prihranek, doba vračanja.	82

Preglednica 40: Pregled investicijskih stroškov po posameznih primerih in skupno.....	83
Preglednica 41: Pregled vzdrževalnih stroškov po posameznih primerih	83
Preglednica 42: Prihranek računske potrebne toplote za ogrevanje v kWh na letni ravni.	84
Preglednica 43: Pregled obratovalnih stroškov po posameznih primerih za dobo 30 let.....	84
Preglednica 44: Neto sedanja vrednost NSV.....	85

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava količnika specifičnih transmisijskih izgub za vse primere	79
Grafikon 2: Primerjava letne potrebne toplote za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine za vse primere	80
Grafikon 3: Primerjava stroškov	81

KAZALO SLIK

Slika 1: Izračun vrednosti linijske toplotne prehodnosti Ψ s prikazom pomena posameznih členov enačbe (1) [31].....	5
Slika 2: Izračun vrednosti f_{Rsi} s prikazom pomena posameznih komponent v enačbi (4) [31].....	6
Slika 3: Mollierov diagram [36].....	6
Slika 4: Primerjava različnih materialov toplotnih izolacij ob istem učinku toplotne izolativnosti.....	7
Slika 5: Razlika med vakuumskimi izolacijskimi paneli, vakuumskimi sendvič elementi in vakuumskimi sistemi iz stekla [7].....	9
Slika 6: Vakuumski izolacijski panel [20].....	11
Slika 7: Praškasta silika, posneta s SEM (angl. Scanning Electron Microscope). Oblika delcev fumed silike je sferična, kar vodi do majhnih kontaktov in tako do majhne toplotne prevodnosti. Majhne stične točke se ohranijo tudi v obteženem stanju. [13].....	12
Slika 8: Steklena vlaka, posneta s SEM (angl. Scanning Electron Microscope). Oblika steklenih vlaken je cilindrična, kar pomeni, da so kontakti manjši. Toplotna prevodnost med vlakni je majhna, tudi če so vlakna obtežena. [13].....	13
Slika 9: Toplotna prevodnost različnih materialov, ki se uporabljajo za jedro vakuumskih izolacijskih panelov [2].....	13
Slika 10: Toplotna prevodnost jedra v odvisnosti od velikosti por materiala, uporabljenega za jedro panela [2].....	14
Slika 11: Primeri tipično uporabljenih materialov za ovojo VIP (AF – kovinski film, MF1 – enoslojni metaliziran film, MF2, MF3 – troslojni metaliziran film) [7].....	16
Slika 12: Toplotna prevodnost v odvisnosti od povečanja tlaka in vlažnosti v vakuumskem izolacijskemu panelu v 25 letih [1, 3].....	17
Slika 13: Ogljični odtis različnih izolacijskih materialov za toplotno prehodnost ovoja stavbe $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, izražen na površino ovoja stavbe (m^2) [18].....	19
Slika 14: Shema toplotnega mostu med dvema paneloma [12].....	20
Slika 15: Dve vrsti zapiranja panelov. Zgornji sliki: zapiranje s štirimi šivi po obodu. Spodnji sliki: zapiranje s tremi šivi. [2].....	22
Slika 16: Opozorilo pri montaži in uporabi vakuumskih izolacijskih materialov [9].....	23
Slika 17: Orientacija stavbe.....	25
Slika 18: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, južna stran.....	26
Slika 19: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, severna stran.....	26
Slika 20: Shema tipične etaže.....	26
Slika 21: Sestava parapeta na severni strani stavbe KSV-1.....	27
Slika 22: Sestava zunanje stene vzhodne in zahodne strani stavbe KSV-2.....	28
Slika 23: Sestava parapeta južna stran stavbe KSV-3.....	28
Slika 24: Sestava medetažne konstrukcije H-1.....	29
Slika 25: Sestava strešne konstrukcije H-2.....	29
Slika 26: Sestava tlakov tla proti terenu H-3.....	30
Slika 27: Horizontalni linijski toplotni most nad pritličjem in vertikalni linijski toplotni most med okni in stebri.....	31
Slika 28: Horizontalni linijski toplotni most medetažne konstrukcije in vertikalni linijski toplotni mostovi med stebri in okni.....	31

Slika 29: Tloris pritličja z označenimi toplotnimi mostovi	32
Slika 30: Tloris tipične etaže z označenimi toplotnimi mostovi	33
Slika 31: Prečni prerez z označenimi toplotnimi mostovi	33
Slika 32: Matrika križanj stebra in okna v tlorisu V-7	34
Slika 33: Matrika križanj medetažne konstrukcije in zunanje stene v prerezu M-1	35
Slika 34: Matrika križanj medetažne konzolne konstrukcije v prvem nadstropju in zunanje stene v prerezu P-1-2.	36
Slika 35: Tloris detajla V-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	40
Slika 36: Potek izoterm v tlorisu V-1	40
Slika 37: Potek toplotnega toka v tlorisu V-1	40
Slika 38: Potek izoterm v tlorisu V-1,	41
Slika 39: Potek toplotnega toka v tlorisu V-1,	41
Slika 40: Tloris detajla V-2, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	42
Slika 41: Potek izoterm v tlorisu V-2	42
Slika 42: Potek toplotnega toka v tlorisu V-2	42
Slika 43: Potek izoterm v tlorisu V-2,	43
Slika 44: Potek toplotnega toka v tlorisu V-2,	43
Slika 45: Tloris detajla V-3, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	44
Slika 46: Potek izoterm v tlorisu V-3	44
Slika 47: Potek toplotnega toka v tlorisu V-3	44
Slika 48: Potek izoterm v tlorisu V-3,	45
Slika 49: Potek toplotnega toka v tlorisu V-3,	45
Slika 50: Tloris detajla V-4, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	46
Slika 51: Potek izoterm v tlorisu V-4	46
Slika 52: Potek toplotnega toka v tlorisu V-4	46
Slika 53: Potek izoterm v tlorisu V-4	47
Slika 54: Potek toplotnega toka v tlorisu V-4	47
Slika 55: Tloris detajla V-5, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	48
Slika 56: Potek izoterm v tlorisu V-5	48
Slika 57: Potek toplotnega toka v tlorisu V-5	48
Slika 58: Potek izoterm v tlorisu V-5,	49
Slika 59: Potek toplotnega toka v tlorisu V-5,	49
Slika 60: Tloris detajla V-6, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	50
Slika 61: Prikaz izoterm v tlorisu V-6	50
Slika 62: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6	50
Slika 63: Prikaz izoterm v tlorisu V-6,	51
Slika 64: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6,	51
Slika 65: Tloris detajla V-7, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	52
Slika 66: Prikaz izoterm v tlorisu V-6	52
Slika 67: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6	52
Slika 68: Prikaz izoterm v tlorisu V-6,	53
Slika 69: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6,	53
Slika 70: Prerez detajla M-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	54
Slika 71: Prikaz izoterm po prerezu M-1	54

Slika 72: Prikaz toplotnega toka po prerezu M-1	54
Slika 73: Prikaz izoterm po prerezu M-1,	55
Slika 74: Prikaz toplotnega toka po prerezu M-1, predlagane izboljšave	55
Slika 75: Prerez detajla M-2, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.	56
Slika 76: Prikaz izoterm po prerezu M-2.....	56
Slika 77: Prikaz toplotnega toka po prerezu M-2	56
Slika 78: Prikaz izoterm po prerezu M-2,.....	57
Slika 79: Prikaz toplotnega toka po prerezu M-2,	57
Slika 80: Prerez detajla P-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.....	58
Slika 81: Prikaz izoterm po prerezu P-1-1.....	58
Slika 82: Prikaz toplotnega toka po prerezu P-1-2	58
Slika 83: Prikaz izoterm po prerezu P-1-1,.....	60
Slika 84: Prikaz toplotnega toka po prerezu P-1-2, predlagane izboljšave	60
Slika 85: Prerez detajla S-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.....	60
Slika 86: Prikaz izoterm po prerezu S-1	61
Slika 87: Prikaz toplotnega toka po prerezu S-1	61
Slika 88: Prikaz izoterm po prerezu,	62
Slika 89: Prikaz toplotnega toka skozi prerez,	62
Slika 90: Sestava strešne konstrukcije KS H-2 – izboljšano stanje.....	69
Slika 91: Sestava parapeta na severi strani stavbe V-1 – izboljšano stanje.....	71
Slika 92: Sestava parapeta, južna stran stavbe KS V-4 – izboljšano stanje.....	73
Slika 93: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – vakuumski izolacijski paneli	75
Slika 94: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – vakuumski izolacijski paneli	76

1. UVOD

Toplotna zaščita stavbe ima neposreden vpliv na človekovo počutje v bivalnem prostoru, kar prispeva k toplotnemu ugodju. Pri odločitvi o izboru primerne materiala za toplotno zaščito stavbe upoštevamo veliko kriterijev. Gotovo je najbolj izpostavljena lastnost materiala toplotna prevodnost λ [W/(m K)]. Poleg toplotne prevodnosti je pomembno upoštevati še druge kriterije, kot so protipožarna odpornost, difuzijska prepustnost, tlačna trdnost, stisljivost, trajnost, občutljivost na navlaževanje. Vedno bolj se zavedamo tudi pomena okoljskih kriterijev. Za zdravje ljudi in varovanje okolja je pomembna vsebnost škodljivih snovi, ekološka neoporečnost proizvodnega postopka, čim manjša raba energije pri proizvodnji, kratke transportne poti, razpoložljivost surovin ter primernost za ponovno uporabo oziroma odstranitev. Odločitev o izbiri materiala je povezana s predvidenim mestom in načinom vgradnje. Pogosto je pomemben faktor pri odločanju tudi cena materiala.

Uporaba toplotnoizolacijskih materialov je z uvedbo Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah [22] v porastu. V kolikor slednje ne velja popolnoma za vgrajene toplote izolacije v absolutnih količinah zaradi krize v gospodarstvu in predvsem v gradbeništvu, pa je zaznavno veliko povečanje količine toplotnih izolacij na enoto površine toplotnega ovoja. Največje težave z upoštevanjem pravilnika so se pokazale pri rekonstrukcijah in pri investicijsko vzdrževalnih delih, saj je pri slednjih treba upoštevati obstoječe lastnosti stavb in kulturnovarstvene pogoje. Vsled zakonodaji razvoj toplotno izolacijskih materialov v svetu zelo hitro napreduje. Različni proizvajalci na tržišče plasirajo vedno nove izboljšane materiale. V članku [29] je avtor Björn Petter Jelle raziskal obstoječe, aktualne in toplotno izolacijske materiale za prihodnosti in ugotovil, da noben od obstoječih materialov ne zadosti vsem zahtevam predpisov. Predlaga, da se izbere najboljše materiale zadnjega stanja gradbene tehnike in se razvije visoko zmogljive toplotnoizolacijske materiale, ki presegajo vse obstoječe lastnosti in rešitve. Organizacija International Energy Agency deluje na področju globalno energijsko učinkovitih stavb in izdaja poročila o energetski učinkovitosti posameznih materialov. V njihovih študijah [2, 9, 12] o vakuumskih izolacijskih materialih so prikazane lastnosti materialov za posamezne sloje panelov, sestava panelov, podana so priporočila za uporabo v industriji in gradbeništvu. Thomas Thorsell je v doktorski disertaciji [13] raziskal materialne lastnosti vakuumskih izolacijskih panelov. Martin Tenpierik je v doktorski disertaciji [20] raziskal termične lastnosti panelov in njihovo obnašanje v življenjski dobi in mehanske lastnosti panelov. Avtorji članka [8] so dokazali z eksperimentalnimi raziskavami, da na staranje panelov najbolj vplivajo temperatura, vlažnost in tlak. Uporabo vakuumskih izolacijskih materialov v posameznih konstrukcijskih sklopih in rešitve detajlov v že izvedenih stavbah je predstavil avtor Pär Johansson v znanstven članku [1].

Namen magistrskega dela je vakuumske izolacijske panele aplikativno uporabiti v rešitvah toplotnih mostov na stavbi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

Delo je okvirno razdeljeno na tri dele. V prvem delu so predstavljene materialne lastnosti, življenjska doba, vpliv na okolje, požarna odpornost, izdelava in montaža, možne izvedbe izbranega toplotnoizolacijskega materiala. V drugem delu je predstavljena možnost uporabe izbranega toplotnoizolacijskega materiala na stavbi Univerze v Ljubljani, na Fakulteti za gradbeništvo in

geodezijo v Ljubljani. Z analizo načrtovalskih detajlov so prikazani detajli, ki ne ustrezajo sodobnim standardom, in rešitve z upoštevanjem kulturnovarstvenih pogojev. V tretjem delu je prikazan izračun toplotne porabe v sedanjem stanju stavbe in primerjava z upoštevanjem izboljšav. Prikazan je izračun stroškov za izboljšave in izračun neto sedanje vrednosti, ki pokaže ekonomsko smotrnost predvidenih izboljšav.

Cilj magistrskega dela je preveriti ali lahko vakuumske izolacijske panele smiselno uporabimo v rešitvah detajlov na izbrani stavbi, in hkrati preveriti, ali so predvidene izboljšave finančno smiselne.

2. ZASNOVA DELA

2.1. Uporabljeni računalniški program

2.1.1.THERM

Za analizo toplotnih mostov smo uporabili računalniški program THERM, ki je bil razvit za pomoč inženirjem, arhitektom in študentom. S programom THERM analiziramo dvodimenzionalno prevajanje toplote v povezavi s problemi kondenzacije na konstrukcijskih sklopih. Program temelji na metodi končnih elementov in omogoča modeliranje gradbenih elementov poljubnih geometrijskih oblik [15]. Za izbrana fasadna križanja smo izvedli dvodimenzionalno analizo toplotnega polja skozi transparentne in netransparentne dele konstrukcije.

2.1.2.TOST

Za izračun ekonomičnosti predlaganih ukrepov smo uporabili program TOST (Toplotni Odziv STavb), program za izračun energetske bilance stavbe po Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah, upoštevajoč SIST EN ISO 13790 in TSG1-004:2010 Učinkovita raba energije, je bil razvit na Univerzi v Ljubljani, na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo [37]. Program izračuna: koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe, letna raba primarne energije, letna potrebna toplota za ogrevanje, letni potrebni hlad za hlajenje in letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto neto uporabne površine in kondicionirane prostornine.

2.2. Zakonodaja

V Sloveniji je od leta 2010 veljaven Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah [22] ali krajše PURES, ki je bil določen na podlagi Direktive o energetske učinkovitosti stavb EPBD-r 2010/31/EU, ki omejuje rabo energije v stavbah z upoštevanjem ciljev 20-20-20 evropske podnebno energetske politike. Pravilnik določa tehnične zahteve na področju ogrevanja, hlajenja, prezračevanja, toplotne zaščite, priprave tople vode, osvetljevanja in zagotavljanja lastnih obnovljivih virov. Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije [23] »določa gradbene ukrepe oziroma rešitve za doseg zahtev iz tega pravilnika in določa metodologijo izračuna energijskih lastnosti stavbe. Uporaba tehnične smernice je obvezna« [23].

Stavbe lahko obravnavamo kot toplotne sisteme z različnimi energetskeimi pritoki in odtoki. Pritoke in odtoke sestavljajo: notranji toplotni dobitki, transmisijski pritoki ali izgube, solarni dobitki, ventilacijski toplotni pritoki ali izgube ter izgube zaradi evaporacije [24].

Toplotni most je po definiciji iz SIST EN ISO 10211: 2008 Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – Podrobni izračuni (ISO 10211:2007) [30] del ovoja stavbe, kjer se sicer enakomerni toplotni upor spremeni zaradi:

- popolnega ali delnega preboja ovoja stavbe z materiali drugačne prevodnosti;
- spremembe v debelini gradbenega elementa;
- razlike v notranji in zunanji površini, ki nastanejo na stikih sten/tal/stropa.

Toplotni most nastane zaradi razlike med toplotno upornostjo konstrukcijskih sklopov, ki se stikajo. Toplotni most ima vpliv na transmisijske toplotne izgube oziroma na prehod toplote skozi ovoj stavbe oziroma negativno vpliva na toplotno bilanco stavbe. Negativni vpliv imajo toplotni mostovi na toplotno ugodje, saj znižujejo notranje površinske temperature. Površinska temperatura je pomembna zaradi toplotnega ugodja ljudi v prostoru.

Glede na obliko toplotne mostove delimo na linijske in točkovne. Linijski toplotni most ima majhno širino in veliko dolžino vzdolž ene od treh ortogonalnih osi. Vrednosti so podane na dolžinsko enoto toplotnega mostu. Točkovni toplotni mostovi predstavljajo točkovne toplotne prehodnosti [30].

Vrednosti toplotnih mostov lahko dobimo numerično s pomočjo programske opreme ali jih brez računanja povzamemo iz SIST EN ISO 14683: 2008 Toplotni mostovi v stavbah – Linearna toplotna prehodnost – Poenostavljena metoda in privzete vrednosti (ISO 14683:1999) [34] ali iz kataloga toplotnih mostov Catalogue des ponts thermiques [32].

Glede na tipe toplotnih mostov jih delimo na geometrijske, konstrukcijske in kombinirane toplotne mostove. Geometrijski toplotni most nastopi na delu ovoja stavbe, pri katerem je zunanja površina, skozi katero toplota prehaja iz ogrevanega prostora v zunanje okolje, precej večja od notranje. Konstrukcijski ali materialni toplotni most nastane tam, kjer je prekinjen toplotni ovoj zgradbe. Največkrat je toplotni most posledica slabo načrtovanih detajlov. Kombinirani toplotni most je kombinacija geometrijskega toplotnega mostu s konstrukcijskim.

Križanja konstrukcijskih sklopov je treba natančno načrtovati, da se tako lahko izognemo toplotnim mostom v stavbnem oboju. Konstrukcijski sklop najprej obravnavamo kot kombinacijo treh osnovnih plasti: nosilna konstrukcija, toplotna izolacija in hidroizolacija. Osnovne plasti morajo biti neprekinjene in povezane tako, da bo stavbni ovoj pravilno deloval. Nato vključimo vse ostale plasti, ki nastopajo v konstrukcijskem sklopu. Pri obravnavi križanj si pomagamo z matriko križanj konstrukcijskih sklopov, ki jo izdelamo glede na geometrijo.

Najpomembnejše omejitve, ki smo jih v delu upoštevali, izhajajo iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Smernica navaja, da se je treba toplotnim mostom z linijsko toplotno prehodnostjo $\psi > 0,20 \text{ W}/(\text{m K})$ izogniti s popravki načrtovalskih detajlov. V kolikor to ni mogoče, je treba dokazati, da vodna para na mestih toplotnih mostov ne bo kondenzirala. Če imajo vsi toplotni mostovi linijsko toplotno prehodnost $\psi < 0,20 \text{ W}/(\text{m K})$, se lahko njihov vpliv upošteva na poenostavljen način, s povečanjem toplotne prehodnosti celotnega ovoja stavbe za $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Vpliv linijskih toplotnih mostov se pri izračunu energije v stavbah, kjer se upoštevajo enodimenzionalne vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov, zajame s pomočjo

vrednosti ψ in dolžine posameznega tipa toplotnega mostu. Vpliv se odraži na vrednosti koeficienta transmisijskega prenosa toplote [23].

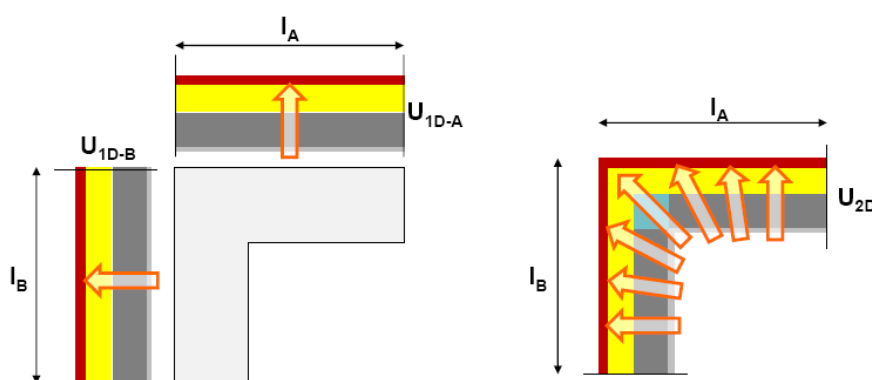
Linearno toplotno prevodnost toplotnega mostu Ψ izračunamo na sledeči način:

$$\psi = L_{2D} - L_{1D} \quad (1)$$

kjer sta, L_{1D} in L_{2D}

$$L_{1D} = (U_{1D-A} * l_A) + (U_{1D-B} * l_B) \quad (2)$$

$$L_{2D} = U_{2D} * (l_A + l_B) \quad (3)$$



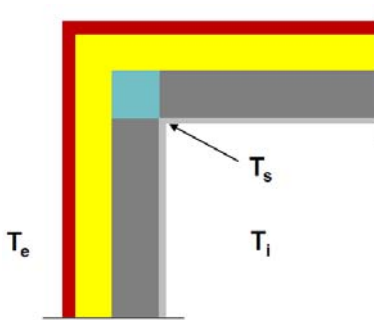
Slika 1: Izračun vrednosti linijske toplotne prehodnosti Ψ s prikazom pomena posameznih členov enačbe (1) [31]

V primeru, da ψ ni manjši od 0,20 W/(m K), moramo dokazati, da vodna para, ki zaradi difuzije prodira v gradbeno konstrukcijo, ne kondenzira. V TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije je navedeno, da v kolikor pride do kondenzacije vodne pare v konstrukciji, se mora ta po koncu računskega obdobja difuzijskega navlaževanja in izsuševanja povsem izsušiti. Vse gradbene konstrukcije morajo biti projektirane tako, da vodna para pri projektnih pogojih na njihovih površinah ne kondenzira [23].

V SIST EN ISO 10211:2008 Toplotni mostovi v stavbah. Toplotni tokovi in površinske temperature – podrobni izračuni (ISO 10211:2007) je definiran temperaturni faktor f_{Rsi} , ki je merilo, s katerim ocenjujemo možnost nastanka kondenzacije na notranji površini konstrukcije [23].

$$f_{Rsi} = \frac{T_s - T_e}{T_i - T_e} \quad (4)$$

kjer je T_s najnižja temperatura na površini konstrukcije, T_e zunanja temperatura zraka, T_i notranja temperatura zraka.



Slika 2: Izračun vrednosti f_{Rsi} s prikazom pomena posameznih komponent v enačbi (4) [31]

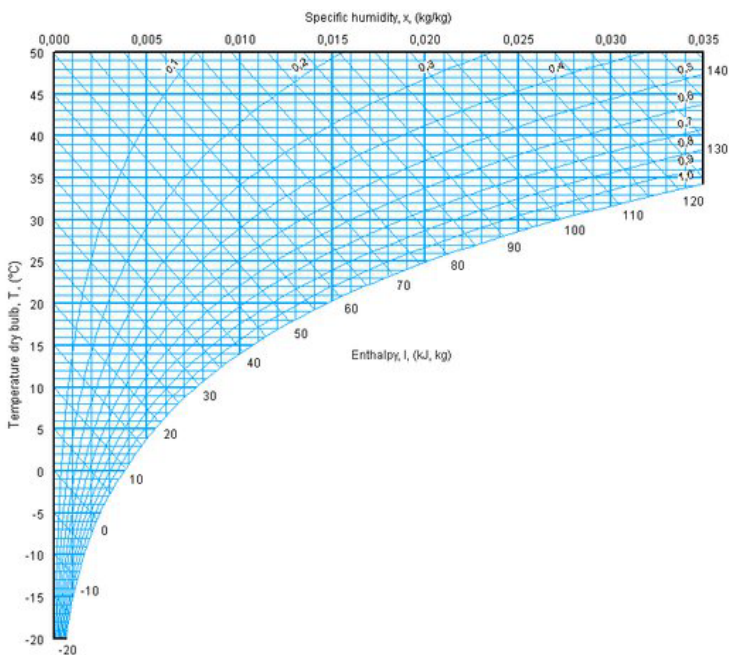
Vrednosti f_{Rsi} , večje od 0,75, ne povzročajo nastanka površinske kondenzacije na notranji strani konstrukcijskega sklopa [31].

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb [36] predpisuje temperaturo zraka za toplotno ugodje sedeče osebe v bivalni coni, in sicer [36]:

- v času brez ogrevanja med 22 °C in 26 °C, priporočljivo 23 °C do 25 °C,
- v času ogrevanja med 19 °C in 24 °C, priporočljivo 20 °C do 22 °C.

S Pravilnikom o prezračevanju in klimatizaciji stavb [36] je določena dopustna relativna vlažnost med 30 % in 70 %, pri temperaturi zraka med 20 °C in 26 °C. S tem je zagotovljena takšna vlažnost zraka, da s svojim neposrednim oziroma posrednim učinkom ne vpliva na ugodje in zdravje ljudi ter ne povzroči nastanka površinske kondenzacije na stenah [36].

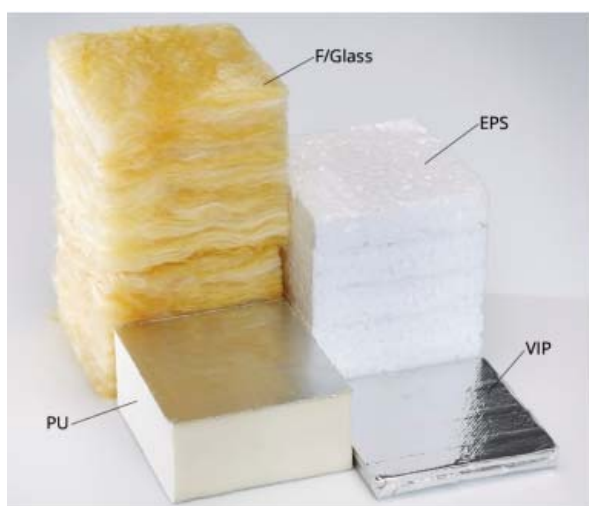
Temperaturo rosišča odčitamo iz Mollierovega diagrama, ki je prikazan na Sliki 3. Temperaturo rosišča z diagrama razberemo za izbrano temperaturo zraka in izbrano relativno vlažnost v prostoru.



Slika 3: Mollierov diagram [36]

3. PREGLED TOPLOTNOIZOLACIJSKIH MATERIALOV

Na Sliki 4 je prikazana primerjava različnih tipov toplotnih izolacij ob istem učinku toplotne izolativnosti. Že nekaj desetletij je najboljši način za izboljšanje toplotne učinkovitosti stavb uporaba toplotnih izolacij. Zaradi uvedbe in zahtev iz Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah [22] toplotne izolacije dosegajo velike debeline. Zmanjšanje debeline toplotne izolacije predstavlja velik izziv za arhitekte, inženirje in ekonomiste. Pri novogradnjah lažje vnaprej predvidimo velike zahteve po debelini toplotnih izolacij, medtem ko v primerih rekonstrukcij in investicijsko vzdrževalnih delih nastopajo nepremostljive ovire zaradi potrebe izolacije stavb, ki v večini primerov pomeni poseg v fasado, pri tem pa debelina izolacije odigra pomembno vlogo. Zahteva, ki je v nasprotju z možnostjo izvedbe, je pri obstoječih objektih običajno nespremenjena podoba zunanosti, kar pa zelo težko dosežemo z dodatno veliko debelino materiala za toplotno izolacijo.



Slika 4: Primerjava različnih materialov toplotnih izolacij ob istem učinku toplotne izolativnosti

Toplotno izolacijske materiale lahko glede na obdobja uporabe razdelimo v tri skupine [29]:

- tradicionalni materiali,
- najnovejši materiali in
- možnosti izolacijskih materialov za prihodnost.

Med tradicionalne izolacijske materiale štejemo materiale, ki so dandanes najpogosteje uporabljeni. To so: mineralna volna, ekspanziran polistiren, ekstrudiran polistiren, celuloza, pluta, poliuretan.

Med najnovejše izolacijske materiale štejemo rešitve, ki so na voljo danes in dosegajo najboljše rezultate v nizki stopnji toplotne prevodnosti. To so: vakuumski izolacijski paneli (VIP), paneli z zračnimi porami (GFP), aerogeli, fazno spremenljivi materiali (PCM).

Vakuumski izolacijski paneli (angl. vacuum insulation panel) so sestavljeni iz jedra in ovoja. Toplotna prevodnost novih panelov se giblje od 0,003 do 0,004 W/(m K), zmanjšuje se s staranjem v odvisnosti od vlažnosti. Slabost je velika občutljivost na poškodbe in potrebna je natančna industrijska priprava

plošč, le-teh ni mogoče žagati. Pomanjkljivost je visoka cena. Največja prednost vakuumskih izolacijskih panelov je majhna debelina.

Aerogeli trenutno največ obetajo. Toplotna prevodnost pri atmosferskem tlaku je 0,013 do 0,014 W/(m K). Velika prednost aerogelov je, da se jih da izdelati prozorne. Paneli z zračnimi porami (angl. gas-filled panels) so podobni vakuumskim izolacijskim panelom, le da so namesto vakuuma dodani žlahtni plini, ki so nizko toplotno prevodni.

Paneli z zračnimi porami so manj občutljivi, saj ni potrebe po zadrževanju vakuuma. Toplotna prevodnost je približno 0,040 W/(m K). Fazno spremenljivi materiali (angl. phase change materials) niso toplotno izolacijski materiali, vendar so zanimivi kot aplikacije za nadomestitev toplotne izolacije.

Fazno spremenljivi materiali se spreminjajo iz trdnega stanja v tekoče stanje, ko se segrevajo z absorpcijo energije, in obratno. Uporaba fazno spremenljivih materialov je odvisna od klimatskih pogojev in zelenih temperaturnih pogojev v prostoru [29].

Možne rešitve za toplotno izolacijo v prihodnosti so: vakuumski izolacijski materiali (VIM), zračni izolacijski materiali (GIM), nano izolacijski materiali (NIM), dinamični izolacijski materiali (DIM) in kombinacije obstoječih izolacijskih materialov in nano materialov.

Vakuumski izolacijski materiali (angl. vacuum insulation materials) so homogeni materiali z vstavljenimi majhnimi porami z vakuumom. Materiali se lahko režejo na kraju gradnje brez izgube toplotne izolativnosti.

Zračni izolacijski materiali (angl. gas insulation materials) so homogeni materiali z zaprtimi majhnimi porami, napolnjenimi z žlahtnimi plini.

Nano izolacijski materiali (angl. nano insulation materials) so sestavljeni iz por zelo majhnih velikosti. Pore so odprte ali zaprte. Ni treba paziti na vdor zraka ali vlažnosti v materialu.

Dinamični izolacijski materiali (angl. dynamic insulation panels) omogočajo kontrolo toplotne prevodnosti s spremembo faze materiala.

Glavna prednost vseh naštetih materialov, ki so še v fazi razvoja, je, da so materiali homogeni, kar pomeni, da jih bo možno uporabljati za različne oblike in oblikovati na gradbišču brez poškodb materiala [29].

V magistrskem delu smo se odločili za študijo vakuumskih izolacijskih panelov, ker v zadnjem stanju tehnike nudijo največjo možnost toplotnih prihrankov in hkrati zavzamejo najmanj prostora za montažo.

Do sedaj razvite sisteme za izolacijo z vakuumom lahko razdelimo na tri podsisteme [7]:

- vakuumski izolacijski paneli (VIP),
- vakuumski sendvič elementi (VIS) in
- vakuumski izolacijski sistemi iz stekla (VIG).



Slika 5: Razlika med vakuumskimi izolacijskimi paneli, vakuumskimi sendvič elementi in vakuumskimi sistemi iz stekla [7]

Vakuumski izolacijski paneli kot samostojen element so krhki in zato ne morejo prenašati koncentriranih obremenitev. Vakuumski sendvič elementi so sendvič elementi, ki lahko prenesejo visoko raven obtežb, brez dodatnih zaščitnih plasti in se lahko uporabljajo za nosilne dele konstrukcije.

V nadaljevanju bo magistrsko delo posvečeno proučitvi vakuumskih izolacijskih panelov.

4. ZGODOVINA VAKUUMSKIH IZOLACIJSKIH PANELOV

Vakuumski izolacijski paneli izhajajo iz Nemčije, kjer so leta 1930 patentirali plošče iz poroznega materiala, ki je bil ovit z gumo. Dvajset let kasneje so v ZDA razvili plošče iz steklene volne, ovite v jekleno folijo, leta 1963 pa je bil razvit prvi panel iz nanomateriala. Komercialna proizvodnja aerogelov se je razvila leta 1970, kar je vodilo v razvoj različnih materialov za jedro panela. Vakuumski izolacijski paneli, kakršni so v uporabi še danes, so bili predstavljeni ob koncu prejšnjega stoletja. Leta 1979 in 1983 sta se pojavila prva patenta za vakuumske izolacijske panele. Koncept panelov se ni veliko spremenil do danes. Ostajata dve bistveni komponenti panelov: jedro in ovoj. Že v zgodnjih poizkusih so ugotovili, da je jedru treba dodati porozni material, ki vsrkava odvečno vlago. Za jedro so kot material uporabljali prah praškastih struktur silike, perlita, elektrofiltrskega pepela, silikine aerogele. Za ovoj so se v začetnih fazah uporabljali plastični ovoji in metalne folije, kasneje so se začele uporabljati večslojne plastike in večslojne kovine [5, 11].

Vakuumski izolacijski paneli so bili razviti za uporabo na mestih, kjer je prostor omejen. Konec 20. stoletja se je med izdelovalci hladilnikov in zamrzovalnih skrinj pojavilo veliko zanimanje za vakuumsko izolacijo, saj so morali nadomestiti do takrat uporabljen CFC (klorofluorogljikovodik). Ena od možnosti za zamenjavo CFC je bila vakuumska izolacija. V ta namen se je preizkusilo veliko različnih materialov in načinov za izdelavo panelov. Pri tem se je pokazal velik potencial za uporabo v gradbeništvu, vendar z upoštevanjem dodatnih ukrepov, kot so npr. staranje materiala in pričakovana doba uporabe. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so se pričele tenzije za proizvodnjo bolj primernih vakuumskih panelov, ki bi bili uporabni v gradbeništvu. Cilj je bil doseči čim tanjšo toplotno izolacijo, ki bi bila visoko učinkovita [1, 11].

Razvoj vakuumskih izolacijskih panelov se je najbolj razvil v Aziji in Evropi. Na azijskem trgu se največ pojavljajo vakuumske izolacije za belo tehniko, to so paneli z aluminijastim ovojem in steklenimi vlakni ali odprto celičastim materialom v jedru. Oba materiala potrebujejo visoko raven vakuum, kar pa pomeni, da je potreben zelo tesen ovoj. V Evropi se paneli uporabljajo tudi v gradbeništvu, so trend uporabe za jedro materiala z majhnimi porami (< 1 mm) in ovoj iz metaliziranih kompozitov. Največkrat uporabljen material za jedro je silika, za ovoj pa polimerni ovoj iz več slojev [13].

5. OPIS DELOVANJA VAKUUMSKIH IZOLACIJSKIH PANELOV

5.1. Sestava vakuumskih izolacijskih panelov

Vakuumski izolacijski paneli so nehomogene izolacijske plošče. Sestavljeni so iz posebne folije, v katero je zrakotesno in vlagotesno zaprto toplotnoizolacijsko jedro. Iz jedra je skoraj v celoti izčrpan zrak.



Slika 6: Vakuumski izolacijski panel [20]

5.1.1. Jedro vakuumskih izolacijskih panelov

Material, uporabljen za jedro vakuumskih izolacijskih panelov, mora izpolnjevati naslednje zahteve [7, 20]:

- premer por v materialu mora biti zelo majhen, da se izognemo premikanju molekul zraka. Idealne velikosti por naj bi bile največ 10 nm, kar bi znižalo prevodnost na nič, tudi pri atmosferskih pogojih. V materialih z velikimi porami mora biti tlak zelo nizek, kar je zelo težko doseči;
- material mora imeti 100 % odprto celično strukturo, da je mogoče zrak kar se da hitro odstraniti iz materiala. Odprta celična struktura materiala olajša proizvodnjo in jo naredi ekonomsko bolj sprejemljivo;
- material mora biti sposoben prenesti spremembo tlaka 1 bara oziroma v ekvivalentu enakomerne obtežbe 10 t/m^2 , brez spremembe oblike ali porušitve panela. Paneli, ki se trenutno proizvajajo, imajo notranji tlak od 0,2 do 3 mbar;
- možnost radiacije mora biti znižana na najmanjšo možno mero z uporabo IR reflektorjev ali IR absorberjev. S tem se doseže nizke vrednosti prevajanja toplote skozi panel.

Poleg osnovnih zahtev je treba upoštevati še dodatne, manj pomembne zahteve [20]:

- odpornost na različne vplive med proizvodnjo, skladiščenjem in vgradnjo;
- enostavnost proizvodnje (temperiranje, splakovanje z nitrogenom, rezanje ...);
- nizke vrednosti toplogrednih plinov pri proizvodnji;

- majhna masa;
- negorljivost;
- majhen vpliv na okolje;
- nizka cena.

Najpogosteje uporabljeni materiali so na osnovi mikroporoznih praškastih struktur silike (SiO_2 ali amorfen pirogen silicijev oksid – kremen). Uporabljajo se tudi materiali iz mineralnih vlaken (steklena vlakna brez veziv) ali materiali na osnovi odprto-celičnih poliuretanskih pen (polistiren, poliuretan, poliamid). Najdaljše življenjske dobe panelov se dosegajo s siliko. Cena silike v primerjavi z ostalimi materiali je občutno višja. Toplotna prevodnost jedra iz silike je le $0,022 \text{ W/(m K)}$, medtem ko je toplotna prevodnost jeder iz steklenih vlaken brez veziv okoli $0,032 \text{ W/(m K)}$ [4, 13, 20].

Jedro je lahko odprte celične, praškaste ali vlaknaste strukture. Pomembno je, da na čim lažji način skoraj popolnoma izčrpamo zrak in ustvarimo pogoje blizu vakuuma, enemu milibaru (1 mbar ali 100 Pa) ali celo stotinki manj (torej samo 1 Pa). Jedro mora biti dovolj kompaktno, da prenese tako velike tlačne napetosti. Že sam zračni tlak, brez dodatne obremenitve panela, predstavlja tlak enega bara oz. 100 kPa. Material mora biti sposoben nositi velike obtežbe, brez porušitve [4, 13, 20].

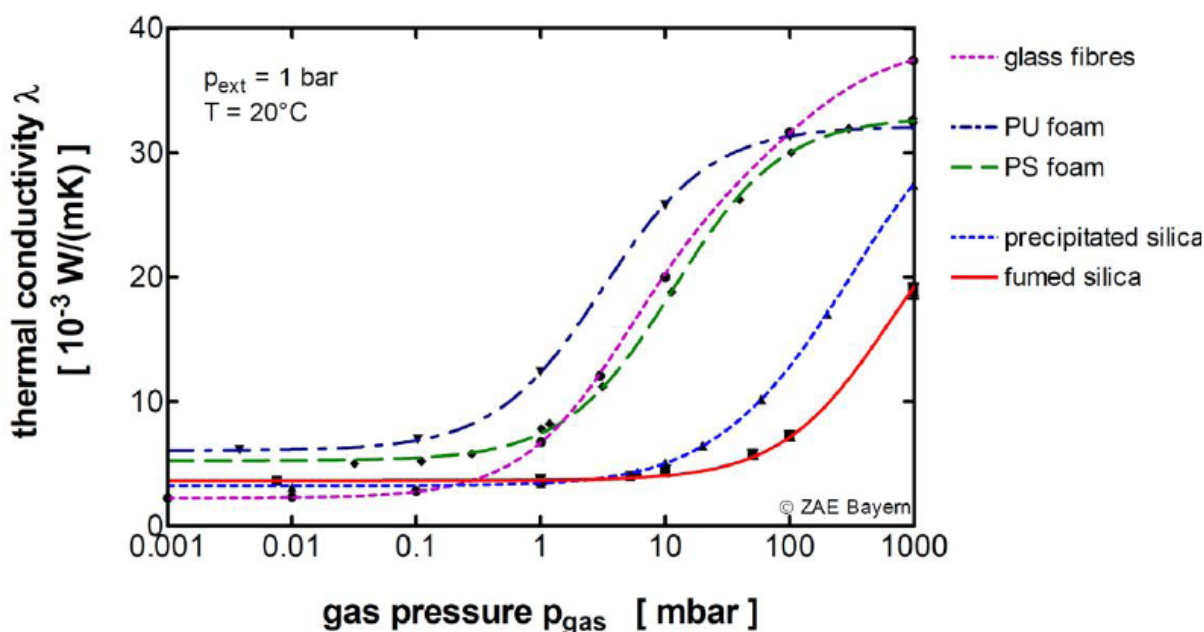


Slika 7: Praškasta silika, posneta s SEM (angl. Scanning Electron Microscope). Oblika delcev fumed silike je sferična, kar vodi do majhnih kontaktov in tako do majhne toplotne prevodnosti. Majhne stične točke se ohranijo tudi v obteženem stanju. [13]



Slika 8: Steklena vlakna, posneta s SEM (angl. Scanning Electron Microscope). Oblika steklenih vlaken je cilindrična, kar pomeni, da so kontakti manjši. Toplotna prevodnost med vlakni je majhna, tudi če so vlakna obtežena. [13]

Na Sliki 9 je razvidno razmerje med tlakom in toplotno prevodnostjo za različne materiale, ki se uporabljajo za jedro panela.

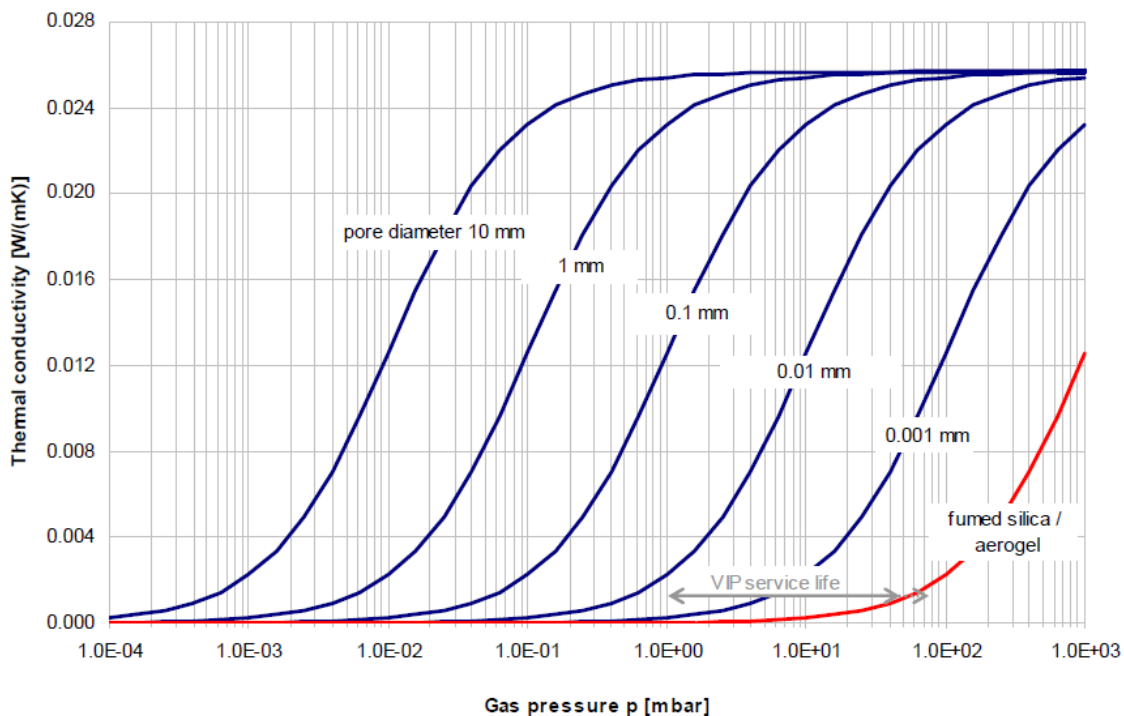


Slika 9: Toplotna prevodnost različnih materialov, ki se uporabljajo za jedro vakuumskih izolacijskih panelov [2]

Pri atmosferskem tlaku je najvišja toplotna prevodnost dosežena pri steklenih vlaknih, ki je porozni material z velikimi porami. Najnižja toplotna prevodnost se doseže s stekleno volno pri nizkem tlaku in znaša $0,002 \text{ W/(m K)}$. Polistiren, poliuretan in silika imajo manjše pore v primerjavi s stekleno volno, kar pomeni, da je prevajanje in prenos toplote skozi te materiale manjši. Toplotna prevodnost silike se do 100 mbar ne poveča bistveno, zato je njena uporaba primerna v kombinaciji z vakuumom. Nad 100 mbar se toplotna prevodnost poveča toliko, da uporaba ni več smiselna [1].

Silika ima pore v velikosti zračnih molekul pri normalni temperaturi in atmosferskem tlaku. Ko se tlak približuje vakuumu, se prevajanje toplote skozi pline s prevajanjem in konvekcijo še znižuje, prevajanje toplote skozi trdnine z radiacijo in prevajanjem pa se ne spreminja, dokler se temperatura in gostota materiala ne spremenita [1].

Na Sliki 10 je prikazana odvisnost toplotne prevodnosti od velikosti por v materialu, uporabljenem za jedro panela. Razvidno je, da so silika ali aerogeli zaradi majhnih por sposobni znižati prevodnost plinov tudi že pri atmosferskem tlaku. Toplotna prevodnost silike in aerogelov začne naraščati pri 50 do 100 mbar. Takrat pravimo, da se konča življenjska doba vakuumskih izolacijskih panelov [2].



Slika 10: Toplotna prevodnost jedra v odvisnosti od velikosti por materiala, uporabljenega za jedro panela [2]

5.1.2. Zaščitna ovojna folija

Najbolj kritična komponenta vakuumskega izolacijskega panela je ovoj, saj mora zagotavljati vakuum v celotnem času uporabe panela. Ovoj mora zadostiti primarnim zahtevam [20]:

- zagotavljati mora zrakotesnost za vse atmosferske pline in hkrati omogočiti totalno parno zaporo proti prehodu difuzijske vlage. Če je presežena kritična meja, pravimo, da je življenjska doba potekla;
- nizka toplotna prevodnost in majhna debelina ali produkt obeh zmanjšata efekt toplotnih mostov. Metalne folije imajo dobre tesnilne lastnosti, vendar veliko toplotno prevodnost, medtem ko imajo polimerne folije nizko toplotno prevodnost, vendar imajo slabo tesnost ovoja. Treba je najti pravo razmerje med obema lastnostma;

- možnost dobrega spoja ovoja z varjenjem ali lepljenjem. Ker je predvsem od spoja odvisna življenjska doba panelov, je treba spoju posvetiti veliko pozornosti. Aluminijastim folijam je dodana plast za lepljenje, ker se same ne morejo lepiti. Metalne folije se varijo. Polimerne folije se vroče lepijo. Procesi lepljenja morajo biti izvedeni v čistih okoljih, ker prah lahko zmanjša tesnost stikov.

Poleg primarnih zahtev so podane še druge zahteve, ki so prav tako pomembne [20]:

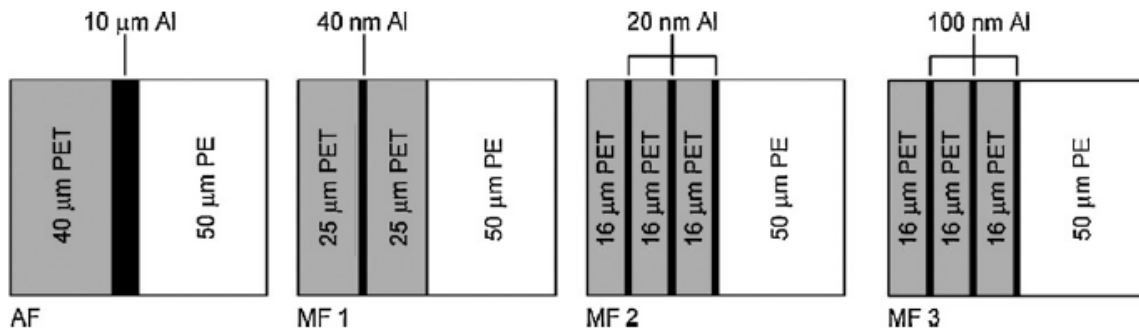
- enostavnost proizvodnje, oblikovanja, rezanja;
- nizka vrednost emisivnosti ovoja;
- visoka mehanična odpornost (odpornost na udarce, abrazivnost, nateg, UV radiacijo);
- negorljivost;
- majhen vpliv na okolje in zdravje;
- nizka cena in dostopnost na trgu;
- združljivost z različnimi materiali na stikih.

Zunanji ovoj panelov je eden izmed kritičnih elementov, ker je odgovoren za vzdrževanje vakuuma v panelu. Če zrak vstopi v jedro, se tlak poveča. Rezultat je povečana toplotna prevodnost jedra. Ko toplotna prevodnost naraste nad dovoljeno mejo, panel ni več uporaben, ker ne opravlja svoje funkcije [13].

Obstaja mnogo različnih materialov, ki se lahko uporabijo za ovoj. Lahko so enojni ali večslojni ovoji iz polimernih filmov ali trdnih metalnih ovojev [13]. Ovoj je sestavljen iz več slojev, ki pokrivajo ves element. Uporaba aluminijastih folij v teh večslojnih ovojih je najpogostejša zaradi nizke prepustnosti zraka in vlage. Toplotna prevodnost skozi ovoj je velika, še posebej skozi robove in vogale. Zato je pri načrtovanju vakuumskih izolacijskih materialov pomembno ne le zračna in vlažnostna tesnost, temveč tudi zmanjšanje toplotnih izgub na robovih [7]. Paneli z zaključnim ovajem, narejeni iz metalnih trakov, zvarjenih v en kos, so teoretično tesni. Težava je v izgubi toplote na zvarjenih delih in vedno zaradi robnega efekta. Najboljša rešitev je v velikih površinah panelov [13].

Ruben Beatens s sodelavci v [7] navaja, da so največkrat v uporabi ovoji vakuumskih izolacijskih materialov, sestavljeni iz več laminarnega ovoja v skupni debelini 100–200 μm . Trenutno se uporabljajo tri tipi ovojev [7]:

- tip a: kovinska folija z aluminijasto bariero, ki je zaščitena s PET folijo proti odpornosti na praske in sredinsko PE tesnim ovajem;
- tip b, c, d: kovinska folija iz treh slojev aluminijevih PET filmov in s sredinsko tesno PE plastjo;
- polimerni filmi z različnimi plastičnimi plastmi, zlepljenimi en na drugega. Prehod zraka in vlage je čez take plasti večji kot pa v kovinskih ovojih. Takšni ovoji so primerni le za uporabo pri panelih, kjer življenjska doba ni predolga.



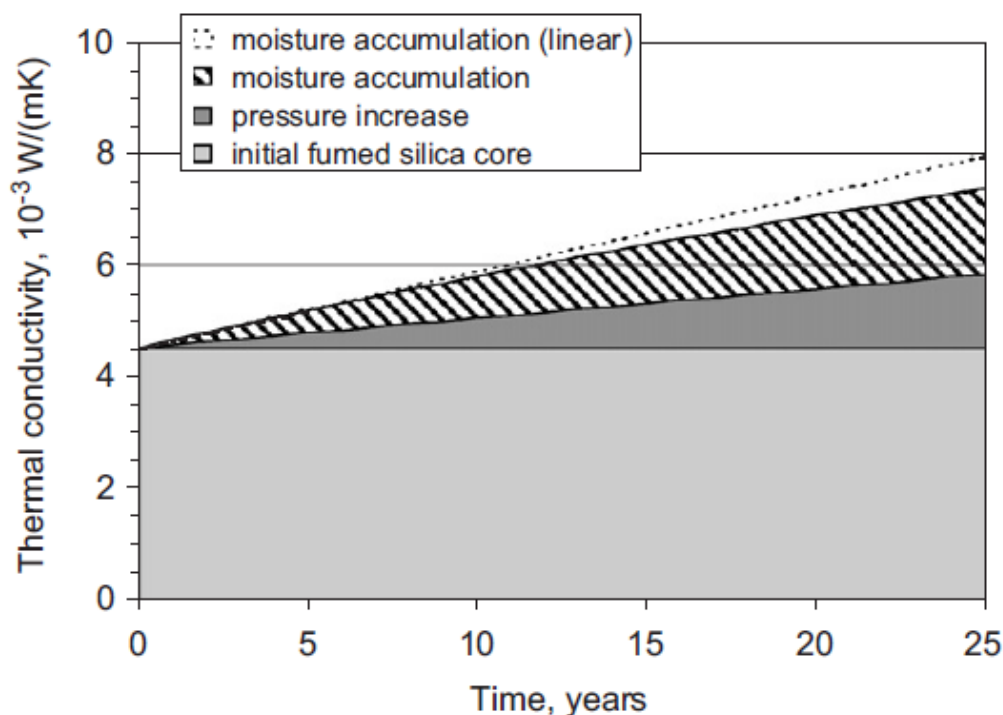
Slika 11: Primeri tipično uporabljenih materialov za ovojo VIP (AF – kovinski film, MF1 – enoslojni metaliziran film, MF2, MF3 – troslojni metaliziran film) [7]

Prepustnost [$\text{m}^2/(\text{s Pa})$] ovoja na zrak in vlago je eden od pomembnejših kriterijev za določitev življenjske dobe panelov. Prvo pravilo je, da tlak v panelih iz silike ne sme narasti nad 100 mbar po 30 do 50 letih. Prepustnost je odvisna od toplotnega koeficienta [$\text{m}^3/(\text{m}^3 \text{Pa}^{-1})$] in koeficienta difuzije zraka [m^2/s]. Prepustnost je definirana kot produkt toplotnega koeficienta in koeficienta difuzije zraka. Celotno prepustnost je mogoče izračunati s prepustnostjo posamezne plasti [7].

Dve glavni zahtevi za vzdrževanje nizke prepustnosti sta [7]:

- malo pomanjkljivosti v ovoju;
- sloj, ki se stika z vakuumsko plastjo, mora imeti nizko prepustnost.

Sliki 12 prikazuje toplotno prevodnost vakuumskega izolacijskega panela v odvisnosti od povečanja tlaka in vlažnosti. Nov vakuumski izolacijski panel ima toplotno prevodnost, merjeno v centru, približno $4,5 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$. Po 25 letih se bo povečala na $7,4 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$. Priporočena toplotna prevodnost panelov je $7\text{--}8 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$, v odvisnosti od vlažnosti v konstrukciji. Če se VIP preluknja, toplotna prevodnost naraste na $20 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$, kar je še vedno manj od toplotne prevodnosti mineralne volne ($40 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m K})$) [1,3].



Slika 12: Toplotna prevodnost v odvisnosti od povečanja tlaka in vlažnosti v vakuumskem izolacijskemu panelu v 25 letih [1, 3]

5.1.3. Adsorbenti plinov in vlage

Za doseganje predvidene življenjske dobe vakuumskih izolacijskih panelov je treba vzdrževati notranji vakuum. Za podaljšanje življenjske dobe se v jedro panela dodajajo absorbente za absorpcijo plinov in vlage že v fazi proizvodnje. Notranji tlak vodne pare in tlak plinov bosta ostala enaka kot pri proizvodnji, dokler se kapacitete absorberjev ne zapolnijo. S preprečitvijo povečanja notranjega tlaka vodne pare in zraka je preprečen dvig toplotne prevodnosti. Možno je absorbente integrirati v samo jedro panela, kar velja za jedra iz silike, ki je zaradi lastne higroskopičnosti odličen absorbent vlage. Uporaba absorbentov je posebej priporočljiva v primerih daljših pričakovanih življenjskih dob [4, 7].

5.1.4. Vakuum

Vakuum lahko uporabimo za zmanjšanje toplotne prevodnosti v skoraj vseh tradicionalnih izolacijskih materialih. Toplotna prevodnost v vakuumu ne bo odvisna le od tlaka, temveč tudi od lastnosti materiala.

Vakuum je primeren za izboljšanje toplotnih lastnosti skoraj vseh odprto celičnih materialov. Za različne materiale so potrebne različne stopnje vakuumu za doseganje nizke stopnje prestopa toplote. Material mora imeti majhne delce in take strukture, da ustvarijo strukturo, kjer so dotiki med delci majhni [13].

Vakuum jedra v panelih je med 0,01 in 1 mbar. Vakuum je odvisen od materiala jedra in želene toplotne upornosti panela. Sušilci, dodani jedru, absorbirajo preostale pline in s tem vzdržujejo raven tlaka v panelu [6].

Yang s sodelavci v [6] navaja, da je toplotna izolativnost panelov v veliki meri odvisna od nivoja vakuuma. Ko nivo tlaka naraste nad 1 mbar, toplotna prevodnost strmo naraste pri jedrih iz steklenih vlaken in poliuretanskih pen, medtem ko toplotna prevodnost v jedrih iz prahu silike začne naraščati pri 100 mbar. Za znižanje prevodnosti plina v izolacijah, kot je mineralna volna, mora biti tlak v rangu 0,1 mbar ali nižje.

5.2. Življenjska doba vakuumskih izolacijskih panelov

Življenjska doba vakuumskih izolacijskih panelov je odvisna od dveh faktorjev:

- staranja in
- vzdržljivosti.

Napoved življenjske dobe ni mišljena kot čas opredelitve porušitve panelov. Življenjska doba je doba med proizvodnjo in porušitvijo panelov [9].

5.2.1. Staranje vakuumskih izolacijskih panelov

Staranje panelov je kontinuiran proces degradacije s počasnim vdiranjem plinov in vlage skozi nepravilnosti v ovoju. Rezultat se pokaže kot ireverzibilni pojav zaradi akumulacije vlage v higroskopnem jedru panelov. Povišana temperatura in vlaga posamično ali hkratio povzročata in ob višji intenzivnosti povečujeta prehod plinov in vlage v sam panel. Ob tem procesu se povečuje toplotna prevodnost, ki limitira k vrednosti, ki jo ima samo jedro. Proces se začne zaradi nizkega tlaka v panelu, ki je nižji od tlaka v okolici, kar povzroči razliko gradientov med tlakoma, ki povzročajo sile za vdor zraka. Zaradi navedenega procesa se pojavita povečan notranji tlak plinov in povečana notranja vsebnost vode [9].

Najpomembneje je preprečiti mehanske poškodbe ali slabe spoje, da se onemogoči vstop plinov in vlage iz zunanosti [18].

Mnogo raziskav staranja zaradi temperature in vlage je bilo narejenih za različne produkte v različnih pogojih. Ugotovljeno je bilo, da je hitrost staranja odvisna od mnogih parametrov: lastnosti materiala za ovoj, od dimenzij panelov, temperature, vlažnosti in pH pogojev [9].

5.2.2. Vzdržljivost vakuumskih izolacijskih panelov

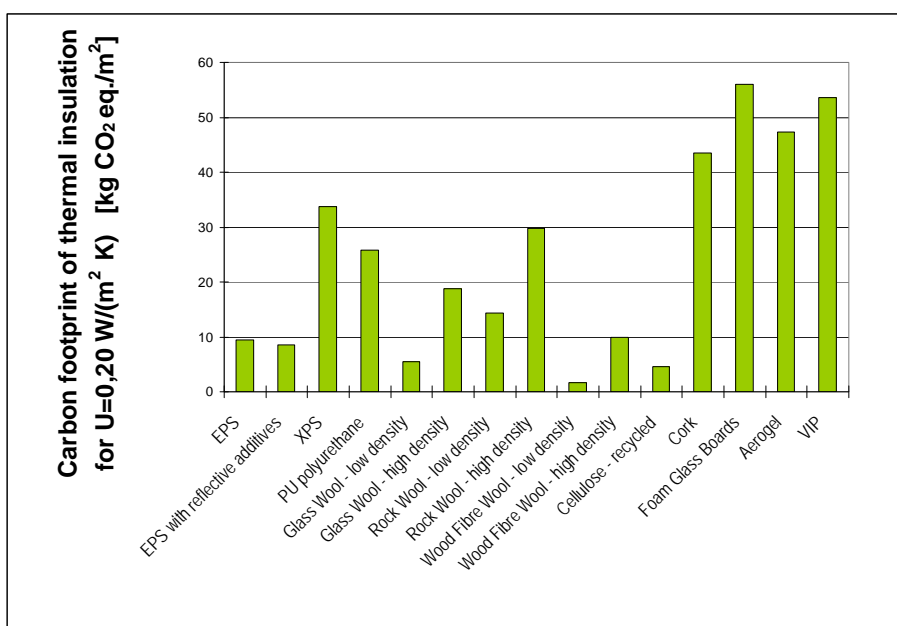
Vzdržljivost panelov je sposobnost, da vzdržijo kemične ali mehanske vplive, ki bi lahko povzročili porušitev ovoja, kar bi vplivalo na notranji tlak. Nekaj odpada panelov se zgodi pri proizvodnji le-teh

zaradi nepravilnosti v materialu ali pri proizvodnji. Največ porušitev se zgodi med samo vgradnjo panelov, ker so paneli zelo občutljivi na mehanične vplive, še posebno na točkovne obremenitve [9].

5.3. Vpliv vakuumske toplotne izolacije na okolje

Vpliv materialov na okolje opišemo z ogljičnim odtisom, ki v splošnem predstavlja ogljični odtis oziroma človekov vtis ali sled na okolje. Ogljični odtis predstavlja celotno količino toplogrednih plinov, ki jih direktno ali indirektno proizvedemo s človeško aktivnostjo in ga izražamo v tonah ogljika ali ogljikovega dioksida. Vpliv na okolje toplotno izolacijskih materialov je opisan z GWP (Global Warming Potencial). GWP je merjen relativno, glede na to, koliko toplogrednih plinov je bilo izpuščenih v atmosfero [18].

Na Sliki 13 je prikazan ogljični odtis za različne toplotnoizolacijske materiale pri enaki toplotni prehodnosti ovoja stavbe $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ glede na površino ovoja stavbe (m^2). Razvidno je, da imajo izolacije na podlagi lesa in celuloze najmanjši vpliv na okolje. Mineralna, steklena in kamena volna imajo majhen vpliv na okolje [18].



Slika 13: Ogljični odtis različnih izolacijskih materialov za toplotno prehodnost ovoja stavbe $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, izražen na površino ovoja stavbe (m^2) [18]

Primerjava toplotnoizolacijskih materialov z ostalimi gradbenimi materiali (beton, omet, glinena opeka, steklo, PVC izdelki, konstrukcijsko jeklo) je pokazala, da imajo prvi relativno majhen ogljični odtis v primerjavi s prihranki energije, ki jih prihranimo, če so stavbe dobro toplotno zaščitene [18].

5.4. Požarna odpornost

Požarna odpornost panelov je odvisna od tipa materiala, uporabljenega za jedro panela. Material, ki je brez prisotnosti organskih snovi, je po kalorični vrednosti okoli 206 kJ/kg. Organski materiali dajejo kalorično vrednost okoli 1200 kJ/kg (kamena volna 1000 kJ/kg, steklena volna 1500 kJ/kg) [9].

Silika je razvrščena v razred A1 po DIN ISO EN 13501-1, kar pomeni, da je negorljiva. Prav tako so v tak razred razvrščeni aerogeli, steklene volne. Polimerne pene so razvrščene v razred B3. Obnašanje panelov med požarom je kljub negorljivemu jedru določeno z ovojem panelov. Ovoj je veliko bolj kritičen element panela v smislu požarne odpornosti. Na splošno se polimerni ovoji talijo mnogo prej pod maksimalno temperaturo, doseženo v požaru [20].

Pomembno se je zavedati, da je treba določiti požarno odpornost za celotne panele. Za vakuumske izolacijske panele je bilo narejenih zelo malo testov, le-ti pa so pokazali, da niso razvrščeni bolje kot v razred B2 (normalno vnetljivi) [20].

5.5. Toplotni mostovi vakuumskih izolacijskih panelov

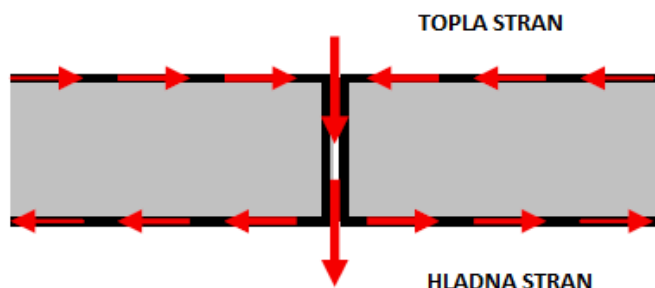
Toplotni most je pomemben tudi pri povečevanju in vzdrževanju življenjske dobe vakuumskih izolacijskih panelov. Boljši kot je izolacijski sistem, bolj pomembna je količina toplotnega toka skozi toplotni most [7].

Toplotni most pri uporabi vakuumskih izolacijskih panelov razdelimo na tri nivoje [7]:

- toplotni most, ki nastane zaradi ovoja vakuumskih izolacijskih panelov;
- toplotni most prefabriciranih elementov z vakuumskimi izolacijskimi paneli;
- toplotni most, ki nastane zaradi konstrukcijskih napak pri uporabi vakuumskih izolacijskih panelov.

5.5.1. Toplotni most, ki nastane zaradi ovoja vakuumskih izolacijskih panelov

Ovoj panela je visoko prevoden, zato tvori toplotni most na robu panela od tople proti hladni strani. Toplotni most se tvori tudi zaradi majhnih zračnih plasti na stiku dveh panelov [7, 12].



Slika 14: Shema toplotnega mostu med dvema paneloma [12]

Toplotni most vpliva na celotno toplotno prevodnost panela, ki je višja od toplotne prevodnosti na sredini panela. Na toplotni most vplivajo tudi lastnosti materialov neposredno v okolici toplotnega

mostu. V efektivni toplotni prevodnosti so upoštevani vsi nehomogeni materiali in doprinos stika med paneli.

Toplotna prehodnost je odvisna od debeline panela, od toplotne prevodnosti na sredini panela, od debeline ovoja, toplotne prevodnosti folije. Izmerjene toplotne prehodnosti za panel velikosti 1 x 0,50 x 0,02 m in toplotno prevodnost 0,004 W/(m K) so pokazale, da se vrednosti gibljejo od 0,001 do 0,400 W/(m K) in celotno toplotno prevodnost od 0,0051 do 0,0086 W/(m K). Velik razpon rezultatov je pokazal pomembnost upoštevanja vpliva robov panelov v izračunu celotne toplotne prevodnosti [12].

V članku [7] so opisane ugotovitve, da rezultati numeričnih in analitičnih modelov kažejo, da imajo aluminijaste lamilirane folije velik vpliv na celotno prevodnost panelov. Vrednosti so bile do 50-krat večje v primerjavi z aluminijastimi večkrat lamiliranimi folijami. Zračni rokavi niso bili upoštevani. Z numeričnimi modeli so dokazali, da paneli, zaobjeti v drug izolacijski material, bistveno zmanjšajo toplotno prevodnost [7].

Zaradi nepravilnosti robu vakuumskega izolacijskega panela se lahko pojavijo zračni žepi na stiku panelov. Predvideno je, da plin ne more prehajati iz zračnih žepov. Zračni žep z lamilirano aluminijasto folijo ima zelo majhen vpliv na toplotno prehodnost. Za zračne žepe v velikosti do 5 mm je povečanje toplotne prehodnosti od 7 do 15 %. Povprečna vrednost toplotne prehodnosti je med 0,320 in 0,170 W/(m K) za debelino panela med 10 in 20 mm. Iz tega lahko sklepamo, da zaradi pomembnosti vpliva toplotne prehodnosti roba ni primerno uporabljati panelov, manjših od 1 m² [12].

V primerjavi z lamilirano aluminijasto folijo je pri aluminijasti, večkrat lamiliranimi foliji, zračni žep bolj pomemben. Povečanje je od 600 do 900 % pri debelini zračnega žepa 5 mm v primerjavi z 0 mm zračnega žepa. Pri uporabi aluminijaste, večkrat lamilirane folije, je treba biti še posebej pozoren, ker morajo biti zračni žepi čim manjši [12].

5.5.2. Toplotni most prefabriciranih elementov z vakuumskimi izolacijskimi paneli

Vakuumski izolacijski paneli se uporabljajo tudi v obliki, ko so zaščiteni z zaščitnimi plastmi in se stikajo z distančnikom. Distančniki predstavljajo toplotni most. Numerični rezultati več avtorjev, zbranih v članku [7], kažejo, da imajo najnižjo toplotno prevodnost paneli z najnižjimi vrednostmi toplotne prevodnosti. Najboljše rezultate so dobili z distančnikom, ki ga predstavlja plastični lepilni trak. Lepilni trak nima funkcije za prevzem obtežb, ker se panele prilepi na podlago.

5.5.3. Toplotni most, ki se pojavi zaradi konstrukcijskih napak pri uporabi vakuumskih izolacijskih panelov

Pomembnost toplotnega mostu se povečuje s kvaliteto izolacijskega materiala. Pred samo izvedbo je treba natančno načrtovati uporabo vakuumskih izolacijskih materialov. Vse stike je treba predhodno

razrešiti in jih tudi simulirati za konkretne podatke. Nevarnost kondenzacije je toliko večja zaradi nizke temperature površine in puščanja zraka.

5.6. Izdelava in montaža vakuumskih izolacijskih panelov

Vakuumski izolacijski paneli se izdelujejo v standardnih velikostih. Po končani proizvodnji se ne smejo rezati ali krojiti, zato je potrebno natančno načrtovanje velikosti panelov in jih je treba predhodno naročiti, da se izdelajo na točno določene mere. Panelov ni dovoljeno prebadati ali mehansko pritrdjevati, saj bi se s tem poškodovalo ali predrlo zaščitno folijo [4].

Na Sliki 15 sta prikazani dve različni vrsti zapiranja panelov. Panel se zapira s štirimi šivi po obodu ali z enim šivom, ki zapira vrečko, in preostalima dvema, ki zapirata dva prosta roba [2].



Slika 15: Dve vrsti zapiranja panelov. Zgornji sliki: zapiranje s štirimi šivi po obodu. Spodnji sliki: zapiranje s tremi šivi. [2]

Panele smemo polagati le na podlage, ki ne vsebujejo ostrih delcev. Ostrih delcev ne smejo vsebovati niti sloji, ki sledijo panelom. Večji kot bodo paneli, boljša bo začetna toplotna izolativnost in boljša bo odpornost na staranje – torej z drugimi besedami: pri dimenzijsko večjih panelih je delež robov in zvarov folije relativno manjši v primerjavi s površino panela, zaradi česar je tudi ohranjanje vakuuma in s tem tudi toplotno izolacijskih lastnosti veliko boljše. Pazljivi moramo biti pri transportu, skladiščenju in manipulaciji s paneli. Prav tako moramo v času montaže in same uporabe na vsak način preprečiti mehanske poškodbe. Praksa kaže, da se poškodbe pojavljajo večinoma pred in med samo vgradnjo panelov [9].



Slika 16: Opozorilo pri montaži in uporabi vakuumskih izolacijskih materialov [9]

Ob poškodbi panela, vgrajenega v konstrukcijo, pride do povečanega toplotnega toka, zato je treba že v sami fazi načrtovanja predvideti možnosti zamenjave poškodovanih panelov. V ta namen je treba predvideti, da se konstrukcije lahko pregleda s kamero za termografijo. To pomeni, da vakuumski izolacijski paneli ne smejo biti z obeh strani konstrukcije pokriti z visoko izolativnimi materiali ali za prezračevalnim kanalom [1].

Najlažje se poškodbam panelov izognemo tako, da se vakuumske izolacijske panele vgradi v prefabricirane elemente, ki se izdelajo v kontroliranih okoljih in z usposobljenim osebjem [1].

5.7. Možne izvedbe z vakuumskimi izolacijskimi paneli in prefabriciranimi vakuumskimi izolacijskimi paneli

Splošna priporočila za upravljanje in montažo vakuumskih izolacijskih panelov na gradbišču [9]:

- panelov ni mogoče rezati na posamezne dele, dimenzije je treba predvideti že vnaprej in jih predhodno naročiti;
- minimalne dimenzije panelov so 0,5 x 0,5 m zaradi zmanjšanja efekta prevelike dolžine robov;
- površina namestitve panelov mora biti očiščena, odstranjeni morajo biti vsi ostri robovi;
- med samo vgradnjo je treba na panele, po katerih se hodi, položiti zaščitne plasti. Inštalaterjem je treba zagotoviti primerne čevlje brez robov, ki bi lahko poškodovali panele;
- priporočljivo je, da se vgradnja panelov izvaja na suho konstrukcijo;
- pomembno je, da je omogočena hitra zamenjava poškodovanih panelov.

Splošna priporočila za uporabo prefabriciranih vakuumskih izolacijskih panelov:

- življenjska doba panelov je krajša od večine prefabriciranih elementov, kar je treba upoštevati pri načrtovanju;
- pri načrtovanju je treba upoštevati, da lahko v panelu pride do površinske kondenzacije in toplotnih izgub;
- pri izdelavi sendvič panelov je treba upoštevati možnost poškodb pri uporabi, zato jih je treba ustrezno zaščititi;

- pri načrtovanju je treba upoštevati zahteve za požarno zaščito, akustične zahteve, higienske zahteve in okoljske zahteve.

Montaža panelov na notranji strani sten je zaradi majhne porabe prostora še posebej zanimiva. Pri tem je pomembno zaščititi panele z notranje strani prostora, zaradi poškodb, ki se lahko zgodijo zaradi uporabe prostorov. Pomembno je upoštevati možnost nastanka vlage še posebej zaradi kondenzacije na stikih panelov in konstrukcije, kondenzacije zaradi difuzije vodne vlage, kondenzacije zaradi vlažnega zraka [9].

Montaža panelov na terasah je še posebej zanimiva zaradi majhne višine toplotne izolacije v primerjavi s konvencionalnimi izolacijami. Zelo pomembno je zagotoviti tesnost terase, ker vlažnost znižuje življenjsko dobo panelov. Še posebej so nevarne alkalne spojine iz betona [9].

6. ANALIZA OBRAVNAVANE STAVBE UNIVERZE V LJUBLJANI, FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

6.1. Predstavitev obravnavane stavbe

Stavba Univerze v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, je locirana na Jamovi ulici 2 v Ljubljani. Koordinate stavbe so GKX 100297, GKY 461301.



Slika 17: Orientacija stavbe

Podatke o stavbi smo pridobili iz projektno-tehnične dokumentacije stavbe [10,11].

Stavba Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani je bila zgrajena leta 1969 po načrtih arhitekta Edvarda Ravnikarja. Stavba je skladno z Uredbo o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena [40] po namembnosti razvrščena med nestanovanjske stavbe, stavbe za izobraževanje in znanstvenoraziskovalno delo. Tlorisni gabarit stavbe je $25,4 \text{ m} \times 67,7 \text{ m}$. Višina najvišjega dela stavbe je 28,88 m. Stavba je zasnovana kot preprost podolgovat blok, ki ga nad pritličjem z zunanjih strani podpirajo trikotni kapiteli. Stavba ima nevkopano klet, pritličje, nato pa je etažnost stavbe različna za severni in južni del. Na severni strani stavbe so štiri nadstropja s predavalnicami, na južni je šest nadstropij s kabineti. Vmesni del je komunikacijsko jedro s stopniščem, hodnikom in pomožnimi prostori. Svetla višina tipične etaže severne strani je 3,95 m, svetla višina tipične etaže južne strani je 2,77 m. Do visokega pritličja fakultete z južne in severne strani vodita z betonskima ploščama prekrite stopnišči. V sklopu fakultete so zgrajeni spremljajoči objekti in zunanja ureditev z urejenimi pripadajočimi funkcionalnimi in manipulativnimi površinami ter komunalna, energetska in prometna infrastruktura.



Slika 18: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, južna stran



Slika 19: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, severna stran

Na Sliki 20 je prikazana shema tipične etaže stavbe, ki se v manjših razlikah pojavi v vseh štirih nadstropjih predavalnic, del s kabineti se ponovi v vmesnih nadstropjih skupno šestkrat.



Slika 20: Shema tipične etaže

6.2. Zasnova stavbe

Nosilna konstrukcija stavbe je skeletna, izvedena iz armiranobetonskih okvirov. Nosilna konstrukcija medetažnih konstrukcij in strehe je iz elementov »strop SUPER 40«. Streha je ravna. Jaški dvigal in stopnišča so armiranobetonske konstrukcije. Predelne stene so izvedene v več različicah: zidane iz plinobetona, steklene, montažne lesene stene.

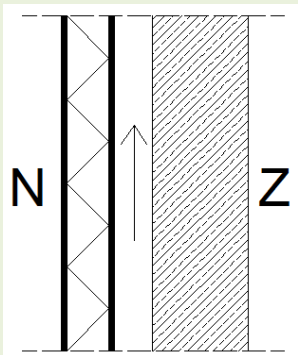
6.2.1. Konstruktivski sklopi stavbe

V Preglednicah od 1 do 8 so prikazani konstruktivski sklopi stavbe ter izračunana toplotna prehodnost sklopov (v nadaljevanju U [$W/(m^2 K)$]).

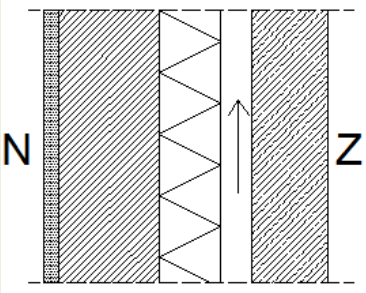
6.2.1.1. Vertikalni konstruktivski sklopi

Vertikalni konstruktivski sklopi imajo nosilno in zaščitno funkcijo [33]. Na stavbi nosilno funkcijo opravljajo sklopi, zaščitno pa okna in fasadna obloga. Obravnavali smo štiri različne orientacije stavbe, ki imajo med seboj različen stavbni ovoj. Medetažna konstrukcija nad pritličjem je konzolno podaljšana navzven in se zaključi z armiranobetonskim vencem v višini 1,00 m. Ta armiranobetonski venec poteka po celotni dolžini stavbe na severni in južni strani in predstavlja parapet v prvem nadstropju. V Preglednicah 1 do 3 so prikazani konstruktivski sklopi stavbe ter izračunana toplotna prehodnost sklopa. Pri izračunu je upoštevan notranji prestopni koeficient zračne plasti $8 W/(m^2 K)$ in zunanji prestopni koeficient $25 W/(m^2 K)$.

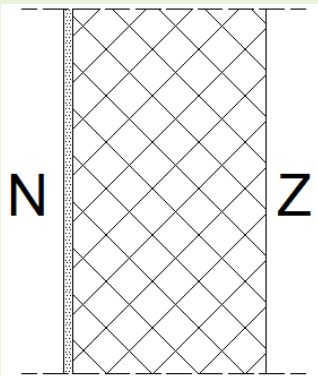
Preglednica 1: Sestava konstruktivskega sklopa parapeta na severni in južni strani stavbe KSV-1.

 <p>Slika 21: Sestava parapeta na severni strani stavbe KSV-1</p>	Med medetažno konstrukcijo in stebri so vstavljena okna s parapetnim delom, ki ima za polnilo 2 cm mineralne volne. Parapet oken je z zunanje strani obložen s prefabriciranimi betonskimi elementi. Fasada je v delu parapeta prezračevana. Medetažna konstrukcija in stebri niso toplotno izolirani. Toplotna prehodnost konstruktivskega sklopa je izračunana na sredini parapeta.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [$W/(m K)$]
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Mineralna volna	0,02	0,040
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Zračna plast	0,02	/
	Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
	U [$W/m^2 K$]	1,39	

Preglednica 2: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2.

 <p>Slika 22: Sestava zunanje stene vzhodne in zahodne strani stavbe KSV-2</p>	Zahodna in vzhodna fasada je med armiranobetonskimi okvirji zapolnjena z opeko NF, žlindrino volno, zračno plastjo in prefabriciranimi betonskimi elementi.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [W/(m K)]
	Omet	0,01	0,93
	Opeka NF	0,065	0,47
	Žlindrina volna	0,04	0,04
	Zračna plast	0,02	/
	Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
	U [W/m ² K]	0,78	

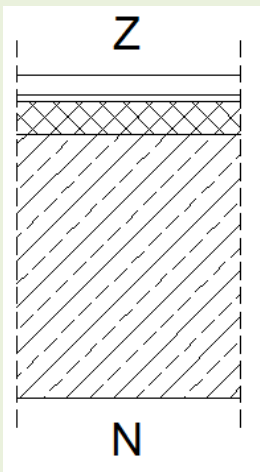
Preglednica 3: Sestava fasade v prvem nadstropju KSV-3

 <p>Slika 23: Sestava parapeta južna stran stavbe KSV-3</p>	Armiranobetonski venec poteka po celotni dolžini južne in severne strani stavbe v prvem nadstropju v višini 1,0 m. Venec predstavlja parapet prvega nadstropja.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [W/(m K)]
	Omet	0,01	0,93
	Armiranobetonska stena višine 1,00 m	0,30	1,16
	U [W/m ² K]	2,30	

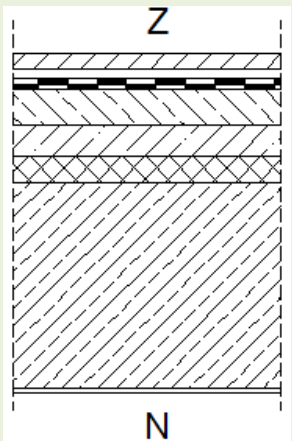
6.2.1.2. Horizontalni konstrukcijski sklopi

Horizontalni konstrukcijski sklopi imajo nosilno in zaščitno funkcijo [35]. Obe funkciji opravljajo medetažne konstrukcije, streha in temeljna tla. Obravnavali smo medetažno konstrukcijo, streho in tla na terenu.

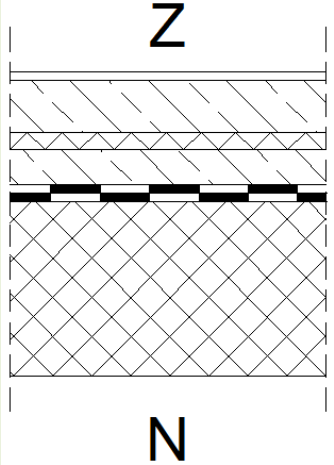
Preglednica 4: Sestava konstrukcijskega sklopa medetažne konstrukcije KSH-1.

 <p>Slika 24: Sestava medetažne konstrukcije H-1</p>	Medetažne konstrukcije so izvedene kot »super strop 40«. Strop je debeline 45 cm, s polnilom iz opeke, debeline 40 cm in tlačno ploščo 5 cm.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [W/(m K)]
	Linolej	0,003	0,17
	Cementni estrih	0,05	1,40
	Žlindrina volna	0,01	0,041
	Tlačna AB plošča	0,05	2,040
	Opeka	0,40	0,52
	Omet	0,01	0,93
	U [W/m ² K]	0,78	

Preglednica 5: Sestava konstrukcijskega sklopa strešne konstrukcije KSH-2.

 <p>Slika 25: Sestava strešne konstrukcije H-2</p>	Streha je ravna in izvedena kot »super strop 40« s polnilom iz opeke. Streha prevzame več funkcij, nosilna konstrukcija, hidroizolacija, toplotna izolacija.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [W/(m K)]
	Omet	0,01	0,93
	Opeka	0,40	0,52
	Tlačna plošča	0,05	2,040
	Lahka opeka	0,05	0,20
	Izravnalni beton	0,40	1,40
	Žlindrina volna	0,01	0,041
	Betonski estrih	0,03	1,40
	Bitumenski trak	0,01	0,19
	Prod	0,03	1,50
	Betonske plošče iz pranega proda	0,03	1,51
	U [W/m ² K]	0,54	

Preglednica 6: Sestava tlakov tla proti terenu, KSH-3

	Konstrukcijski sklop tla proti terenu leži na gramoznem nasutju.		
	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Prevodnost [W/(m K)]
Guma	0,004	0,16	
Betonski estrih	0,03	1,40	
Stisnjena žilindrina volna	0,01	0,04	
Betonski estrih	0,02	1,40	
Bitumenski trak	0,01	0,19	
Betonska plošča	0,10	1,51	
U [W/m ² K]	1,88		

Slika 26: Sestava tlakov tla proti terenu H-3

6.2.1.3. Transparentni konstrukcijski sklopi

Transparentni del zunanjega ovoja stavbe predstavlja stavbno pohištvo. Po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] je lahko toplotna prehodnost oken (steklo in okvir) največ 1,3 W/(m² K) za PVC in 1,6 W/(m² K). Faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla in senčila mora biti manjši od 0,5. Koefficient senčila je odvisen od učinkovitosti senčila: če je okno brez senčila, je vrednost koeficienta enaka 1, zelo učinkovita senčila pa imajo vrednost 0,1. Za senčila na južni strani vzamemo srednjo vrednost 0,5.

V stavbi so vgrajeni trije različni tipi oken.

Okna na severni strani stavbe in okna v pritličju in kleti so sestavljena iz transparentnega zgornjega dela in netransparentnega parapetnega dela. Material je aluminij, dvojna zasteklitev, eno float steklo in eno z nizko emisijskim premazom. $U_w = 1,6$ W/(m² K), faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla $g_{gl,w} = 0,58$, izračunan faktor okvirja $F_{F,w} = 0,65$. Okna na severni strani fasade nimajo senčil, medtem ko imajo okna v kleti in pritličju vzhodne, južne in zahodne strani zunanja senčila, za katera točnih podatkov nismo dobili in smo predpostavili najmanj ugoden rezultat, faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla in senčila $g = 0,50$.

Okna v kabinetih na južni strani stavbe in okna na malih hodnikih vzhodne in zahodne strani stavbe so PVC z dvojno zasteklitvijo in nizko emisijskim premazom. $U_w = 1,3$ W/(m² K), faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla in senčila $g_{gl,w} = 0,58$, faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla in senčila $g = 0,29$, faktor okvirja $F_{F,w} = 0,7$.

Na vzhodni in zahodni fasadi so starejša aluminijasta okna. Podatki za aluminijasta okna: $U_w = 3,6$ W/(m² K), faktor prepustnosti celotnega sončnega obsevanja stekla $g_{gl,w} = 0,76$, faktor prepustnosti

celotnega sončnega obsevanja stekla in senčila $g = 0,38$, faktor okvirja $F_{F,w} = 0,70$. Če faktor okvirja ni natančno poznan, se po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] privzame vrednost 0,7.

6.2.2. Toplotni mostovi

V projektni dokumentaciji in z ogledom stavbe smo ugotovili, da se na križanjih konstrukcijskih sklopov pojavljajo linijski in točkovni toplotni mostovi. Ugotovili smo, da so na stavbi pretežno linijski toplotni mostovi.



Slika 27: Horizontalni linijski toplotni most nad pritličjem in vertikalni linijski toplotni most med okni in stebri



Slika 28: Horizontalni linijski toplotni most medetažne konstrukcije in vertikalni linijski toplotni mostovi med stebri in okni

Toplotne mostove stavbe smo razdelili na horizontalne in vertikalne.

Horizontalni:

- križanje temelja in zunanje stene,
- križanje medetažne konstrukcije in zunanje stene,
- križanje medetažne konstrukcije in stebrov,
- križanje zunanje stene in strešne konstrukcije.

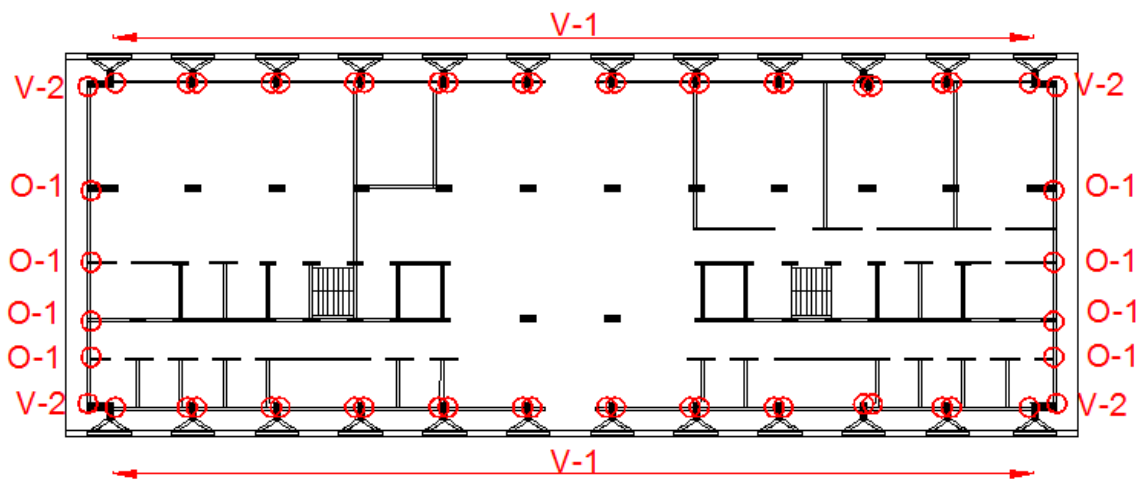
Vertikalni:

- križanje oken in stebrov,
- križanje stebrov in zunanjih sten.

V nadaljevanju so na tlorisih in prerezhih prikazani vsi toplotni mostovi na zunanjem ovoju stavbe.

Toplotni mostovi v pritličju so evidentirani:

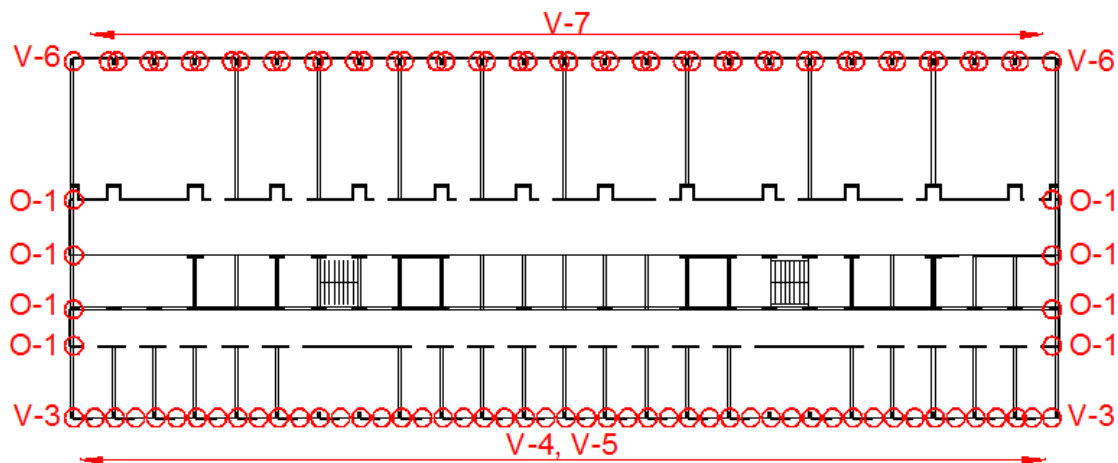
- na stiku armiranobetonskega stebra in okna (V-1),
- na stiku armiranobetonskega stebra in zunanje stene (V-2),
- na stiku zunanje stene in okna na vzhodni in zahodni strani stavbe (O-1).



Slika 29: Tloris pritličja z označenimi toplotnimi mostovi

Toplotni mostovi v tipičnih etažah so evidentirani:

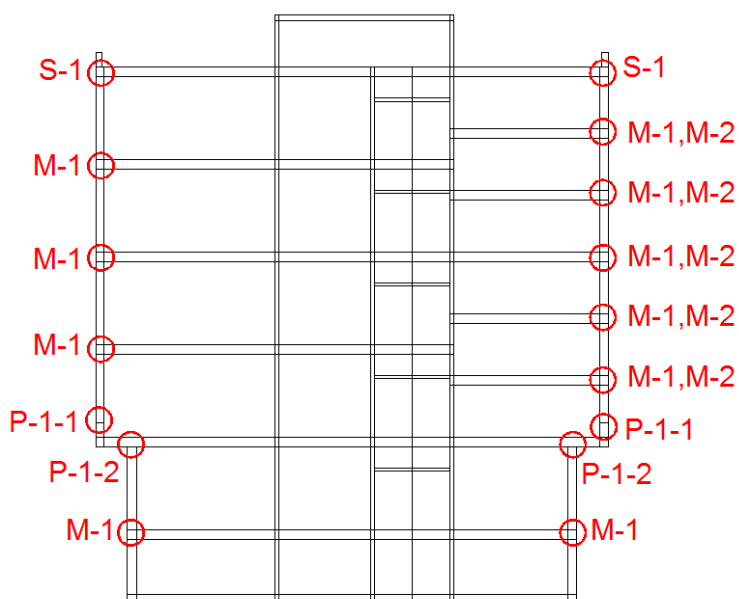
- v vogalih stavbe, na stiku stebra in zunanje stene (V-3),
- v vogalih stavbe, na stiku stebra in zunanje stene (V-6),
- na stiku armiranobetonskega stebra in okna na severni strani stavbe (V-7),
- na stiku armiranobetonskega stebra in okna na južni strani stavbe (V-5),
- na stiku armiranobetonskega stebra in zunanje stene na južni strani stavbe (V-5),
- na stiku zunanje stene in okna na vzhodni in zahodni strani stavbe (O-1).



Slika 30: Tloris tipične etaže z označenimi toplotnimi mostovi

Toplotni mostovi v prečnem prerezu stavbe so evidentirani:

- na stiku medetažne konstrukcije in zunanje stene (M-2, M-1, P-1, P-2),
- na stiku strehe in zunanje stene (S-1).



Slika 31: Prečni prerez z označenimi toplotnimi mostovi

Poenostavitve smo naredili pri različnih tipih oken na vzhodni in zahodni fasadi in jih označili z entno oznako (O-1).

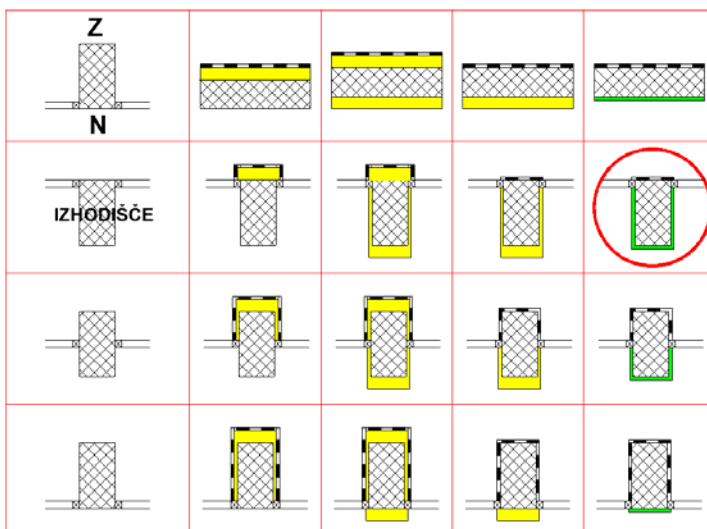
6.3. Izhodišča analize

Pri obravnavi konstrukcijskih sklopov smo ugotovili, da so toplotne prehodnosti vseh sklopov višje od dovoljenih po Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah [22]. Pri pregledu križanj smo ugotovili, da obstajajo toplotni mostovi.

Rešitve za izboljšanje toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov in toplotne prehodnosti toplotnih mostov bomo poiskali s pomočjo matrik križanj. Križanja smo razdelili na vertikalna in horizontalna. Realne sestave konstrukcijskih sklopov smo reducirali na osnovne funkcijske plasti: nosilna konstrukcija, toplotna, hidro, zvočna izolacija. Na osnovni ravni smo preverili vse možne opcije poteka funkcionalnih plasti v območju križanja in nato smo izbrali najboljše variante.

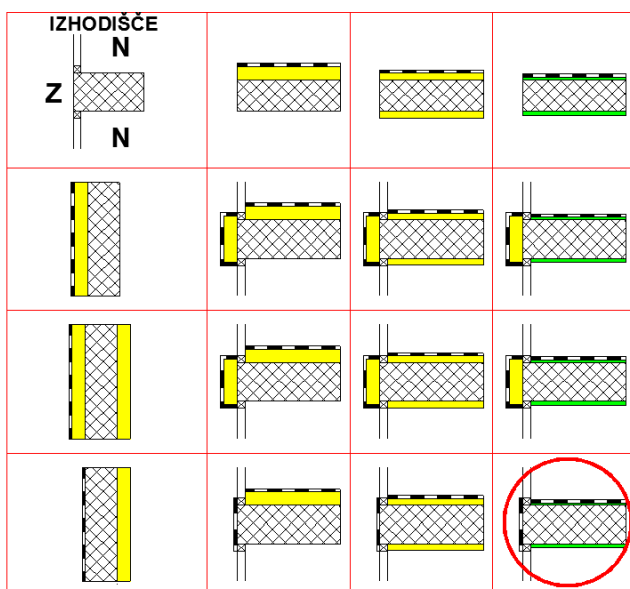
Osnova matrike je prvi stolpec in prva vrstica, ki predstavljata različne postavitve osnovnih funkcij. V ostalih poljih so prikazana križanja med osnovnimi funkcijami. Oznaka »IZHODIŠČE« v matriki pomeni dejansko stanje križanja na stavbi. Oznaka »Z« pomeni zunaj, »N« notri. Rumena barva pomeni klasični toplotnoizolacijski materiali, zelena barva vakuumski izolacijski paneli.

Na Sliki 32 je prikazana matrika križanj stebra in zunanje stene v tlorisu V-7. Obravnavali smo različne pozicije stebra glede na zunanjo steno in glede na lego toplotne izolacije. Pri izhodiščnem stanju ni toplotne izolacije, zato križanje predstavlja toplotni most. Najenostavnejša izvedba bi bila dodana toplotna izolacija na zunanji strani stebra. V primerih, ko to ni mogoče in bi bilo treba toplotno izolacijo namestiti na notranjo stran, je smiselno uporabiti toplotnoizolacijske materiale, ki zavzamejo čim manj prostora. Ugotovili smo, da je dejanska pozicija stebrov glede na zunanjo steno na stavbi najprimernejša z gledišča lege toplote izolacije, saj bi z uporabo klasičnih toplotnih izolacij na zunanji strani najenostavnejše rešili toplotni most, saj okno predstavlja toplotno izolacijo in hidroizolacijo. Izbrana varianta za podrobnejšo obdelavo v nadaljevanju magistrskega dela je označena z rdečim krogom.



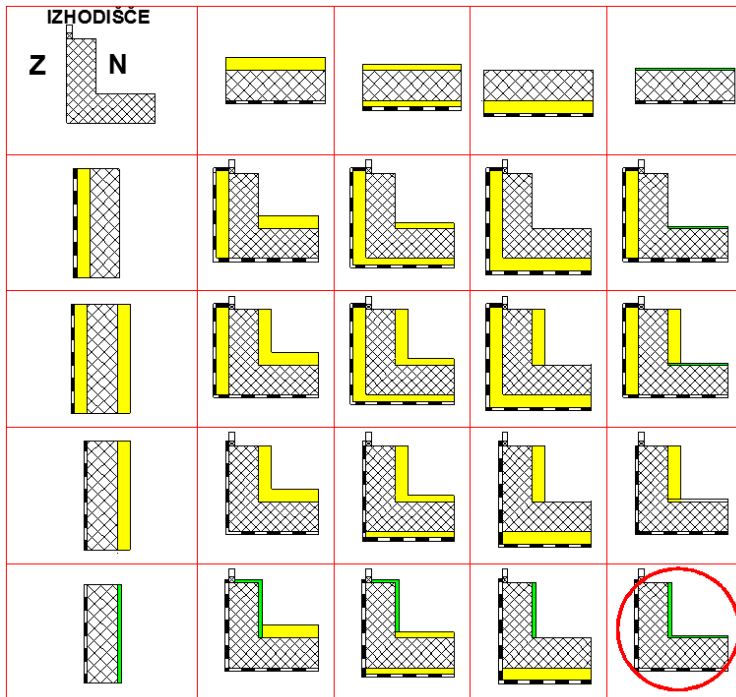
Slika 32: Matrika križanj stebra in okna v tlorisu V-7.

Na Sliki 33 je prikazana matrika križanja medetažne konstrukcije in zunanje stene v prerezu M-1. V matriki smo za izhodiščno stanje uporabili netransparentne konstrukcijske sklope, v iskanju rešitev pa smo uporabili dejansko stanje iz stavbe, kjer se križajo transparentni deli z medetažno konstrukcijo. Matrika prikazuje stanje na severni strani stavbe. Ugotovili smo, da je možnih več rešitev dodajanja toplotne izolacije na zunanjo stran stene ali dodajanje toplotne izolacije na notranjo stran na tla in strop medetažne konstrukcije. V primeru dodajanja na notranjo stran je treba izračunati smiselno debelino toplotne izolacije. Izbrana varianta za podrobnejšo obdelavo je v nadaljevanju magistrskega dela označena z rdečim krogom.



Slika 33: Matrika križanj medetažne konstrukcije in zunanje stene v prerezu M-1.

Na Sliki 34 je prikazana matrika križanj konzolne medetažne konstrukcije P-1-2 v prvem nadstropju stavbe. Obravnavali smo različne pozicije toplotne izolacije in hidroizolacije na zunanji in notranji strani nosilne konstrukcije. Najprimernejša rešitev je izvedba toplotne izolacije na zunanji strani fasadnega ovoja, ker s tem ne vplivamo na notranji prostor. V kolikor to ni mogoče, je primerna uporaba visoko zmogljivih toplotnoizolacijskih materialov, ki ne zavzamejo veliko prostora. Izbrana varianta za podrobnejšo obdelavo je v nadaljevanju magistrskega dela označena z rdečim krogom.



Slika 34: Matrika križanj medetažne konzolne konstrukcije v prvem nadstropju in zunanje stene v prerezu P-1-2.

6.3.1. Robni pogoji stavbe

Po Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah [22] smatramo za robne pogoje pri zagotavljanju učinkovite rabe energije v stavbah življenjsko dobo stavbe, njeno namembnost, podnebne podatke, materiale konstrukcije in ovoja, lego in orientiranost, parametre notranjega okolja, vgrajene sisteme in naprave ter uporabo obnovljivih virov energije.

Temperatura, vlažnost

Osnovni parameter je notranja temperatura zraka in relativna vlažnost zraka. Z dodatno toplotno izolacijo na notranji strani se toplotni tok spremeni in s tem tudi notranja površinska temperatura, ki vpliva na pojav kondenzacije.

Preglednica 7: Robni pogoji.

	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost zraka [%]
Znotraj	21	60
Zunaj	- 13	90

Posamezne robne pogoje bomo upoštevali sproti po posameznih poglavjih. Poleg vseh naštetih robnih pogojev moramo v primeru obravnavane stavbe upoštevati kulturnovarstvene pogoje, ker je stavba vpisana v Register kulturne dediščine.

6.3.2. Kulturnovarstveni pogoji

V Sloveniji je uveljavljen večstopenjski sistem varstva, ki loči nepremično kulturno dediščino po kategorijah glede na kulturni pomen: kulturno dediščino, kulturne spomenike lokalnega pomena in kulturne spomenike državnega pomena [26, 27].

Stavba Fakultete za gradbeništvo in geodezijo je vpisana v Register kulturne dediščine kot stavbna dediščina pod evidenčno številko (EŠD) 16657; Ljubljana – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo [26, 27].

Za stavbo veljajo sledeči varstveni režimi:

I. Ljubljana – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Enota je kot stavbna dediščina varovana v okviru prostorskih aktov. Kulturnovarstveni režim, ki je določen v 67. členu Odloka o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana – izvedbeni del (Ur. list RS št. 78/2010) določa:

(2) Za posamezne vrste registrirane kulturne dediščine veljajo naslednji varstveni režimi:

a) Pri stavbni registrirani kulturni dediščini se ohranjajo varovane vrednote, kot so:

- tlorisna in višinska zasnova (gabariti),
- gradivo (gradbeni material) in konstrukcijska zasnova,
- oblikovanost zunanjsčine (členitev objekta in fasad, oblika in naklon strešin, kritina, barve fasad, fasadni detajli),
- funkcionalna zasnova notranjosti objektov in pripadajočega zunanjega prostora,
- sestavine in pritikline,
- stavbno pohištvo in notranja oprema,
- komunikacijska in infrastrukturna navezava na okolico (pripadajoči odprti prostor z niveleto površin ter lego, namembnostjo in oblikovanostjo pripadajočih objektov in površin),
- pojavnost in vedute (predvsem pri prostorsko izpostavljenih objektih – cerkvah, gradovih, znamenjih in podobno),
- celovitost dediščine v prostoru (prilagoditev posegov v okolici značilnostim stavbne dediščine),
- zemeljske plasti z morebitnimi arheološkimi ostalinami [26, 28].

II. Ljubljana – Mestna četrt Kolezija

Enota je kot naselbinska dediščina varovana v okviru prostorskih aktov. Kulturnovarstveni režim, ki je določen v 67. členu Odloka o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana – izvedbeni del (Ur. list RS št. 78/2010) za naselbinsko registrirano kulturno dediščino, določa [26, 28]:

III. Ljubljana – Arheološko najdišče Ljubljana (EŠD 329) Območje enote Ljubljana – Arheološko najdišče Ljubljana (EŠD 329) je bilo razglašeno za arheološki spomenik z Odlokom o razglasitvi arheološkega kompleksa v ljubljanskih občinah za kulturni in zgodovinski spomenik (Ur. list RS št. 46/1990) [26, 28].

Iz navedenega je razvidno, da nameščanje toplotne izolacije na fasado stavbe s kulturnovarstvenega vidika ni dopustno.

6.4. Podrobnejša analiza toplotnih mostov

Z analizo toplotnih mostov želimo ugotoviti, ali izbrani detajli na stavbnem ovoju ustrezajo Pravilniku o učinkoviti rabi energije [22]. Z dvodimenzionalnim izračunom križanj konstrukcijskih sklopov smo analizirali obstoječe stanje in v primeru neizpolnjevanja pogojev iz pravilnika predvideli rešitve.

Zaradi kompleksnosti toplotnih mostov, za katere vrednosti linijske toplotne prehodnosti ni mogoče odčitati iz standardov, smo se odločili, da bomo s pomočjo prečnih prerezov izdelali dvodimenzionalne modele. Za modele bomo s programom THERM izračunali toplotni tok, toplotno prehodnost in temperaturo po prerezu in s pomočjo formul od (1) do (3) izračunali linijsko toplotno prehodnost ter temperaturni faktor po formuli (4).

Izračunano vrednost toplotne prehodnosti za dvodimenzionalne prereze bomo primerjali z vrednostmi toplotne prehodnosti za enodimenzionalne prereze iz TSG-1-004 Učinkovita raba energije [23]. Zavedamo se, da so toplotne prehodnosti iz TSG-1-004 Učinkovita raba energije [23] določene na podlagi konstrukcijskih sklopov brez vplivov toplotnih mostov. V magistrskem delu so poleg odčitanih dvodimenzionalnih toplotnih prehodnosti navedene vrednosti za enodimenzionalni prehod toplote.

Izračunano vrednost linijske toplotne prehodnosti bomo primerjali s pogoji iz TSG-1-004 Učinkovita raba energije [23]. V kolikor pogojem ne bo zadoščeno, bomo z dodatnimi ukrepi, kot je uporaba toplotne izolacije, poizkusili zadostiti pogojem. V primeru neizpolnjevanja pogojev bomo preverili, ali vodna para kondenzira na površini oziroma znotraj konstrukcijskega sklopa.

Potek analize toplotnih mostov je potekal v sledečem vrstnem redu:

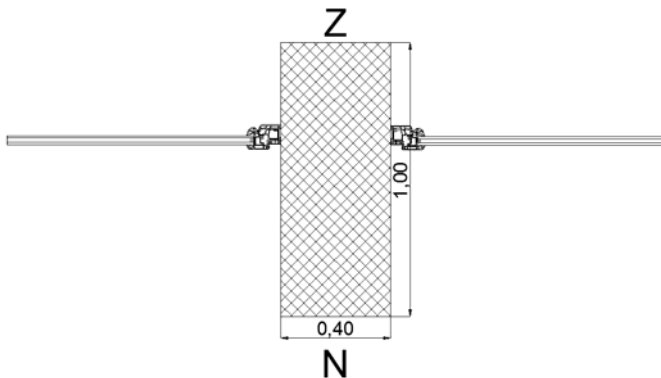
- izbira obravnavanega toplotnega mosta,
- analiza obstoječega stanja,
- definicija in analiza problema,
- predlagane rešitve.

»ta stran je namenoma prazna«

6.4.1. Križanje stebrov in oken v pritličju V-1

Obstoječe stanje

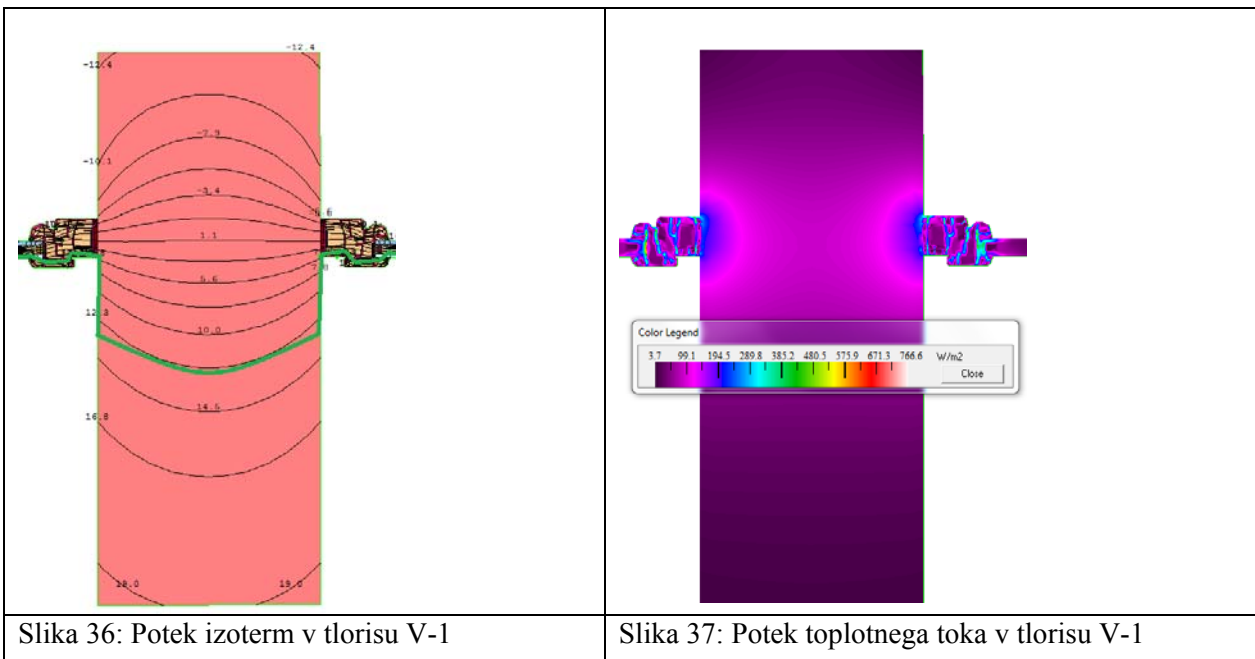
Armiranobetonski stebri s kapiteli v pritličju predstavljajo podporo zgornjim nadstropjem. Med stebre so vstavljena okna, ki so sestavljena iz dveh delov: netransparentni parapetni del, višine 0,80 m, ki je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi in transparentnim zgornjim delom okna, višine 3,20 m. Tip toplotnega mostu V-1 na stiku okna in stebra v dolžini 4,00 m se na stavbi pojavi štiriindvajsetkrat.



Slika 35: Tloris detajla V-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 36 je v tlorisu prikazan potek izoterm po stebri in oknu. Razvidno je, da je najnižja površinska temperatura na notranji strani na stiku stebra in okenskega okvirja $T = 5,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber $U = 1,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 37 prikazuje potek toplotnega toka skozi tloris. Najvišji toplotni tok skozi steber se zgodi na stiku z okenskim okvirjem. Najvišja vrednost toplotnega toka skozi steber $q = 289,8 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 36 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

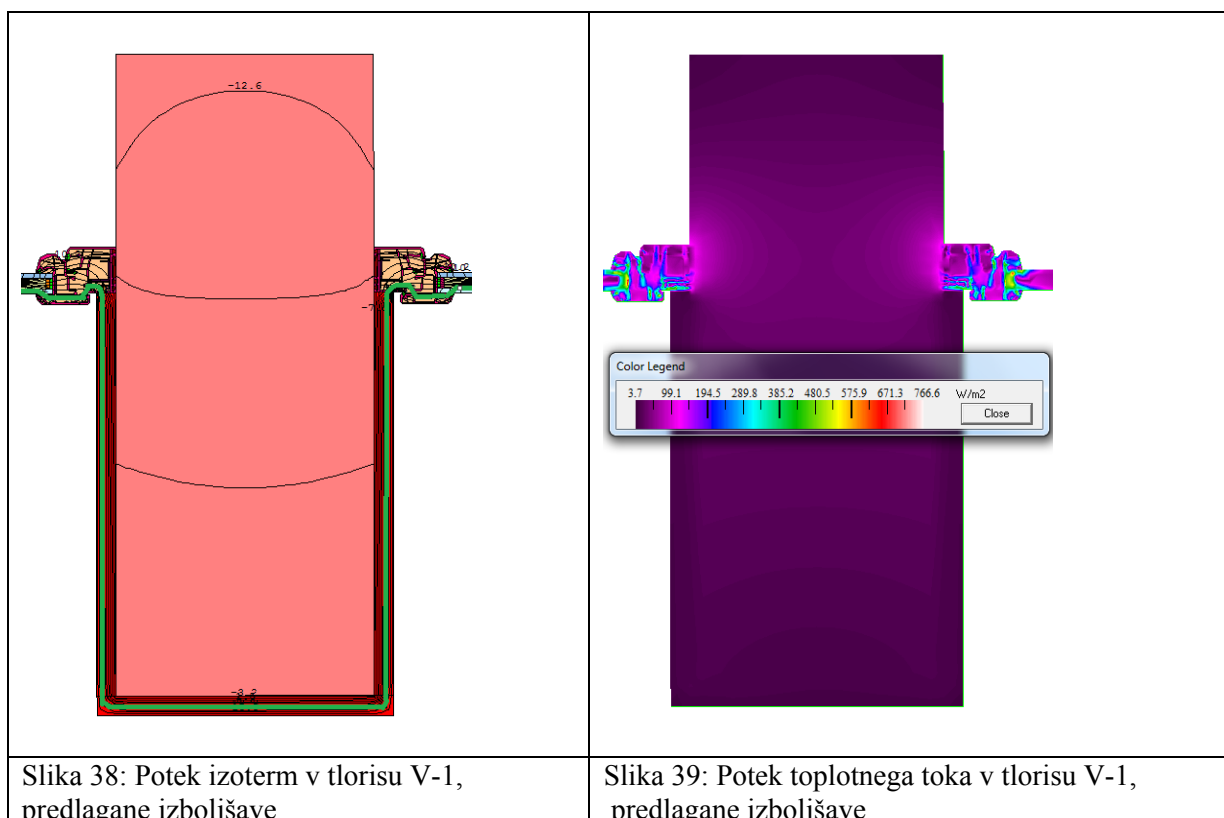
Steber ni toplotno izoliran, zato na križanju prihaja do povečanega toplotnega toka, kar povzroča toplotni most. V Preglednici 8 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije na notranji strani stebra, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,54$, ki je manjši od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu $\Psi = 0,73 \text{ W/(m K)}$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti načrtovalske detajle.

Preglednica 8: Prikaz rezultatov

Konstruktivski sklop	U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]	Dolžina [m]	Ψ [$\text{W}/(\text{m K})$]	f_{Rsi} [-]
Okno levo	1,21	1,30	0,73	0,54
Okno desno	1,21	1,30		
Okna in steber	1,26	3,08		

Predlagane izboljšave

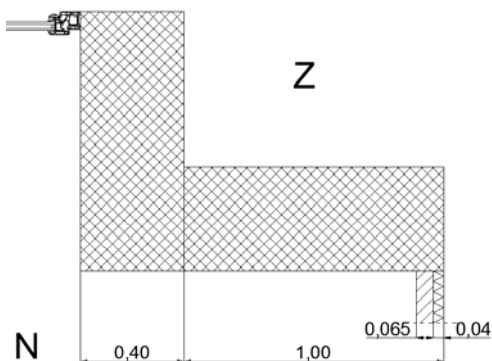
Ker smo ugotovili, da linijski toplotni most obstaja, smo na notranjo stran stebra predvideli dodatne 3 cm debele vakuumske izolacijske panele (Slika 38). Toplotna prehodnost skozi steber se zmanjša na $U = 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Po dodani toplotni izolaciji je vrednost $\Psi = 0,20 \text{ W}/(\text{m K})$. Možnosti nastanka površinske kondenzacije ni, saj je izračunani faktor $f_{Rsi} = 0,91$. Površinska temperatura najhladnejšega dela je $T = 17,9 \text{ }^\circ\text{C}$, možnosti kondenzacije na notranji površini stebra ni, ker je temperatura rosišča pri predvideni notranji temperaturi $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $13,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Z zeleno linijo je na Sliki 38 prikazana ravnina rosišča.



6.4.2. Križanje stebrov in zunanje stene v pritličju V-2

Obstoječe stanje

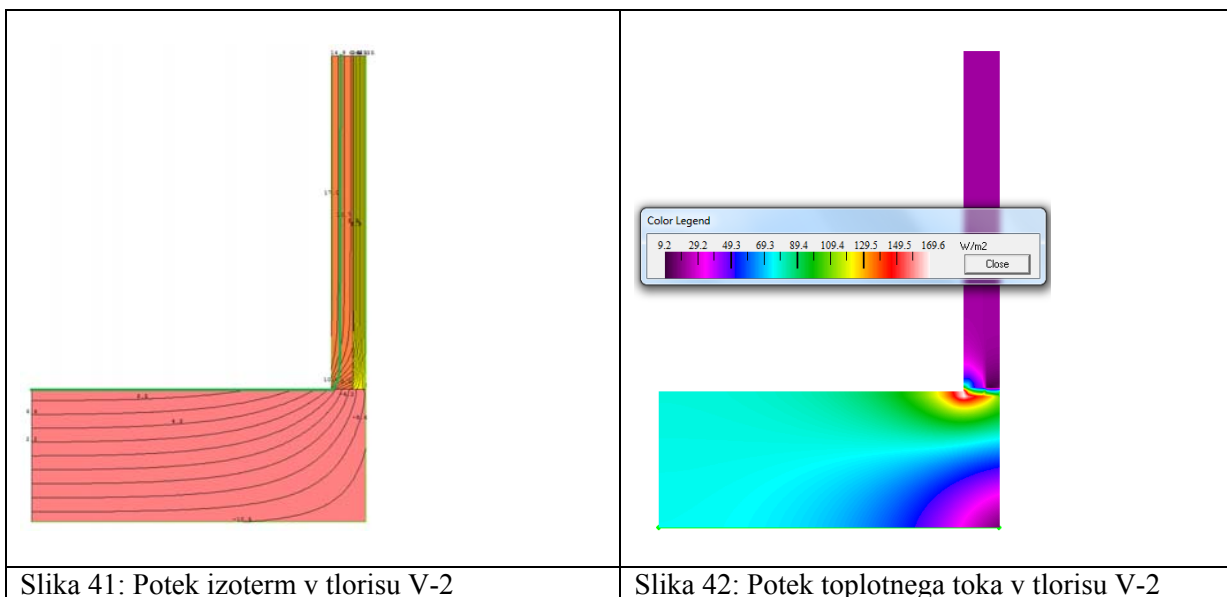
Armiranobetonski stebri se na vogalih pritličja križajo z zunanjo steno (Slika 40). Stebri so v »L« obliki. Obravnavamo steber na stiku z zunanjo steno, v dolžini 1,00 m, preostanek stebra smo obravnavali kot steber V-1. Zunanje stene so sestavljene iz opeke, žilindrine volne, prezračevanega kanala in prefabriciranih betonskih elementov. Prefabriciranih betonskih elementov v izračunu ne upoštevamo zaradi zračne plasti. Tip toplotnega mostu V-2 v dolžini 4,00 m se na stavbi pojavi štirikrat.



Slika 40: Tloris detajla V-2, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 41 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi steber in steno. Razvidno je, da je najnižja površinska temperatura na stiku stebra in okvirja $T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber $U = 2,43 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 42 prikazuje potek toplotnega toka skozi tloris. Razvidno je, da je skozi steber na stiku stebra in zunanje stene toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 206,0 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 41 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

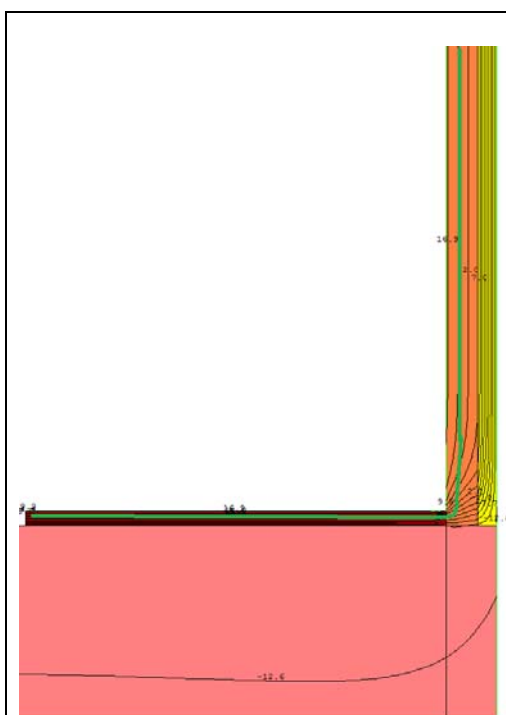
Steber ni toplotno izoliran, medtem ko je debelina toplotne izolacije zunanje stene le 4 cm, zato na križanju prihaja do povečanega toplotnega toka (Slika 42). V Preglednici 9 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije na notranji strani stebra, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,46$, ki je manjši od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu znaša $\Psi = 0,86 \text{ W/(m K)}$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 9: Prikaz rezultatov

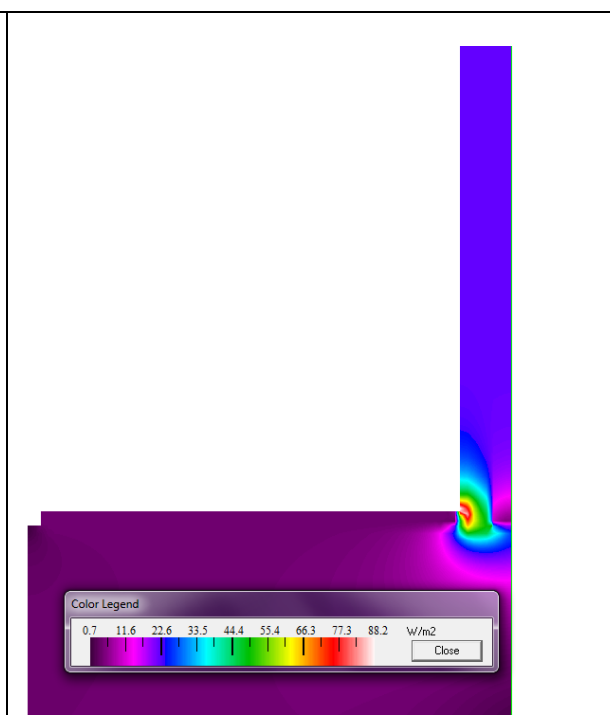
Konstrukcijski sklop	$U \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$	Dolžina [m]	$\Psi \text{ [W/(m K)]}$	$f_{Rsi} \text{ [-]}$
Stena	0,65	1,00	0,77	0,46
Steber	1,96	0,89		
Stena in steber	1,32	2,40		

Predlagane izboljšave

Ugotovili smo, da linijski toplotni most obstaja, zato smo na notranjo stran stebra predvideli 3 cm debele vakuumske izolacijske panele. Toplotna prehodnost skozi steber se zmanjša na $U = 0,09 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Vrednost po dodani toplotni izolaciji $\Psi = 0,14 \text{ W/(m K)}$. V pasu 2 cm na križanju stebra in stene je možna površinska kondenzacija, ker je $T = 8,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura se nato dvigne na $T = 18,3 \text{ }^\circ\text{C}$, zato možnosti nastanka površinske kondenzacije ni, saj je faktor $f_{Rsi} = 0,92$. Z zeleno linijo je na Sliki 43 prikazana ravnina rosišča.



Slika 43: Potek izoterm v tlorisu V-2, predlagane izboljšave

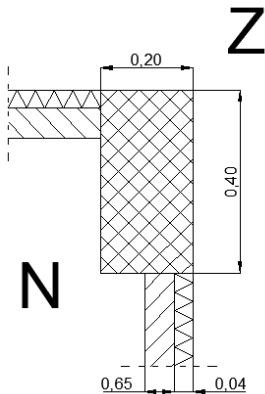


Slika 44: Potek toplotnega toka v tlorisu V-2, predlagane izboljšave

6.4.3. Križanje stebrov in zunanjih sten na južnem delu stavbe V-3

Obstoječe stanje

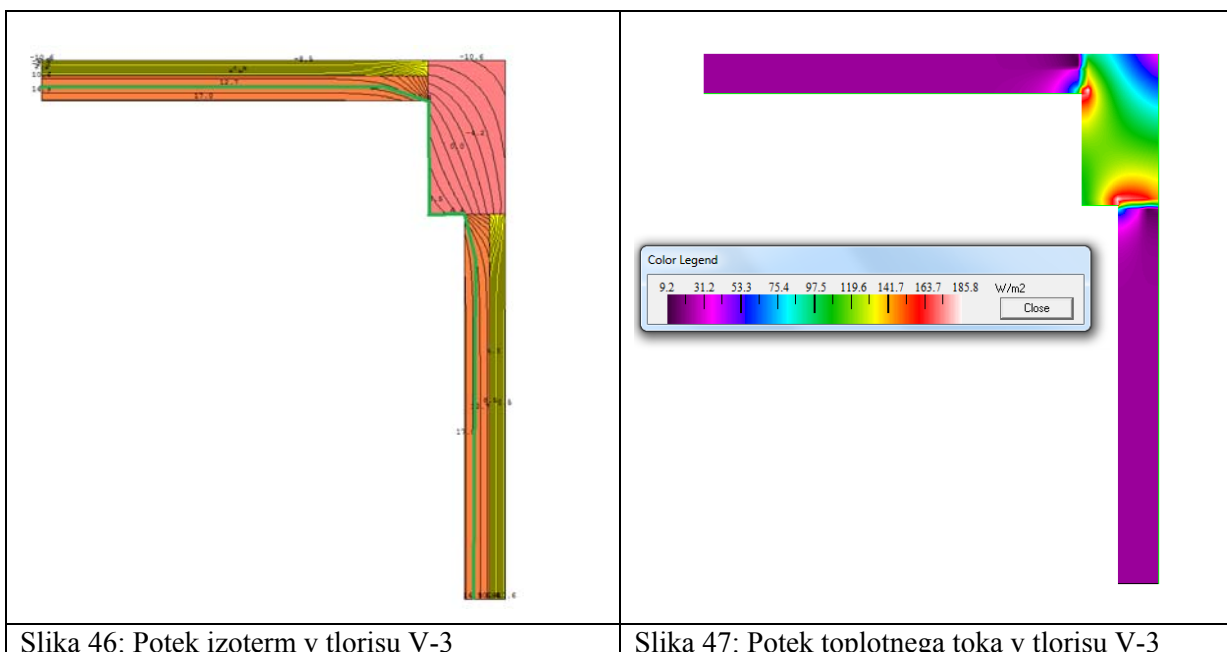
Armiranobetonski stebri se na jugovzhodnem delu stavbe križajo z zunanjima stenama. Zunanje stene so sestavljene iz opeke in žilindrine volne na zunanji strani. Z zunanje strani toplotno izolacijo pokrivajo prefabricirani betonski elementi, le-teh v izračunu ne upoštevamo, ker so od žilindrine volne ločeni s prezračevalno plastjo. Tip toplotnega mostu V-3 v dolžini 2,50 m se na stavbi pojavi dvakrat v šestih etažah.



Slika 45: Tloris detajla V-3, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 46 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi steni in steber. Razvidno je, da je najnižja temperatura na stiku stebra in stene $T = -0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber $U = 2,50\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ in steno $U = 0,65\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$. Slika 47 prikazuje toplotni tok v tlorisu skozi steni in steber. Razvidno je, da je skozi steber ter na stiku stebra in zunanje stene toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 180,0\text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 46 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

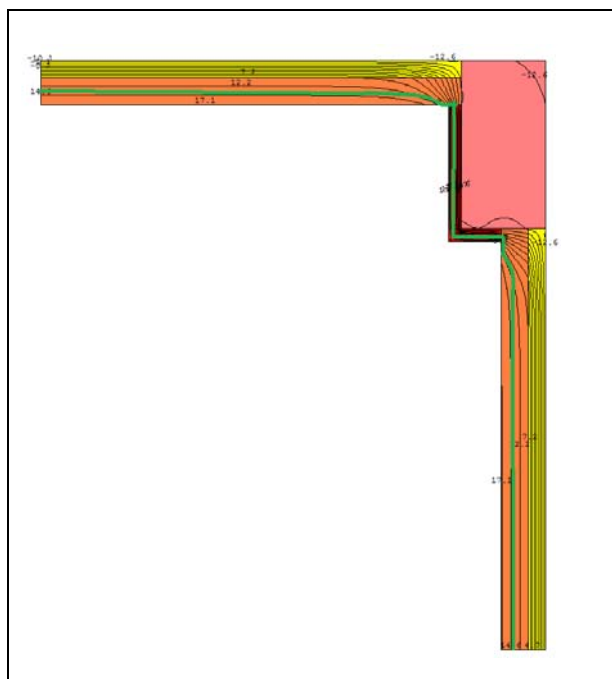
Steber ni toplotno izoliran, medtem ko je debelina toplotne izolacije zunanje stene le 4 cm, zato na križanju prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 10 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije na notranji strani stebra, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,36$, ki je manjši od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu znaša $\Psi = 1,53$ W/(m K), kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 10: Prikaz rezultatov

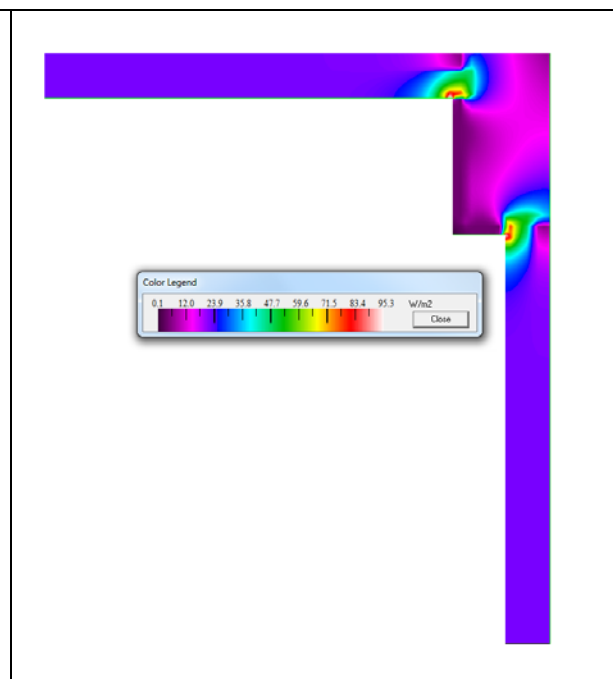
Konstrukcijski sklop	U [W/(m ² K)]	Dolžina [m]	Ψ [W/(m K)]	f_{Rsi} [-]
Stena levo	0,64	1,00	1,53	0,36
Stena desno	0,64	1,00		
Steni skupaj	1,08	2,60		

Predlagane izboljšave

Ker smo ugotovili, da linijski toplotni mostovi obstajajo in da toplotna prehodnost skozi steber ne ustreza vrednosti iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23], smo na notranjo stran stebra predvideli 3 cm debele vakuumske toplotne panele. Toplotna prehodnost skozi steber se zmanjša na $U = 1,06$ W/(m² K). Vrednost po dodani toplotni izolaciji je $\Psi = 0,20$ W/(m K). Možnost nastanka površinske kondenzacije je na stiku stebra in stene na obeh straneh, saj je faktor $f_{Rsi} = 0,66$. Površinska temperatura najhladnejšega dela stene je $T = 9,7$ °C, vendar se po 3 cm dvigne na 13,0 °C, kjer ni več možnosti površinske kondenzacije. Z zeleno linijo je na Sliki 48 prikazana ravnina rosišča.



Slika 48: Potek izoterm v tlorisu V-3, predlagane izboljšave

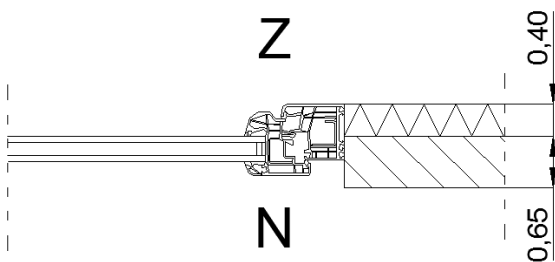


Slika 49: Potek toplotnega toka v tlorisu V-3, predlagane izboljšave

6.4.4. Križanje zunanje stene in okna v kabinetih V-4

Obstoječe stanje

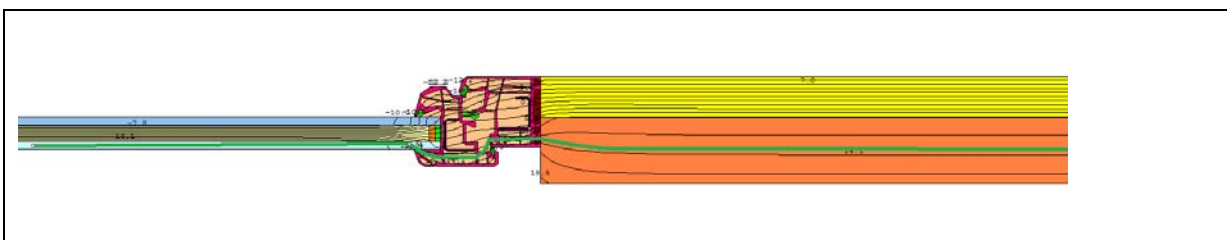
Na južni strani stavbe v kabinetih se pojavljajo križanja oken in zunanjih sten. Med stebre so vstavljena okna dimenzij 1,3 x 1,7 m. Parapetni del je višine 0,80 m in je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi. Zunanja stena je sestavljena iz opeke NF in žlindre volne, ki je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi. Prefabriciranih betonskih elementov v izračunu ne upoštevamo, ker so od žlindre volne ločeni s prezračevalno plastjo. Tip toplotnega mostu V-4 v dolžini 2,50 m se na stavbi pojavi štiriindvajsetkrat v šestih etažah.



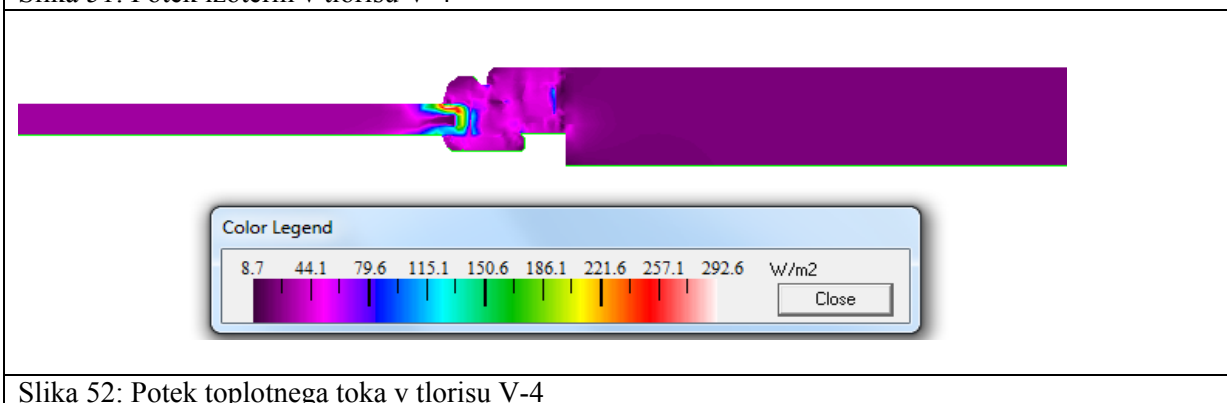
Slika 50: Tloris detajla V-4, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 51 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi steno in okno. Razvidno je, da je najnižja temperatura na notranji strani stika okna in stene $T = 15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steno je $U = 0,65\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$. Slika 52 prikazuje potek toplotnega toka skozi tloris. Razvidno je, da je na stiku stebra in okenskega okvirja toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 40,0\text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 51 prikazana ravnina rosišča.



Slika 51: Potek izoterm v tlorisu V-4



Slika 52: Potek toplotnega toka v tlorisu V-4

Definicija in analiza problema

V Preglednici 11 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Z izračunom vrednosti linijskega toplotnega mostu, ki znaša $\Psi = -0,006 \text{ W}/(\text{m K})$, ugotovimo, da toplotnega mostu ni. Iz samega detajla križanja lahko sklepamo, da toplotnega mostu ni, ker imata okno in stena podobne toplotne prehodnosti. Z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,76$ ugotovimo, da ni možnosti nastanka površinske kondenzacije, ker je večji od zahtevane vrednosti 0,75. Površinska temperatura je $T = 16,2 \text{ }^\circ\text{C}$. U stene presega mejne vrednosti, določene za zunanje stene v TGS-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23].

Preglednica 11: Prikaz rezultatov

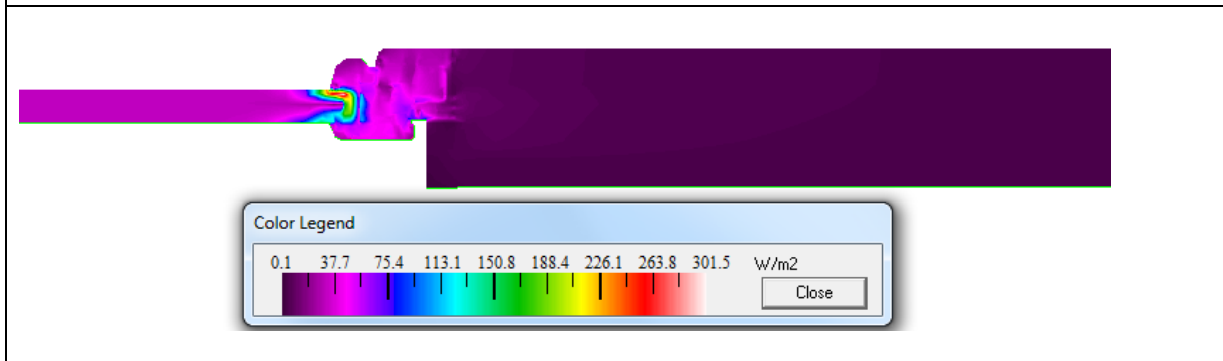
Konstrukcijski sklop	$U \text{ [W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$	Dolžina [m]	$\Psi \text{ [W}/(\text{m K})]$	$f_{Rsi} [-]$
Stena	0,66	1,00	0,006	0,75
Okno	0,98	1,04		
Okno in stena	0,82	2,04		

Predlagane izboljšave

Z dodanimi vakuumskimi toplotnimi paneli na steni v debelini 3 cm ugotovimo, da se U skozi steno zmanjša na $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Vrednost po dodani toplotni izolaciji je $\Psi = 0,004 \text{ W}/(\text{m K})$. Možnosti nastanka površinske kondenzacije ni, saj je faktor $f_{Rsi} = 0,92$ in presega mejno vrednost 0,75. Površinska temperatura najhladnejšega dela je $T = 17,4 \text{ }^\circ\text{C}$ in presega temperaturo rosišča, določeno pri notranji temperaturi $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $13,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Z zeleno linijo je na Sliki 53 prikazana ravnina rosišča.



Slika 53: Potek izoterm v tlorisu V-4

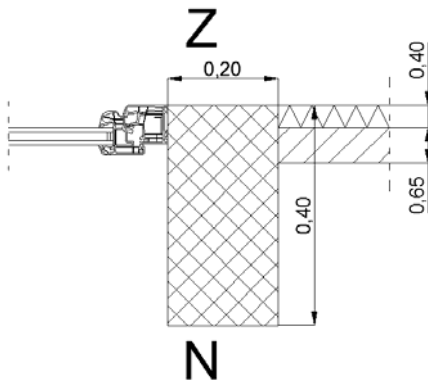


Slika 54: Potek toplotnega toka v tlorisu V-4

6.4.5. Križanje stebrov in oken v kabinetih V-5

Obstoječe stanje

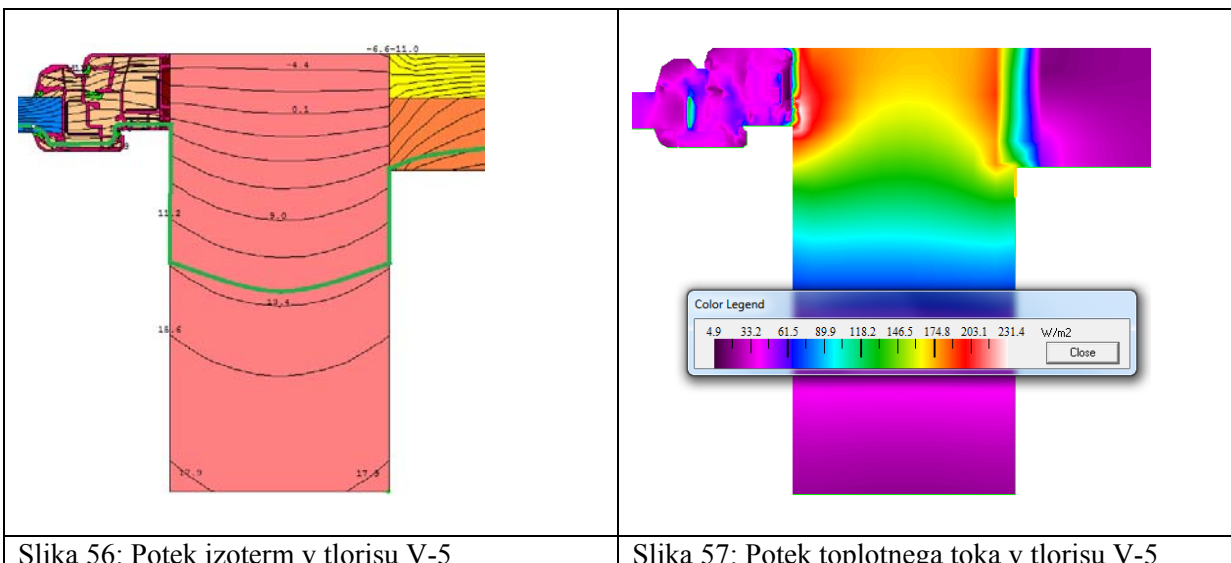
V kabinetih južne strani stavbe je križanje stebra s parapetom okna na eni strani in zunanje stene na drugi strani. Steber je brez toplotne izolacije. Med stebre so vstavljena okna dimenzij 1,3 x 1,7 m. Parapetni del v višini 0,80 m ima za polnilo toplotno izolacijo v debelini 2 cm, z zunanje strani je zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi. Zunanja stena je sestavljena iz opeke NF in žilindrine volne, ki je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi, le-teh v izračunu ne upoštevamo, ker so od žilindrine volne ločeni s prezračevalno plastjo. Tip toplotnega mostu V-5 v dolžini 2,50 m se na stavbi pojavi triindvajsetkrat v šestih etažah.



Slika 55: Tloris detajla V-5, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

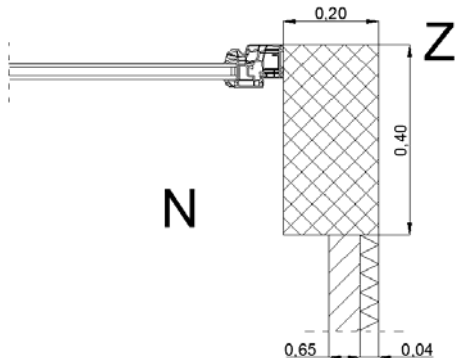
Na Sliki 56 in Sliki 57 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi parapet, steber in steno. Razvidno je, da je najnižja temperatura na notranji strani stika okno - steber $T = 4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber je $U = 5,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, skozi steno je $U = 0,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ in skozi parapet je $U = 1,31 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 57 prikazuje potek toplotnega toka skozi prerez. Razvidno je, da je na stiku stebra in okenskega okvirja toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 231,4 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 56 prikazana ravnina rosišča.



6.4.6. Križanje v vogalih stebrov severne strani stavbe V-6

Obstoječe stanje

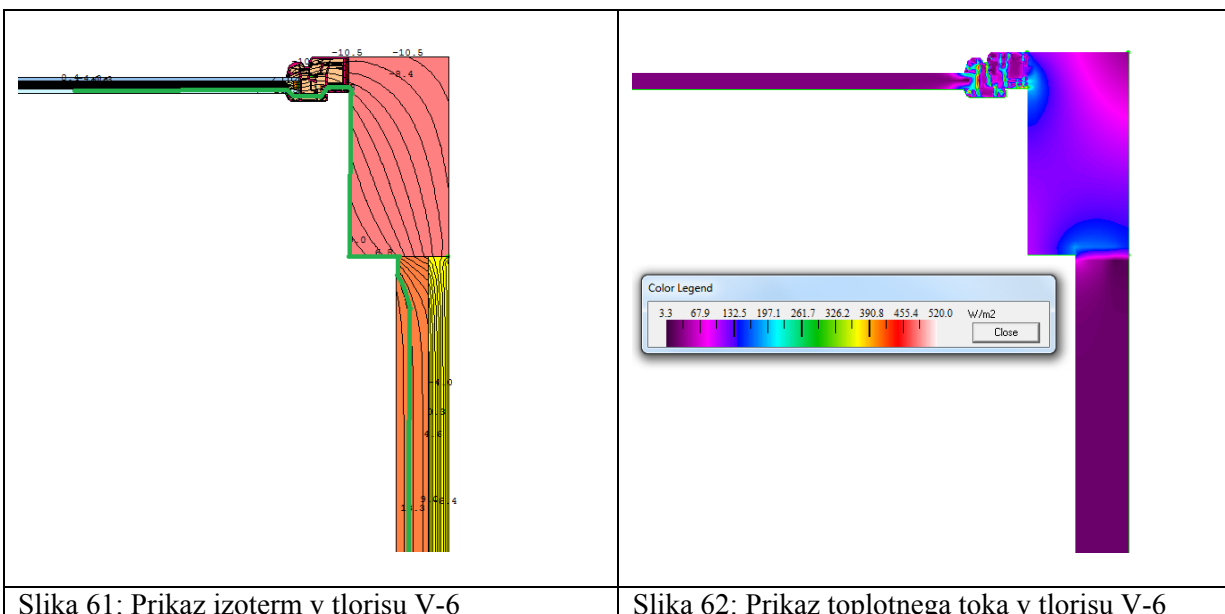
Armiranobetonski stebri severne strani stavbe se na eni strani križajo z oknom in na drugi s steno. Zunanja stena je sestavljena iz opeke NF, žlindre volne, zračne plasti in prefabriciranih betonskih plošč, ki jih v izračunu nismo upoštevali zaradi zračne plasti. Med stebre so vstavljena okna, ki so sestavljena iz dveh delov: netransparentni parapetni del višine 0,80 m, ki je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi in transparentnim zgornjim delom okna višine 3,20 m. Tip toplotnega mostu V-6 v dolžini 4,00 m se na stavbi pojavi osemkrat.



Slika 60: Tloris detajla V-6, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 61 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi okno, steber in steno. Razvidno je, da je najnižja temperatura na notranji strani stika stebra in okna $T = -0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber $U = 2,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, skozi steno $U = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ in skozi okno $U = 1,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 62 prikazuje potek toplotnega toka skozi tloris. Razvidno je, da je na stiku stebra in okenskega okvirja in skozi steber toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 197,1 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 61 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

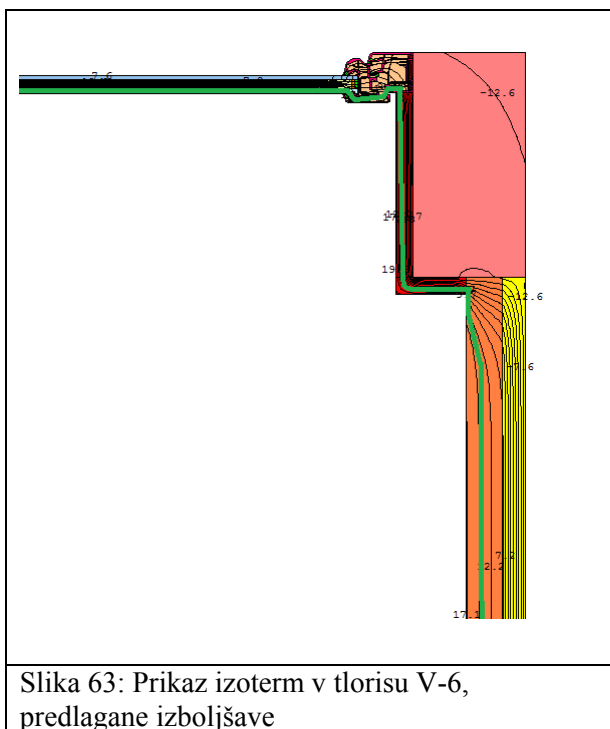
Steber ni toplotno izoliran, zato na križanju stebra prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 13 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost kondenzacije na notranji strani stebra. Z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,37$ ugotovimo, da je možnost nastanka površinske kondenzacije, ker je manjši od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu znaša $\Psi = 1,58 \text{ W}/(\text{m K})$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 13: Prikaz rezultatov

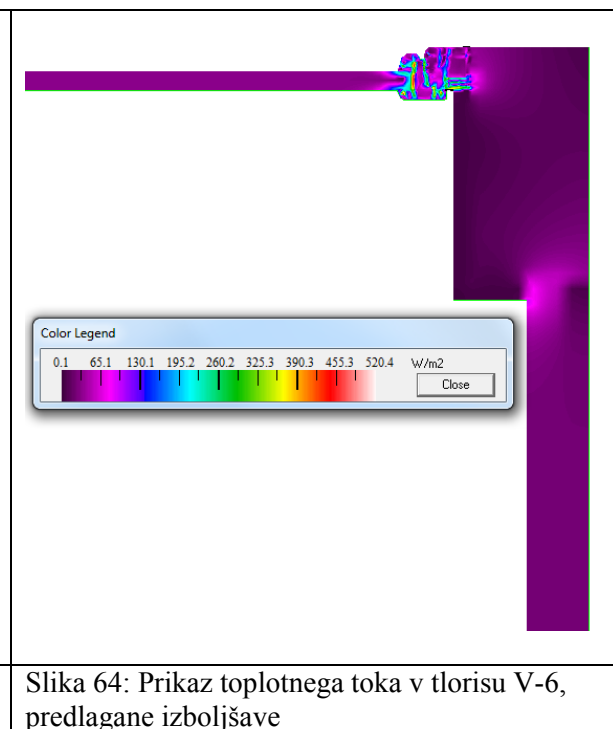
Konstruktivski sklop	U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]	Dolžina [m]	Ψ [$\text{W}/(\text{m K})$]	f_{Rsi} [-]
Okno	1,15	1,04	1,58	0,37
Stena	0,66	1,00		
Okno, stena, steber	1,30	2,64		

Predlagane izboljšave

Ker smo ugotovili, da linijski toplotni mostovi obstajajo in da toplotna prehodnost skozi steber ne ustreza vrednosti iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23], smo na notranji strani stebra predvideli 3 cm debele vakuumske toplotne panele. Toplotna prehodnost skozi steber se zmanjša na $U = 0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Vrednost linijskega toplotnega mosta po dodani toplotni izolaciji $\Psi = 0,19 \text{ W}/(\text{m K})$. Površinska temperatura najhladnejšega dela se je premaknila na steno in je $T = 7,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Po dodanih vakuumskih izolacijskih panelih je na stiku stebra in stene možnost kondenzacije na širini 3 cm, ker je tam temperatura manjša od $13 \text{ }^\circ\text{C}$, faktor $f_{Rsi} = 0,59$. Z zeleno linijo je na Sliki 63 prikazana ravnina rosišča.



Slika 63: Prikaz izoterm v tlorisu V-6, predlagane izboljšave

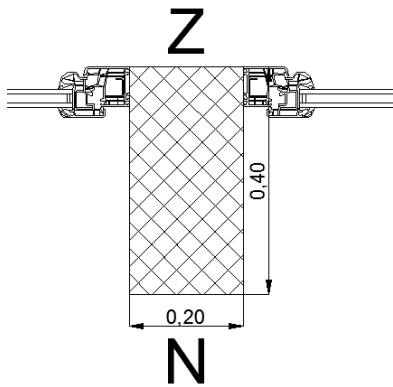


Slika 64: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6, predlagane izboljšave

6.4.7. Križanje stebrov in oken v predavalnicah na severni strani stavbe V-7

Obstoječe stanje

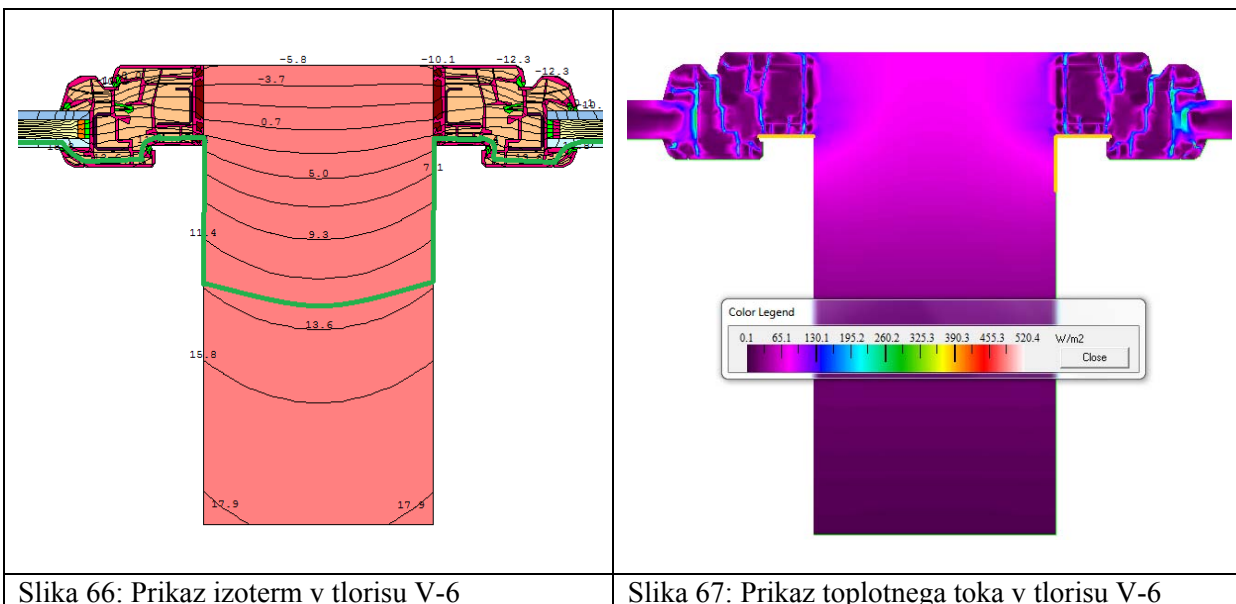
Med stebre na severni strani stavbe so v predavalnicah vstavljena okna, ki so sestavljena iz dveh delov: netransparentni parapetni del višine 0,80 m, ki je z zunanje strani zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi in transparentnim zgornjim delom okna višine 3,20 m. Tip toplotnega mostu V-7 v dolžini 4,00 m se na stavbi pojavi v štirih nadstropjih po štiriindvajsetkrat.



Slika 65: Tloris detajla V-7, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 66 je v tlorisu prikazan potek izoterm skozi okna in steber. Razvidno je, da je najnižja temperatura na stiku okna in stebra na notranji strani $T = 4,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi steber $U = 5,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 67 prikazuje potek toplotnega toka skozi steber in okni v tlorisu. Razvidno je, da je na stiku stebra in okenskega okvirja toplotni tok največji, vrednost doseže $q = 195,2 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 66 prikazana ravnina rosišča.



Slika 66: Prikaz izoterm v tlorisu V-6

Slika 67: Prikaz toplotnega toka v tlorisu V-6

Definicija in analiza problema

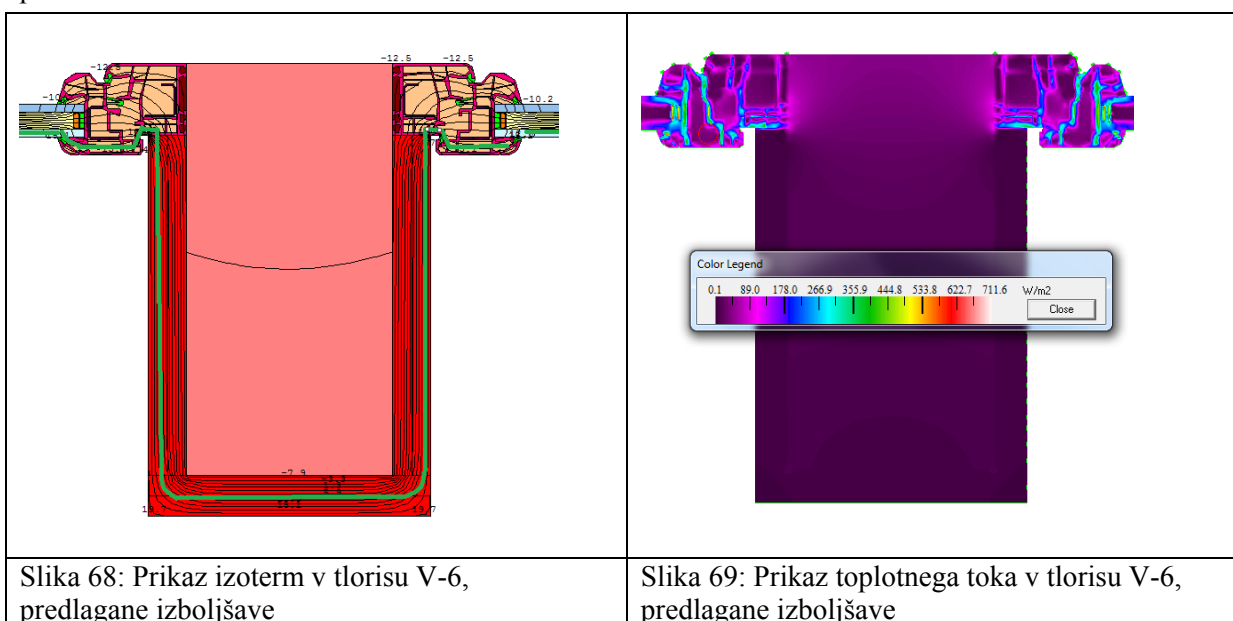
Steber ni toplotno izoliran, zato na križanju stebra in okna prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 14 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije na notranji strani stebra, kar ugotovimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,51$, ki je večji od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu znaša $\Psi = 1,08 \text{ W}/(\text{m K})$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 14: Prikaz rezultatov

Konstruktivski sklop	U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]	Dolžina [m]	Ψ [$\text{W}/(\text{m K})$]	f_{Rsi} [-]
Okno levo	1,19	1,04	1,08	0,51
Okno desno	1,19	1,04		
Oba okna in steber	1,56	2,28		

Predlagane izboljšave

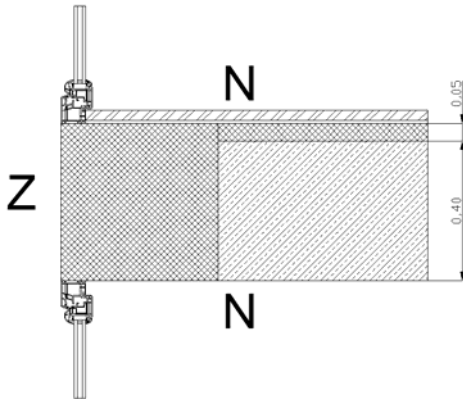
Ker smo ugotovili, da linijski toplotni mostovi obstajajo in da toplotna prehodnost skozi steber ne ustreza vrednosti iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23], smo na notranjo stran stebra predvideli 3 cm debele vakuumske toplotne panele. Ugotovimo, da bi bila najprimernejša in najenostavnejša rešitev montaža toplotne izolacije na zunanji strani konstrukcije, vendar zaradi kulturnovarstvenih pogojev to ni mogoče, ker posegi na fasadi niso dovoljeni. Edina možna rešitev je namestitev toplotne izolacije na notranji strani stebra. Slika 68 prikazuje potek izoterm v stebri in oknih v tlorisu. Najnižja temperatura na obodu stebra je v stiku stebra in okenskega okvirja $T = 13,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Največji toplotni tok se zgodi skozi zasteklitev. Toplotna prehodnost skozi steber se zmanjša na $U = 1,29 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, kar je še vedno višja vrednost od dovoljene po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Vrednost linijskega toplotnega mosta je po dodani toplotni izolaciji $\Psi = 0,19 \text{ W}/(\text{m K})$. Možnosti nastanka površinske kondenzacije ni, saj je faktor $f_{Rsi} = 0,76$. Z zeleno linijo je na Sliki 68 prikazana ravnina rosišča.



6.4.8. Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije severne strani stavbe M-1

Obstoječe stanje

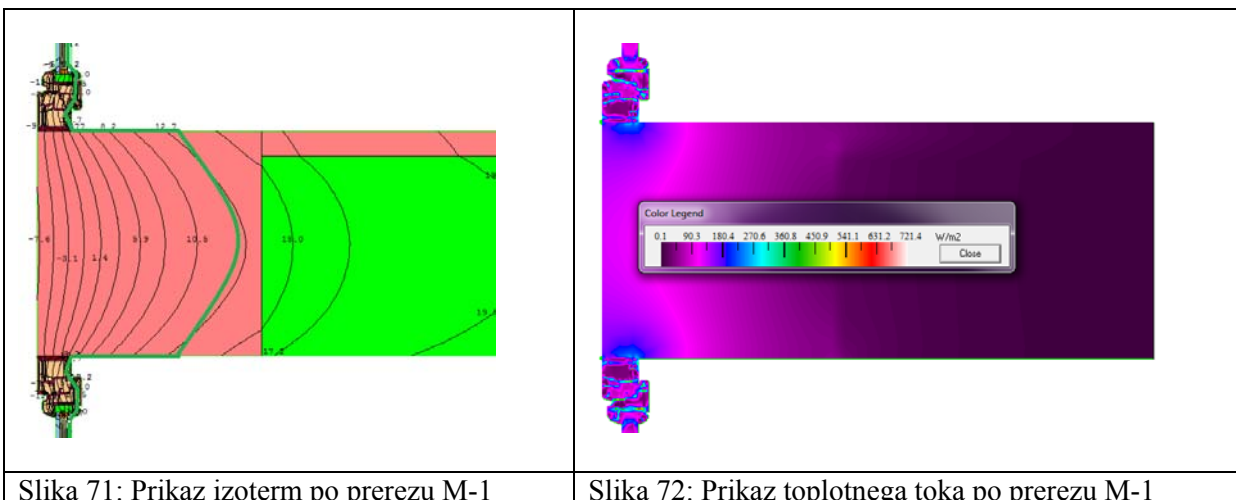
Fasadni ovoj je sestavljen iz vidnega dela medetažne konstrukcije, prefabriciranega betonskega elementa parapeta, ki pokriva parapet okna in transparentnega dela okna. Medetažna konstrukcija je konstrukcijski element »super strop 40«, ki z zunanje strani ni toplotno izoliran. Križanje medetažne konstrukcije in zunanje stene predstavlja linijski toplotni most po celotni dolžini in širini stavbe. Tip toplotnega mostu M-1 se pojavi v dolžini 67,40 m v treh nadstropjih in v dolžini 1,30 m štiriindvajsetkrat v petih nadstropjih.



Slika 70: Prerez detajla M-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 71 je po prerezu prikazan potek izoterm skozi okna in medetažno konstrukcijo. Razvidno je, da je najnižja temperatura $T = 2,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na mestu križanja okenskega okvirja in armiranobetonskega okvirja. Toplotna prehodnost skozi medetažno konstrukcijo je $U = 4,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 72 prikazuje potek toplotnega toka v prerezu skozi okni in medetažno konstrukcijo. Razvidno je, da je na stiku stebra in okenskega okvirja toplotni tok največji. Doseže vrednost $q = 270,6 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 71 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

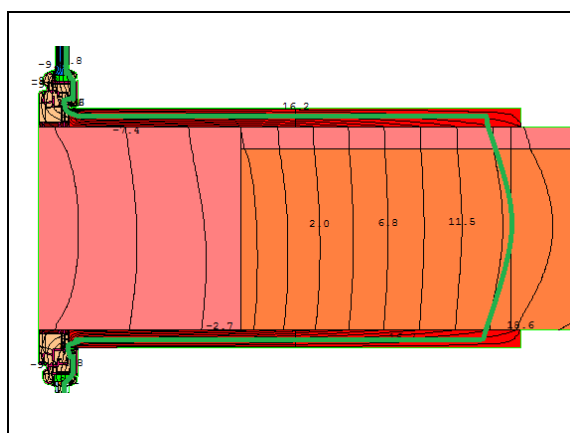
Medetažna konstrukcija z zunanje strani ni toplotno izolirana, zato na križanju z zunanjo steno prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 15 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,45$, ki je večji od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu znaša $\Psi = 2,05 \text{ W/(m K)}$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 15: Prikaz rezultatov

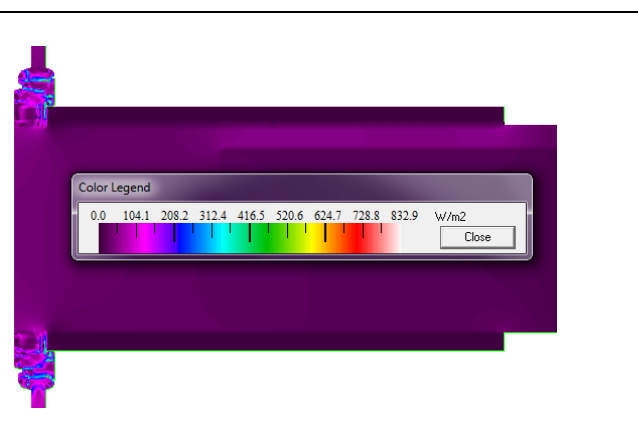
Konstrukcijski sklop	$U \text{ [W/(m}^2 \text{ K)]}$	Dolžina [m]	$\Psi \text{ [W/(m K)]}$	$f_{Rsi} \text{ [-]}$
Okno zgoraj	1,45	0,74	2,05	0,45
Okno spodaj	2,72	1,16		
Okna in medetaža	2,57	2,44		

Predlagane izboljšave

Rešitev poiščemo s pomočjo matrike križanj, prikazane na Sliki 33. Ugotovimo, da bi bila najprimernejša in najenostavnejša rešitev montaža toplotne izolacije na zunanji strani. Zaradi kulturnovarstvenih pogojev to ni mogoče, ker posegi na fasadi niso dovoljeni. Izberemo možnost dodatne toplotne izolacije na notranji strani tal in stropa v debelini 4 cm v pasu vzdolž fasade. V prvem primeru vzamemo pas širine 50 cm, vendar ugotovimo, da rezultati ne zadostijo pogojem iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23], ker je širina pasu premajhna. Pri širini 1,00 m se toplotna prehodnost skozi zunanji rob medetažne konstrukcije zmanjša na $U = 1,12 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, kar je še vedno višja vrednost od dovoljene po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Vrednost linijskega toplotnega mostu po dodani toplotni izolaciji $\Psi = 0,49 \text{ W/(m K)}$. Širina dodatne toplotne izolacije zadostuje, da ni možnosti nastanka površinske kondenzacije, faktor $f_{Rsi} = 0,85$. Površinska temperatura najhladnejšega dela je $T = 16,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Z zeleno linijo je na Sliki 73 prikazana ravnina rosišča.



Slika 73: Prikaz izoterm po prerezu M-1, predlagane izboljšave

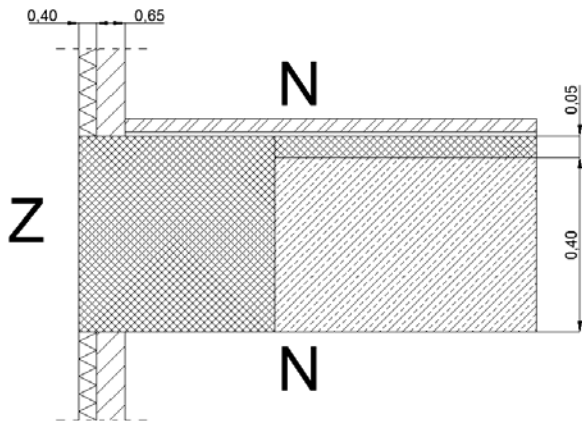


Slika 74: Prikaz toplotnega toka po prerezu M-1, predlagane izboljšave

6.4.9. Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije južne strani stavbe M-2

Obstoječe stanje

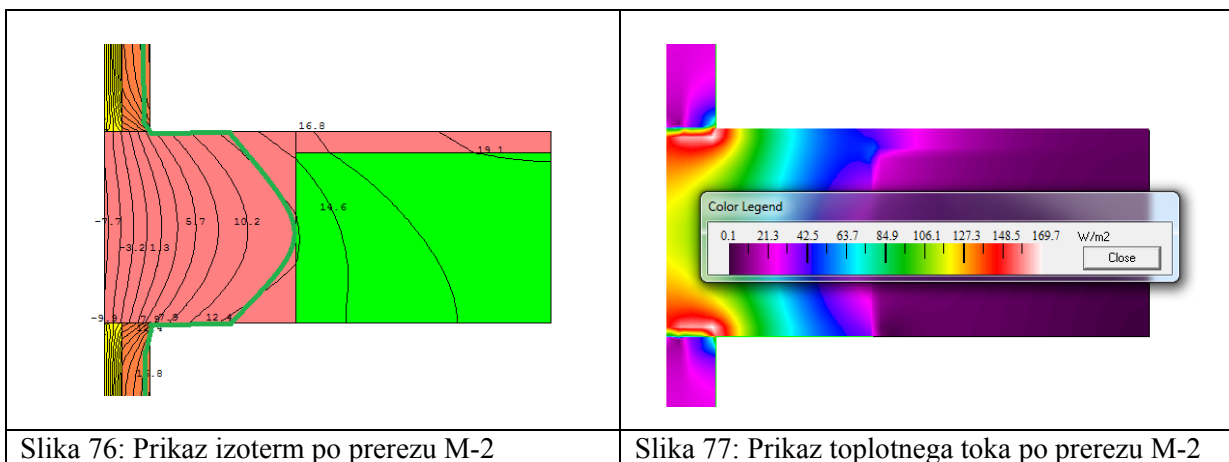
Zunanje stene južnega dela stavbe so sestavljene iz dveh različnih sklopov. Prvi sklop je fasadni ovoj, zaščiten s prefabriciranimi betonskimi elementi, ki pokriva žlindrino volno in opeko NF. Prav tako je s prefabriciranimi betonskimi elementi pokrita medetažna konstrukcija, ki navzven ni toplotno izolirana. Tip toplotnega mostu M-2 v dolžini 1,30 m se na stavbi pojavi v petih nadstropjih po štiriindvajsetkrat, v dolžini 17,60 m v štirih nadstropjih in v dolžini 7,00 m v šestih nadstropjih.



Slika 75: Prerez detajla M-2, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 76 je po prerezu prikazan potek izoterm skozi stene in medetažno konstrukcijo. Razvidno je, da je najnižja temperatura na križanju medetažne konstrukcije in stene $T = 4,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi medetažno konstrukcijo $U = 3,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, toplotna prehodnost skozi zunanje stene je $U = 0,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 77 prikazuje potek toplotnega toka skozi prerez medetažne konstrukcije in sten. Razvidno je, da je na stiku medetažne konstrukcije in stene toplotni tok največji, vrednost $q = 170,0 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 76 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

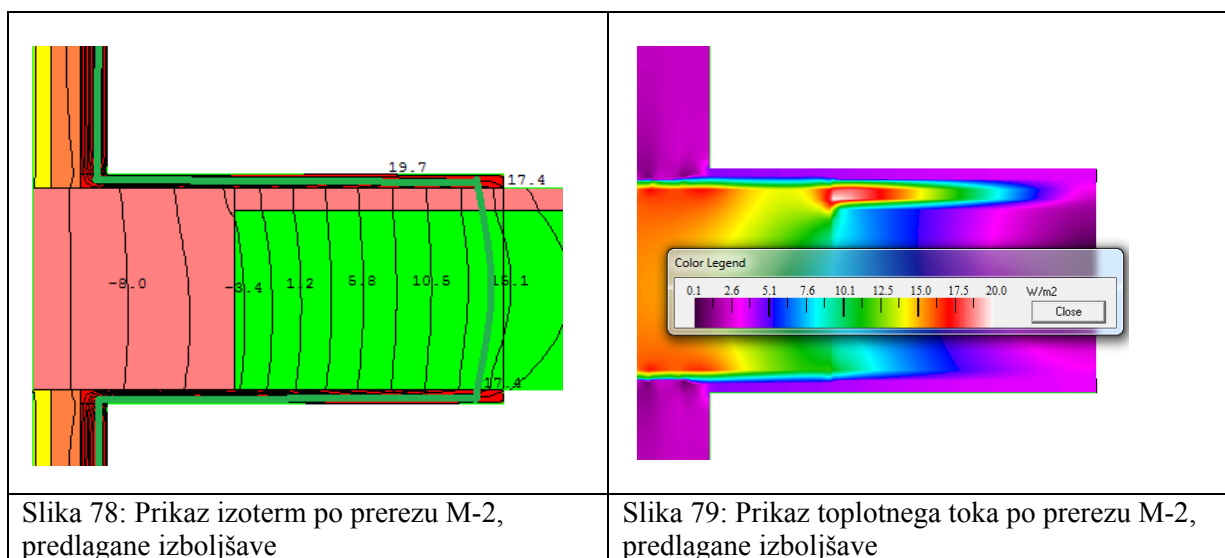
Medetažna konstrukcija z zunanje strani ni toplotno izolirana, zato na križanju z zunanjo steno prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 16 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost površinske kondenzacije, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,52$, ki je manjši od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu $\Psi = 1,76 \text{ W/(m K)}$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 16: Prikaz rezultatov

Konstruktivski sklop	U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$]	Dolžina [m]	Ψ [$\text{W}/(\text{m K})$]	f_{Rsi} [-]
Stena zgoraj	0,65	1,00	1,76	0,52
Stena spodaj	0,65	1,00		
Steni in medetaža	1,25	2,45		

Predlagane izboljšave

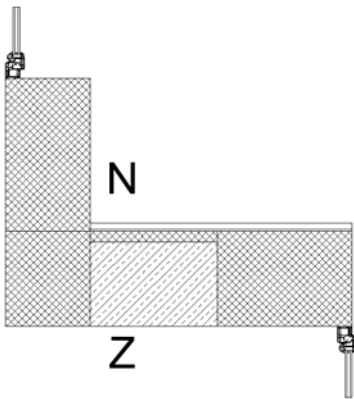
Rešitev poiščemo s pomočjo matrike križanj, prikazane na Sliki 33. Ugotovimo, da bi bila najprimernejša in najenostavnejša rešitev montaža toplotne izolacije na zunanji strani. Zaradi kulturnovarstvenih pogojev to ni mogoče, ker posegi na fasadi niso dovoljeni. Izberemo možnost dodatne toplotne izolacije na tleh in stropa v debelini 3 cm v pasu 1,00 m vzdolž fasade. Toplotna prehodnost skozi medetažno konstrukcijo se zmanjša na $U = 0,99 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, kar je več od dovoljenih vrednosti po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Vrednost $\Psi = 0,45 \text{ W}/(\text{m K})$ po dodani toplotni izolaciji. Ker ugotovimo, da rešitev ne odpravi toplotnega mostu, dodamo 6 cm debele vakuumske izolacijske panele na notranjo stran obeh sten. Simulacija pokaže izboljšane rezultate skozi medetažno konstrukcijo: $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, $\Psi = 0,20 \text{ W}/(\text{m K})$, $f_{Rsi} = 0,92$. Linijskega toplotnega mostu nismo odpravili. Površinska temperatura najhladnejšega dela je $T = 19,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Po dodanih vakuumskih izolacijskih panelih ni možnosti nastanka površinske kondenzacije. Z zeleno linijo je na Sliki 78 prikazana ravnina rosišča.



6.4.10. Križanje ab stene in medetažne konstrukcije v pritličju P-1-1 in P-1-2

Obstoječe stanje

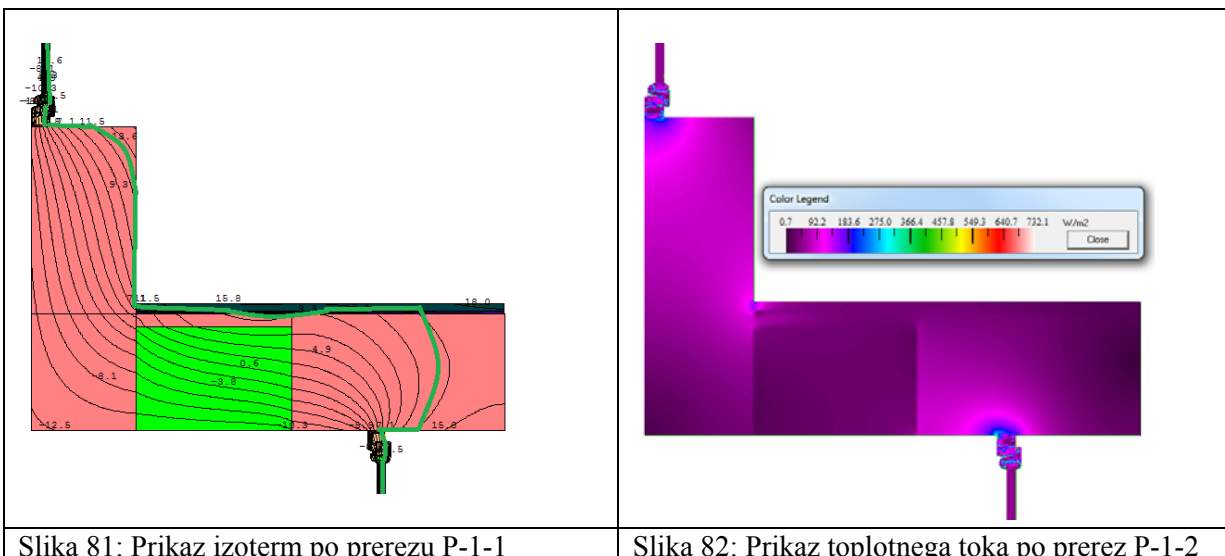
Obravnavani detajl smo razdeli na dva dela: prvi toplotni most je na križanju okna in armiranobetonskega venca P-1-1, drugi toplotni most je na križanju okna in medetažne konstrukcije P-1-2. Previsni del medetažne konstrukcije je izveden kot »super strop 40« in se konzolno nadaljuje v zunanjo steno višine 1,1 m. Nad betonskim vencem so med stebri transparentni deli fasade. Konzola s spodnje niti s stranske strani ni toplotno izolirana. Prvi tip toplotnega mostu P-1 meri 67,4 m, drugi tip toplotnega mostu se v dolžini 64,6 m pojavi na severni in južni strani stavbe.



Slika 80: Prerez detajla P-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 81 je po prerezu prikazan potek izoterm skozi okno, steno in medetažno konstrukcijo. Razvidno je, da je najnižja temperatura $T = 2,3\text{ °C}$ na mestu križanja okna in AB venca. Temperatura na notranji strani križanja okna z medetažno konstrukcijo $T = 8,0\text{ °C}$. Toplotna prehodnost skozi celotni AB previsni del $U = 1,65\text{ W/(m}^2\text{ K)}$. Slika 82 prikazuje potek toplotnega toka skozi prerez. Razvidno je, da je na stiku medetažne konstrukcije nad pritličjem in okenskega okvirja toplotni tok največji, vrednost $q = 275,0\text{ W/m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 81 prikazana ravnina rosišča.



Definicija in analiza problema

Vertikalna konzolna stena in medetažna konstrukcija nista toplotno izolirani. V tem delu prihaja do povečanega toplotnega toka. V Preglednici 17 in Preglednici 18 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Zaradi nizke površinske temperature na obeh križanjih obstaja možnost površinske kondenzacije, kar potrdimo z izračunom faktorja $f_{Rsi} = 0,45$ in $f_{Rsi} = 0,62$, ki sta manjša od zahtevane vrednosti 0,75. Vrednost linijskega toplotnega mostu $\Psi = 0,12$ W/(m K) na križanju okno - betonski venec in $\Psi = 0,012$ W/(m K) na križanju okno - medetažna konstrukcija.

Preglednica 17: Prikaz rezultatov P-1-1

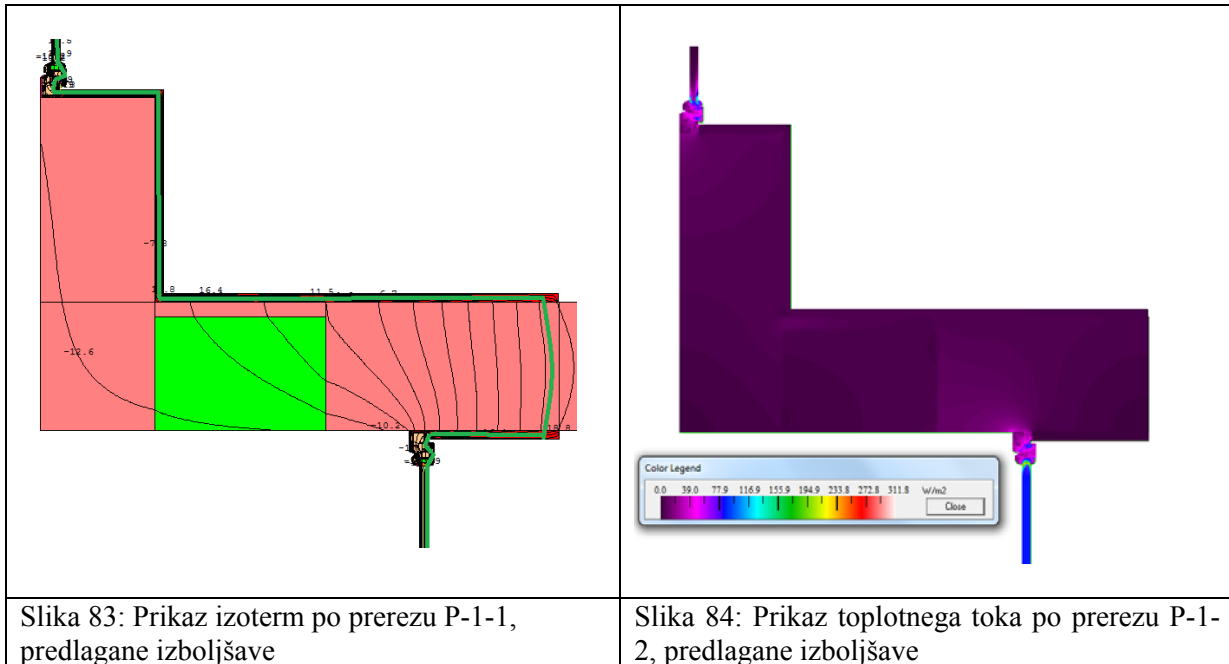
Konstrukcijski sklop	U [W/(m ² K)]	Dolžina [m]	Ψ [W/(m K)]	f_{Rsi} [-]
Okno	1,84	0,37	0,12	0,45
Vertikalna stena	2,69	0,72		
Skupno	2,40	1,04		

Preglednica 18: Prikaz rezultatov P-1-2

Konstrukcijski sklop	U [W/(m ² K)]	Dolžina [m]	Ψ [W/(m K)]	f_{Rsi} [-]
Okno	0,66	1,15	0,012	0,62
Horizontalni del AB	1,67	0,89		
Skupno	1,67	2,04		

Predlagane izboljšave

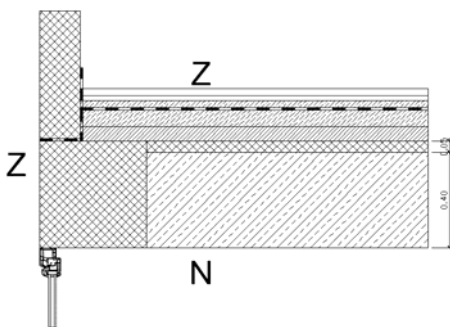
Celotni previsni del z notranje strani toplotno izoliramo z dodanimi vakuumskimi izolacijskimi paneli v debelini 3 cm. Vakuumske izolacijske panele v širini 0,50 m dodamo na spodnjo stran medetažne konstrukcije, saj s tem preprečimo možnost nastanka površinske kondenzacije na križanju okna in medetažne konstrukcije. Toplotna prehodnost skozi celotni previsni del se po dodani toplotni izolaciji zmanjša na $U = 0,36$ W/(m² K), kar je več od dovoljenih vrednosti po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Rezultati simulacije nam pokažejo, da se linijska toplotna prehodnost na križanju okna in stene poveča na $\Psi = 0,03$ W/(m K) in zmanjša na $\Psi = 0,001$ W/(m K) za križanje okno - medetažna konstrukcija. Po dodanih vakuumskih izolacijskih panelih ni možnosti nastanka površinske kondenzacije. Z zeleno linijo je na Sliki 83 prikazana ravnina rosišča.



6.4.11. Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije S-1

Obstoječe stanje

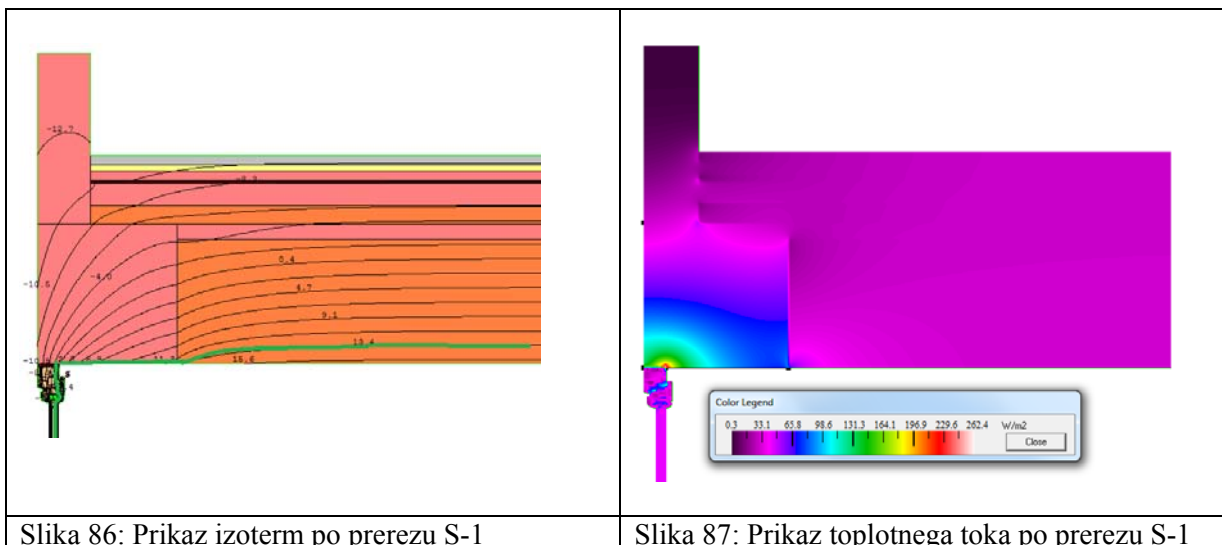
Strešna konstrukcija je izvedena kot »super strop 40«, ki je umeščena med elemente AB okvirne konstrukcije. Zunanja stena oziroma okna segajo do armiranobetonskega okvirja, nad okvirjem je armiranobetonski parapetni zid, ki je nameščen direktno na okvir stavbe. Strešna konstrukcija je »super strop«, zaščitena je s toplotno izolacijo debeline 1 cm, hidroizolacijo, estrihom in betonskimi ploščami iz pranega proda. Tip toplotnega mostu S-1 je dolžine 184,00 m.



Slika 85: Prerez detajla S-1, obstoječe stanje. Z – zunaj, N – notri.

Analiza obstoječega stanja

Na Sliki 86 je po prerezu prikazan potek izoterm skozi okno in streho. Razvidno je, da je najnižja površinska temperatura $T = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Toplotna prehodnost skozi AB okvirno konstrukcijo nad oknom je $U = 1,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Slika 87 prikazuje potek toplotnega toka skozi prerez. Razvidno je, da je na stiku AB okvirne konstrukcije in okenskega okvirja toplotni tok največji, vrednost $q = 262,4 \text{ W}/\text{m}^2$. Z zeleno linijo je na Sliki 86 prikazana ravnina rosišča.



Slika 86: Prikaz izoterm po prerezu S-1

Slika 87: Prikaz toplotnega toka po prerezu S-1

Definicija in analiza problema

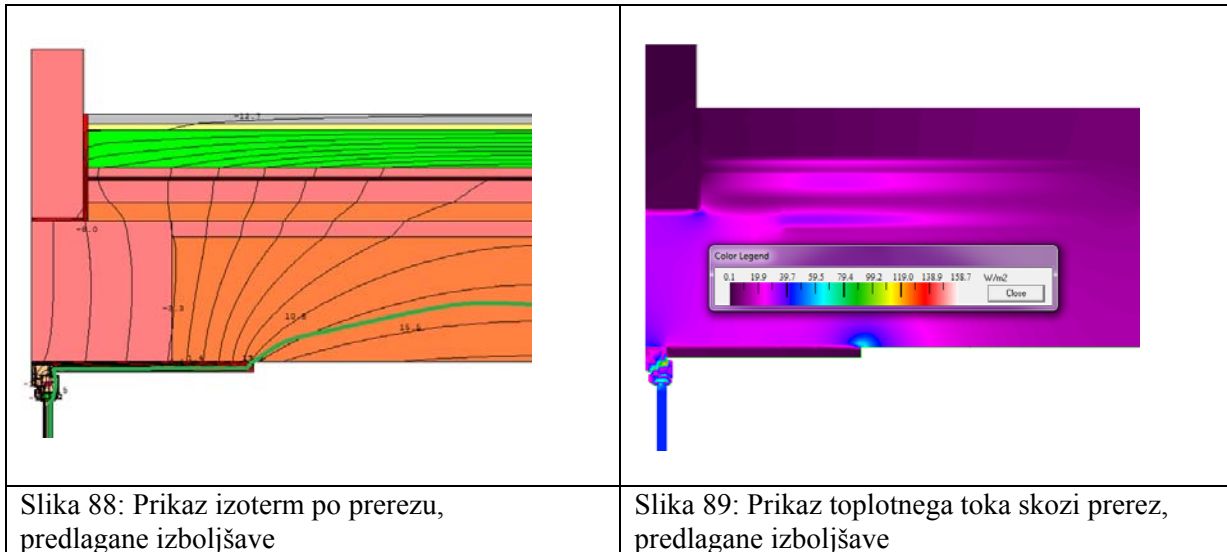
Medetažna konstrukcija z zunanje strani ni toplotno izolirana, zato na križanju z zunanjo steno prihaja do povečanega toplotnega toka. Zaradi nizke površinske temperature obstaja možnost kondenzacije. V Preglednici 19 so prikazani odčitani rezultati U s pomočjo programa in izračunana vrednost Ψ in f_{Rsi} . Z izračunom faktorja f_{Rsi} ugotovimo, da je možnost nastanka plesni. Vrednost linijskega toplotnega mostu $\Psi = 1,15 \text{ W}/(\text{m K})$, kar pomeni, da je treba skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] popraviti detajle.

Preglednica 19: Prikaz rezultatov

Konstrukcijski sklop	$U \text{ [W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$	Dolžina [m]	$\Psi \text{ [W}/(\text{m K})]$	$f_{Rsi} [-]$
Okno	1,29	1,16	1,15	0,39
Strop	0,79	1,46		
Okno, ab, strop	0,92	4,13		

Predlagane izboljšave

Na zgornjo stran strešne konstrukcije smo predvideli 0,12 m ekstrudiranega polistirena. Pod in stransko od betonskega parapetnega zida smo predvideli 1 cm debele vakuumske izolacijske panele, zato da smo toplotno zaščitili stranski del zaključnih slojev strešne konstrukcije. Na notranji strani smo predvideli 0,60 m širok pas vakuumskih izolacijskih panelov, ki preprečijo možnost nastanka površinske kondenzacije. Rezultati linijske toplotne prehodnosti se izboljšajo na $\Psi = 0,20 \text{ W}/(\text{m K})$. Površinska temperatura najhladnejšega dela je $T = 13,3 \text{ °C}$ na stiku vakuumskih izolacijskih panelov in stropa. Faktor $f_{Rsi} = 0,76$, kar pomeni, da ni možnosti nastanka površinske kondenzacije. Toplotna prehodnost skozi AB okvirno konstrukcijo se zmanjša na $U = 0,97 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Toplotna prehodnost skozi strešno konstrukcijo je $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Z zeleno linijo je na Sliki 88 prikazana ravnina rosišča.



6.5. Ugotovitve

Z analizo izbranih križanj smo ugotovili, da na stavbi obstaja več različnih pozicij in geometrij linijskih toplotnih mostov. Pojavljajo se v vertikalni in horizontalni smeri. Na celotni stavbi je evidentiranih 13 različnih linijskih toplotnih mostov. V skupino vertikalnih z oznakami »V« spadajo toplotni mostovi na stikih z armiranobetonskimi stebri. V skupino z oznako »O« spadajo vsa križanja z okni na vzhodni in zahodni strani fasadnega ovoja. Ugotovili smo, da na teh križanjih ni toplotnega mostu, ker se okna stikajo s toplotno izolacijo, zato jih nismo obravnavali. V skupino »P« spadajo toplotni mostovi medetažne konstrukcije nad pritličjem. V skupino »M« spadajo toplotni mostovi medetažnih konstrukcij v predavalnicah in kabinetih. V skupino »S« spada toplotni most strehe in zunanje stene. Ugotovili smo, da se na stavbi pojavljajo še nekateri drugi manjši toplotni mostovi, vendar smo jih v računu zanemarili, saj je njihov vpliv na porabo energije v stavbi zanemarljiv.

V Preglednici 20 so zbrani rezultati linijske toplotne prehodnosti za vse obravnavane toplotne mostove začetnega in izboljšanega stanja in njihove dolžine. Skupna dolžina vseh toplotnih mostov na stavbi je 1731,60 m. Dolžina horizontalnih linijskih toplotnih mostov je večja od vertikalnih.

Rešitve toplotnih mostov smo iskali glede na linijsko toplotno prehodnost in njene dovoljenje vrednosti iz TSG-1-2010: Učinkovita raba energije [23]. V kolikor nismo zadostili pogojem, smo preverili možnost kondenzacije na notranji površini konstrukcijskih sklopov. Ugotovili smo, da se pri parcialnem reševanju toplotnih mostov, kot na primer pri stebrih v vogalih, možnost površinske kondenzacije na notranji strani stebra pomakne na steno. Temperatura rosišča pri projektni temperaturi notranjega zraka 21 °C in 60-odstotni relativni vlažnosti zraka v prostoru je pri 13 °C. Dejansko stanje relativne vlažnosti na obravnavani stavbi v zimskem času je nižje od projektne relativne vlažnosti, zato se kondenzacija ne pojavlja. Na primer temperatura rosišča pri notranji temperaturi zraka 21 °C in relativni vlažnosti 30 % je – 2,5 °C.

Preglednica 20: Linijski toplotni mostovi celotne stavbe

Lokacija toplotnega mosta	Oznaka toplotnega mosta	Dolžina [m]	Ψ_e [W/(m K)]	Ψ_e [W/(m K)] Izboljššan
Vertikalni toplotni mostovi				
Križanje steber okno v pritličju	V-1	96,00	0,73	0,20
Križanje vogalnih stebrov v pritličju	V-2	16,00	0,77	0,14
Križanje stebrov in zunanjih sten na južnem delu	V-3	5,00	1,53	0,20
Križanje zunanje stene in okna v kabinetih	V-4	360,00	0,006	0,004
Križanje stebrov in oken v kabinetih	V-5	60,00	1,06	0,23
Križanje vogalnih stebrov	V-6	96,00	1,58	0,19
Križanje steber - okno	V-7	384,00	1,08	0,19
Horizontalni linijski mostovi				
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije na severni strani stavbe	M-1	358,20	2,05	0,49
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije na južni strani	M-2	268,40	1,76	0,20
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije nad prvim nadstropjem	P-1 - 1	134,80	0,12	0,03
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije nad prvim nadstropjem	P-1-2	129,20	0,012	0,001
Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije	S-1	184,00	1,15	0,20

Najbolj problematični so linijski toplotni mostovi, ki se pojavljajo po celotnih višinah in dolžinah stavbe, kot na primer križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije na severni strani stavbe. Ti obsegajo dolžino 358,20 m, linijska toplotna prevodnost je $\Psi_e = 2,05$ W/(m K). Izračunana vrednost je v primerjavi z mejno vrednostjo, določeno v TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23], večja za desetkrat. Stanje smo izboljšali z dodanimi vakuumskimi izolacijskimi paneli na strop in tla v širini pasu 1,0 m. Izboljšani rezultati niso zadostili mejnim vrednostim, je pa širina pasu zadoščala, da ni možnosti nastanka površinske kondenzacije. Linijska toplotna prehodnost križanja zunanje stene in medetažne konstrukcije na južni strani stavbe v skupni dolžini 268,40 m je $\Psi_e = 1,76$ W/(m K). Rešitev je bila enaka kot pri križanju na severni strani stavbe, le da so v tem primeru dodani še vakuumski izolacijski paneli po celotni višini stene. S tako rešitvijo zadostimo vrednostim, določenim v TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23].

Uporabljeni ukrepi na celotni stavbi za zadostitev pogojem linijske toplotne prehodnosti in toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov iz TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] so bili:

- toplotna izolacija v obliki vakuumskih izolacijskih panelov v širini pasu 1,0 m na stropu in tleh;

-
- toplotna izolacija v obliki vakuumskih izolacijskih panelov na notranji strani sten;
 - toplotna izolacija v obliki vakuumskih izolacijskih panelov na notranji strani AB stebrov;
 - toplotna izolacija v obliki vakuumskih izolacijskih panelov na stiku zaključnih slojev strešne konstrukcije in parapetnega zidu na strehi;
 - toplotna izolacija v obliki ekstrudiranega polistirena na strehi.

S temi ukrepi smo dosegli, da se je linijska toplotna prehodnost konstrukcijskih sklopov v večini primerov pomaknila v območje, ki že zadovoljuje zahteve Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah [22]. Izjema sta križanja V-5 in M-1, kjer s predlaganimi ukrepi nismo zadostili zahtevam pravilnika.

V kolikor bi bilo mogoče dodati toplotno izolacijo na zunanji strani fasadnega ovoja, bi bila izvedba lažja in bolj učinkovita. Vertikalni toplotni mostovi ob oknih in horizontalni toplotni mostovi medetažnih konstrukcij bi bili lažje rešljivi.

7. UKREPI ZA IZBOLJŠANJE TOPLOTNIH KARAKTERISTIK STAVBE IN OCENA EKONOMSKE UPRAVIČENOSTI

7.1. Ukrepi za izboljšanje toplotnih karakteristik stavbe

V prejšnjih poglavjih smo spoznali konstrukcijske sklope in linijske toplotne mostove stavbe in ugotovili, da ima stavba mnogo pomanjkljivosti, ki vplivajo na porabo energije. Odločili smo se, da bomo energijske lastnosti stavbe izračunali s pomočjo programa TOST in preverili možnosti izboljšanja toplotnih karakteristik stavbe.

Simulirali smo izhodiščno stanje stavbe in v primerjavi z zahtevami iz TSG-01-2010: Učinkovita raba energije [23] predlagali ukrepe za izboljšanje.

Za vsak ukrep smo opredelili strošek investicijsko vzdrževalnih del. Strošek predvidenih del bomo ocenili na podlagi ocenjene vrednosti gradbenih in obrtniških del. Zaradi zahtevnih detajlov toplotnih mostov predvidimo 150 €/m² z upoštevanimi vakuumskimi izolacijskimi paneli in zaključnimi deli.

Ceno 150 €/m² sestavljajo:

- dobava vakuumskih izolacijskih panelov, dobavljeni paneli morajo biti predhodno razrezani na točno določene dimenzije;
- montaža vakuumskih izolacijskih panelov, izvedba zahtevnih detajlov;
- zaključna obdelava vertikalnih površin z mavčno kartonastimi ploščami ali
- zaključna obdelava horizontalnih površin z upoštevanjem PVC zaključnega sloja.

Glede na posamezne ukrepe in glede na stroške investicijsko vzdrževalnih del bomo ocenili ekonomski smisel izboljšav.

7.1.1. Obstoječe stanje stavbe

7.1.1.1. Izhodiščni podatki

Izhodiščni podatki so:

- vrsta stavbe po Uredbi o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena [40] – nestanovanjska stavba;
- skladno s Pravilnikom o učinkoviti rabi energije v stavbah [22] so mejne vrednosti »Do 31. 12. 2014«;
- način upoštevanja toplotnih mostov je po »S katalogi, računalniškimi simulacijami«;
- toplotna prevodnost zemljine se vzame 2 W/(m K).

Klimatski podatki stavbe (projektna zunanja temperatura, temperaturni primanjkljaj, trajanje ogrevalne sezone, globalno sončno obsevanje) so pridobljeni iz spletnega portala ARSO glede na koordinate stavbe.

Določitev računskih obdobij smo določili glede na zasedenost stavbe. Stavba se od ponedeljka do petka ogreva od 5. do 21. ure, čez vikende se stavba ogreva 16 ur.

Za ogrevanje, hlajenje in ogrevanje sanitarne tople vode smo učinkovitost določili na podlagi priporočenih vrednosti iz priročnika Računalniški program (TOST) za izračun energetske bilance stavbe po Pravilniku o učinkovitosti rabe energije v stavbah, upoštevajoč SIST EN ISO 13790 in TSG-1-004:2010 [39].

Preglednica 21: Učinkovitost energentov

		Generacija	Distribucija	Emisija
Ogrevanje	Daljinska toplota s kogeneracijo	0,90	0,80	0,80
Hlajenje	Električna energija	3,50	0,90	0,80
Topla voda	Daljinska toplota s kogeneracijo	0,90	0,80	1,00

Preglednica 22: Izhodiščni podatki

		CONA 1			
Volumen cone V_e [m ³]	Klet	3449,00			
	Pritličje	4599,00			
	Predavalnice, komunikacije, kabineti	30259,00			
	Skupaj	38307,00			
Uporabna površina cone A_u [m ²]	Klet	1034,00			
	Pritličje	1034,00			
	Predavalnice, komunikacije	4198,00			
	Kabineti	2509,00			
	Skupaj	8775,00			
Površina netransparentnih delov ovoja A [m] toplotna prehodnost U [W/(m ² K)]	Zunanje stene	Streha			
	2527,00	1658,00			
	1,67	0,54			
Transparentni konstrukcijski sklopi		A_w [m ²]	U_w [W/(m ² K)]	$g_{gl,w}$	$F_{F,w}$
	Sever	632,00	1,30	0,58	0,65
	Vzhod	1113,00	1,60	0,58	0,70
	Jug	115,00	1,30	0,58	0,70
	Zahod	115,00	1,60	0,58	0,70
Projektne temperature	notranje	Dan	Noč	Vikend	Nezaseden o
	Poleti θ_{iph} [°C]	26	26	26	26
	Pozimi θ_{iph} [°C]	21	17	21	17

Način prezračevanja	Naravno prezračevanje, skladno s [38] v času zasedenosti prostorov izmenjava $0,5 \text{ h}^{-1}$, v času nezasedenosti $0,2 \text{ h}^{-1}$.			
Povprečna moč dobitkov notranjih virov Φ_i [W]	99324,00	8277,00	16554,00	8277,00

Stavba nima v okolici nobene visoke stavbe, zato predpostavimo, da je faktor osenčenosti vrednosti 1,0.

Odločili smo se, da celotno stavbo definiramo kot eno cono, saj je celotna stavba enotno ogrevana, termostatski ventili niso nameščeni na vseh radiatorjih.

Preglednica 23: Vrednosti uporov mejnih zračnih plasti glede na konstrukcijski sklop.

Konstrukcijski sklop	Ri [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]	Re [$\text{m}^2 \text{ K/W}$]
Zunanji zid	0,13	0,04
Tla na terenu	0,17	0
Ravne strehe	0,10	0,04

Ker se v programu lahko za ovoj doda samo eno toplotno prehodnost, smo jo za posamezne strani neba določili glede na deleže konstrukcijskih sklopov.

Linijske toplotne mostove smo izračunali s programom Therm. Dodali smo jih glede na Preglednico 19.

Porabo energije za razsvetljavo izračunamo skladno s TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23]. Izberemo vrsto stavbe »7 - 1263 – Stavbe za izobraževanje in znanstveno-raziskovalno delo«, gostoto moči svetilk $P_N = 13 \text{ W/m}^2$, zasilno razsvetljavo, ročni način upoštevanja prisotnosti v prostoru in ročni način upoštevanja dnevne svetlobe.

Notranje vire lahko določimo na podlagi metabolizma oseb, povprečne površine odrasle osebe, števila oseb. Lahko pa jih določimo s pomočjo SIST EN ISO 13790.

7.1.1.2. Rezultati obstoječega stanja

Iz Preglednice 24 je razvidno, da stavba ne izpolnjuje mejnih vrednosti iz Pravilnika o učinkoviti rabi energije [23]. Z rdečo barvo so označeni rezultati, ki presegajo mejne vrednosti.

Preglednica 24: Energijske lastnosti stavbe, obstoječe stanje

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	1,46	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.834.649	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	865.649	291.741
Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	56.826	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	98,65	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ² a)]	22,60	7,62

Izračunani koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe H'_T presega največje dovoljene vrednosti za 147 %, letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine pa kar za 196 %.

Dovoljena toplotna prehodnost netransparentnih delov ovoja stavbe po TSG-1-2010: Učinkovita raba energije [23] je 0,28 W/(m² K), v primeru osnovnega stanja pa kar 1,67 W/(m² K). Na stavbi obstaja 1731,60 m linijskih toplotnih mostov z različno linijsko toplotno prehodnostjo do vrednosti 2,05 W/(m K). Streha s toplotno prehodnostjo 0,54 W/(m² K) presega dovoljeno vrednost za 170 %.

V nadaljnjih korakih smo poizkušali zmanjšati toplotno prehodnost netransparentnega dela ovoja in eliminirati toplotne mostove.

7.1.2. Izboljšano stanje – primer 1

7.1.2.1. Izhodiščni podatki

V prvi fazi izboljšav smo upoštevali razliko zaradi odpravljenih linijskih toplotnih mostov. Linijske toplotne mostove smo rešili z dodatno toplotno izolacijo v vertikalni in horizontalni smeri. Dodana je bila toplotna izolacija na vse armiranobetonske stebre, ki se dotikajo fasadnega ovoja. Toplotna izolacija je bila dodana na betonski venec v prvem nadstropju, in sicer po celotnem previsnem in vertikalnem delu.

V primeru 1 upoštevamo izboljšave križanj V-1, V-2, V-3, V-5, V-6, V-7, M-1, M-2, P-1-1, P-1-2, S-1. Linijska toplotna mosta V-5 v dolžini 60,00 m z vrednostjo 0,23 W/(m K) in M-1 v dolžini 358,20 m in vrednost 0,49 W/(m K) upoštevamo, ker ju nismo uspeli povsem odpraviti. V primeru križanja S-1 dodamo toplotno izolacijo na streho v obliki ekstrudiranega polistirena (XPS), kot je prikazano v Preglednici 25. Križanja V-4 ne upoštevamo, ker je toplotna izolacija južne strani stavbe upoštevana v primeru 3.

Preglednica 25: Sestava konstrukcijskega sklopa strešne konstrukcije KS H-2 – izboljšano stanje.

Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Toplotna prevodnost λ [W/(m K)]
Omet	0,01	0,93
Super strop 40 opek	0,40	0,52
Tlačna plošča	0,05	2,040
Lahka opeka	0,05	0,20
Izravnalni beton	0,40	1,40
Žlindrina volna	0,01	0,041
Cementni estrih	0,03	1,40
Bitumenski trak	0,01	0,19
Ekstrudirani polistiren XPS	0,12	0,04
Gramoz	0,03	1,50
Betonske plošče prane	0,03	1,51
Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	0,20	

Slika 90: Sestava strešne konstrukcije KS H-2 – izboljšano stanje

Toplotno prehodnost za celotno stavbo smo izračunali s pomočjo povprečja posameznih toplotnih prevodnosti skozi različne konstrukcijske sklope. Izračunana povprečna toplotna prehodnost z upoštevanimi izboljšavami za celotni fasadni ovoj stavbe je $U = 0,92 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Za strešno konstrukcijo upoštevamo izboljšano toplotno prehodnost $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, ki ustreza maksimalni dovoljeni vrednosti za toplotno prehodnost ravnih streh. Izboljšane toplotne prehodnosti, ki smo jih upoštevali pri izračunu nove toplotne prehodnosti, so pridobljene z analizo v Thermu.

Ostali podatki so enaki izhodiščnemu primeru. Analizo energijskih lastnosti stavbe izvedemo v programu TOST.

7.1.2.2. Rezultati

Preglednica 26: Energijske lastnosti stavbe, primer 1

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	0,81	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.453.143	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	487.336	291.741
Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	94.277	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	55,54	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ³ a)]	12,72	7,62

V Preglednici 26 so z rdečo barvo označeni rezultati, ki presegajo dovoljene vrednosti. Izračunani koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe H'_T presega največje dovoljene vrednosti za 37 %, kar je 110-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje. Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine presega največje dovoljene vrednosti za 67 %, kar je 129-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje.

7.1.2.3. Strošek investicijsko vzdrževalnih del

V Preglednici 27 so prikazani stroški investicijsko vzdrževalnih del za primer 1.

Preglednica 27: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 1

Križanje	Oznaka	Količina [m ²]	Cena [EUR]
Križanje steber okno v pritličju	V-1	153,60	23.040,00
Križanje vogalnih stebrov v pritličju	V-2	14,40	2.160,00
Križanje stebrov in zunanjih sten na južnem delu	V-3	12,00	1.800,00
Križanje stebrov in oken v kabinetih	V-5	276,00	41.400,00
Križanje vogalnih stebrov	V-6	12,80	1.920,00
Križanje steber - okno	V-7	307,2	46.080,00
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije	M-1	358,20	53.730,00
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije na južni strani	M-2	268,40	40.260,00

Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije nad kletjo	P-1	64,60	9.690,00
Križanje zunanje stene in medetažne konstrukcije nad pritličjem	P-2	132,48	19.872,00
Križanje zunanje stene in strešne konstrukcije	S-1	184,00	27.600,00
Izvedba toplotne izolacije strešne konstrukcije se izvede z izvedbo klasične toplotne izolacije z dodano 12 cm ekstrudiranega polistirena XPS. Ohrani se obstoječo hidroizolacijo in uporabi se obstoječe betonske plošče. Upoštevamo ceno 50 EUR/m ² .	S-1	1208,00	60.400,00
Skupaj [EUR]		327.952,00	

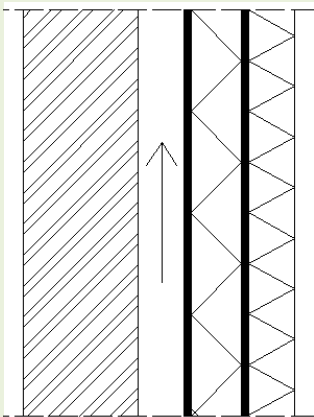
Izboljšanje toplotnih karakteristik stavbe za primer 1 znaša 327.952,00 EUR, kar znese 37,37 EUR/m² neto tlorisne površine stavbe. Največji strošek je dodatna toplotna izolacija na zunanji strani strehe, za katero smo uporabili ekstrudirani polistiren v debelini 12 cm.

7.1.3. Izboljšano stanje – primer 2

7.1.3.1. Izhodiščni podatki

K že izboljšanim pogojem iz primera 1 smo predvideli dodatno toplotno izolacijo na notranji strani severnega dela fasadnega ovoja stavbe. Na severni strani stavbe so med stebre in medetažne konstrukcije vstavljena okna s spodnjim netransparentnim delom, ki predstavlja parapet. Na parapetni del v višini 0,80 m smo dodali 1,5 cm debele vakuumske izolacijske panele. V Preglednici 28 je prikazan konstrukcijski sklop z dodatnimi vakuumskimi izolacijskimi paneli.

Preglednica 28: Sestava konstrukcijskega sklopa fasade na severni strani KS V-1 – izboljšano stanje.

	Sloj od znotraj navzven	Debelina [m]	Toplotna prevodnost λ [W/(m K)]
	Vakuumski izolacijski panel	0,015	0,004
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Okenski parapet - mineralna volna	0,02	0,040
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Zračna plast	0,02	/
	Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
	Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	0,22	

Slika 91: Sestava parapeta na severni strani stavbe V-1 – izboljšano stanje

Z upoštevanjem dodatne toplotne izolacije na severni strani stavbe se je toplotna prehodnost celotnega netransparentnega dela zmanjšala iz $U = 0,92 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ na $U = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Vsi ostali vhodni podatki so enaki primeru 1.

7.1.3.2. Rezultati

Preglednica 29: Energijske lastnosti stavbe, primer 2

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	0,77	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.417.555	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	462.981	291.741
Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	97.449	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	52,76	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ³ a)]	12,09	7,62

V Preglednici 29 so z rdečo barvo označeni rezultati, ki presegajo dovoljene vrednosti. Izračunani koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe H'_T presega največje dovoljene vrednosti za 30 %, kar je 117-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje in 7-odstotno izboljšanje glede na primer 1. Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine presega največje dovoljenje za 58 %, kar je 138-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje in 8-odstotno izboljšanje glede na primer 1.

Iz rezultatov ugotovimo, da se energijske lastnosti stavbe niso veliko izboljšale, kljub temu da je skupna površina dodane toplotne izolacije več kot 140 m².

7.1.3.3. Strošek investicijsko vzdrževalnih del

Preglednica 30: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 2

	Količina [m ²]	Cena [EUR]
Izvedba toplotne izolacije parapetov oken na severni strani. Površina vakuumskih izolacijskih panelov je sestavljena iz dolžine 2,6 m in višine 0,80 m in debeline 1,5 cm.	143,52	21.528,00
Skupaj [EUR]	21.528,00	

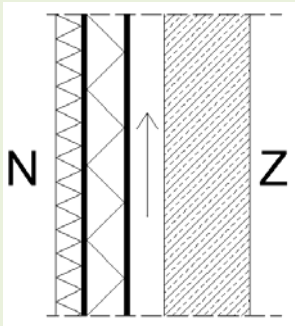
Izboljšanje rezultatov energijskih lastnosti stavbe za primer 2 znaša 21.528,00 EUR, kar znese 2,45 EUR/m² neto tlorisne površine stavbe.

7.1.4. Izboljšano stanje – primer 3

7.1.4.1. Izhodiščni podatki

Z upoštevanjem vseh ukrepov iz primera 2 se odločimo za dodatni ukrep za zmanjšanje toplotne prehodnosti na južni strani stavbe z dodatno toplotno izolacijo na notranji strani fasadnega ovoja na mestih parapetnega dela zunanje stene. Odločili smo se za 1,5 cm debele vakuumske izolacijske panele. V Preglednici 31 in Preglednici 28 je prikazan konstrukcijski sklop z dodatnimi vakuumskimi izolacijskimi paneli.

Preglednica 31: Sestava fasade na južni strani KSV-4 – izboljšano stanje

 <p>Slika 92: Sestava parapeta, južna stran stavbe KS V-4 – izboljšano stanje</p>	Drugi sklop so polnilo opeke NF, žlindrina volna, zračna plast in prefabricirani betonski elementi. Širina je 1,30 m.		
		Debelina [m]	Toplotna prehodnost λ [W/(m K)]
	Vakuumski izolacijski paneli	0,015	0,004
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Mineralna volna	0,02	0,040
	PVC plošča, okenski okvir	0,005	0,20
	Zračna plast	0,02	/
	Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	0,22		

Z upoštevanjem dodatne toplotne izolacije na južni strani stavbe se je toplotna prehodnost celotnega netransparentnega dela zmanjšala iz $U = 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ na $U = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Vsi ostali vhodni podatki so enaki primeru 2.

7.1.4.2. Rezultati

Preglednica 32: Energijske lastnosti stavbe, primer 3

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	0,75	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.400.365	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	451.134	291.741
Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	99.121	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	52,76	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ³ a)]	11,78	7,62

V Preglednici 32 so z rdečo barvo označeni rezultati, ki presegajo dovoljene vrednosti. Izračunani koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe H'_T presega največje dovoljene vrednosti za 27 %, kar je 120-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje in 3-odstotno izboljšanje glede na primer 2. Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine presega največje dovoljenje za 54 %, kar je 140-odstotno izboljšanje rezultatov glede na izhodiščno stanje in 2-odstotno izboljšanje glede na primer 2.

7.1.4.3. Strošek investicijsko vzdrževalnih del

Preglednica 33: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 3

	Količina [m ²]	Cena [EUR]
Izvedba toplotne izolacije parapetov oken na južni strani stavbe. Površina vakuumskih izolacijskih panelov je sestavljena iz širine 1,3 m in višine 0,80 m ter širine 1,3 m in višine 2,5 m.	493,35	74.002,50
Skupaj [EUR]	74.002,50	

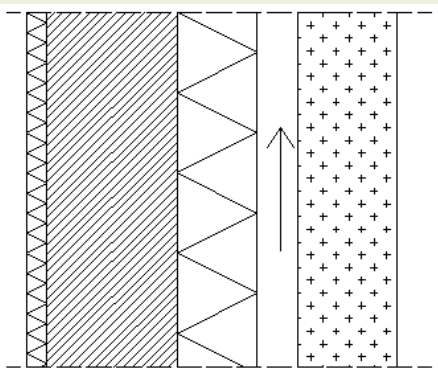
Izboljšanje rezultatov energijskih lastnosti stavbe za primer 3 znaša 74.002,50 EUR, kar znese 8,43 EUR/m² neto tlorisne površine stavbe.

7.1.5. Izboljšano stanje – primer 4

7.1.5.1. Izhodiščni podatki

Z upoštevanjem vseh ukrepov iz primera 3 se odločimo za dodatni ukrep za zmanjšanje toplotne prehodnosti z dodatno toplotno izolacijo na notranji strani fasadnega ovoja na vzhodni in zahodni fasadi. Ker je skupna površina vzhodne in zahodne fasade $1146,00 \text{ m}^2$, se odločimo, da bomo izvedli dve varianti, in sicer z uporabo vakuumskih izolacijskih panelov in z uporabo ekspandiranega polistirena. Debelina vakuumskih izolacijskih panelov je 1,5 cm in debelina ekspandiranega polistirena 10 cm. V Preglednici 34 je prikazan konstrukcijski sklop z dodatno klasično toplotno izolacijo in v Preglednici 35 konstrukcijski sklop z dodanimi vakuumskimi izolacijskimi paneli.

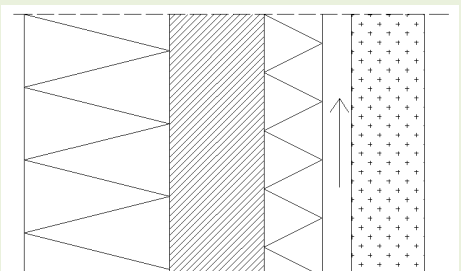
Preglednica 34: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – vakuumski izolacijski paneli

		Debelina [m]	Toplotna prehodnost λ [W/(m K)]
 <p>Slika 93: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – vakuumski izolacijski paneli</p>	Mavčno kartonaste plošče	0,02	0,93
	Vakuumski izolacijski panel	0,014	0,004
	Opeka NF	0,065	0,19
	Žilindrina volna	0,04	0,04
	Zračna plast	0,02	/
	Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
	Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	0,28	

Z upoštevanjem dodatne toplotne izolacije v obliki vakuumskih izolacijskih panelov se je toplotna prehodnost celotnega netransparentnega dela zmanjšala iz $U = 0,74 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ na $U = 0,26 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Vsi ostali vhodni podatki so enaki primeru 3.

Preglednica 35: Sestava konstrukcijskega sklopa zahodne in vzhodne fasade KSV-2 – ekspanzirani polistiren

	Debelina	Toplotna prevodnost
	[m]	λ [W/(m K)]
Mavčno kartonaste plošče	0,02	0,93
Ekspanzirani polistiren	0,13	0,04
Opeka NF	0,065	0,19
Žilindrina volna	0,04	0,04
Zračna plast	0,02	/
Prefabricirani betonski elementi	0,05	/
Toplotna prehodnost U [W/m ² K]	0,28	

Z upoštevanjem dodatne toplotne izolacije v obliki ekspandiranega polistirena je toplotna prehodnost celotnega netransparentnega dela $U = 0,28$ W/(m² K).

7.1.5.2. Rezultati

Preglednica 36: Energijske lastnosti stavbe, primer 4

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	0,58	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.270.076	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	359.391	291.741
Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	115.063	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	40,96	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ³ a)]	9,38	7,62

V Preglednici 36 so z rdečo barvo označeni rezultati, ki presegajo dovoljene vrednosti. Izračunani koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe H'_T zadosti pogojem za največjo dovoljeno vrednost. Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine presega največje dovoljenje za 23 %.

7.1.5.3. Strošek investicijsko vzdrževalnih del

Preglednica 37: Strošek investicijsko vzdrževalnih del za primer 4

	Količina [m ²]	Cena [EUR]
Vakuumski izolacijski paneli VIP	1146,00	171.900,00
Ekspandirani polistiren EPS. Upoštevamo ceno 50 €/m ²	1146,00	57.300,00
Skupaj		

V Preglednici 37 je prikazana primerjava stroškov izvedbe toplotne izolacije z dvema različnima materialoma. Debelina vakuumskih izolacijskih panelov je 1,4 cm, ekspandiranega polistirena 13 cm. Ocenjena vrednost za izvedbo z uporabo vakuumskih izolacijskih panelov je 200 % višja kot z izvedbo z ekspandiranim polistirenom.

7.1.6. Izboljšano stanje – primer 5

7.1.6.1. Izhodiščni podatki

Zanimalo nas je, kaj vse moramo storiti, da ne bomo presegli mejnih vrednosti za letno potrebno toploto za ogrevanje Q_{NM} [kWh] in letne potrebne toplote za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine Q_{NH}/V_e [kWh/(m² a)].

Ukrepi, ki smo jih predvideli, da zadostimo pogojem iz Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah [22]:

- projektno notranjo temperaturo pozimi čez dan smo zmanjšali iz 21 °C na 20 °C;
- projektno notranjo temperaturo za noč smo zmanjšali iz 17 °C na 16 °C;
- projektno notranjo temperaturo za vikend smo zmanjšali iz 21 °C na 19 °C;
- toplotno prehodnost strehe smo zmanjšali na $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ z dodatno toplotno izolacijo 5 cm ekstrudiranega polistirena. Skupna toplota strehe je 20 cm ekstrudiranega polistirena. Vrednost toplotne prehodnosti za strop proti neogrevanemu prostoru po TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije [23] je $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

7.1.6.2. Rezultati

Preglednica 38: Energijske lastnosti stavbe, primer 4

	Oznaka	Izračunane vrednosti	Največje dovoljene vrednosti
Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe	H'_T [W/(m ² K)]	0,52	0,59
Letna raba primarne energije	Q_p [kWh]	1.158.270	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje	Q_{NH} [kWh]	284.592	291.741

Letni potrebni hlad za hlajenje	Q_{NC} [kWh]	122.144	-
Letna potrebna toplota za ogrevanje na enoto uporabne površine in kondicionirane prostornine	Q_{NH}/A_u [kWh/(m ² a)]	32,43	-
	Q_{NH}/V_e [kWh/(m ³ a)]	7,43	7,62

Z dodatnimi ukrepi in predvsem z dodano toplotno izolacijo 5 cm so vse izračunane vrednosti manjše od največjih dovoljenih vrednosti.

7.1.6.3. Strošek investicijsko vzdrževalnih del

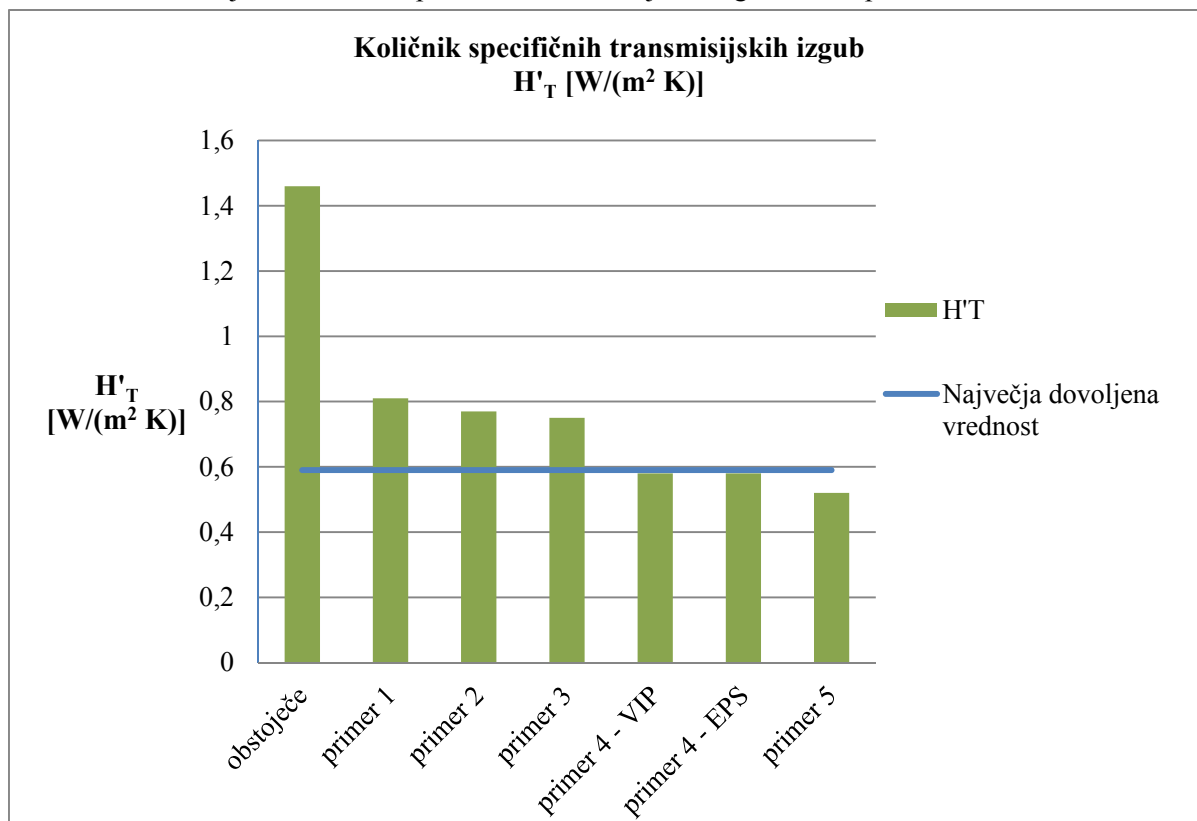
		Količina [m ²]	Cena [EUR]
Izvedba toplotne izolacije strešne konstrukcije z dodatnimi 8 cm debelimi ploščami iz ekstrudiranega polistirena XPS na že obstoječo 12 cm debelo toplotno izolacijo. Upoštevamo ceno 10 EUR/m ² .	S-1	1208,00	12.080,00
Skupaj [EUR]		12.080,00	

Izboljšanje rezultatov energijskih lastnosti stavbe za primer 5 znaša 12.080,00 EUR, kar znese 1,38 EUR/m² neto tlorisne površine stavbe.

7.1.7. Primerjava rezultatov porabe energije

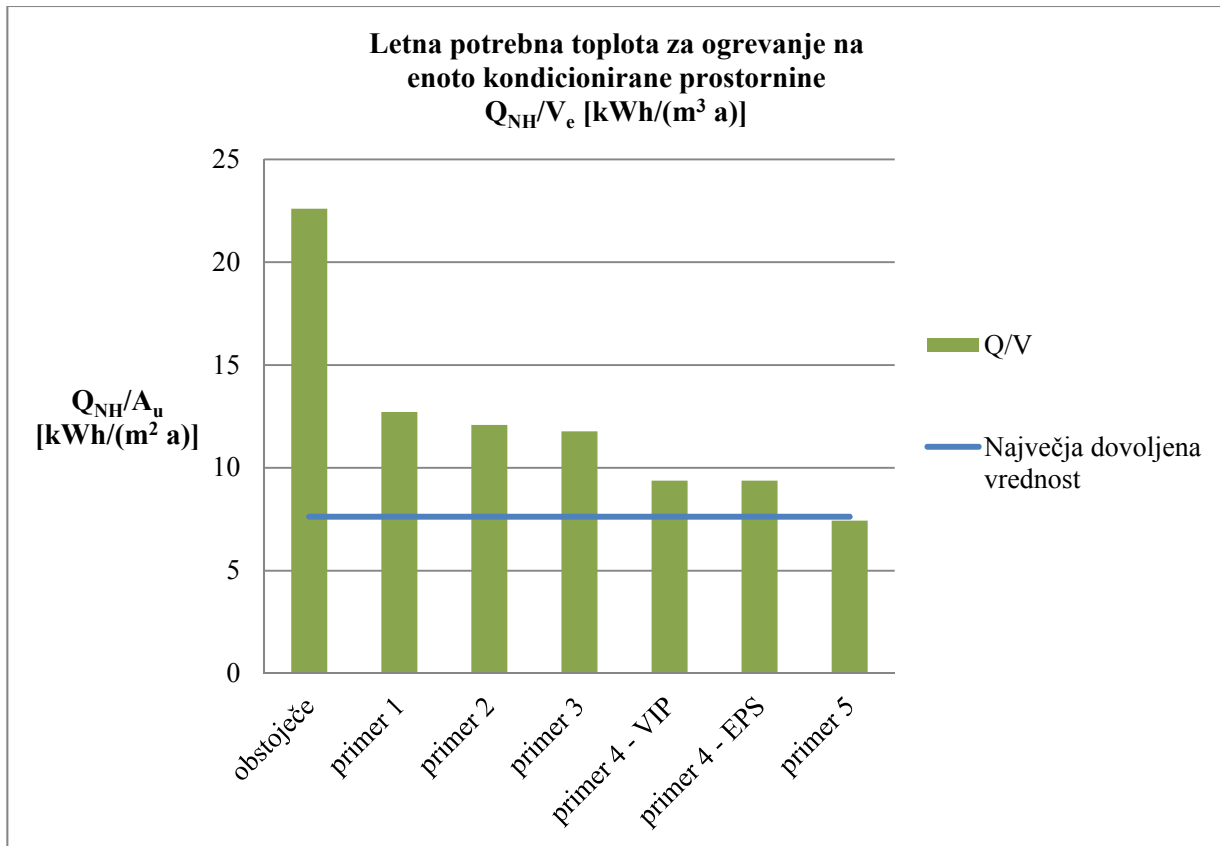
Na Grafikonu 1 in Grafikonu 2 je prikazana primerjava rezultatov količnika specifičnih transmisijских izgub in letne potrebne toplote za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine po posameznih primerih, ki predstavljajo izboljšanje toplotnih karakteristik zunanje ovojja stavbe.

Grafikon 1: Primerjava količnika specifičnih transmisijских izgub za vse primere



Z Grafikona 1 je razvidno, da je količnik specifičnih transmisijских izgub v obstoječem stanju presežen za 147 % glede na dovoljene vrednosti, določene s Pravilnikom o učinkoviti rabi energije v stavbah [22]. V nadaljnjih primerih, kjer so bili eliminirani linijski toplotni mostovi in upoštevane toplotne prehodnosti, ki po večini ustrezajo mejnim vrednostim, so se rezultati približali k največjim dovoljenim vrednostim. V zadnjem primeru smo korigirali temperature v zimskem času in dodali 8 cm toplotne izolacije na streho in tako znižali toplotno prehodnost na $U = 0,15$ W/(m² K) in s tem zadostili največji dovoljeni vrednosti, ki je v grafikonu označena z modro linijo.

Grafikon 2: Primerjava letne potrebne toplote za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine za vse primere

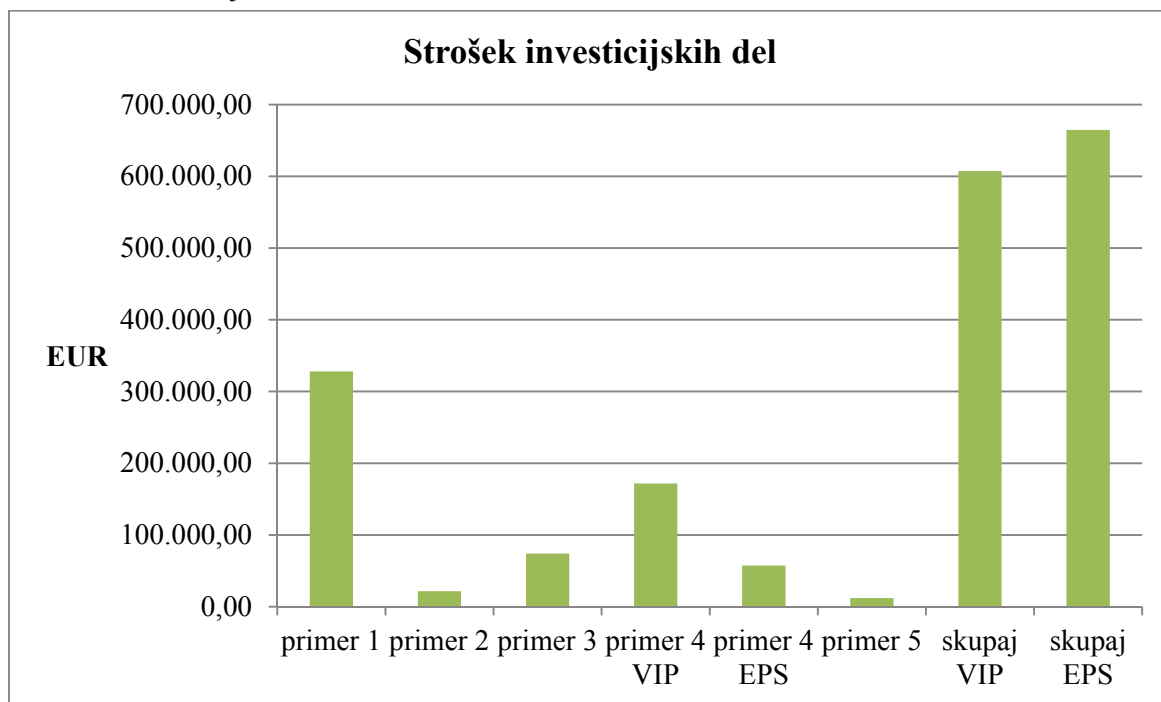


Z Grafikona 2 je razvidno, da se rezultati letne potrebne toplote za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine Q_{NH}/V_e [kWh/(m³ a)] po posameznih primerih spreminjajo podobno kot za primer količnika specifičnih transmissijskih izgub. Z modro linijo je označena največja dovoljena vrednost, ki je presežena v vseh primerih, razen v primeru 5.

7.1.8. Primerjava stroškov investicijskih del

Na Grafikonu 3 je prikazana primerjava stroškov po posameznih primerih.

Grafikon 3: Primerjava stroškov



Razvidno je, da je v primeru 1, kjer smo reševali linijske toplotne mostove, strošek največji. Hkrati smo predhodno ugotovili, da z največjim vložkom prihranimo največ energije oziroma najbolj znižamo količnik specifičnih transmissijskih izgub in letno potrebno toploto za ogrevanje na enoto kondicionirane prostornine. Velik strošek predstavlja primer 4 – VIP, kjer smo predvideli toplotno izolacijo v obliki vakuumskih izolacijskih panelov na notranji strani stavbe na vzhodni in zahodni fasadi, ki predstavlja 1146,0 m². V primeru 4 – EPS je strošek manjši za 114.600,00 EUR. Prikazana sta primera skupne investicije za primer uporabe vakuumskih izolacijskih panelov in ekspandiranega polistirena na vzhodni in zahodni fasadi.

7.2. Ocena ekonomske upravičenosti

Analizo stroškov smo izvedli s pomočjo metode izračuna neto sedanje vrednosti (NSV), ki nam omogoča primerjavo celotnih stroškov v življenjski dobi investicije. Za presojo smiselnosti investicije pa uporabimo metodo dobe vračanja.

7.2.1. Doba vračanja ali enostavna vračilna doba investicije

Metoda izračuna enostavne vračilne dobe investicije je primerna predvsem za začetno presojo o smiselnosti investicije. Dobo vračanja smo izračunali s pomočjo razlike obstoječih stroškov računsko potrebne toplote za ogrevanje in računsko določenih stroškov ogrevanja po izvedenih investicijah, kot je razvidno v Preglednici 42. Za oceno potrebnega časa za povrnitev investicije za primere 1 do 4 smo investicijo delili s prihrankom toplotne energije in dobili enostavno vračilno dobo. Največja pomanjkljivost te metode je, da ne upošteva nobenih stroškov obratovanja in vzdrževanja.

Preglednica 39: Višina investicije, letni prihranek, doba vračanja

Varianta	Investicija [EUR]	Prihranek toplotne energije [EUR]	Doba vračanja [leto]
Primer 1	327.952,00	24.459,98	13,41
Primer 2	21.528,00	1.574,68	13,67
Primer 3	74.002,50	765,97	96,61
Primer 4 – VIP	171.900,00	5.931,68	28,98
Primer 4 – EPS	57.300,00	5.931,68	9,66
Primer 5	12.080,00	4.836,16	2,50
Skupno – VIP	607.462,50	37.568,47	16,17
Skupno – EPS	492.862,50	37.568,47	13,12

Iz Preglednice 39 je razvidno, da ima največjo dobo vračanja primer 3, kjer smo na južno stran fasadnega ovoja dodali 493,35 m² vakuumskih izolacijskih panelov. Najkrajšo vračilno dobo ima primer 5, kjer smo dodali 8 cm ekstrudiranega polistirena, s tem da smo upoštevali le ceno za material, saj primer 5 izvajamo hkrati s primerom 1. Dobo vračanja za skupni strošek investicije smo razdelili na primer z uporabo vakuumskih izolacijskih panelov in primer z uporabo ekspandiranega polistirena na vzhodni in zahodni fasadi. Iz rezultatov ugotovimo, da je doba vračanja z uporabo ekspandiranega polistirena krajša in zato bolj smiselna.

7.2.2. Investicijski stroški

V Preglednici 40 so prikazani stroški investicije po posameznih primerih od 1 do 5 in skupni stroški, prikazani za dva različna primera.

Preglednica 40: Pregled investicijskih stroškov po posameznih primerih in skupno.

Varianta	[EUR]
Primer 1	327.952,00
Primer 2	21.528,00
Primer 3	74.002,50
Primer 4 – VIP	171.900,00
Primer 4 – EPS	57.300,00
Primer 5	12.080,00
Skupno – VIP	607.462,50
Skupno – EPS	492.862,50

7.2.3. Vzdrževalni stroški

Višino vzdrževalnih stroškov izračunamo s formulo:

$$\text{Vzdrževalni stroški} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{faktor malih popravil x strošek investicije}}{\text{življenjska doba}} = \sum_{t=1}^n \frac{V[\text{€}] * (1 + \text{inflacija})^t}{(1 + \text{diskontna stopnja})^t} \quad (5)$$

Preglednica 41: Pregled vzdrževalnih stroškov po posameznih primerih

Varianta	Stroški vzdrževanja [EUR]	Vzdrževalni stroški z upoštevanjo 4-odstotno diskontno stopnjo in 2,5-odstotno inflacijo po 30 letih v [EUR]
Primer 1	21.863,47	527.802,71
Primer 2	1.435,20	34.646,95
Primer 3	4.933,50	119.098,89
Primer 4 – VIP	11.460,00	276.654,16
Primer 4 – EPS	3.820,00	276.654,16
Primer 5	805,33	19.441,43
Skupno – VIP	40.497,50	977.644,15
Skupno – EPS	32.857,50	793.208,04

Faktor malih popravil odčitamo v Pravilniku o spremembah in dopolnitvah Pravilnika o standardih vzdrževanja stanovanjskih stavb in stanovanj [14], kjer je za posamezni gradbeni element navedena normalna doba trajanja elementa v letih, teoretična menjava v 60 letih in faktor malih popravil od nove vrednosti v %. Ker v navedenem pravilniku ni vakuumskih izolacijskih panelov, določimo faktor malih popravil 2 %, normalno dobo trajanja elementa pa 30 let. Teoretično menjavo v 60 letih vzamemo 1, ker so vakuumski izolacijski paneli zaščiteni z zaključnim slojem [46].

7.2.4. Obratovalni stroški

Preglednica 42: Prihranek računske potrebne toplote za ogrevanje v kWh na letni ravni.

Varianta	Obstoječa raba toplotne energije [kWh/leto]	Prihranek toplotne energije [kWh/leto]	Strošek obstoječe rabe toplotne energije [EUR/leto]	Prihranek toplotne energije [EUR/leto]
Osnovni	865.649,00		55.968,88	
Primer 1	487.336,00	378.313,00	31.508,90	24.459,98
Primer 2	462.981,00	24.355,00	29.934,22	1.574,68
Primer 3	451.134,00	11.847,00	29.168,25	765,97
Primer 4 – VIP				
Primer 4 – EPS	359.391,00	91.743,00	23.236,57	5.931,68
Primer 5	284.592,00	74.799,00	18.400,41	4.836,16
Skupno	284.592,00	581.057,00	18.400,41	37.568,47

Cene energije smo pridobili od dobavitelja toplote Energetika Ljubljana, d. d. Cena za dobavljene količine toplote za negospodinjjski odjem po toplotnem števcu znaša 64,6554 EUR/MWh z DDV [45].

Obratovalne stroške, navedene v Preglednica 43, smo izračunali s pomočjo enačbe (6):

$$\text{Obratovalni stroški} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{stroški energije (t)}}{\text{diskontna stopnja (t)}} = \sum_{t=1}^n \frac{E[\text{€}]}{(1+\text{diskontna stopnja})^t} \quad (6)$$

Preglednica 43: Pregled obratovalnih stroškov po posameznih primerih za dobo 30 let.

Varianta	Obratovalni stroški z upoštevanom 4-odstotno diskontno stopnjo po 30 letih v [EUR]
Osnovni	967.815,78
Primer 1	422.962,76
Primer 2	27.229,46
Primer 3	13.245,22
Primer 4 VIP	102.570,81
Primer 4 EPS	102.570,81
Primer 5	83.627,03
Skupno	649.635,28

Najvišji obratovalni stroški so v osnovnem primeru, ker je stavba energijsko potratna. Po posameznih primerih pa je razvidna razlika med osnovnim in izboljšanim primerom. Skupna vrednost je seštevek vseh primerov brez osnovnega.

7.2.5. Neto sedanja vrednost

Investicije lahko ocenjujemo z različnimi metodami vrednotenja, ki jih v splošnem delimo na statične in dinamične metode, odvisno od tega, ali kriterij vključuje časovno komponento. Odločili smo se, da bomo ekonomsko učinkovitost investicije ocenili z metodo neto sedanje vrednosti [44].

Diskontiranje je postopek določevanja sedanje vrednosti prihodnjih denarnih tokov. Prihodnje vrednosti stroškov ali koristi prevedemo na današnjo raven z uporabo diskontne stopnje [41].

Prihodnje stroške prevrednotimo na neto sedanjo vrednost s formulo:

$$NSV = NSV_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FT_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

kjer je,

- NSV_0 začetni ali nabavni stroški [EUR];
- FT_t stroški obratovanja ali finančni tok (prihodnji strošek ali priliv) v času t [EUR];
- n število let;
- r letna diskontna stopnja [%];
- $(1/(1+r)^t)$ finančni diskontni faktor za diskontiranje finančnega toka v času t .

V izračunu upoštevamo 30-letno življenjsko dobo posameznih gradbenih elementov. Uporabimo 4-odstotno diskontno stopnjo in letno inflacijo 2,5 %.

Pri metodi neto sedanje vrednosti iščemo investicijo, ki izkazuje najnižjo NSV, ker pri izračunu upoštevamo samo odhodke.

Preglednica 44: Neto sedanja vrednost NSV

Varianta	Investicija [EUR]	Vzdrževanje [EUR]	Obratovanje [EUR]	NSV [EUR]
Obstoječe stanje			967.815,78	967.815,78
Primer 1	327.952,00	527.802,71	422.962,76	1.278.717,47
Primer 2	21.528,00	34.646,95	27.229,46	83.404,41
Primer 3	74.002,50	119.098,89	13.245,22	206.346,61
Primer 4 – VIP	171.900,00	276.654,16	102.570,81	551.124,98
Primer 4 – EPS	57.300,00	92.218,05	102.570,81	252.088,87
Primer 5	12.080,00	19.441,43	83.627,03	115.148,46
Skupno – VIP	607.462,50	977.644,15	649.635,28	2.234.741,93
Skupno – EPS	492.862,50	793.208,04	649.635,28	1.935.705,82

Pri izračunu NSV upoštevamo le stroške, zato je najboljša najnižja investicija.

Iz Preglednice 44 vidimo, da se strošek obratovanja oziroma strošek toplotne energije zaradi izvedenih primerov investicije zmanjša za 24 %. NSV v primeru z uporabo VIP na vzhodni in zahodni fasadi je višja od primera EPS, kar pomeni, da z ekonomskega vidika primer EPS pokaže boljši rezultat za investitorja. Glede na izrabo prostora je bolj smiselno uporabiti primer VIP, pri čemer je pomembno, da so stroški obratovanja enaki pri obeh izvedbah. Glede na to, da so vakuumski izolacijski paneli relativno nova tehnologija, lahko predvidevamo, da se bodo stroški vzdrževanja znižali, zato bo za investitorje takšna izvedba še bolj zanimiva.

8. ZAKLJUČEK

Namen magistrskega dela je bil spoznati možnosti uporabe vakuumskih izolacijskih panelov v stavbah. Vakuumski izolacijski paneli imajo prednost predvsem zaradi izredno majhne toplotne prevodnosti, na račun katere dosežemo izredne rezultate kljub majhnemu razpoložljivemu prostoru na notranji strani stavbe.

Med najnovejše izolacijske materiale štejemo tiste, ki so na voljo danes in dosegajo najboljše rezultate v nizki stopnji toplotne prevodnosti pri majhni debelini. Vakuumski izolacijski paneli imajo toplotno prevodnost od 0,003 pri novih panelih in do 0,004 W/(m K) pri starih, ker se toplotna prevodnost zmanjšuje s staranjem v odvisnosti od vlažnosti. Slabost vakuumskih izolacijskih panelov je v tem, da je treba plošče industrijsko pripraviti in paziti pri vgradnji le-teh.

Uporabo vakuumskih izolacijskih panelov smo prikazali na stavbi Univerze v Ljubljani, na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Karakteristike stavbe smo spoznali iz projektne tehnične dokumentacije iz leta 1968. Ker za stavbo niso izdelani posamezni detajli, smo križanja spoznali z ogledom stavbe. Ugotovili smo, da se na stavbi pojavljajo toplotni mostovi zaradi odsotnosti toplotne izolacije na severni strani stavbe, na ostalih fasadah pa je uporabljena toplotna izolacija v zgolj 4 cm.

Stavba je vpisana v Register kulturne dediščine, kar pomeni, da za stavbo velja, da ni dovoljeno spreminjati tlorisne in višinske zasnove, gradiva (gradbeni material) in konstrukcijske zasnove in oblikovanosti zunanjsčine. Pogoji za stavbo so zelo strogi in ne dopuščajo nikakršnih sprememb na fasadnem ovoju.

S programom Therm smo analizirali detajle in izračunali toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov in linijske toplotne prehodnosti toplotnih mostov. S pomočjo temperature rosišča smo ocenili možnost nastanka površinske kondenzacije na notranjih površinah stavbe. S pomočjo izračunanih rezultatov smo poiskali rešitve za odpravo linijskih toplotnih mostov. Z upoštevanjem kulturnovarstvenih pogojev smo ugotovili, da obstaja možnost dodatne toplotne izolacije le na notranji strani stavbe in na zunanji strani pohodne strehe.

Z rešitvami dodatne toplotne izolacije na detajlih stavbe smo preverili predvidene ukrepe za izboljšanje toplotnih karakteristik v programu TOST. Izračunali smo pet zaporednih primerov, ki skupaj izpopolnjujejo rezultate koeficienta specifičnih transmisijskih toplotnih izgub stavbe in letno potrebno toploto za ogrevanje na enoto uporabne površine in se gibljejo k dovoljenim vrednostim. Z odpravo večine linijskih toplotnih mostov, dodatno toplotno izolacijo strešne konstrukcije, dodatno toplotno izolacijo parapetov na južni in severni strani stavbe in dodatno toplotno izolacijo vzhodnega in zahodnega fasadnega ovoja smo zagotovili, da stavba zadosti pogojem iz Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah [22]. Za vsak primer smo izračunali ocenjeno vrednost investicije.

V zadnjem poglavju smo želeli ugotoviti smiselnost posameznih primerov in skupne investicije. Izračunali smo dobo vračanja, ki je pokazala, da se investicija, kjer uporabimo samo vakuumske

izolacijske panele, povrne v 16,2 letih. Za tovrstne stavbe in pričakovano življenjsko dobo 30 let s predvidevanjem stalne uporabe stavbe le-ta ni pretirana. Stroški toplotne energije so pri alternativnih izvedbah enaki. Vakuumski izolacijski paneli pri izračunu NSV pokažejo nekaj višje stroške investicije in vzdrževanja, vendar zaradi relativno nove tehnologije skozi bolj pogosto uporabo lahko predvidevamo padec cen.

Glede na kulturnovarstvene pogoje in razpoložljiv prostor za izvedbo dodatne toplotne izolacije se vakuumski izolacijski paneli izkažejo kot realno izvedljiva rešitev.

VIRI

- [1] Johansson, P. 2012. Vacuum Insulation Panels in Buildings. Literature review. Report in Building Physics. Goteborg. Chalmers University of Technology.
- [2] Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., Quénard, D., Sallée, H., Noller, K., Kücükpinar-Niarchos, E., Stramm, C., Tenpierik, M. J., Cauberg, J. J. M., and Erb, M. 2005. Vacuum Insulation Panels. Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A). IEA/ECBCS Annex 39 High Performance Thermal Insulation (HiPTI).
- [3] Brunner, S., Simmler, H. 2008. In situ performance assessment of vacuum insulation panels in a flat roof construction. *Vacuum*, 82: p. 700-707.
- [4] Kunič, R. 2011. Vakuumski izolacijski paneli – najučinkovitejša toplotna izolacija. *Gradbenik* 10.
- [5] Binz, A., Steinke, G. 2005. Applications of Vacuum Insulation in the Building Sector. 7th International Vacuum Insulation Symposium. Duebendorf/Zurich. Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research.
- [6] Yang, C.G., Li, Y.J., Gao, X., Xu, L. 2012. A Review of Vacuum Degradation Research and the Experimental Outgassing Research of the Core Material- PU Foam on Vacuum Insulation Panels. *Physics Procedia* 32: p. 239 – 244.
- [7] Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A. 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings* 42: p. 147 – 172.
- [8] Wegger, E., Jelle, B. J., Sveipe, E., Grynning, S., Gustavsen, A., Thue, J. V. 2010. Accelerated Ageing of Vacuum Insulation Panels (VIPs). *Renewable Energy Conference 2010*. Trondheim. Book of abstracts.
- [9] Project Summary Report. Vacuum Insulation Panel Properties & Building Applications. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. 2010. Birmingham. International Energy Agency. Project Summary Report. 2010. ECBCS Annex 39.
- [10] Projektno tehnična dokumentacija stavbe. Komuna Projekt Maribor, šifra 301/99, Novo poslopje FAGG, glavni načrt.
- [11] Projektno tehnična dokumentacija stavbe. Nadzidava FAGG. 1980. Investitor FAGG UN Ljubljana.

-
- [12] Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg, H., Tenpierik, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M., Nussbaumer, B. Vacuum Insulation in the Building Sector. Systems and Applications. International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Programme.
- [13] Thorsell, T. 2012. Advances in Thermal Insulation – Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Buildings. Doctoral thesis. Stockholm. KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering.
- [14] Pravilnik o spremembah in dopolnitvah Pravilnika o standardih vzdrževanja stanovanjskih stavb in stanovanj, Uradni list RS, št. 18/11.
- [15] <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>.
- [16] Brunner, S., Stahl, T., Wakili, K. G. 2012. An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building facade. Energy and Buildings 54: p. 278-282.
- [17] Willems, M. W. Schild, K. Vacuum Insulation Constructions in Detail.
http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik/pdf/art_143.pdf
Pridobljeno 9.11.2013.
- [18] Kunič, R. Kutnar, A. 2014. Carbon footprint of thermal insulation materials in building envelopes. Pismeni dokumenti avtorja.
- [19] Heinemann, U. Vacuum Insulation Panels — Potentials, Challenges and Applications. 11th International Vacuum Insulation Symposium. 2013. Dubendorf. EMPA Akademie.
- [20] Tenpierik, M. 2010. Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions. Doctoral thesis. Delft. Technische Universiteit Delft.
- [21] Kunič, R. 2012. Vacuum Insulation Panels – An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life. Strojniški vestnik. 58, str. 10.
- [22] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Uradni list RS, št. 52/2010.
- [23] Tehnična smernica TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije. Ministrstvo za okolje in prostor.
- [24] Szokolay, S. V. 2004. Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design. Architectural Press.

- [25] Toplotni mostovi. Učinkovita raba energije. Toplotna zaščita zgradb. 2/11. http://www.aure.gov.si/eknjiznica/IL_2-11.PDF
Pridobljeno 12.7.2014.
- [26] Benko, Z. 2014. Javni zavod Republike Slovenije za varstvo kulturne dediščine. Elektronsko sporočilo.
- [27] Register nepremične kulturne dediščine. RS Ministrstvo za kulturo. <http://giskds.situla.org/giskd/>.
Pridobljeno 14.6.2014.
- [28] Odlok o občinskem prostorskem načrtu Mestne občine Ljubljana – izvedbeni del (Uradni list RS, št. 78/2010).
- [29] Jelle, B. P. 2011. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. Energy and Buildings 43: p. 2549-2563.
- [30] SIST EN ISO 10211:2008 Toplotni mostovi v stavbah. Toplotni tokovi in površinske temperature – podrobni izračuni (ISO 10211:2007).
- [31] Košir, M. 2013. Študijsko gradivo. Stavbni ovoj netransparenten del. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [32] Office fédéral de l'énergie OFEN, Catalogue des ponts thermiques, 2003. http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/energie/fichiers_pdf/calcul_pont_thermiques.pdf
Pridobljeno 6.8.2014.
- [33] Kristl, Ž. 2012. Vertikalni konstrukcijski sklopi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [34] SIST EN ISO 14683: 2008 Toplotni mostovi v stavbah - Linearna toplotna prehodnost - Poenostavljena metoda in privzete vrednosti (ISO 14683:1999).
- [35] Kristl, Ž. 2012. Horizontalni konstrukcijski sklopi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente.
- [36] Mollier diagram. AlpicAir. <http://www.alpicair.com/technical-info-support/howto-tips/mollier-diagram/>
Pridobljeno 7.8.2014.

-
- [37] Zakon o graditvi objektov, Uradni list RS, št. 110/2013 .
- [38] Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, Uradni list RS, št. 42/2002.
- [39] Krainer, A., Predan, R. Računalniški program (TOST) za izračun energetske bilance stavbe po Pravilniku o učinkovitosti rabe energije v stavbah upoštevajoč SIST EN ISO 13790 in TSG-1-004:2010. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [40] Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena, Uradni list RS, št. 109/11.
- [41] Kunič, R., Krainer, A. 2009. Ekonomična debelina slojev toplotnih izolacij v kontaktnoizolacijskih fasadah obodnih sten. Gradbeni vestnik 58.
- [42] Kunič, R., Krainer, A. 2010. Ekonomična debelina toplotnoizolacijskih slojev v ravnih strehah. Gradbeni vestnik 59.
- [44] Šubic-Kovač, M. 2010. Vrednotenje nepremičnin. Študijsko gradivo za univerzitetni študij gradbeništva - komunalna smer na UL FGG. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za komunalno gospodarstvo.
- [45] <http://www.energetika-lj.si/ceniki/cenik-toplota>
(Pridobljeno 25.8.2014)
- [46] Marušič, I. 2014. Celovita obnova toplotnega ovoja večstanovanjske stavbe na obali, v pogledu ekonomike in ogljičnega odtisa. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.