

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2024

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Diplomska naloga št.:

Graduation thesis No.:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

Ljubljana, _____

POPRAVKI – ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

ZAHVALA

Hvala mentorju in somentorju za vselej izkazano potrpežljivost, spodbudnost in predvsem prijaznost.

Hvala staršem in babici za podporo.

Hvala Nini.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	699.866:666.157(043.2)
Avtor:	Urban Vochl
Mentor:	doc. dr. Jure Kokalj, univ. dipl. fiz.
Somentor:	doc. dr. Luka Pajek, mag. inž. stavb.
Naslov:	Obravnavanje uporabe fazno spremenljive snovi v zasteklitvi
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	X, 35 str., 8 pregl., 27 sl., 46 en., 1 pril., 15 vir.
Ključne besede:	fazno spremenljive snovi, zasteklitev, okna, toplotni tok

Izvleček

Zaradi prehoda k trajnostni družbi se pojavlja vse večja potreba po energijsko učinkovitejših stavbah. Kljub mnogim napredkom in vse večji kompleksnosti, zasteklitev še vedno predstavlja eno izmed šibkih točk v sicer dobro izoliranem fasadnem ovoju. Rešitev za zmanjšanje te šibke točke lahko predstavlja uporaba fazno spremenljivih snovi (FSS), saj s tem zasteklitvi tako učinkovito povečamo toplotno kapaciteto.

V diplomski nalogi se obravnava delovanje zasteklitve s FSS v primerjavi z običajno zasteklitvijo. Za obravnavo zasteklitve se je postavil model poteka toplotnih tokov in spreminjanja agregatnega stanja FSS, na podlagi katerega smo dobili rezultate toplotnih dobitkov. Problem je bil obravnavan v vremenskih pogojih Ljubljane v poletni sezoni z uporabo dejanskih merjenih vremenskih podatkov in preko simuliranega sinusnega dnevnega poteka temperature. V modelu se je spreminjalo debelino sloja FSS in zraka ter tip FSS različnih konfiguracij zasteklitve v iskanju optimalnih lastnosti in tako ustvarilo zasteklitev, ki v stavbo vnese manj toplote kot običajna zasteklitev. Na podlagi rezultatov smo povzeli priporočila za optimalno zasteklitev. Ugotovili smo tudi, da ima modificirano steklo z določenimi FSS lahko zelo nizke toplotne tokove v času spreminjanja agregatnega stanja FSS, kar lahko prispeva k večjemu toplotnemu udobju.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 699.866:666.157(043.2)
Author: Urban Vochl
Supervisor: Assist. Prof. Jure Kokalj, PhD
Co-supervisor: Assist. Prof. Luka Pajek, PhD
Title: Analysis of application of phase change material in glazing
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: X, 35 p., 8 tab., 27 fig., 46 eq., 1 ann., 15 ref.
Keywords: phase change materials, glazing, windows, heat flux

Abstract

Transition to sustainability is demanding energy efficient buildings. Despite advancements in glazing technology an opening in the buildings envelope is still one of its main weak points. A solution to this problem could be the use of phase change material (PCM), as it significantly improves the thermal capacity of a glazing system.

In this graduation thesis evaluated the performance of a PCM-filled glazing versus normal gas-filled glazing. A model was built to calculate energy gains via heat flux and to monitor the behaviour of PCM layer. Real measured data was used to simulate climate conditions of Ljubljana during summer season. Different configurations of glazing and types of PCM were used to find an optimal configuration that performed better than gas-filled glazing. Recommendations for optimal glazing were written based on the results. PCM-filled glazing systems could offer better thermal comfort due to low heat flux during phase change of the PCM layer.

KAZALO

POPRAVKI – ERRATA.....	I
ZAHVALA.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO	V
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC.....	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS.....	X
1 UVOD	1
1.1 Pregled literature	2
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	3
2.1 Toplotni tok	3
2.2 Toplotni tok v stacionarnem stanju.....	4
3 MODEL.....	6
3.1 Poenostavitve	6
3.2 Fizikalni opis dogajanja.....	6
3.2.1 Taljenje	6
3.2.2 Strjevanje	7
3.2.3 Taljenje in strjevanje hkrati	8
3.2.4 Stanje I: taljenje pri naraščajoči temperaturi z eno mejo trdno - tekoče.....	10
3.2.5 Stanje II: taljenje ali strjevanje pri padajoči temperaturi, ena meja tekoče – trdno	12
3.2.6 Stanje III: strjevanje staljene FSS z dvema mejama trdno - tekoče.....	13
3.2.7 Stanje IV: taljenje delno strjene FSS	14
3.2.8 Stanje V: stanje splošnega prehajanja toplotnega toka	16
3.3 Izračun toplotne bilance	17
3.4 Predpostavljene lastnosti.....	17
3.5 Omejitve.....	18
4 ANALIZA RAZLIČNIH KONFIGURACIJ ZASTEKLITEV V ČASU POLETJA S SIMULIRANIMI PODATKI.....	19
4.1 Rezultati in primerjava.....	20
4.1.1 Dvoslojna zasteklitev s FSS.....	21
4.1.2 Troslojna zasteklitev s FSS na zunanji strani	23
4.1.3 Troslojna zasteklitev s FSS na notranji strani.....	26
5 ANALIZA RAZLIČNIH KONFIGURACIJ ZASTEKLITEV V ČASU POLETJA Z RESNIČNIMI PODATKI	30
5.1 Rezultati in primerjava.....	31
6 DISKUSIJA IN OPTIMIZACIJA ZASTEKLITVE.....	33
7 ZAKLJUČEK.....	34

VIRI	35
-------------------	-----------

KAZALO SLIK

Slika 1: Vzдолžni prereз homogene palice v smeri x s toplotno izoliranim obodom in konstantno ploščino preseka (povzeto po [13]).	3
Slika 2: Vzдолžni prereз homogene palice v smeri x s izoliranim obodom in konstantnim presekom, na vsaki strani je stalna temperatura (povzeto po [13]).	4
Slika 3: Prečni prereз zasteklitve, a) zasteklitev v začetnem stanju s strjeno FSS, b) zasteklitev po pretečenem času Δt s staljeno plastjo FSS.	6
Slika 4: Prečni prereз zasteklitve, strjevanje staljene FSS z obeh strani.	8
Slika 5: Prečni prereз zasteklitve, FSS v zasteklitvi s tremi mejami in štirimi plastmi.	9
Slika 6: Stanje I – prečni prereз zasteklitve, prikaz taljenja FSS z eno mejo.	11
Slika 7: Stanje II – prečni prereз zasteklitve, prikaz strjevanja FSS z eno mejo.	13
Slika 8: Stanje III – prečni prereз zasteklitve, prikaz taljenja delno strjene FSS. V tem primeru se obe meji premikata druga proti drugi.	14
Slika 9: Stanje IV – prečni prereз zasteklitve, prikaz taljenja levega sloja FSS in hkrati strjevanja desnega sloja. x_{ml} se v tem primeru ne spreminja.	15
Slika 10: Stanje V – prečni prereз zasteklitve, prikaz običajnega preprostega prehajanja toplote.	16
Slika 11: Običajni zasteklitvi; a) dvoslojna, b) troslojna.	18
Slika 12: Zasteklitve s FSS; a) dvoslojna s FSS troslojna, b) troslojna s FSS na notranji strani, c) troslojna s FSS na zunanji strani.	18
Slika 13: Potek simulirane zunanje temperature v obliki sinusa.	20
Slika 14: Premikanje mej in toplotni tok v notranjost, kadar je tok približno konstanten vosek menja agregatno stanje.	20
Slika 15: Toplotna tokova q_{in} in q_{out} sta si različna, kadar se spreminja agregatno stanje FSS.	21
Slika 16: potek temperature v prečnem prereзу zasteklitve; a) pred popolno stalitvijo FSS je na 1. meji temperatura tališča, saj nestaljeni FSS ne more preseči tališča, b) po popolni stalitvi je temperatura FSS nad T_t .	21
Slika 17: grafikona toplotnih tokov; a) absolutna vrednost toplotnih tokov zasteklitev s FSS je mnogo višja od toka običajne zasteklitve, le pri taljenju RT22 ni zaradi majhne temperaturne razlike, b) RT24 je večino dneva konstanten.	22
Slika 18: grafikoni premikanja mej in debelin plasti, a) vosek RT22 se čez noč ne strdi v celoti; b) in c) vosek je v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se le delno stali zaradi previsokega tališča.	23
Slika 19: grafikona toplotnih tokov, oblika krivulj je podobna kot pri dvoslojni zasteklitvi s FSS; a) in b) dodaten sloj zasteklitve približa absolutne vrednosti toplotnih tokov zasteklitve s FSS k toku zasteklitve brez FSS.	25

Slika 20: grafikoni premikanja mej in debelin plasti, poteki so podobni kot pri dvoslojni zasteklitvi s FSS; a) vosek RT22 se čez noč ne strdi v celoti; b) in c) vosek je v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se le delno stali zaradi previsokega tališča.....	25
Slika 21: grafikona toplotnih tokov; a) dodatna debelina sloja FSS komaj opazno prispeva k nižjim toplotnim tokom, b) RT24 je več kot $\frac{3}{4}$ dneva konstanten.....	26
Slika 22: grafikona toplotnih tokov; a) RT24 in RT28 sta si večino časa enakovredna, b) RT24 je v primerjavi s prejšnjima primeroma še večji del dneva konstanten.	27
Slika 23: grafikoni premikanja mej in debelin plasti; a) RT22 je zelo malo, le okoli 10 % izkoriščen, b) vosek RT24 se skoraj nič ne aktivira, c) kot pri a), d) in e) vosek se ne aktivira zaradi previsokega tališča.	28
Slika 24: grafikona toplotnih tokov; a) ker se RT24 in RT28 nikoli ne pričneta taliti, sta si ves čas enaka, b) RT24 je več kot 90 % dneva konstanten.	28
Slika 25: grafikoni premikanja mej in debelin plasti; a) vosek RT22 se čez noč le delno strdi, b) vosek se ne aktivira, c) vosek je skoraj v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se ne aktivira zaradi previsokega tališča.	29
Slika 26: Potek temperature treh dni. Krivulje posameznih dni so si podobne, opazi se rast temperatur z vsakim naslednjim dnevom.	30
Slika 27: Povprečna zunanja temperatura na višini dveh metrov na vmesni dan – 20. julij 2022. Čez dan ni večjih skokov temperature.....	31

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava različnih materialov in njihove akumulirane toplote [3].....	1
Preglednica 2: Povprečne minimalne in maksimalne mesečne temperature za obdobje 2010–2020....	19
Preglednica 3: primerjava toplotnih bilanc različnih konfiguracij zasteklitve pri različnih pogojih dvoslojne zasteklitve s FSS.....	22
Preglednica 4: primerjava toplotna bilanca različnih konfiguracij zasteklitve pri različnih pogojih troslojne zasteklitve s FSS na zunanji strani.	24
Preglednica 5: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na notranji strani.....	27
Preglednica 6: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah dvoslojne zasteklitve s FSS v dejanskih vremenskih pogojih.	31
Preglednica 7: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na zunanji strani v dejanskih vremenskih pogojih.	32
Preglednica 8: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na notranji strani v dejanskih vremenskih pogojih.....	32

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI / ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

~~Tukaj navedite pogosto uporabljene okrajšave, njihov pomen v izvirniku in prevod v slovenskem jeziku.
Navedenih je nekaj primerov, avtor lahko oblikovanje prilagodi svojim potrebam.~~

q_{out}	Gostota toplotnega toka, ki teče iz zasteklitve v notranjost	
q_{in}	Gostota toplotnega toka, ki teče iz zunanosti v zasteklitev	
x_m	Debelina prve meje med tekočim in trdnim stanjem FSS	
x_{m2}	Debelina druge meje med tekočim in trdnim stanjem FSS	
x_{m3}	Debelina tretje meje med tekočim in trdnim stanjem FSS	
FSS	fazno spremenljiva snov	ang. phase change material

1 UVOD

Eden osnovnih elementov stavb so odprtine. Potrebujemo jih, ko ima stavba poleg strehe tudi stene, ki jasno določijo notranji prostor. V zunanjem ovoju stavbe jih načrtujemo za najbolj osnovno potrebo vstopanja v in izstopanja iz stavb. Odprtine sicer nudijo veliko več kot le to, najbolj osnovno funkcijo. Omogočajo socialno povezavo med notranjim in zunanjim okoljem, komunicirajo nam zunanje vremenske razmere in nam ponujajo spreminjajočo sliko sveta. Odprtina prepušča svetlobo in tako izboljša notranje življenjske razmere. Vendar odprtina lahko ustvari tudi problem – nezaščiten v stavbnem ovoju poleg zgoraj naštetega prepušča tudi snov, npr. zrak. To nam lahko močno poslabša bivalne razmere, zato odprtino zaščitimo s transparentnim materialom v okviru – zasteklitvijo. Še vedno pa nam odprtina, zaščitena z zasteklitvijo prepušča nezanemarljivo večjo količino energije v primerjavi s sodobnimi rešitvami zunanjih sten.

Naveden fenomen smo omilili z večslojnimi zasteklitvami, skozi katere teče manjši toplotni tok. Uporabljamo različne premaze, ki odbijajo bodisi notranji bodisi zunanji sevalni toplotni tok. Medstekelni prostor polnimo z različnimi plini, ki se bolje obnesejo kot zrak. Vgrajujemo žaluzije, rolete, zaves in druga senčila s ciljem, da zmanjšamo toplotne dobitke in izgube. Kljub temu se, zaradi vse večje ozaveščenosti o onesnaževanju okolja, pojavlja nadaljnja potreba po še bolj energijsko učinkoviti zasteklitvi, hkrati pa iščemo rešitve za zagotavljanje vse višjega nivoja toplotnega ugodja. Pojavi se vprašanje: kako dodatno regulirati toplotne tokove skozi odprtine z obzirom na njene osnovne funkcije? Eden od odgovorov na vprašanje je uporaba nekonvencionalne rešitve zmanjšanja toplotnih izgub z uporabo translucenčnih površin – vgrajevanje fazno spremenljivih snovi (v nadaljevanju: FSS) v medstekelni prostor zasteklitev.

FSS se že uporablja v lahkih, največkrat endoskeletnih, stavbnih ovajih, kjer nadomesti toplotno kapaciteto klasične eksoskeletne gradnje [1]. Pod FSS uvrščamo snovi, ki skladiščijo latentno energijo in pri katerih se fazna sprememba zgodi pri skoraj konstantni temperaturi [2]. Latentna energija FSS je mnogokrat večja od senzibilne energije tipičnih gradbenih materialov pri realnih temperaturnih pogojih [1]. Preglednica 1 prikazuje akumulirano toploto različnih materialov za realen primer, kjer v FSS pride do spremembe faznega stanja. FSS ima v tem primeru 23-krat več akumulirane toplote kot opeka in 18-krat več kot beton.

Preglednica 1: Primerjava različnih materialov in njihove akumulirane toplote [3].

Material (1 kg)	Akumulirana toplota ($T_{min} = 15\text{ °C}$, $T_{max} = 40\text{ °C}$, $\Delta T = 15\text{ K}$) [Wh]
Opeka	3,33
Beton	4,38
Les (smreka)	9,58
FSS (Parafinski vosek)	78,47

FSS v času fazne spremembe absorbira toploto in tako zmanjša in zamakne temperaturna nihanja, ki jih v stavbah povzročajo dnevne temperaturne spremembe. Tako hkrati zmanjša potrebno energijo za vzdrževanje ustrezne sobne temperature in zamakne čas, ko se najvišja zunanja temperatura odrazi v notranjosti [3].

FSS delimo na organske, anorganske in evtektike [1]. Med anorganske sodijo kovine in hidratizirane soli z različnimi točkami tališča. Značilnost slednjih je, da so močno korozivna, posledično neprimerna

za aplikacije s kovinami. Anorganski FSS imajo slabo lastnost razpadanja na dolgi rok ali pri višjih temperaturah [1], [3]. Med organskimi FSS sodijo parafinski voski in maščobne kisline. So masno manj gosti kot anorganski in imajo zato manj energijskega potenciala na dani volumen [4].

V nalogi bodo obravnavane zasteklitve z vgrajenim FSS, pri čemer bo analiza osredotočena na toplotne lastnosti. Računsko bo obravnavana energijska bilanca različnih konfiguracij zasteklitve v izbranem kraju in letnem času, rezultati pa bodo primerjani z običajno zasteklitvijo. Zasteklitev se bo konfigurirala na takšen način, da se čimbolj zmanjšajo toplotni dobitki za namen zmanjšanja potrebne energije za hlajenje. Na koncu bo na podlagi prednosti in slabosti zasteklitve s FSS ovrednotena smiselnost takšnega ukrepa.

1.1 Pregled literature

V preteklosti je bilo že mnogo raziskav, ki so obravnavale različne aspekte zasteklitev z vgrajeno FSS. Li et al. [5] so s simulacijami in eksperimentom raziskovali temperaturna nihanja in vpliv na potrebe energije za vzdrževanje notranje temperature. V raziskavah so uporabili dvoslojno zasteklitev s FSS in običajno dvoslojno zasteklitev za primerjavo in prišli do zaključka, da se dvoslojna zasteklitev z izbrano FSS bolje obnese poleti, vendar pozimi in med sezonama zahteva večjo ogrevalno energijo, saj je bila notranja temperatura višja od tališča FSS. Kljub temu, da je zasteklitev s FSS delovala slabše od konvencionalne v treh izmed štirih sezon, so toplotni prihranki znašali kar 40 %.

Goia et al. [6] so eksperimentalno raziskovali površinske temperature in intenziteto prejetega sončnega sevanja dvoslojne zasteklitve s FSS in referenčne običajne dvoslojne zasteklitve na območju mesta Nanjing na Kitajskem. Meritve so opravili v obdobju poletja in jeseni. Uporabili so jih za numerično evaluacijo notranjih temperaturnih razmer in toplotnega udobja. Njihove ugotovitve so v korist zasteklitev z vgrajeno FSS. Za toplejša podnebja so predlagali FSS z višjo temperaturo tališča in obratno za hladnejša podnebja.

Duraković in Torlak [7] sta eksperimentalno in numerično dokazala, da ima dvoslojna zasteklitev s FSS manjša temperaturna nihanja v primerjavi z običajno dvoslojno zasteklitvijo. Iskala sta optimalno debelino sloja s FSS v dvoslojni zasteklitvi in jo definirala pri 19 mm za severno okno in 24 mm za južno okno za podnebje Sarajeva.

Grynning et al. [8] so izvajali meritve na komercialno dostopni štirislojni zasteklitvi s prizmatičnim solarnim reflektorjem in slojem FSS proizvajalca GlassX. Meritve so izvajali v podnebnem simulatorju. Ugotovili so, da ima taka zasteklitev visok potencial za akumulacijo toplote, kar prispeva k manjši porabi toplote in večjemu temperaturnemu udobju. Koláček et al. [9] so raziskovali podobno zasteklitev kot v [8] eksperimentalno in prek simulacije. Zapisali so, da so v primeru uporabe zasteklitve s FSS manjša temperaturna nihanja v prostoru, primerjano z običajno zasteklitvijo.

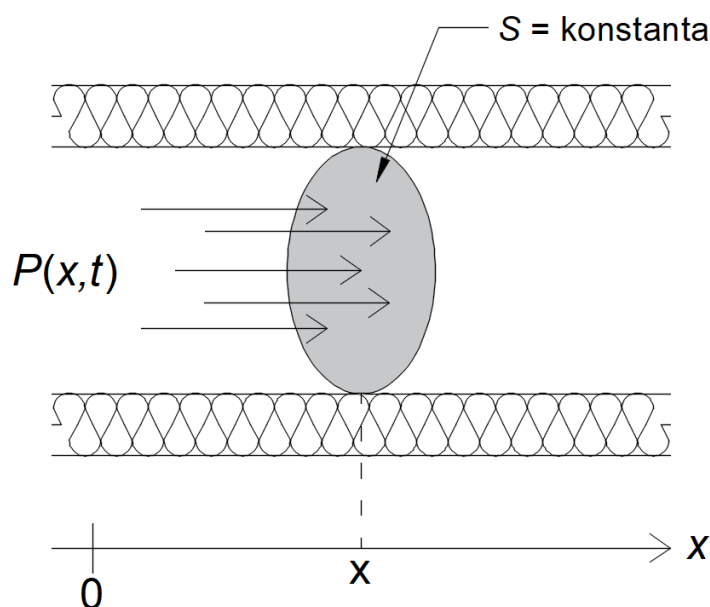
Ravasio et al. [10] so na podlagi numeričnega modela iz [11] analizirali temperaturno delovanje troslojne zasteklitve s FSS na južni strani stavbe v arktičnem podnebjju. Uporabili so značilni dan vsake sezone, kar je vključevalo temperaturo zraka in sončno sevanje. Zaradi posebne značilnosti arktičnega okolja, kjer je del leta brez sončnega sevanja in del leta s stalnim sončnim sevanjem, se je zasteklitev s FSS obnesla slabše v času zime, med vmesnima sezonama primerljivo in v času poletja bolje kot običajna troslojna zasteklitev. Primerjali so tudi učinkovitost treh različnih parafinskih voskov – parafin 5, 10 in 15. Najbolje se je obnesel parafin 10.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Toplotni tok

Analiza toplotne bilance se izvaja s teorijo prevajanja toplote. Osnovna značilnost prevajanja toplote je, da toplota teče od mesta z višjo temperaturo k mestu z nižjo temperaturo [12]. Proces se izvaja tridimenzionalno, za potrebe te naloge se je poenostavilo na eno dimenzijo.

Na sliki 1 je prikazana obravnavana homogena palica, ki je po obodu tako toplotno izolirana, da toplotni tok teče le v smeri osi x .



Slika 1: Vzdolžni presek homogene palice v smeri x s toplotno izoliranim obodom in konstantno ploščino preseka (povzeto po [13]).

Toplotni tok $P(x,t)$ je definiran kot množina toplote, ki se v časovni enoti prenese skozi prečni presek palice na oddaljenosti x v trenutku t [13].

$$P(x,t) = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Q ... toplota

Fourierov zakon ali zakon o prevajanju toplote trdi, da je toplotni tok večji, čim večji je presek in čim večji je temperaturni gradient $\partial T/\partial x$ na poljubno izbranem mestu. Sorazmernostni faktor λ , imenovan toplotna prevodnost snovi, je odvisen od snovi in temperature. Ker imamo opravka z majhnim razponom temperatur, ga lahko pišemo kot konstantnega. Iz naštetega sledi:

$$P = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

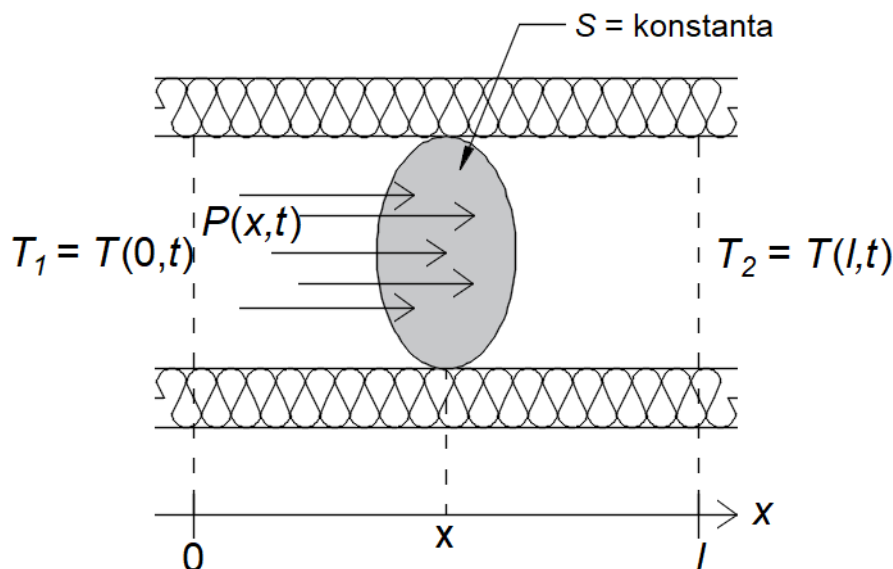
Količina, katera se v nalogi pogosto pojavlja je gostota toplotnega toka, definirana kot toplotni tok na enoto prečnega preseka (palice).

$$q = \frac{P}{S} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

V nadaljevanju bo pogosto gostota toplotnega toka napisana kot toplotni tok, ker sta si vrednosti enakovredni v primeru, da je površina preseka 1 m^2 .

2.2 Toplotni tok v stacionarnem stanju

V prejšnjem poglavju je obravnavan toplotni tok na splošno, v nalogi pa je uporabljen toplotni tok v stacionarnem stanju. Na sliki 2 je obravnavana homogena palica konstantnega preseka z izoliranim obodom. Predpostavljena je različna stalna temperatura na obeh koncih palice. Na levem koncu je T_1 , na desnem $T_2 < T_1$. Koordinatna os x je postavljena vzdolž palice z izhodiščem na levem koncu pri temperaturi T_1 .



Slika 2: Vzdolžni prerez homogene palice v smeri x s izoliranim obodom in konstantnim presekom, na vsaki strani je stalna temperatura (povzeto po [13]).

Ker je na obeh koncih palice stalna temperatura, se med koncema palice vzpostavi stacionarno stanje. Temperatura vzdolž palice je tako odvisna le od koordinate x in nič več od časa t . Velja $T = T(x)$, $T(0) = T_1$ in $T(l) = T_2$. Toplotni tok v tem primeru je:

$$P = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Tako kot je temperatura v palici neodvisna od časa t , je za stacionarni primer zgornja enačba neodvisna od koordinate x , saj se toplota nikjer ne kopiči ali izgublja. Integracija zgornje enačbe z upoštevanjem robnega pogoja $T(x=0) = T(0) = T_1$ nam prinese:

$$T(x) = T_1 - \frac{P}{\lambda \cdot S} \cdot x \quad (5)$$

Temperatura vzdolž palice torej linearno pada v smeri toplotnega toka. Z upoštevanjem drugega robnega pogoja $T(x=l) = T(l) = T_2$ zapišemo naslednjo enačbo:

$$P = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (6)$$

V obliki gostote toplotnega toka:

$$q = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{l} \quad (7)$$

Definira se še toplotno upornost (palice), ta nam pove, s kolikšno močjo teče toplotni tok pri temperaturni razliki 1 K med obema koncema snovi (palice).

$$R = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad (8)$$

3 MODEL

3.1 Poenostavitve

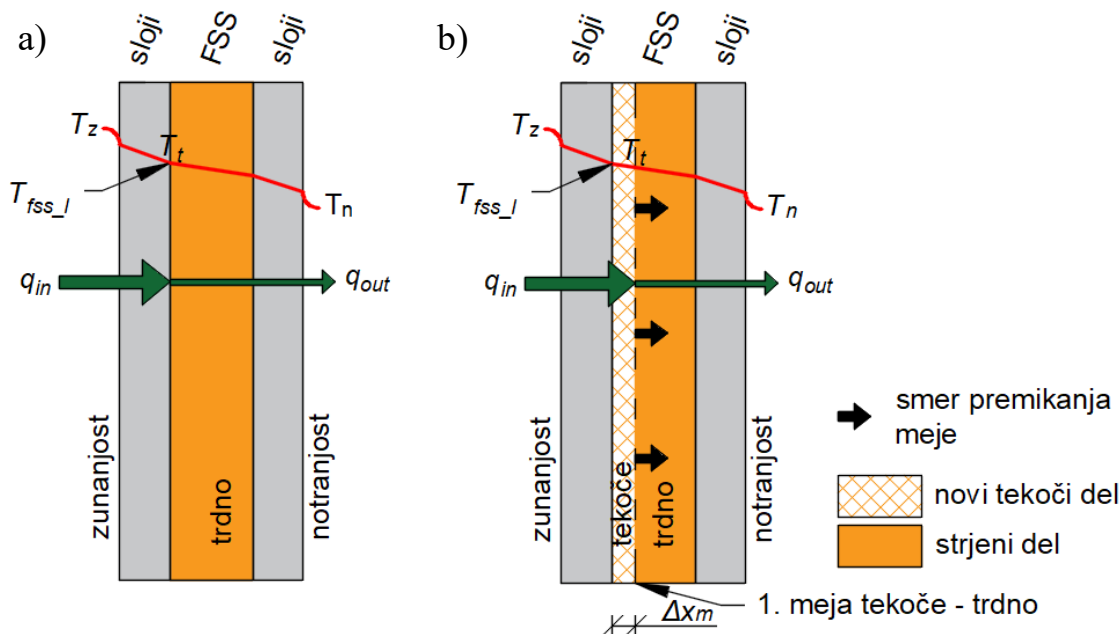
Za poenostavitev sicer kompleksnega modela se je uvedlo nekaj poenostavitev. V modelu je predpostavljeno kvazistacionarno stanje vseh slojev, kar je utemeljeno s Stefanovim številom. Notranja temperatura je konstantna oz. se regulira preko enote za uravnavanje temperature zraka. Gostota FSS variira glede na njeno agregatno stanje, razlika med trdnim in tekočim stanjem je približno 10 % [14]. Predpostavljeno je, da je gostota obeh agregatnih stanj enaka. Uporabljene FSS v praksi nimajo točne temperature tališča, ta variira za 1,5 °C [14]. V modelu je predpostavljeno, da temperatura tališča ne variira oz. je točna.

Okenski okvir je brez toplotnih izgub ali dobitkov. Konvekcija, ki bi sicer delovala v primeru staljene FSS in zraka, se zanemari. Zaradi mnogokrat večje toplote, potrebne za spremembo agregatnega stanja FSS, se je zanemarilo toploto potrebno za spremembo temperature snovi posameznih delov zasteklitve.

3.2 Fizikalni opis dogajanja

3.2.1 Taljenje

Zaradi spreminjanja agregatnega stanja FSS je treba teorijo toplotnega toka preurediti. Da se spoznamo z osnovnimi količinami si oglejmo preprost primer na sliki 3. Postavljena je zasteklitve površine 1 m² s FSS v vmesnem prostoru med poljubnim številom slojev. Na zunanji strani predpostavimo zunanjo temperaturo T_z , ki je toliko večja od tališča T_t , da je temperatura na levem robu FSS T_{fss_l} večja od T_t . Notranja temperatura T_n je manjša od tališča T_t .



Slika 3: Prečni prerez zasteklitve, a) zasteklitev v začetnem stanju s strjeno FSS, b) zasteklitev po pretečenem času Δt s staljeno plastjo FSS.

Iz zunanosti v zasteklitev do levega roba FSS vstopa toplotni tok q_{in} , pri čemer velja, da temperatura FSS ne more biti višja od tališča T_t , če FSS ni staljena. Tako velja:

$$q_{in} = \frac{T_z - T_t}{R_l} \cdot \frac{1}{S} \quad (9)$$

R_l ... toplotna upornost slojev levo od levega roba strjene FSS

Toplotni tok q_{out} , ki teče naprej v prostor, je drugačne velikosti, saj se del toplotnega toka q_{in} absorbira v FSS.

$$q_{out} = \frac{T_t - T_n}{R_d} \cdot \frac{1}{S} \quad (10)$$

R_d ... toplotna upornost desno od levega roba strjene FSS

Razlika $\Delta q = q_{in} - q_{out}$ pomnožena s časom trajanja toplotnega toka t je energija Q_t , ki se je absorbirala v FSS:

$$Q_t = m \cdot q_t \quad (11)$$

q_t ... talilna toplota izbrane FSS

Če v enačbo vstavimo razliko toplotnih tokov pomnoženih s časom, dobimo naslednje:

$$(q_{in} - q_{out}) \cdot S \cdot \Delta t = S \cdot \Delta x_m \cdot \rho_{fss} \cdot q_t \quad (12)$$

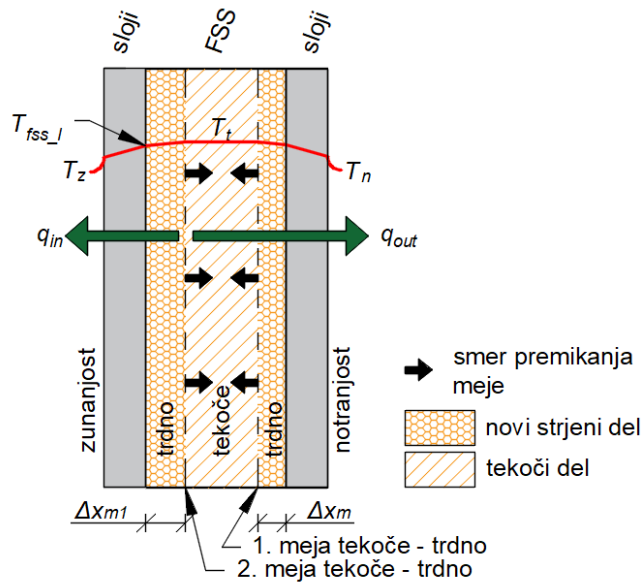
ρ_{fss} ... gostota izbrane FSS

Enačbo preuredimo in imamo debelino staljenega sloja FSS Δx_m (slika 3b), ki je posledica absorbirane energije:

$$\Delta x_m = \frac{(q_{in} - q_{out}) \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (13)$$

3.2.2 Strjevanje

Primer v poglavju 3.2.1 je obravnaval zasteklitev, v kateri se začne taliti v celoti strjena FSS. Sedaj si pogledjmo, kaj se zgodi, ko se zunaj ohladi in se zunanja temperatura spusti pod tališče FSS, da se ta prične strjevati. Staljeni FSS se temperatura ne bo spustila vse dokler ni povsem strjena. To pomeni, da je staljeni sloj FSS vroča točka, od katere odteka toplota v notranjost in zunanost (slika 4). Ko je $T_{fss,l} < T_t$, se toplotni tok q_{in} obrne in se staljena plast FSS začne strjevati od leve proti desni, kar ustvari 2. mejo trdno – tekoče. Prav tako se zaradi toplotnega toka q_{out} strjuje tudi desna stran staljene FSS pri 1. meji tekoče – trdno.



Slika 4: Prečni prerez zasteklitve, strjevanje staljene FSS z obeh strani.

Enačbi za debelino staljene FSS imata v tem primeru vsak svoj toplotni tok namesto razlike Δq :

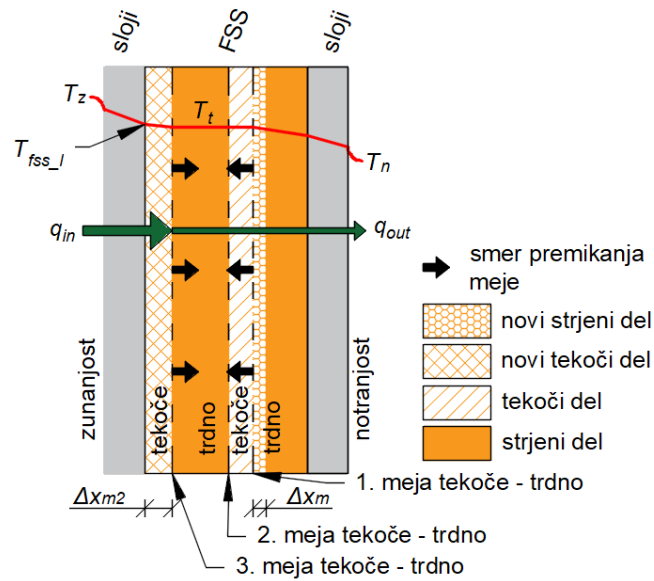
$$\Delta x_m = \frac{q_{out} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (14)$$

$$\Delta x_{m1} = \frac{q_{in} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (15)$$

Δx_{m1} ... debelina strjene plasti FSS, glej sliko 4.

3.2.3 Taljenje in strjevanje hkrati

Kaj pa se zgodi, če se v zgornjem primeru še pred popolno strditvijo FSS zunanja temperatura povzpne in je posledično T_{fss_l} višji od T_t ? V tem primeru se q_{in} zopet obrne proti notranosti, kar pomeni, da se leva strjena plast FSS začne taliti in se pojavi 3. meja tekoče – trdno (slika 5).



Slika 5: Prečni prerez zasteklitve, FSS v zasteklitvi s tremi mejami in štirimi plastmi.

2. meja tekoče – trdno se ne spreminja, ostaja na mestu, vse dokler se ne združi z bodisi 1. bodisi 3. mejo, ki se premikata druga proti drugi. 3. mejo premika razlika $\Delta q = q_{in} - q_{out}$, 1. mejo premika q_{out} , torej sta enačbi za novo staljeno plast Δx_{m2} in obstoječo Δx_m sledeči:

$$\Delta x_{m2} = \frac{\Delta q \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (16)$$

$$\Delta x_m = \frac{q_{out} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (17)$$

Če bi zgornjo pot nadaljevali, bi lahko uvedli še več mej, vendar se pojavi vprašanje smiselnosti le-tega. Z vsako dodatno mejo sicer pridobimo na natančnosti obnašanja modela v dnevu z mnogimi skoki temperature, vendar je smiselnost tega vprašljiva zaradi vseh predpostavljenih poenostavitev, predvsem konvekcije, ki ima verjetno večji vpliv kot vsaka naslednja meja. Tako smo definirali tri meje, da se je zagotovilo delovanje modela pri simuliranem sinusnem poteku dnevne temperature, ki nima skokov v zunanji temperaturi.

Kot navedeno, stalno spreminjajoče vreme in različna agregatna stanja FSS pomenita, da je za postavitev modela potrebno obnašanje zasteklitve razdeliti na več možnih stanj. Toplotni tok v notranjost q_{out} se razlikuje za štiri stanja. Toplotni tok iz zunanosti q_{in} je bolj kompleksen, zato je razdeljen na 5 stanj. Spodaj so nanizana stanja za q_{in} :

- I. taljenje pri naraščajoči temperaturi z eno mejo trdno – tekoče
- II. taljenje ali strjevanje pri padajoči temperaturi, ena meja tekoče – trdno
- III. stanje strjevanja staljene FSS z dvema mejama trdno - tekoče
- IV. taljenje delno strjene FSS
- V. splošno prehajanje toplotnega toka

Stanja I in II sta pri toplotnem toku q_{out} združena v eno stanje.

Našteta stanja se v modelskem izračunu menjajo glede na pogoje v zasteklitvi, kar smo upoštevali z uporabo stavkov z logičnimi funkcijami IF, OR, AND in NOT, ki pomenijo:

- IF: logični test, ki da eno vrednost za TRUE rezultat in eno za FALSE.
- OR: logični test z argumenti, ki da TRUE rezultat, če je eden izmed argumentov pravilen in FALSE rezultat, če so vsi nepravilni.
- AND: obratno od OR funkcije. Če so vsi argumenti pravilni, da TRUE rezultat in FALSE rezultat, če je le en argument nepravilen.
- NOT: obrne vrednost, torej FALSE je TRUE in TRUE je FALSE.

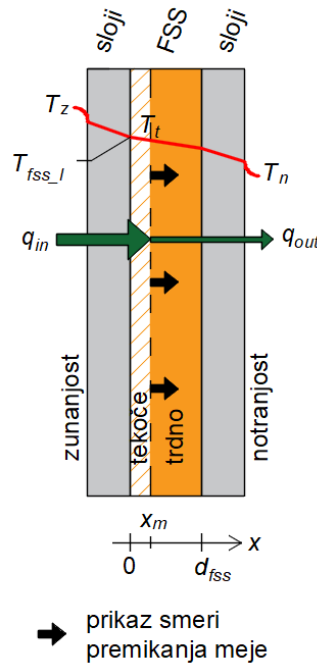
Izračun poteka iterativno z majhnimi časovnimi koraki pri čemer je bil časovni interval $\Delta t = 1800$ s oz. pol ure. Izračun je izveden s programskim orodjem Microsoft Excel.

3.2.4 Stanje I: taljenje pri naraščajoči temperaturi z eno mejo trdno - tekoče

Pogoji za nastop stanja taljenja, prikazanega na sliki 6, pri padajoči temperaturi:

- $T_{fss_l} > T_t$
 - T_{fss_l} ... temperatura skrajnega levega roba trdne FSS
 - T_t ... temperatura tališča
- $x_m \neq d_{fss}$
 - x_m ... razdalja od levega roba FSS do skrajno desne 1. meje tekoče – trdno. Ta meja je prva, ki se pojavi.
 - d_{fss} ... debelina sloja FSS
- $T_z^P < T_z$
 - Prejšnja temperatura je višja od naslednje – pogoj za naraščanje temperature
- $x_{ml} = 0$
 - x_{ml} ... razdalja od levega roba FSS do skrajno leve 2. meje trdno – tekoče. *Ta meja se pojavi, ko se FSS prične strjevati od leve proti desni (kadar je zunaj hladneje od tališča FSS oz. natančneje, kadar je $T_{fss_l} < T_t$)*

oz. v obliki logične funkcije: $\text{AND}(T_{fss_l} > T_t; T_z^P < T_z; x_{ml} = 0; x_m \neq d_{fss})$.



Slika 6: Stanje I – prečni prerez zasteklitve, prikaz taljenja FSS z eno mejo.

Gostota toplotnega toka stanja I q_{in}^I , definiran v spodnji enačbi, nam pove koliko toplote priteka iz zunanosti do 1. meje tekoče – trdno:

$$q_{in}^I = \frac{\Delta T_l}{R_l^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (18)$$

S ... površina (1 m^2)

ΔT_l ... razlika zunanje temperature T_z in temperature tališča FSS T_t

$$\Delta T_l = T_z - T_t \quad (19)$$

R_l^I ... toplotna upornost slojev levo od meje tekoče – trdno. Potrebno je upoštevati, da se debelini trdnega in staljenega dela FSS s časom spreminjata.

$$R_l^I = \frac{x_m}{\lambda_{fss}} + \sum_{i=1}^l R_i \quad (20)$$

i ... sloji levo od sloja s FSS

l ... število slojev levo od sloja s FSS

$$x_m = x_m^P + \Delta x_m \quad (21)$$

x_m^P ... razdalja od levega roba FSS do 1. meje tekoče – trdno v prejšnji iteraciji

Δx_m ... staljena debelina FSS iteracije

$$\Delta x_m = \frac{\Delta q^I \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (22)$$

Δt ... časovni interval oz. čas iteracije

Δq^I ... razlika toplotnih tokov $q_{in} - q_{out}$. Več o q_{out} spodaj.

Gostota toplotnega toka stanja I q_{out}^I , definirana v spodnji enačbi (23), nam pove koliko toplote odteka od 1. meje tekoče – trdno v notranjost:

$$q_{out}^I = \frac{\Delta T_d}{R_d^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (23)$$

ΔT_d ... razlika notranje temperature T_n in temperature tališča T_t FSS

$$\Delta T_d = T_t - T_n \quad (24)$$

R_d^I ... toplotna upornost slojev desno od 1. meje tekoče – trdno

$$R_d^I = \frac{d_{fss} - x_m}{\lambda_{fss}} + \sum_{m=1}^d R_m \quad (25)$$

m ... sloj desno od sloja FSS

d ... število slojev desno od sloja FSS

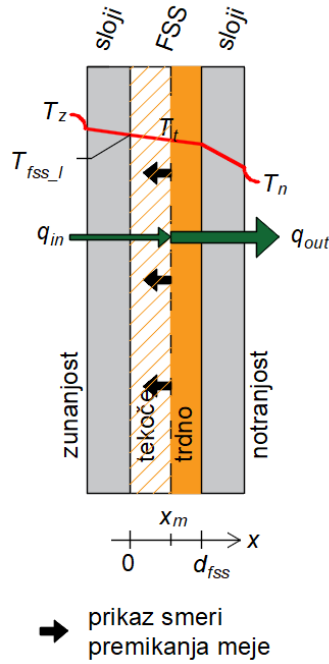
Razen v posebnih primerih, ko je $q_{in}^I = q_{out}^I$, se razlika med zgornjima gostotama toplotnega toka porabi za taljenje FSS.

3.2.5 Stanje II: taljenje ali strjevanje pri padajoči temperaturi, ena meja tekoče – trdno

Pri tem stanju se izvaja tako taljenje kot tudi strjevanje. Stanje na sliki 7 je po enačbah sicer enak prejšnjemu, vendar ima drugačne pogoje za nastop zaradi padajoče zunanje temperature.

Pogoj za nastop stanja:

$$- \text{AND}[T_z < T_z^P; T_z > T_i; x_m \neq d_{fss}; x_m \neq 0; x_{mI} = 0]$$



Slika 7: Stanje II – prečni prerez zasteklitve, prikaz strjevanja FSS z eno mejo.

$$q_{in}^{II} = q_{in}^I = \frac{\Delta T_l}{R_l^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (26)$$

$$R_l^{II} = R_l^I = \frac{x_m}{\lambda_{fss}} + \sum_{i=1}^l R_i \quad (27)$$

$$q_{out}^{II} = q_{out}^I = \frac{\Delta T_d}{R_d^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (28)$$

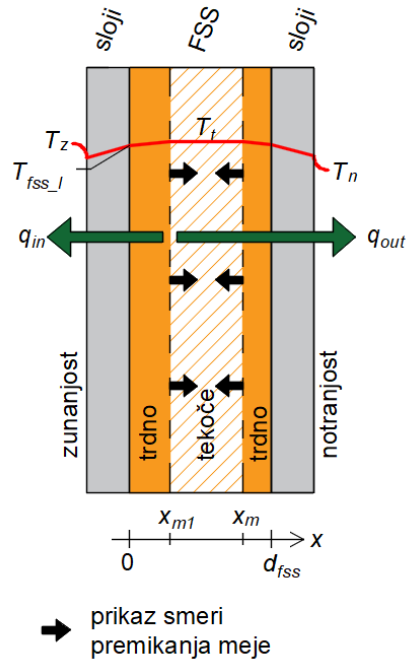
$$x_m = x_m^P + \Delta x_m \quad (29)$$

$$\Delta x_m = \frac{\Delta q^I \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (30)$$

3.2.6 Stanje III: strjevanje staljene FSS z dvema mejama trdno - tekoče

Pogoj za nastop strjevanja staljene FSS z dvema mejama (slika 8):

$$- \text{AND}[T_{fss,l} < T_i; x_m \neq 0; (x_{m1} + (d_{fss} - x_m)) < d_{fss}]$$



Slika 8: Stanje III – prečni prerez zasteklitve, prikaz taljenja delno strjene FSS. V tem primeru se obe meji premikata druga proti drugi.

Enačbe so podobne stanju I, le da je tu še 2. meja tekoče – trdno x_{m1} :

$$q_{in}^{III} = q_{in}^I = \frac{\Delta T_l}{R_l^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (31)$$

$$q_{out}^{III} = q_{out}^I = \frac{\Delta T_d}{R_d^I} \cdot \frac{1}{S} \quad (32)$$

$$x_{m1} = x_{m1}^P + \Delta x_{m1} \quad (33)$$

x_{m1}^P ... razdalja od levega roba FSS do 2. meje tekoče – trdno v prejšnji iteraciji

Δx_{m1} ... strjena debelina FSS iteracije

$$\Delta x_{m1} = \frac{\Delta q^{III} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (34)$$

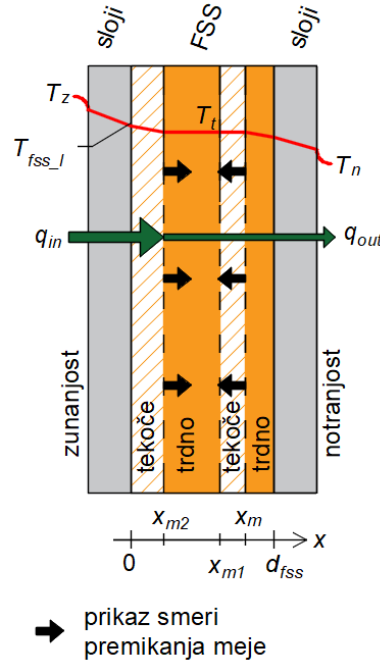
q_{out}^{III} se v tem stanju porabi za strjevanje Δx_m .

$$\Delta x_m = \frac{q_{out}^I \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (35)$$

3.2.7 Stanje IV: taljenje delno strjene FSS

Pogoj za nastop stanja taljenja delno strjene FSS:

- $\text{AND}[x_{m1} > 0; x_m < d_{fss}; 0 \leq (x_{m2} - x_{m2}^P); T_z > T_i; (x_{m1} - x_{m2}) > 0]$
 - x_{m2} ... razdalja od levega roba FSS do 3. meje tekoče – trdno. Ta meja se pojavi, če se FSS v času hladnejših temperatur ne strdi v celoti še preden T_{fss_l} naraste nad tališče.
 - $(x_{m2} - x_{m2}^P) \geq 0$... pogoj naraščanja x_{m2} – razdalja v trenutni iteraciji od levega roba FSS do 3. meje mora biti večja od razdalje prejšnje iteracije



Slika 9: Stanje IV – prečni prerez zasteklitve, prikaz taljenja levega sloja FSS in hkrati strjevanja desnega sloja. x_{m1} se v tem primeru ne spreminja.

$$q_{in}^{IV} = \frac{\Delta T_l}{R_l^{IV}} \cdot \frac{1}{S} \quad (36)$$

R_l^{IV} ... toplotna upornost levo od meje tekoče – trdno

$$R_l^{IV} = \frac{x_{m2}}{\lambda_{fss}} + \sum_{i=1}^l R_i \quad (37)$$

$$x_{m2} = x_{m2}^P + \Delta x_{m2} \quad (38)$$

x_{m2}^P ... tretja meja tekoče - trdno v prejšnji iteraciji

Δx_{m2} ... staljena debelina FSS iteracije

$$\Delta x_{m2} = \frac{\Delta q^{IV} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (39)$$

$$q_{out}^{IV} = \frac{\Delta T_d}{R_d^{IV}} \cdot \frac{1}{S} \quad (40)$$

R_d^{IV} ... toplotna upornost desno od 3. meje tekoče – trdno

$$R_d^{IV} = \frac{d_{fss} - x_{m2}}{\lambda_{fss}} + \sum_{n=1}^d R_n \quad (41)$$

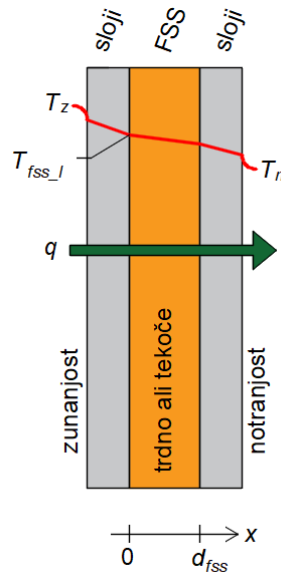
q_{out}^{IV} se v tem stanju porabi za strjevanje Δx_m .

$$\Delta x_m = \frac{q_{out}^{IV} \cdot \Delta t}{q_t \cdot \rho_{fss}} \quad (42)$$

3.2.8 Stanje V: stanje splošnega prehajanja toplotnega toka

Pogoji za nastop stanja splošnega prehajanja toplotnega toka

- $OR[x_m = d_{fss}; AND[x_m = 0; NOT[AND[T_{fss_l}^n < T_t; T_{fss_l}^{n+1} > T_t]]]]$
- $T_{fss_l}^n < T_t; T_{fss_l}^{n+1} > T_t$... pogoj za primer, ko temperatura ravno prekorači tališče



Slika 10: Stanje V – prečni prerez zasteklitve, prikaz običajnega preprostega prehajanja toplote.

V tem stanju je $q_{in}^V = q_{out}^V$, zato potrebujemo le naslednjo enačbo:

$$q^V = \frac{\Delta T^V}{R} \cdot \frac{1}{S} \quad (43)$$

R ... celoten upor zasteklitve

ΔT^V ... razlika med zunanjo in notranjo temperaturo

$$\Delta T^V = T_z - T_n \quad (44)$$

3.3 Izračun toplotne bilance

Toplotna bilanca oz. energija, ki je bodisi pritekla bodisi odtekla iz prostora, je izračunana po naslednji enačbi:

$$Q_{out} = \sum_{i=1}^v q_{out_i} \cdot \Delta t \quad (45)$$

v ... število izračunov v enem dnevu. Pri $\Delta t = 30$ min je $v = 48$

3.4 Predpostavljene lastnosti

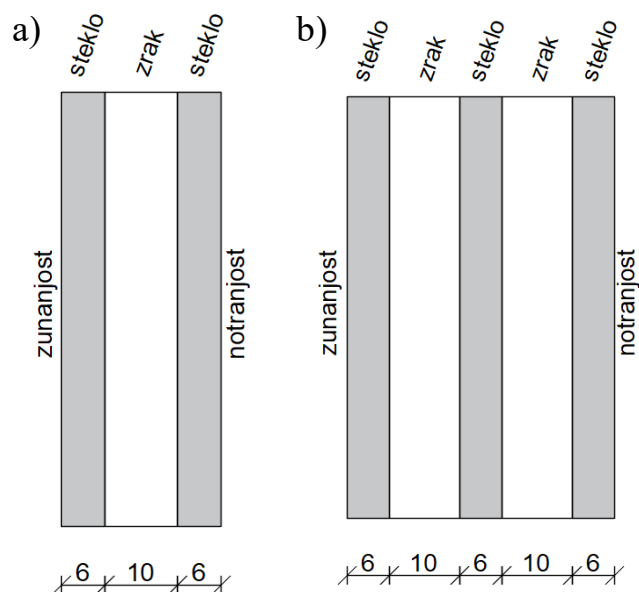
Izbrani so bile FSS nemškega proizvajalca Rubitherm, bolj specifično njihova linija organskih FSS izdelkov RT-line na parafinski osnovi. Za linijo proizvajalec trdi, da ponujajo veliko akumulacijo energije pri približno konstantni temperaturi. Iz specifikacij je razvidno, da so FSS zmožne hraniti od 120 – 260 kJ/kg pri temperaturi $\pm 1,5$ °C okoli tališča, odvisno od izbrane FSS. Prav tako navajajo, da so kemično inertne in se ne degradirajo tudi čez več tisoč ciklov [14].

V nadaljevanju se bo uporabilo njihove oznake za FSS, kot npr. RT 28 HC, kjer je:

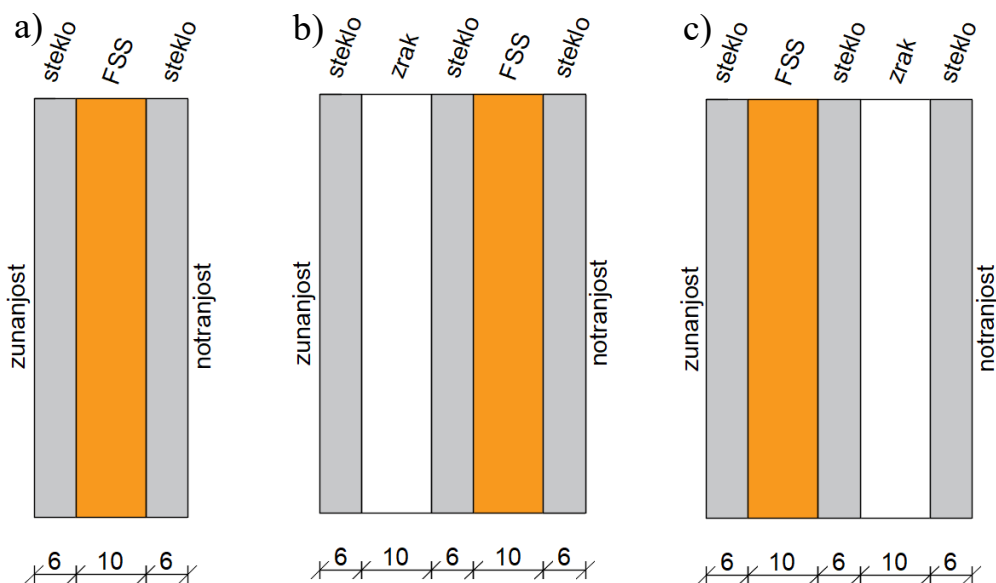
- RT: interna kategorizacija FSS podjetja Rubitherm
- 28: temperatura tališča FSS (28 °C)
- HC: visoka akumulacija (okrajšava za *ang. high capacity*)

Vsi uporabljeni voski so tipa HC, zato se ta okrajšava v nadaljevanju izpušča.

Toplotne prevodnosti zraka, stekla, notranje in zunanje mejne prestopne plasti so vzete iz tehnične smernice za učinkovito rabo energije [15]. Za preizkus je bilo narejenih več konfiguracij dvoslojne in troslojne zasteklitve (slika 12). Vsem zasteklitvam je skupna površina 1 m² in nadstandardna debelina stekla $d_s = 6$ mm. Razlog za debelejšo steklo je v dodatnem pritisku zaradi FSS v medstekelnem prostoru. Običajna dvoslojna zasteklitev in troslojna zasteklitev na sliki 11 predstavljata osnovo, ki se jo bo poskusilo izboljšati z dodajanjem FSS v medstekelni prostor. Običajni zasteklitvi imata medstekelni prostor debeline $d_{zrak} = 10$ mm, pri modificiranih zasteklitvah je ta dimenzija izhodišče, ki se ga prilagaja v iskanju optimalne konfiguracije. Analizirane so bile 3 konfiguracije modificiranih zasteklitev: dvoslojna zasteklitev s FSS v medstekelnem prostoru, troslojna zasteklitev s FSS v zunanjem medstekelnem prostoru in obratna konfiguracija.



Slika 11: Običajni zasteklitvi; a) dvoslojna, b) troslojna.



Slika 12: Zasteklitve s FSS; a) dvoslojna s FSS troslojna, b) troslojna s FSS na notranji strani, c) troslojna s FSS na zunanji strani.

3.5 Omejitve

Zaradi vse večje kompleksnosti modela se je pojavila potreba po dodatnih poenostavitvah, zato model deluje le za primere, ko je temperatura tališča nad temperaturo notranjosti. Model je bil prvotno zasnovan okoli sinusnega poteka temperature, vendar je sposoben upoštevati nekatere bolj realistične pojave. To je npr. Padec temperature, ki ne pade pod temperaturo tališča med drugače splošnim dvigovanjem temperature (npr. Od jutra do popoldneva). Pri pogostejših, običajno tudi večjih padcih temperature, ki so v intervalu temperature tališča FSS, lahko pride do anomalij zaradi omejenega števila mej (3) med tekočim in trdnim stanjem FSS, saj se pojavi potreba po večjem številu teh mej.

4 ANALIZA RAZLIČNIH KONFIGURACIJ ZASTEKLITEV V ČASU POLETJA S SIMULIRANIMI PODATKI

Analiza zaseklitve s FSS, ki ima tališče enako ali višje od sobne temperature ima smisel le za obdobje, ko je zunanja temperatura višja od tališča za primerno dolg čas, da se FSS stali. Model striktno ne potrebuje treh zaporednih podobnih dni, vendar so za zvezen začetek in konec priporočljivi, saj izračun začnemo z nekim izbranim začetnim stanjem in potrebuje nekaj časa, da preide v običajno obnašanje neodvisno od izbranega začetnega stanja. Rezultat se izpiše na osnovi srednjega oz. drugega dneva. Potek temperature se je definiral s sinusno krivuljo, ki predstavlja približek poteku dejanskih temperatur.

$$T_z = T_s + T_a \cos\left(\frac{2 \cdot \Pi \cdot t}{t_o} + \frac{\Pi}{2}\right) \quad (46)$$

T_z ... zunanja temperatura

T_s ... srednja zunanja temperatura

T_a ... amplituda temperaturnega nihanja

t ... čas

t_o ... perioda $t_o = 1440 \text{ min}$

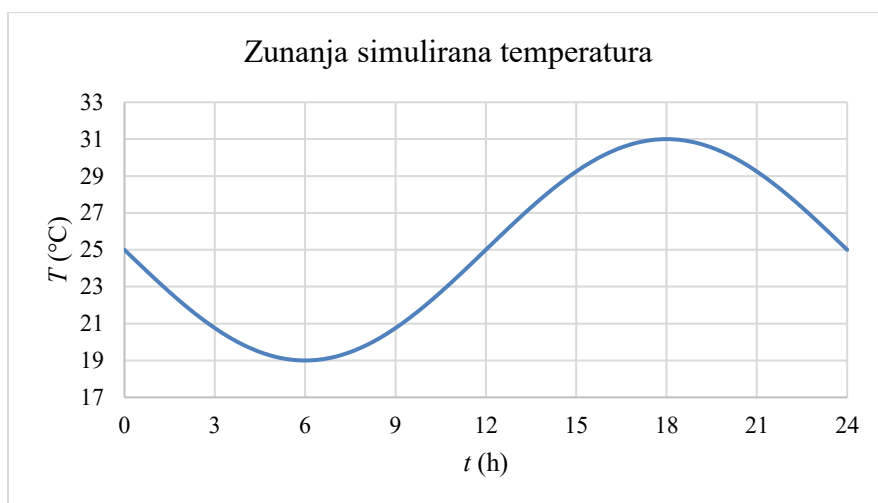
Izbrana je navzgor zaokrožena temperaturna amplituda $T_a = 6 \text{ °C}$ na podlagi povprečne junijske, julijske in avgustovske temperaturne razlike med najnižjo in najvišjo dnevno temperaturo. Podatke je zabeležila vremenska postaja Bežigrad v Ljubljani za obdobje 2010 do 2020 [15], prikazani so v preglednici 2.

Srednja temperatura $T_s = 25 \text{ °C}$ je izbrana tako, da se omogoči spreminjanje agregatnega stanja FSS in hkrati upošteva značilnosti Ljubljanskega poletnega vremena.

Simuliran dan na sliki 13 se prične ob 00:00 s srednjo temperaturo $T_s = 25 \text{ °C}$, ki pada do najnižje temperature $T = 19 \text{ °C}$ ob 6:00, nato se povzpne do najvišje temperature 31 °C ob 6:00. To sicer ni v skladu z dejanskim potekom temperatur skozi dan, vendar to nima vpliva na rezultat.

Preglednica 2: Povprečne minimalne in maksimalne mesečne temperature za obdobje 2010–2020.

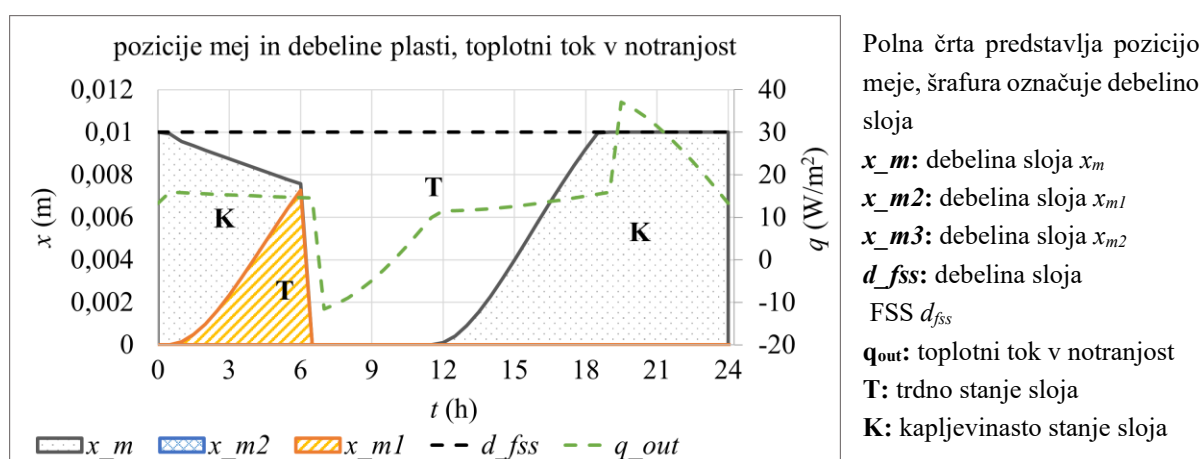
	Junij		Julij		Avgust	
	<i>min. T</i>	<i>max. T</i>	<i>min. T</i>	<i>max. T</i>	<i>min. T</i>	<i>max. T</i>
2010	14,5	25,5	17,3	28,9	15,5	26,0
2011	14,7	25,5	15,3	26,9	16,2	29,5
2012	15,5	26,8	17,3	28,9	16,5	30,7
2013	13,9	25,8	16,6	30,1	15,9	29,5
2014	14,1	26,5	15,8	26,5	15,2	25,1
2015	14,6	26,4	18,7	30,2	16,7	28,5
2016	15,1	25,2	17,7	29,1	15,2	27,0
2017	16,0	27,8	16,8	29,3	16,7	30,2
2018	15,2	27,1	16,7	28,2	17,3	29,2
2019	17,0	29,4	17,1	29,0	17,6	28,2
2020	14,5	24,8	15,8	27,9	17,4	28,2
2010–2020	15,0	26,4	16,8	28,6	16,4	28,4
$T_{\max} - T_{\min}$	11,4		11,8		12,0	
T_a	5,7		5,9		6	



Slika 13: Potek simulirane zunanje temperature v obliki sinusa.

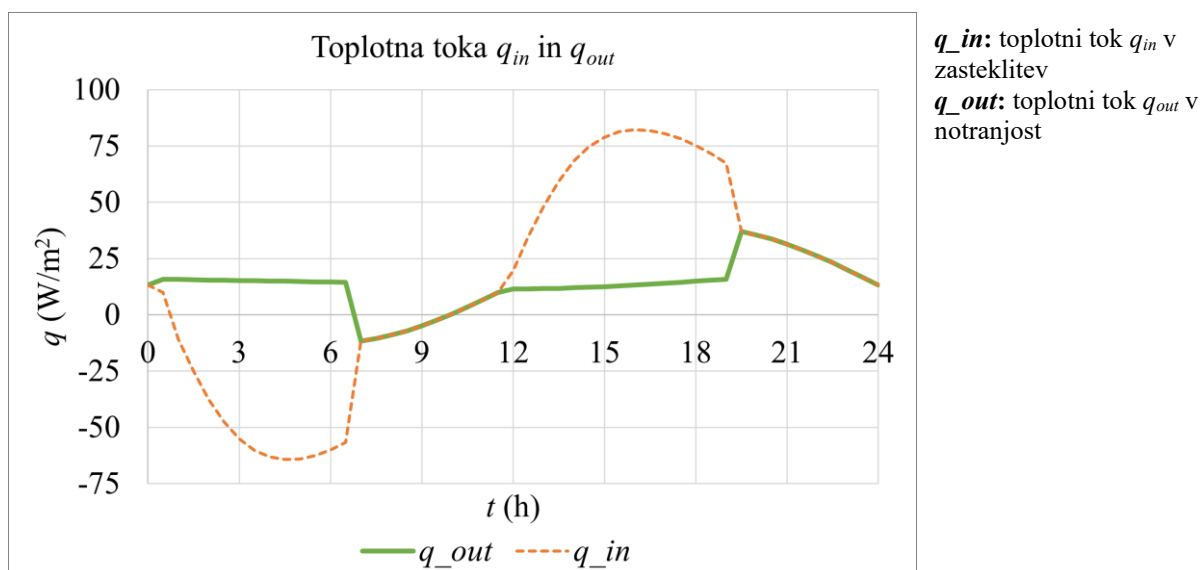
4.1 Rezultati in primerjava

Ker grafi vsebujejo veliko prepletajočih in nezveznih krivulj, si najprej oglejmo dogajanje na spodnjem primeru dvoslojne zasteklitve s FSS (RT24) pri notranji temperaturi 21,9 °C. Na sliki 14 polni črti prikazujeta premikanje prvih dveh mej x_m in x_{m1} , šrafirano območje pa njuno debelino. Tako je debelina sivo šrafiranega tekočega sloja pri $t = 3$ h približno 0,007 m ($d = x_m - x_{m1} = 0,009$ m - 0,002 m = 0,007 m). Zelena prekinjena črta označuje toplotni tok v notranjost q_{out} , črna označuje debelino sloja FSS d_{fss} . Črki označujeta tekoče oz. kapljevinsko stanje (K) in trdno stanje (T) šrafirane površine. Kadar FSS menjuje agregatno stanje je toplotni tok približno konstanten, spreminja ga le premikanje meje, ki v zameno spreminja vrednost toplotne upornosti R_d . V trenutku, ko se sprememba agregatnega stanja v celoti izvrši (glej $t = 6$ h), toplotni tok skoči oz. pade, saj zamenja stanje oz. se hipno spremeni temperatura iz tališča na višjo ali nižjo.



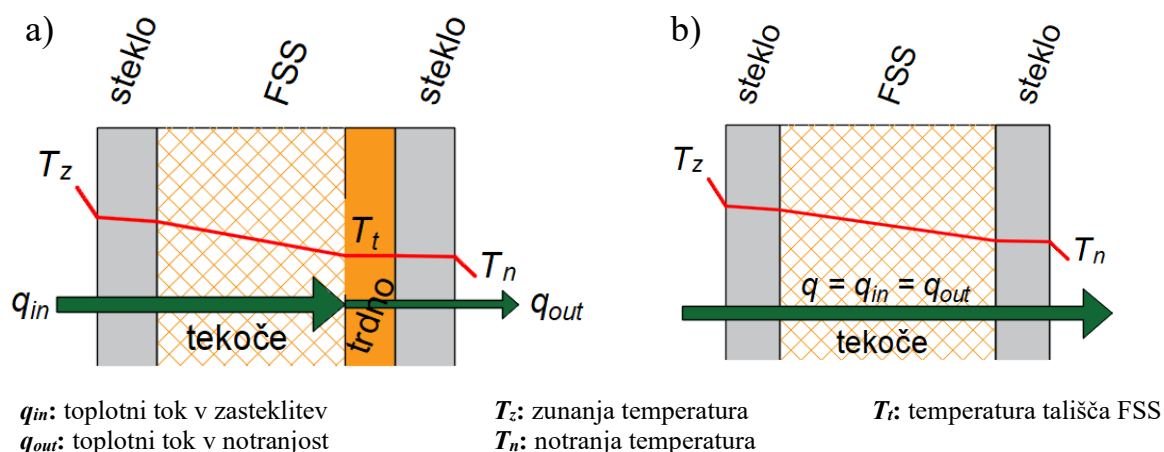
Slika 14: Premikanje mej in toplotni tok v notranjost, kadar je tok približno konstanten vsek menja agregatno stanje.

Slika 15 prikazuje, da sta si toplotna tokova q_{in} in q_{out} različna, razen če je vosek (tj. FSS) v zasteklitvi popolnoma strjen ali staljen. Razlika med njima se, odvisno od zunanje temperature, akumulira v vosek ali pa oddaja iz voska za spreminjanje agregatnega stanja.



Slika 15: Toplotna tokova q_{in} in q_{out} sta si različna, kadar se spreminja agregatno stanje FSS.

Na spodnji sliki 16 je prikazan različni potek temperature glede na stanje. Na levi je FSS delno staljen, kar pomeni, da je q_{out} odvisen od tališča in debeline preostalega strjenega sloja. Na desni je FSS popolnoma staljen in je q_{out} enakovreden q_{in} , saj se toplota ne more več akumulirati (oddajati) v (iz) FSS.



Slika 16: potek temperature v prečnem prerezu zasteklitve; a) pred popolno stalitvijo FSS je na 1. meji temperatura tališča, saj nestaljeni FSS ne more preseči tališča, b) po popolni stalitvi je temperatura FSS nad T_t .

Ker so bile za analizo uporabljene poletne vremenske razmere v Ljubljani, ki je značilno obdobje potrebe po hlajenju stavb, iščemo rezultat s čim manjšo pridobljeno toploto Q_{out} .

4.1.1 Dvoslojna zasteklitev s FSS

Primer: $T_n = 21,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; RT22, RT24 in RT28

Zaradi toplotne prevodnosti parafinskega voska, ki je v primerjavi z zrakom 8-krat višja, pride do visokih toplotnih tokov v času staljenega voska, kot prikazuje slika 17a. Visoka toplotna prevodnost voska bi lahko med časom nižjih temperatur odvajala toploto, vendar do tega ne pride, saj se prav v tem času staljeni vosek strjuje in oddaja toploto. Tako je toplotni tok v notranjost bistveno manjši le v času taljenja in strjevanja voska, v času popolne strjenosti ali staljenosti pa je višji. Slika 18a prikazuje, da se

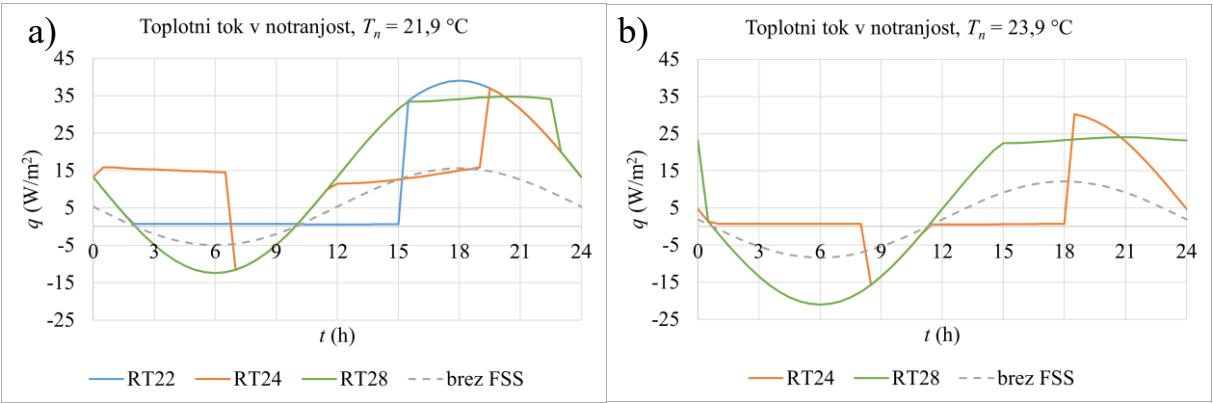
FSS v času nižjih temperatur ne strdi v celoti in tako ni popolnoma izkoriščena toplotna akumulacija. RT22 in RT24 se prehitro stali, medtem ko je RT28 le delno izkoriščen, saj se stali le slaba šestina voska (slike 18a – 18d). Pridobljena toplota je tako več kot dvakrat višja od običajne zasteklitve (preglednica 3).

Primer: $T_n = 23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; RT24 in RT28

Višja notranja temperatura ne prispeva k znatnem zmanjšanju pridobljene toplote za zasteklitev s FSS. Energijski pritok je sicer manjši, vendar je upoštevajoč običajno dvoslojno zasteklitev še vedno 2,2-krat (RT24) oz. 2,6-krat (RT28) večja (preglednica 3). Toplotni tok zasteklitve z RT24 je dobro polovico dneva na zelo nizki vrednosti ($0,7\text{ W/m}^2$) dokler se ne stali ali strdi v celoti, kot je vidno na sliki 17b. Vosek RT24 je dobro izkoriščen, saj se v celoti stali in strdi (slika 18c), kar se odraža v boljšem rezultatu kot RT28, ki je zopet večinoma neizkoriščen pri le 23,7 % (preglednica 3, slika 18e).

Preglednica 3: primerjava toplotnih bilanc različnih konfiguracij zasteklitve pri različnih pogojih dvoslojne zasteklitve s FSS.

DVOSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 10\text{ mm}$	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	13,9	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	301,9	318,1	317,7	130,2
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 10\text{ mm}$	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	23,7	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	-	103,0	118,3	46,2



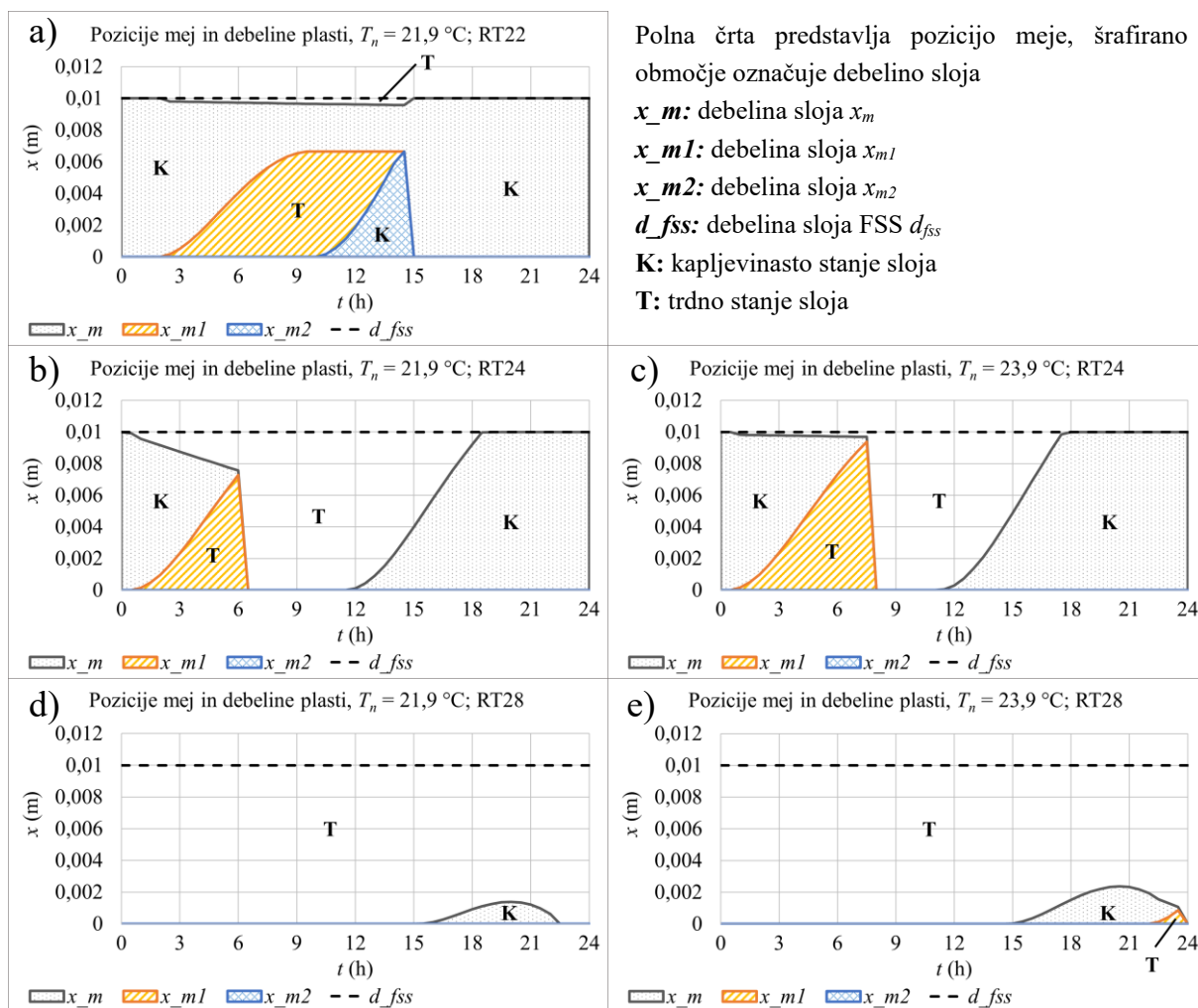
RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS

RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS

brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

Slika 17: grafikona toplotnih tokov; a) absolutna vrednost toplotnih tokov zasteklitev s FSS je mnogo višja od toka običajne zasteklitve, le pri taljenju RT22 ni zaradi majhne temperaturne razlike, b) RT24 je večino dneva konstanten.



Slika 18: grafikon premikanja mej in debelin plasti, a) vosek RT22 se čez noč ne strdi v celoti; b) in c) vosek je v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se le delno stali zaradi previsokega tališča.

4.1.2 Troslojna zasteklitev s FSS na zunanji strani

Pri primeru dvoslojne zasteklitve s FSS je problem zaradi visokega toplotnega toka. Pri troslojni zasteklitvi s FSS na zunanji strani imamo na notranji strani dodaten visokoizolativni zračni sloj, ki ovira toplotni tok. To se pokaže tudi v toplotnih dobitkih, ki so v primerjavi s dvoslojno zasteklitvijo s FSS veliko bližje primerljivemu običajnemu troslojni zasteklitvi. Toplotni toki so bodisi blizu nič bodisi blizu toplotnemu toku običajni troslojni zasteklitvi.

Primer: $T_n = 21,9\text{ °C}$; FSS: RT22, RT24 in RT28

Toplotni dobitki so sedaj 1,4–1,6-krat višji od običajne zasteklitve (preglednica 4). Pri izbranih pogojih se zopet pojavi problem stalitve celotne debeline FSS pri RT22 in RT24 še preden se temperatura začne nižati (slika 20a, 20b), kar pomeni, da je del dneva povišan toplotni tok (slika 19a). RT28 se stali le za 37,6 % (preglednica 4, slika 20d), vendar zaradi visokega tališča prepušča visok toplotni tok (7 W/m^2) že med samim taljenjem, kot prikazuje slika 19a.

Primer: $T_n = 23,9\text{ °C}$; FSS: RT24 in RT28

Vosek RT24 je v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, kar se odraža v visokem toplotnem toku v končnih urah dneva (sliki 19b in 20c). Kot v prejšnjem primeru se RT28 ne stali v celoti in tako prepreči vdor najvišjih vrednosti toplotnega toka tekom najvišjih temperatur dneva (sliki 19b in 20e). Kljub temu preglednica 4 prikazuje manjši toplotni pridobitek za vosek RT24, saj ima zelo nizek toplotni tok ($0,18 \text{ W/m}^2$) v času taljenja zaradi manjše temperaturne razlike med FSS in notranjostjo (slika 19b).

Primer: $T_n = 21,9 \text{ }^\circ\text{C}$; $d_{fss} = 0,012 \text{ m}$; FSS: RT22, RT24 in RT28

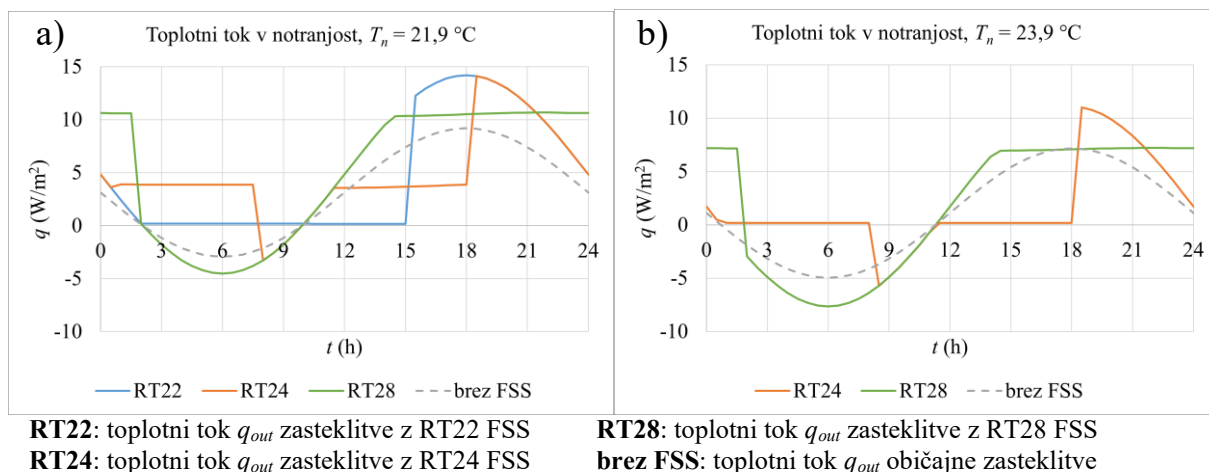
Dodatna debelina voska zmanjša toplotne dobitke RT24 in RT28 za 2 % oz. 4 % (preglednica 4). Pri RT28 je rezultat boljši le zaradi višje toplotne upornosti dodatnih dveh milimetrov voska, saj se dodatna debelina FSS ne izkoristi za taljenje oz. strjevanje.

Primer: $T_n = 23,9 \text{ }^\circ\text{C}$; $d_{fss} = 0,012 \text{ m}$; FSS: RT24 in RT28

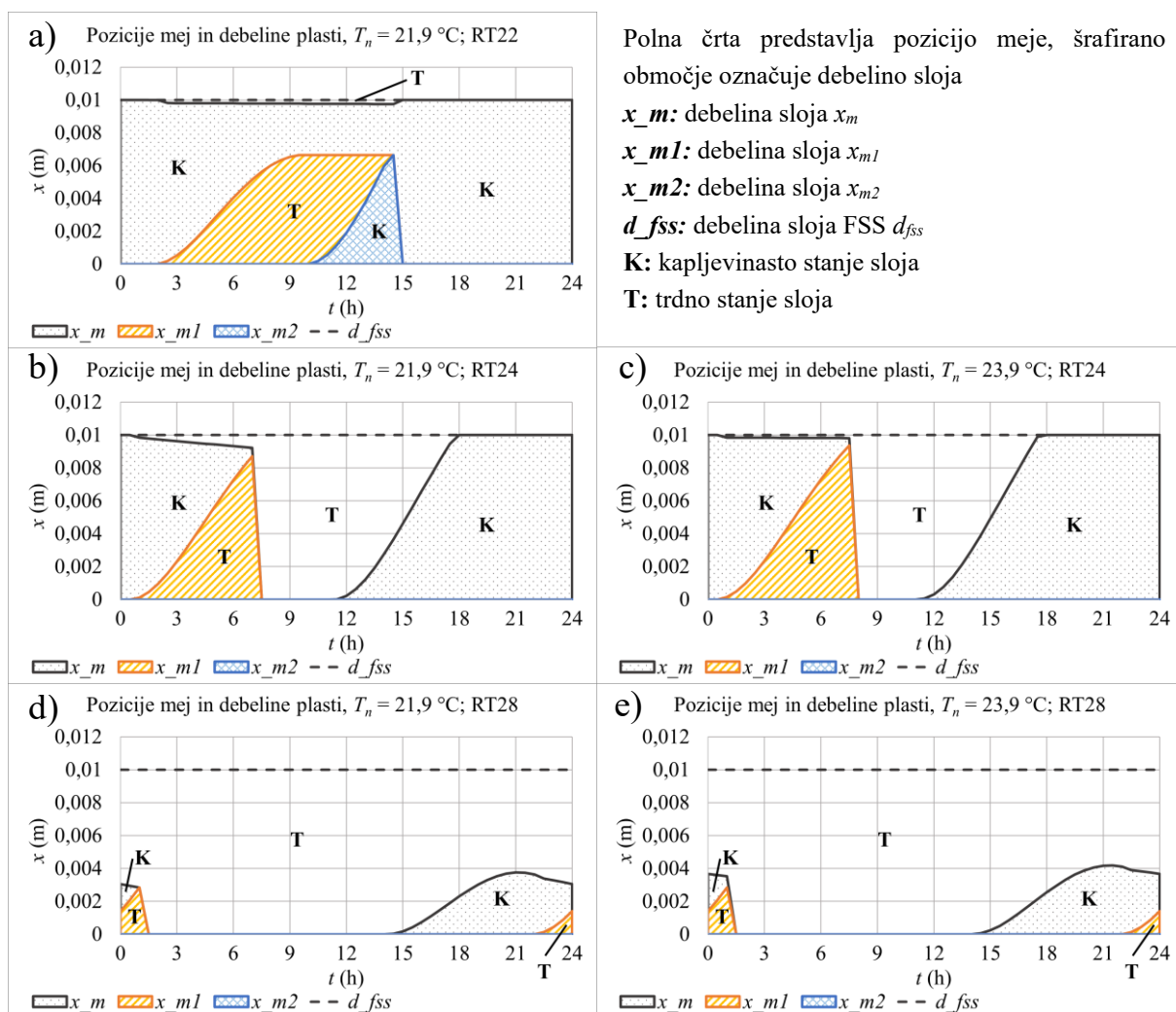
V tem primeru se toplotni dobitki znižajo le za slaba 2 % (preglednica 4). Slika 21b prikazuje, da toplotni tok voska RT24 le v enem delu dneva poskoči, preostali del je približno konstanten pri $0,18 \text{ W/m}^2$.

Preglednica 4: primerjava toplotna bilanca različnih konfiguracij zasteklitve pri različnih pogojih troslojne zasteklitve s FSS na zunanji strani.

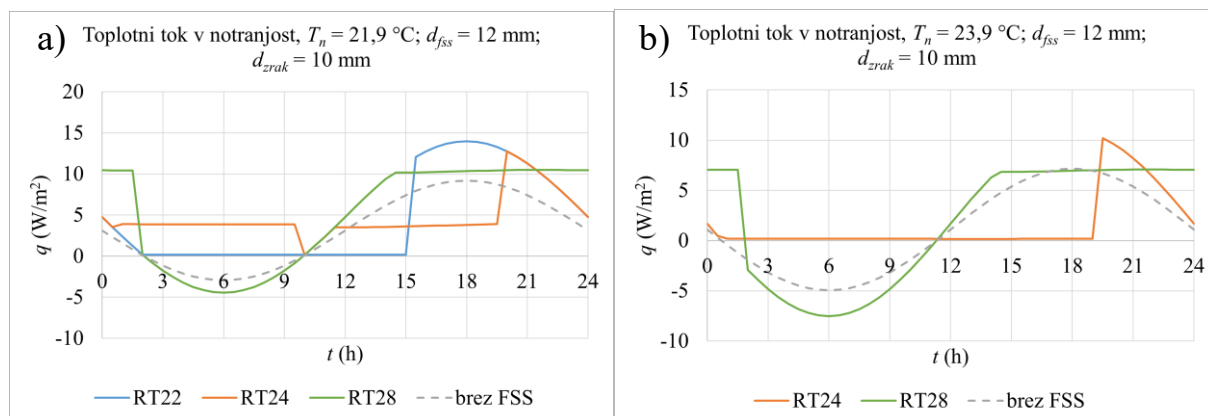
TROSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS NA ZUNANJI STRANI				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 10 \text{ mm}$	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	37,6	-
$Q_{out} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	109,0	114,8	120,0	76,7
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 10 \text{ mm}$	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	41,9	-
$Q_{out} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	-	36,5	41,4	27,2
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 12 \text{ mm}$	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	31,5	-
$Q_{out} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	107,3	110,6	118,0	76,7
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 12 \text{ mm}$	∕	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	35,0	-
$Q_{out} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	-	35,9	40,6	27,2



Slika 19: grafikona toplotnih tokov, oblika krivulj je podobna kot pri dvoslojni zasteklitvi s FSS; a) in b) dodaten sloj zasteklitve približa absolutne vrednosti toplotnih tokov zasteklitve s FSS k toku zasteklitve brez FSS.



Slika 20: grafikoni premikanja mej in debelin plasti, poteki so podobni kot pri dvoslojni zasteklitvi s FSS; a) vosek RT22 se čez noč ne strdi v celoti; b) in c) vosek je v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se le delno stali zaradi previsokega tališča.



RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS

RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS

brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

Slika 21: grafikona toplotnih tokov; a) dodatna debelina sloja FSS komaj opazno prispeva k nižjim toplotnim tokom, b) RT24 je več kot $\frac{3}{4}$ dneva konstanten.

Grafi premikanja mej za primer, ko je $d_{fss} = 0,012$ m niso prikazani, saj so zelo podobni izhodiščnim grafom.

4.1.3 Troslojna zasteklitev s FSS na notranji strani

Primer: $T_n = 21,9$ °C; RT22, RT24 in RT28

Troslojna zasteklitev s FSS na notranji strani se pri tem primeru obnese podobno kot obratna konfiguracija. Zaradi visoke izolativnosti zračnega sloja na zunanji strani so temperature v notranjem sloju zasteklitve manjše, kar podaljša čas taljenja pri RT24 in RT28 do te mere, da se ne stalita v celoti ali pa se proces sploh ne sproži (preglednica 5, sliki 23b in 23d). Hkrati se zaradi večje izolativnosti na zunanji strani le manjši del voska RT22 strdi v času nižjih temperatur (slika 23a), kar pomeni nizko izkoriščenost voska. Toplotni toki, prikazani na sliki 22a, so višji kot v obratni konfiguraciji zaradi manjše izolativnosti desno od sloja s FSS.

Primer: $T_n = 23,9$ °C; RT24 in RT28

Podobno prejšnjemu primeru, le da se RT24 stali v celoti in hkrati ne strdi v celoti, kot RT22 v prejšnjem primeru (preglednica 5, slika 23c). RT24 ima nizek toplotni tok ($0,5$ – $0,7$ W/m²) večji del dneva. (slika 22b). RT28 ostane v celoti neizkoriščen (slika 23e).

Primer $T_n = 21,9$ °C; $d_{fss} = 2$ mm, $d_{zrak} = 18$ mm; RT22, RT24, RT28

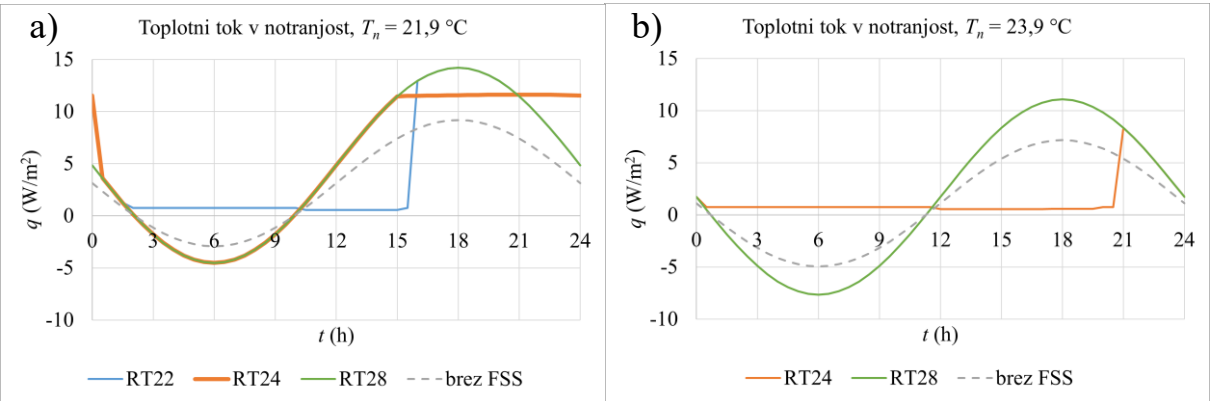
Da bi se rešilo problem nestrjevanja FSS, se je zmanjšalo debelino FSS in sorazmerno zvišalo debelino zračnega sloja. Ukrepa sicer nasprotujeta drug proti drugemu, vendar se obrestujeta, saj je pridobljena toplota voska RT22 manjša od običajne zasteklitve za 11 % (preglednica 5). Voska RT24 in RT28 imata 5 % višjo pridobljeno toploto v primerjavi z običajno zasteklitvijo, verjetno zaradi višje toplotne prevodnosti FSS, saj oba voska ostaneta neizkoriščena (sliki 25b in 25d). Slika 24a prikazuje, da toplotni tok voskov RT24 in RT28 sledi toplotnemu toku običajne zasteklitve, vendar z nekoliko višjo, za $0,8$ W/m², amplitudo.

Primer: $T_n = 23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; $d_{fss} = 2\text{ mm}$, $d_{zrak} = 18\text{ mm}$; RT24 in RT28

Pri tej notranji temperaturi se vosek RT24 najbolje obnese. Zaradi majhne debeline se velika večina voska v času nižanih temperatur strdi, hkrati pa visokoizolativno zračni sloj dovolj izolira vosek, da se dlje časa tali, kar prepreči visok toplotni tok v notranjost (sliki 24b, 25c). Zaradi majhne temperaturne razlike tališča voska in notranje temperature je toplotni tok med taljenjem ali strjevanjem FSS nizek ($0,7\text{ W/m}^2$). Končni rezultat je za 28 % boljši proti običajni zasteklitvi pri RT24 in približno ekvivalenten pri RT28, kljub temu da je slednji popolnoma neizkoriščen (preglednica 5, slika 25e).

Preglednica 5: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na notranji strani.

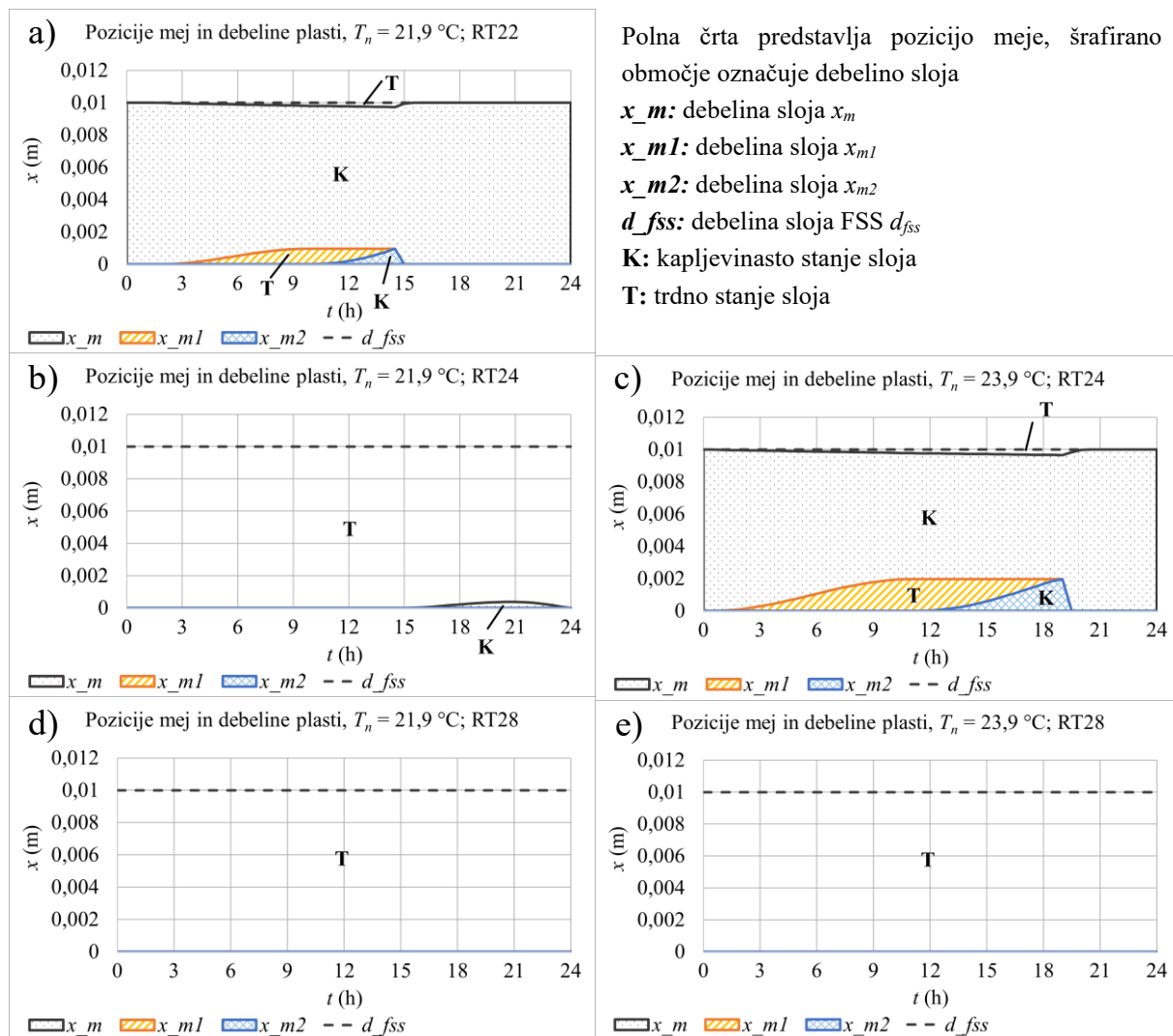
TROSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS NA NOTRANJI STRANI				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 10\text{ mm}$	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	3,8	0,0	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	101,2	117,5	116,1	76,7
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 10\text{ mm}$	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	0,0	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	-	32,0	41,2	27,2
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 2\text{ mm}$, $d_{zrak} = 18\text{ mm}$	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	0,0	0,0	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	71,7	80,8	80,8	76,7
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 2\text{ mm}$, $d_{zrak} = 18\text{ mm}$	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	0,0	-
$Q_{out}\text{ (Wh/m}^2\text{)}$	-	19,7	28,7	27,2



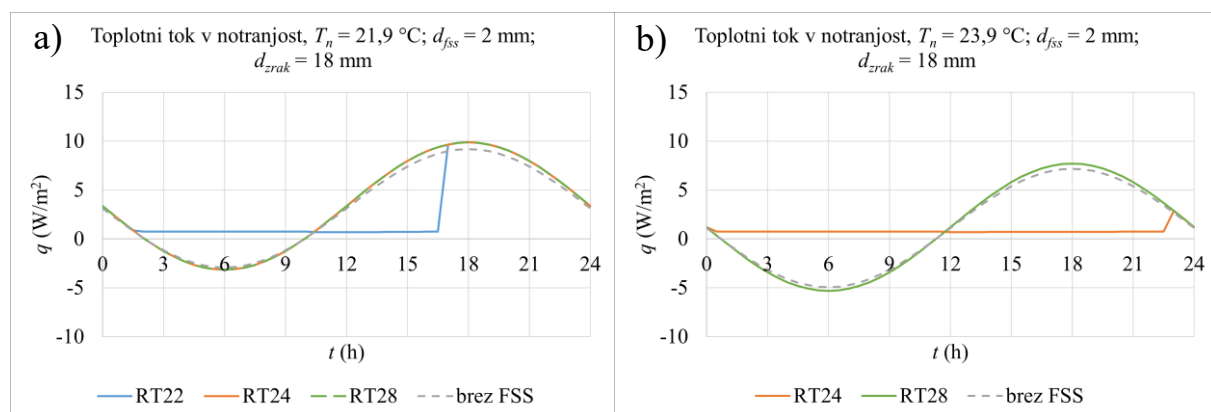
RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

Slika 22: grafikona toplotnih tokov; a) RT24 in RT28 sta si večino časa enakovredna, b) RT24 je v primerjavi s prejšnjima primeroma še večji del dneva konstanten.



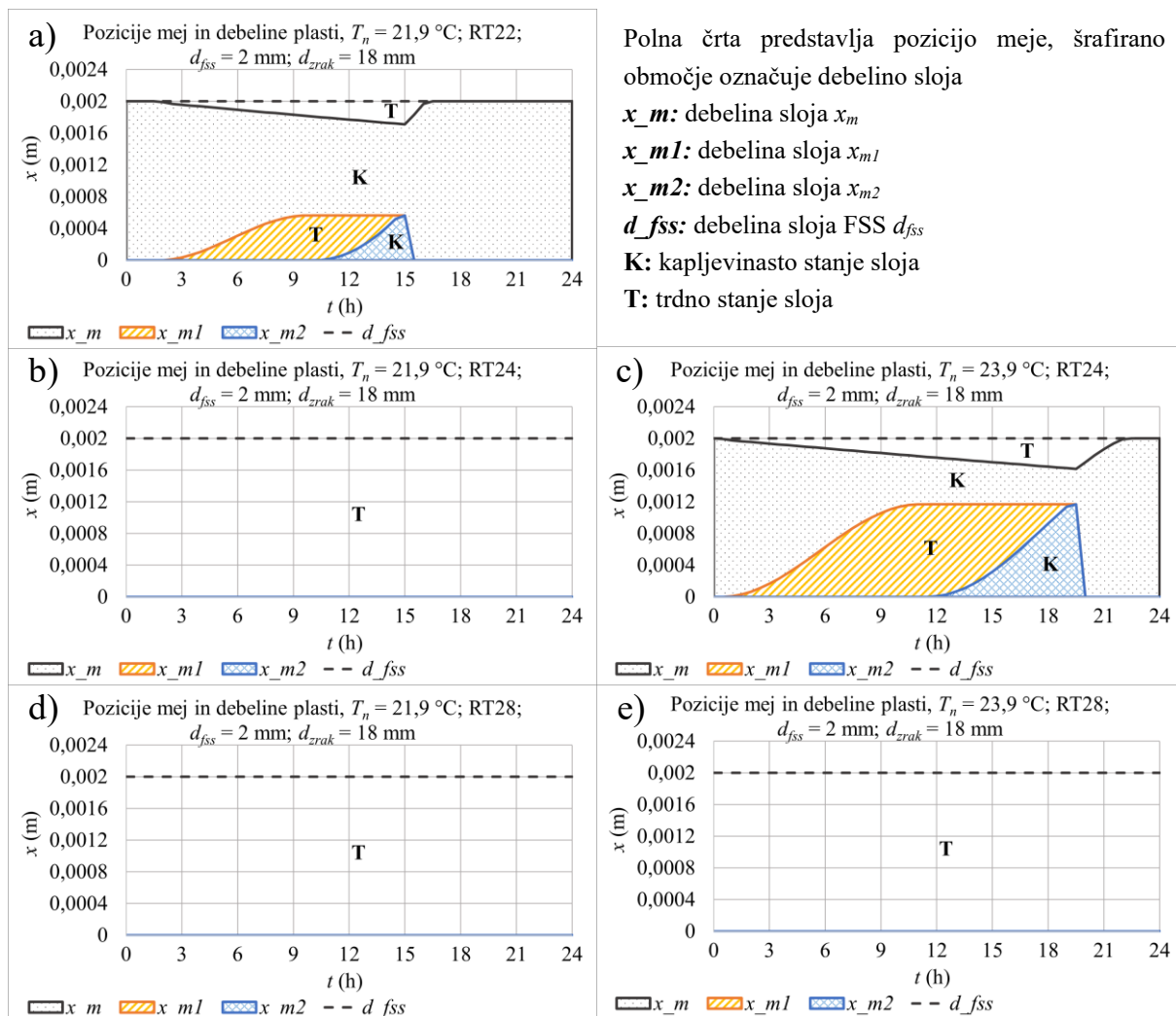
Slika 23: grafikoni premikanja mej in debelin plasti; a) RT22 je zelo malo, le okoli 10 % izkoriščen, b) vosek RT24 se skoraj nič ne aktivira, c) kot pri a), d) in e) vosek se ne aktivira zaradi previsokega tališča.



RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

Slika 24: grafikona toplotnih tokov; a) ker se RT24 in RT28 nikoli ne pričneta taliti, sta si ves čas enaka, b) RT24 je več kot 90 % dneva konstanten.

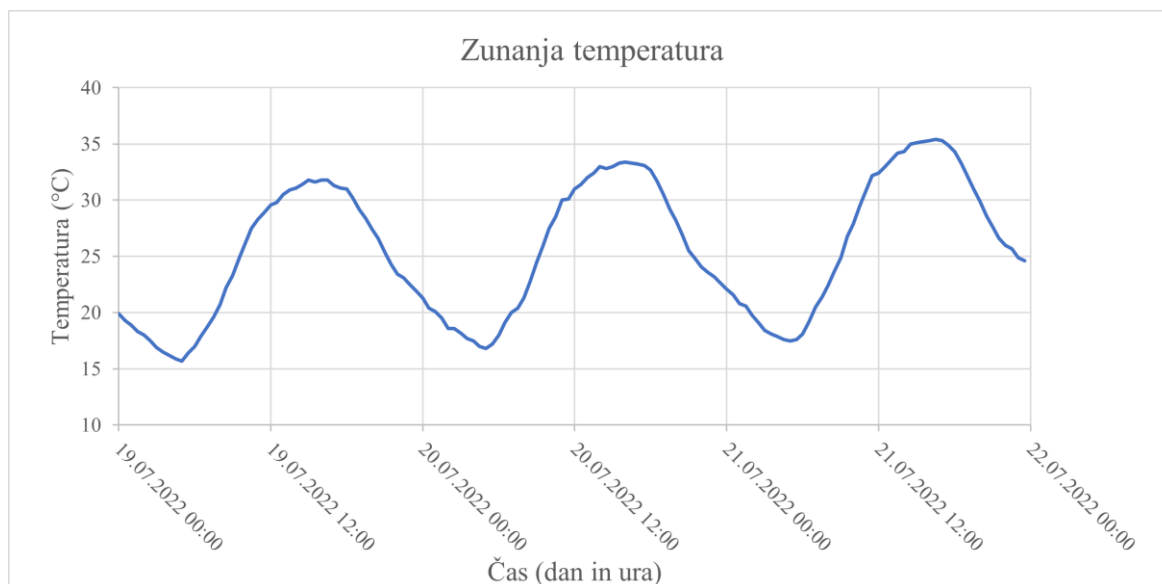


Slika 25: grafikon premikanja mej in debelin plasti; a) vosek RT22 se čez noč le delno strdi, b) vosek se ne aktivira, c) vosek je skoraj v celoti izkoriščen, vendar se prehitro stali, d) in e) vosek se ne aktivira zaradi previsokega tališča.

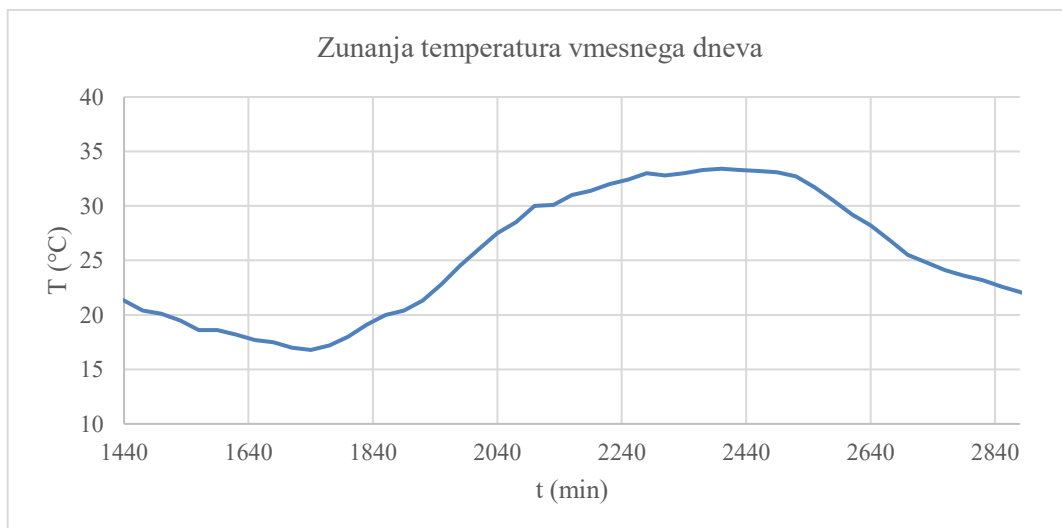
5 ANALIZA RAZLIČNIH KONFIGURACIJ ZASTEKLITEV V ČASU POLETJA Z RESNIČNIMI PODATKI

Za analizo s podatki vremenskih postaj so izbrani tri zaporedni vroči julijski dnevi s krivuljo temperature v obliki valova, ki je podoben simuliranemu sinusnemu poteku temperatur. S spletnega arhiva meritev ARSO se je naložilo meritve za obdobje meseca julija leta 2022. Izbrana je povprečna temperatura zraka na višini dveh metrov v intervalu desetih minut. Zaradi nepredvidljivih nenadnih skokov in padcev v temperaturi, tipičnih za naravno okolje, se je interval povečalo na 30 minut in meritve primerno povprečilo. Iz tako pridobljenega grafikona temperatur se je poiskalo tri podobne zaporedne dneve z visoko poletno temperaturo (nad 30 °C) prikazane na sliki 26. Vzeti so dnevi od 19. do 21. julija, torej je osnova za rezultat vmesni dan, 20. julij 2022, prikazan na sliki 27.

Povprečna temperatura srednjega dne je 25,6 °C, dobre pol stopinje več kot pri simuliranemu vremenu. Amplituda je za 2,3 °C višja in znaša 8,3 °C. Dan ima torej višjo maksimalno in nižjo minimalno temperaturo pri približno enaki povprečni temperaturi.



Slika 26: Potek temperature treh dni. Krivulje posameznih dni so si podobne, opazi se rast temperatur z vsakim naslednjim dnevom.



Slika 27: Povprečna zunanja temperatura na višini dveh metrov na vmesni dan – 20. julij 2022. Čez dan ni večjih skokov temperature.

5.1 Rezultati in primerjava

Izbran je bil vremenski pojav, ki je podoben simuliranemu sinusnemu nihanju v poglavju 4, torej so rezultati pričakovano podobni. Zaradi podobnosti z grafikoni simuliranega vremena in zaradi boljše preglednosti, so grafikoni rezultatov tega poglavja predstavljeni v prilogi. Iz preglednic 6–8 je razvidno, da so toplotni dobitki pri skoraj vseh primerih višji kot v analizi s simuliranim vremenom. Izstopa le vosek RT28 za primer troslojne zasteklitve s FSS na zunanji strani – toplotna dobitka sta v primerjavi s običajno zasteklitvijo le za nekaj odstotkov višja. V primerjavi z analizo s simuliranim vremenom je bil toplotni dobiček proti običajni zasteklitvi od 23 do 49 % višji. To pomeni, da ima tudi ta konfiguracija zasteklitve potencial za nižanje energijskih potreb, kljub temu da ima izbran FSS za 4,1 °C višjo temperaturo tališča kot je notranja temperatura.

Preglednica 6: primerjava deleža staljenih različnih FSS in prtok energije pri različnih temperaturah dvoslojne zasteklitve s FSS v dejanskih vremenskih pogojih.

DVOSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 12$ mm	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	52,3	-
Q_{out} (Wh/m ²)	373,4	369,2	377,8	150,5
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 12$ mm	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	65,6	-
Q_{out} (Wh/m ²)	-	153,4	170,9	68,2

Preglednica 7: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na zunanji strani v dejanskih vremenskih pogojih.

TROSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS NA ZUNANJI STRANI				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 10$ mm	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	84,1	-
Q_{out} (Wh/m ²)	135,6	136,0	122,9	88,6
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 10$ mm	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	89,2	-
Q_{out} (Wh/m ²)	-	55,0	42,4	40,2
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 12$ mm	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	100,0	70,3	-
Q_{out} (Wh/m ²)	125,9	132,6	120,8	88,6
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 12$ mm	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	74,5	-
Q_{out} (Wh/m ²)	-	58,2	41,5	40,2

Preglednica 8: primerjava deleža staljenih različnih FSS in pritok energije pri različnih temperaturah troslojne zasteklitve s FSS na notranji strani v dejanskih vremenskih pogojih.

TROSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS NA NOTRANJI STRANI				
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 10$ mm	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	13,5	0,0	-
Q_{out} (Wh/m ²)	126,6	135,0	137,0	88,6
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 10$ mm	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	0,0	-
Q_{out} (Wh/m ²)	-	50,2	62,1	40,2
Primer $T_n = 21,9$; $d_{fss} = 2$ mm, $d_{zrak} = 18$ mm	RT22	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	100,0	0,0	0,0	-
Q_{out} (Wh/m ²)	86,2	95,4	95,4	88,6
Primer $T_n = 23,9$; $d_{fss} = 2$ mm, $d_{zrak} = 18$ mm	/	RT24	RT28	Običajno
Delež staljenega FSS (%)	-	100,0	0,0	-
Q_{out} (Wh/m ²)	-	27,7	43,2	40,2

6 DISKUSIJA IN OPTIMIZACIJA ZASTEKLITVE

Rezultati obeh analiz kažejo, da se zasteklitev s FSS enakovredno ali bolje obnese, če se le-ta v celoti stali oz. se izkoristi čim večji delež potencialne akumulacije toplote v vosku. Najbolje se obnese troslojna zasteklitev s FSS na notranji strani. Pri notranji temperaturi $T_n = 23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, vosku RT24 debeline $d_{fss} = 2\text{ mm}$ in zračnemu sloju debeline $d_{zrak} = 18\text{ mm}$ se zasteklitev obnese bistveno bolje kot običajna troslojna zasteklitev. Iz primera lahko sklepamo, da je za učinkovito zasteklitev potrebno naslednje:

- Temperatura tališča voska čim bližje notranji temperaturi, da se zmanjša toplotni tok q_{out} .
- Vosek takšne debeline, da se v času hladnejših temperatur popolnoma strdi.
- Vosek takšne debeline, da absorbira vroče konice dneva.
- Konfiguracija zasteklitve z zračnim slojem na zunanji strani in slojem voska na notranji.
- Debelino zračnega sloja tolikšna, da prepreči prehitro taljenje voska, a hkrati ne preprečuje zadostnega strjevanja.

Kot ena potencialno glavnih lastnosti zasteklitve s FSS je nizek toplotni tok med taljenjem in strjevanjem FSS. Pri pravilni izbiri zasteklitve in FSS se ta večji del dneva tali oz. strjuje, posledično ima toplotni tok višine pod 1 W/m^2 , temperatura notranje površine zasteklitve pa je blizu notranji temperaturi zraka. V realnosti to lahko pomeni, da se uporabnik prostora ne bo odločil za dodatno (mehansko) hlajenje sobe, saj zasteklitev ne oddaja neprijetno visoke količine energije, ki bi negativno vplivala na toplotno udobje uporabnika. Konstanten toplotni tok ima tudi negativno plat, saj pomeni, da v nočnem času skozi zasteklitev ne odteka energija, ki bi (blagodejno) ohladila prostor. To lahko uporabnik blaži z odpiranjem okna, če zunanje razmere to omogočajo. V takem primeru je v času odprtega okna toplotni tok obeh zasteklitev enakovreden, hkrati se FSS v zasteklitvi hitreje ohlaja zaradi hladnejših razmer na obeh, ne le eni, straneh zasteklitve. Če bi predpostavili odprto okno tekom hladnejšega časa dneva in uvedli toplotno bilanco le za toplejši del dneva, ko se nekatere konfiguracije zasteklitve s FSS (npr. troslojna zasteklitev s FSS debeline 2 mm na notranji strani) bolje obnesejo, bi dobili še manjši oz. boljši rezultat toplotne bilance zasteklitve s FSS. Zaradi višje toplotne prevodnosti FSS v primerjavi z zrakom prihaja do višjih toplotnih tokov v času popolne staljenosti ali strjenosti sloja FSS. Takšna zasteklitev ima torej izrazito dvopolne vrednosti toplotnega toka – ali visoke ali nizke. Visokim vrednostim toplotnega toka se lahko izognemo s primerno konfiguracijo zasteklitve, kjer ne pride do popolne staljenosti ali strjenosti sloja FSS.

Druga pomembna lastnost je toplotna kapaciteta zasteklitve, ki je proti običajni zasteklitvi nekajkrat višja. Posledično je tudi zamik med najvišjo dnevno temperaturo in najvišjo temperaturo notranje površine zasteklitve podaljšan.

Med diskusijo rezultatov se je opazilo, da se vosek (tj. FSS) v nekaterih primerih stali delno ali pa sploh ne. Če upoštevamo, da se zasteklitev z neizkoriščenim (nestaljenim) voskom skoraj vedno obnese slabše, kot če je vosek izkoriščen, lahko sklepamo, da bi se vse predstavljene zasteklitve v hladnem vmesnem ali še hladnejšem zimskem obdobju zagotovo obnesle slabše, torej z manj ugodno toplotno bilanco, kot primerljiva običajna zasteklitev. Za hladnejša obdobja bi bilo smiselno analizirati delovanje zasteklitve s FSS, ki imajo tališče nižje kot notranjo temperaturo, za kar pa bi bilo potrebno predstavljeni model modificirati, da bi tudi takšne primere omogočal.

7 ZAKLJUČEK

Naloga vsebuje analizo različnih konfiguracij zasteklitev z in brez FSS (*ang.* PCM) v poletnih vremenskih pogojih pri dveh različnih notranjih temperaturah. Rezultati so deloma usklajeni z ugotovitvami prejšnjih raziskav, predvsem se ujemajo v tem, da se zasteklitev s FSS bolje kot običajna obnese v toplejših sezonah. Če se upošteva le rezultate energijske bilance, so se zasteklitve s FSS v vseh, razen enem primeru, obnesla mnogo slabše ali zgolj primerljivo. Razlog za tak izid je relativno visoka toplotna prevodnost FSS, v nekaterih primerih tudi nizka ali prehitra izkoriščenost sloja s FSS in previsoka temperatura tališča. Upoštevajoč grafikone toplotnih tokov se nekatere konfiguracije zasteklitev s FSS, predvsem obe konfiguraciji troslojne zasteklitve s RT24 pri temperaturi $T_n = 23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, obnesejo bolje kot običajna zasteklitev, saj so večino časa v stanju spremembe agregatnega stanja, ki preprečuje visoke negativne in pozitivne toplotne tokove. Iz rezultatov se je ugotovilo pod kakšnimi pogoji se bo zasteklitev s FSS najbolje obnesla. Optimalna zasteklitev je tako troslojna s FSS na notranji strani s tako debelino voska, da se ta stali in strdi v celoti. Pomembni sta tudi izbira voska s tališčem, ki je čim bližje notranji temperaturi, in izbira primerne debeline zračnega sloja, da se prepreči visok toplotni tok. Presenetljivo je nizke toplotne dobitke, ki so le za nekaj odstotkov višji od dobitkov običajne zasteklitve, dosegla tudi zasteklitev z obratno konfiguracijo z voskom RT28 pri analizi z dejanskimi vremenskimi pogoji. Glavne prednostne lastnosti zasteklitve s FSS so konstanten nizek toplotni tok in notranja površinska temperatura v času spreminjanja agregatnega stanja ter višja toplotna kapaciteta. Vse lahko prispevajo k boljšemu toplotnemu počutju uporabnika, ki bi se v nasprotnem primeru blažil z mehanskim hlajenjem. Negativna lastnost je visoka toplotna prevodnost FSS, ki se izrazi kot višji toplotni tok v času popolne strjenosti ali staljenosti plasti FSS. Zasteklitev s FSS ima torej bodisi visok bodisi nizek toplotni tok. Upoštevajoč naštet, je smiselnost take zasteklitve odvisna od potreb uporabnika.

Predstavljene zasteklitve se je analiziralo le za poletne vremenske pogoje, ko je značilno toplo. Ker se v nekaterih primerih niti v takšnih vremenskih pogojih FSS ni v celoti stalil ali sploh talil, lahko sklepamo, da bi se predstavljene zasteklitve v hladnejših vremenskih pogojih obnesle slabše v smislu energijske bilance. V prihodnjih raziskavah bi bilo smiselno uvesti sončno sevanje, ki je prisotno pri večini zasteklitev in predstavlja nezanemarljiv delež pridobljene energije stavbe. FSS običajno v tekočem stanju prepuščajo več svetlobe kot v strjenem stanju. Lahko sklepamo, da bi se z upoštevanjem sončnega sevanja zasteklitve s FSS obnesle opazno bolje pod pogojem, da zagotovimo zadostno toplotno akumulacijo in dovolj hitro strjevanje FSS.

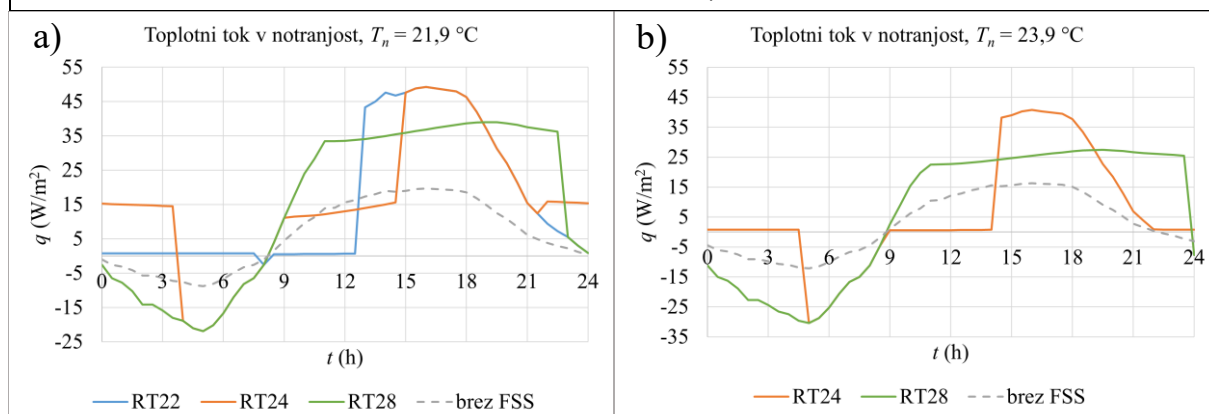
VIRI

- [1] Pajek, L., Kunič, R., Jagličić, Z. 2018. Fazno spremenljive snovi (PCM) in njihova uporaba v stavbah. *Gradbeni vestnik*, 67: 51–62.
- [2] Sadineni, S. B., Madala, S., Boehm, R. F. 2011. Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 8: 3617–3631. doi:10.1016/j.rser.2011.07.014.
- [3] Kishore, R. A., Bianchi, M. V. A., Booten, C., Vidal, J., Jackson, R. 2021. Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings. *Appl Therm Eng*, 187. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116568.
- [4] Cabeza, L. F., Mehling, H. 2007. Thermal energy storage for sustainable energy consumption: fundamentals, case studies and design. Springer: p. 257–277. doi:10.1007/978-1-4020-5290-3_17
- [5] Li, S., Zhou, Y., Zhong, K., Zhang, X., Jin, X. 2013. Thermal analysis of PCM-filled glass windows in hot summer and cold winter area. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 0: 1–8. doi:10.1093/ijlct/ctt073.
- [6] Goia, F., Perino, M., Serra, V. 2013. Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy Build*, 60: 442–452. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.029.
- [7] Durakovic, B., Torlak, M. 2017. Experimental and numerical study of a PCM window model as a thermal energy storage unit. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12: 272–280. doi:10.1093/ijlct/ctw024.
- [8] Goia, F., Grynning, S., Time, B. 2015. Dynamic thermal performance of a PCM window system: Characterization using large scale measurements. *Energy Procedia*, 78: 85–90. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.119.
- [9] Koláček, M., Charvátová, H., Sehnálek, S. 2017. Experimental and numerical research of the thermal properties of a PCM window panel. *Sustainability*, 9, 1222. doi:10.3390/su9071222.
- [10] Ravasio, L., Calay, R. K., Riise, R. 2021. Simplified thermal performance evaluation of a PCM-filled triple-glazed window under arctic climate conditions. *Energies*, 14, 8086. doi:10.3390/en14238068.
- [11] Goia, F., Perino, M., Haase, M. 2012. A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations. *Energy Build*, 54: 141–153. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.036.
- [12] Peternelj, J., Jagličić, Z. 2014. Osnove gradbene fizike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta ta gradbeništvo in geodezijo: 166 str.
- [13] Rubitherm. PCM RT-LINE.
<https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/organische-pcm-rt> (Pridobljeno 21. 8. 2023.).
- [14] Ministrstvo za okolje in prostor. 2010. Tehnična smernica TSG-1-004:2010. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.

- [15] Agencija Republike Slovenije za okolje. Arhiv meritev.
<https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (Pridobljeno 3. 8. 2023.).

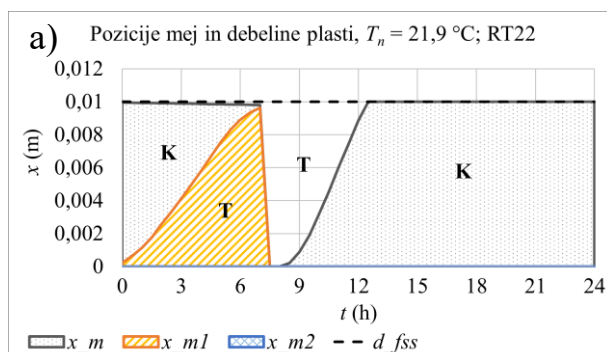
PRILOGA A

DVOSLOJNA ZASTEKLITEV S FSS, DEJANSKO VREME



RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve



Polna črta predstavlja pozicijo meje, šrafirano območje označuje debelino sloja

x_m : debelina sloja x_m

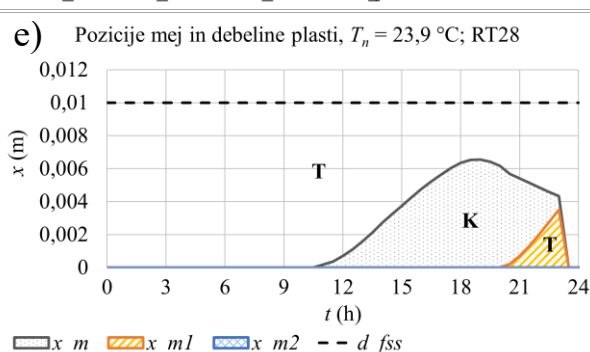
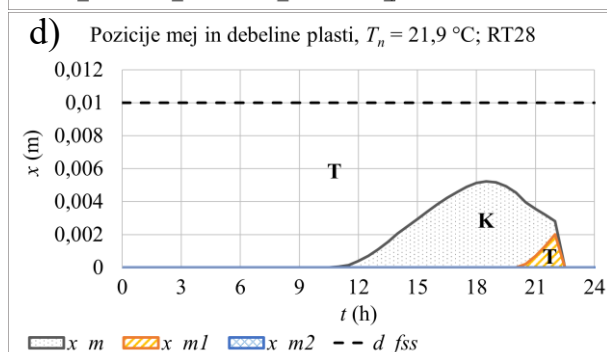
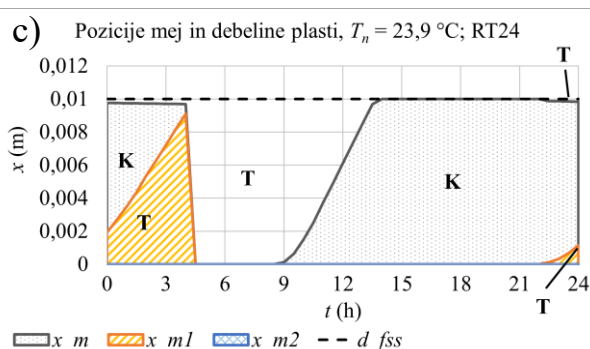
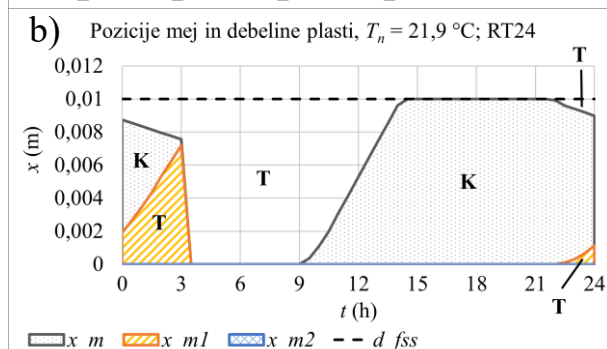
x_{m1} : debelina sloja x_{m1}

x_{m2} : debelina sloja x_{m2}

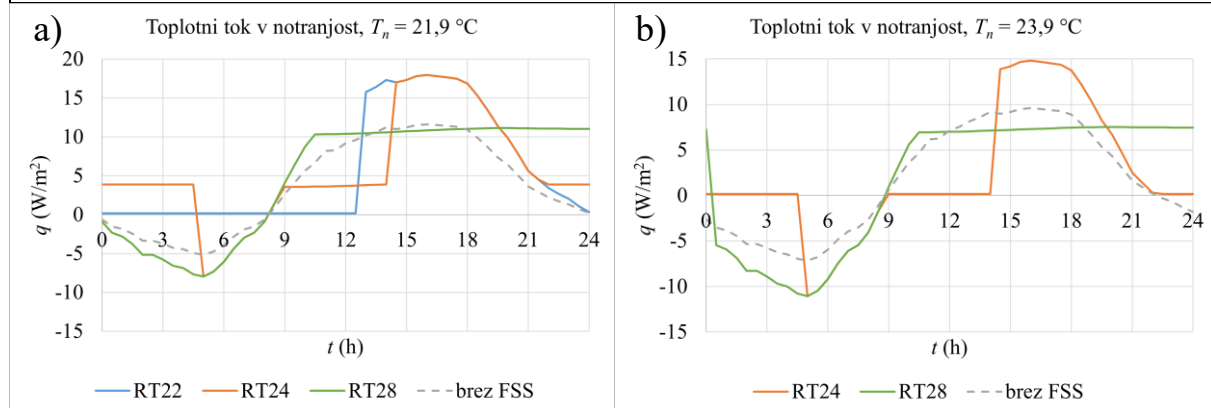
d_{fss} : debelina sloja FSS d_{fss}

K: kapljevinasto stanje sloja

T: trdno stanje sloja

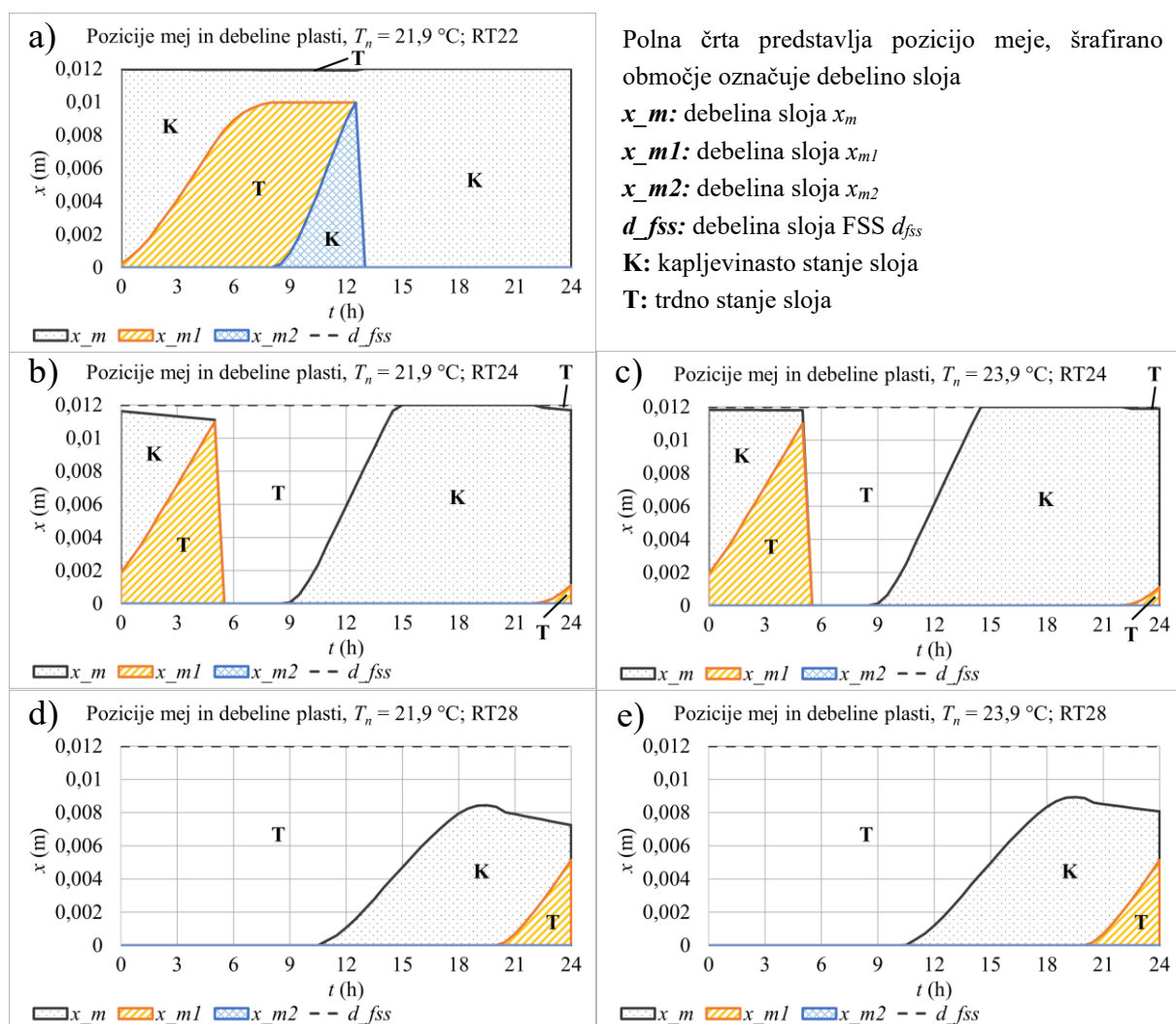


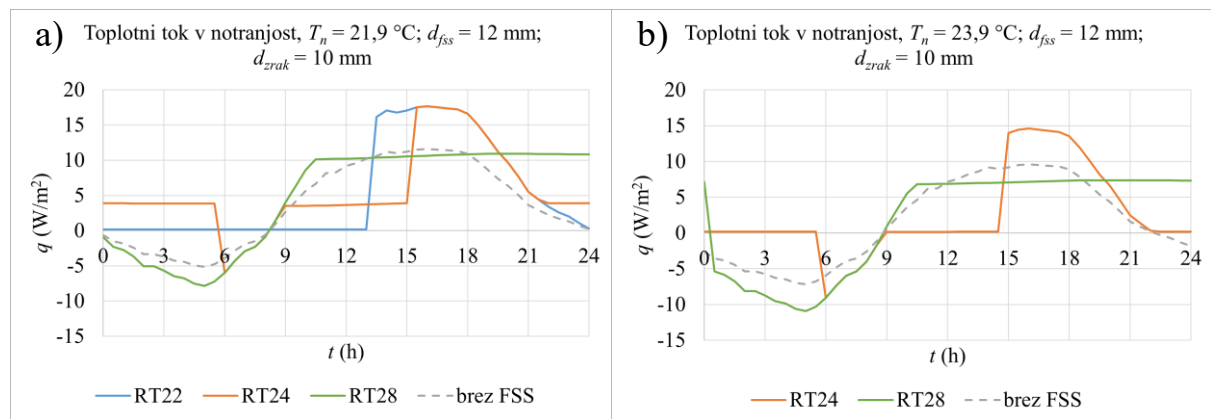
TROSLOJNA ZASTEKLITEV, FSS ZUNAJ, DEJANSKO VREME



RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

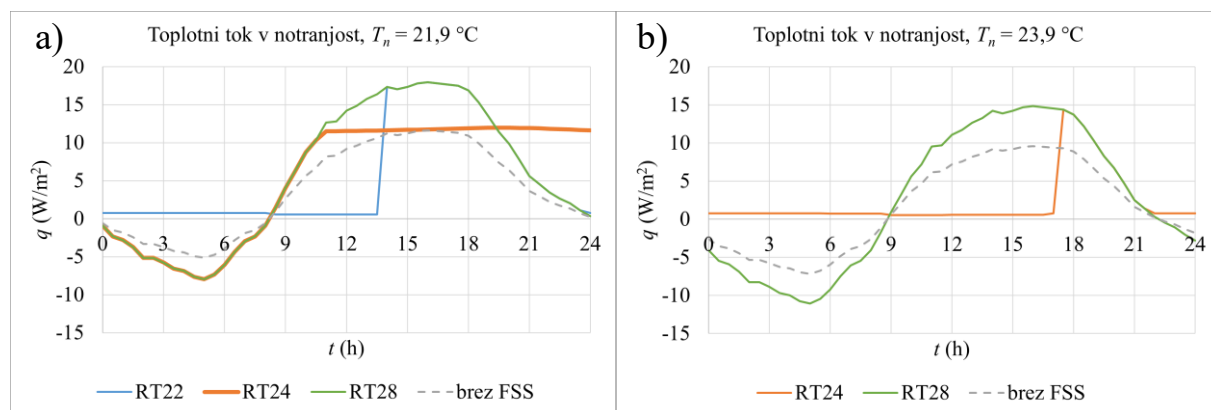




RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

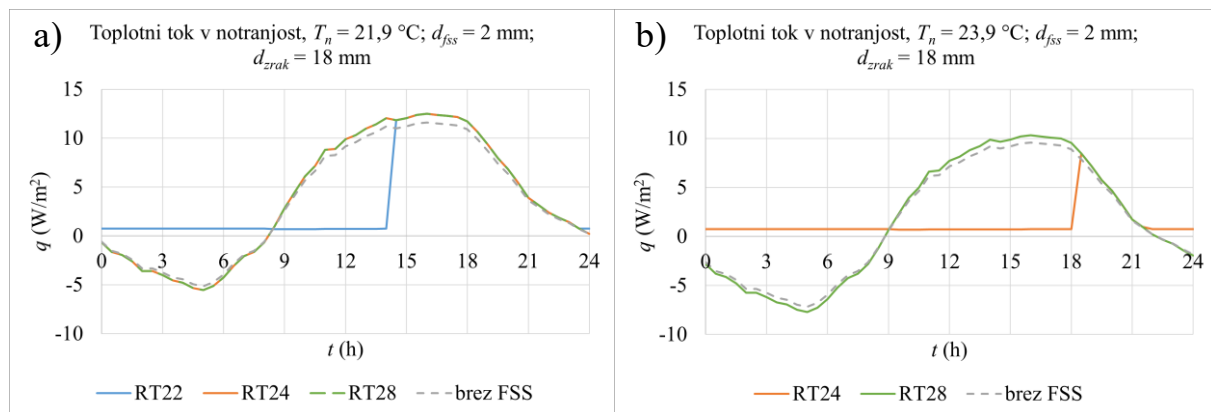
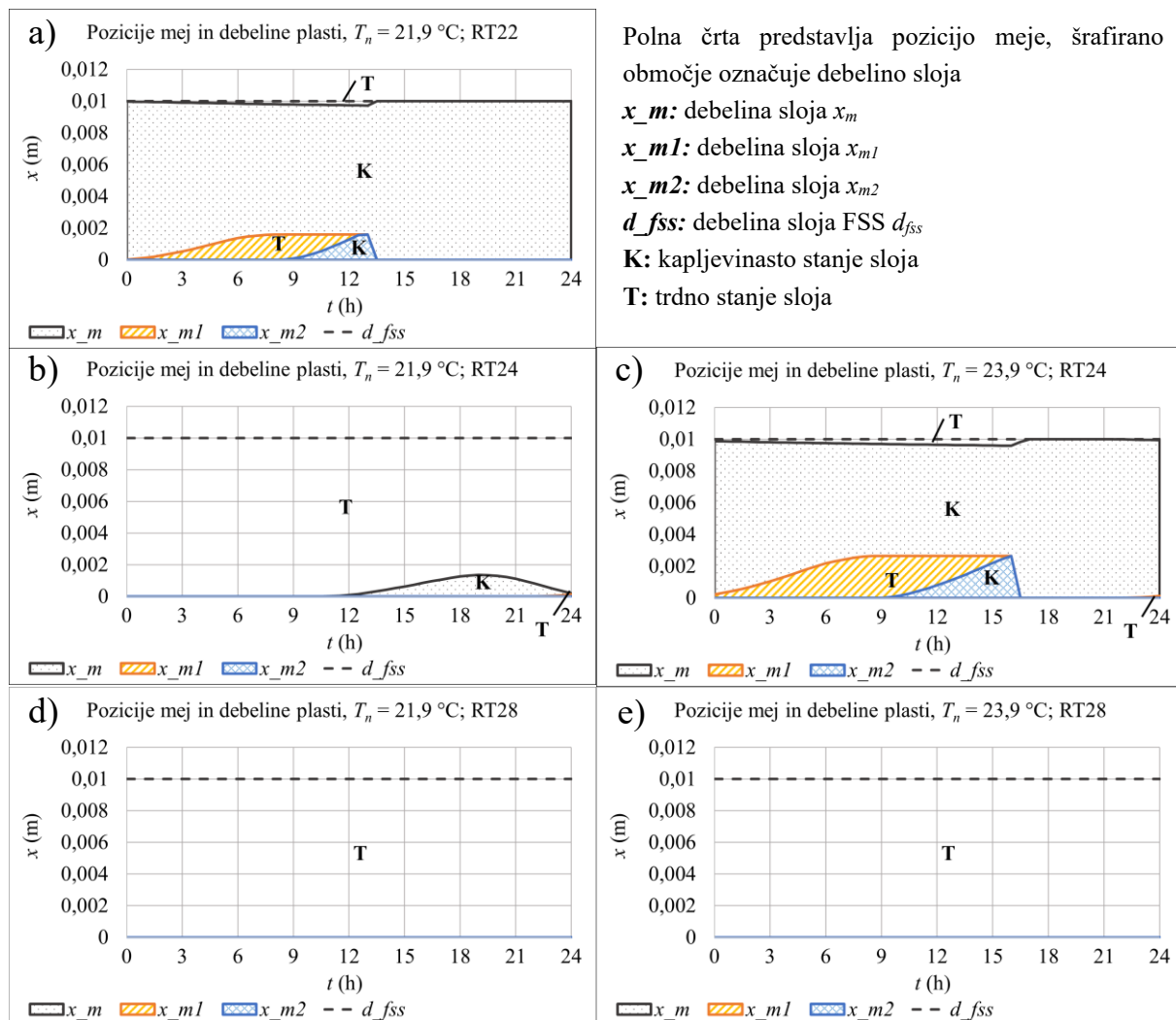
RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve

TROSLOJNA ZASTEKLITEV, FSS NOTRI, DEJANSKO VREME



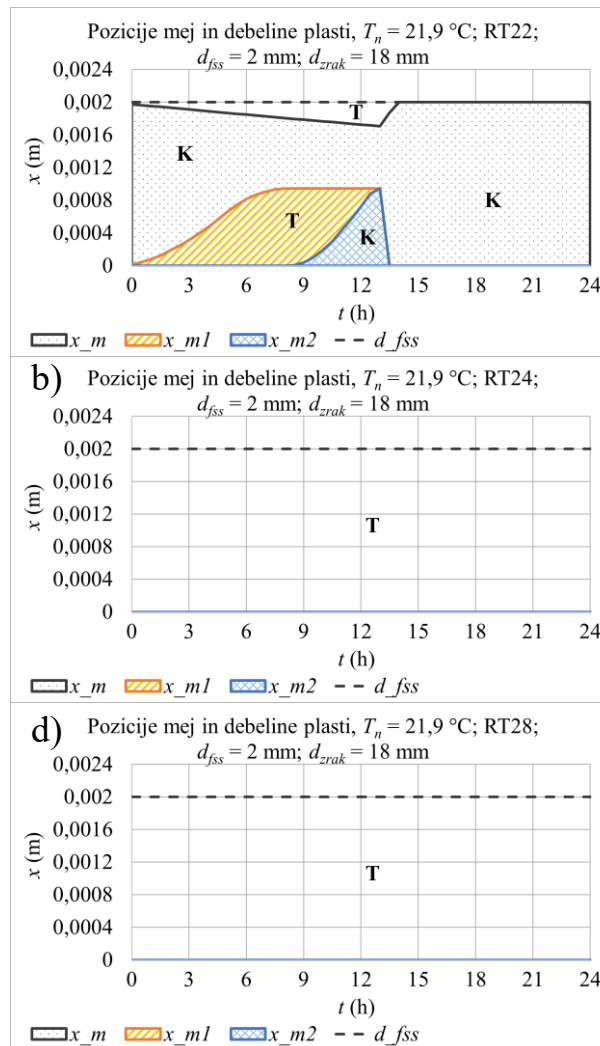
RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve



RT22: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT22 FSS
RT24: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT24 FSS

RT28: toplotni tok q_{out} zasteklitve z RT28 FSS
brez FSS: toplotni tok q_{out} običajne zasteklitve



Polna črta predstavlja pozicijo meje, šrafirano območje označuje debelino sloja

x_m : debelina sloja x_m

x_{m1} : debelina sloja x_{m1}

x_{m2} : debelina sloja x_{m2}

d_{fss} : debelina sloja FSS d_{fss}

K: kapljevinsko stanje sloja

T: trdno stanje sloja

