

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Izboljšava prezračevanja z latentnim hranilnikom toplote

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Rok Koželj

Ljubljana, junij 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

Izboljšava prezračevanja z latentnim hranilnikom toplote

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Rok Koželj

Mentor: doc. dr. Uroš Stritih, univ. dipl. inž.
Somentor: prof. dr. Vincenc Butala, univ. dipl. inž.

Ljubljana, junij 2017

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM II. STOPNJE: **MAG II/400**

NASLOV TEME: **Izboljšava prezračevanja z latentnim hranilnikom toplote**

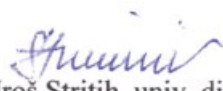
Omejene količine fosilnih goriv in povečevanje vsebnosti onesnažil v zraku botrujejo k direktivam po učinkoviti rabi energije in povečevanju deleža obnovljivih virov v ogrevalnih sistemih in sistemih za proizvodnjo električne energije. Pri tem med obnovljivimi viri energije predstavlja največji potencial sončna energija, katere največji problem je časovna spremenljivost. Zato se vedno več pozornosti namenja tehnologijam za shranjevanje energije, kjer imajo pri kratkotrajnem shranjevanju toplote največji potencial fazno spremenljive snovi (angl. *Phase Change Materials – PCM*).

V uvodu magistrskega dela proučite sistem sončne energije kot vir za pridobivanje toplote, sprejemnike sončne energije in hranilnike toplote s poudarkom na latentnih hranilnikih toplote. Na obstoječem eksperimentalnem sistemu za ogrevanje izvedite meritve, ki bodo osnova za validacijo modela shranjevanja toplote v PCM, ki ga razvija skupina raziskovalcev iz BUT Brno. S pomočjo programskega paketa TRNSYS in izdelanega modela simulirajte delovanje eksperimentalnega sistema v času ogrevalne sezone. Analizirajte delovanje in izračunajte učinkovitost prezračevalnega sistema.

Rezultate prikažite na pregleden način in podajte ustrezne zaključke.

Magistrsko delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilnem slovenskem jeziku. Rok za oddajo tega dela je šest mesecev od dneva prevzema.

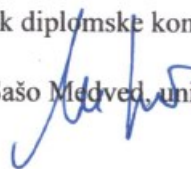
Mentor


doc. dr. Uroš Stritih, univ. dipl. inž.

Somentor


prof. dr. Vincenc Butala, univ. dipl. inž.

Predsednik diplomske komisije


prof. dr. Sašo Medved, univ. dipl. inž.

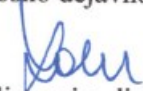
Podpisani sem delo
prevzel v Ljubljani

dne 12.5.2017

Podpis 



Prodekan za pedagoško dejavnost
II. in III. stopnje


prof. dr. Mitjan Kalin, univ. dipl. inž.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Urošu Stritihu in somentorju prof. dr. Vincencu Butali, ki sta si kljub obilici dela vzela čas za svetovanje in pomoč pri izdelavi magistrske naloge. Iskrena zahvala gre tudi skupini raziskovalcev iz Univerze za Tehnologijo v Brnu, ki je razvila numerični model latentnega hranilnika toplote, še posebej dr. Pavelu Charvátu, za nasvete pri simulaciji. Na koncu bi se zahvalil še moji družini za omogočanje študija, ki predstavlja nujen a neprecenljiv del poti do razvoja v inženirja.

Izjava

Spodaj podpisani Rok Koželj študent Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23132011, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Izboljšava prezračevanja z latentnim hranilnikom toplote,

IZJAVLAM,

- 1.* a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, _____

Podpis avtorja: _____

*Obkrožite varianto a) ali b).

Izboljšava prezračevanja z latentnim hranilnikom toplote

Rok Koželj

Ključne besede: prezračevanje
 latentni hranilnik toplote
 fazno spremenljive snovi (FSS)
 sprejemnik sončne energije
 shranjevanje toplote

V magistrskem delu je predstavljena analiza izboljšave prezračevanja z uporabo latentnega hranilnika toplote v sistemu prezračevanja z zračnim sprejemnikom sončne energije. Podan je kratek opis sistema sončne energije kot vira za pridobivanje toplote, pregled sprejemnikov sončne energije in hranilnikov toplote s poudarkom na latentnih hranilnikih toplote. Na eksperimentalnem sistemu so bile izvedene meritve v obdobju ogrevanja, ki so bile osnova za validacijo računalniškega modela latentnega hranilnika toplote, ki ga je razvila skupina raziskovalcev iz Univerze za Tehnologijo v Brnu. S programskim paketom TRNSYS je bila izvedena simulacija delovanja eksperimentalnega sistema v ogrevalni sezoni. Iz dobljenih rezultatov simulacije je bilo analizirano delovanje in učinkovitost prezračevalnega sistema. Ugotovljeno je bilo, da latentni hranilnik toplote poveča povprečno temperaturo zraka za prezračevanje.

Abstract

UDC 697.1:502.21:523.9(043.2)

No.: MAG II/400

Improvement of ventilation with latent heat storage

Rok Koželj

Key words: ventilation
 latent heat storage
 phase change material (PCM)
 solar collector
 thermal storage

In master's thesis analysis of ventilation improvement with phase change materials storage in ventilation system with solar collector has been presented. Short description of solar energy system as source of heat generation has been provided. Overview of solar collectors and heat storages with focus on phase change thermal storages has been described. Measurements in heating season were performed on experimental set-up which were the basis for validation of computer model of phase change thermal storage. Computer model was developed by the group of researchers from Brno University of Technology. With program tool TRNSYS simulation of experimental system in heating season were performed. From obtained results of simulation operation and effectiveness of ventilation system were analyzed. It was found out that phase change thermal storage increases average temperature of air for ventilation.

Kazalo

Kazalo slik	xv
Kazalo preglednic	xvii
Seznam uporabljenih simbolov	xix
Seznam uporabljenih okrajšav	xxi
1. Uvod.....	1
1.1. Ozadje problema	1
1.2. Cilji.....	1
1.3. Struktura dela	2
2. Teoretične osnove in pregled literature	3
2.1. Sončna energija.....	3
2.1.1. Sonce.....	3
2.1.2. Sončno obsevanje	4
2.2. Sprejemniki sončne energije.....	5
2.2.1. Ravni sprejemniki sončne energije	5
2.2.2. Vakuumski sprejemniki sončne energije	8
2.3. Hranilniki toplote	9
2.3.1. Senzibilni hranilniki toplote	10
2.3.2. Latentni hranilniki toplote	12
2.3.2.1. Shranjevanje toplote v fazno spremenljivih snoveh	12
2.3.3. Aplikacije uporabe fazno spremenljivih snovi	15
2.3.4. Kemični hranilniki toplote	17
3. Metodologija raziskave.....	19
3.1. Eksperimentalni del.....	19
3.1.1. Princip delovanja sistema	19
3.1.2. Eksperimentalni sistem	21
3.1.2.1. Latentni hranilnik toplote.....	21
3.1.2.2. Zračni sprejemnik sončne energije	22
3.1.2.3. Ostali elementi eksperimentalnega sistema	24
3.1.3. Meritve.....	25
3.1.3.1. Meritve temperature zraka	26
3.1.3.2. Meritve toka zraka	26

3.1.4. Prikaz meritev temperature zraka	29
3.2. Analiza sistema v programskem paketu TRNSYS.....	30
3.2.1. Računalniški model latentnega hranilnika toplote	30
3.2.1.1. Pristop modeliranja, poenostavitev, predpostavke.....	30
3.2.1.2. Koncept modela	31
3.2.1.3. Modeliranje prenosa toplote, fazne spremembe in LHT.....	31
3.2.1.4. Parametri, začetni in robni pogoji	35
3.2.2. Računalniški model toplozračnega sprejemnika sončne energije	37
3.2.2.1. Splošen opis modela	37
3.2.2.2. Matematični opis modela.....	37
3.2.2.3. Parametri, začetni in robni pogoji.....	39
3.2.3. Validacija računalniških modelov	40
3.2.3.1. Validacija modela latentnega hranilnika toplote.....	41
3.2.3.2. Validacija modela toplozračnega sončnega sprejemnika energije.....	43
3.2.4. Simulacija delovanja eksperimentalnega sistema	45
3.2.5. Rezultati simulacije in preračun	46
3.2.6. Rezultati preračuna in diskusija.....	50
 4. Zaključki.....	 55
 5. Literatura	 57

Kazalo slik

Slika 2.1: Tipični ravni SSE z dviznimi vodi [2].	5
Slika 2.2: Shema serpentinaste izvedbe ravnega SSE [2].	6
Slika 2.3: Shema ravnega SSE in detajl absorberja [2].	7
Slika 2.4: Različni tipi konfiguracij absorberjev ravnih SSE za vodo in zrak [2].	7
Slika 2.5: Shema vakuumskega cevnega SSE [2].	8
Slika 2.6: Vakuumski SSE [4].	9
Slika 2.7: Vrste hranilnikov toplote [5].	9
Slika 2.8: Gostota shranjene energije različnih HT [6].	10
Slika 2.9: Solarni sistem s HT iz gramoza [3].	11
Slika 2.10: Hranilnik toplote s temperaturnim razslojevanjem [3].	12
Slika 2.11: Količina in vrsta shranjene toplote za snov z in brez fazne spremembe [9].	13
Slika 2.12: Razdelitev fazno spremenljivih snovi [5].	14
Slika 2.13: Mikroenkapsuliran FSS integriran v mavec [8].	16
Slika 2.14: Trombeov zid [11].	16
Slika 2.15: Princip delovanja prostega hlajenja z uporabo FSS [12].	17
Slika 2.16: Zaprti cikel desorpcije in adsorpcije HT [13].	18
Slika 3.1: Shematski prikaz principa delovanja eksperimentalnega sistema [9].	20
Slika 3.2: Prezračevanje pisarne v ciklu polnjenja.	20
Slika 3.3: Prezračevanje pisarne v ciklu praznjenja.	21
Slika 3.4: LHT z odkrito prednjo stranico in vidno nosilno konstrukcijo.	22
Slika 3.5: Zračni SSE pod oknom pisarne na južni strani fasade stavbe.	23
Slika 3.6: Struktura vgrajenega toplozračnega SSE [18].	23
Slika 3.7: Toplotna moč vgrajenega SSE [17].	24
Slika 3.8: Elementi eksperimentalnega sistema.	24
Slika 3.9: Shema eksperimentalnega sistema.	25
Slika 3.10: Merilna veriga termopara [19].	26
Slika 3.11: Shema delovanja anemometra z vročo žičko [20].	27
Slika 3.12: Meritve hitrosti zraka.	28
Slika 3.13: Meritve temperature zraka.	29
Slika 3.14: Efektivna specifična toplota [23].	32
Slika 3.15: Shematski prikaz zračnih reg z računskimi domenami [24].	33
Slika 3.16: Shema računske domene CSM plošče [24].	34
Slika 3.17: Shema procedure preračunavanja [24].	35
Slika 3.18: Shema validacije modela LHT v programu TRNSYS.	41
Slika 3.19: Primerjava simulirane izstopne temperature z merjeno iz LHT.	42
Slika 3.20: Shema validacije modela SSE v programu TRNSYS.	43
Slika 3.21: Primerjava simulirane izstopne temperature z merjeno iz SSE.	44
Slika 3.22: Shema eksperimentalnega sistema v TRNSYSu.	45

Slika 3.23: Urejen diagram temperatur zraka za ogrevalno sezono.	47
Slika 3.24: Urejen diagram temperatur zraka v času prezračevanja.....	47
Slika 3.25: Koristna toplota prezračevalnega sistema.	51
Slika 3.26: Delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub.	52

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Merilna negotovost tipa A meritev hitrosti zraka.	28
Preglednica 2: Parametri, vhodni in izhodni podatki modela LHT.	36
Preglednica 3: Vhodni podatki modela SSE.	39
Preglednica 4: Parametri modela SSE.	40
Preglednica 5: Izhodni podatki modela SSE.	40
Preglednica 6: Absolutni in relativni pogrešek simulacije modela LHT.	43
Preglednica 7: Absolutni in relativni pogrešek simulacije modela SSE.	45
Preglednica 8: Akumulirana in sproščena toplota v simulaciji.	50
Preglednica 9: Energijska bilanca prezračevalnega sistema.	50
Preglednica 10: Delež pokritja in delež časa pokritosti prezračevalnih toplotnih izgub.	52
Preglednica 11: Učinkovitost delovanja celotnega sistema.	53

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
A	m^2	površina
b	/	koeficient funkcije učinkovitosti
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	specifična toplota
d	m	premer
e	/	pogrešek
F	/	faktor učinkovitosti prenosa toplote
f	/	delež trdnine
H	J	entalpija
h	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	toplotna prestopnost
I	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$	povprečno urno sončno sevanje
k	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	toplotna prevodnost
L	J kg^{-1}	latentna toplota
l	m	dolžina
$\dot{m}$	kg s^{-1}	masni tok
m	kg	masa
N	/	število iteracij
n	/	število meritev
O	m	obseg
$\dot{Q}$	W	toplotni tok
Q	J	toplota
R	K W^{-1}	toplotna upornost
r	/	odbojnost
s	/	eksperimentalni standardni odmik
T	K	temperatura
T^*	$\text{K m}^2 \text{W}^{-1}$	nadtemperatura
t	s	čas
U	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	toplotna prehodnost
u	/	merilna negotovost
$\dot{V}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	volumski tok
V	m^3	volumen
v	m s^{-1}	hitrost zraka
$\bar{v}$	m s^{-1}	povprečna hitrost zraka
x	m	prostorska koordinata
α	/	absorptivnost
Δ	/	razlika
ε	/	delež
η	/	učinkovitost naprave
θ	$^\circ$	vpadni kot
ζ	/	učinkovitost sistema
ρ	kg m^{-3}	gostota
Σ	/	vsota
τ	/	transmisivnost

Indeksi

A	tip A
a	absolutni
aku	akumulirana
c	ledišče
cel	celotna
dog	dogrevanje
ef	efektivna
el	električna
f	tekočina
FSS	fazno spremenljiva snov
glob	globalno
dif	difuzno
H	horizontalna površina
iz	izstop
izg	izgube
k	koristna
kon	končna
l	kapljevina
LHT	latentni hranilnik toplote
m	tališče
maks	največji
mer	merjena
n	normala na površino
not	notranja
ok	okolica
p	konstanten tlak
pr	presežek
prez	prezračevalne
r	relativni
s	trdnina
sim	simulirana
sob	sobna
spr	sproščena
sr	srednja
SSE	sprejemnik sončne energije
T	nagnjena ploskev
v	vstop
zac	začetna
zr	zrak
t	časovni

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
ARSO	Agencija Republike Slovenije za Okolje
BUT	Univerza za tehnologijo v Brnu (angl. <i>Brno University of Technology</i>)
CSM	kompaktni moduli za shranjevanje (angl. <i>Compact Storage Modules</i>)
DLL	dinamična povezava knjižnice (angl. <i>Dynamic Link Library</i>)
FSS	fazno spremenljiva snov
HT	hranilnik toplote
ISE	Inštitut za sončne energijske sisteme (angl. <i>Institute for Solar Energy Systems</i>)
LHT	latentni hranilnik toplote
MO	merilno območje
MR	merilni razpon
PCM	fazno spremenljiva snov (angl. <i>Phase Change Material</i>)
PVC	polivinil klorid (angl. <i>Polyvinyl Chloride</i>)
TISS	spektralno selektivna barva (angl. <i>Thickness Insensitive Spectrally Selective Paint</i>)
TRNSYS	simulacije nestacionarnih sistemov (angl. <i>TRaNsient SYstem Simulation</i>)
SSE	sprejemnik sončne energije

1. Uvod

1.1. Ozadje problema

Stavbni sektor obsega 40% skupne rabe primarne energije v Evropski Uniji, glavna primarnih virov za ogrevanje pa so še vedno naftni derivati in trdna goriva, ki predstavljajo tudi najpomembnejši vir emisij ogljikovega dioksida, ki povzroča globalno segrevanje. Z večanjem stavbnega sektorja bi se glede na trenutno učinkovitost rabe energije le ta povečevala, zato Direktiva Evropskega parlamenta o energetske učinkovitosti stavb (2010/31/EU) [1] določa zahteve za učinkovito, preudarno, racionalno in trajnostno rabo energije ob znatni podpori iz obnovljivih virov energije. Cilj omenjene Direktive je, da morajo biti po 31. decembru 2020 vse nove stavbe skoraj nič-energijske, kar pa je možno doseči le z implementacijo naprav za izkoriščanje obnovljivih virov in inovativnih tehnologij v stavbni sektor. Poleg same rabe energije ima pomembno vlogo tudi notranje okolje, ki neposredno vpliva na zdravje ljudi in njihovo delovno storilnost. Za vzdrževanje ustreznih pogojev notranjega okolja je potrebno prostore ustrezno klimatizirati, kar predstavlja dodatno rabo energije.

1.2. Cilji

Iz predstavljene aktualne problematike, ki zadeva rabo energije v stavbnem sektorju za zagotavljanje ustreznih parametrov notranjega okolja, predstavljajo prezračevalne izgube velik delež toplotne potrebe stavbe. Ker je prezračevanje prostorov potrebno in neizogibno, se pri vnosu svežega zraka v prostor poslužujemo različnih načinov rekuperacije ali regeneracije zavržene toplote. V našem primeru pa smo naredili raziskavo izkoriščanja sončne energije s sprejemnikom sončne energije in uporabo latentnega hranilnika toplote za potrebe zimskega prezračevanja pisarne Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Namen raziskovalne naloge je bil:

- Opraviti meritve na obstoječem eksperimentalnem sistemu za potrebe prezračevanja v ogrevalni sezoni.
- Ovrednotiti vpliv latentnega hranilnika na implementacijo v prezračevalni sistem s sončnim sprejemnikom toplote.

Glede na namen raziskave so bili naši cilji sledeči:

- Meritve na obstoječem eksperimentalnem sistemu za ogrevanje.
- Validacija modela latentnega hranilnika toplote in sončnega sprejemnika toplote v programskem orodju TRNSYS.
- Simulacija delovanja obravnavanega sistema v času ogrevalne sezone v programskem orodju TRNSYS.
- Analiza dobljenih rezultatov delovanja obravnavanega sistema v ogrevalni sezoni.

Glede na postavljene cilje raziskave največje izzive pričakujemo pri validaciji računalniških modelov, saj se bodo morali rezultati dobljeni iz simulacije čimbolj ujemati z meritvami, da lahko potrdimo ustreznost analize narejene iz rezultatov simulacije v programskem orodju TRNSYS.

Ker v osnovi želimo izboljšati prezračevalni sistem z integracijo latentnega hranilnika toplote, in glede na zavedanje o njegovem potencialu pričakujemo, da bo latentni hranilnik toplote doprinesel k učinkovitosti prezračevalnega sistema.

1.3. Struktura dela

Magistrsko delo v osnovi sestoji iz pregleda teoretičnih osnov (poglavje 2) in raziskovalnega dela (poglavje 3). V teoretičnih osnovah (poglavje 2) smo opisali osnove sončne energije (poglavje 2.1) kot vir pridobivanja energije in pretvarjanja v sprejemnikih sončne energije (poglavje 2.2), kjer smo našli sprejemnike, ki se najpogosteje uporabljajo za potrebe ogrevanja v stavbah. V poglavju 2.3 smo opisali vrste nizkotemperaturnih hranilnikov toplote namenjenih za kratkotrajno shranjevanje toplote, pri tem pa smo se v poglavju 2.3.2 osredotočili na podrobnejši opis shranjevanja v fazno spremenljivih snoveh in predstavili nekaj aplikacij latentnih hranilnikov toplote (poglavje 2.3.3). Metodologijo raziskave smo predstavili v poglavju 3, kjer smo v poglavju 3.1 opisali princip delovanja eksperimentalnega sistema, opisali njegove elemente ter izvedbo meritev. Poglavje 3.2 pa obsega analizo obravnavanega sistema v programskem paketu TRNSYS. To poglavje je razdeljeno na več podpoglavij, kjer smo opisali računalniški model latentnega hranilnika toplote (poglavje 3.2.1) in zračnega sprejemnika sončne energije (poglavje 3.2.2) skupaj z začetnimi in robnimi pogoji. Sledila je validacija računalniških modelov (poglavje 3.2.3) in simulacija delovanja obravnavanega sistema v ogrevalni sezoni (poglavje 3.2.4). V poglavju 3.2.5 smo predstavili rezultate simulacije in potek preračuna, v poglavju 3.2.6 pa smo diskutirali dobljene rezultate delovanja prezračevalnega sistema z latentnim hranilnikom in brez njega.

2. Teoretične osnove in pregled literature

V tem poglavju smo naredili pregled teoretičnih osnov pridobivanja toplotne energije iz Sonca, in predstavili nekaj najpogostejših naprav za pretvarjanje sončne energije v toploto, ki jo koristimo za potrebe ogrevanja. Pregled literature je večinoma povzet po literaturi Kalogiroua [2]. Nato smo naredili še pregled hranilnikov toplote s poudarkom na latentnih hranilnikih toplote, katerega smo tudi uporabili v naši raziskavi. Pregled literature hranilnikov toplote je v opisu senzibilnih hranilnikov povzet po literaturi Dincerja in sodelavcev [3].

2.1. Sončna energija

2.1.1. Sonce

Sonce je sfera intenzivnih vročih plinastih snovi s parametrom $1,39 \cdot 10^9$ m, in je oddaljeno od Zemlje približno $1,5 \times 10^8$ km. Ko toplotno sevanje zapusti površino Sonca, pripotuje do Zemlje v 8 minutah in 20 sekundah, saj toplotno sevanje Sonca potuje v vakuumu s svetlobno hitrostjo (300.000 km/s). Pri opazovanju iz Zemlje disk Sonca tvori 32 minutni stopinjski kot, kar je pomembno za aplikacije, še posebej v optiki koncentriranja sončnega obsevanja, kjer Sonca ne smemo smatrati kot točkovni vir, saj je že tako majhen kot pomemben v analizi optičnega obnašanja sprejemnika sončne energije. Sonce ima efektivno temperaturo črnega telesa vrednosti 5760 K, pri tem pa je temperatura v središču Sonca veliko višja. V bistvu je Sonce kontinuiran jedrski reaktor, v katerem se vodik združuje v helij. Celotna toplotna moč ki jo oddaja Sonce je $3,8 \cdot 10^{20}$ MW, kar je enako 63 MW/m^2 površine Sonca. Ta energija seva v vse smeri Vesolja, pri čimer Zemlja sprejme samo majhen delež celotnega emitiranega obsevanja, ki znaša $1,7 \cdot 10^{11}$ MW. Vendar pa je kljub majhnemu deležu ocenjeno, da je 84 minut sončnega obsevanja na Zemljo enako letni svetovni potrebi po energiji, ki znaša približno 900 EJ.

Pot Sonca na nebu pri relativnem opazovanju iz Zemlje se spreminja čez leto. Oblika omenjene poti Sonca glede na enak opazovan čas vsak dan skozi celotno leto ima obliko števila 8 poravnano vzdolž smeri sever-jug, in predstavlja deviacijo Sonca na nebu od svoje poti (grško *analemma*). Najbolj pogosta variacija v vizualni lokaciji Sonca skozi celotno leto je zamik osi sever-jug za kot 47° zaradi $23,5^\circ$ naklona zemeljske osi relativno na Sonce.

Temu zamiku pravimo deklinacija, in je glavni razlog za obstoj letnih časov. Poznavanje sončne poti na nebu je pomembno za inženirsko prakso, saj je potrebno izračunati vpadno sončno obsevanje na površino sprejemnikov sončne energije (v nadaljevanju SSE), dobitkov zaradi sončnega obsevanja, pravilne orientacije SSE, izogibanja senčenju SSE itd.

2.1.2. Sončno obsevanje

Vse snovi tako trdna telesa kot kapljevine in plini, čigar temperature so nad absolutno ničlo, oddajajo energijo v obliki elektromagnetnega valovanja. Sončno obsevanje pomembno za naprave, ki pretvarjajo sončno energijo v toploto (SSE), je tisto, ki ga sonce oddaja v ultravijoličnem ($0,01\ \mu\text{m}$ do $0,4\ \mu\text{m}$), vidnem ($0,38\ \mu\text{m}$ do $0,76\ \mu\text{m}$) in infrardečem ($3\ \mu\text{m}$ do $100\ \mu\text{m}$) spektru. Torej valovne dolžine sončnega obsevanja ki so pomembne za SSE so v spektralnem območju od $0,15\ \mu\text{m}$ do $3\ \mu\text{m}$.

Toplotno sevanje je oblika energijske emisivnosti (oddaje) in transmisije (prepustnosti), ki je v celoti odvisna od temperaturnih karakteristik in emisivnosti površine. Pri tem ni posrednega nosilca energije, kot je v preostalih mehanizmih prenosa toplote pri prevodu in konvekciji. Toplotno sevanje predstavlja elektromagnetno valovanje, ki potuje s svetlobno hitrostjo, katera je odvisna od valovne dolžine in frekvence sevanja. Ko direktno toplotno sevanje vpade na površino telesa, se del toplotnega sevanja odbije od površine telesa, del se absorbira v telesu, del pa prepušča telo. Različne lastnosti povezane z omenjenim pojavom niso samo funkcije površine ampak tudi smeri in valovne dolžine vpadnega obsevanja, zato delež odbitega toplotnega sevanja imenujemo spektralna reflektivnost, delež absorbiranega toplotnega sevanja spektralna absorptivnost in delež prepuščenega toplotnega sevanja spektralna transmisivnost.

Količina sončne energije na enoto časa in enoto površine, pri srednji razdalji Zemlje od Sonca, ki jo sprejme površina na zunanem robu atmosfere v smeri normale Sonca (pravokotno na smer sončnih žarkov), se imenuje solarna konstanta, ki ima vrednost $1366\ \text{W/m}^2$, in skozi celotno leto varira za 3,3%.

Sončno obsevanje ki doseže zemeljsko površino je manjše od solarne konstante, ker se je večji delež razprši, odbije nazaj v vesolje in absorbira v atmosferi. Delež prvotno usmerjenih sončnih žarkov se kot rezultat interakcije z atmosfero razprši ali postanejo neusmerjeni. Delež razpršenega obsevanja ki doseže zemeljsko površino imenujemo difuzno obsevanje. Sončno obsevanje ki pride neposredno skozi atmosfero pa se imenuje direktno sončno obsevanje. Obsevanje površine na Zemlji je vsota difuznega sončnega obsevanja in normalne komponente direktnega sončnega obsevanja. Toplota Sonca ki jo posamezna površina na Zemlji sprejme, je odvisna od debeline plasti ozona, od razdalje ki jo mora sončno obsevanje prepotovati skozi atmosfero, količine vodne pare, prahu in ostalih komponent atmosfere ter jasnosti neba (pokritost neba z oblaki). Torej celotno sončno obsevanje je sestavljeno iz direktnega, difuznega in odbitega sončnega obsevanja.

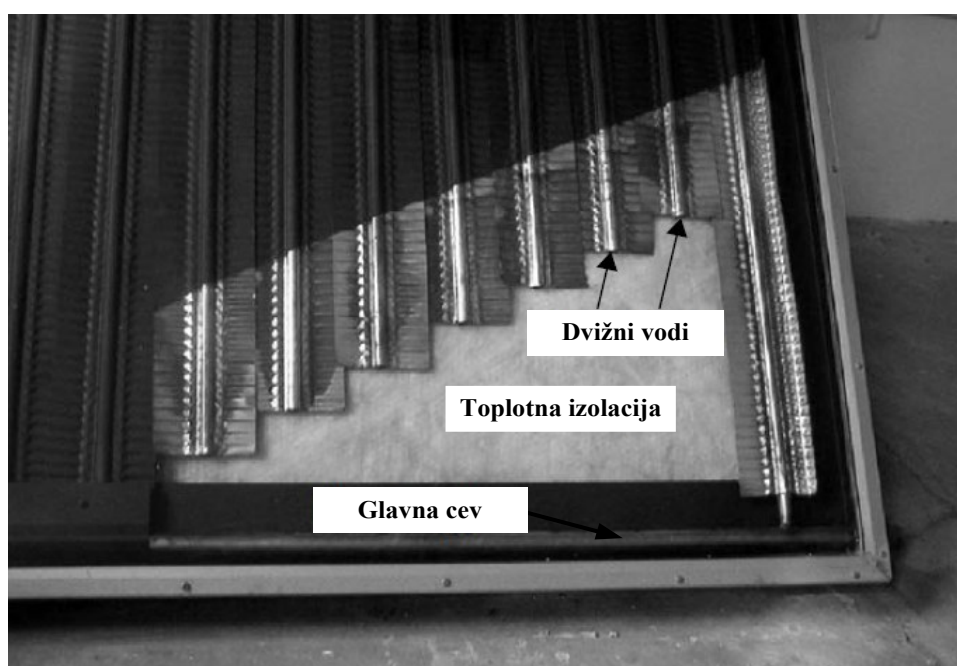
2.2. Sprejemniki sončne energije

Sprejemniki sončne energije so posebne vrste prenosnikov toplote, ki pretvarjajo energijo sončnega obsevanja v notranjo energijo transportnega medija. Glavna komponenta katerega koli solarnega sistema je sprejemnik sončne energije (SSE). SSE je naprava, ki absorbira vpadno sončno obsevanje, ga pretvori v toploto, in prenese toploto na medij (običajno zrak, vodo ali olje), ki teče skozi sprejemnik. Sprejeta sončna energija se lahko transportira neposredno v sistem za ogrevanje ali pa v hranilnik toplote, ki omogoča koriščenje toplote zvečer, ali ko je nebo oblačno.

V osnovi obstajata dva tipa SSE in sicer ne-usmerjeni ali nepremični in usmerjeni SSE. Nepremični SSE ima enako površino za sprejemanje in absorpcijo sončnega obsevanja, medtem ko usmerjeni SSE ki sledi Soncu, ima po navadi konkavne odbojne površine za sprejemanje in koncentriranje sončnih žarkov v manjše površine sprejemanja, s čimer se poveča sevalni toplotni tok. Usmerjeni SSE so primerni za visokotemperaturne aplikacije. SSE prav tako delimo glede na tip nosilca toplote (voda, voda-protizmrovalna tekočina, zrak, olje) in glede na to ali so SSE zastekljeni ali nezastekljeni. V nadaljevanju se bomo osredotočili zgolj na opis ne-usmerjenih oziroma nepremičnih SSE, pri čimer pa se bomo osredotočili na nizkotemperaturne sisteme.

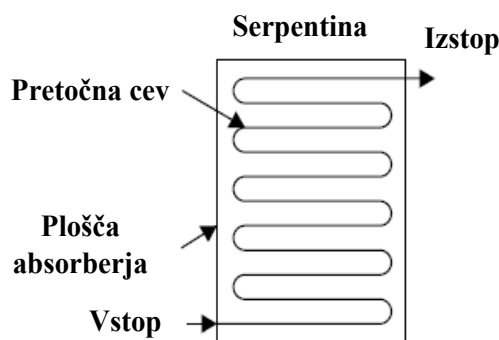
2.2.1. Ravni sprejemniki sončne energije

Ravni SSE so daleč največ uporabljeni tipi sončnih sprejemnikov, in se po navadi uporabljajo v nizko temperaturnih aplikacijah do 80 °C. Na sliki 2.1 je prikazan tipični ravni SSE.



Slika 2.1: Tipični ravni SSE z dvížnimi vodi [2].

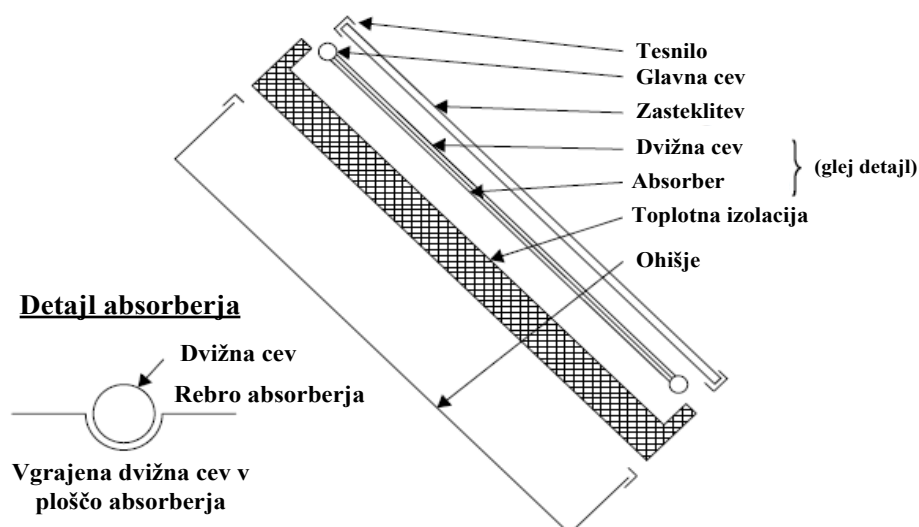
Ko sončno obsevanje preide transparentno površino, in vpada na absorber črne površine z visoko absorptivnostjo, se velik delež dospele energije absorbira v absorberju, in prenaša na nosilec toplote v ceveh, ki transportira sprejeto toploto naprej v hranilnik ali za neposredno rabo. Spodnja stran absorberja in obe strani so zelo dobro izolirane zato, da zmanjšajo toplotne izgube s prevodom. Cevi so lahko zvarjene na ploščo absorberja, ali pa so lahko integriran del plošče, in jih imenujemo dvižne cevi (angl. *riser pipe*). Dvižne cevi so na obeh koncih povezane z velikim premerom glavnih cevi (angl. *header pipe*). Tako se ravni sprejemnik deli na glavni in dvižni del, kar je tipična zasnova ravnih SSE, ki je prikazana na sliki 2.1. Alternativa omenjeni zasnovi je serpentinasta zasnova, ki je prikazana na sliki 2.2. Pri SSE s serpentinasto zasnovo se pojavi problem v delovanju pod naravno cirkulacijo, kjer serpentinasti sprejemnik ne deluje učinkovito, in potrebuje prisilni obtok nosilca toplote. Plošča absorberja je lahko v izvedbi ene plošče na katero so pritrjene vse dvižne cevi, ali pa je posamezna dvižna cev pritrjena na ločeno rebro, kot je to prikazano na sliki 2.1.



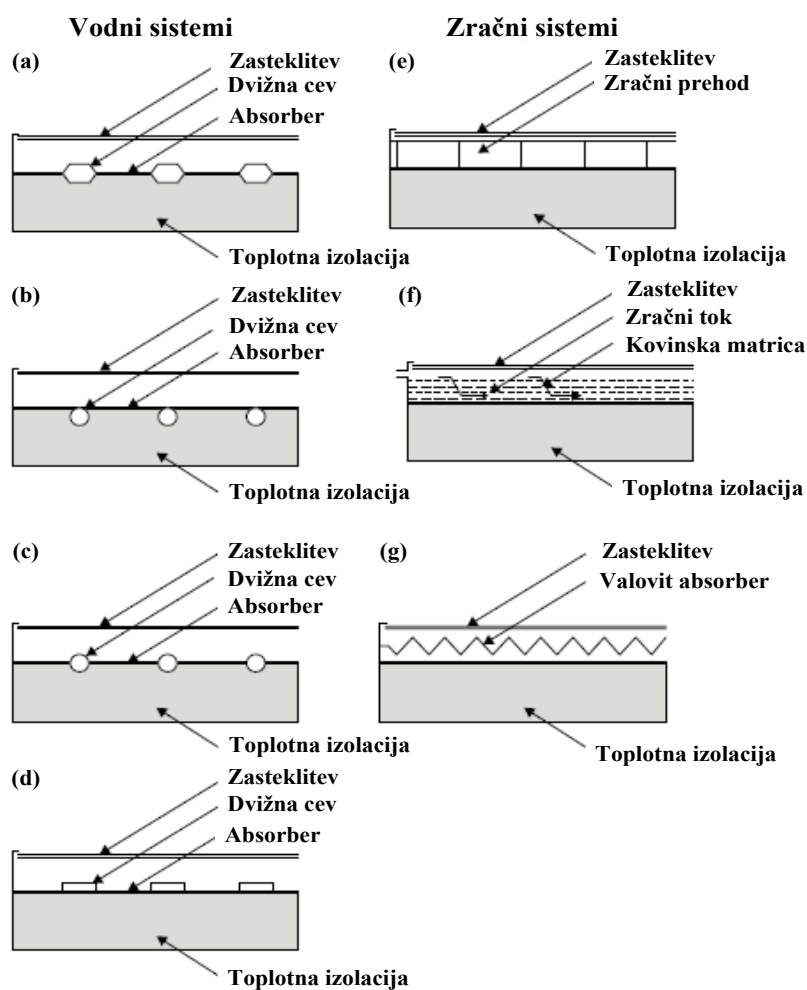
Slika 2.2: Shema serpentinaste izvedbe ravnega SSE [2].

Transparentni pokrov (zasteklitev) na napravi SSE se uporablja za zmanjševanje konvektivnih izgub absorberja zaradi upornosti plasti mirujočega zraka med absorberjem in zasteklitvijo. Prav tako zmanjša izgube obsevanja sprejemnika, ker je steklo prepustno (transparentno) za kratkovalovno sončno obsevanje, vendar pa je neprepustno za dolgovalovno toplotno sevanje, ki ga emitira plošča absorberja (učinek tople grede).

Osnovne komponente ravnega SSE so prikazane na sliki 2.3, pri čimer pa smo posamezne dele prikazane na sliki razložili že v drugem in tretjem odstavku tega poglavja. Ravni SSE so bili zasnovani na veliko različnih načinov in z raznovrstnimi material. Prav tako lahko uporabljajo različni delovni medij oziroma nosilec toplote, kot je voda, voda-protizmrzovalna tekočina ali zrak. Glavna razlika med zračnimi in vodnimi SSE je v zasnovi absorberja, ki mora v primeru zračnega SSE premagati slabši prenos toplote, ki je posledica manjše toplotne prestopnosti med zrakom in absorberjem. Zato se uporabljajo razširjene površine za povečanje površine prenosa toplote, ki so prikazane na slikah 2.4 e, f in g saj se z večjo površino posledično poveča tudi prenesen toplotni tok iz absorberja na zrak. Torej je njihova glavna zahteva velika kontaktna površina med absorberjem in zrakom. Specifična toplota zraka je veliko manjša od vode, zato v primeru zračnih absorberjev potrebujemo večji pretok zraka skozi sprejemnik. Na sliki 2.4 so prikazani različni tipi absorberjev ravnih SSE za vodne in zračne sisteme, ki so bili uporabljeni v SSE.



Slika 2.3: Shema ravnega SSE in detajl absorberja [2].

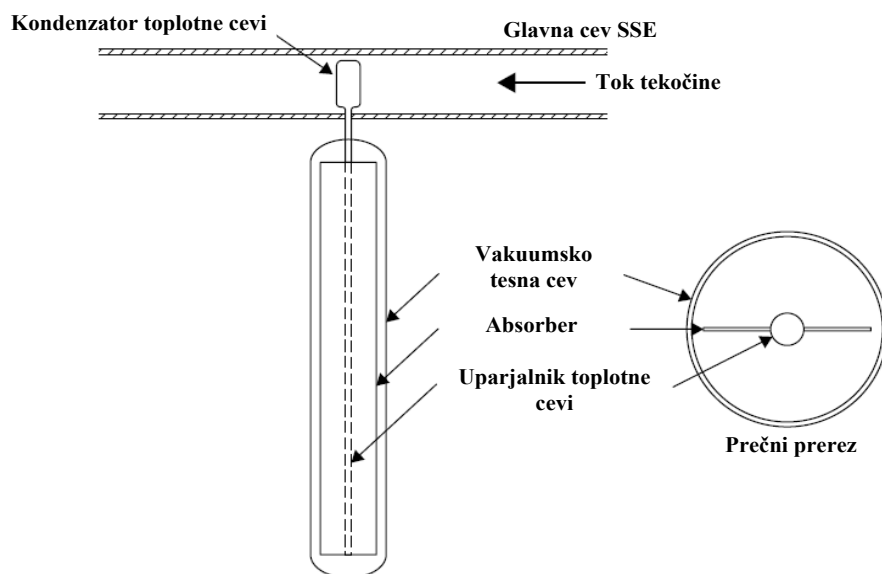


Slika 2.4: Različni tipi konfiguracij absorberjev ravnih SSE za vodo in zrak [2].

Prednosti ravnih SSE so v nizki ceni proizvodnje, absorbirajo tako direktno kot difuzno sončno obsevanje in ga pretvarjajo v toploto ter, da so fiksno vpeti, pri čimer ne potrebujejo naprave za sledenje soncu.

2.2.2. Vakuumski sprejemniki sončne energije

Vakuumski cevni SSE so sestavljeni iz toplotne cevi (angl. *heat pipe*) v vakuumsko zatesnjeni cevi, kot je to prikazano na sliki 2.5. V dejanski aplikaciji pa je več cevi povezanih v glavno razdelilno cev, kot je to prikazano na sliki 2.6.



Slika 2.5: Shema vakuumskega cevnega SSE [2].

Vakuumski SSE uporabljajo fazno spremenljive snovi (s spreminjanjem agregatnega stanja kapljevina-para) za prenos toplote pri visoki učinkovitosti. Toplotna cev vgrajena v vakuumsko zatesnjeni cevi predstavlja visoko učinkovit toplotni prevodnik. Zatesnjena bakrena cev je pritrjena na bakreno rebro črne barve (absorber), ki je v celoti v vakuumsko zatesnjeni cevi. Na vrhu cevi pa je kovinska konica pritrjena na zatesnjeno cev (kondenzator). Toplotna cev vsebuje majhno količino tekočine (npr. metanol), ki je podvržen parno-kondenzacijskemu ciklu. V tem ciklu toplota sončnega obsevanja upari kapljevino, para nato potuje v območje ponora toplote, kjer kondenzira, in sprošča latentno toploto. Kondenzirana kapljevina se vrne v SSE, kjer se proces ponovi. Kovinsko konico v glavni cevi obteka delovni medij (voda ali glikol), ki sprejema toploto od vakuumskih cevi v katerih se nahajajo toplotne cevi. Ogret delovni medij oziroma nosilec toplote se transportira skozi ogrevalni sistem ali hranilnik toplote.

Vakuumski SSE prikazujejo, da kombinacija selektivne površine in izničenja konvekcije rezultira v dobrem delovanju pri visokih temperaturah. Vakuumska plast okoli toplotne cevi zmanjša konvektivne izgube toplote, pri čimer lahko vakuumski SSE obratujejo pri višjih temperaturah kot ravni SSE, pri čimer temperatura stagnacije z nepremičnimi usmerjevalniki

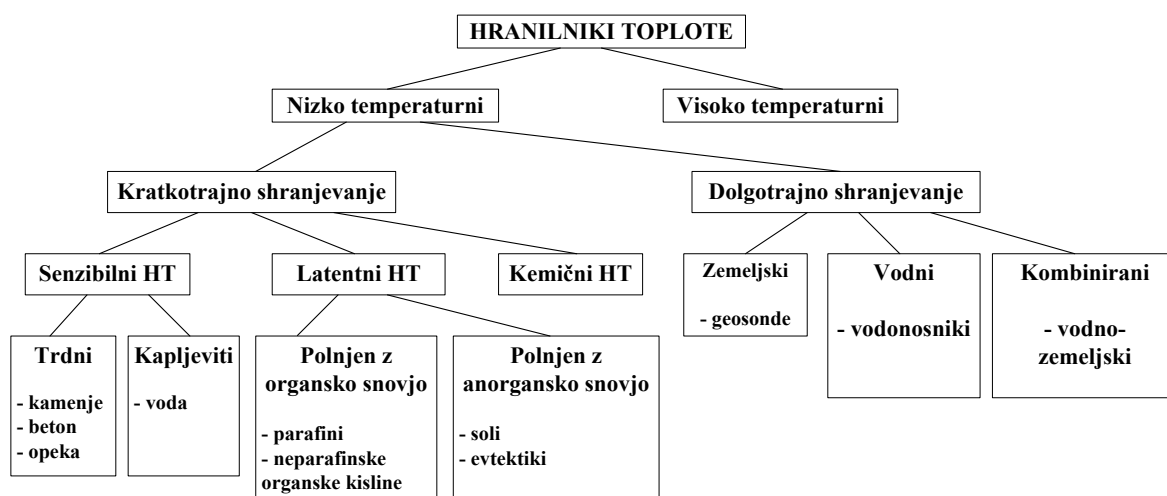
preseže tudi 300 °C. Vakuumski SSE prav tako sprejemajo direktno in difuzno sončno obsevanje, vendar pa je njihova učinkovitost večja pri nižjih vpadnih kotih sončnega obsevanja, kar postavi vakuumske SSE v prednost pred ravnimi SSE glede na delovanje.



Slika 2.6: Vakuumski SSE [4].

2.3. Hranilniki toplote

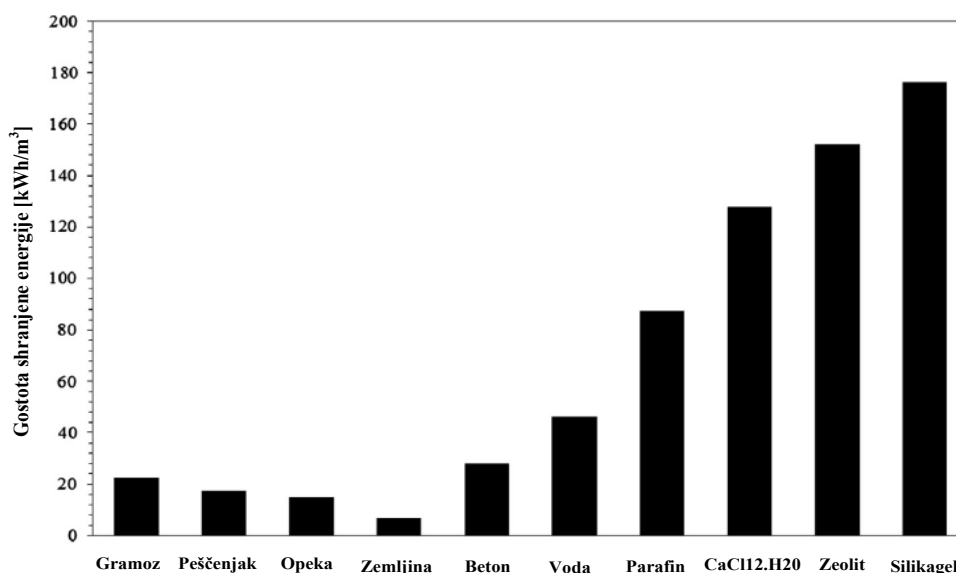
Hranilniki toplote (v nadaljevanju HT) predstavljajo napredno energijsko tehnologijo namenjeno toplotnim aplikacijam kot je ogrevanje, hlajenje in klimatizacija. Izmed vrst HT ki so prikazane na sliki 2.7, se največ uporabljajo senzibilni HT.



Slika 2.7: Vrste hranilnikov toplote [5].

Potencial sistemov HT je v povečanju učinkovne rabe energijske naprave in zmanjšanju pogostega vklopljanja in izklopljanja naprave, kar poveča učinkovitost sistema. Največji pomen integracije HT v energijski sistem je v rešitvi neskladja med proizvodnjo energije in njeno rabo. Izbor HT je predvsem odvisen od obratovalnih pogojev, investicije in periode shranjevanja energije (dnevno ali sezonsko shranjevanje), pri čimer slednja predstavlja pomemben faktor pri shranjevanju. Sistemi HT shranjujejo energijo z ogrevanjem ali hlajenjem, taljenjem ali uparjanjem (strjevanjem ali ukaplinjanjem) snovi ali preko termo-kemičnih reakcij. Shranjevanje energije kot posledica zvišanja temperature se imenuje senzibilno shranjevanje toplote, kot posledica fazne spremembe pa latentno shranjevanje toplote. Posledica povračljive kemijske reakcije, ki absorbira energijo imenujemo termo-kemično toplotno shranjevanje.

Na sliki 2.8 je prikazana gostota shranjene energije različnih snovi, ki se uporabljajo v različnih tipih HT. Pri tem vidimo da imajo največji potencial za shranjevanje energije snovi, ki se uporabljajo v termo-kemičnih HT. Termo-kemični HT imajo približno od 8 do 10 krat višjo gostoto od senzibilnih HT in dvakrat višjo od latentnih HT [6].



Slika 2.8: Gostota shranjene energije različnih HT [6].

V nadaljevanju bomo opisali nizkotemperaturne HT namenjene za kratkotrajno shranjevanje toplote, pri čimer pa se bomo osredotočili na latentni HT, saj je omenjen tip predmet obravnavanega dela.

2.3.1. Senzibilni hranilniki toplote

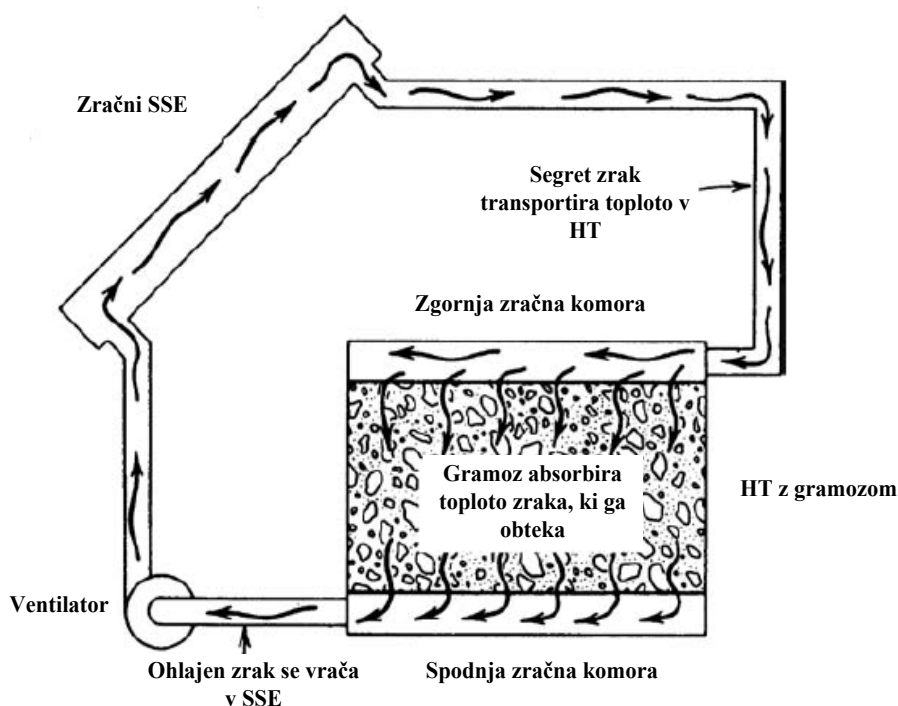
V senzibilnih HT je energija shranjena s spremembo temperature nosilca toplote kot so voda, zrak, olje, gramoz z vodo, opeke, pesek ali zemljina. Količina dovedene energije v senzibilni HT je proporcionalna razliki temperatur nosilca toplote na koncu in na začetku ΔT , masi

shranjenega nosilca toplote m ter njegovi specifični toploti c_p , pri čimer pa nosilec toplote ni podvržen nikakršni fazni spremembi. Količino toplote shranjene v masi nosilca toplote lahko izrazimo z enačbo (2.1).

$$Q = mc_p\Delta T = \rho c_p V \Delta T \quad (2.1)$$

Vsaka uporabljena snov (medij) v senzibilnem HT ima svoje prednosti in slabosti. Voda ima približno dvakrat večjo specifično toploto ($\sim 4,2$ kJ/kgK) od kamena in zemljine, zato je po navadi logična izbira v sistemu shranjevanja toplote, ki obratujejo v temperaturnem območju potrebnem za ogrevanje in hlajenje stavb. Relativno majhna specifična toplota kamena in keramike ($\sim 0,84$ kJ/kgK) pa se nekoliko kompenzira na račun možne velike temperaturne spremembe in relativno visoke gostote.

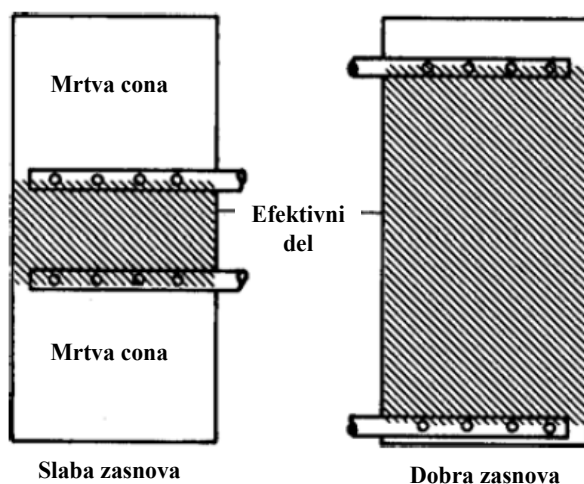
Zmožnost shranjevanja senzibilne toplote snovi je močno odvisna od produkta vrednosti gostote ρ in specifične toplote c_p . Voda ima visoko vrednost omenjenih veličin, poleg tega je še poceni, vendar ker je v kapljevitem stanju mora biti shranjena v bolj kakovostnem rezervoarju kot trdne snovi. Poleg nizke cene in visoke specifične toplote je pri senzibilnih HT pomemben parameter tudi hitrost pri kateri se toplota akumulira ali sprošča. Omenjena karakteristika je funkcija termične difuzivnosti, pri čimer pa je železov oksid odličen nosilec toplote, saj ima visoko specifično toploto in visoko toplotno prevodnost. Gramoz je dobra senzibilna snov za HT iz vidika cene, vendar pa je njegova volumetrična specifična toplota za enkrat manjša od vode. Dincer in sodelavci so v raziskavi dela [7] dokazali, da se je gramoz izkazal za praktično izvedbo shranjevanja toplote, pri čimer je njegova glavna prednost, da je uporabljen za shranjevanje toplote nad 100°C .



Slika 2.9: Solarni sistem s HT iz gramoza [3].

Na sliki 2.9 je prikazan solarni sistem z zračnim SSE, ki je vezan na HT napolnjen z gramozom. HT z gramozom je postavljen v toplotno izolirano ohišje pod stavbo ali neposredno ob njej. Kot je vidno iz slike 2.9, zrak iz zračnega SSE transportira absorbirano toploto sončnega obsevanja v HT napolnjen z gramozom. Zrak obteka gramoz in mu oddaja toploto, ter se ohlajen vrne v SSE, kjer se cikel ponovi.

Senzibilni HT so iz nosilca toplote, rezervoarja, vstopnih in izstopnih elementov. Rezervoar mora ohraniti snov (nosilec toplote) s katero je napolnjen, in preprečiti toplotne izgube. Obstoj temperaturnega gradienta vzdolž HT (temperaturno razslojevanje) je v HT zaželeno, njegovo vzdrževanje pa je v HT s snovjo trdnega agregatnega stanja bolj enostavno kot v HT s kapljevino. Na sliki 2.10 je prikazan vstop in izstop vode v HT s temperaturnim razslojevanjem, pri čemer sta prikazani slaba zasnova (leva stran slike) in dobra zasnova (desna stran slike) HT. Šrafirana površina na sliki 2.10 prikazuje efektivni delež shranjene toplote v hranilniku.



Slika 2.10: Hranilnik toplote s temperaturnim razslojevanjem [3].

Cilj temperaturnega razslojevanja je ohraniti eksergijo toplote v HT. Delovanje naravnega temperaturnega razslojevanja v HT se pojavi, ko se z dovajanjem toplote v HT topla voda, ki ima manjšo gostoto, začne dvigati na vrh, med tem ko se hladnejša voda z večjo gostoto spusti na dno. Volumen HT s principom razslojevanja je manjši relativno na ostale tipe HT, saj je mrtvi volumen vode relativno majhen in energijska učinkovitost relativno visoka.

2.3.2. Latentni hranilniki toplote

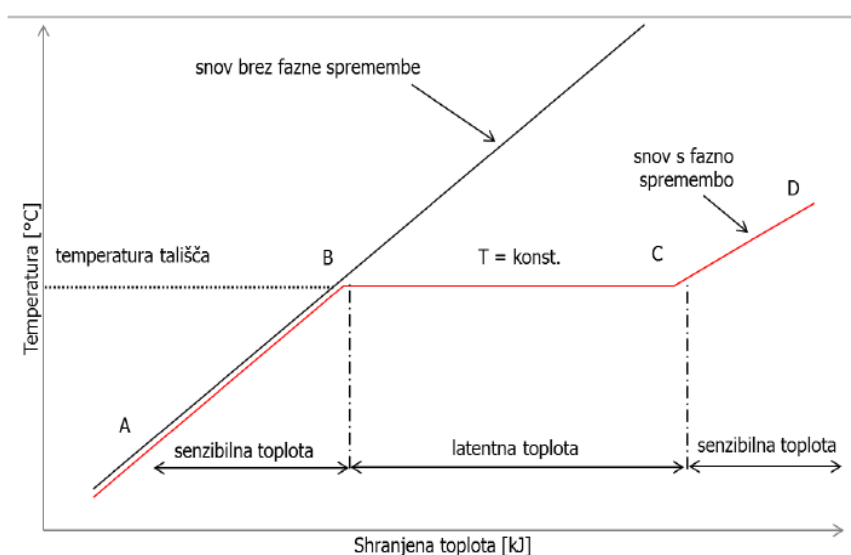
2.3.2.1. Shranjevanje toplote v fazno spremenljivih snoveh

Toplota ki se pojavi, ko snov preide iz ene faze v drugo se imenuje latentna toplota. Sprememba latentne toplote je veliko večja od spremembe senzibilne toplote snovi, ki se nanaša na specifično toploto [3]. Torej latentno shranjevanje toplote temelji na absorpciji ali

sproščanju toplote, ko je snov (medij za shranjevanje toplote) podvržena fazni spremembi iz trdnine v kapljevino ali iz kapljevine v plin oziroma obratno. Kapaciteta shranjene toplote FSS je podana z enačbo (2.2) [8].

$$Q = m(c_{p,s}(T_m - T_{zac}) + L + c_{p,l}(T_m + T_{kon})) \quad (2.2)$$

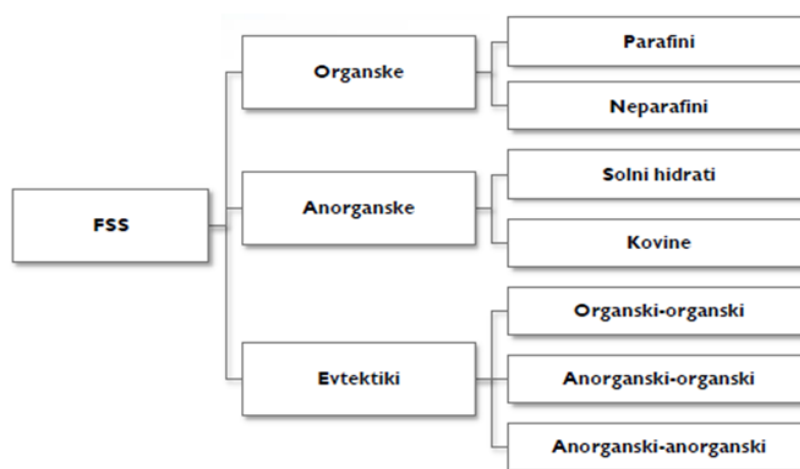
V osnovi se fazno spremenljive snovi (v nadaljevanju FSS) obnašajo kot konvencionalne (senzibilne) snovi uporabljene za shranjevanje toplote, saj njihova temperatura narašča, ko absorbirajo toploto. V nasprotju s senzibilnimi snovmi FSS absorbirajo in sproščajo toploto pri skoraj konstantni temperaturi snovi. Shranijo lahko od 5 do 14 krat več toplote na enoto volumna kot senzibilne snovi za shranjevanje toplote (voda, gramoz, opeka) [8]. Na sliki 2.11 je prikazana primerjava temperaturnega poteka snovi v odvisnosti od shranjene toplote za snov brez fazne spremembe in za snov s fazno spremembo [9].



Slika 2.11: Količina in vrsta shranjene toplote za snov z in brez fazne spremembe [9].

Iz slike 2.11 vidimo, da se ob segrevanju trdne snovi njena temperatura najprej linearno povišuje (področje A-B), pri tem pa molekule snovi nihajo vedno bolj intenzivno. Pri temperaturi tališča je kinetična energija nihajočih molekul ravno zadostna, da zapusti svoja mesta (B), in trdna snov se prične taliti. Med taljenjem (B-C) se temperatura snovi in kinetična energija molekul kljub segrevanju ne povečujeta, ampak se dovedena toplota rabi za povečanje potencialne energije molekul zaradi prehoda iz urejene zgradbe v neurejeno. Večini snovi se s taljenjem poveča prostornina za nekaj odstotkov, saj je število molekul na enoto volumna v kapljeviti fazi manjše kot v trdni. Ker so relativne spremembe prostornine snovi ob taljenju majhne, se tališče s tlakom le malo spreminja. Ob segrevanju kapljevine se povečuje intenziteta toplotnega gibanja, a se molekule kapljevine kljub temu ne razbežijo, ker jih drži skupaj medmolekulske sile – povečuje se kinetična energija molekul in s tem temperatura snovi (območje C-D). Ob nadaljnjem dovajanju toplote bi snov prešla iz kapljevitega v plinasto stanje, kar pa ni predmet naše obravnave. Celotno dovedeno toploto od točke A do točke D izračunamo z enačbo (2.2) [9].

Prednost uporabe FSS je torej v manjših temperaturnih razlikah med akumulacijo in sproščanjem toplote, v visoki gostoti shranjene energije in v možnosti ohranjanja konstantne temperature snovi v določeni aplikaciji. Latentna toplota je lahko, kot že omenjeno, posledica več različnih faznih sprememb, pri tem mora biti sistem čim bolj preprost in kompakten, razlika prostornin med fazami pa čim manjša. Za pline to pomeni, da bi jih bilo potrebno stisniti, s čimer bi se povečala potreba po energiji, in zmanjšal učinek sistema. Sprememba iz trdnega v trdno se zgodi le v peščici snovi (n-alkani), hkrati pa je latentna toplota nižja pri prehodu iz trdnega v kapljevito stanje. Zaradi naštetih dejavnikov se tako najpogosteje uporablja fazna sprememba iz trdnega v kapljevito stanje [9]. FSS ki prehajajo iz trdnega v kapljevito stanje in obratno, lahko razvrstimo v dve glavni kategoriji in sicer v organske in anorganske snovi, njihova razdelitev pa je prikazana na sliki 2.12 [5].



Slika 2.12: Razdelitev fazno spremenljivih snovi [5].

Pri implementaciji FSS v HT moramo upoštevati željene termo-fizikalne, kinetične in kemične lastnosti. Poleg tega pa je potrebno vzeti v obzir še ekonomsko upravičenost in razpoložljivost snovi. V nadaljevanju so našteje lastnosti, katere v delu navaja Tyagi s sodelavci [10].

Termofizikalne lastnosti:

- Temperatura taljenja v delovnem območju aplikacije.
- Visoka latentna talilna toplota na enoto volumna zato da je manjši volumen ohišja v katerem je FSS.
- Visoka specifična toplota za dodatno shranjevanje senzibilne toplote.
- Visoka toplotna prevodnost trdne in kapljevite faze za boljši prenos toplote pri akumuliranju in sproščanju toplote.
- Majhna sprememba volumna pri fazni spremembi in majhen parni tlak pri delovni temperaturi za zmanjšanje problema kontaminacije.
- Konstantna kapaciteta shranjevanja snovi pri ciklu strjevanja/taljenja.

Kinetične lastnosti:

- Visoka stopnja nukleacije za izogib podhlajevanju kapljevite faze.
- Visoka stopnja rasti kristalov zato da sistem zadosti potrebi po toploti.

Kemične lastnosti:

- Popolna povračljivost cikla strjevanja/taljenja.
- Ne korozivni konstrukcijski materiali.
- Nestrupeni, nevnetljivi in neeksplozivni materiali.

Ekonomski kriterij:

- Cena.
- Razpoložljivost FSS na trgu.

Pri zasnovi latentnega hranilnika toplote (v nadaljevanju LHT) je poleg ustrezne snovi, ki je sposobna shraniti velike količine v ozkem temperaturne območju pomemben tudi način shranjevanja FSS oziroma enkapsuliranja. Način shranjevanja je odvisen od namena uporabe; in poznamo tri načine shranjevanja FSS: makrokapsulacija, mikrokapsulacija in kompoziti [9].

Priporočena temperatura taljenja FSS med 20 °C in 32 °C za shranjevanje toplote v FSS v pasivnih in aktivnih sistemih shranjevanja toplote za ogrevanje in hlajenje stavbe [10].

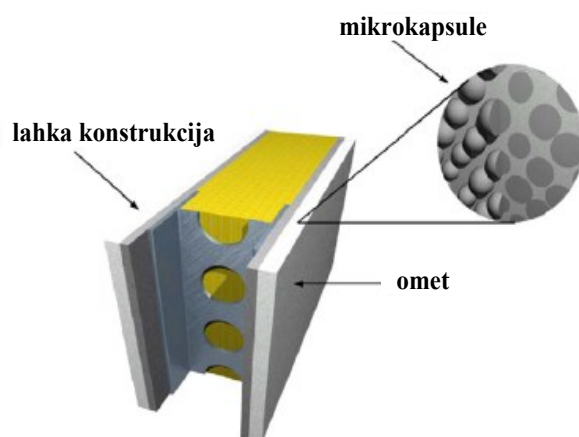
2.3.3. Aplikacije uporabe fazno spremenljivih snovi

V tem poglavju bomo opisali aplikacije uporabe FSS (opisanih v poglavju 2.3.2), ki se uporabljajo za potrebe ogrevanja in hlajenja stavb. Aplikacije z uporabo FSS so bile predmet mnogih raziskav, zato bomo opisali le nekaj najpomembnejših, ki so primerne za hlajenje in ogrevanje stavbe. Aplikacije s FSS delimo na pasivne in aktivne sisteme. Pri pasivnih sistemih so FSS lahko vgrajene v ovoj stavbe, s čimer povečajo njeno toplotno kapaciteto, za njihovo delovanje pa ne potrebujejo dodatne energije, saj izkoriščajo le naravno prezračevanje. Pri aktivnih sistemih pa se FSS vgrajuje v sisteme za klimatizacijo v obliki HT, pri čimer akumulirano toploto uporabimo, ko jo potreba po njej [9].

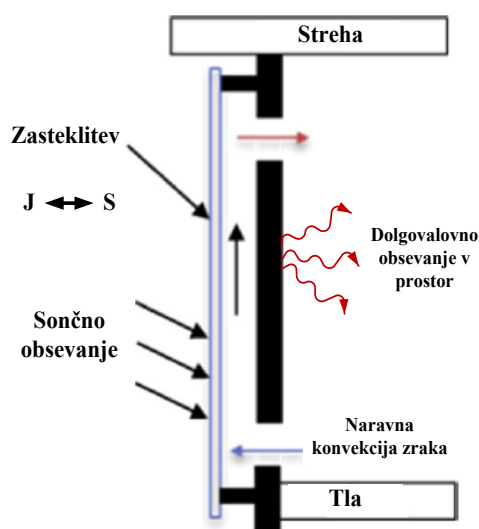
Pasivni sistemi

Pri pasivnih sistemih so FSS vgrajene v del stavbe kot so stene, strop, tla ali streha, in s tem povečajo toplotno sposobnost akumulacije. Podnevi FSS spremeni agregatno stanje, ko absorbira toploto iz prostora, in s tem vzdržuje zrak v prostoru pri konstantni temperaturi. Ponoči ko temperatura zraka v prostoru pade, FSS sprosti toploto, in se strdi. S tem se prepreči pregrevanje stavbe v poletnem obdobju, in zagotovi toploto v zimskem [9]. Na sliki 2.13 je prikazana mikroenkapsulirana FSS integrirana na notranjo stran stene v omet iz mavca (FSS plošča), in je tržno dostopna [8].

Na sliki 2.14 je prikazan Trombeov zid, ki sestoji iz FSS. Zid je pobarvan na črno in usmerjen proti jugu, ter namenjen za ogrevanje prostora. Debela plast stekla ali druge transparentne površine je vgrajena približno 10 cm od zidu. Čez dan zid (FSS) absorbira vpadno sončno obsevanje, pri čimer se FSS stali. Ponoči pa se absorbirana toplota sprosti v prostor, in ga ogreva. Trombeov zid ima zmožnost pokrivanja 42% celotne toplotne obremenitve velikega prostora [11].



Slika 2.13: Mikroenkapsuliran FSS integriran v mavec [8].

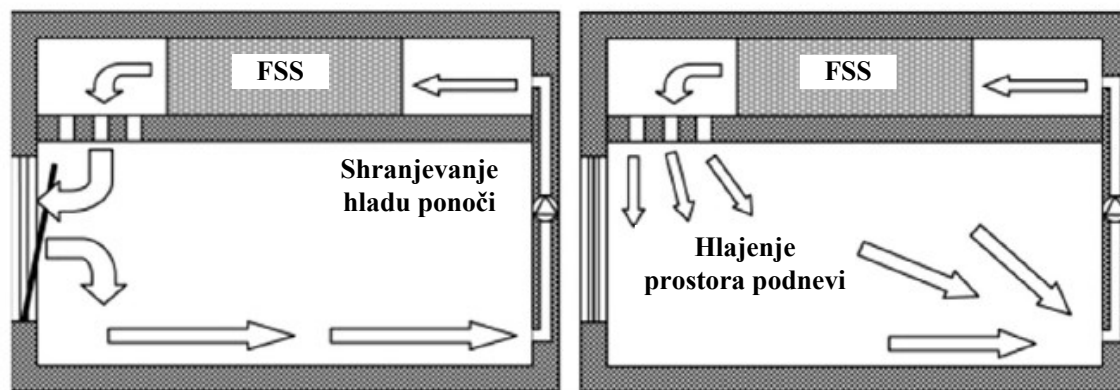


Slika 2.14: Trombeov zid [11].

Aktivni sistemi

Prosto hlajenje predstavlja shranjevanje hladu v nočnem času in njegovo uporabo podnevi, ko se poveča potreba po hlajenju. Prednost prostega hlajenja (slika 2.15) pred npr. naravnim prezračevanjem je v razpoložljivosti, pri čimer hlad pri naravnem prezračevanju ni vedno na voljo, medtem ko pri prostem hlajenju zrak s pomočjo ventilatorjev kroži skozi LHT in ob potrebi zagotavlja potrebno količino hladu. S tem se sicer poveša raba električne energije, a se hkrati poveča količina shranjenega hladu, ki je odvisna od variacije dnevne temperaturne zunanega zraka [9]. Stritih in Butala [12] sta eksperimentalno analizirala hlajenje stavbe z uporabo parafina s temperaturo tališča 22 °C v kovinskem ohišju z rebri, ki je bilo vstavljeno

v prezračevalni kanal, kot je to prikazano na sliki, pri čimer je bilo ugotovljeno, da se sistem zelo dobro odzove pri hlajenju prostora.

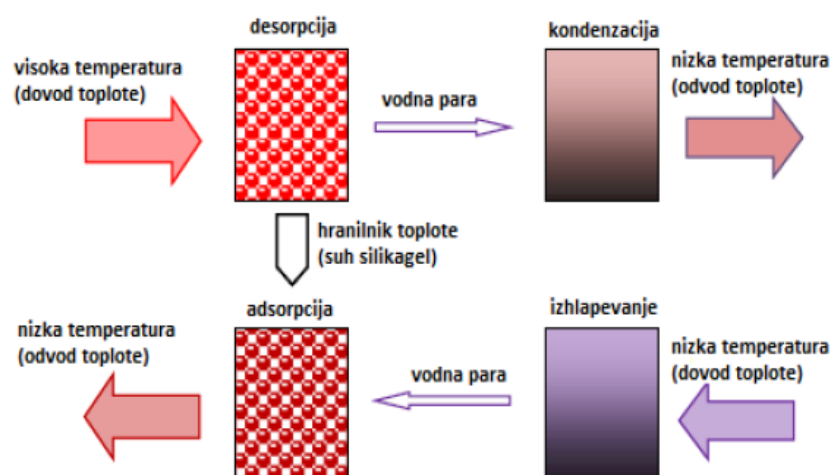


Slika 2.15: Princip delovanja prostega hlajenja z uporabo FSS [12].

V doktorskem delu Osterman [9] je narejen pregled raziskav FSS. Ugotovljeno je, da imajo FSS velik potencial za zmanjšanje rabe energije v stavbah, vendar pa je potrebnih še veliko raziskav in izboljšav. Manjša rabe energije je močno odvisna od temperature tališča in lastnosti FSS, klimatskih razmer, geometrijskih lastnosti LHT ter prenosa v zraku in FSS. Optimizacija omenjenih parametrov je ključnega pomena, saj le tako lahko dosežemo največjo izkoriščenost FSS in s tem največje možne prihranke energije v stavbah, da upravičimo uporabo FSS.

2.3.4. Kemični hranilniki toplote

Pri termo-kemičnem shranjevanju toplote je le-ta shranjena v obliki kemijskih vezi, kar je rezultat procesa sorpcije med sorpcijsko snovjo in plinom (vodno paro). Dovedena toplota (na primer sončna energija) material posuši oziroma odstrani vodo iz por, s čimer polnimo HT, posušen material pa shranimo v ločeni zaprti posodi. Pri praznjenju HT pa poteka nadzorovana vezava vode nazaj v material, pri čemer se sprošča toplota. Stopnji polnjenja in praznjenja sta lahko natančno nadzorovani, in omogočata optimalno prilagajanje potrebi po toploti. Slika 2.16 prikazuje proces desorpcije in adsorpcije v sezonskem HT. Kemični HT so sposobni shraniti visoko gostoto energije z majhnimi oziroma ničnimi toplotnimi izgubami, in so primerni za dolgotrajno shranjevanje toplote. Ostale tehnologije HT ki so na trgu, pa shranijo nižje gostote energije, in so kot take bolj primerne za kratkotrajno shranjevanje toplote. Glavna ovira pri širši uporabi kemičnih HT je dejstvo, da ni primernih komercialno dostopnih poroznih materialov [13], [14].



Slika 2.16: Zaprti cikel desorpcije in adsorpcije HT [13].

3. Metodologija raziskave

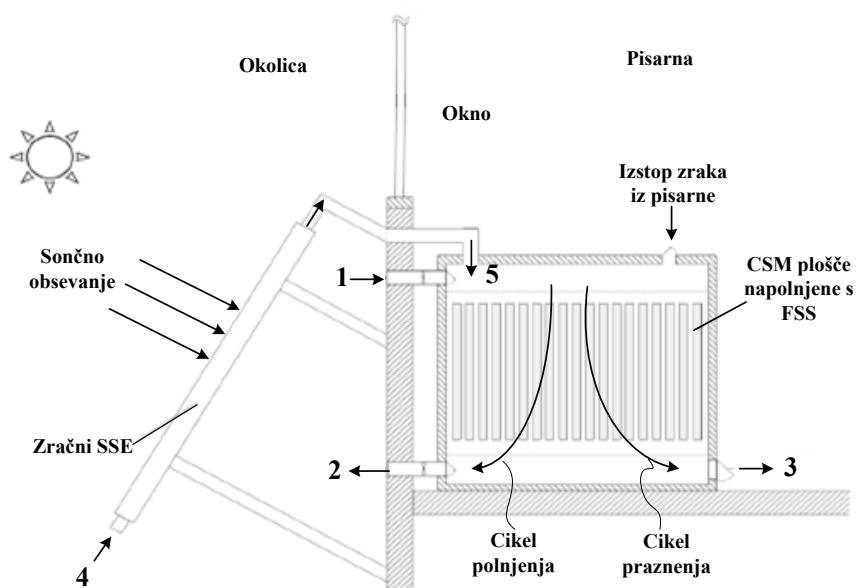
Raziskovalno delo je bilo eksperimentalne in teoretične narave. V eksperimentalnem delu raziskovalnega dela smo na obstoječem eksperimentalnem sistemu izvedli meritve procesa polnjenja in praznjenja LHT. Eksperimentalni del je služil za validacijo računalniškega modela LHT, ki ga je razvila skupina raziskovalcev iz BUT Brno za uporabo v programskem orodju TRNSYS. V teoretičnem delu smo izvedli validacijo računalniškega modela zračnega SSE in LHT, ter simulirali delovanje eksperimentalnega sistema v času ogrevalne sezone. Dobljene rezultate smo analizirali, in izračunali učinkovitost (delež) pokritja prezračevalnih toplotnih izgub pisarne na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, kjer se eksperimentalni sistem nahaja.

3.1. Eksperimentalni del

3.1.1. Princip delovanja sistema

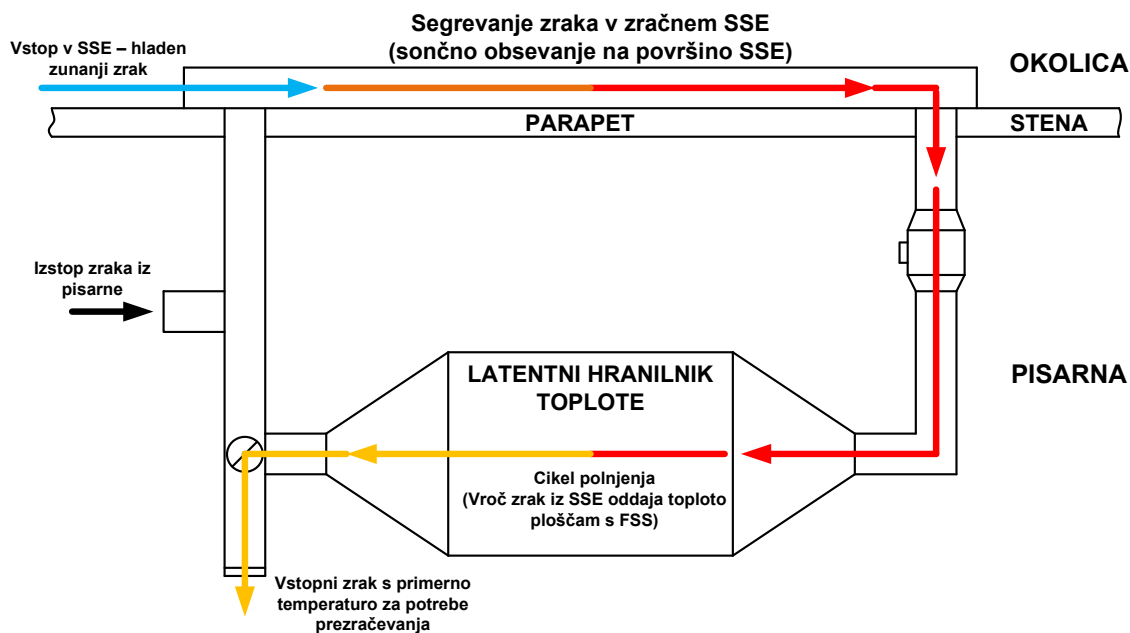
Princip delovanja sistema SSE in LHT za potrebe ogrevanja in hlajenja, kot je prikazano na sliki 3.1, je bilo leta 2015 predstavljeno v delu Osterman [9], kjer je bil zasnovan obravnavani eksperimentalni sistem za potrebe hlajenja.

Princip delovanja sistema s SSE in LHT prikazanega na sliki 3.1 se deli na način ogrevanja in hlajenja, kar pomeni, da sistem lahko uporabljamo skozi celotno leto. Princip delovanja sistema v obdobju **hlajenja** je sestavljen iz dveh ciklov. Prvi cikel se odvija ponoči, ko se z ventilatorjem dovaja hladen zunanji zrak v LHT (številka 1), kjer zrak obteka plošče napolnjene s FSS, pri čimer le-ta preide v trdno agregatno stanje, in shrani hlad iz zraka v obliki latentne toplote, pri tem pa transportiran zrak izteka iz LHT (2). Drugi cikel se odvija podnevi, ko se pojavi potreba po hlajenju, vstopa topel zunanji zrak v LHT (1), ki shranjen hlad v FSS sprošča, in ohlaja vstopajoč zunanji zrak (1), ki vteka v prostor (3). V obdobju **ogrevanja** hladen zunanji zrak vodimo skozi SSE (4), kjer se pod vplivom sončnega obsevanja segreje, in nadaljuje skozi LHT (5), kjer odda toploto FSS, ki prehaja v kapljevito stanje in shrani toploto v obliki latentne toplote. Zjutraj in zvečer ali ko je sončno obsevanje premajhno, transportiramo hladen zunanji zrak skozi LHT (1), pri čimer FSS preide v trdno stanje, in s tem odda toploto transportiranemu zraku, ki vteka v prostor (3) [9].



Slika 3.1: Shematski prikaz principa delovanja eksperimentalnega sistema [9].

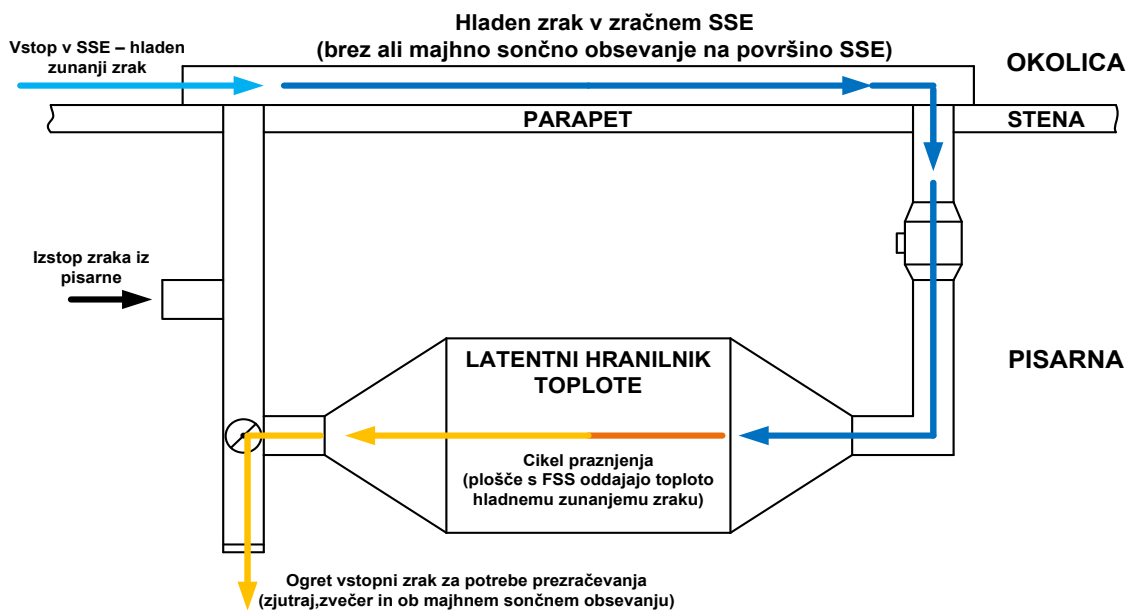
Obravnavan eksperimentalni sistem je deloval v obdobju ogrevanja za potrebo neprekinjenega prezračevanja pisarne. Pri tem se delovanje omenjenega prezračevalnega sistema deli na cikel polnjenja in praznjenja, kot je shematsko prikazano na slikah 3.2 in 3.3.



Slika 3.2: Prezračevanje pisarne v ciklu polnjenja.

V zračni SSE vedno vstopa svež zunanji zrak, ki se ob prisotnem sončnem obsevanju segreje, in vstopa v LHT, kjer segret zunanji zrak odda toploto FSS. Omenjeno predstavlja cikel polnjenja in je prikazan na sliki 3.2.

Cikel praznjenja (slika 3.3) pa se odvija, ko je nebo oblačno, oziroma ko je sončno obsevanje majhno ali ga ni, pri čimer se zrak skozi SSE ne segreje. Hladen zrak potuje skozi LHT, kjer je v FSS shranjena toplota, ki se prenaša na zrak in ga segreje.



Slika 3.3: Prezračevanje pisarne v ciklu praznjenja.

3.1.2. Eksperimentalni sistem

Snovanje obravnavanega eksperimentalnega sistema je bilo plod dela preteklih raziskav začenši z delom Osterman [9], kjer je bil LHT dimenzioniran (poglavje 3.1.2.1), in obratovanje sistema za potrebe hlajenja doseženo, kar je tudi predstavljeno v delu Dolenc [15]. V zaključnem delu Kofalt [14] pa je sledila nadgradnja sistema z zračnim SSE (poglavje 3.1.2.2), pri čimer je bil eksperimentalni sistem pripravljen na celoletno obratovanje za potrebe ogrevanja (pozimi) in potrebe hlajenja (poletje).

3.1.2.1. Latentni hranilnik toplote

Nosilna konstrukcija za CSM plošče je bila narejena iz 8 mm debelih polimetilmetakrilatnih plošč z zunanjimi merami 725 mm x 460 mm x 420 mm, z zunanje strani pa je bil LHT toplotno izoliran z 50 mm ekspandiranega polistirena (slika 3.4). Znotraj LHT je bilo 29 CSM plošč, napolnjenih s parafinom RT22HC in temperaturo tališča med 20 °C in 23 °C z

maksimumom pri 22 °C. Specifična toplota FSS v temperaturnem območju med 14 °C in 29 °C znaša $200 \text{ kJ/kg} \pm 7,5\%$. FSS in temperatura tališča je bila izbrana tako, da se lahko zagotavlja maksimalen proces taljenja ali strjevanja. Upoštevane so bile meje temperaturnega ugodja v povezavi z izstopno temperaturo, pri čimer je temperatura tališča nekoliko višja, saj je LHT namenjen ogrevanju in hlajenju. Za klimatske razmere v Sloveniji je bila izbrana temperatura tališča med 22 °C in 23 °C [9], [16].



Slika 3.4: LHT z odkrito prednjo stranico in vidno nosilno konstrukcijo.

Zunanje dimenzije CSM plošč so bile 300 mm x 450 mm x 150 mm, v LHT pa so bile postavljene horizontalno, pri čimer je daljša stranica pravokotna s tokom zraka. Zračna reža med ploščami pa je znašala 10 mm. Kompaktnost LHT je bila $133 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (razmerje med površino plošč in volumnom plošč), gostota shranjene energije pa $16 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (razmerje med shranjeno energijo in volumnom LHT). Povprečna masa posamezne CSM plošče je znašala $1361 \pm 5 \text{ g}$, masa FSS pa $1003 \pm 5 \text{ g}$, pri čimer je volumen plošče znašal 1,4 litra in volumen FSS 1,3 litra. Iz tega sledi, da je 8 % volumna plošče praznega zaradi kompenzacijskih volumskih sprememb FSS s čimer se izognemo deformaciji plošč zaradi povišanega tlaka [9].

3.1.2.2. Zračni sprejemnik sončne energije

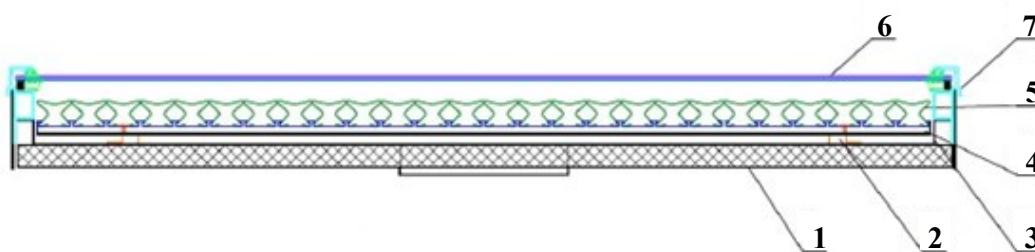
Zračni SSE je bil vgrajen v obravnavan eksperimentalni sistem, pri čimer je bil SSE komercialni izdelek podjetja SolAir d.o.o. [14]. SSE s površino $1,638 \text{ m}^2$ in aluminijastim ohišjem je bil vgrajen na južno stran fasade stavbe Fakultete za strojništvo v Ljubljani z orientiranostjo 17° proti zahodu. SSE je bil vpet vertikalno na parapet pod okno pisarne (slika 3.5), kar pomeni, da je bil kot naklona SSE 90° . Material absorberja je aluminij z debelino rebra 0,2 mm in širino rebra 30 mm. Absorptivnost sončnega obsevanja absorberja znaša $93 \pm 2 \%$, njegova hemisferična emisivnost pa $35 \pm 3 \%$, pri čimer je absorber pobarvan s črno selektivno barvo TISS (angl. *Thickness Insensitive Spectrally Selective Paint*). Pretočni kanali v SSE so povezani med seboj brez razmaka, izstop SSE pa je povezan z LHT

v pisarni. Zasteklitev je iz polikarbonatnih plošč debeline 4mm in s transmisivnostjo sončnega obsevanja $90 \pm 1 \%$. Toplotna izolacija je iz polietilena, in je nameščena na hrbtni strani kolektorja, medtem ko je ob straneh ni [17], [18].



Slika 3.5: Zračni SSE pod oknom pisarne na južni strani fasade stavbe.

Struktura vgrajenega zračnega SSE je prikazana na sliki 3.6.

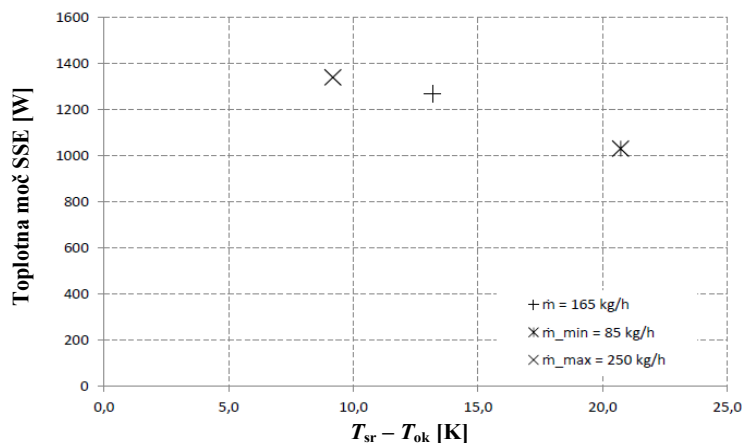


- 1 - toplotna izolacija (penasti polietilen z zaprtimi porami);
- 2 - distančnik iz temperaturno obstojne umetne mase;
- 3 - hrbtni nosilec iz pocinkane pločevine;
- 4 - nosilec absorberja (nerjavna pločevina);
- 5 - aluminijasti absorber;
- 6 - polikarbonatna plošča Macrolux®;
- 7 - dvostensko aluminijasto ohišje.

Slika 3.6: Struktura vgrajenega toplozračnega SSE [18].

Merjenje karakteristik zračnega SSE je bilo izvedeno na nemškem inštitutu Fraunhofer ISE (angl. *Institute for Solar Energy Systems*) v Freiburgu. Toplotna moč zračnega SSE je bila pridobljena preko meritev v stanju dinamičnega ravnovesja s kalorimetrično metodo. Učinkovitost obravnavanega zračnega SSE glede na površino naprave pri normalnem vpadu

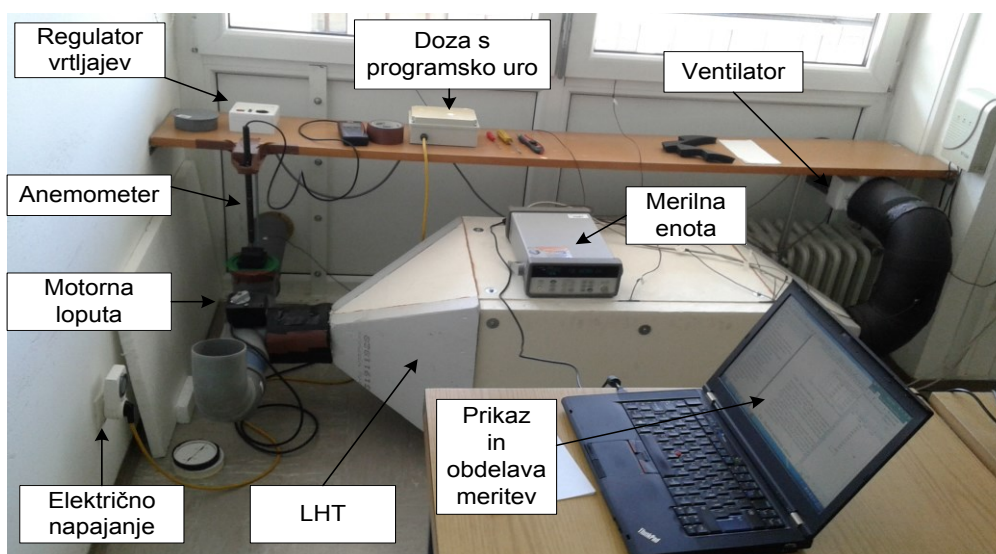
sončnega obsevanja znaša 0,703. Vrednost je dobljena pri sončnem sevanju na površino SSE pri 961 W/m^2 , toplotni moči SSE 1290 W in masnem toku zraka 250 kg/h . Na sliki 3.7 je prikazana toplotna moč pridobljena iz zračnega SSE glede na temperaturno razliko (med srednjo temperaturo zraka v SSE T_{sr} in temperaturo zraka okolice T_{ok}) pri 1000 W/m^2 sončnega sevanja [17].



Slika 3.7: Toplotna moč vgrajenega SSE [17].

3.1.2.3. Ostali elementi eksperimentalnega sistema

Ohišje LHT je izdelano tako, da se na obeh straneh konusno zmanjšuje, in je povezano v cev premera 100 mm. Na vstopni strani ohišja je zaradi možnosti separacije zračnih tokov pritrjeno satovlje, na izstopni strani pa mreža za mešanje zračnega toka [14].

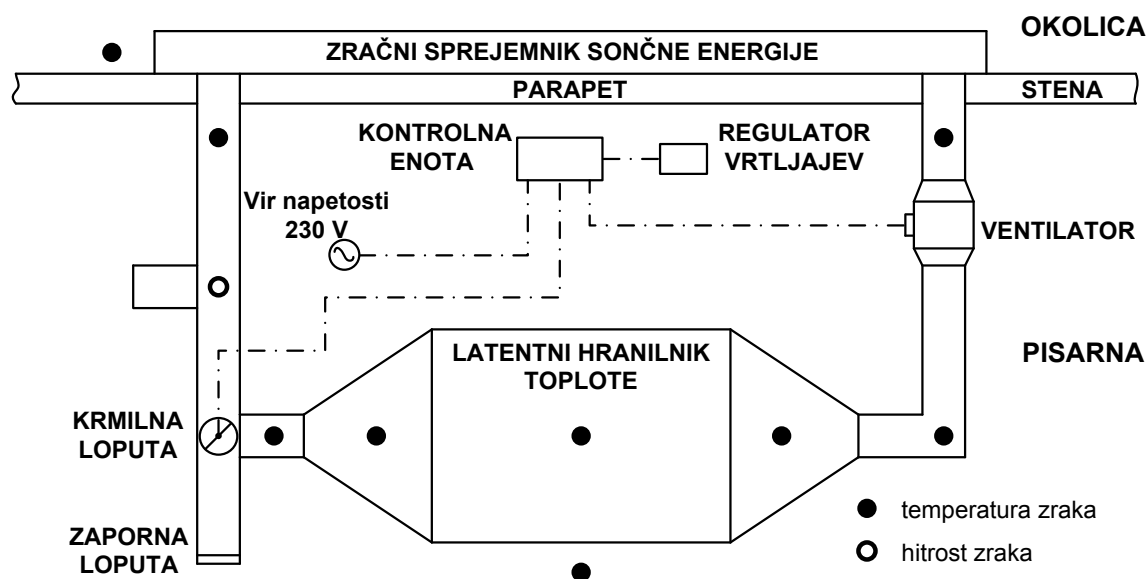


Slika 3.8: Elementi eksperimentalnega sistema.

Za kanale ki povezujejo hranilnik z okolico in prostorom so uporabljene PVC odtočne cevi premera 100 mm, ki so izolirane z Armaflex izolacijo debeline 20 mm. Pred LHT je nameščen aksialni ventilator proizvajalca Ventilution moči od 21 W do 33 W. Z ventilatorjem je povezan regulator vrtljajev podjetja Wallair, ki prilagaja vrtljaje ventilatorja glede na nastavitve, in omogoča nastavitve petih različnih vrtilnih hitrosti. Regulator vrtljajev se krmili s programsko uro Schneider Electric IH 15336. Istočasno se z regulatorjem vrtljajev krmili tudi motorni pogon lopute, ki je nameščena za izhodom iz LHT, in omogoča usmeritev zraka v prostor ali v okolico. Kovinska loputa ima zaradi boljšega tesnjenja po robovih nameščeno gumo, in je vgrajena v PVC odtočni T-kos. Povezana je z motornim pogonom, ki nam omogoča kot zasuka 90°. Vsa električna vezava je zaradi varnosti zaprta v električno dozo. Celotna regulacija je napajana preko omrežne napetosti 230V. Elementi eksperimentalnega sistema pa so prikazani na sliki 3.8 [14].

3.1.3. Meritve

Na sliki 3.9 je prikazana shema eksperimentalnega sistema, kjer so označena mesta meritve temperature zraka in hitrosti zraka. Na omenjeni shemi so prikazani elementi eksperimentalnega sistema in merilne verige z izjemo merilne kartice in računalnika.



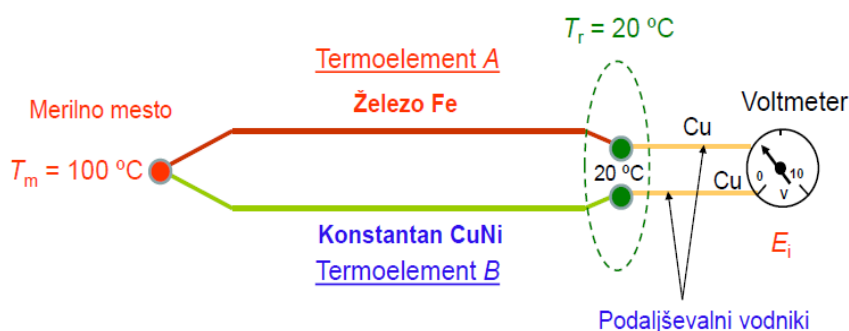
Slika 3.9: Shema eksperimentalnega sistema.

Eksperiment smo izvedli s konstantnim zračnim tokom skozi LHT, pri čimer se je toplota akumulirala v LHT čez dan, in oddajala preko noči z odtokom zraka v okolico. Ventilator je obratoval celotni čas, zračni tok pa je bil s krmilno loputo preusmerjen v izstopno cev eksperimentalnega sistema, ki je vodila v okolico. S tem smo omogočili maksimalne toplotne tokove, saj se je LHT ponoči popolnoma izpraznil, in se ob sončnem obsevanju na SSE ponovno začel polniti. Meritve smo izvajali šest sončnih dni od 28.3.2017 do 3.4.2017 z enominutnim intervalom med meritvami.

3.1.3.1. Meritve temperature zraka

Meritve temperature zraka smo izvedli na devetih različnih mestih eksperimentalnega sistema, kar je prikazano na sliki 3.9 (poglavje 3.1.3). Temperaturo zraka smo merili s termopari tipa T, ki so bili umerjeni v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Največja merilna negotovost tipa A je znašala $\pm 0,119$ °C.

Termopar tipa T je standardiziran termopar, in je sestavljen iz žičke bakra (Cu) in konstantana (Cu+Ni), njegovo merilno območje pa je od -270 °C do +400 °C. Termopari so termoelektrična merilna zaznavala, ki delujejo na osnovi termoelektričnega učinka. Termoelektrični učinek označuje fizikalni pojav, pri katerem gre za neposredno pretvorbo temperaturne razlike v enosmerno električno napetost in obratno. Zaradi spremenljive temperature vzdolž prevodnika med dvema točkama (vroča in hladna) se vzdolž prevodnika generira termoelektrična napetost. Temperaturna razlika med obema spojem povzroča torej termoelektrični potencial vzdolž prevodnika, ki je nizke enosmerne napetosti. Prirastek količine energije za določeno porast temperature pa imenujemo termoelektrična napetost. Če obdržimo referenčni spoj na znani referenčni ali primerjalni temperaturi, se da iz izmerjene termoelektrične enosmerne napetosti določiti neznano merjeno temperaturo. Shematski prikaz merilne verige termopara je prikazana na sliki 3.10, in ne predstavlja obravnavanega termopara tipa T [19].



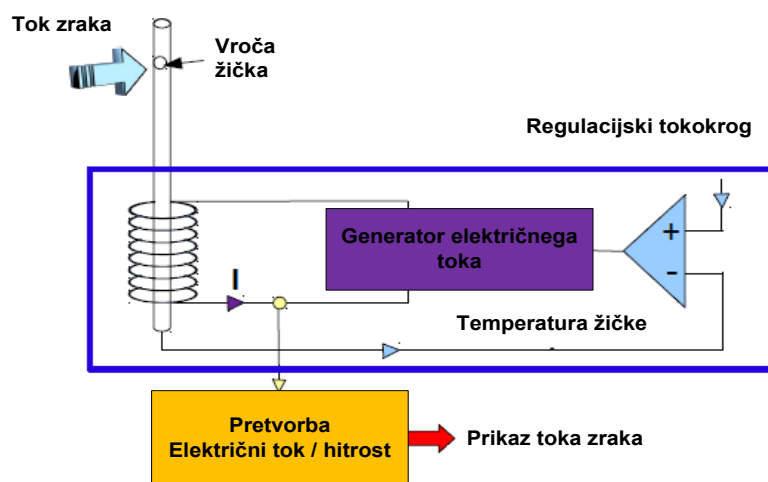
Slika 3.10: Merilna veriga termopara [19].

Meritve temperature smo zajemali z merilno enoto Agilent 34970A, ki sestoji iz merilne kartice in analogno-digitalnega pretvornika ter digitalne komunikacije RS-232. Merilna enota je bila povezna z računalnikom, na katerem smo preko programskega paketa BechLink Data Logger 3 nastavliali nastavitve merilne enote, in spremljali potek meritev, ter jih s programskim orodjem Excel uredili.

3.1.3.2. Meritve toka zraka

V eksperimentalnem sistemu smo meritve pretoka zraka izvajali posredno z merjenjem hitrosti zraka v iztočni cevi sistema. Hitrost zraka smo merili z anemometrom na vročo žičko

VT 110 od proizvajalca KIMO instruments. Merilno območje (MO) merjenja hitrosti je od 0,15 m/s do 30 m/s, merilni pogrešek pa znaša $\pm 3 \%$ merilnega razpona (MR) v območju od 0,15 do 3 m/s in prav tako $\pm 3 \%$ MR v območju od 3.1 m/s do 30 m/s. Ločljivost merjenja je 0,01 m/s v območju do 3 m/s in 0,1 m/s do 30 m/s. Delovna temperatura merilnika je od 0 do $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Merilni element na vročo žičko deluje po principu termistorja z negativnim temperaturnim koeficientom. Neprekinjen električni tok skozi žičko povzroča njeno segrevanje, pri čimer je njena temperatura višja od temperature okolice. Zračni tok vročo žičko hladi, konstantna temperatura vroče žičke pa je vzdrževana z regulacijskim električnim tokokrogom, pri čimer je električni tok, ki povzroča segrevanje žičke sorazmeren hitrosti toka. Shema delovanja anemometra z vročo žičko je prikazana na sliki 3.11 [20].



Slika 3.11: Shema delovanja anemometra z vročo žičko [20].

Meritve hitrosti zraka smo izvajali neprekinjeno s petminutnim časovnim korakom znotraj treh dni poteka eksperimenta, in jih odčitavali ročno, ter zapisovali v programsko orodje Excel, kjer smo nato izračunali povprečen masni tok zraka. Ker smo meritve odčitavali ročno, in zaradi temperaturnega delovnega območja merilnika, smo meritve hitrosti zraka lahko izvajali za največ 5 urni časovni interval. Meritve smo izvajali v eni točki (v osi cevi), pri čimer smo omenjeno poenostavitev merjenja izvedli zaradi obratovanja ventilatorja pri konstantnih vrtljajih celotni čas izvedbe eksperimenta, in glede na daljši časovni interval izvajanja meritev, ki smo jih trikrat ponovili, na istem mestu, z enako zbranostjo, ob enakih pogojih in z isto merilno opremo. Na sliki 3.12 je prikazan potek meritev hitrosti zraka za drug ponovljen interval meritev, kjer je najmanjša hitrost zraka znašala 1,21 m/s, največja pa 1,54 m/s (tabela 1), kar predstavlja $0,0025 \text{ m}^3/\text{s}$ ($9 \text{ m}^3/\text{h}$) razlike.

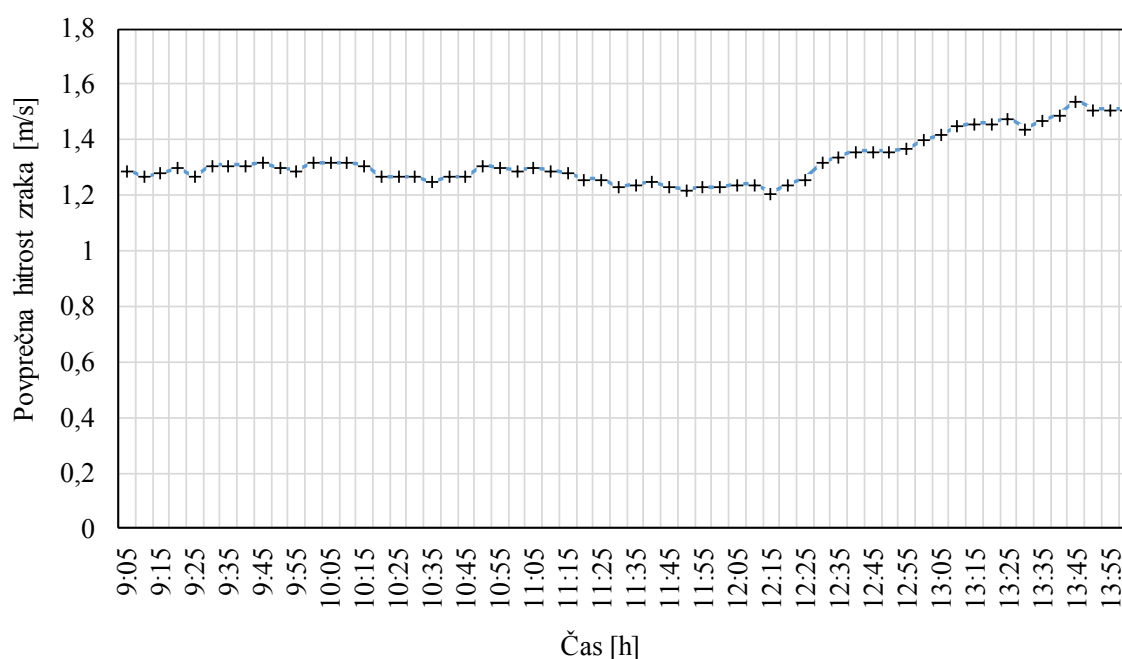
Ker imamo večkrat ponovljene in neodvisne meritve, smo lahko izračunali merilno negotovost tipa A $u_A(v)$ po enačbi (3.2):

$$u_A(v) = \frac{s(v)}{\sqrt{n}}, \quad (3.1)$$

kjer je n število meritev in $s(v)$ eksperimentalni standardni odmik izračunan po enačbi (3.2):

$$s(v) = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}, \quad (3.2)$$

kjer je v_i posamezen izmerek hitrost in $\bar{v}$ aritmetična srednja vrednost vseh izmerkov hitrosti [21].



Slika 3.12: Meritve hitrosti zraka.

Preglednica 1: Merilna negotovost tipa A meritev hitrosti zraka.

Meritev	1	2	3
Največja hitrost [m/s]	1,51	1,54	1,32
Najmanjša hitrost [m/s]	1,29	1,21	1,26
Povprečna hitrost [m/s]	1,35	1,32	1,29
Eksperimentalni standardni odmik [m/s]	±0,047	±0,088	±0,016
Merilna negotovost tipa A [m/s]	±0,007	±0,011	±0,003

V preglednici 1 so prikazane povprečne vrednosti meritev hitrosti zraka, njihove največje in najmanjše vrednosti ter merilne negotovosti tipa A meritev hitrosti zraka, pri čimer je največja merilna negotovost znašala $\pm 0,011$ m/s kar predstavlja $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

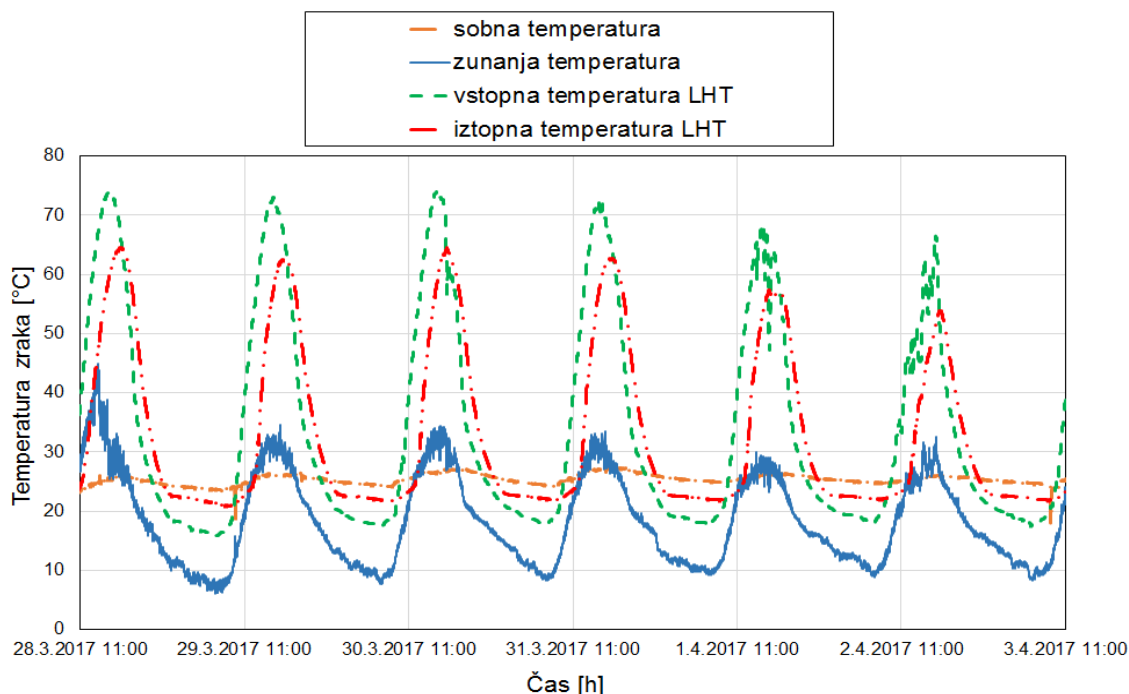
Iz meritev hitrosti zraka v smo izračunali volumski tok zraka $\dot{V}$ po enačbi (3.3), kjer je A presek cevi s premerom d 0,1 m. Nato pa smo izračunali še masni tok zraka $\dot{m}$ skozi sistem po enačbi (3.4), kjer smo gostoto zraka ρ normirali na obratovalne pogoje. Izračunane vrednosti smo povprečili, in dobili povprečni volumski tok zraka skozi sistem, ki je znašal 0,010 m³/s (36 m³/h) oziroma 10 l/s in masni tok zraka, ki je znašal 0,012 kg/s. Pri tem je pomembno tudi poudariti, da je 10 l/s zahtevana vtočna količina zraka glede na onesnaževanje, ki ga povzroča standardna oseba, za dosego A kategorije toplotnega ugodja.

$$\dot{V} = v \cdot A = v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.3)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (3.4)$$

3.1.4. Prikaz meritev temperature zraka

Merjene temperature zraka za šest dni smo prikazali v grafu na sliki 3.13. Na omenjeni sliki so prikazane sobna temperatura zraka (potrebna za izračun toplotnih izgub LHT), zunanja temperatura zraka, vstopna temperatura zraka v LHT (predstavlja hkrati izstopno temperaturo zraka iz SSE) in izstopna temperatura zraka iz LHT.



Slika 3.13: Meritve temperature zraka.

Zunanja temperatura zraka se je večinoma gibala med 6 °C in 34 °C s povprečno temperaturo 18 °C, medtem ko je prvi dan temperatura zunanjega zraka dosegla 45°C. Razlog tako

visokih amplitud zunanje temperature zraka je v meritvi temperatur blizu južne fasade stavbe ob vstopnem delu SSE. Sončno obsevanje je segrelo fasado stavbe, ki je absorbirano energijo sevalo nazaj v okolico in segrelo zrak v bližini fasade stavbe. Največja dnevna temperatura zraka na izstopu SSE je segala tudi do 74 °C, minimalna pa do 21 °C, kar pomeni, da je temperaturni nivo previsok za neposredno prezračevanje pisarne iz SSE.

3.2. Analiza sistema v programskem paketu TRNSYS

Analizo obravnavanega eksperimentalnega sistema smo izvedli v programskem paketu TRNSYS (angl. *TRaNsient SYstem Simulation program*) [22], ki predstavlja fleksibilno in grafično osnovano programsko okolje za simulacijo tranzientnih sistemov, pri čimer je večina simulacij osredotočena na oceno delovanja toplotnih in elektro energetskega sistemov. Namenjen je za uporabo inženirjem in raziskovalcem za validacijo energetskega konceptov, od enostavnih sistemov za pripravo tople sanitarne vode v gospodinjstvih do dimenzioniranja in simulacije stavbe ter naprav, vključno s strategijo krmiljenja in vedenjem prisotnih ljudi ter alternativnih energetskega sistemov (vetrni, solarni, fotovoltaični, vodikovi sistemi) itd. TRNSYS sestoji iz dveh delov. Prvi del je jedro (angl. *Engine*), ki bere in procesira vhodne podatke, iterativno rešuje sistem in določa konvergenco in izrisuje spremenljivke sistema. Jedro programa prav tako zagotavlja pripomočke, ki med drugim določajo termo-fizikalne lastnosti, inverzne matrike, linearno regresijo in interpolira zunanje podatke datotek. Drugi del TRNSYSa pa predstavlja razširjena knjižnica komponent, izmed katerih vsaka modelira delovanje določenega dela sistema. Modeli so zasnovani na tak način, da jih uporabnik lahko modificira ali celo zasnuje svoje, saj je programsko orodje odprtokodno [22].

Projekti ki jih ustvarimo v vizualnem vmesniku predstavljajo sklop povezanih grafičnih komponent, ki jih imenujemo tipi (angl. *Type*). Vsak tip komponente je opisan z matematičnim modelom v jedru (angl. *Engine*) TRNSYSa in ima niz ujemajočih pro form (angl. *Proforma*). Pro forma predstavlja opis komponente kot črne-škafle (angl. *Black-box*): vhodni, izhodni podatki itd. V sklopu predstavljene naloge smo uporabili verzijo programa TRNSYS 17 [22].

3.2.1. Računalniški model latentnega hranilnika toplote

Računalniški model latentnega hranilnika toplote za uporabo v programskem orodju TRNSYS je razvila skupina raziskovalcev iz Univerze za tehnologijo v Brnu (angl. *Brno University of Technology*), pri čimer je predstavitev dela v celotnem podpoglavju 3.2.1 plod raziskav univerze v BUT [23], [24].

3.2.1.1. Pristop modeliranja, poenostavitev, predpostavke

Model LHT je bil razvit kot kvazi-eno-dimenzionalen. Predpostavljeno je bilo, da je masni tok zraka enak v vseh zračnih regah (kanalih) med CSM ploščami. Toplotna prevodnost v

FFS je bila upoštevana samo v smeri debeline CSM plošč. Ta predpostavka je bila vzeta, ker je debelina plošč veliko manjša v primerjavi z dolžino in širino plošč, pri tem pa je največji temperaturni gradient v smeri debeline. Prenos toplote med zrakom in površino CSM plošč je bil izračunan preko korelacij za tok tekočine med vzporednimi ploščami. Čeprav LHT vsebuje dva stolpca horizontalno postavljenih CSM plošč, simulacijski model ni omejen na tako konfiguracijo.

3.2.1.2. Koncept modela

Model LHT je bil implementiran kot TRNSYSov tip. Veliko število modelov za shranjevanje toplote je bilo implementiranih in apliciranih v različnih raziskavah, ki so jih v svojih delih prikazali Al-Saadi in sodelavci [25], Halawa in sodelavci [26] ter Lu in sodelavci [27]. Model je bil narejen kot samostojen TRNSYSov tip v obliki DLL knjižnice (angl. *Dynamic Link Library*), in je bil poimenovan Type256. Za njegovo implementacijo pa je bil uporabljen programski jezik C++. LHT sestoji iz več geometrično identičnih zračnih kanalov, ki predstavljajo zračne rege med CSM ploščami v LHT. Ker je bil predpostavljen enak pretok zraka v vseh zračnih regah, je bila modelirana samo ena zračna rega med parom sosednjih CSM plošč. Simulacija prevoda toplote in fazne spremembe FSS v CSM plošči je predstavljala najbolj zamuden del.

3.2.1.3. Modeliranje prenosa toplote, fazne spremembe in LHT

Numerični model temelji na implementaciji 1D prenosa toplote, ki vsebuje notranji vir toplote (enačba (3.5)).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}, \quad (3.5)$$

kjer pomeni:

ρ	gostota FSS;
c	specifična toplota FSS;
k	toplotna prevodnost FSS;
t	čas;
T	temperatura FSS;
x	prostorska koordinata v smeri debeline CSM plošče.

Notranji vir latentne talilne toplote $\dot{Q}$ v enačbi (3.5) izrazimo, in dobimo enačbo (3.6):

$$\dot{Q} = \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial t}, \quad (3.6)$$

kjer je L_f latentna talilna toplota in f_s delež trdnine, ki predstavlja razmerje med trdno in kapljevito fazo. Metoda efektivne specifične toplote je bila uporabljena pri pristopu modeliranja fazne spremembe. Ta metoda uporabi efektivno specifično toploto c_{ef} za

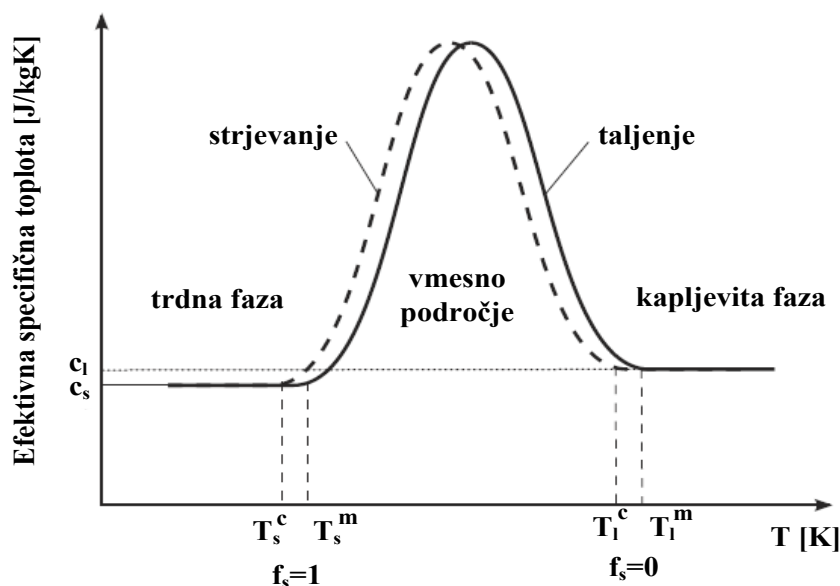
kompenzacijo latentne talilne toplote. Efektivna specifična toplota je definirana po enačbi (3.7):

$$c_{\text{ef}}(T) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial T} = c - L_f \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial t}{\partial T}, \quad (3.7)$$

kjer je H entalpija FSS. Pri tem je efektivna specifična toplota premo-sorazmerna naklonu funkcije entalpije v odvisnosti od temperature. Efektivna specifična toplota temelji na umetni povečavi specifične toplote v temperaturnem razponu fazne spremembe. Z vstavitvijo enačbe (3.7) v enačbo (3.5) dobimo vodilno enačbo za 1D prenos toplote v FSS, ki je prikazana v enačbi (3.8):

$$\rho c_{\text{ef}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (3.8)$$

Splošna odvisnost efektivne specifične toplote od temperature snovi, ki gre skozi fazno spremembo, je prikazana na sliki 3.14, pri čimer efektivna specifična toplota znatno varira, ko snov preide fazno spremembo, saj vključuje absorpcijo ali sproščanje latentne toplote. Slika 3.14 prikazuje efektivno specifično toploto snovi s histerezo taljenja in strjevanja, ki je značilna za FSS. Histereza oteži numerično modeliranje toplotne odzivnosti FSS, ko se FSS ne ukapljevine ali ne strdi popolnoma med delovnim ciklom. V simulaciji se FSS popolnoma ukapljevine med ciklom akumuliranja toplote in popolnoma strdi med ciklom sproščanja toplote. Zato se uporablja ena funkcija efektivne specifične toplote za taljenje in druga za strjevanje.



Slika 3.14: Efektivna specifična toplota [23].

Efektivna specifična toplota uporabljene FSS Rubitherm RT22HC je bila podana v obliki Gaussove funkcije z enako specifično toploto trdnine in kapljevine, ki znaša 200 kJ/kg v temperaturnem območju od 14 °C in 29 °C. Funkcija efektivne specifične toplote je podana z enačbo (3.9):

$$c_{\text{ef}}(T) = 2 + c_{\text{maks}} \exp \left\{ -\frac{(T_{\text{FSS}} - T_{\text{sr}})^2}{2,1} \right\}, \quad (3.9)$$

kjer je c_m največja porast specifične toplote zaradi latentne toplote, T_m pa je srednja temperatura fazne spremembe. Glede na negotovost efektivne specifične toplote ki znaša $\pm 7,5\%$, sta uporabljeni še dve funkciji efektivne specifične toplote v numerični simulaciji, pri čimer torej definiramo tri parametre funkcije efektivne specifične toplote v modelu.

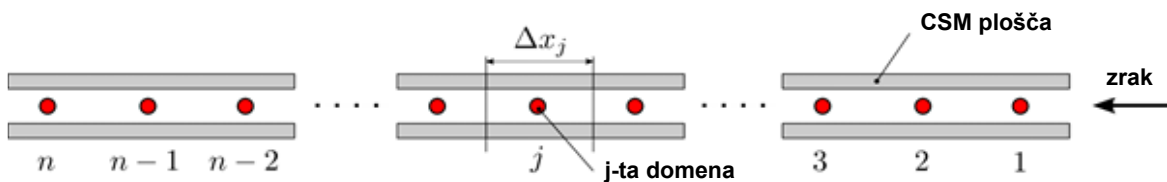
Aplikacija LHT v TRNSYS simulaciji vključuje uporabo dveh različnih časovnih korakov. TRNSYS časovne iteracije izvaja z uporabo globalnega časovnega koraka Δt_{glob} , ki ga določi uporabnik. Vendar pa model LHT numerično aproksimira časovni odvod v enačbi (3.8) preko eksplcitne časovne diskretizacije, ki je pogojno stabilna. Pogojna stabilnost zahteva, da je maksimalni časovni korak za numerično rešitev striktno omejen. Največji časovni korak $\Delta t_{\text{not,maks}}$ je lahko določen iz kriterija stabilnosti, in je po navadi veliko manjši od globalnega časovnega koraka v TRNSYSu. Model LHT zato uporablja notranji časovni korak Δt_{not} , ki je določen po enačbi (3.10):

$$\Delta t_{\text{not}} = \frac{\Delta t_{\text{glob}}}{N_{\text{t,not}}}, \quad (3.10)$$

kjer $N_{\text{t,not}}$ predstavlja število notranjih časovnih iteracij znotraj globalne časovne iteracije, in je zaokrožen k najbližjemu višjemu številu. Izračunamo ga po enačbi (3.11):

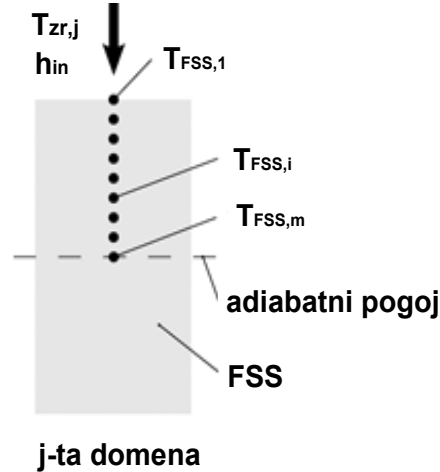
$$N_{\text{t,not}} = \frac{\Delta t_{\text{glob}}}{\Delta t_{\text{not,maks}}}. \quad (3.11)$$

Enodimenzionalen pod-model prenosa toplote služi kot osnovni element za modeliranje LHT. Slika 3.15 predstavlja posamezen zračni kanal (zračno rego) skozi LHT, ki ga tvori par sosednjih CSM plošč. Obravnavan zračni kanal je razdeljen na n razdelkov v vzdolžni smeri, kjer vsako vozlišče (rdeča pika na sliki 3.15) predstavlja posamezen razdelek oziroma računsko domeno.



Slika 3.15: Shematski prikaz zračnih reg z računskimi domenami [24].

Podrobnost računske domene CSM plošče je prikazana na sliki 3.16. Uporabljeno število vozlišč za izračunavanje se lahko določi v modelu skupaj s številom domen, ki morajo biti rešene za vsako ploščo.



Slika 3.16: Shema računske domene CSM plošče [24].

Rešitev toplotnega odziva v posamezni domeni je izvedena z 1D pod-modelom prenosa toplote. Shema interakcije med pod-modelom 1D prenosa toplote, zračnim tokom in zrakom v okolici (pisarna) je prikazan na sliki 3.17. Preračunavanje se začne v prvi domeni, kjer je upoštevano, da je temperatura zraka v vozlišču $T_{zr,1}$ enaka vstopni temperaturi zraka $T_{zr,v}$ (enačba (3.12)).

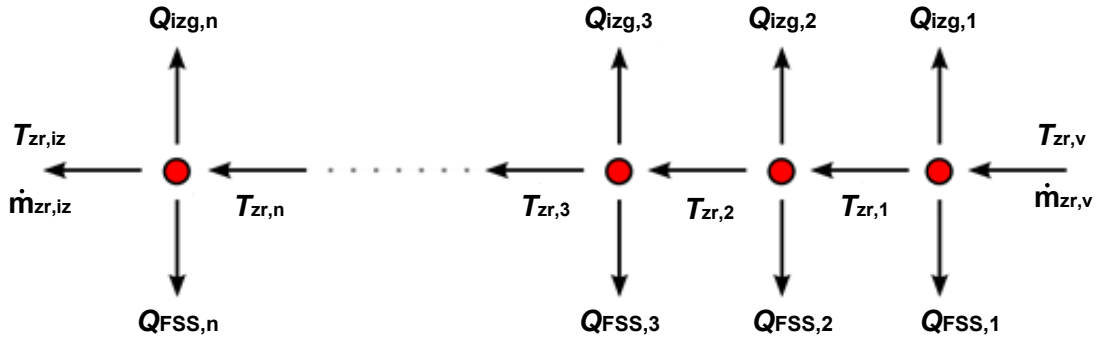
$$T_{zr,1} = T_{zr,v} \quad (3.12)$$

Temperatura zraka v vozlišču $T_{zr,2}$ je izračunana iz vstopne temperature $T_{zr,1}$, toplotnega toka na/z sosednjih CSM plošč $\dot{Q}_{FSS,1}$ in toplotnih izgub v okolico (pisarna) $\dot{Q}_{izg,1}$. Potem se procedura nadaljuje z naslednjo domeno, vse dokler ni rešena zadnja n -ta domena. Toplota $Q_{FSS,j}$ ki se prenaša (akumulira ali sprošča) med FSS v CSM plošči in zračnim tokom v j -ti sekciji v notranji časovni iteraciji (med notranjim časovnim korakom Δt_{not}), je definirana po enačbi (3.13):

$$Q_{FSS,j} = 2l\Delta x_j h_{not}(T_{zr,j} - T_{FSS,j})\Delta t_{not} , \quad (3.13)$$

kjer pomeni:

l	dolžina vodilne stranice CSM plošč;
Δx_j	dolžina j -te domene;
h_{not}	toplotna prestopnost na površini CSM plošč;
$T_{zr,j}$	temperatura zraka;
$T_{FSS,j}$	temperatura površine CSM plošče.



Slika 3.17: Shema procedure preračunavanja [24].

Toplotne izgube j -te domene med notranjim časovnim korakom Δt_{not} so določene po enačbi (3.14):

$$Q_{izg,j} = \Delta x_j O \left(\frac{T_{zr,j} - T_{sob}}{\frac{1}{h_{not}} + \frac{R}{h_{zun}}} \right) \Delta t_{not} , \quad (3.14)$$

kjer pomeni:

O	obseg LHT v ravnini pravokotni na dolžino sekcije;
T_{sob}	temperatura zraka v sobi (pisarna);
R	toplotna upornost stene LHT vključno s toplotno izolacijo;
h_{zun}	je toplotna prestopnost na zunanji površini LHT.

Temperatura zračnega toka v zračnem kanalu v j -ti domeni je posodobljena glede na energijsko bilanco, kot je prikazano v enačbi (3.15):

$$T_{zr,j} = T_{zr,j-1} - \frac{Q_{izg,j-1} + Q_{FSS,j-1}}{\dot{m}_{zr} c_p \Delta t_{not}} , \quad (3.15)$$

kjer pomeni:

$\dot{m}_{zr}$	masni tok zraka skozi LHT;
c_p	specifična toplota zraka pri konstantnem tlaku.

Kot za prvo domeno $j=1$ v enačbi (3.15) velja predpostavka, da je temperatura zraka v prvi domeni $T_{zr,1}$ enaka vstopni temperaturi zraka $T_{zr,v}$.

3.2.1.4. Parametri, začetni in robni pogoji

V tip komponente LHT je potrebno vnesti vrsto parametrov, ki popisujejo obravnavani LHT, pri čimer gre za dimenzijske in modelirne parametre ter snovne in fizikalne veličine FSS, ki predstavljajo robne in začetne pogoje za Type256. Omenjeni parametri so prikazani v

preglednici 2 in si dosledno sledijo kot pri vnosu v programu TRNSYS. Vrednosti parametrov, vhodnih in izhodnih podatkov, ki so prikazane v preglednici 2, smo uporabili v simulaciji, pri čimer so vrednosti konstantne. Vhodne in izhodne podatke pa vstavimo oziroma dobimo izračunane v obliki časovne vrste, saj gre za simulacijo dinamičnega sistema.

Preglednica 2: Parametri, vhodni in izhodni podatki modela LHT.

	Parameter	Vrednost	Enota
1	začetna temperatura FSS	23	°C
2	toplotna prevodnost FSS	0,2	W/mK
3	gostota FSS	730	kg/m ³
4	srednja temperatura fazne spremembe FSS	21,5	°C
5	1. parameter funkcije efektivne specifične toplote	2000	-
6	2. parameter funkcije efektivne specifične toplote	136000	-
7	3. parameter funkcije efektivne specifične toplote	0,5	-
8	temperatura zraka okolice (pisarna) v kateri je LHT	23	°C
9	debelina CSM plošč	0,015	m
10	število računskih vozlišč v središču CSM plošče	10	-
11	celotna dolžina CSM plošč v smeri zračnega toka	0,6	m
12	obseg prečnega prereza LHT	1,68	m
13	število domen v zračni regi na katere se deli celotna dolžina plošč v preračunu	20	-
14	toplotna upornost izolacije LHT	0,5	m ² K/W
15	število CSM plošč v eni vrsti	15	-
16	toplotna prestopnost na notranji strani LHT	10	W/m ² K
17	toplotna prestopnost na zunanji strani LHT	10	W/m ² K
18	specifična toplota pri konstantnem tlaku	1013	J/kgK
19	dolžina roba CSM plošče pravokotno na smer zračnega toka	0,45	m
Vhodni podatki (časovna vrsta)			
1	masni tok zraka (konstanten)	0,012	kg/s
2	temperatura na vstopu v LHT	$T_{v,i}$	°C
Izhodni podatki (časovna vrsta)			
1	izstopna temperatura zraka	$T_{iz,i}$	°C
2	toplotne izgube LHT	$Q_{izg,i}$	W
3	akumulirana in sproščena toplota CSM plošč	$Q_{FSS,i}$	W
4	masni tok zraka (konstanten)	0,012	kg/s

3.2.2. Računalniški model toplozračnega sprejemnika sončne energije

Računalniški model za SSE smo uporabili iz standardne TRNSYSove knjižnice, in sicer model Type 1b, ki je namenjen za ravne SSE. Tako je opis matematičnega modela, ki je opisan v celotnem podpoglavju 3.2.2, povzet po TRNSYSovem priročniku [28] z dodatno razlago povzeto iz dela Kalogiroua [2].

3.2.2.1. Splošen opis modela

Model Type 1b modelira kvadratično enačbo učinkovitosti, ki je posplošena oblika Hottel-Whillierjeve enačbe. Ta komponenta modelira toplotno karakteristiko SSE z uporabo teorije. Toplotna karakteristika celotnega niza SSE je odvisna od števila modulov v seriji in karakteristike posameznega modula, pri čimer pa imamo v obravnavanem sistemu samo en modul. V modelu morajo biti vneseni rezultati standardnih testov učinkovitosti η_{SSE} glede na reducirano temperaturno razliko T_{sr}^* (enačba (3.16)), ki predstavlja razmerje med temperaturno razliko ΔT (razlika med srednjo temperaturo tekočine T_{sr} in temperaturo zraka okolice T_{ok}) in sončnim sevanjem I_T . Temperatura tekočine je glede na evropske standarde o SSE povprečna temperatura T_{sr} , pri čimer model predpostavlja, da je lahko funkcija učinkovitosti glede na reducirano temperaturno razliko modelirana kot kvadratična enačba.

$$T_{sr}^* = \frac{T_{sr} - T_{ok}}{I_T} \quad (3.16)$$

V kvadratični enačbi so opravljene tudi korekcije naklona funkcije, prestrezanja sončnih žarkov, pretokov različnih od tistih pri testnih pogojih ipd. V tem modelu je pet različnih možnosti upoštevanja ne normalnega vpada sončnega obsevanja, pri čimer je uporabljena kvadratična funkcija drugega reda za preračun spreminjanja kota vpadnih sončnih žarkov.

3.2.2.2. Matematični opis modela

Splošna enačba učinkovitost SSE je dobljena iz Hottel-Whillierjevega izraza, ki je predstavljen v enačbi (3.17). Učinkovitost SSE je razmerje med koristnim toplotnim tokom SSE in globalnim sončnim sevanjem na nagnjeno površino SSE:

$$\eta_{SSE} = \frac{\dot{Q}_k}{A_{SSE} I_T} = \frac{\dot{m} c_p (T_{iz} - T_v)}{A_{SSE} I_T}, \quad (3.17)$$

kjer pomeni:

T_v	vstopna temperatura zraka v SSE;
T_{iz}	izstopna temperatura zraka iz SSE;
η_{SSE}	toplotna učinkovitost SSE;
$\dot{Q}_k$	koristni toplotni tok iz SSE;
A_{SSE}	bruto površina SSE (naprave);

I_T globalno sončno sevanje na nagnjeno površino SSE.

Ker je zaželeno izraziti celotno pridobljeno koristno energijo iz SSE z vstopno temperaturo v SSE, je potrebno uporabiti faktor učinkovitosti prenosa toplote F_R . Faktor učinkovitosti prenosa toplote (enačba (3.18)) predstavlja razmerje dejanske pridobljene koristne energije, ki bi se pojavila, če bi bila temperatura površine absorberja enaka lokalni temperaturi tekočine, ki teče skozi sprejemnik:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_{iz} - T_v)}{A_{SSE}[I_T(\tau\alpha)_n - U_{SSE}(T_v - T_{ok})]} , \quad (3.18)$$

kjer pomeni:

U_{SSE} celotna toplotna prehodnost SSE;
 τ_n kratkovalovna transmisivnost pokrova SSE pri normalnem vpadu sončnega obsevanja;
 α_n kratkovalovna absorptivnost absorberja pri normalnem vpadu sončnega obsevanja.

V enačbi (3.18) se zamenja števec s koristnim toplotnim tokom $\dot{Q}_k$ in se dobi novo obliko koristnega toplotnega toka iz SSE, ki je prikazan v enačbi (3.19):

$$\dot{Q}_k = A_{SSE}F_R[I_T(\tau\alpha)_n - U_{SSE}(T_v - T_{ok})] . \quad (3.19)$$

Toplotna učinkovitost SSE je dobljena z deljenjem koristnega toplotnega toka $\dot{Q}_k$ s sončnim sevanjem na površino SSE ($A_{SSE}I_T$), kar je prikazano v enačbi (3.20).

$$\eta_{SSE} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_{SSE} \frac{T_v - T_{ok}}{I_T} \quad (3.20)$$

V realnosti koeficient celotne toplotne prehodnosti SSE U_{SSE} ni konstanten, ampak je funkcija vstopne in izstopne temperature SSE, pri čimer upoštevamo linearno odvisnost celotne toplotne prehodnosti glede na temperaturno razliko, ki je prikazana v enačbi (3.21):

$$F_R U_{SSE} = b_1 + b_2(T_v - T_{ok}) . \quad (3.21)$$

Če vstavimo enačbo (3.21) v (3.19) in delimo s sončnim sevanjem na površino SSE, dobimo končno obliko toplotne učinkovitosti SSE, ki je prikazana v enačbi (3.22):

$$\eta_{SSE} = b_0 - b_1 \frac{\Delta T}{I_T} - b_2 \frac{\Delta T^2}{I_T} , \quad (3.22)$$

kjer pomeni:

b_0 optična učinkovitost;
 b_1 koeficient prvega reda funkcije učinkovitosti SSE;
 b_2 koeficient drugega reda funkcije učinkovitosti SSE.

Torej b_0 predstavlja maksimalno učinkovitost SSE, in je odvisna od optičnih lastnosti zasteklitve in absorberja, zaradi česar jo imenujemo optična učinkovitost (enačba (3.23)).

$$b_0 = F_R(\tau\alpha)_n \quad (3.23)$$

Torej enačba (3.22) je splošna enačba toplotne učinkovitosti SSE, ki se uporablja v TRNSYSovem modelu Type 1b, kjer so b_0 , b_1 in b_2 koeficienti, ki jih je potrebno določiti kot vhodni podatek v modelu. Koeficient b_1 je naklon krivulje učinkovitosti, in predstavlja toplotne izgube SSE, ter je negativen koeficient prvega reda v enačbi za učinkovitost SSE. Koeficient b_2 pa je prav tako negativen koeficient vendar drugega reda v enačbi za učinkovitost SSE.

Temperaturna sprememba v enačbi (3.22) se nanaša na povprečno temperaturo med vstopom in izstopom SSE, ter predstavlja razliko med povprečno temperaturo tekočine T_{sr} (v našem primeru zraka) v SSE in temperaturo zraka okolice T_{ok} , kot je prikazano v enačbi (3.24). Omenjena temperaturna sprememba se uporablja pri testih po evropskih standardih.

$$\Delta T = T_{sr} - T_{ok} \quad (3.24)$$

Vrednosti parametrov so bile dobljene iz testnih meritev SSE na inštitutu Fraunhofer [17], medtem ko sta bila koeficienta b_1 in b_2 izračunana s pomočjo enačb v obravnavanem poglavju.

3.2.2.3. Parametri, začetni in robni pogoji

V obravnavanem poglavju so v preglednicah 3,4,5 predstavljeni vhodni podatki, parametri SSE, in izračunani izhodni podatki, ter prikazane vrednosti, ki smo jih uporabili za simulacijo v programu TRNSYS. V preglednici 3 so prikazani vhodni podatki, ki jih vstavimo v obliki časovne vrste, le masni tok in kot naklona SSE sta v simulaciji konstantna.

Preglednica 3: Vhodni podatki modela SSE.

	Vhodni podatki (časovna vrsta)		
1	vstopna temperatura	$T_{v,i}$	°C
2	vstopni masni tok (konstanten)	0,012	kg/s
3	temperatura okolice	$T_{ok,i}$	°C
4	vpadno sončno sevanje (direktno in difuzno) na površino SSE	$I_{glob,i}$	J/hm ²
5	globalno sončno sevanje na horizontalno površino	$I_{H, glob, i}$	J/hm ²
6	difuzno sevanje na horizontalno površino	$I_{H, dif, i}$	J/hm ²
7	odbojnost ali albedo okolice (konstanten)	r_{ok}	-
8	vpadni kot sončnega obsevanja	θ	°
9	kot naklona SSE (konstanten)	90	°

V preglednici 4 so prikazane vrednosti parametrov modela SSE, ki predstavljajo dejanske vrednosti zračnega SSE.

Preglednica 4: Parametri modela SSE.

	Parametri		
1	število v seriji po vrsti	1	-
2	površina SSE	1,638	m ²
3	specifična toplota zraka	1013	J/kgK
4	način upoštevanje učinkovitosti SSE	2	-
5	masni tok pri testnih pogojih	130	kg/hm ²
6	optična (največja) učinkovitost	0,8	-
7	koeficient prvega reda funkcije učinkovitosti SSE	10,2	W/m ² K
8	koeficient drugega reda funkcije učinkovitosti SSE	-0,0041	W/m ² K ²
9	optični način modifikacije ne-normalnega vpadnega kota	2	-
10	faktor prvega reda modifikacije ne-normalnega vpadnega kota	0,2	-
11	faktor drugega reda modifikacije ne-normalnega vpadnega kota	0	-

V preglednici 5 pa so prikazani izhodni podatki, ki predstavljajo izračunane vrednosti dobljene iz simulacije, in so v obliki časovne vrste.

Preglednica 5: Izhodni podatki modela SSE.

	Izhodni podatki (časovna vrsta)		
1	izhodna temperatura zraka	$T_{iz,i}$	°C
2	masni pretok zraka	0,012	kg/s
3	koristna energija	Q	J

3.2.3. Validacija računalniških modelov

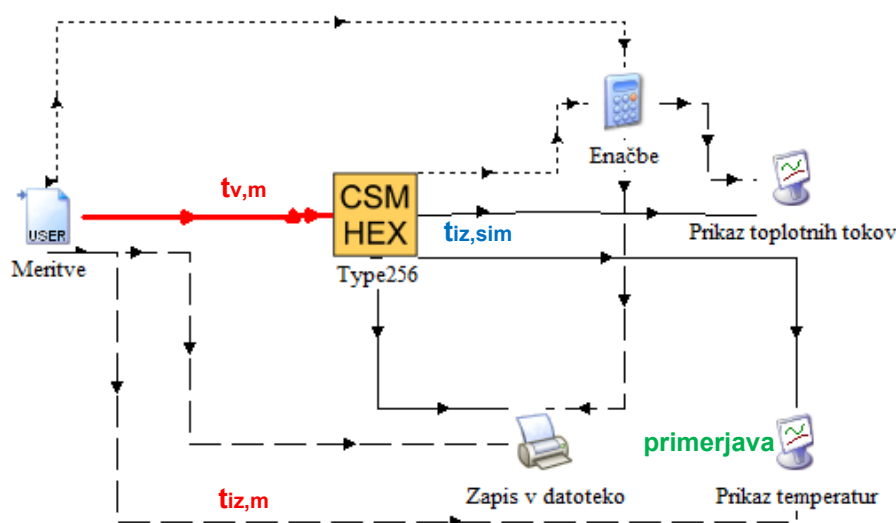
Validacija je proces določanja stopnje, do katere model prikazuje točen prikaz realnega sveta iz perspektive namena uporabe modela, in je proces, ki ovrednoti negotovost. Omenjena definicija je splošno sprejeta definicija, ki jo navajajo v delu Versteeg in sodelavci [29]. Proces validacije torej vključuje proces ovrednotenja vhodnih negotovosti in negotovosti fizikalnega modela. Oberkampff in sodelavci [30] navajajo, da kvantitativna ocena negotovosti fizikalnega modela zahteva primerjavo rezultatov simulacije z visoko-kakovostnimi eksperimentalnimi rezultati. Prav tako dodajajo, da je smiselna validacija mogoča samo ob prisotnosti dobrih kvantitativnih ocen numeričnih napak, vstopnih

negotovosti in negotovosti eksperimentalnih podatkov uporabljenih za primerjavo. Torej ultimativni test numeričnega modela je v primerjavi med rezultati simulacije obravnavanega modela in eksperimentalnimi podatki. Vendar pa način po katerem bi omenjena primerjava bila izvedena, je še vedno bolj ali manj stvar razprav. Najpogostejši način poročanja izida procesa validacije je izris ciljne veličine, ki jo modeliramo in eksperimentalnih podatkov iste veličine na istem grafu. Če je razlika med izračunanimi in eksperimentalnimi vrednostmi dovolj majhna, potem numerični model velja za validiranega [29].

Validacija računalniškega modela Type256, ki predstavlja LHT, je predstavljena v podpoglavju 3.2.3.1, validacija računalniškega modela Type 1b, ki predstavlja zračni SSE, pa je predstavljena v podpoglavju 3.2.3.2. Kot smo navedli na koncu prvega odstavka tega poglavja, smo validacijo posameznega računalniškega modela izvedli glede na dobljene meritve eksperimentalnega sistema, pri čimer smo uporabili merjeno vstopno temperaturo zraka v LHT oziroma SSE za vhodni podatek v simulaciji. Izstopno merjeno temperaturo zraka iz LHT oziroma SSE pa smo uporabili za primerjavo s simulirano izstopno temperaturo. Torej primerjava med izstopno temperaturo zraka dobljeno z meritvami, in izstopno temperaturo zraka dobljeno s simulacijo, je predstavljala validacijo modelov. V obeh primerih validacije smo uporabili masni tok zraka dobljen z meritvami hitrosti kot vhodni podatek za simulacijo. Predpostavili smo, da je masni tok zraka konstanten skozi celoten čas obratovanja, pri čimer je znašal 0,012 kg/s.

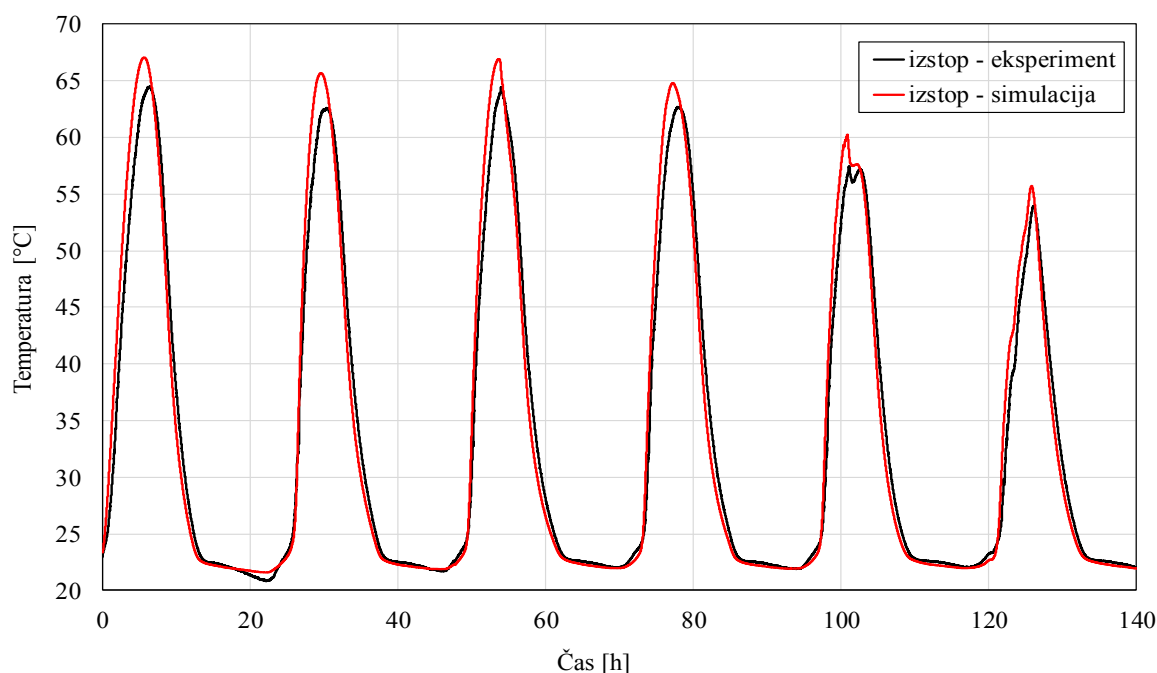
3.2.3.1. Validacija modela latentnega hranilnika toplote

Numerični model LHT za programski paket TRNSYS (poglavje 3.2.1) je skupina raziskovalcev iz BUT razvila glede na eksperimentalni sistem, ki smo ga opisali v poglavju 3.1. Na sliki 3.18 je prikazana shema validacije modela LHT (Type256) v programu TRNSYS za simulacijo izstopne temperature zraka in primerjave z merjeno.



Slika 3.18: Shema validacije modela LHT v programu TRNSYS.

Časovni korak simulacije je znašal 30s, medtem ko je korak meritev znašal 1 minuto, kar pomeni, da je TRNSYS podatke meritev interpoliral. Primerjava simulirane izstopne temperature zraka z merjeno temperaturo zraka za šest dni, je prikazana na sliki 3.19, kjer lahko vizualno ocenimo, da je ujemanje med eksperimentalnimi podatki in rezultati simulacije zadovoljivo. Večja odstopanja se pojavijo le ob konicah krivulj, med tem ko je njun trend enak. Iz vizualnega vidika lahko torej ocenimo, da je validacija računalniškega modela LHT uspešna.



Slika 3.19: Primerjava simulirane izstopne temperature z merjeno iz LHT.

Kljub vizualni oceni korektnosti računalniškega modela smo izračunali še relativni pogrešek e_r , ki predstavlja povprečno odstopanje simulirane vrednosti od dejanske merjene vrednosti glede na dejansko merjeno vrednost, in je prikazan v enačbi (3.25):

$$e_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_{a,i}}{T_{mer,i}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{sim,i} - T_{mer,i}}{T_{mer,i}} \right| \cdot 100\% , \quad (3.25)$$

kjer pomeni:

e_r	relativni pogrešek;
e_a	absolutni pogrešek;
T_{mer}	merjena temperatura;
T_{sim}	simulirana (izračunana) temperatura;
n	število podatkov (meritev oziroma izračunov).

V preglednici 6 so prikazani pogreški za posamezen dan obravnavan v simulaciji, kjer absolutni pogrešek e_a predstavlja absolutno razliko med izračunano in izmerjeno vrednostjo. Relativni pogrešek je največji prvi dan simulacije in znaša 5,3 % , najmanjši pa drugi dan in

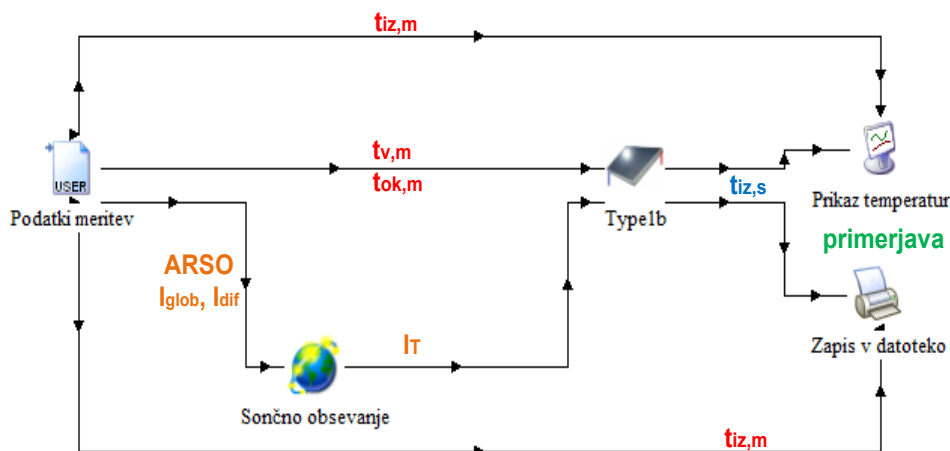
znaša 3,6 %. Absolutni pogrešek celotne simulacije znaša 1,63 K, pri tem pa je relativni pogrešek 4,1 %. Iz prikazanih pogreškov lahko z gotovostjo trdimo, da model uspešno odraža realno stanje obravnavanega sistema, in ga lahko uporabimo za simulacijo, ki je predmet diskusije obravnavanega dela.

Preglednica 6: Absolutni in relativni pogrešek simulacije modela LHT.

Dan	e_a [K]	e_r [%]
1	2,08	5,3
2	1,52	3,6
3	1,68	4,1
4	1,68	4,2
5	1,45	3,8
6	1,34	3,8
Povprečje	1,63	4,1

3.2.3.2. Validacija modela toplozračnega sončnega sprejemnika energije

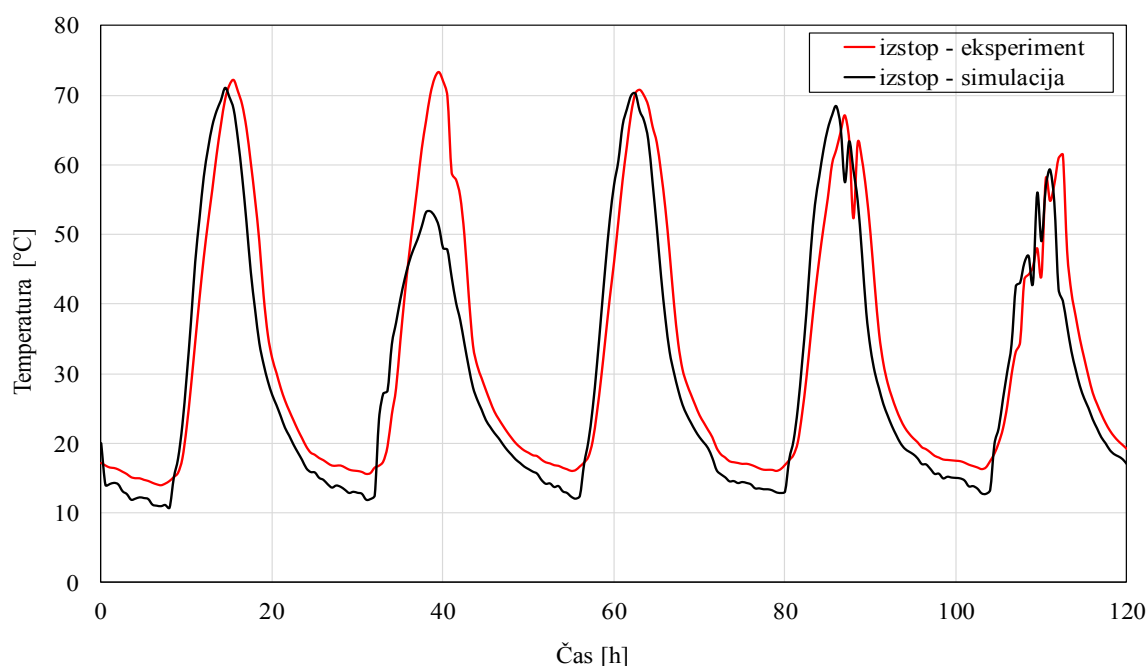
Na sliki 3.20 je prikazana shema validacije računalniškega modela SSE (Type1b) v programskem orodju TRNSYS. Poleg že omenjenih vhodnih podatkov v drugem odstavku poglavja 3.2.3 smo kot vhodni podatek vnesli še polurne podatke meritev o globalnem in difuznem sončnem sevanju, ki smo jih za obravnavani čas meritev dobili iz arhiva podatkov Agencije Republike Slovenije za Okolje (ARSO) [31] iz meritev samodejne vremenske postaje za Bežigradom v Ljubljani. Meritve temperatur ZRAKA z enominutnim časovnim korakom smo povprečili tako, da smo dobili povprečene polurne temperaturne vrednosti, zato da je bil časovni korak med temperaturami zraka in sevanjem usklajen, pri čimer pa je časovni korak simulacije prav tako znašal pol ure.



Slika 3.20: Shema validacije modela SSE v programu TRNSYS.

Podatki meritev o sončnem sevanju so veljali za horizontalno površino, pri čimer pa smo potrebovali podatke o sončnem sevanju na površino SSE pod kotom 90° in azimutom 17° . Da bi dobili ustrezne podatke o sončnem sevanju na obravnavano površino SSE, smo uporabili TRNSYSov model (Type16i) za preračunavanje sončnega sevanja, ki je s podatkov meritev o globalnem in difuznem sončnem sevanju na horizontalno površino preračunal vrednosti vseh komponent vpadnega sončnega sevanja (direktno in difuzno sončno sevanje) na obravnavano površino SSE. Albedo okolice smo glede na to da SSE obdaja stavba izbrali 0,2.

Na sliki 3.21 je prikazana primerjava simulirane izstopne temperature zraka z merjeno temperaturo zraka iz SSE za pet dni, kjer vidimo, da se pojavi veliko odstopanje v drugem dnevu simulacije. Odstopanje se pojavi ob konicah primerjanih krivulj, in znaša približno 20 K, kar je preveliko odstopanje. Vendar pa je v preostalih dneh odstopanje simulacije in eksperimentalnih podatkov zadovoljivo in trend poteka krivulj enak.



Slika 3.21: Primerjava simulirane izstopne temperature z merjeno iz SSE.

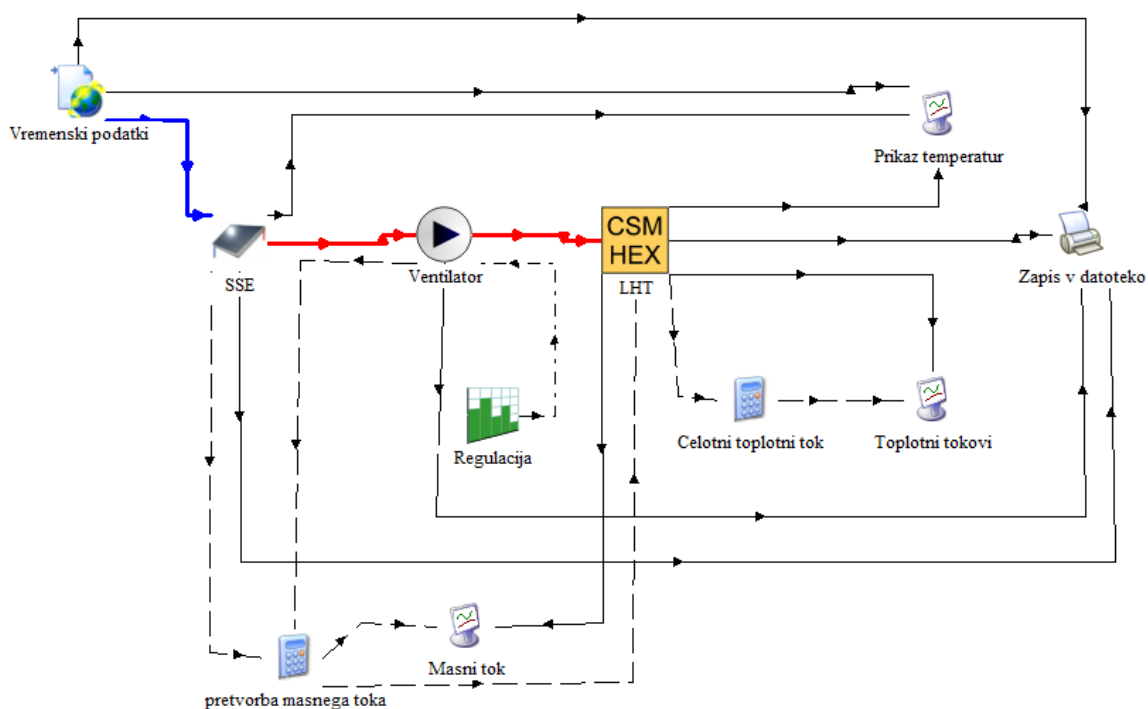
Pogreški izračunani po enačbi (3.25) (poglavje 3.2.3.1) so predstavljeni v preglednici 7, kjer vidimo, da je povprečen absolutni pogrešek največji v drugem dnevu, kar smo opazili že vizualno iz grafa na sliki 3.21, in znaša 7,47 K. Iz tega sledi, da je isti dan tudi največji relativni pogrešek (21,5%), med tem ko je najmanjši relativni pogrešek peti dan, in znaša 15,3%. Relativni pogrešek celotne simulacije znaša 17,9 %, kar predstavlja veliko odstopanje, do katerega pride zaradi zamaknjenega trenda krivulj, ki ju primerjamo (slika 3.21). Zato v primeru validacije modela SSE (Type1b) glede na vizualno oceno lahko trdimo, da je validacija modela uspešna, vendar pa glede na pogreške le to lahko trdimo z veliko večjo negotovostjo kot v primeru modela LHT.

Preglednica 7: Absolutni in relativni pogrešek simulacije modela SSE.

Dan	e_a [K]	e_r [%]
1	5,58	18,0%
2	7,47	21,5%
3	5,27	16,6%
4	5,65	17,8%
5	4,53	15,3%
Povprečje	5,70	17,9%

3.2.4. Simulacija delovanja eksperimentalnega sistema

Ob izvedeni validaciji računalniških modelov LHT in SSE, ki smo ju predstavili v poglavjih 3.2.3.1 in 3.2.3.2, smo lahko omenjena modela umestili v shemo vizualnega vmesnika programskega orodja TRNSYS, ki predstavlja realen eksperimentalni sistem, in je prikazana na sliki 3.22. Na omenjeni shemi (slika 3.22) je umeščen še ventilator z regulacijo, in model vhodnih vremenskih podatkov (Type15-6) , ki omogoča branje vremenskih podatkov za izbrano lokacijo, generiranih s pomočjo orodja Meteonorm (Verzija 5.0.13) [32] pod licenco Metotesta [33].



Slika 3.22: Shema eksperimentalnega sistema v TRNSYSu.

Meteorolog iz dejanskih merjenih mesečnih vrednosti vremenskih postaj iz več kot 1000 lokacij v več kot 150 državah po vsem svetu izračuna urne vrednosti vseh parametrov vremenskih podatkov z uporabo stohastičnega modela. Dobljena časovna vrsta vrednosti

vremenskih podatkov se odraža v standardnem meteorološkem letu, ki se ga uporablja za dimenzioniranje sistemov. Torej model Type15-6 bere podatke generirane z Meteoronom, in interpolira vrednosti (vključno s sončnim obsevanjem na nagnjeno površino) v časovnih korakih, ki so manjši od ene ure, ter omogoča, da vrednosti služijo kot vhodni podatek ostalim modelom v programskem orodju TRNSYS [32], [34].

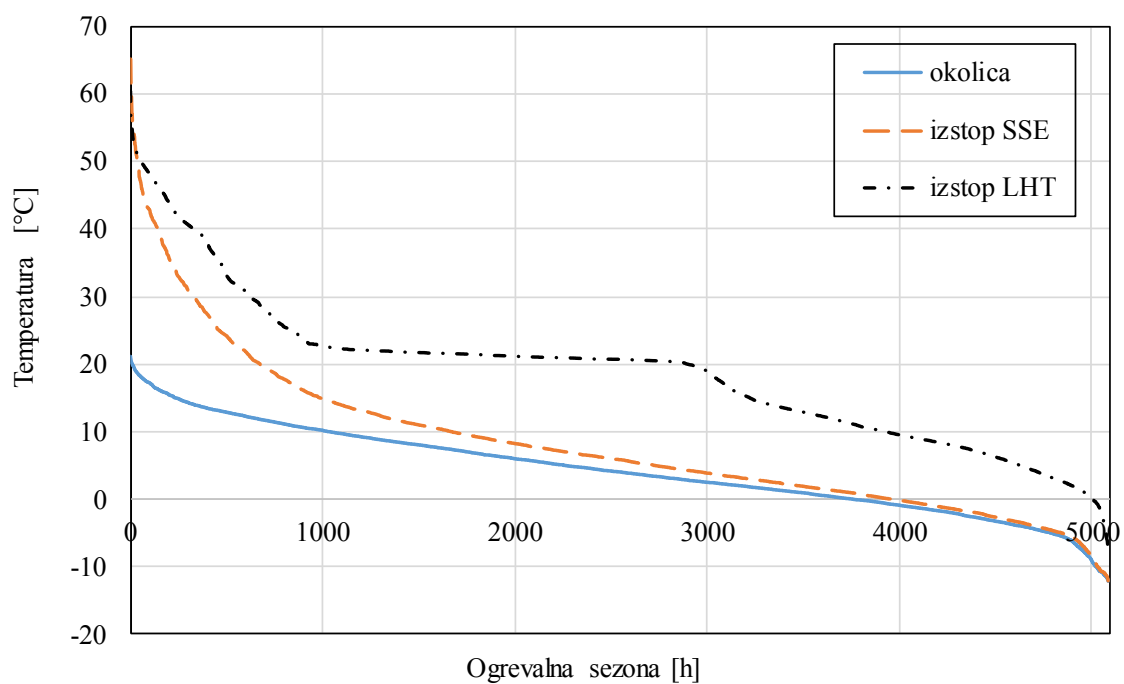
V naslednjem koraku smo izvedli simulacijo obravnavanega eksperimentalnega sistema za ogrevalno sezono v obdobju od oktobra do aprila (212 dni) z vremenskimi podatki za Ljubljano, pridobljenimi z uporabo Meteoroma (opisano v drugem odstavku tega poglavja). Model za branje podatkov datoteke Meteoroma (Type15-6) omogoča pripravo vhodnih podatkov za model SSE, ki so predstavljeni v preglednici 3 poglavja 3.2.2.3. Simulacijo smo izvedli za namen prezračevanja pisarne na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani od 8ih do 16ih za vse obravnavane dni v obdobju od 1.10. do 30.4. z enournim simulacijskim korakom. Parametri, začetni in robni pogoji za modela LHT in SSE so predstavljeni v poglavjih 3.2.1.4 in 3.2.2.3.

Cilj simulacije je dobiti izstopne temperature zraka iz SSE in LHT, ki predstavljajo temperature vtoka zraka v pisarno, kar nam omogoča izdelavo energijskih bilanc za prezračevanje pisarne in primerjavo sistema prezračevanja z LHT in brez LHT.

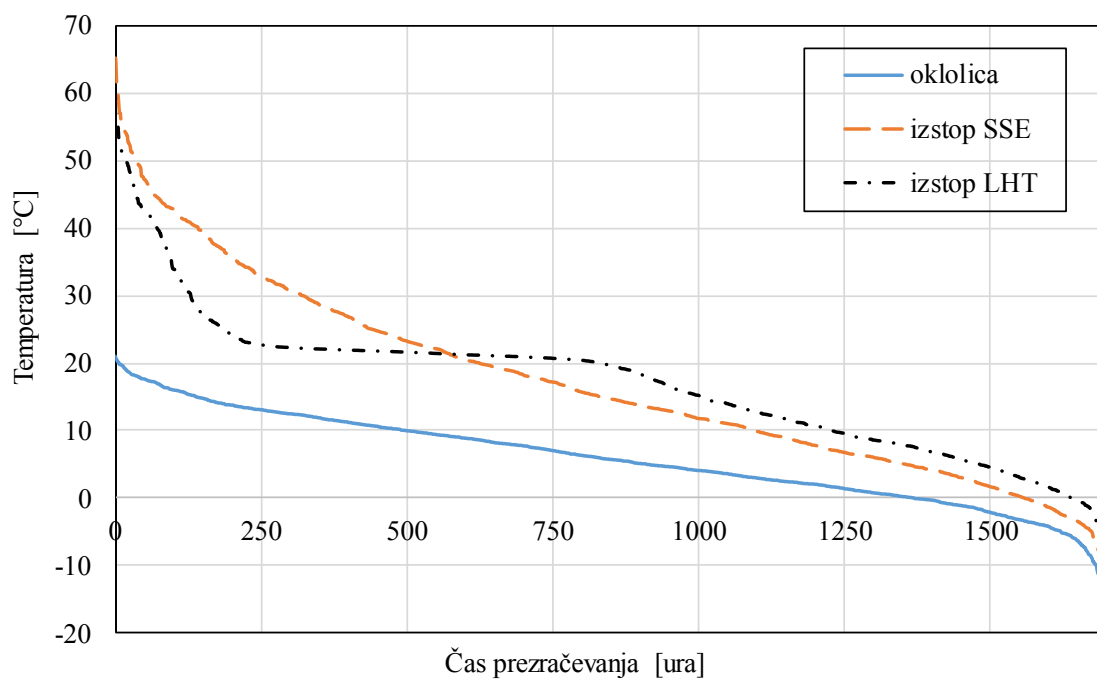
3.2.5. Rezultati simulacije in preračun

Rezultate simulacije smo iz programa TRNSYS izvozili v programsko orodje Excel, kjer smo jih nadalje analiziral. Rezultati simulacije izstopnih temperatur zraka v obdobju ogrevanja so prikazani v urejenem diagramu na sliki 3.23, kjer je v obzir vzet celotni čas obravnavanega obdobja. Torej je na sliki 3.23 prikazan temperaturni nivo na bazi celotnega dne skozi ogrevalno sezono, kjer lahko vidimo, da je temperaturni nivo LHT višji kot temperaturni nivo na izstopu SSE. Površina med krivuljama izstopnih temperatur LHT in SSE namiguje na potencial LHT.

Na sliki 3.24 je prikazan urejen diagram izstopnih temperatur zraka v času, ko prezračujemo pisarno (od 8ih do 16ih). Temperature na omenjeni sliki prikazujejo primerjavo med različnimi sistemi naravnega prezračevanja in sicer prezračevanjem brez dodatnih sistemov (v pisarno vpihujemo neposredno zrak iz okolice), prezračevanjem z uporabo SSE ter prezračevanjem z uporabo SSE in LHT. V nadaljevanju bomo delali primerjavo glede na prezračevanje s sistemom SSE, ki vsebuje LHT in sistemom SSE brez LHT, zato se bomo sklicevali na sistem z ali brez LHT. Iz slike 3.24 vidimo, da sistem z LHT poveča povprečno temperaturo zraka za prezračevanje pisarne. Razlika med krivuljami predstavlja akumulirano ali sproščeno toploto LHT. Kjer je krivulja SSE višje od krivulje LHT, se bo toplota akumulirala v LHT, in kjer je krivulja SSE nižje od krivulje LHT, se bo toplota iz LHT sprostila. Izstopna temperatura iz LHT z vrednostjo okoli 20 °C se pojavi v 36 % glede na celotni čas prezračevanja, kar prikazuje vpliv LHT na notranje toplotno ugodje.



Slika 3.23: Urejen diagram temperatur zraka za ogrevalno sezono.



Slika 3.24: Urejen diagram temperatur zraka v času prezračevanja.

Iz dobljenih povprečnih vrednosti temperatur zraka simulacije smo izračunali energijske bilance obravnavanega prezračevalnega sistema na mesečni ravni. Sprva smo izračunali prezračevalne toplotne izgube Q_{prez} z enačbo (3.26):

$$Q_{\text{prez}} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{\text{sob}} - T_{\text{ok},i}) \Delta t_i, \quad (3.26)$$

kjer konstantna temperatura zraka v pisarni T_{sob} znaša 20°C, temperatura zunanjega zraka $T_{\text{ok},i}$ je pridobljena iz dobljenih rezultatov simulacije v časovnem koraku simulacije Δt_i , masni tok vtoka zraka $\dot{m}$ v prostor, pa je konstanten, in smo ga definirali z meritvami. V naslednjem koraku smo izračunali celotno pridobljeno toploto sistema Q_{cel} z enačbo (3.2):

$$Q_{\text{cel}} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{\text{iz},i} - T_{\text{ok},i}) \Delta t_i \quad (3.27)$$

kjer $T_{\text{iz},i}$ predstavlja izstopno temperaturo zraka iz SSE ali iz LHT. Razlika med celotno pridobljeno toploto iz sistema brez LHT in celotno pridobljeno toploto iz sistema z LHT predstavlja akumulirano toploto Q_{aku} (če je razlika pozitivna) ali sproščeno toploto Q_{spr} (če je razlika negativna). Akumulirano in sproščeno toploto lahko zapišemo tudi z energijsko bilanco toka zraka skozi prezračevalni sistem z enačbama (3.28) in (3.29):

$$Q_{\text{aku}} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{\text{iz,SSE},i} - T_{\text{iz,LHT},i}) \Delta t_i \quad (3.28)$$

$$Q_{\text{spr}} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{\text{iz,LHT},i} - T_{\text{iz,SSE},i}) \Delta t_i \quad (3.29)$$

kjer pomeni:

$T_{\text{iz,SSE},i}$	izstopna temperatura zraka iz SSE;
$T_{\text{iz,LHT},i}$	izstopna temperatura zraka iz LHT.

Torej če je izstopna temperatura zraka iz SSE $T_{\text{iz,SSE},i}$ večja od izstopne temperature zraka iz LHT $T_{\text{iz,LHT},i}$, potem se toplota akumulira v LHT (enačba (3.28)). V nasprotnem primeru ko je izstopna temperatura zraka iz SSE manjša od izstopne temperature zraka iz LHT, se toplota iz LHT sprošča (enačba (3.29)).

Dovedena temperatura zraka v prostor je bistvenega pomena za vzdrževanje toplotnega ugodja. Zato če je temperatura dovedenega zraka v prostor $T_{\text{iz},i}$ višja kot projektna temperatura zraka prostora T_{sob} (20 °C), se pojavi toplotni presežek Q_{pr} (enačba (3.30)), ki ga zavržemo. Pri tem smo torej v analizi presežke toplote Q_{pr} odšteli od celotne pridobljene toplote Q_{cel} , in dobili koristno toploto Q_{k} (enačba (3.31)) namenjeno prezračevanju prostora in vzdrževanju toplotnega ugodja. Torej v primeru presežka toplote ki ga zavržemo, je koristna toplota pridobljena iz sistema enaka prezračevalnim toplotnim izgubam.

$$Q_{pr} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{iz,i} - T_{sob}) \Delta t_i , \quad (3.30)$$

$$Q_k = Q_{cel} - Q_{pr} . \quad (3.31)$$

Če je temperatura dovedenega zraka v prostor $T_{iz,i}$ manjša od sobne temperature zraka T_{sob} , potem je celotna pridobljena toplota Q_{cel} manjša od prezračevalnih toplotnih izgub Q_{prez} , pri čimer se pojavi primanjkljaj toplote Q_{dog} , ki ga izračunamo po enačbi (3.32). V tem primeru je koristna toplota Q_k pridobljena iz sistema enaka celotni pridobljeni toploti Q_{cel} sistema (enačba (3.2)), pri tem pa je potrebno dodatno dogrevanje zraka s pomožnim virom energije.

$$Q_{dog} = \sum_{i=1}^n \dot{m} c_p (T_{sob} - T_{iz,i}) \Delta t_i \quad (3.32)$$

Sledil je izračun učinkovitosti pokritja toplotni izgub z enačbo (3.33), ki predstavlja razmerje med mesečnimi vrednostmi koristne toplote in prezračevalnimi toplotnimi izgubami, s čimer ovrednotimo delež pokritosti prezračevalnih toplotnih izgub na mesečni ravni.

$$\varepsilon = \frac{Q_k}{Q_{prez}} \quad (3.33)$$

Izračunali smo tudi učinkovitost delovanja prezračevalnega sistema (SSE+LHT) glede na koristno pridobljeno energijo z enačbo (3.34), ki predstavlja razmerje med mesečnimi vrednostmi koristne toplote Q_k pridobljene iz sistema prezračevanja (SSE+LHT) in vloženo električno energijo za pogon ventilatorja Q_{el} .

$$\xi_{prez} = \frac{Q_k}{Q_{el}} \quad (3.34)$$

Na koncu pa smo izračunali še učinkovitost delovanja celotnega sistema z enačbo (3.35), ki predstavlja razmerje med mesečnimi vrednostmi potrebne toplote za pokritje prezračevalnih toplotnih izgub Q_{prez} in celotne vložene energije v sistem. Vložena energija pa je vsota električne energije za pogon ventilatorja Q_{el} in pomožne energije za dogrevanje zraka Q_{dog} , ko s prezračevalnim sistemom ne pokrijemo celotnih prezračevalnih toplotnih izgub.

$$\xi_{cel} = \frac{Q_{prez}}{Q_{el} + Q_{dog}} \quad (3.35)$$

Izračunali smo tudi delež časa, ko prezračevalne toplotne izgube v celoti pokrивamo. Torej koliko časa glede na celotni čas prezračevanja pokrивamo prezračevalne toplotne izgube s toploto pridobljeno iz sistema prezračevanja. Pri tem pa smo izračunali še delež časa, ko je izstopna temperatura zraka iz sistema prezračevanja manjša od 15°C.

3.2.6. Rezultati preračuna in diskusija

V preglednici 8 so prikazane vrednosti akumulirane in sproščene toplote za posamezen mesec v ogrevalni sezoni. Če je akumulirana toplota večja kot sproščena, pomeni, da je v povprečju za obravnavan mesec izstopna temperatura iz SSE višja kot izstopna temperatura iz LHT. Če pa je sproščena toplota večja od akumulirane toplote pa je ravno obratno. Akumulirana toplota ima največjo vrednost v marcu in aprilu in tudi najmanjšo vrednost sproščene toplote, kar je posledica največjega sončnega obsevanja in zunanje temperature v ogrevalni sezoni. Akumulirana toplota ima najmanjšo vrednost v decembru, kar pomeni, da je december mesec z najmanjšim sončnim obsevanjem, in glede na prezračevalne toplotne izgube iz preglednice 9 je drugi najhladnejši mesec. Največja vrednost sproščene toplote se pojavi januarja (9 kWh), in v primerjavi z akumulirano toploto v istem mesecu (7 kWh) lahko zaključimo, da je januar hladen mesec, in glede na prezračevalne izgube iz preglednice 9 vidimo, da je najhladnejši mesec. Enako kot za januar velja tudi za februar, le da je akumulirana toplota večja od sproščene toplote, kar pomeni, da je sončno obsevanje februarja zelo visoko.

Preglednica 8: Akumulirana in sproščena toplota v simulaciji.

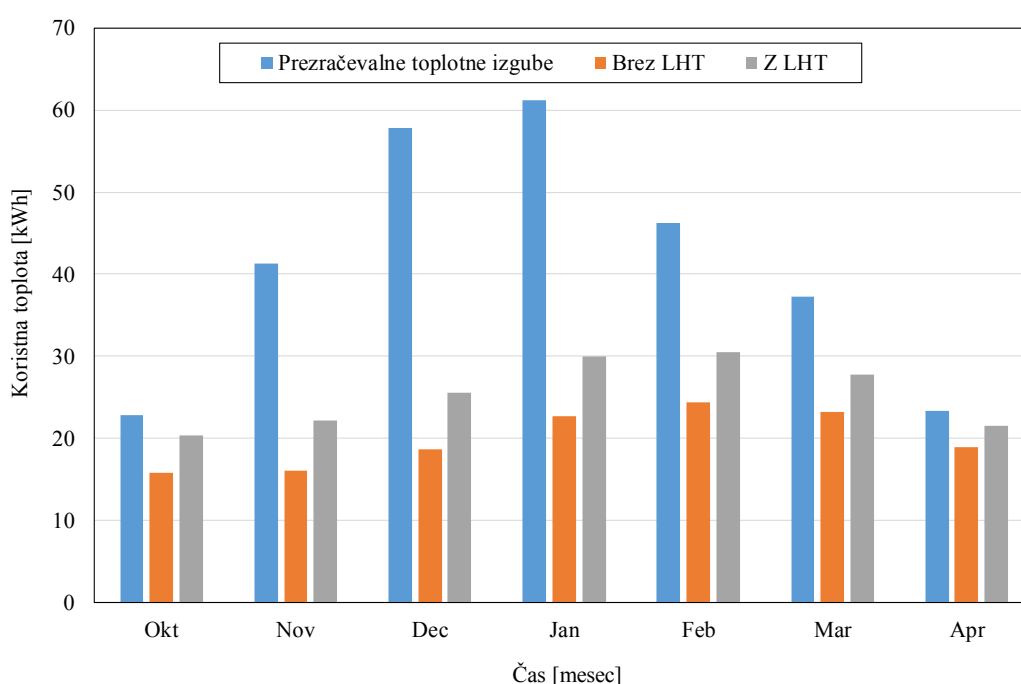
Mesec	Akumulirana toplota [kWh]	Sproščena toplota [kWh]
Oktober	9	7
November	6	8
December	5	8
Januar	7	9
Februar	9	8
Marec	10	6
April	11	5
Σ	56	51

Preglednica 9: Energijska bilanca prezračevalnega sistema.

	Potrebna toplota [kWh]	Koristna toplota [kWh]		Dogrevanje zraka [kWh]	
Mesec	Prezračevalne toplotne izgube	Brez LHT	Z LHT	Brez LHT	Z LHT
Okt	23	16	20	7	3
Nov	41	16	22	25	19
Dec	58	19	26	39	32
Jan	61	23	30	38	31
Feb	46	24	31	22	16
Mar	37	23	28	14	10
Apr	23	19	22	4	2
Σ	290	140	178	150	112

V preglednici 9 so prikazani rezultati preračuna energijske bilance prezračevalnega sistema, kjer so prikazane mesečne vrednosti potrebne toplote za namen prezračevanja, koristne toplote dobljene iz dodatnega sistema za prezračevanje in vrednosti toplote potrebne za dodatno ogrevanje, ko koristna toplota ne pokriva potrebne toplote za pokritje prezračevalnih toplotnih izgub.

Na sliki 3.25 je prikazana primerjava koristne toplote pridobljene iz sistema z in brez LHT, pri čimer vidimo, da s sistemom prezračevanja z LHT dobimo večji delež koristne toplote. Vendar pa je glede na prezračevalne toplotne izgube kljub temu energijska bilanca prezračevalnega sistema z LHT negativna, in potrebujemo pomožno ogrevanje (preglednica 9) za dogrevanje prezračevalnih toplotnih izgub.



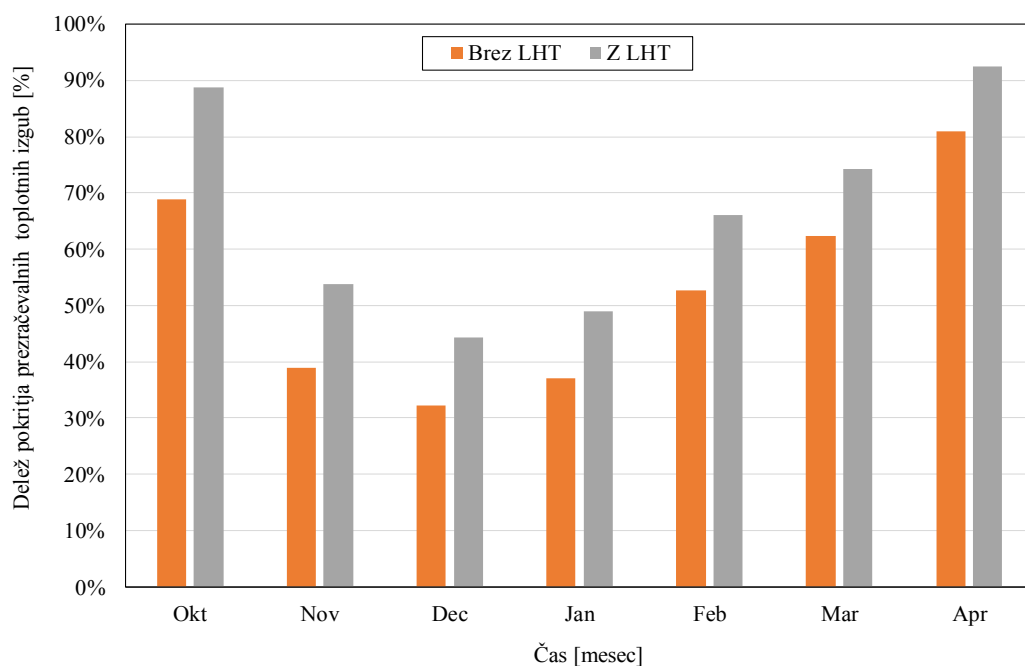
Slika 3.25: Koristna toplota prezračevalnega sistema.

V preglednici 10 in sliki 3.26 so prikazani rezultati deleža pokritja prezračevalnih toplotnih izgub glede na mesečne energijske bilance sistema z ali brez LHT. Prikazani so tudi rezultati deleža časa, ko so prezračevalne toplotne izgube popolnoma pokrite s koristno toploto pridobljeno iz obravnavanega sistema. V zadnjih dveh stolpcih preglednice 10 so prikazani rezultati deleža časa, ko je izstopna temperatura zraka iz sistema prezračevanja (temperatura zraka na vstopu v pisarno) manjša od 15 °C. Iz dobljenih rezultatov nazorno vidimo, da prezračevalni sistem z LHT dosega večjo učinkovitost skozi celotno ogrevalno obdobje od sistema brez LHT. Največji delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub je v prehodnem obdobju in sicer aprila (92 %) in oktobra (89 %). Najmanjši delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub pa se pojavi decembra (44 %), pri čimer smo že v prvem odstavku ugotovili, da je to mesec z najmanjšim sončnim obsevanjem in drugi najhladnejši mesec v letu. Povprečni delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub skozi ogrevalno obdobje sistema z LHT znaša 67 % in sistema brez LHT 53 %.

Preglednica 10: Delež pokritja in delež časa pokritosti prezračevalnih toplotnih izgub.

Mesec	Delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub[%]		Delež časa celotnega pokritja prezračevalnih toplotnih izgub [%]		Delež časa ko je $T < 15^{\circ}\text{C}$ [%]	
	Brez LHT	Z LHT	Brez LHT	Z LHT	Brez LHT	Z LHT
Okt	69%	89%	53%	80%	23%	8%
Nov	39%	54%	26%	34%	69%	58%
Dec	32%	44%	17%	21%	78%	72%
Jan	37%	49%	19%	21%	75%	70%
Feb	53%	66%	29%	36%	58%	46%
Mar	62%	74%	47%	65%	37%	27%
Apr	81%	92%	64%	81%	15%	4%
Povprečje	53%	67%	36%	48%	51%	41%

Delež (učinkovitost) pokritja prezračevalnih toplotnih izgub prav tako predstavlja prihranke energije sistema glede na potrebno toploto za pokritje celotnih prezračevalnih toplotnih izgub brez dodatnega sistema. Količina dodatne toplote potrebne za pokritje razlike med prezračevalnimi toplotnimi izgubami in koristno toploto pridobljeno iz dodatnega sistema je predstavljena v preglednici 9.



Slika 3.26: Delež pokritja prezračevalnih toplotnih izgub.

V preglednici 11 je prikazana še mesečna učinkovitost delovanja prezračevalnega sistema in učinkovitost delovanja celotnega sistema brez in z LHT, kjer je vključena še potrebna pomožna toplota za dogrevanje. Z izračunom učinkovitosti ovrednotimo delovanje sistema

z eno vrednostjo. Pri tem pridemo do enakih ugotovitev kot v predhodnih analizah preglednic in slik.

Preglednica 11: Učinkovitost delovanja celotnega sistema.

Mesec	Učinkovitost prezračevalnega sistema [/]		Učinkovitost celotnega sistema [/]	
	Brez LHT	Z LHT	Brez LHT	Z LHT
Okt	10,0	12,9	2,6	5,5
Nov	10,5	14,5	1,5	2,0
Dec	11,8	16,2	1,4	1,7
Jan	14,4	19,0	1,5	1,9
Feb	17,1	21,4	2,0	2,7
Mar	14,8	17,6	2,4	3,3
Apr	12,4	14,1	3,9	7,1
Povprečje	13,0	16,5	2,2	3,5

4. Zaključki

V magistrskem delu smo predstavili raziskavo prezračevalnega sistema s sprejemnikom sončne energije (SSE) in latentnim hranilnikom toplote (LHT). Cilj raziskave je bilo ugotoviti vpliv LHT na izboljšanje prezračevalnega sistema z analizo narejeno v numeričnem programskem orodju TRNSYS. Povzetek raziskave je opisan po točkah:

- 1) Opravili smo meritve na obstoječem prezračevalnem sistemu s SSE in LHT.
- 2) Predstavili smo računalniški model LHT, ki ga je razvila skupina raziskovalcev iz Univerze v Brnu.
- 3) Rezultate meritev smo uporabili za validacijo računalniških modelov LHT in SSE, pri čimer je primerjava med rezultati simulacije in meritvami v obeh primerih modelov glede na relativni pogrešek ter grafično primerjavo kazala na dobro ujemanje.
- 4) Izvedli smo simulacijo eksperimentalnega sistema v programskem orodju TRNSYS za ogrevalno obdobje s podatki standardnega meteorološkega leta za Ljubljano, in z dobljenimi rezultati simulacije opravili analizo prezračevalnega sistema s SSE z uporabo LHT in brez njega.
- 5) Iz analize rezultatov simulacije smo ugotovili, da vgraditev LHT poveča povprečno temperaturo zraka za prezračevanje pisarne, pri tem pa ima izstopna temperatura zraka iz LHT v 49 % celotnega prezračevalnega časa 20 °C ali več, med tem ko v primeru SSE znaša ta temperatura 37 % časa. Glede na to da ima izstopna temperatura zraka iz LHT v 36 % časa temperaturo od 20 °C do 23 °C, pa prikazuje tudi pozitiven vpliv LHT na toplotno ugodje.
- 6) Sistem prezračevanja z LHT je v vsakem mesecu analize prikazal večjo učinkovitost delovanja kot sistem brez LHT, pri čimer je največja učinkovitost (delež) pokritja prezračevalnih toplotnih izgub znašala v prehodnem obdobju in sicer v aprilu (92 %) in v oktobru (89%), med tem ko je najmanjša učinkovitost znašala v decembru (44%), ki je bil drugi najhladnejši mesec z najnižjim sončnim obsevanjem.
- 7) Glede na učinkovitost (delež) pokritja prezračevalnih toplotnih izgub smo ugotovili, da je potrebno tudi dodatno dogrevanje za pokritje celotnih prezračevalnih toplotnih izgub, in da obravnavan sistem prezračevanja ne pokrije vseh prezračevalnih izgub celotni čas.

Iz predstavljenih točk lahko povzamemo, da smo uspešno izpolnili namene in cilje naše raziskave, ter ovrednotili integracijo LHT v sistemu prezračevanja s SSE, in potrdili doprinos LHT h učinkovitejšemu delovanju prezračevalnega sistema.

Predlogi za nadaljnje delo

V nadaljnjem delu bi bilo potrebno še enkrat izvesti meritve hitrosti zraka po prerezu cevi, in določiti povprečno hitrost zraka z log-linearno metodo, ter primerjati rezultate meritev z našim delom. Smiselno bi bilo tudi narediti analizo toplozračnega ogrevanja prostora, pri čimer bi s toploto ki se akumulira v LHT ogrevali prostor zjutraj in zvečer. Torej pri tej analizi ne bi upoštevali mehanskega prezračevanja vendar samo ogrevanje, pri čimer bi dobili energijsko bilanco pokritja toplotnih izgub prostora ob minimalnem zahtevanem naravnem prezračevanju. V naslednjem koraku pa bi nadgradili sistem z aktivnim odjemom, kjer bi preko vremenske napovedi temperatur zraka in sončnega obsevanja polnili LHT ob največjem sončnem obsevanju, in ga praznili, ko bi se nivo ppm-ov CO₂ približevalo zgornji meji kategorije toplotnega ugodja. Pri tem bi uvedli tudi regulacijo vrtljajev ventilatorja in posredno toka zraka skozi sistem, kjer bi se proces polnjenja LHT izvajal ob najvišjih temperaturah zraka okolice, za kar bi potrebovali manjši tok zraka skozi sistem za enak toplotni tok zaradi večje temperaturne razlike med zrakom in FSS. Hitrost zraka bi pri tem lahko neprekinjeno merili s Pitot-Prandtlovo merilno sondo, ki bi jo v obravnavanem sistemu umerili z ostrorobo merilno zaslonko. Ker je v trenutnem sistemu vgrajen ventilator napajan z električno energijo iz omrežja elektroenergetskega sistema, bi bilo v prihodnje potrebno vgraditi še sončne celice za pridobivanje električne energije za pogon ventilatorja. Pri tem bi bilo smiselno vgraditi še sistem za akumulacijo električne energije preko litij-ionskih baterij, kar bi omogočalo avtonomno delovanje sistema prezračevanja. Na koncu pa bi glede na potrebno energijo za dogrevanje pisarne povečali LHT z vgraditvijo dodatnih CSM plošč napolnjenih s FSS, da bi popolnoma pokrili potrebe po ogrevanju prostora, in s tem dosegli trajnostni proces pridobivanja energije za ogrevanje pisarne.

5. Literatura

- [1] EU: *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council*. Official Journal of the European Union, 2010.
- [2] S.A. Kalogirou: *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier, Academic Press, London, 2009.
- [3] I. Dincer, M.A. Rosen: *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2002.
- [4] S. Medved: *Sprejemniki sončne energije: izbrana poglavja iz OVE*. Ljubljana, 2015.
- [5] U. Stritih: *Inovativne tehnologije z uporabo FSS pri hlajenju, ogrevanju in klimatizaciji v stavbah: izbrana poglavja iz KHS*. Ljubljana, 2015.
- [6] D. Aydin, S.P. Casey, S. Riffat: *The latest advancements on thermochemical heat storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews **41** (2015) str. 356-367.
- [7] I. Dincer, S. Dost, X. Li: *Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications*. International Journal of Energy Research **21** (1997), str. 1157-1171.
- [8] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi: *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews **13** (2009) str. 318-345.
- [9] E. Osterman: *Sistem z latentnim hranilnikom toplote za ogrevanje in hlajenje prostorov: doktorska disertacija*. Ljubljana, 2015.
- [10] V.V. Tyagi, D. Buddhi: *PCM thermal storage in buildings: A state of art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews **11** (2007) str. 1146-1166.
- [11] R.K. Sharma, P. Ganesan, V.V. Tyagi, H.S.C. Metselaar, S.C. Sandaran: *Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage*. Energy Conversion and Management **95** (2015) str. 193-228.
- [12] U. Stritih, V. Butala: *Experimental investigation of energy savings in buildings with PCM cold storage*. International Journal of Refrigeration **33** (2010) str. 1676-1683.
- [13] U. Stritih, A. Bombač: *Description and Analysis of Adsorption Heat Storage Device*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering **60** (2014) 10 str. 619-628.

- [14] M. Kofalt: *Nadgradnja sistema z latentnim hranilnikom toplote za ogrevanje in hlajenje stavb: diplomsko delo*. Ljubljana, 2016.
- [15] G. Dolenc: *Eksperimentalni sistem s fazno spremenljivo snovjo za ogrevanje in hlajenje prostora: diplomsko delo*. Ljubljana, 2015.
- [16] Rubitherm: *Data sheet*. Rubitherm Technologies GmbH. Dostopno na: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT22HC_EN_29062016.PDF, ogled: 24.4.2017.
- [17] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE: Poročilo testiranja v skladu s EN 12975-1:2006+A1:2010/EN ISO 9806:2013, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, 2016.
- [18] SolAir: *Sončni zračni kolektorji*. Solair d.o.o., Celje, 2016. Dostopno na: <http://www.sol-air.eu/>, ogled: 25.4.2017.
- [19] I. Bajsić: *Osnove merjenja temperature: izbrana poglavja iz EM*. Ljubljana, 2014.
- [20] KIMO: *Technical Data Sheet*. KIMO instruments, Marne La Vallee Cedex, 2017. Dostopno na: https://www.hitma-instrumentatie.nl/assets/catalog/parts/Datasheet_NL_EN/Datasheet_Kimo_VT110-VT115.pdf, ogled: 28.3.2017.
- [21] I. Bajsić: *Temeljni meroslovni pojmi: izbrana poglavja iz MT*. Ljubljana, 2014.
- [22] Solar Energy Laboratory: *Getting started*. TRNSYS 17 manual, Volume 1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison 2014.
- [23] P. Charvat, L. Kimeš, M. Ostry: *Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems*. Energy and Buildings **68** (2014) str. 488-497.
- [24] U. Stritih, P. Charvat, R. Koželj, L. Klimes, E. Osterman, M. Ostry, V. Butala: *Experimental and numerical investigations of PCM thermal storage system for heating and cooling of buildings*. Raziskava pripravljena na objavo v Special issue in Sustainable Cities and Society (2017).
- [25] S.N. Al-Saadi, Z. Zhai: *A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls*. Energy and Buildings **109** (2015) str. 274-290.
- [26] E. Halawa, W. Saman: *Thermal performance analysis of a phase change thermal storage unit for space heating*. Renewable Energy **36.1** (2011) str. 259-264.
- [27] S. Lu, S. Liu, J. Huang, X. Kong: *Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio*. Energy and Buildings **84** (2014) str. 287-298.
- [28] Solar Energy Laboratory: *Mathematical Reference*. TRNSYS 17 manual, Volume 4. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison 2014.
- [29] H.K.Versteeg, W. Malalasekera: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Second Edition*. Pearson Education Limited, Essex, 2007.
- [30] W. Oberkampf, T.G. Trucano: *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics*. Progress in Aerospace Sciences **38** (2002) str. 209-272.
- [31] *Podatki samodejnih postaj*. Agencija Republike Slovenije za Okolje. Dostopno na: <http://www.meteo.si/met/sl/app/webmet>, ogled: 17.4.2017.

- [32] *Metonorm Software*. Meteonorm. Dostopno na:
<http://www.meteonorm.com/en/features/features>, ogled: 17.5.2017.
- [33] *Sonne & Klima*. Meteotest. Dostopno na:
<https://meteotest.ch/geschaeftsbereich/sonne-klima><https://meteotest.ch/>, ogled:
17.4.2017.
- [34] Solar Energy Laboratory: *Weather Data*. TRNSYS 17 manual, Volume 8. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison 2014.

