

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

ALFONSAS MIEŽĖNAS

**EKSPERIMENTINIS APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETO SAULĖS
SIENOS EFEKTYVUMO TYRIMAS**
**EXPERIMENTAL STUDY OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY SOLAR WALL PERFORMANCE**

BAIGIAMASIS MAGISTRO DARBAS

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Aplinkos inžinerijos fakultetas

Pastatų energetikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Eksperimentinis Aplinkos inžinerijos fakulteto saulės sienos efektyvumo tyrimas**

Autorius **Alfonsas Miežėnas**

Vadovas prof. habil. dr. **Vytautas Martinaitis**

Kalba

lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliktas eksperimentinis neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus efektyvumo tyrimas. Eksperimento metu parinkta ir sumontuota matavimo ir duomenų kaupimo įranga. Pagal gautus meteorologinius ir kolektoriaus parametrų duomenis išanalizuotas kolektoriaus veikimas. Nustatyta kolektoriaus paviršiaus ir tiekiamojo oro temperatūrų, temperatūrinio efektyvumo ir bendro efektyvumo priklausomybė nuo išorinių veiksnių. Atliktas rezultatų palyginamas esant pastoviam ir kintamam tiekiamojo oro debitui, ir nustatyta jo įtaka kolektoriaus veikimui. Remiantis šilumos srauto principu ir naudojantis parinkta matavimo įranga, nustatyta kolektoriaus veikimo įtaka išorinei pastato atitvarai. Nustatyti galimi šilumos pritekiai šildymo sezono ir vasaros metu, naudojant kolektorių kaip apsauginę priemonę nuo tiesioginių saulės spindulių. Atliktas kolektoriaus ekonominis ir energinis vertinimas naudojantis RETScreen programa ir, lyginant gautus rezultatus su kitais baziniais šildymo būdais, apskaičiuotas kolektoriaus atsipirkimo laikotarpis.

Prasminiai žodžiai: saulės siena, neįstiklintas pratakus saulės kolektorius, šildymas, vėdinimo sistema, eksperimentinis tyrimas, atsinaujinančios energijos sistemos, saulės energija, energijos taupymo priemonės.

Vilnius Gediminas technical university
Environmental engineering faculty
Building energetics

ISBN ISSN
Copies. No.
Date-....-....

Master Degree Studies **Energy Engineering and Planning** study programme Master's Thesis
Title **Experimental study of Environmental engineering faculty solar wall performance**
Author **Alfonsas Miežėnas** Academic supervisor prof. habil. dr. **Vytautas Martinaitis**

Language
lithuanian

Annotation

Master thesis carried out an experimental study of unglazed transpired solar collector. During the experimental required measuring equipment was selected and installed. Performance of the collector was analyzed according to measured meteorological collector's parameters data. Collector surface and supply air temperature, thermal efficiency and overall efficiency dependency on external factors was investigated. The study results are compared with constant or variable supply air flow rate and its impact on the operation of the collector. Collector operation impact to building's external wall is investigated based on the principle of heat flow and using the selected measurement equipment. Study investigated possible heat inflow during the heating season and summer time, using collector as a shield against direct sunlight. Collector economical and energetic assessment was done using RETScreen software.

Keywords: solar wall, unglazed transpired solar collector, heating, ventilation, experimental study, renewable energy, solar energy, energy-saving devices.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012
m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Alfonsas Miežėnas, 20064521

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Energijos inžinerija ir planavimas, ENmf-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2013 m. Birželio 6 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „Eksperimentinis Aplinkos inžinerijos fakulteto saulės sienos efektyvumo tyrimas“

patvirtintas 20 _____ m. _____ d. dekanas potvarkiu Nr. _____, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parentant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai:

Mano darbo (projekto) vadovas habil.dr.prof. Vytautas Martinaitis

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytu piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

(Vardas ir pavardē)

TURINYS

Santrumpų sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	9
Lentelių sąrašas.....	11
Priedų sąrašas	11
ĮVADAS	12
1. NEĮSTIKLINTAS PRATAKUS SAULĖS KOLEKTORIUS	14
2. LITERATŪROS APŽVALGA	16
2.1. Teoriniai tyrimai	16
2.2. Skaitiniai tyrimai.....	17
2.3. Eksperimentiniai tyrimai.....	20
2.4. Kolektoriaus pritaikymai	25
3. NAUDOTINI TYRIMO METODAI	26
3.1. Šilumos mainų teorija	26
3.2. Papildytas kolektoriaus šilumos balansas	29
3.3. Kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas	32
3.4. Kolektoriaus efektyvumas	34
4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ŠILDYMO SEZONO METU	35
4.1. Sistemos aprašymas	35
4.2. Matavimo įranga	36
4.3. Matavimų aprašymas	38
4.4. Rezultatai	40
4.4.1. Kolektoriaus paviršiaus temperatūros kitimas	40
4.4.2. Oro temperatūros pasiskirstymas kolektoriuje.....	41
4.4.3. Tiekiamojo oro temperatūros prieaugio kitimas	44
4.4.4. Kolektoriaus veikimo įtaka išorinei atitvarai	49
4.4.5. Temperatūrinis efektyvumas	51
4.4.6. Efektyvumas.....	53
4.5. Skyriaus apibendrinimas.....	56
5. EKSPERIMENTINIS KOLEKTORIAUS TYRIMAS VASAROS SEZONO METU	57
5.1. Matavimo įrangos aprašymas	58
5.2. Matavimo duomenų rezultatai	60
5.3. Skyriaus apibendrinimas.....	63
6. EKONOMINIS IR ENERGINIS VERTINIMAS	64

6.1. Priimti rodikliai.....	65
6.2. Rezultatai	66
6.3. Gautų rezultatų palyginimas su faktiniais duomenimis	67
Išvados.....	70
Problemos	71
Tolimesnių tyrimų gairės.....	72
Literatūros sąrašas	73
PRIEDAI	76

Santrumpų sąrašas

VG TU – Vilniaus Gedimino technikos universitetas

AIF – Aplinkos inžinerijos fakultetas

PEMS – Pastatų energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorija

CIMC – Civilinės inžinerijos mokslo centras

UTC – *Unglazed transpired solar collector*

3D – trys dimensijos

TRNSYS – *Transient systems simulation program*

SFD (angl. *CFD*) – Skaičiuojamųjų fluidų dinamika (angl. *Computational fluid dynamics*)

PV – *photovoltaic*

ROI – *return of investment*

VGN – vidinė gražos norma

GDV – grynoji dabartinė vertė

SCADA – *supervisory control and data acquisition*

SAH – *solar air heater*

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema šildymo sezono metu

2 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema vasaros metu

3 pav. Wang pratakiaus saulės kolektoriaus skaitinis modelis (kairėje - temperatūros pasiskirstymas kolektoriuje, dešinėje – oro judėjimo greitis kolektoriuje)

4 pav. Delisle eksperimentinio tyrimo modelis (kairėje – kolektoriaus išorė su PV elementais, dešinėje – matavimo įranga)

5 pav. Meier oro srauto aptekėjimo apie pastatą modelis

6 pav. Kolektoriaus energijos balansas

7 pav. Temperatūros ir greičio pasi enių sluoksnių kitimas perforuotame paviršiuje

8 pav. Kolektoriaus papildytas energijos balansas

9 pav. Neįstiklinto pratakiaus saulės kolektoriaus bendras vaizdas (VG TU AIF II rūmai)

10 pav. Kolektoriaus konstrukcija (kairėje – kolektoriaus pjūvis; dešinėje – kolektoriaus paviršius)

11 pav. Matuojamų duomenų schema

- 12 pav. Matavimo įranga (kairėje – pirometras; dešinėje – termoporos ir anemometrai)
- 13 pav. Sistemos veikimo darbalaukis SCADA programoje
- 14 pav. Gautų rezultatų analizės eiliškumas
- 15 pav. Saulės spinduliuotės, tiekiamo oro, išorės oro ir kolektoriaus paviršiaus temperatūrų kitimas (Kovo 8 d.)
- 16 pav. Oro temperatūros kolektoriuje pasiskirstymas (Kovo 8 d.)
- 17 pav. Oro ir paviršiaus temperatūrų pasiskirstymas kolektoriuje (Kovo 8 d.)
- 18 pav. Temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)
- 19 pav. Temperatūros prieaugio ir išorės oro temperatūros kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)
- 20 pav. Temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo debito pokyčio (Sausio 9 d.)
- 21 pav. Temperatūros prieaugio rezultatų palyginimas su „SolarWall“ gamintojo nurodymais
- 22 pav. Kovo 15-17 d. saulės spinduliuotės ir išorės oro temperatūros kitimas
- 23 pav. Kovo 15-17 d. šilumos srauto per išorinę pastato atitvarą kitimas
- 24 pav. Kovo 15-17 d. išorinės atitvaros vidinio paviršiaus temperatūros kitimas
- 25 pav. Temperatūrinio efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)
- 26 pav. Temperatūrinio efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Sausio 9 d.)
- 27 pav. Efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)
- 28 pav. Efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės ir debito pokyčio (Sausio 9 d.)
- 29 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema vasaros metu ir stogo vaizdas su apeigos vožtuvu
- 30 pav. Duomenų kaupiklis Ahlborn Almemo 2890-9
- 31 pav. Šilumos srauto plokštelė FQA019C
- 32 pav. Matavimo įrangos išdėstymas (kairėje – pagalbinė patalpa, dešinėje – laiptinė)
- 33 pav. Saulės spinduliuotės ir išorės oro temperatūros kitimas Birželio 25 d. – Liepos 16 d.
- 34 pav. Šilumos srauto ir paviršiaus temperatūros kitimas Birželio 25 d. – Liepos 16 d.
- 35 pav. Lauko oro ir vidinių paviršių temperatūrų bei saulės spinduliuotės kitimas (Birželio 29 d.)
- 36 pav. Vidinio paviršiaus šilumos srauto kitimas priklausomai nuo saulės intensyvumo (Birželio 29 d.)
- 37 pav. „RETScreen“ programos pradinis darbalaukis

Lentelių sąrašas

- 1 lentelė. 2013 m. Kovo 8 d. matavimų informacija
- 2 lentelė. 2013 m. Sausio 9 d. matavimų informacija
- 3 lentelė. Efektyvumo ir išmatuotų parametrų vidutinės reikšmės esant kintamam debitui
- 4 lentelė. Temperatūros išėigų palyginimas
- 5 lentelė. NASA atmosferinių parametrų duomenys
- 6 lentelė. Energijos išėigos rezultatai pagal NASA duomenis
- 7 lentelė. Ekonominis palyginimas
- 8 lentelė. Faktinių ir NASA duomenų palyginimas
- 9 lentelė. Energijos išėigų palyginimas

Priedų sąrašas

- 1 priedas. Įrangos montavimo darbai
- 2 priedas. *RETScreen* darbalaukis

IVADAS

Mažėjantys naftos, dujų ir kt. gamtos išteklių šaltiniai bei augantis suvartojimas ir kainos skatina imtis alternatyvių energijos šaltinių ir priemonių joms panaudoti, siekiant užtikrinti komfortinį mikroklimatą pastatuose.

Visame pasaulyje didžiausias suvartojamas energijos kiekis tenka pastatų sektoriui. Lietuva yra ne išimtis, nes ji priklauso šalto klimato zonai, o pastatų sektoriaus suvartojamas galutinės energijos kiekis viršija 40 % [1]. Visos Europos Sąjungos narės, įskaitant ir Lietuvą, yra įsipareigojusios iki 2020 m. sumažinti energijos suvartojimą 20 %. Ne paslaptis, kad didžiausias potencialas sumažinti energijos vartojimą glūdi būtent šiame sektoriuje. Todėl yra pasitelkiamos ir skatinamos įvairios alternatyvios priemonės įgyvendinant šį tikslą.

Atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimas pastatų šildymo ir vėdinimo sistemose yra neatsiejamas šių dienų klausimas. Pasaulyje vis labiau populiarėja technologijos, leidžiančios pastatų šildymo sistemose panaudoti saulės energiją – pasyviosios ir aktyviosios sistemos. Pastarąsias sudaro kelios skirtingos saulės kolektorių grupės pagal cirkuliuojančio šilumnešio tipą. Vienos jų yra visiškai sandarios ir jose cirkuliuojantis šilumnešis neturi jokio tiesioginio kontakto su aplinka. Tai praktikoje dažniausiai sutinkami plokštieji ir vakuuminiai saulės kolektoriai. Kitą grupę sudaro pratakūs saulės kolektoriai, kurių konstrukcija yra itin paprasta, o juose cirkuliuojantis šilumnešis dažniausiai yra išorės oras. Tai vieninteliai kolektoriai, kurie tuo pačiu metu atlieka dvi skirtingas funkcijas – vėdina ir šildo. Jie taip pat sumažina patalpų šilumos nuostolius, kurie prarandami per išorinę pastato atitvarą, ir šilumos pritekį vasaros metu, apsaugodami dengiamą pastato išorinės atitvaros plotą nuo tiesioginių saulės spindulių. Prekyboje šis kolektorius dažniausiai yra sutinkamas saulės sienos pavadinimu (angl. *solar wall*), tačiau technologiškai jis yra įvardijamas kaip neįstiklintas pratakus saulės kolektorius (angl. UTC – *unglazed transpired solar collector*).

Lietuvoje pirmasis neįstiklintas pratakus saulės kolektorius įrengtas 2011 m. rudenį ant Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto antrųjų rūmų pietinio fasado. Tai reiškia, jog Lietuvoje iki šiol nėra atliktų tyrimų, susijusių su šiuo kolektoriumi ir jo panaudojimo galimybėmis pastatų šildymo ir vėdinimo sistemose, pasitelkiant „lietuvišką“ saulę. Taip pat apžvelgtuose literatūros šaltiniuose nebuvo aptikta atliktų tyrimų kaimyninėse valstybėse, todėl keliamas klausimas – ar galime efektyviai ir kaip efektyviai panaudoti neįstiklintą pratakų saulės kolektorių šalto klimato šalyje, kuri saulės spinduliuotės intensyvumo žemėlapyje patenka į vidutinę zoną.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Magistrinio darbo tikslas – atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinį tyrimą ir nustatyti jo efektyvumo rodiklius.

Darbo tikslui pasiekti keliama šie **uždaviniai**:

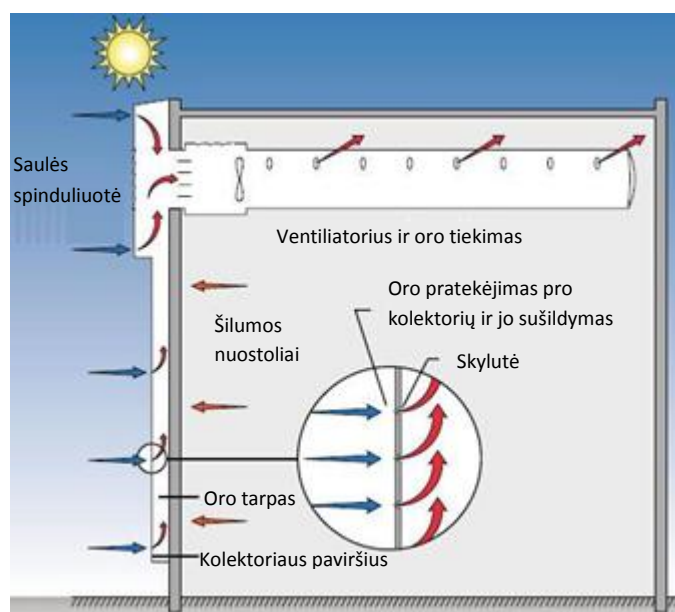
- Apžvelgti literatūros šaltinius susijusius su atliktais tyrimais baigiamojo darbo tema;
- Išanalizuoti kolektoriaus veikimą žiemos ir vasaros laikotarpiu priklausomai nuo išorinių ir vidinių veiksnių;
- Nustatyti kolektoriaus efektyvumo ir našumo rodiklius bei labiausiai juos įtakojančius veiksnius;
- Atlikti kolektoriaus modeliavimą ir palyginti ekonominius rodiklius.

Parengė:

Alfonsas Miežėnas

1. NEĮSTIKLINTAS PRATAKUS SAULĖS KOLEKTORIUS

Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius – tai vėdinimo sistemos įrenginys, kuris, naudodamas saulės spinduliuotės energiją, šildo į patalpas tiekiamą lauko orą. Šių kolektorių sistemos yra pritaikomos įvairios paskirties pastatuose patalpų vėdinimui ir žematemperatūriniam šildymui, gamybos procesuose ir žemės ūkio produktų džiovinimui. Dėl ribotos saulės spinduliuotės kolektorius dažniausiai yra naudojamas pirminiam oro sušildymui, o galutinai paruošiamas vėdinimo įrenginyje. Žemiau pateikiama kolektoriaus principinė veikimo schema šildymo sezono metu 1 pav.:



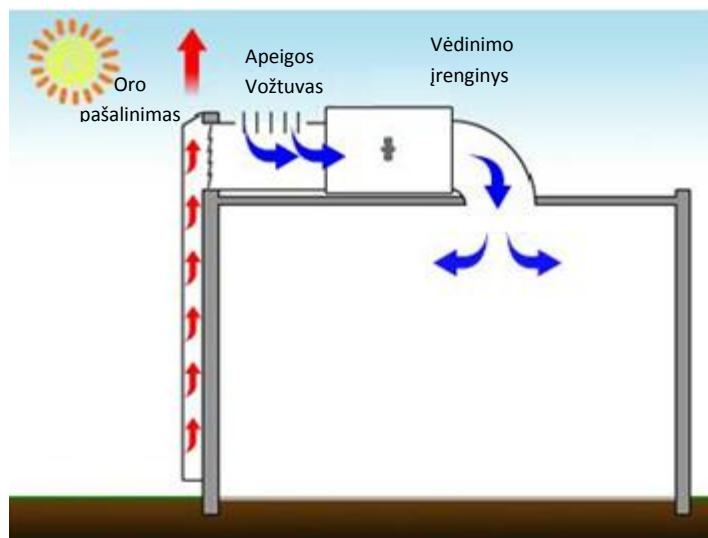
1 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema šildymo sezono metu [46]

Kolektoriaus konstrukcija susideda iš: karkaso, kuris yra tvirtinamas prie išorinės pastato atitvaros, jį dengiančio absorbuojančio paviršiaus ir jungties su vėdinimo sistemos ortakio. Svarbiausia kolektoriaus dalis – saulės energiją absorbuojantis paviršius, nes nuo jo savybių priklauso kolektoriaus našumas. Šis paviršius yra gaminamas iš perforuotos – gofruotos plieno arba aliuminio skardos, kuri yra padengiama tamsiais metalo dažais dėl aukštesnio saulės spinduliuotės sugerties koeficiento, nes nuo jo dydžio priklauso absorbuojamas energijos kiekis. Absorbcijos metu kolektoriaus paviršiaus temperatūra išauga ir ši šiluminė energija konvekcijos būdu yra perduodama tiekiamam išorės orui, kuris į kolektorių patenka per skylutes. Visa likusi kolektoriaus konstrukcija yra sandari. Ventilatoriaus pagalba sukuriama priverstinis šilto oro srauto tekėjimas vyksta tarp kolektoriaus paviršiaus ir išorinės pastato atitvaros. Kolektorius dažniausiai yra tvirtinamas prie pastato pietinio fasado dėl būdingo didžiausio saulės energijos kiekio.

Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius taip pat atlieka pastato išorinės atitvaros papildomo izoliacinio sluoksnio funkciją. Šilumos nuostoliai, kurie prasiskverbia iš vidinių

patalpų per pastato dengiamo išorinės atitvaros plotą, patenka į kolektoriaus tūrį ir yra panaudojami. Todėl galima teigti, jog per šią atitvaros plotą nėra patiriami šilumos nuostoliai.

Vasaros metu neįstiklintas pratakus saulės kolektorius atlieka šilumos pritekėjimų mažinimo funkciją, apsaugodamas dengiamą išorinės atitvaros plotą nuo tiesioginių saulės spindulių. Kolektoriuje cirkuliuojantis šiltas oras yra pašalinamas viršutinėje kolektoriaus dalyje, o tuo metu vėsesnis oras vėdinimo sistemai yra siurbiamas per apeigos vožtuvą, įrengtą ant pastato stogo. Kolektorius veikdamas šiuo principu sumažina vėsos poreikius vasaros metu. Žemiau pateikiama kolektoriaus principinė veikimo schema vasaros metu 2 pav.:



2 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema vasaros metu [46]

„Conserval Engineering SolarWall“ deklaruoja šias kolektoriaus eksploatacines ir ekonomines savybes [46]:

- Kolektorius išnaudojamas visą pastato gyvavimo trukmę;
- $16 \div 55$ °C tiekiamojo oro temperatūros prieaugis, priklausomai nuo oro debito;
- Kasmetiniai 1 tonos CO₂ sutaupymai esant 5 m² ploto kolektoriui;
- 1 m² kolektoriaus sutaupo 20 ÷ 80 dol. metinių šildymo išlaidų, priklausomai nuo bazinės šildymo sistemos rūšies;
- Iki 50 % pastato šildymo energijos poreikio padengimo;
- Pagamina 0,4 ÷ 1 MWh/m²/metus šiluminės energijos;
- Iki 80 % efektyvumas;
- „SolarWall“ sistemos pagal kainą yra lyginamos su plytų mūro atitvaromis, o, įvertinus mokesčius ir galimas dotacijas, šios sistemos gali būti netgi pigesnės už mūro ar metalinių konstrukcijų atitvaras;
- Efektyvus kolektoriaus veikimas debesuotomis dienomis;
- Mažesni vėsinimo kaštai vasaros metu;

- Nereikalinga eksploatacinė priežiūra per visą gyvavimo laikotarpį.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

Ruošiantis atlikti neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinį tyrimą buvo išsamiai apžvelgti literatūros šaltiniai baigiamojo darbo tema, kurie apima ne tik atliktus eksperimentinius kolektoriaus tyrimus, bet ir nagrinėtus teorinius bei skaitinius tyrimus, taip pat įgyvendintų projektų analizę ir galimus pritaikyti kolektoriaus variantus.

Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius mokslinėje literatūroje pirmą kartą paminėtas C. Christensen 1990 m. [2]. Jis savo darbe atliko trijų skirtingų saulės kolektorių – vakuuminių, skirtų vandens šildymui, neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus vėdinimo sistemoje ir neįstiklinto kolektoriaus vandens šildymui, ekonominį ir energinį palyginimą.

2.1. Teoriniai tyrimai

Kutscher [3] sudarė pratakaus saulės kolektoriaus šilumos balanso lygtį ir palygino gautus analitinius rezultatus su eksperimentiniu modeliu. Jis parodė, jog kolektoriaus efektyvumas, kuris yra apibrėžiamas kaip santykis tarp energijos kiekio suteikto tiekiamui orui ir saulės spinduliuotės krintančios ant kolektoriaus paviršiaus, yra mažai veikiamas vėjo esant aukštam oro tiekimo greičiui (apie 0,05 m/s). Rezultatuose yra parodoma, kad, sumažinus siurbiamo oro greitį, sumažėja kolektoriaus efektyvumas, nes jo paviršiaus temperatūra išauga ir ji tampa labiau jautri vėjo poveikiui. Tolimesniuose tyrimuose autorius nustatė, kad natūralios konvekcijos išorinėje kolektoriaus pusėje galima nevertinti. Tai tik patvirtino ankstesnio tyrimo metu išsakytą teiginį, kad vėjo poveikis atsiranda tik esant žemam oro siurbimo greičiui.

Hollands [4; 5] atliko literatūros apžvalgą ir aprašė pratakaus saulės kolektoriaus veikimą bei sutelkė dėmesį į energijos balansą, norėdamas ištirti siurbimo fenomeną ir tekėjimo vientisumą. Jis priėjo prie išvados, kad vieninteliai nuostoliai, kuriuos patiria kolektorius, yra spinduliavimo nuostoliai (atspindžio) į aplinką, o konvekciniai šilumos nuostoliai yra nežymūs.

Biona [6] tyrė įvairių autorių atliktus darbus siekdamas apibrėžti kolektoriaus naudingumą ir efektyvumą kaip temperatūrų santykinį dydį (skirtumas tarp pratekėjusio pro kolektorių oro ir aplinkos oro temperatūros, su kolektoriaus paviršiaus ir aplinkos oro temperatūros skirtumu). Autorius pateikė šių išraiškų pritaikymo galimybes projektuojant kolektorių skirtą grūdinės kultūros džiovinimui.

Motahar ir Alemrajabi [7] atliko neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinę analizę. Naudodamiesi stacionariu modeliu jie optimizavo kolektorių, atsižvelgdami į skylių skersmenį, atstumą tarp jų, saulės spinduliuotės intensyvumą ir siurbimo greitį. Tyrimo metu

buvo gauta, kad ekserginis efektyvumas pasiekė didžiausią 2,28 % reikšmę, o rezultatui didžiausią poveikį darė saulės spinduliuotė ir skylučių parametrai. Nustatyta, kad, padidinus siurbiamo oro greitį, ekserginis naudingumas sumažėja.

Gao [8] sukūrė kolektoriaus matematinį modelį remiantis šilumos balanso lygtimi. Jis pažymėjo, jog saulės spinduliuotė ir oro debitas turi didelę reikšmę kolektoriaus veikimo efektyvumui. Taip pat nustatyta, kad paviršiaus spinduliavimo sugerties koeficientas turi didesnę reikšmę šilumos atgavimui nei juodumo laipsnis, tačiau pastarasis labiau lemia aukštesnę tiekiamojo oro temperatūrą: esant juodumo laipsniui nuo 0,2 iki 0,9 reikšmei, tiekiamojo oro temperatūra atitinkamai sumažėja apie 14% iki 30 °C ir apie 45% iki 50 °C temperatūros.

2.2. Skaitiniai tyrimai

Kutscher [9] parengtoje disertacijoje, naudodamasis „*Fluent CFD*“ modeliavimo programa, išsamiai išstudijavo šilumos mainus su oru, vykstančius apie kolektoriaus skylutes 2D modelyje. Rezultatuose autorius parodė, kad didžiausi šilumos mainai vyksta priekinėje skylučių dalyje. Taip pat jis nurodė, jog, skaičiuojant kolektoriaus efektyvumą, reikia naudoti vidutinę logaritminę kolektoriaus paviršiaus temperatūrą. Atliktuose tyrimuose yra nurodoma vėjo įtaka šilumos mainams.

Gunniewiek [10], kurdamas 3D tiekiamojo oro pasiskirstymo kolektoriuje modelį, atliko jo skaitinį vertinimą. Jis nustatė šešis fizikinius ir geometrinius parametrus, kurie veikia oro tekėjimą kolektoriuje: jo aukštis, spindulių sugerties ir šilumos nuostolių koeficientai, oro siurbimo greitis, kolektoriaus aukščio ir storio santykis, hidrauliniai nuostoliai. Buvo nustatyta kiekvieno iš šių parametrų poveikis kolektoriaus veikimui, esant skirtingiems oro siurbimo ir vėjo greičiams. Autorius nustatė, kad, esant skirtingam kolektoriaus aukščiui ir sugerties koeficientui, yra reikalingas skirtingas papildomas oro siurbimas (naudojant ventiliatoriaus trauką), o esant didesniui kolektoriaus aukščio ir storio santykiui bei hidrauliniams nuostoliams sulėtėja oro tekėjimo greitis. Jis pažymėjo, kad labiausiai atkreipti dėmesį į vėjo įtaką kolektoriaus veikimui reikia esant mažam siurbiamo oro greičiui. Autorius apibrėžė santykį tarp oro slėgio išorėje ir slėgio nuostolių visame kolektoriuje esant tolygiam oro tekėjimui. Tai leidžia prognozuoti oro tekėjimo krypties pasikeitimą į priešingą pusę. Gunniewiek [11], kurdamas šį modelį, [10] pasiūlė 2D modelį, kuris neįvertina vėjo poveikio. Autorius, remdamasis tyrimais, teigia, kad esant skylutėse oro siurbimo greičiui mažesniui negu 0,0125 m/s, kolektoriaus viršutinėje dalyje oro srauto tekėjimo kryptis tampa priešinga. Taip pat nustatyta, kad esant nevienodam oro tekėjimo pasiskirstymui šalia vidinio kolektoriaus paviršiaus, priekinėje dalyje sumažėja šilumos mainai su pratekančiu pro jį oru, o tuo pačiu ir jo efektyvumas.

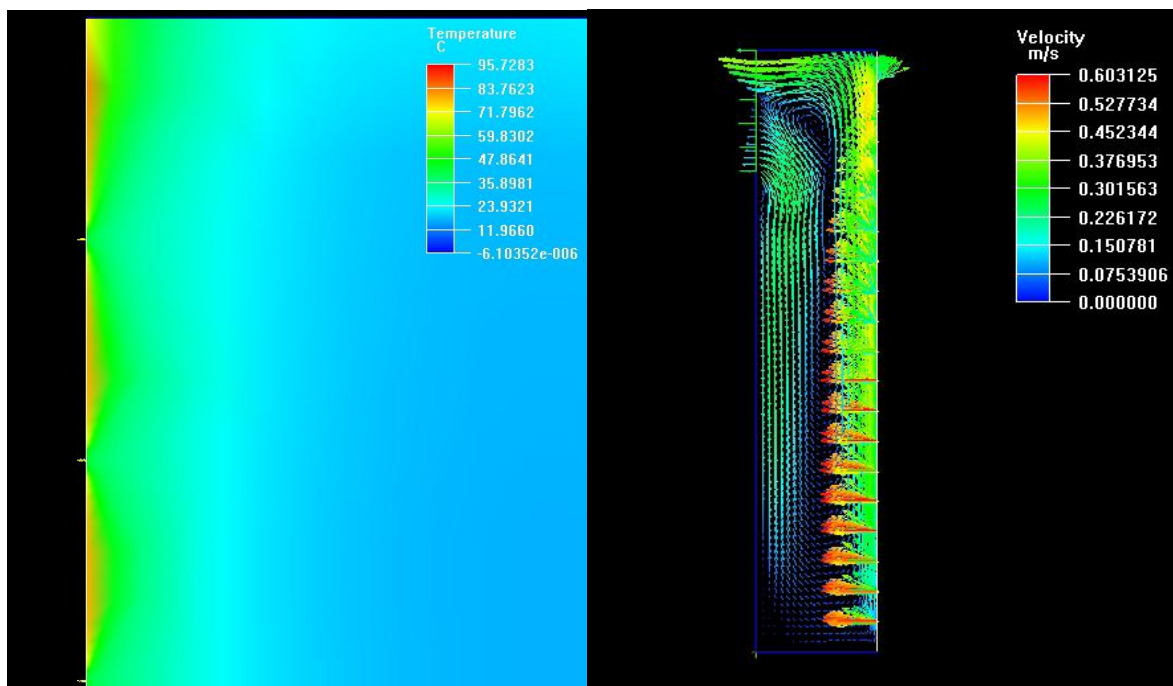
Tolimesniuose tyrimuose Gunnewiek [12] patobulino savo modelį atsižvelgęs į vėjo įtaką srauto tėkmei. Jis nustatė, kad norint išvengti atbulinio srauto tekėjimo susidarymo esant 5 m/s vėjo greičiui į kolektoriaus paviršių, siurbiamo oro greitis skylutėse turi būti padidintas nuo 0,0125 m/s iki 0,026 m/s. Taip pat atlikta slėgio pasiskirstymo kolektoriaus paviršiuje dėl vėjo poveikio analizė parodė, kad, siekiant išvengti atbulinio srauto tekėjimo atsiradimo, geriau yra vengti įrenginėti neįstiklintą prataką saulės kolektorių per visą fasado aukštį.

Summers [13; 14], remdamasis šilumos balanso metodu, naudodamasis „*TRNSYS*“ programa sukūrė skaitinį kolektoriaus modelį ir atliko kolektoriaus veikimo režimo tyrimą, priklausomai kokios paskirties pastate yra įrengtas kolektorius. Autorius taip pat atliko kolektoriaus, esančio Viskonsino valstijoje, energinį ir ekonominį vertinimą. Rezultatuose jis parodė, kad šioje valstijoje kolektoriaus ekonominis potencialas yra ganėtinai žemas, nors kitą vertus, jis konkuruotų su elektros energija, bet jo naudojimas yra labiau rekomenduojamas dideliems gyvenamiesiems ir naujiems pastatams.

Dymond ir Kutscher [15; 16], naudodamiesi vamzdelių tinklu, sukūrė srauto tekėjimo modelį, kuris leido greitai atlikti srauto tekėjimo skaičiavimus, nesinaudojant baigtinių elementų ir tūrių metodu. Modelis buvo sukurtas naudojantis vamzdelių tinklu ir masės balansu šio tinklo mazguose, o tai leido stebėti slėgio pokyčius visame kolektoriuje. Kai šis metodas pasiteisino, sekantis žingsnis buvo atliktas naudojantis energijos balanso lygtimi. Srautai buvo nustatyti pagal fluido savybes, gautas iš temperatūrų. Šis pavyzdys parodė kolektoriaus, kurio kraštinių ilgiai yra 5 m, srauto greičius, temperatūras ir efektyvumą. Šiuos rezultatus jie palygino su termografine nuotrauka ir, kruopščiai įvertinę, patvirtino, kad rezultatai buvo panašūs.

Carpenter ir Meloche [17] atliko kolektoriaus skaičiavimus naudodamiesi „*RETScreen*“ programa, o gautus rezultatus palygino su „*Swift*“ programos rezultatais. Skaičiavimuose buvo įvertinti šilumos energijos sutaupymai, šilumos susigrąžinimas per išorinę pastato atitvarą ant kurios sumontuotas kolektorius, ir šilumos maišymosi patalpos tūryje sutaupymai (angl. *destratification savings*). Skaičiavimai buvo atlikti remiantis vidutiniais kiekvieno mėnesio eksperimentiniais rezultatais. Išvadose autoriai teigia, kad nors gauti rezultatai, naudojant šias dvi skirtingas programas, nežymiai skiriasi, jos yra priimtinos atlikti ekonominius ir energinius skaičiavimus.

Wang [18], naudodamasis skaičiuojamųjų fluidų dinamikos (angl. *CFD*) programa, sukūrė neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus modelį ir palygino jo veikimo charakteristikas su kitais kolektoriais, naudojamais tiekiamojo oro šildymui. Tyrimo rezultatai parodė, kad naudojimasis skaičiuojamųjų fluidų dinamikos modeliais gali palengvinti ir praplėsti atliekamus kolektoriaus tyrimus (žr. 3 pav).



3 pav. Wang pratakaus saulės kolektoriaus skaitinis modelis (kairėje - temperatūros pasiskirstymas kolektoriuje, dešinėje – oro judėjimo greitis kolektoriuje [18])

Frank [19] sukūrė neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus modelį, kuris atitiko esantį Kirgizijoje. Šio kolektoriaus šiltas oras buvo naudojamas vandens šildymui. Kuriant modelį buvo atsižvelgta į įprastus kolektoriaus parametrus ir į tokius kaip – konvekciniai šilumos nuostoliai, kurie yra nežymūs, spindulių sugerties koeficientą, priklausomai nuo kolektoriaus pasvirimo kampo, ir pastato dydį. Autoriaus įvertinimais gauta, kad šios sistemos kaina sudarė 0,50 eur/kWh, kas tuo metu buvo mažiau už dujų kainą rinkoje.

Leon ir Kumar [20], siekdami ištirti svarbiausius kolektoriaus parametrus reikalingus atliekant džiovinimo funkciją, sukūrė savo modelį susiedami teorines analizes, skaitinius modelius ir eksperimentinius tyrimus. Didžioji dalis atliktų tyrimų buvo skirti tiriant kolektoriaus panaudojimą pastatų vėdinimo sistemose. Jų rezultatuose yra pateikiami pagrindiniai parametrai reikalingi tiekti 45–55 °C temperatūros orą, tai – kolektoriaus spindulių sugerties koeficientas, žingsnis tarp skylių ir oro tekėjimo greitis, o kolektoriaus juodumo laipsnis ir poringumas turi nedidelę reikšmę.

Delisle [21] sukūrė „TRNSYS“ modelį, kuriame kolektorius yra naudojamas kartu su saulės fotovoltiniais elementais (toliau PV). Ji pritaikė Summers [13] ir Maurer [35] tyrimo principus, kurie atsižvelgė į vėjo ir trapecinio profilio įtaką kolektoriaus veikimui. Šiame kolektoriaus modelyje PV elementai yra išdėstyti visame kolektoriaus plote arba ant viršutinio gofruoto paviršiaus. Atlikti tyrimai parodė, kad, naudojant kolektorių, pratekantis oro srautas pro PV elementus sumažina jų temperatūrą ir tai padidina pagaminamos elektros kiekį.

Moaveni [22] sukūrė skaitinį neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus modelį esančio Breck mokykloje Minesotoje. Atliekant šio modelio tyrimą buvo įvertintas temperatūros prieaugio dydis, atgauti šilumos nuostoliai per išorinę pastato atitvarą, energijos sutaupymai ir kolektoriaus efektyvumas. Skaičiavimai buvo atlikti remiantis šilumos perdavimo per atitvarą metodu. Visi šio modelio rezultatai buvo palyginti su įrengto kolektoriaus atliktais matavimais. Gauta, kad energijos sutaupymai, gauti modeliavimo būdu, yra didesni nei faktiškai išmatuoti, o skirtumas tarp jų yra 13,8 %. Autorius nurodo, kad šis skirtumas yra gautas dėl skaičiavimuose naudotos vidutinės mėnesio išorės oro temperatūros, vietoj vidutinės valandinės temperatūros.

Shukla [23] atliko trijų skirtingų modelių palyginimą. Skaičiavimai buvo atlikti naudojantis „RETScreen“ ir „Swift“ programomis. Gautuose rezultatuose yra pateikiami pagamintos šiluminės energijos kiekiai. Atlikus skaičiavimus, naudojantis „Swift“ programa, suteiktos šiluminės energijos kiekis daugiau nei kelis kartus viršija gautus skaičiuojant „RETScreen“ programa.

2.3. Eksperimentiniai tyrimai

Kutscher [9; 24] atliko neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinį tyrimą, kurio metu parodė, kad oro debitas, žingsnis tarp skylių, jų skersmuo ir vėjo greitis yra esminiai parametrai vertinant kolektoriaus šilumos perdavimą. Tyrimai buvo atlikti esant nuliniam vėjo greičiui ir trimis skirtingoms greičio vėrtėms. Gauti rezultatai leido numatyti kolektoriaus šilumos perdavimo efektyvumą, o sukurta slėgio nuostolių įvertinimo metodika, palengvino projektuotojų darbą parenkant reikalingą ventiliatorių. Eksperimentinio tyrimo matavimo duomenys parodė, kad šilumos nuostoliai, atsirandantys dėl vyraujančio vėjo, yra nežymūs.

Delisle [21] be skaitinio vertinimo taip pat atliko eksperimentinį tyrimą, kurio modelyje PV elementai buvo sumontuoti tik kolektoriaus viršutinėje dalyje (4 pav.). Atlikto eksperimentinio tyrimo rezultatai buvo palyginti su Summers [13] ir Dymond [15] modelių rezultatais. Rezultatuose teigiama, kad kolektoriaus paviršiaus ir tiekiamojo oro temperatūros, gautos modeliavimo metu, buvo šiek tiek aukštesnės lyginant su eksperimentinio tyrimo reikšmėmis. Autorius šį skirtumą pirmiausia grindžia tuo, kad šiame modelyje naudojamas vėjo sukuriamas šilumos nuostolių koeficientas neįvertina vėjo krypties ir kolektoriaus trapecinės formos profilio, o antra – kolektoriaus paviršiaus temperatūra ir debitas nėra visiškai tolygūs eksperimento metu. Gauta, kad „TRNSYS“ modelis pervertino generuojamos elektros kiekį $50 \div 100 \text{ W/m}^2$, tačiau, esant nuliniam oro debitui, „TRNSYS“ ir eksperimentinio metu generuojamos elektros kiekiai buvo labai panašūs.



4 pav. Delisle eksperimentinio tyrimo modelis (kairėje – kolektoriaus išorė su PV elementais, dešinėje – matavimo įranga [21])

Weerakoon [25], atlikdamas eksperimentinį tyrimą, sukonstravo pratakaus saulės kolektoriaus modelį, kuriame pritaikė įprastus skardos lakštus, naudojamus pastatų stogų dengimui, kaip absorbuojantįjį paviršių. Gauti matavimų rezultatai parodė, kad kolektoriaus tiekiamojo oro temperatūros prieaugis siekė $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, o optimaliausias kolektoriaus paviršiaus poringumas yra $0,2\text{ \%} \div 0,4\text{ \%}$. Tyrimų metu nustatyta, kad sumažėjęs oro srautas pro kolektoriaus paviršių ir aukštas vėjo greitis sumažina kolektoriaus veikimo efektyvumą.

Badache [26] atliko eksperimentinį tyrimą, kurio tikslas buvo sumodeliuoti ir optimizuoti pratakaus saulės kolektoriaus veikimą, atkreipiant dėmesį į keturis pasirinktus veiksnius – skylutės skersmenį, kolektoriaus paviršiaus padengimą, saulės spinduliuotės intensyvumą ir oro srautą. Atlikęs tyrimą, autorius gavo optimaliausią šių keturių parametrų derinį, kuris užtikrina $70\text{--}80\text{ \%}$ kolektoriaus veikimo efektyvumą.

Gao [27] sukūrė neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus modelį, kurio bendras plotas buvo $2,5\text{ m}^2$. Tyrimas buvo atliktas keturių dienų laikotarpiu, kurio metu buvo stebimas kolektoriaus efektyvumo kitimas. Nors šio tyrimo metu oro sąlygos buvo praktiškai vienodos, tačiau dienos vidutinis kolektoriaus efektyvumas kito nuo $61\text{ \%}$ iki $78\text{ \%}$. Taip pat nustatyta, kad temperatūros prieaugis mažėja, o kolektoriaus efektyvumas didėja sulig augančiu tiekiamojo oro debitu.

Moaveni [28] atliko tyrimą, kurio metu pagrindinį dėmesį sutelkė į šilumos kiekį, akumuliuojamą išorinėje pastato atitvaroje dėl veikiančio pratakaus saulės kolektoriaus. Autorius taip pat aptaria kaip šis naudingas reiškinys turėtų atsispindėti kolektoriaus efektyvumo

išraiškoje. Moaveni matavimais nustatė, kad, naudojant pratakų saulės kolektorių, nakties metu atitvaros išorinio paviršiaus temperatūra buvo aukštesnė. Autorius teigia, kad ši naudinga šiluma turi būti įtraukta į kolektoriaus efektyvumą, o tai lemtų aukštesnę jo vertę.

Hoy-Yen Chan [29] tirdamas kolektoriaus tiekiamojo oro temperatūrą, savo tyrime įtraukė oro temperatūros pokyčio išilgai kolektoriaus kryptimi stebėjimus. Pateiktuose rezultatuose teigiama, kad, orui tekant vertikalia kryptimi, jo temperatūra auga tolygiai nuo kolektoriaus apačios iki viršutinės dalies. Šie gauti rezultatai buvo priešingi sulig iki tol atliktais tyrimais, kuriuose buvo teigiama, kad oro temperatūra visuose kolektoriaus vidiniuose taškuose yra vienoda. Autorius nurodo, kad, esant tolygiam oro debitui, temperatūros prieaugis išilgai kolektoriaus aukščio kinta nuo 30 % iki 60 %, nuo didžiausios jos vertės.

Hollick [30] teigia, kad PV elementai, generuodami elektros energiją, tuo pačiu metu išskiria šilumą, kurios kiekis yra didesnis už elektros. Todėl jis pasiryžo apjungti PV elementus ir neįstiklintą pratakų saulės kolektorių bendram darbui. Autorius sukūrė bendrą šios sistemos modelį ir tyrimais įvertino pagaminamos elektros bei šiluminės energijos kiekį. Rezultatai parodė, kad apjungtas šių dviejų skirtingų sistemų modelis panaudoja didesnę saulės energijos kiekį ir tuo pačiu jos efektyvumą, nei veikiant šioms sistemoms atskirai.

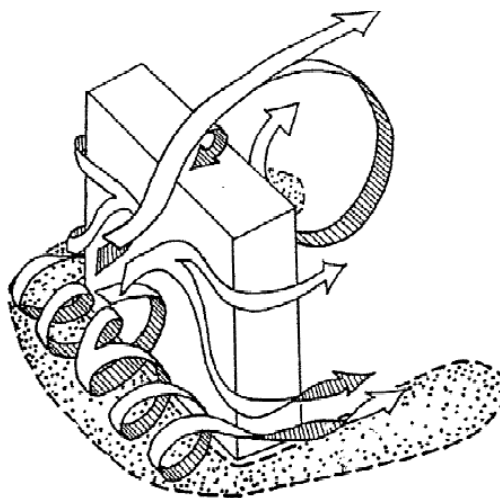
Naveed [31] atliko tyrimą, kurio metu palygino PV elementų, sumontuotų ant pratakaus saulės kolektoriaus paviršiaus, generuojamos elektros energijos kiekį ir atsipirkimo laikotarpį su įprastų PV modulių pagaminta elektra. Atliktų tyrimų rezultatai parodė, kad PV elementų temperatūra sumažėjo 3 °C. Šie rezultatai buvo panaudoti skaičiuojant skaitinį modelį, kurio galia buvo priimta 3 kW ir sumontuota ant 50 m² pratakaus saulės kolektoriaus paviršiaus. Atlikus skaičiavimus, pagal eksperimentinio tyrimo rezultatus, nustatyta, kad tokio tipo sistemai reikėtų trims 75 W PV elementais mažiau, o atsipirkimo laikas sumažėtų nuo 23 iki 15 metų.

Athienitis [32] sukūrė pratakaus saulės kolektoriaus modelį su integruotais PV elementais, kurie dengė 70 % kolektoriaus paviršiaus ploto ir turėjo aukštesnę saulės spinduliuotės sugerties koeficientą. Formuluodamas išvadas autorius priėmė, kad elektros energijos vertė yra mažiausiai keturis kartus aukštesnė už šiluminę energiją, tokiu atveju gauta, kad šios bendros sistemos terminis efektyvumas išauga nuo 7 % iki 17 %.

Barker [33] teigia, kad visuose atliktuose tyrimuose pasigenda slėgio kritimo, atsirandančio visame kolektoriuje, poveikio įvertinimo jo veikimo efektyvumui. Kaip pagrindinius slėgio kritimą charakterizuojančius parametrus autorius nurodo oro debitą, kolektoriaus paviršiaus poringumą ir oro savybes (klampumas, tankis ir pan.). Buvo atlikti rinkoje esančių šešių skirtingų, naudojamų kolektoriaus paviršiui, lakštų tyrimai – trijų pagamintų iš aliuminio ir trijų plieninių. Tyrimo tikslas buvo charakterizuoti šių gaminių slėgio kritimą kaip funkciją nuo pagrindinių oro savybių. Buvo išmatuotas slėgio kritimas, oro debitas, temperatūra ir santykinis

drėgnis. Šie matavimai buvo naudojami kuriant metodiką, kuri leistų nustatyti slėgio nuostolius visame kolektoriuje. Pagal Nacionalinės Atsinaujinančios Energijos Laboratorijos atliktų tyrimų rekomendacijas, slėgio kritimas kolektoriuje turi būti bent 25 Pa, kad vyktų šilumos mainai tarp kolektoriaus paviršiaus ir pratekančio oro. Autorius pateikia siūlymus kaip išvengti oro tekėjimo iš kolektoriaus atsiradimo.

Meier [45] savo baigiamajame magistro darbe atliko trijų dimensijų (3D) vėjo aptekėjimo apie pastatą ir jo įtakos neįstiklinto pratakais saulės kolektoriaus veikimui tyrimą. Eksperimentas buvo atliktas Kanados Pakrantės Apsaugos bazėje, kurioje buvo naujai įrengtas gamintojo „SolarWall“ kolektorius.



5 pav. Meier oro srauto aptekėjimo apie pastatą modelis [45]

Tyrimo metu buvo išmatuotos temperatūros, tiekiamojo oro debitas, saulės spinduliuotė, vėjo greitis ir kryptis, o nustatant 3D oro aptekėjimą apie kolektorių, jo centre buvo įrengtas ultragarsinis anemometras. Išvadose yra teigiama, kad vėjo kryptis turi poveikį kolektoriaus efektyvumui ir naudingumui. Kolektoriaus efektyvumas buvo aukštesnis esant vėjo tekėjimui virš pastato nei esant lygiagrečiam su pastato atitvara. Tačiau autorius pastebėjo, kad, esant oro tekėjimui virš pastato stogo, šalia kolektoriaus paviršiaus atsirasdavo šilto oro sąstingio zonos, kurių užsistovėjimas oro siurbimo zonoje padidindavo kolektoriaus efektyvumą.

Fleck [34], tyrinėdamas vėjo įtaką kolektoriaus veikimo efektyvumui, atliko tokį patį eksperimentinį tyrimą. Autorius savo eksperimente naudojo tuos pačius matavimo prietaisus kaip ir Meier [45]. Fleck kolektoriaus tyrimą atliko žiemos metu, kurio plotas buvo 63 m^2 , o vėjo sklaidos duomenys buvo matuojami 61 cm atstumu nuo kolektoriaus paviršiaus. Tyrimais nustatyta, kad šalia kolektoriaus paviršiaus vyrauja didelis oro turbulentiškumas, kuris įtakoja šilumos perdavimą. Tačiau labiausiai autorių nustebino tai, kad didžiausia kolektoriaus efektyvumo reikšmė pasiekama ne prie nulinio vėjo greičio, kas buvo teigiama Kutscher [9] atliktame tyrime, o tarp 1 ir 2 m/s.

Maurer [35] baigiamajame magistro darbe atliko eksperimentinį neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus tyrimą, kurio tikslas buvo įvertinti kolektoriaus veikimo našumą ir ekonominius rodiklius. Kolektorius, kurį tyrinėjo, yra įrengtas Šiaurės Karolinoje ant gamyklos išorinės atitvaros. Tačiau tyrinédamas susidūrė su problema – oro srautas pratekantis pro kolektoriaus paviršių buvo per mažas, kas lėmė konvekcinį šilumos nuostolių atsiradimą. Nors kolektorius ir tiekė ganėtinai šiltą orą, tačiau dažniausiai, dėl per mažo srauto, šiltas oras tiesiog užsistovédavo kolektoriaus viduje. Maurer taip pat sukūrė kolektoriaus modelį naudodamasis „*TRNSYS*“ programa. Rezultatuose autorius nurodo, kad konvekciniai šilumos nuostoliai yra svarbūs naudojant gofruoto profilio kolektoriaus lakštus, tačiau norint tai tiksliau įvertinti, modelis turėtų būti papildytas skaičiuojamųjų fluidų dinamikos (SFD) ir temperatūros susisluoksniavimo tūryje įvertinimais. Maurer papildomai į savo darbą įtraukė vasaros sezono tyrimą, nustatant šilumos pritekį. Rezultatai parodė, kad yra tikimybė, jog vasaros metu pratakus saulės kolektorius gali sukelti nepageidaujamus šilumos pritekį, tačiau nurodo, kad turėtų būti atlikti papildomi tyrimai, kurie įvertintų oro srauto tekėjimo charakteristikas, naudojant apeigo vožtuvą.

Cordeau [36] atliko dviejų vienodų neįstiklintų pratakų saulės kolektorių broilerių paukštyne eksperimentinį tyrimą, kurie yra naudojami kaip pirminio oro šildytuvai. Kiekvieną iš šių paukštynų sudaro trys aukštai, kurių kiekvienas turi po atskirą $73,65 \text{ m}^2$ ploto pratakų saulės kolektorių (bendras kolektorių plotas vienam tvartui – 221 m^2). Tyrimais nustatyta, kad kolektoriaus efektyvumas svyravo nuo 35 % iki 64 % esant didžiausiai 6 % matavimų paklaidai. Autorius priėmęs, kad dujų energijos kaina yra 0,08 Kanados dol./kWh gavo 4,7 % investicijų metinį pelningumą (ROI). Atlikus šilumos balanso tyrimą, nustatyta, kad didžiausi šilumos nuostoliai – apie 30 %, atsiranda dėl šilumos susisluoksniavimo (angl. *stratification*) patalpos tūryje.

Bambara [37] pristatė pratakaus saulės kolektoriaus, integruoto PV elementais, veikimo tyrimą. Šios sistemos užimamas 288 m^2 plotas gali generuoti 25 kW elektros ir maždaug 75 kW šiluminės energijos, kuri naudojama $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ tiekiamojo oro šildymui. Norint parodyti šios kombinuotos sistemos energinį potencialą naujai statomuose ar modernizuojamuose pastatuose, išnaudojant saulės energiją elektros ir šilumos gamybai, buvo nustatytas jos 50 % efektyvumas.

Tebbe ir Moavenni [38] atliko Minesotoje esančių pratakų saulės kolektorių veikimo analizę. Pagal atliktus matavimus autoriai nustatė, kad kolektorių efektyvumas svyruoja tarp 30 % ir 55 %, o tai yra žemesnis rezultatas nei nurodo dauguma gamintojų ar atliktų tyrimų autoriai. Metiniai energijos sutaupymai svyravo $233 \div 761 \text{ kWh/m}^2$ intervale. Šis mažiausias sutaupymas yra žemesnis nei nurodo gamintojai, kurie teigia, kad sistemoje yra per mažas oro debitas.

Kozubal [39] savo darbe atliko kolektoriaus ekonominį vertinimą ir nustatė, kad kolektorius gali lengvai pasiekti ir viršyti 10 % VGN reikšmę, esant tinkamai nustatytam jo veikimui. Autorius taip pat atliko 743 m² ploto kolektoriaus tyrimą, kuris yra sumontuotas ant „Walmart“ prekybos centro Kolorado valstijoje. Pagal atliktus matavimus nustatyta, kad šis kolektorius išnaudodavo tik 10 % saulės energijos, kai tuo tarpu tokio kolektoriaus galimybės viršija 50 % reikšmę. Autorius pateikė išvadą, kad toks žemas kolektoriaus efektyvumas yra dėl netinkamo nustatyto veikimo, kurį lėmė per didelis kolektoriaus plotas.

2.4. Kolektoriaus pritaikymai

Pesaran [40] atliko tyrimą naudojant neįstiklintą pratakų saulės kolektorių desikantiniam vėsinimui. Sukurtas kompiuterinis modelis buvo palygintas su dažniausiai naudojamais įstiklintais plokščiaisiais kolektoriais, kadangi pastarieji yra brangesni. Tyrimo metu nustatyta, kad, naudojant neįstiklintą kolektorių, sistemos našumas yra mažesnis nei naudojant įstiklintus kolektorius. Kaip priežastis tokio rezultato yra nurodomas kolektoriaus nesugebėjimas panaudoti adsorbcijos išskiriamą šilumą, esant nusausinimo procesui. Vienintelė teigiama neįstiklinto pratakaus kolektoriaus savybė – 44 % mažesnės investicijos, tačiau reikalingas kolektoriaus plotas yra 69 % didesnis, nei įstiklinto kolektoriaus.

Brunger [41] išleido ataskaitą skirtą projektuotojams ar norintiems įsirengti neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus sistemą. Šiame leidinyje yra aprašyti keturi skirtingi kolektoriai ir jų veikimo principai.

Hollick [42] pristatė galimybę panaudoti kolektorių žemės ūkio produktų džiovinimui, kadangi įprastos džiovinimo sistemos sunaudoja milžinišką energijos kiekį. Savo tyrime jis aprašo atliktą galimybių studiją, panaudojant kolektorių prieskonių džiovinimui Indijoje. Autorius taip pat nurodo, kad gamintojai gali pereiti prie pratakaus saulės kolektoriaus naudojimo, su minimaliais pokyčiais sistemoje, kurie atsipirktų per dvejus metus.

Leon [43] atliko teorinį ir eksperimentinį hibridinės saulės – biomasės šildymo sistemos tyrimą. Šios sistemos pagrindą sudaro neįstiklintas pratakus saulės kolektorius ir biomasės gazifikatorius, kurie užtikrina reikiamos temperatūros oro tiekimą esant didesnei nei 90 % kasdieniai apkrovai. Pagal atliktą analizę, kiekvienas šios sistemos komponentas buvo suprojektuotas ir pagamintas. Vėliau apjungus abi šias sistemas buvo atliktas eksperimentinis tyrimas.

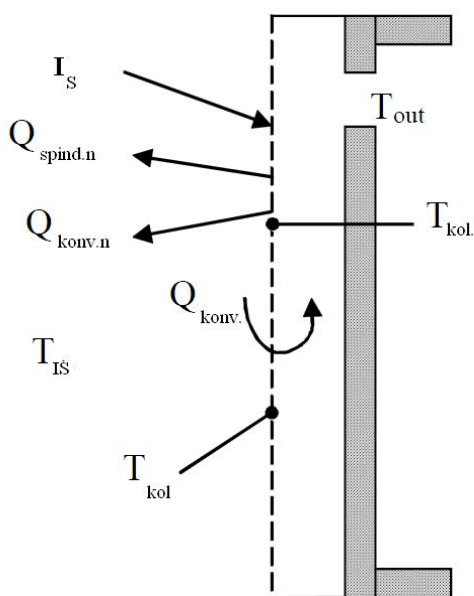
Hassanain [44] atliko bandymus panaudojant neįstiklintą pratakų saulės kolektorių keturių skirtingų prieskonių džiovinimui. Kolektoriaus bandymai buvo atlikti Egipte ir palyginti su kitais dvejais tradiciniais džiovinimo metodais – džiovinant lauke tiesioginių saulės spindulių pagalba ir pavėsinėje. Tyrimu metu buvo atsižvelgta kokią poveikį daro kiekvienas iš šių džiovinimo

metodų prieskonių džiovinimo lygiui ir santykiui bei kaip išsaugoja augalo kokybę (eterinių aliejų kiekį, aromatą, skonį ir pan.). Rezultatai parodė, kad vietoje naudojamų tradicinių džiovinimo metodų, pratakus saulės kolektorius išsaugoja rozmarinų ir mairūnų didesnę aliejaus kiekį, o tuo pačiu ir geresnę jų kokybę.

3. NAUDOTINI TYRIMO METODAI

3.1. Šilumos mainų teorija

Pirmieji neįstiklinto pratakus saulės kolektoriaus šilumos mainų tyrimai buvo atlikti Christensen ir Kutscher 1990 m. [2]. Autoriai suformulavo pagrindinę šilumos mainų teoriją plokštiesiems pratakams saulės kolektoriams. Kolektoriaus energinis – šiluminis balansas yra išreiškiamas kaip kolektoriaus absorbuojančio paviršiaus atiduotas šilumos kiekis pratekčiam pro jį orui yra lygus kolektoriaus paviršiaus absorbuotam spinduliavimo energijos kiekiui, įvertinus konvekcinius ir spinduliavimo nuostolius. Žemiau pateikiama kolektoriaus energijos balanso schema:



6pav. Kolektoriaus energijos balansas [35]

Energijos balanso pagrindinė lygtis pateikiama žemiau:

$$\rho \cdot C_p \dot{M} (T_{out} - T_{Is}) = I_s A_K \varepsilon_K - Q_{Spind.N.} - Q_{Konv.N.} \quad (1)$$

Čia:

ρ – oro tankis, kg/m³;

C_p – savitoji oro šiluma, J/kgK;

$\dot{M}$ – tiekiamojo oro debitas, m³/h;

T_{Out} – tiekiamojo oro temperatūra, °C;

T_{Is} – išorės oro temperatūra, °C;

I_s – saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m²;

A_K – kolektoriaus plotas, m²;

ε_K – kolektoriaus spinduliavimo sugerties koeficientas;

$Q_{Spind.N.}$ – spinduliavimo nuostoliai, W;

$Q_{Konv.N.}$ – konvekciniai šilumos nuostoliai, W.

Šioje šilumos balanso lygtyje nėra įvertinti šilumos mainai su išorine pastato atitvara. Taip pat neatsižvelgta į vyraujančio vėjo poveikį. Tai aptariama sekančiame skyrelyje (žr.sk.3.2).

Kadangi kolektoriaus paviršiaus plotas yra perforuotas, todėl tikrasis plotas yra apskaičiuojamas kaip santykis tarp kolektoriaus ploto A ir kolektoriaus ploto įvertinus perforuotų skylių plotą A_K :

$$\frac{A}{A_K} = 1 - \sigma; \quad (2)$$

Čia dydis σ yra kolektoriaus ploto poringumo koeficientas:

$$\sigma = 0,907(D/P)^2 \quad (3)$$

Čia:

D – skylutės skersmuo, m;

P – žingsnis tarp skylių, m.

Iš balanso lygties (1) matome, jog pagrindiniai du nežinomieji yra šilumos nuostoliai dėl spinduliavimo $Q_{Spind.N.}$, W, ir konvekcijos $Q_{Konv.N.}$, W. Priėmus prielaidą, jog kolektoriaus paviršius yra pilkas kūnas ir temperatūra visame paviršiuje yra pasiskirsčiusi vienodai, tuomet šilumos nuostoliai dėl spinduliavimo:

$$Q_{spind.n.} = \varepsilon_{kol} \sigma_{S.B.} A_K \left(T_{kol}^4 - F_{kol-dang.} T_{dang.}^4 - F_{kol-žem.} T_{žem.}^4 \right) \quad (4)$$

Čia:

ε_{kol} – kolektoriaus paviršiaus spinduliavimo koeficientas;

$\sigma_{S.B.}$ – Stefano-Bolcmano konstanta, (5,67*10⁻⁸ W/m²K⁴);

T_{kol} – kolektoriaus paviršiaus temperatūra, °C;

$T_{dang.}$ – dangaus temperatūra, °C;

$T_{žem.}$ – žemės paviršiaus temperatūra, °C;

$F_{kol-dang.}$ – paviršiaus regos koeficientas tarp kolektoriaus ir dangaus;

$F_{kol-žem.}$ – paviršiaus regos koeficientas tarp kolektoriaus ir žemės paviršiaus.

Paviršių regos kampai yra išreiškiami kaip funkcija priklausanti nuo kolektoriaus pasvyrimo kampo:

$$F_{kol-dang.} = \frac{1 + \cos \beta_{kol}}{2}; \quad F_{kol-žem.} = \frac{1 - \cos \beta_{kol}}{2}; \quad (5)$$

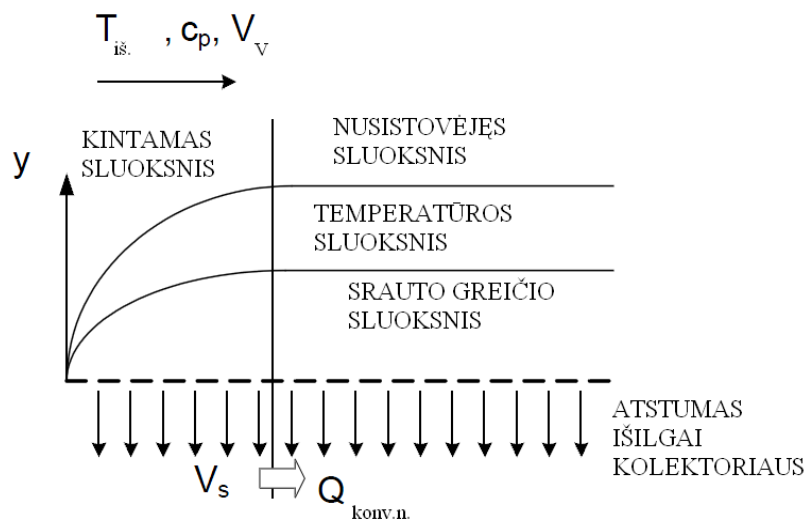
Jei paviršių regos kampų nevertiname, tuomet:

$$Q_{Spind.N.} = \varepsilon_{kol} \sigma_{S.B.} A_K (T_{Kol}^4 - T_{IS}^4); \quad (6)$$

$$T_{apl.}^4 = 0,5(T_{dang.}^4 + T_{žem.}^4); \quad (7)$$

$$T_{dang.} = 0,0552 \cdot T_{IS}, T_{žem.} \cong T_{IS}; \quad (8)$$

Konvekciniai šilumos nuostoliai susideda iš laminarinių ir turbulentinių, esant natūraliai ar priverstiniai konvekcijai. Šių nuostolių tyrimai buvo atlikti Kutcher [35], kuris apibendrino juos, naudodamasis Schichting [35] atliktais siurbiamo oro srauto per plokštę tyrimo rezultatais. Priėmęs prielaidą, kad srauto tekėjimas per perforuotą kolektoriaus dangą yra laminarinis, o siurbimas yra nusistovėjęs, atliktais analitiniais bandymais nustatė, jog konvekciniai šilumos nuostoliai atsiradavo šalia kolektoriaus vidinio paviršiaus pasienio sluoksnio.



7 pav. Temperatūros ir greičio pasienių sluoksnių kitimas perforuotame paviršiuje [35]

Šioje dalyje temperatūros ir greičio sluoksnio storis yra augantis, tačiau tam tikroje kolektoriaus dalyje jie nusistovi ir jų storis nebekinta, todėl šioje dalyje nevyksta šilumos mainai tarp nusistovėjusio oro sluoksnio ir kolektoriaus paviršiaus. Prieita prie išvados, kad šiame nusistovėjusiame tekėjimo sluoksnyje nėra konvekcinių šilumos nuostolių $Q_{Konv.N.}$, jie atsiranda

tik pasienio sluoksnyje, kuriame vyksta temperatūros ir srauto greičio kitimas. Nagrinėjamų sluoksnių iliustracija pateikiama 7 pav.

Kutcher [35] padarė išvadą, jog priimta prielaida dėl laminarinio srauto pasienio sluoksnio, naudojant pratakus saulės kolektorius su dideliais siurbiamo oro greičiais, yra priimtina. Vadovaujantis šia atlikta studija, Kutcher nustatė, jog natūralios konvekcijos nuostoliai yra nežymūs, naudojant didelio pločio pratakus saulės kolektorius, lyginant su priverstinės konvekcijos šilumos nuostoliais ir išreiškė konvekcinių šilumos nuostolių koeficientą $\alpha_{konv.n.}$, W/m^2K :

$$\alpha_{konv.n.} = 0,82 \cdot \frac{V_v \nu \rho c_p}{L V_s}; \quad (9)$$

Čia:

V_v – vėjo greitis, m/s;

V_s – oro srauto greitis, m/s;

L – kolektoriaus plokštės ilgis, m;

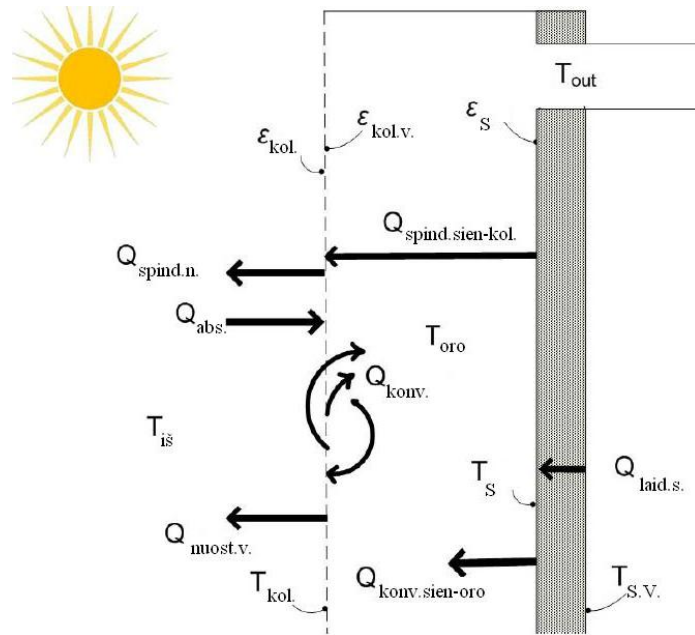
ν – oro kinematinė klampa, m^2/s .

Atliekant tyrimus ir nustatant konvekcinius šilumos nuostolius, esant turbulentiniam srautui, Kutcher pasinaudojo sukauptais Verrolet [35] duomenimis ir juos išanalizavęs, priėjo prie išvados, jog šilumos nuostoliai, esant turbulentiniam srauto tekėjimui, yra didesni nei esant laminariniam srautui, tačiau jie vis tiek išliko nežymūs.

Kutcher taip pat nustatė, jog pratakaus saulės kolektoriaus efektyvumas yra beveik nekintantis ir nebe priklausantis nuo vėjo, esant srauto pasiurbimo greičiui didesniai nei 0,05 m/s.

3.2. Papildytas kolektoriaus šilumos balansas

Pagrindiniame kolektoriaus šiluminiame balanse nebuvo įvertinti šilumos mainai tarp kolektoriaus ir pastato išorinės atitvaros, taip pat neatsižvelgta į atsirandačius konvekcinius šilumos nuostoliai dėl išorės vėjo poveikio. Todėl yra pateikiama papildyta balanso lygtis ir schema 8 pav.:



8 pav. Kolektoriaus papildytas energijos balansas [35]

Papildyta kolektoriaus energijos balanso lygtis:

$$Q_{abs.} + Q_{spind.sien-kol.} = Q_{konv.} + Q_{spind,n.} + Q_{nuost.v.} \quad (10)$$

Čia:

$Q_{abs.}$ – kolektoriaus paviršiaus absorbuojama energija, W;

$Q_{spind.sien-kol.}$ – atitvaros išorinio paviršiaus spinduliuojama energija, W;

$Q_{konv.}$ – kolektoriaus perduotas šilumos kiekis orui, W;

$Q_{spind,n.}$ – kolektoriaus spinduliavimo nuostoliai, W;

$Q_{nuost.v.}$ – konvekciniai šilumos nuostoliai į aplinką (dėl vėjo), W.

Šilumos kiekis, kurį absorbuoja kolektoriaus paviršius $Q_{abs.}$ W, yra apskaičiuojamas:

$$Q_{abs.} = I_s A_{kol} \varepsilon_K; \quad (11)$$

Čia:

I_s – saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m²;

$A_{kol.}$ – kolektoriaus paviršiaus plotas, m²;

ε_K – kolektoriaus paviršiaus spinduliavimo sugerties koeficientas.

Šiluma patenkanti į kolektorių per išorinę pastato atitvarą $Q_{laid.s.}$, W:

$$Q_{laid.s.} = Q_{konv.sien-oro.} + Q_{spind.sien-kol.}, W; \quad (12)$$

Čia:

$Q_{konv.sien-oro.}$ – šiluma atiduodama nuo išorinės atitvaros tiekiamam orui, W;

$Q_{spind.sien-kol.}$ – išorinės atitvaros spinduliuojamas šiluma, W;

Šilumos srautas perduodamas nuo kolektoriaus paviršiaus šildomam orui konvekcijos būdu $Q_{konv.}$, W:

$$Q_{konv.} = \dot{M} c_p (\vartheta_{oro} - T_{iš}) \quad (13)$$

Čia:

$\dot{M}$ – oro srauto debitas, m³/val.;

c_p – savitojo oro šiluma, J/kgK;

T_{oro} – tiekiamojo oro temperatūra, °C;

$T_{iš.}$ – išorės oro temperatūra, °C.

Šiluma kuri yra atiduodama kolektoriaus paviršiui nuo išorinės atitvaros spinduliavimo būdu $Q_{spind.sien-kol.}$ W, apskaičiuojama:

$$Q_{spind.sien-kol.} = \alpha_{ss} A_{kol.} (\vartheta_s - T_{kol.}) \quad (14)$$

Čia:

α_{ss} – šilumos perdavimo koeficientas spinduliavimo būdu tarp išorinės atitvaros ir kolektoriaus vidinio paviršiaus, W/m²K;

T_{kol} – kolektoriaus paviršiaus temperatūra, °C;

T_s – išorinės atitvaros paviršiaus temperatūra, °C;

Šilumos perdavimo koeficientas spinduliavimo būdu tarp išorinės atitvaros ir kolektoriaus vidinio paviršiaus α_{ss} W/m²K, apskaičiuojamas:

$$\alpha_{ss} = \frac{\sigma_{S.B.} (\vartheta_s^4 - T_{kol.}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_{kol.}} - 1} \quad (15)$$

Čia:

$\sigma_{S.B.}$ – Stefano-Bolcmano konstanta, (5,67*10⁻⁸W/m²K⁴);

ε_{kol} – kolektoriaus paviršiaus spinduliavimo koeficientas;

ε_s – išorinės atitvaros paviršiaus spinduliavimo koeficientas.

Šilumos kiekis kurį išorinė atitvara atiduoda šildomam orui yra lygi šilumos nuostoliams per šią atitvarą $Q_{laid.s.}$, W:

$$Q_{laid.s.} = U_s A_s (\vartheta_{s.vid.} - T_s) \quad (16)$$

Čia:

$T_{S,vid.}$ – išorinės atitvaros vidaus paviršiaus temperatūra, °C;

U_S – atitvaros šilumos laidumo koeficientas, W/m²K;

A_S – atitvaros plotas, m².

Šilumos kiekį, kurį atiduoda išorinės atitvaros paviršius tiekiamam orui $Q_{konv.siena-oro}$, priklauso nuo oro srauto greičio kolektoriuje. Todėl buvo įvesti pataisos koeficientai esant laminariniam srautui per kolektoriaus paviršių:

$$Q_{konv.siena-oro} = \frac{\lambda_S Nu_{kol.H.}}{H} A_{kol.} (T_{S.} - T_{oro}) = \dot{M} c_p (T_{S.} - T_{oro}); \quad (17)$$

$$Nu_{kol.H.} = \begin{cases} 0,664 Re_H^{0,5} Pr^{0,333}, & kai \rightarrow Re_H < 5 \cdot 10^5 \\ 0,037 Re_H^{0,8} - 871 Pr^{0,333}, & kai \rightarrow Re_H > 5 \cdot 10^5 \end{cases} \quad (18)$$

Čia:

λ_S – išorinės atitvaros šilumos laidumo koeficientas, W/mK;

H – kolektoriaus aukštis, m;

Šilumos nuostoliai dėl konvekcinių šilumos mainų su aplinka, įvertinus vėjo įtaką, $Q_{nuostv.}$

W :

$$Q_{nuostv.} = \alpha_{KV} A_{kol.} (T_{kol.} - T_{iš.}); \quad (19)$$

Čia:

α_{KV} – šilumos perdavimo koeficientas konvekcijos būdu tarp kolektoriaus ir išorės oro dėl vėjo poveikio, W/m²K.

Šilumos perdavimo koeficientas dėl vėjo poveikio α_{KV} W/m²K, yra apskaičiuojamas:

$$\alpha_{KV} = 6,0 + 4,0 \cdot V_V - 76 \cdot V_S; \quad (20)$$

Čia:

V_S – oro srauto greitis, m/s;

V_V – išorės vėjo greitis, m/s.

3.3. Kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas

Kolektoriaus temperatūrinio efektyvumo išraiška buvo aprašyta Kutscher [16]. Šis rodiklis parodo santykinį dydį tarp tiekiamojo oro faktinio temperatūros prieaugio ir galimo didžiausio temperatūros prieaugio. Priėmęs prielaidą, jog kolektoriaus paviršius yra izoterminis, temperatūrinis efektyvumas ϵ įgavo šią išraišką:

$$\varepsilon_T = \frac{T_{oro} - T_{I\check{s}}}{T_{kol.} - T_{I\check{s}}}; \quad (21)$$

Čia:

$T_{I\check{s}}$ – išorės oro temperatūra, °C;

T_{kol} – kolektoriaus paviršiaus temperatūra, °C;

T_{oro} – tiekiamojo oro temperatūra, °C.

Vėliau Kutscher [35] į temperatūrinio efektyvumo išraišką įtraukė pataisos koeficientą Nu_D , kuris leidžia įvertinti šilumos mainus kolektoriaus paviršiaus skylutėse – išorinėje pusėje, šoniniame paviršiuje ir vidiniame paviršiuje:

$$Nu_D = 2,75 \left[\left(\frac{P}{D} \right)^{-1,2} Re_D^{0,43} + 0,011 \sigma Re_D \left(\frac{V_v}{V_s} \right)^{0,48} \right]; \quad (22)$$

Čia:

Re_D – Reinoldso skaičius priklausantis nuo skylutės skersmens ir srauto greičio joje.

$$\begin{aligned} Re_D &= V_D D / \nu; \\ V_D &= V_s / \sigma; \end{aligned} \quad (23)$$

Temperatūrinis efektyvumas ε_T įvertinus pataisos koeficientą Nu_D , kai kolektoriaus paviršiaus porėtumas yra $0,1 \% < \sigma < 5 \%$ ir Reinoldso skaičius yra $100 < Re_D < 2000$:

$$\varepsilon_T = 1 - \exp \left(- \frac{\lambda_{kol} Nu_D (1 - \sigma)}{D \rho V_s c_p} \right); \quad (24)$$

Čia:

λ_{kol} – kolektoriaus paviršiaus šilumos laidumo koeficientas, W/mK;

Van Decker [35], atlikdamas bandymus su neįstiklintu pratakiu saulės kolektoriumi esant skirtingoms paviršiaus medžiagomis, skylių skersmeniui, jų formai, skardos storiui ir laidumo koeficientui, pagal gautus rezultatus, papildė efektyvumo skaičiavimo išraišką įvertindamas šilumos mainus skylutės priekinėje pusėje ε_f , šoninėje ε_h ir vidinėje ε_b :

$$\varepsilon_T = 1 - (1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_b); \quad (25)$$

Šioje lygtyje atskiri efektyvumai išreiškiami:

$$\varepsilon_f = \left(1 + \frac{1,72 Re_s}{Re_v^{0,5}} \right)^{-1}; \varepsilon_b = 1 - \frac{1}{1 + 3,4 Re_b^{1/3}}; \varepsilon_h = 1 - \exp \left[-0,0204 \frac{P}{D} - \frac{20,62t}{Re_h D} \right]; \quad (26)$$

Kur:

$$\text{Re}_v = \frac{V_v P}{\nu}; \text{Re}_s = \frac{V_s P}{\nu}; \text{Re}_b = \frac{V_s P}{\nu \sigma}; \text{Re}_h = \frac{V_s D}{\nu \sigma}; \quad (27)$$

Čia:

t – kolektoriaus skardos storis, m;

ν – oro kinematinė klampa, m^2/s .

Šis Van Decker metodas tinka skirtingo tipo kolektoriaus paviršiams, tačiau tik esant nustatytoms šių kintamųjų riboms: esant oro srauto greičiui pro kolektoriaus paviršių $0,028 < V_s < 0,083$ m/s, vėjo greičiui $0 < V_v < 5$ m/s, skylučių skersmeniui $0,8 < D < 3,6$ mm, kolektoriaus skardos storiui $0,6 < t < 6,5$ mm, kolektoriaus skardos laidumo koeficientui $0,15 < k_k < 200$ W/mK.

3.4. Kolektoriaus efektyvumas

Pratakaus saulės kolektoriaus momentinis efektyvumas η yra išreiškiamas kaip santykis tarp saulės spinduliavimo energijos srauto krintančio ant kolektoriaus paviršiaus ir tiekiamojo oro šilumos kiekio [35]:

$$\eta = \frac{Q}{I_s A_K} = \frac{\dot{M} C_p \varepsilon_T (T_{Kol.} - T_{Iš})}{I_s A_K} = \frac{\dot{M} C_p (T_{Out.} - T_{Iš})}{I_s A_K}; \quad (28)$$

Čia:

Q – šilumos kiekis suteiktas tiekiamam orui, W;

ε_T – temperatūrinis efektyvumas.

Prieš tai nagrinėtas kolektoriaus efektyvumas įvertina tik temperatūrinį efektyvumą, tačiau neįtraukia šilumos nuostolių atsirandančių dėl spinduliavimo į aplinką. Nors išorės oras yra sušildomas nuo kolektoriaus paviršiaus konvekciniu būdu, tačiau šiluminiai nuostoliai dėl spinduliavimo turėtų būti įvertinti. Todėl Kutscher [9] pateikė išraišką, kuri leidžia apskaičiuoti kolektoriaus efektyvumą, kuris įvertina šilumos nuostolius dėl spinduliavimo į aplinką:

$$\eta = \frac{\dot{M} C_p \varepsilon_T (T_{Out.} - T_{Iš})}{I_s A_K} = \frac{\varepsilon_K}{\left(\frac{1 + \alpha_{SK}}{\varepsilon_T \rho C_p V_s} \right)} = \frac{\varepsilon_K}{\left(\frac{1 + \alpha_{SK} A_K}{\dot{M} C_p \varepsilon_T} \right)}; \quad (29)$$

Čia:

ε_K – kolektoriaus paviršiaus spinduliavimo sugerties koeficientas;

α_{SK} – šilumos perdavimo koeficientas spinduliavimo būdu tarp kolektoriaus ir išorės, W/m²K.

Tolimesniuose skyriuose yra aprašomas atliktas neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinis tyrimas, kurio metu kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas ir bendras efektyvumas buvo apskaičiuoti naudojantis šiame skyriuje pateiktomis (21) ir (28) formulėmis.

4. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ŠILDYMO SEZONO METU

4.1. Sistemos aprašymas

Eksperimento metu tiriamas neįstiklintas pratakus saulės kolektorius buvo įrengtas 2011 m. rudenį ant Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos fakulteto II-ųjų rūmų pietinio fasado. Žemiau pateikiamas kolektoriaus bendras vaizdas 9 pav.:

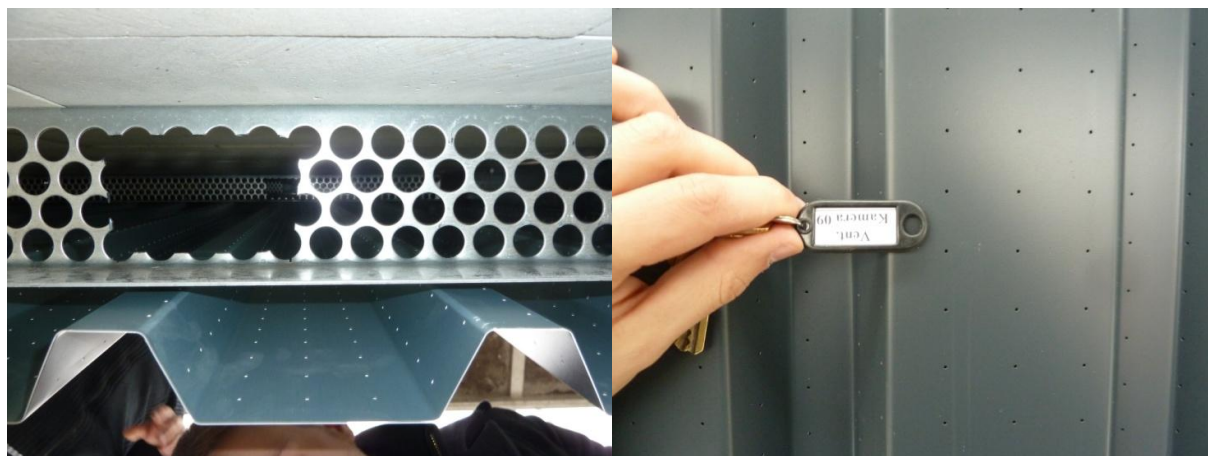


9 pav. Neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus bendras vaizdas (VGTU AIF II rūmai)

Kolektoriaus bendras plotas yra 100 m^2 , plotis – 6 m., aukštis – 16,6 m. Kolektorius yra sudarytas iš trijų sekcijų, kurios yra atskirtos viena nuo kitos. Pirmosios sekcijos plotis 3 m., antrosios – 2 m., trečiosios – 1 m. Kiekvienoje iš šių sekcijų yra sukuriamas priverstinis oro srautas, kuris patenka į bendrą magistralinį ortakį (žr. 12 pav. dešinėje) ir yra galutinai paruošiamas vėdinimo įrenginyje, esančiame laboratorijos patalpose. Kiekvienos sekcijos oro srautas gali būti reguliuojamas įrengtomis rankinėmis balansavimo sklendėmis. Eksperimento metu šios sklendės buvo pilnai atidarytos.

Kolektoriaus svarbiausia ir didžiausią įtaką turinti konstrukcija – absorbuojantis paviršius. Šis paviršius yra pagamintas iš gofruotos – cinkuotos plieninės skardos, kuri yra perforuota 1mm skersmens apvaliomis skylutėmis, pro kurias patenka išorės oras. Atliekant skaičiavimus yra priimta, jog tai yra „SolarWall“ gaminys [46], su SW450 profiliu ir Slate Grey (RAL7012)

spalva, kurios spindulių sugerties koeficientas – 0,86. Kolektoriaus paviršiaus ir pjūvio iliustracija pateikiama 10 pav.



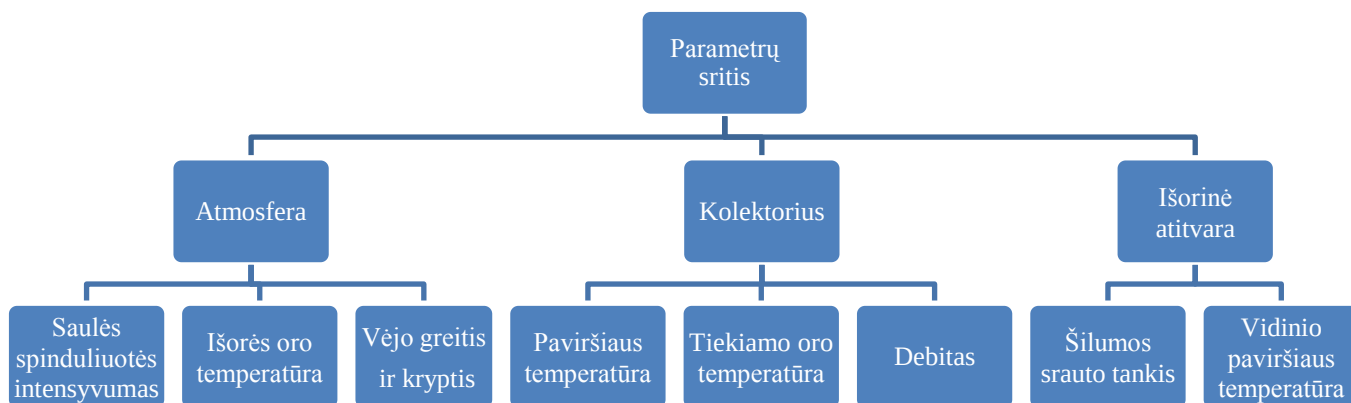
10 pav. Kolektoriaus konstrukcija (kairėje – kolektoriaus pjūvis; dešinėje – kolektoriaus paviršius)

Kolektoriuje ir vėdinimo sistemoje yra įrengta matavimo įranga, kuri leidžia stebėti kolektoriaus veikimą, tiekiamojo oro temperatūrą bei jų pasiskirstymą kolektoriuje, oro srauto greitį ir debitą. Visa ši įranga yra valdoma SCADA (angl. *supervisory control and data acquisition*) sistemos 13 pav., kuri atlieka ir duomenų kaupimo funkciją.

Sistemos veikimas (įsijungimas/išsijungimas) yra nustatomas automatinio būdų pagal paros laiką arba rankiniu. Kadangi kolektoriaus veikimas labiausiai priklauso nuo aplinkos sąlygų, eksperimento metu sistemos veikimas buvo nustatomas savo nuožiūra. Detaliau apie tai žr. sk. 4.3.

4.2. Matavimo įranga

Pagal parengtą tyrimo metodiką, norint įvertinti kolektoriaus veikimo efektyvumo rodiklius, buvo parinkta matavimo įranga, o trūkstama – sumontuota. Reikalingiems skaičiavimams ir analizėms atlikti buvo fiksuojami šių parametrų duomenys:



11 pav. Matuojamų duomenų schema

Pagal įvardintas matavimų sritis buvo naudojama ši įranga:

Atmosferos parametrai

- Saulės spinduliuotės intensyvumo jutiklis – pirometras (žr. 12 pav. kairėje). Gamintojas: *Onset Hobo S-LIB-M003* (1vnt.), matavimo diapazonas $0 \div 1280 \text{ W/m}^2$ [47]. Siekiant nustatyti saulės intensyvumą į vertikalų paviršių, jutiklis sumontuotas vertikalia kryptimi (tokiu pačiu kampu kaip ir kolektoriaus paviršius, įskaitant ir pasaulio šalių atžvilgiu);
- Kiti atmosferos parametrai – išorės oro temperatūros, vėjo krypties, vėjo greičio matavimai yra fiksuojami meteorologinės stoties *HOBO U30* pagalba, kuri yra įrengta ant fakulteto stogo. Duomenys yra kaupiami duomenų bazėje realiu laiku;

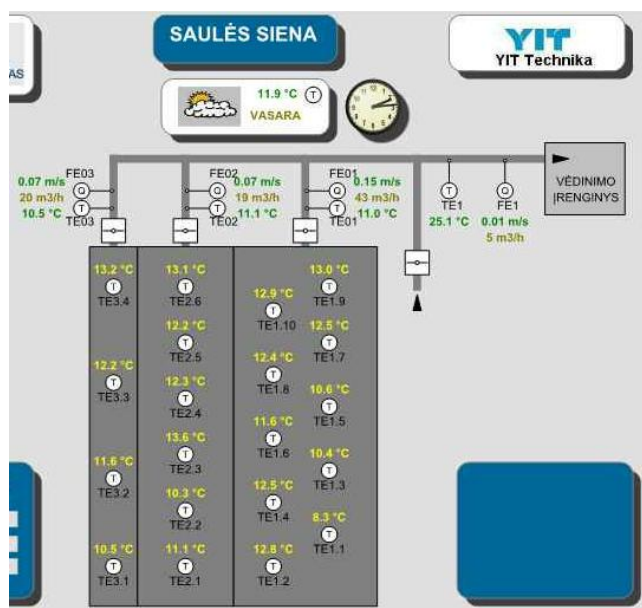


12 pav. Matavimo įranga (kairėje – pirometras; dešinėje – termoporos ir anemometrai)

Kolektoriaus parametrai

- Tiekiamojo oro temperatūra – matavimai atliekami termoporomis 13 pav., kurios sumontuotos kolektoriaus sekcijose tam tikrais žingsniais. Taip pat atliekamas iš kiekvienos sekcijos ištekančio oro ir bendro srauto magistraliniame ortakyje temperatūros matavimas. Termoporos pritvirtintos prie plieninio lino, kuris yra nuleistas vertikalia kryptimi žemyn per sieniniuose kronšteinuose išpjautas angas (žr.10 pav. kairėje);
- Tiekiamojo oro srauto greitis – matavimai atliekami termoanemometrais. Šie parametrai yra taip pat matuojami sekcijų atšakose ir magistraliniame ortakyje. Greitis yra perskaičiuojamas į srauto debitą pagal ortakio skerspjūvio plotą (13 pav. „Q“). Šie matavimo prietaisai buvo sumontuoti įrengiant kolektorių, tačiau yra tikimybė, kad rezultatai yra netikslūs, nes matavimo taškų išdėstymas ortakiuose yra netinkamas. Yra rekomenduojama, kad prieš matavimo skerspjūvį eitų tiesus, bent 4–5 skersmenų ilgio ruožas ir 2 skersmenų – už matavimo skerspjūvio [51].
- Kolektoriaus paviršiaus temperatūros jutiklis *HOBO S-TMB-M017* (14 vnt.). Matavimo diapazonas $-40 \div 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [47]. Jutikliai yra išdėstyti 1,5 m (10 vnt.) atstumu vertikalia kryptimi ir 1,0 m atstumu horizontalia kryptimi (4 vnt.) centrinėje kolektoriaus dalyje. Šie jutikliai buvo

sumontuoti 2012 m. Liepos 5 d., atliekant mokslinės veiklos praktiką (12 pav. dešinėje). Priede Nr.1 yra pateikiami paveikslai iš montavimo darbų.



13 pav. Sistemos veikimo darbalaukis SCADA programoje

Išorinės atitvaros parametrai

- Šilumos srauto plokštelės *Ahlborn* FQA (3 vnt.). Matavimo ribos $<15 \text{ W/m}^2$ [48]. Šios plokštelės tvirtinamos ant išorinės pastato atitvaros vidinio paviršiaus (žr. 32 pav.);
- Termoporos *Ahlborn* FTA (3 vnt.). Matavimo diapazonas $-25 \div 400 \text{ °C}$ [48].

Atmosferos ir kolektoriaus matuojamų parametrų duomenys yra kaupiami realiu laiku, 24 val. per parą. Duomenų fiksavimo intervalas – 1 min (skaičiuojamas 1 min vidurkis).

4.3. Matavimų aprašymas

Dalis matavimų duomenų buvo fiksuojami ir kaupiami nuo 2011 m., kai savo darbą pradėjo Pastato Energetinių ir Mikroklimato Sistemų (PEMS) laboratorija. Atliekant duomenų analizę yra labai svarbu pasirinkti tinkamus duomenis iš jų gausybės. Todėl tiriamų dienų pasirinkimas turi nemažą reikšmę analizės rezultatams ir išvadų formulavimui. Matavimo duomenų analizė ir skaičiavimai buvo atliekami naudojantis „MS Excel“ programa šiomis dienomis:

Matavimai 2013 m. Kovo 8 d.

Atliekant saulės spinduliuotės poveikio vertinimą kolektoriaus veikimui, svarbiausia yra jos intensyvumo kitimo stabilumas eksperimento metu. Ši diena buvo pasirinkta neveltui, nes saulės intensyvumas kito ganėtinai stabiliai dienos laikotarpyje, be žymesnių svyravimų (žr. 15 pav.).

Šią dieną tyrimai buvo atliekami prie nustatyto pastovaus debito vėdinimo sistemoje – 40 % apkrova. Detalesnė dienos informaciją:

1 lentelė. 2013 m. Kovo 8 d. matavimų informacija

Data	2013 m. Kovo 8 d.
Veikimo laikas	07:00 – 20:00
Debitas	Pastovus – 50 % apkrova. Kitimo ribos $\sim 600 \div 680 \text{ m}^3/\text{h}$.
Vyraujanti išorės oro temperatūra	$-8,6 \div 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$
Vyraujantis vėjas	$0 \div 6 \text{ m/s}$, vidutinis – $2,3 \text{ m/s}$
Vėjo kryptis	R – PR

Pastaba: nustačius pastovią vėdinimo įrenginio ventiliatoriaus apkrovą, išlieka debito kitimas $80 \text{ m}^3/\text{h}$ (9 % veikimo paklaida) intervale. To priežastis gali būti netinkamas matavimo įrangos išdėstymas, vėjo, vėjo gūσιο ar vėjo krypties pasikeitimas, taip pat oro tankio kitimas priklausomai nuo tiekiamojo oro temperatūros pokyčio.

Matavimai 2013 m. Sausio 9 d.

Šią dieną gauti matavimų duomenys buvo analizuojami esant kintamam tiekiamojo oro debitui, kuris buvo keičiamas mažinant vėdinimo įrenginio ventiliatoriaus apkrovą nuo 100 % iki 40 %. Mažinimas buvo atliekamas 10 % apkrovos dydžiu, apytiksliai 15 min laiko intervalais. Detalesnė tiriamosios dienos informaciją:

2 lentelė. 2013 m. Sausio 9 d. matavimų informacija

Data	2013 m. Sausio 9 d.
Veikimo laikas	12:40 – 16:10
Debitas	Kintamas – $100 \% \div 40 \%$ (10 % intervalais). Kitimo ribos $\sim 2200 \div 630 \text{ m}^3/\text{h}$.
Vyraujanti išorės oro temperatūra	$-4,3 \div -2,9 \text{ }^\circ\text{C}$
Vyraujantis vėjas	$1,3 \div 5,6 \text{ m/s}$, vidutinis – $3,4 \text{ m/s}$
Vėjo kryptis	P – PV

Iš aukščiau pateiktos lentelės matome, jog atliekamo tyrimo metu išorės oro temperatūros kitimo intervalas buvo nedidelis – $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Dėl šio mažo pokyčio priimta, kad temperatūra šią dieną neturėjo reikšmingo poveikio kolektoriaus veikimui ir detaliau buvo analizuojamas pagal kitus nagrinėjamus veiksnius.

Poveikio išoriniai atitvarai tyrimas

Esant funkcionuojančiam kolektoriui, jo vidinėje ertmėje cirkuliuoja šiltas oras, kuris, tekėdamas nuo apatinės iki viršutinės dalies, apiplauna dengiamą išorinės pastato atitvaros plotą. Gamintojų teigimu kolektorius sumažina šilumos pritekius vasaros metu, todėl Maurer [35] savo darbe atliko teorinį tyrimą, kuriuo bandyta įvertinti šį teiginį. Taip pat atliktoje literatūros apžvalgoje yra pasigendama tyrimų, kurie įvertintų kaip šis procesas veikia išorinės atitvaros

šiluminę inerciją ir srautą žiemos metu. Todėl buvo nuspręsta atlikti eksperimentinį tyrimą ir nustatyti šilumos srautą per atitvarą bei vidinio paviršiaus temperatūrą. Šie du parametrai labiausiai priklauso nuo vidaus ir išorės oro temperatūros, atitvaros fizikinių savybių ir saulės spinduliuotės intensyvumo. Pastaroji turi didžiausią įtaką kolektoriaus vidinėje dalyje cirkuliuojančio oro temperatūrai. Eksperimento metu buvo priimta, kad vidaus patalpų oro temperatūrą yra pastovi arba kinta nežymiai.

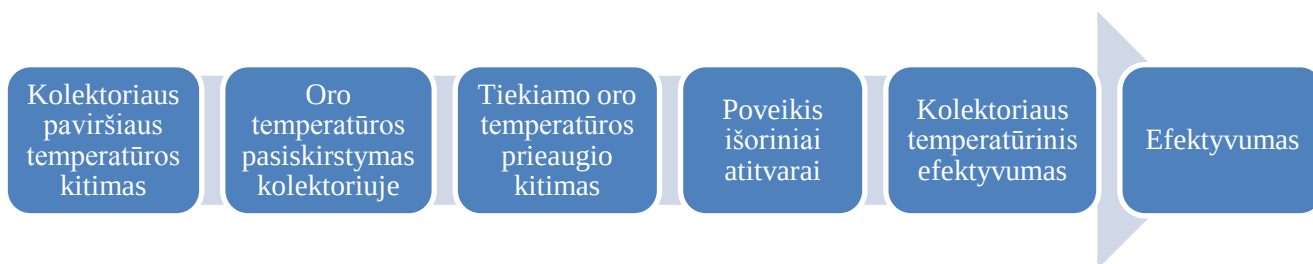
Atliekant šį eksperimentinį tyrimą buvo sumontuotos šilumos srautą matuojančios *Ahlborn Almemo* plokštelės ir paviršiaus temperatūrą matuojančios termoporos fakulteto laiptinės 8-ame aukšte ir pagalbinėje patalpoje. Šie taškai pasirinkti neatsitiktinai – tai viršutinė kolektoriaus dalis, kurioje vyksta intensyviausi šilumos mainai su pastato atitvara dėl teoriškai aukščiausios cirkuliuojančio oro temperatūros. Matavimai buvo atliekami skirtinguose taškuose (32 pav.), o gauti rezultatai palyginti:

- Paviršius kurį dengia kolektorius (2 ir 3 taškas);
- Paviršius kurio nedengia kolektorius (1 taškas).

Duomenys buvo fiksuojami nuo 2013 m. Vasario 15-os d. iki Kovo 27-os d. Duomenų analizei pasirinkti trijų dienų duomenys, kurie buvo užfiksuoti Kovo 15–17 dienomis, nes jomis saulės spinduliuotė buvo stabiliausia ir intensyviausia.

4.4. Rezultatai

Gauti matavimų duomenų rezultatai yra analizuojami eiliškumo tvarka, pagal pirmines poveikio sritis. Žemiau pateikiama analizės schematinis išsidėstymas:



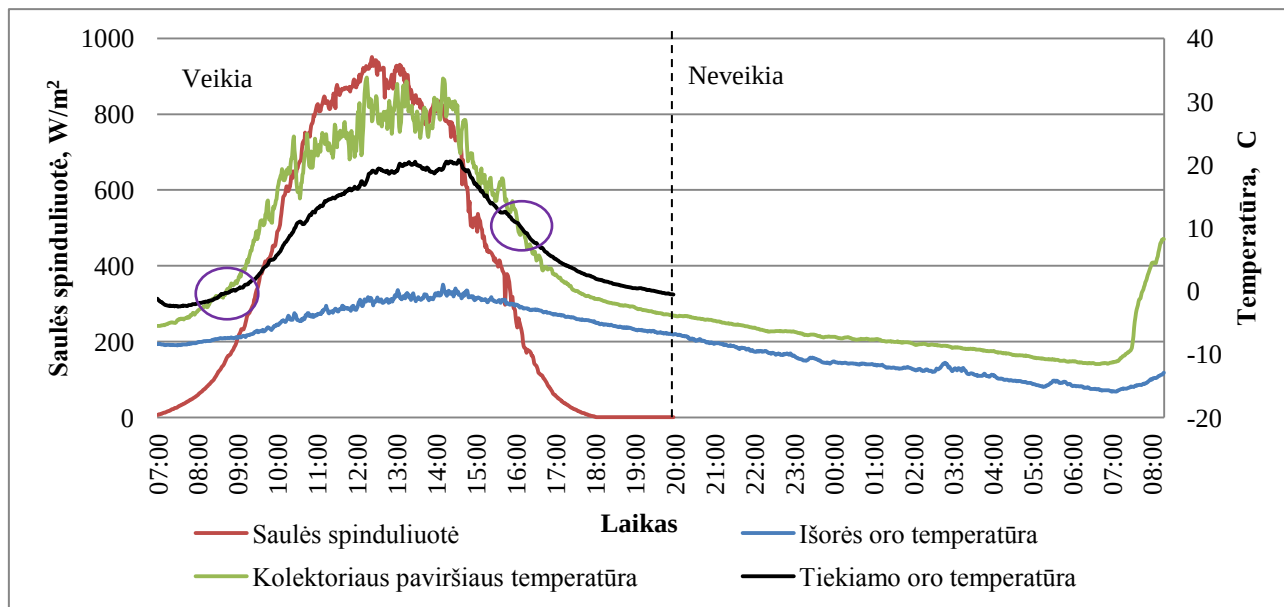
14 pav. Gautų rezultatų analizės eiliškumas

Toliau yra aprašomi eksperimento metu gauti rezultatai.

4.4.1. Kolektoriaus paviršiaus temperatūros kitimas

Neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus veikimas yra pagrįstas šilumos mainais tarp kolektoriaus paviršiaus ir pro jį pratekančiu oru, todėl jo temperatūra labiausiai priklauso nuo kolektoriaus paviršiaus temperatūros. Pastaris parametras yra esminis veiksnys, kurio dydis labiausiai priklauso nuo saulės spinduliuotės ir išorės oro temperatūros.

Panagrinėkime 15 pav., kuriame yra pateiktas minėtų parametrų kitimas Kovo 8 d. Į grafiką yra taip pat įtrauktas parametrų kitimas iki Kovo 9 d. 8 val., dėl platesnio įvertinimo. Vėdinimo įrenginio veikimas yra išskirtas punktyrine linija *Veikia – Neveikia*. Grafike yra matyti, kad kolektoriaus paviršiaus temperatūra pradeda kilti sulig saulės spinduliuotės augimu ir



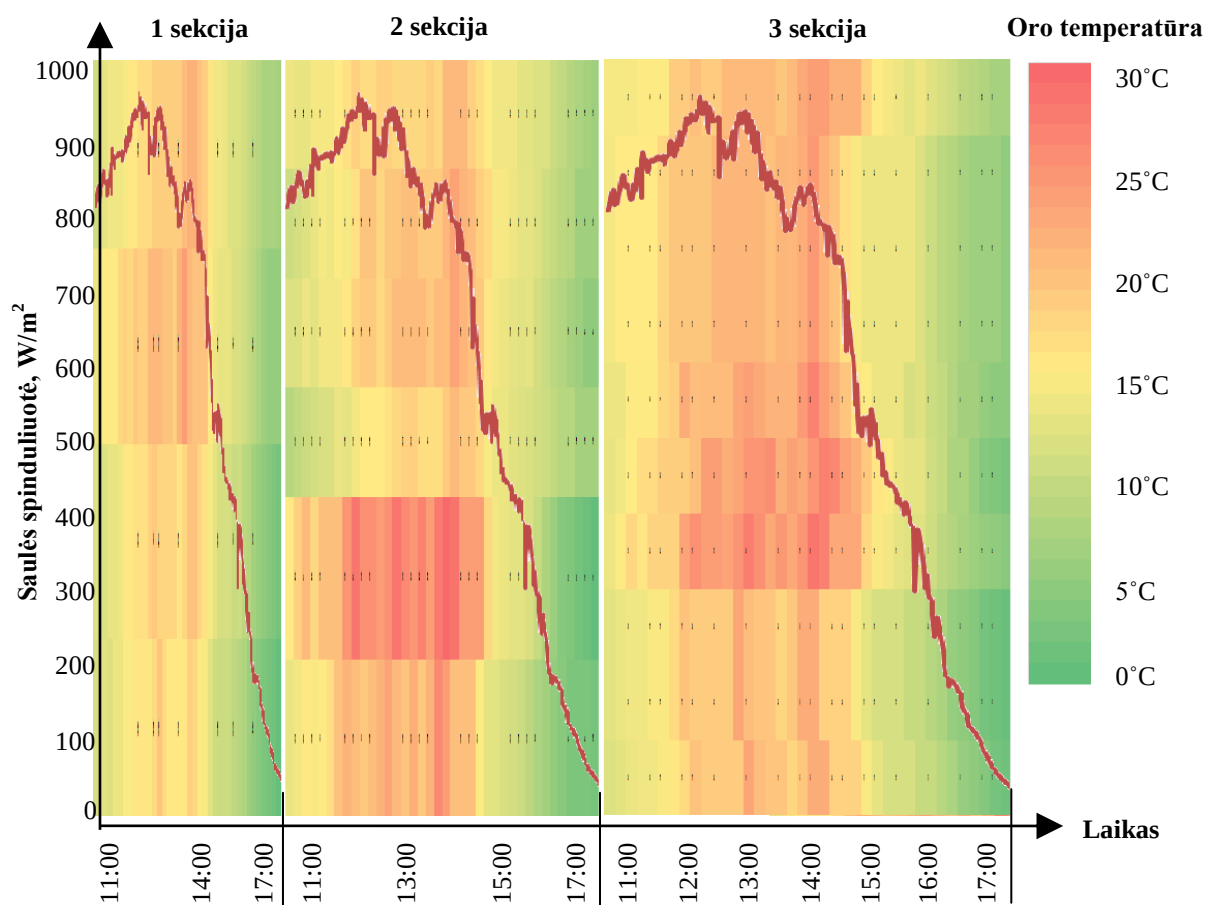
15 pav. Saulės spinduliuotės, tiekiamo ir išorės oro, kolektoriaus paviršiaus temperatūrų kitimas (Kovo 8 d.)

pasiekia aukščiausią 33,5 °C temperatūrą 12 val. 30 min. esant 933 W/m² spinduliuotei. Taip pat yra matyti, jog kolektoriaus paviršiaus temperatūros judėjimo kreivė yra nepastovi. Šis netolygumas atsiranda dėl tuo metu vyraujančių vėjo gūsių, oro debito ir saulės spinduliuotės svyravimų. Tačiau įdomiausias pastebėtas reiškinys šiame grafike yra tai, jog, leidžiantis saulei ir staigiai mažėjant jos intensyvumui, kartu mažėja ir kolektoriaus paviršiaus temperatūra, bet ji nesusilygina su išorės temperatūra visos nakties metu. Tarp išorės oro ir kolektoriaus paviršiaus temperatūrų išlieka apytiksliai 4 °C skirtumas. Kadangi pats kolektorius nakties metu negali išskirti šilumos, o dienos metu sukaupta šiluma yra greitai prarandama dėl metalo gero šilumos laidumo ir mažo konstrukcijų storio, todėl vienintelis paaiškinimas būtų – aukštesnės temperatūros oras kolektoriuje, kuriam šilumą suteikia išorinė pastato atitvara.

4.4.2. Oro temperatūros pasiskirstymas kolektoriuje

Remiantis Kutscher teiginiu [9], kad, skaičiuojant kolektoriaus efektyvumą, reikia naudotis vidutine logaritmine paviršiaus temperatūra dėl būdingo temperatūrinio gradiento, galima teigti, kad dėl tos pačios priežasties vyrauja oro, esančio kolektoriaus tūryje, temperatūrinis gradientas. Šiame skyrelyje yra atliekamas tyrimas, siekiant tiksliau išanalizuoti oro temperatūros pasiskirstymą kolektoriuje.

Naudojantis oro temperatūrą matuojančiomis termoporomis, kurių kolektoriuje yra sumontuota 20 vnt. (13 pav.), yra sukurta oro temperatūros pasiskirstymo kolektoriuje vizualizacija 16 pav. naudojantis *MS Excel*. Tyrimo metu yra naudojami 2013 m. Kovo 8 d. duomenys, užfiksuoti nuo 11 val. iki 17 val. Ši vizualizacija parodo oro temperatūros pasiskirstymą kiekvienoje iš sekcijų kolektoriaus aukščio ir saulės spinduliuotės atžvilgiu ordinačių ašyje, ir laiko kitimo atžvilgiu – abscisų ašyje. Dėl riboto termoporų kiekio oro temperatūra yra analizuojama tik vertikalia kryptimi – išilgai kolektoriaus aukščio. Priimta, kad šis temperatūros kitimas vyksta vidurinėje sekcijų dalyje. Žemiau pateikiama vizualizacija:



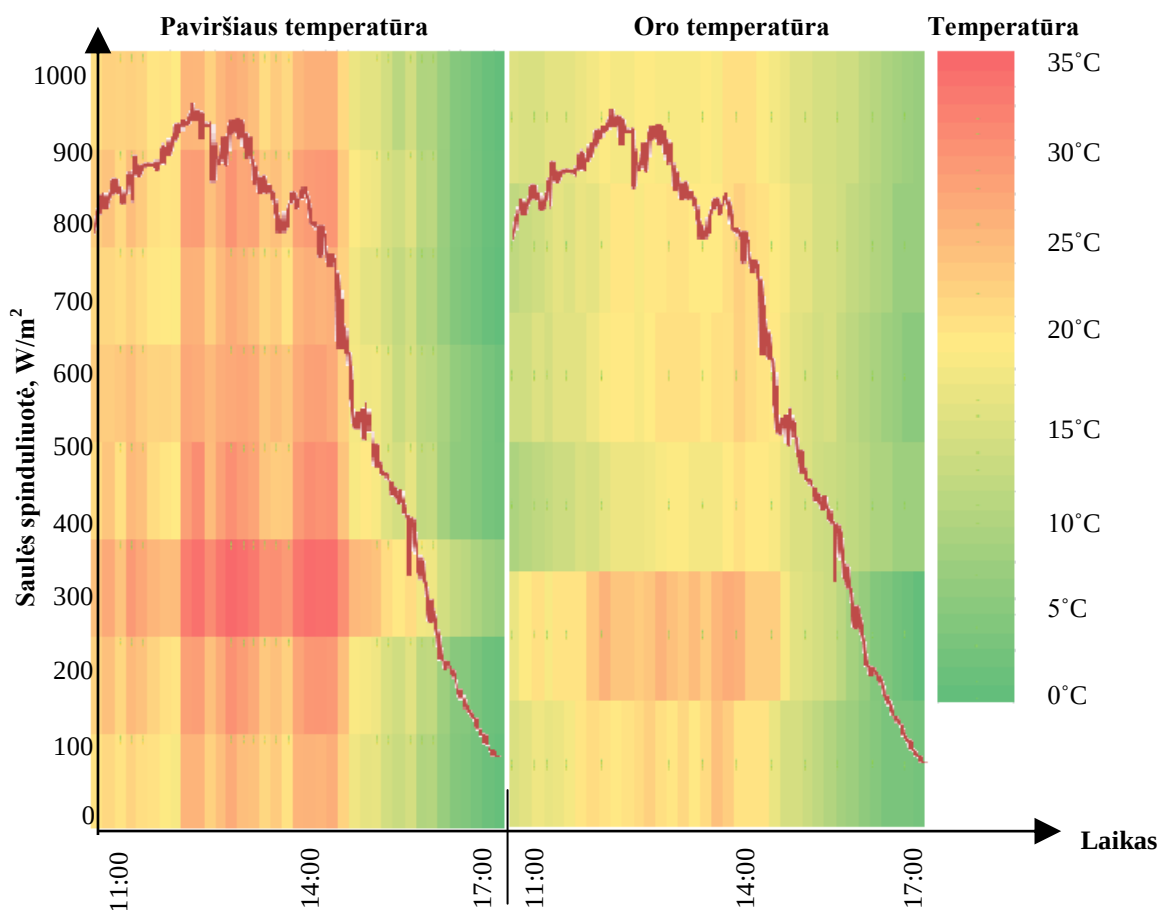
16 pav. Oro temperatūros kolektoriuje pasiskirstymas (Kovo 8 d.)

Iš pateiktos vizualizacijos yra matyti, kad kolektoriuje oro temperatūra yra aukščiausia esant didžiausiam saulės spinduliuotės intensyvumui tarp 12–15 val. Tačiau įdomiausia yra tai, kad aukščiausiai oro temperatūra vyrauja ne kolektoriaus viršutinėje sekcijų dalyje, o ties viduriniais sluoksniais, kurie ypač gerai yra matomi 2-oje ir 3-oje sekcijose. Šiuose sluoksniuose užfiksuota aukščiausia 28 °C temperatūra 2-oje sekcijoje, kai tuo metu viršutiniuose sluoksniuose vyravo 22 °C oro temperatūra, o 3-oje sekcijoje tuo metu buvo 3 °C skirtumas tarp vidurinio ir viršutinio sluoksnio. Wang [18] skaičiuojamųjų fluidų dinamikos modelyje pateikė tiekiamojo oro greičių pasiskirstymą kolektoriuje (3 pav.), kuriame pavaizduotas greičio mažėjimas išilgai kolektoriaus. Mažiausi oro greičiai vyrauja žemiausioje

kolektoriaus dalyje dėl didžiausių slėgio nuostolių tolimiausiame taške. Todėl remiantis vyraujančiu tiekiamojo oro greičio gradientu, galima teigti, jog dėl didesnio oro greičio viršutinėje kolektoriaus dalyje, paviršius atiduoda didesnę šilumos kiekį orui, todėl jo paviršiaus ir oro temperatūra yra žemesnės, nei viduriniuosiuose sluoksniuose su vyraujančiu žemesniu oro greičiu. Nors didesnis oro greitis sąlygoja efektyvesnę šilumokaitą, tačiau kaip matome šioje situacijoje tai negelbsti temperatūros atžvilgiu.

Absorbuojantis paviršius yra tvirtinimas prie sieninių kronšteinų (žr. 10 pav.), kurie irgi yra perforuoti, tačiau jie sukuria papildomus slėgio nuostolius. Todėl šių kronšteinų išpildymas turėtų būti tobulinamas, norint sumažinti slėgio nuostolius, kas pagerintų oro srauto pasiskirstymą kolektoriuje ir kartu padidintų jo efektyvumą.

Analizuojant žemiausią kolektoriaus dalį ir remiantis duomenimis, jog oro greitis šiuose sluoksniuose yra lėčiausias, tiekiamojo oro temperatūra turėtų būti aukščiausia, tačiau taip nėra. Kadangi tiekiamojo oro temperatūra priklauso nuo paviršiaus temperatūros, žemiau yra pateikiamas 2-osios sekcijos oro ir paviršiaus temperatūrų pasiskirstymo palyginimas 17 pav.



17 pav. Oro ir paviršiaus temperatūrų pasiskirstymas kolektoriuje (Kovo 8 d.)

Iš 17 pav. matome, kad toks pats temperatūros gradientas vyrauja abiejuose matavimo parametruose – paviršiaus ir oro temperatūroje.

Remiantis gautais rezultatais, galima teigti, kad oro temperatūros pasiskirstymas kolektoriuje yra tolygus paviršiaus temperatūros pasiskirstymui. Taip pat rezultatai parodo, kad kolektorius yra nepilnai išnaudojamas, nes, esant didesniems greičiams kolektoriaus viršutinėje dalyje, tiekiamojo oro temperatūra yra žemesnė nei viduriniuose sluoksniuose. Nors dėl didelio oro debito kolektoriaus viršutinėje dalyje pasisavinamas šilumos kiekis yra didesnis, tačiau esant aukštesnės oro temperatūros poreikiui, ypatingai naudojant kolektorių džiovinimo procesuose, kolektorius funkcionuos neefektyviai.

4.4.3. Tiekiamojo oro temperatūros prieaugio kitimas

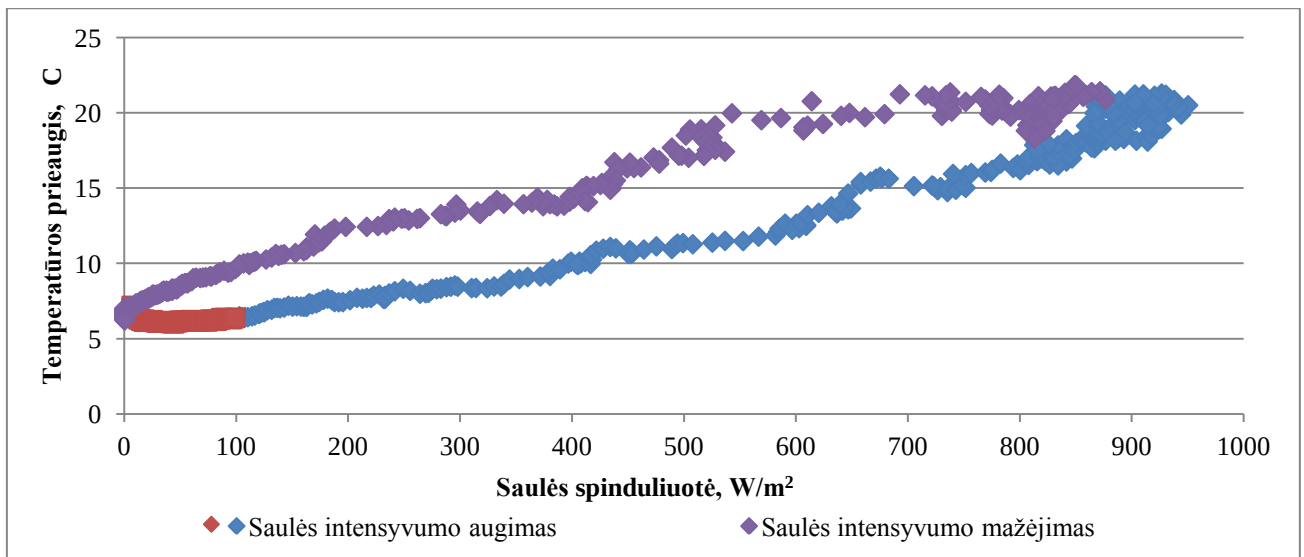
Atliekant prataką saulės kolektoriaus tyrimą, pagrindinis tiriamasis parametras, kuris apibūdina kolektoriaus veikimo našumą – tiekiamojo oro temperatūros prieaugis. Tai skirtumas tarp lauko oro temperatūros ir tiekiamojo oro temperatūros į vėdinimo įrenginį.

Žvelgiant į 15 pav. (žr. sk. 4.4.1.) yra matyti kaip keitėsi tiekiamojo oro temperatūra dienos metu. Įdomus reiškinys yra tai, jog tiekiamojo oro temperatūros kreivė prasilenkia su saulės spinduliuotės kreive t.y. tiekiamojo oro temperatūra savo maksimumą – 20,5 °C pasiekia esant 925 W/m², o saulei leidžiantis nuo 13 val. iki 14 val. 30 min. ir spinduliuotės intensyvumui sumažėjus apytiksliai 200 W/m², tiekiamojo oro temperatūra išlieka beveik nepakitusi ir pradeda mažėti tik praėjus 1,5 val. Nagrinėjant šį laikotarpį išorės oro temperatūra neaugo, todėl tai nesudarė sąlygų tiekiamojo oro temperatūrai išlikti vienodai esant mažėjančiai saulės spinduliuotei. Tai atspindi kolektoriaus ir dengiamo atitvaros ploto sukauptą šilumą, kurią vėliau atiduoda tiekiamam orui esant staigiai mažėjančiai saulės spinduliuotei.

Tačiau keisčiausia yra tai, kad įrenginiui pradėjus veikti 7 val. ryto, tiekiamojo oro temperatūra buvo 6 °C aukštesnė už išorės oro temperatūrą – -8,5 °C. Tačiau netgi praėjus 1 val. po įrenginio įjungimo, nėra užfiksuotas joks tiekiamojo oro temperatūros kritimas (8 val. ryto saulės spinduliuotė – 56 W/m²). Taip pat nustatyta, kad visos nakties metu vidutinė oro temperatūra kolektoriuje buvo aukštesnė už kolektoriaus paviršiaus temperatūrą, kuri ir lėmė aukštesnę paviršiaus temperatūrą už išorės oro. Tiekiamojo oro temperatūros kitimo kreivė baigiasi ties 20 val., nes šis jutiklis yra kolektoriaus dalyje, kuris yra patalpoje (ortakis yra izoliuotas šilumine izoliacija), todėl tolimesnis jo analizavimas būtų netikslus.

Kovo 8 d. matavimų rezultatai

Žemiau pateikiamas Kovo 8 d. temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės intensyvumo 18 pav.:



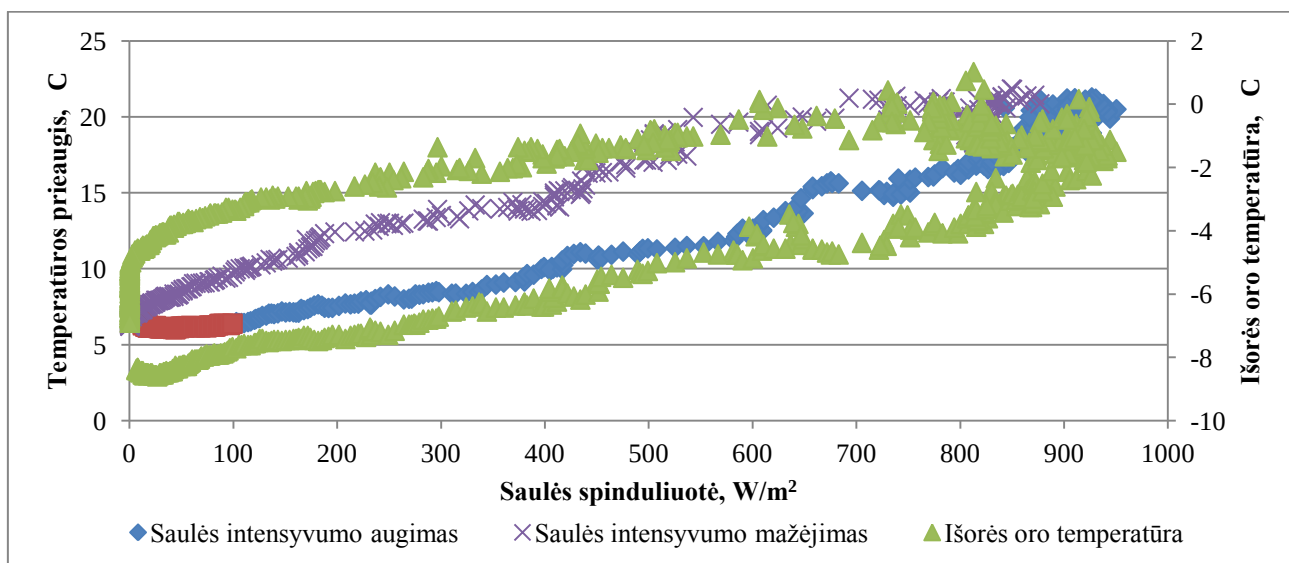
18 pav. Temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)

Nagrinėjant šios dienos matavimų rezultatus, saulės spinduliuotės kitimas buvo suskirstytas į tris etapus:

1. Grafike raudonai pažymėtos reikšmės parodo saulės spinduliuotės augimą ankstyvą rytą, tarp 7 val. ir 8 val. 30 min., iki apytiksliai 100 W/m^2 . Šiame periode nebuvo užfiksuotas temperatūros prieaugio akivaizdus pokytis;
2. Mėlynos reikšmės parodo temperatūros prieaugio augimą pirmoje dienos pusėje, kai saulės altitudė didėjo iki 13 val. 20 min.;
3. Violetinės reikšmės žymi temperatūros prieaugio mažėjimą antroje dienos pusėje esant saulės altitudės mažėjimui.

Iš grafiko akivaizdžiai yra matyti, jog, didėjant saulės spinduliuotės intensyvumui, atitinkamai auga tiekiamojo oro temperatūros prieaugis. Tačiau nesunku pastebėti, kad temperatūros prieaugio skirtumai tarp saulės spinduliuotės intensyvumo augimo ir mažėjimo yra gerokai atitolę vienas nuo kito. Iš pirmo įspūdžio galima manyti, kad pirmoje dienos pusėje kolektoriuje cirkuliuojantis šiltas oras dalį savo šilumos perduoda išoriniai atitvarai, kadangi jos temperatūra yra žemesnė nei tiekiamojo oro. Todėl galima teigti, jog šiuo laiko tarpu pratakus saulės kolektorius patiria didesnius šilumos nuostolius ir atitinkamai sumažėja jo efektyvumas. Tačiau antrosios dienos pusėje, kuomet saulė pradeda leisti ir jos intensyvumas sparčiai mažėja, tiekiamojo oro temperatūros prieaugio vertės išlieka aukštesnės už pirmosios dienos pusę iki visiško saulės nusileidimo. Šis reikšmių nuokrypis atspindėtų kolektoriaus dengiamo išorinės atitvaros ploto šiluminę inerciją. Tačiau į grafiką įtraukus išorės oro temperatūros kitimą priklausomai nuo saulės spinduliuotės dienos metu (žr. 19 pav.), matome jog išorės temperatūros skirtumai tarp pirmosios ir antrosios dienos pusių sutampa su temperatūros prieaugių skirtumais.

Todėl prieš tai minėtas teiginys, kad antroje dienos pusėje išorinėje atitvaroje sukaupta šiluma yra grąžinama tiekiamam orui, galėtų tik neilgam laiko tarpui.



19 pav. Išorės oro ir temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)

Kadangi šio tyrimo metu saulės spinduliuotės kitimas visos dienos laikotarpiu buvo stabilus (15 pav.), tai leido išnaudoti išorinėje atitvaroje sukaupą šilumą antroje dienos pusėje, esant staigiai mažėjančiai saulės spinduliuotei, palaikant vienodą tiekiamojo oro temperatūrą apytiksliai 1,5 val. Todėl tolimesni tyrimai, nagrinėjant šį reiškinį, galėtų būti atlikti esant nepastoviai saulės spinduliuotei dienos laikotarpyje.

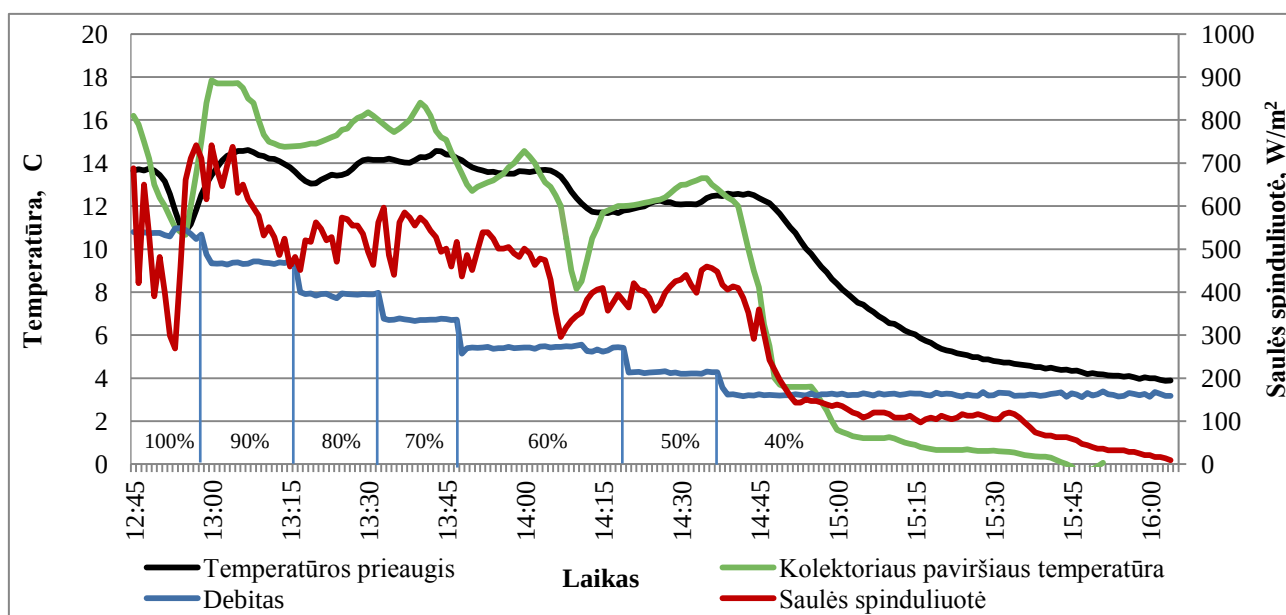
Sausio 9 d. matavimų rezultatai

Atliekant tyrimus Sausio 9 d., buvo vertinama tiekiamojo oro debito įtaka temperatūros prieaugiui. Tyrimo metu debitas buvo mažinamas keičiant ventiliatoriaus apkrovą nustatytais laiko intervalais. Vėdinimo įrenginys tyrimo pradžioje buvo įjungtas pilnu pajėgumu (100 %) ir kas apytiksliai 15 min. ventiliatoriaus apkrova mažinta 10 % dydžiu. Kadangi dėl vyraujančių aplinkos sąlygų ir sistemos parametrų pokyčių atsiranda debito netolygumai, buvo užfiksuotos šios vidutinės reikšmės prie nustatytos ventiliatoriaus apkrovos:

- Esant 100 % apkrovai – 2150 m³/h;
- 90 % – 1870 m³/h;
- 80 % – 1580 m³/h;
- 70 % – 1350 m³/h;
- 60 % – 1080 m³/h;
- 50 % – 850 m³/h;
- 40 % – 650 m³/h.

Viso šio tyrimo metu išorės oro temperatūra buvo pastovi $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir tik labai trumpais laiko momentais kito $\pm 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, todėl priimta, kad temperatūros prieaugio kitimas yra nesusietas su išorės oro temperatūros pokyčiais.

Pateiktame 20 pav. matome, jog dienos metu vyrauja nedidelis $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros prieaugio kitimas. Saulės spinduliuotės intensyvumas tyrimo metu – nuo 12 val. 45 min iki 15 val. kinta $200 \div 740\text{ W/m}^2$ intervale (vidutinė saulės spinduliuotė – 480 W/m^2), tačiau tai didelio poveikio temperatūros prieaugiui nesudaro. Eksperimentinio tyrimo metu keičiamas vėdinimo sistemos debitas puikiai atsispindi grafike. Tyrimo pradžioje, esant 100 % ventiliatoriaus apkrovai, matyti, jog esant pastoviam debitui ir mažėjant saulės spinduliuotei, temperatūros prieaugis taip pat mažėja, o augant – didėja. Tiriant laikotarpį tarp 13 val. 15 min. ir 14 val., kuomet tiekiamojo oro debitas yra sumažinamas nuo $1870\text{ m}^3/\text{h}$ iki $1080\text{ m}^3/\text{h}$ (viso $790\text{ m}^3/\text{h}$) ir saulės spinduliuotės intensyvumas yra $520 \pm 50\text{ W/m}^2$, temperatūros prieaugis padidėja labai nežymiai – $13,3 \div 14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.



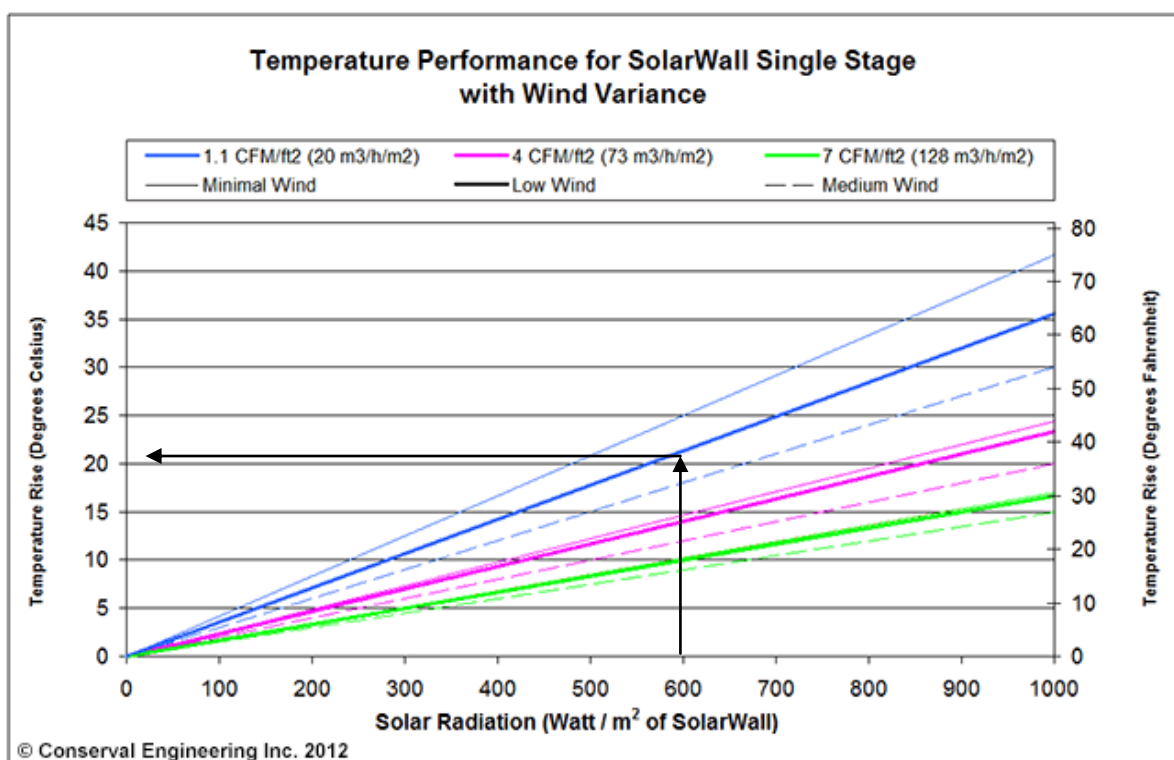
20 pav. Temperatūros prieaugio kitimas priklausomai nuo debito pokyčio (Sausio 9 d.)

Remiantis apžvelgta literatūra ir atliktais tyrimais, neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas yra mažesnis už vienetą, o tai reiškia, jog kolektoriaus paviršiaus temperatūra yra aukštesnė už tiekiamojo oro temperatūrą. Šiame grafike matome, jog kolektoriaus paviršiaus temperatūra yra akivaizdžiai priklausoma nuo saulės spinduliuotės intensyvumo. Tačiau, nagrinėjant kreivių judėjimą trumpais laiko tarpais iki apytiksliai 5 min., yra matoma, jog ryškesni kolektoriaus paviršiaus temperatūrų svyravimai neatsiranda ($12:55 \div 13:03$; $13:20 \div 13:33$; $14:15 \div 14:35$) ir tendencingai mažėja arba didėja pagal kryptingą saulės intensyvumo kitimą. Šis reiškinyss ir tai, kad tam tikrais laiko tarpais kolektoriaus

paviršiaus temperatūra būna žemesnė už tiekiamojo oro temperatūrą, patvirtina prieš tai išsakytą nuomonę apie šilumos mainus tarp išorinės atitvaros ir tiekiamojo oro.

Rezultatų palyginimas su gamintojų nurodymais

Pagal gautus temperatūros prieaugio rezultatus Sausio 9 d., atlikime trumpą palyginimą su gamintojo „SolarWall“ pateiktais duomenimis [46]. Žemiau esančiame grafike 21 pav. yra nurodyti temperatūros prieaugiai priklausomai nuo saulės spinduliuotės esant skirtingam debitui. Šiuo atveju gamintojo nurodytas $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ debitas yra artimiausias eksperimento metu nustatytam $1870 \text{ m}^3/\text{h}$, kas atitinka $18,7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Kadangi eksperimento metu vyravo vidutinis $3,4 \text{ m/s}$ vėjas, gamintojo grafike priimtas žemas (angl. *low wind*) vėjo greitis. Nagrinėjamas laikotarpis yra tarp 13 val. ir 13 val. 10 min, kuriuo vyravo vidutinė $575 \text{ W}/\text{m}^2$ saulės spinduliuotė, o tuo metu maksimalus temperatūros prieaugis buvo $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



21 pav. Temperatūros prieaugio rezultatų palyginimas su „SolarWall“ gamintojo nurodymais [46]

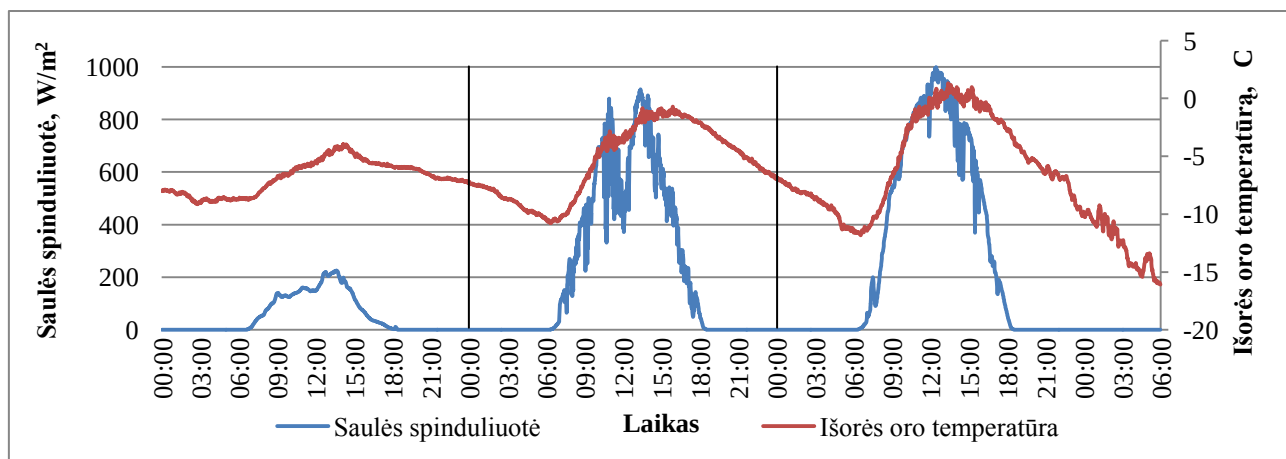
Gamintojo grafike yra nurodoma, kad esant $20 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ($2000 \text{ m}^3/\text{h}$ esant 100 m^2 kolektoriaus plotui) ir apytiksliai $575 \text{ W}/\text{m}^2$ saulės spinduliuotei, tiekiamojo oro temperatūros prieaugis yra $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$, o tai yra $6 \text{ }^\circ\text{C}$ aukštesnė temperatūra nei gauta eksperimentinio tyrimo metu. Šis temperatūrų skirtumas galėjo atsirasti dėl šių priežasčių: lyginamos skirtingos kolektoriaus paviršiaus medžiagos, kurių skiriasi juodumo laipsnis ir sugerties koeficientas; gamintojas nenurodo ar yra įvertinti šilumos pritekiai iš pastato vidaus; skirtingas kolektoriaus išpildymas ir pan. Taip pat eksperimentinio tyrimo metu saulės spinduliuotės intensyvumas yra

nuolatos kintantis, todėl norint nustatyti tikrąjį maksimalų tiekiamojo oro temperatūros prieaugį, spinduliuotė turėtų būti stacionari, iki temperatūros prieaugis pasieks didžiausią reikšmę.

4.4.4. Kolektoriaus veikimo įtaka išorinei atitvarai

Tyrimo metu duomenys buvo fiksuojami nuo 2013 m. Vasario 15-os d. iki Kovo 27-os d., tačiau duomenų analizei pasirinkti trijų dienų duomenys, kurie buvo užfiksuoti Kovo 15–17 dienomis, kadangi šiomis dienomis saulės spinduliuotė buvo stabiliausia ir intensyviausia.

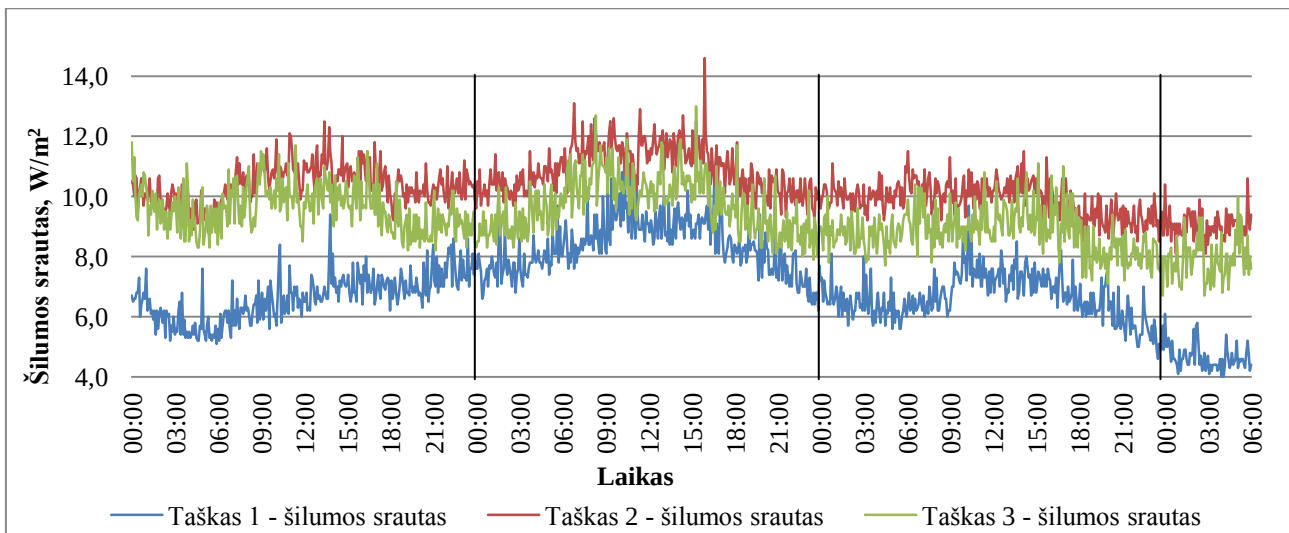
Pagal atlikus matavimus yra pateikiamas saulės spinduliuotės ir išorės oro temperatūros kitimo grafikas 22 pav. Vertikalios linijos išskiria paras.



22 pav. Kovo 15-17 d. saulės spinduliuotės ir išorės oro temperatūros kitimas

22 pav. matyti, kad pirmąjį matavimų dieną saulės spinduliuotė buvo nedidelė, o jos didžiausia vertė siekė tik 217 W/m^2 . Tačiau šios dienos duomenys pasirinkti siekiant apžvelgti šilumos srauto kitimą bendrame kontekste ir palyginti su kitomis dienomis, kuriomis saulės intensyvumas buvo žymiai aukštesnis. Šiomis dienomis vyraujanti išorės oro temperatūra $-15 \div 0$ °C.

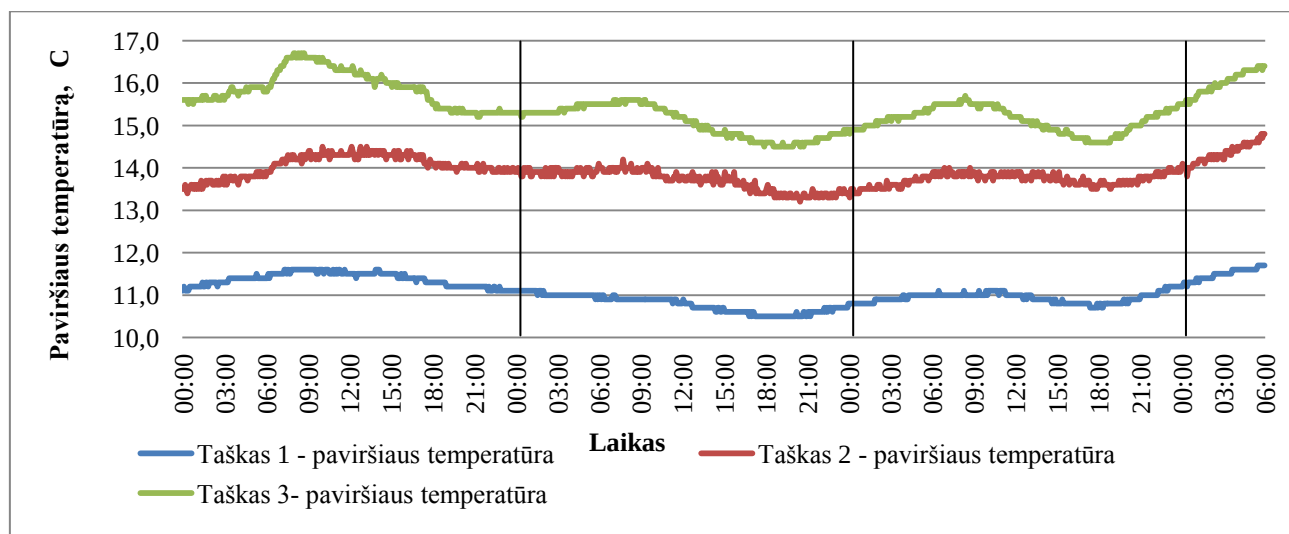
23 pav. yra pateiktas šilumos srauto per išorinę pastato atitvarą kitimo grafikas. Grafike esančios teigiamos matavimų reikšmės parodo šilumos tekėjimą iš pastato vidaus į išorę (šilumos nuostoliai), o srauto sumažėjimas – atitinkamai šilumos nuostolių sumažėjimą. Grafike puikiai atsispindi išmatuoto šilumos srauto tarp Taško 1 ir Taškų 2-3 kitimo skirtumas. Tai yra dėl to, jog kolektorius iš išorės nedengia Taško 1, o Taškus 2-3 dengia. Taško 1 didesnė šilumos srauto kitimo amplitudė parodo šio atitvaros ploto priklausomybę nuo išorės veiksnių – oro temperatūros ir saulės spinduliuotės. Tačiau pirmąjį matavimų dieną (Kovo 15 d.) saulės spinduliuotė buvo neintensyvi, o dėl šviesios fasado spalvos jo sugerties koeficientas yra palyginti nedidelis. Patalpoje vyraujanti oro temperatūra buvo pastovi, kas yra matyti iš nežymaus vidinio paviršiaus temperatūros kitimo (24 pav.). Todėl galima teigti, kad šilumos srautas labiausiai kito dėl išorės oro temperatūros svyravimų.



23 pav. Kovo 15-17 d. šilumos srauto kitimas per išorinę pastato atitvarą

Taškų 2-3 judėjimo kreivės yra beveik vienodos, skiriasi tik nežymiai pačios reikšmės. Mažesnė judėjimo amplitudė parodo, kad šis atitvaros plotas yra mažiau inertiškas išorės veiksnių pokyčiui.

Kitas grafike pastebimas reiškinys yra šilumos nuostolių vėlavimas. Nagrinėjant šilumos srautą laiko atžvilgiu yra matoma, kad šilumos nuostoliai didėja dienos metu, o naktį mažėja. Tai puikiai parodo atitvaros masyvumo ir inertiškumo savybę.



24 pav. Kovo 15-17 d. išorinės atitvaros vidinio paviršiaus temperatūros kitimas

23 pav. grafike taip pat matomas ganėtinai aukštas šilumos srauto skirtumas tarp Taško 1 ir Taškų 2-3 galėjo atsirasti dėl skirtingų paviršiaus temperatūrų – Taško 1 vidutinė vyraujanti temperatūra yra 11 °C, o Taškų 2-3 atitinkamai 14 °C ir 15 °C. Šie temperatūrų skirtumai galėjo atsirasti dėl prasčiau šildomos pagalbinės patalpos.

Pagal Furjė dėsnį šilumos srauto tankis yra tiesiogiai proporcingas temperatūriniam gradientui t.y. vidinio ir išorinio paviršiaus temperatūrų skirtumui. Tačiau 23 pav. yra pastebima, kad nors paviršiaus Taško 3 temperatūra yra aukštesnė už Taško 2, kas sąlygotų didesnę šilumos

srautą, šiame taške jis yra mažesnis. To priežastimi gali būti šilumos srauto matavimo plokštelių išdėstymas, nes Taško 3 matavimai atliekami vidurinėje kolektoriaus dalyje, kurioje vyrauja aukštesnės temperatūros oras, todėl šilumos srautas yra mažesnis nei Taško 2, kurio matavimai atliekami šoninėje kolektoriaus dalyje.

Norint tiksliau įvertinti šiuos duomenis, matavimai turėtų būti atliekami esant vienodomis oro temperatūroms patalpose, tačiau šie duomenys nėra žinomi.

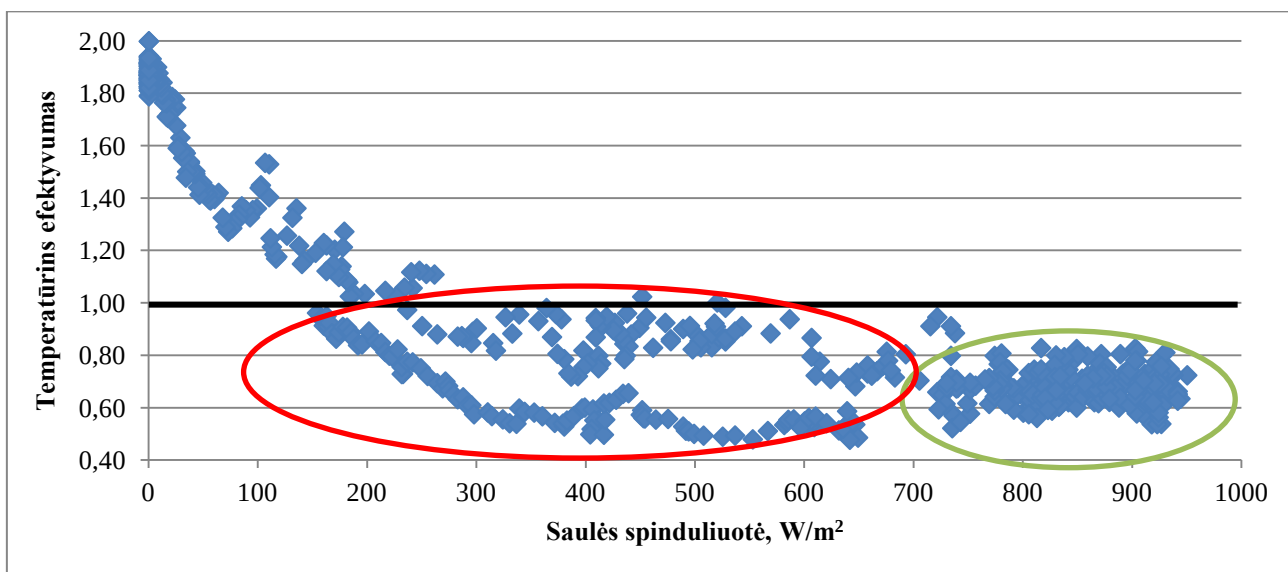
4.4.5. Temperatūrinis efektyvumas

Šiame skyrelyje yra pateikiami kolektoriaus temperatūrinio efektyvumo rezultatai, kurie buvo gauti atlikus skaičiavimus, naudojantis *MS Excel* programa ir matavimų duomenimis. Kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas ε_T apibūdina šilumos mainus vykstančius tarp kolektoriaus paviršiaus ($T_{kol.}$) ir išorės oro (T_{ls}), kuris prateka pro perforuotą kolektoriaus paviršių ir yra sušildomas (T_{oro}). Tai santykinis dydis tarp tiekiamojo oro temperatūros prieaugio ir galimo didžiausio jo prieaugio:

$$\varepsilon_T = \frac{T_{oro} - T_{ls}}{T_{kol.} - T_{ls}}; \quad (21)$$

Kovo 8 d. matavimų rezultatai

Kolektoriaus efektyvumo skaičiavimams yra naudojami Kovo 8-osios matavimų duomenys. Žemiau yra pateikiamas grafikas 25 pav. su temperatūrinio efektyvumo kitimu priklausomai nuo besikeičiančio saulės spinduliuotės intensyvumo:



25 pav. Temperatūrinio efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)

Šiame grafike kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas yra suskirstymas į dvi kategorijas:

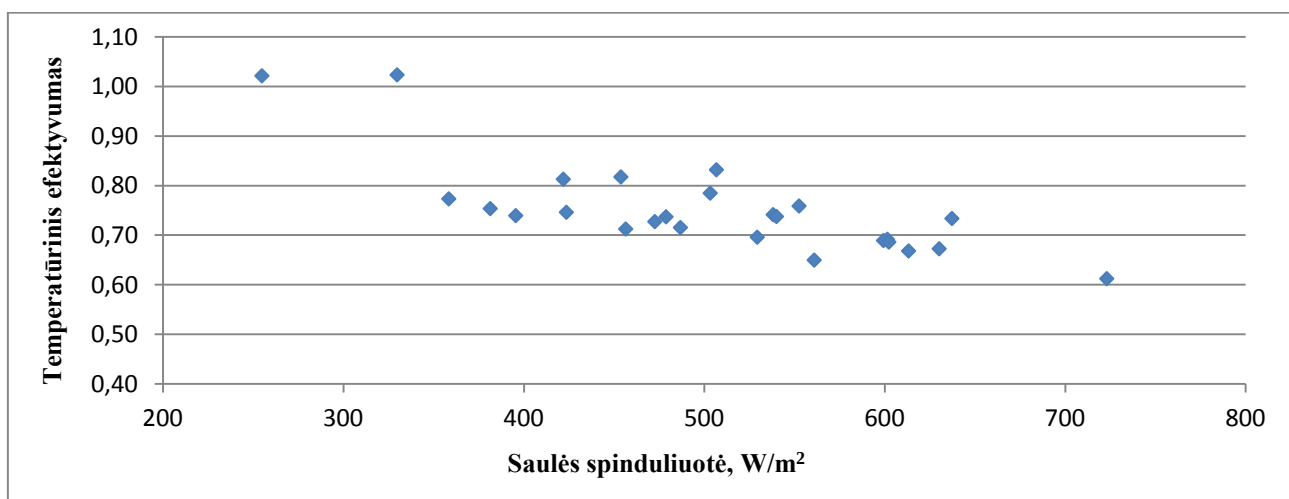
- Reikšmės didesnės už $>1,0$;
- Reikšmės mažesnės už $<1,0$.

Remiantis temperatūrinio efektyvumo formule (21), apskaičiuotos reikšmės, kurių dydis viršija $>1,0$ parodo, kad šiais momentais tiekiamojo oro temperatūra buvo aukštesnė už kolektoriaus paviršiaus temperatūrą. Visos šios reikšmės buvo gautos ankstyvų rytą iki saulės spinduliuotė perkopė apytiksliai 150 W/m^2 ribą ir tuo pačiu kolektoriaus paviršiaus temperatūra tapo aukštesnė už tiekiamojo oro, arba vakare, esant staigiam saulės spinduliuotės mažėjimui. Tiekiamojo oro ir kolektoriaus paviršiaus temperatūrų kreivių susikirtimo taškai yra pavaizduoti 15 pav. violetinėmis elipsėmis.

Nustatant ir vertinant tikrąjį kolektoriaus temperatūrinį efektyvumą yra imamos apskaičiuotos vertės iki $<1,0$. Pateiktame 25 pav. žalia elipse yra pažymėtos kolektoriaus apskaičiuotų temperatūrinio efektyvumo verčių didžiausia koncentracija, kuri ir parodo šį efektyvumą esant nusistovėjusiam kolektoriaus veikimui. Raudona elipsė apibrėžia dvejetainį temperatūrinio efektyvumo kitimą, kuris yra susijęs su 18 pav. matomu temperatūrinio prieaugio kitimu, esant saulės spinduliuotės augimui ir staigiam mažėjimui. Todėl vertinant tik žaliai apibrėžtų taškų koncentraciją, vidutinis kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas yra 68 % ir 71 % imant visas reikšmes gautas iki 1,0 efektyvumo ribos.

Sausio 9 d. matavimų rezultatai

Žemiau yra pateikiamos gautos temperatūrinio efektyvumo kitimo reikšmės esant kintamam tiekiamojo oro debitui.



26 pav. Temperatūrinio efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Sausio 9 d.)

Iš šio paveikslo matome, jog, esant kintamam tiekiamojo oro debitui, kolektoriaus temperatūrinio efektyvumo mažėjimo tendencija, didėjant saulės spinduliuotei, taip pat išlieka. Gautos reikšmės yra aukštesnės už Kovo 8-osios, nes šią dieną saulės spinduliuotė buvo

nepastovesnė, kas galėjo lemti dažnesnį išorinės atitvaros šilumos panaudojimą. Vidutinis šio matavimo periodo temperatūrinis efektyvumas siekia 73 %. Grafike nėra pateikiamos debito reikšmės, nes nebuvo užfiksuotas jo poveikis temperatūriniam efektyvumui.

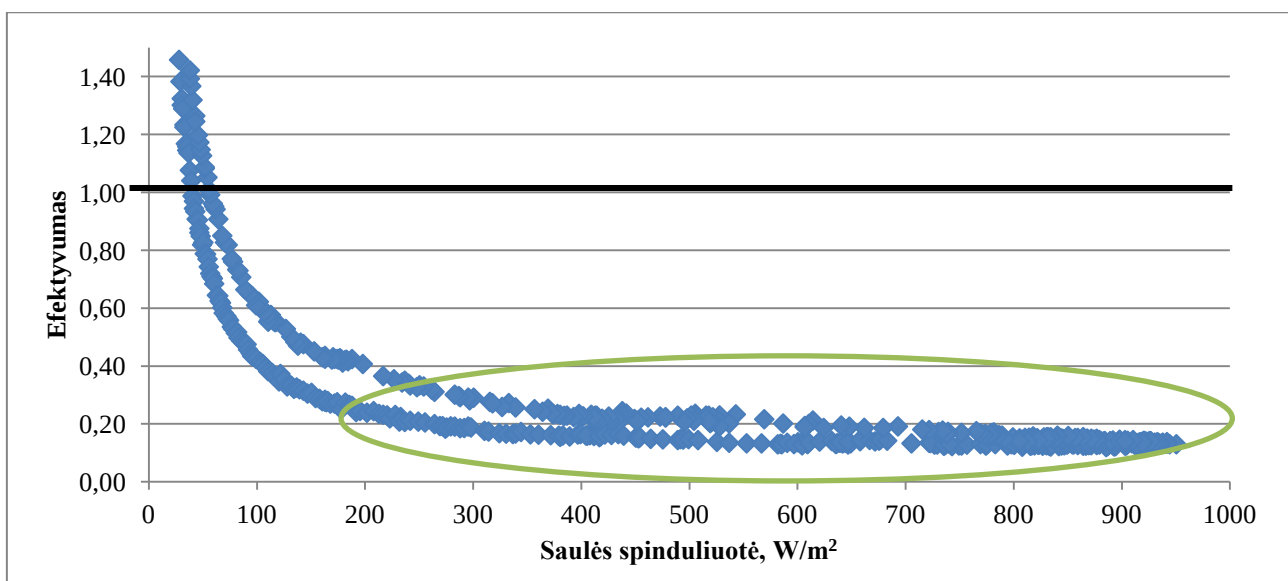
4.4.6. Efektyvumas

Prieš tai nagrinėtas temperatūrinis efektyvumas parodo tik santyki dydį, kokia dalimi yra perduodama šiluma nuo įkaitusio kolektoriaus paviršiaus tiekiamam orui, tačiau šis dydis neparodo kaip efektyviai buvo panaudojama saulės spinduliuotė šiam procesui atlikti. Todėl tam yra naudojama kolektoriaus efektyvumo η išraiška, kuri parodo santykį tarp šilumos kiekio suteikto tiekiamam orui Q ir saulės spinduliuotės intensyvumo I patenkančio ant kolektoriaus paviršiaus ploto A :

$$\eta = \frac{Q}{I_s A_K} = \frac{\dot{M} C_p (T_{Out} - T_{Is})}{I_s A_K}; \quad (28)$$

Kovo 8 d. matavimų rezultatai

Žemiau yra pateikiamas grafikas 27 pav. su efektyvumo kitimu priklausomai nuo saulės spinduliuotės intensyvumo:



27 pav. Efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės (Kovo 8 d.)

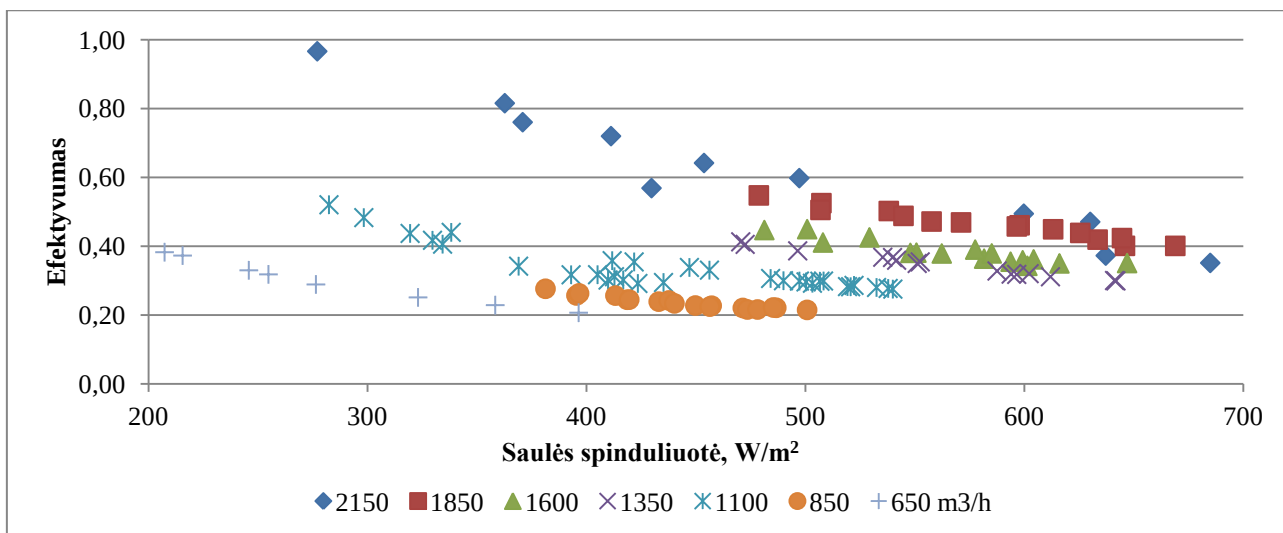
Kaip ir temperatūrinio efektyvumo grafike, nagrinėjant kolektoriaus bendrą efektyvumą, jo reikšmės yra išskirtos į kintančias iki $<1,0$ ir virš $>1,0$. Kadangi Kovo 8 d. aplinkos sąlygos buvo itin palankios atliekamiems matavimams, grafike matome tolygiai išsidėsčiusias kolektoriaus efektyvumo reikšmių kreives, kurios parodo, kad, didėjant saulės spinduliuotės intensyvumui, ypatingai prie žemų reikšmių – $50 \div 200 \text{ W/m}^2$, kolektoriaus efektyvumas sparčiai mažėja. Visos efektyvumo reikšmės, kurios yra didesnės už 50 %, yra gautos prie žemos saulės spinduliuotės

(iki 100 W/m^2 pirmoje dienos pusėje) ir palyginti aukšto tiekiamojo oro temperatūros prieaugio – $6,5 \text{ }^\circ\text{C}$, o reikšmės kurios viršija 100 % efektyvumą yra gautos esant 0 W/m^2 saulės spinduliuotei ir tiekiamojo oro temperatūrai aukštesnei už išorės oro (žr. 15 pav.).

Grafike žalia elipse yra pažymėtos nusistovėjusios kolektoriaus efektyvumo reikšmės, kurių vidurkis – 17 %. Tai parodo, kad kolektorius panaudoja mažiau nei penktadalį saulės energijos, kuri patenka ant kolektoriaus paviršiaus.

Sausio 9 d. matavimų rezultatai

Atliekant tyrimus Kovo 8 d. ir vertinant gautus kolektoriaus efektyvumo rezultatus, pastarieji buvo ganėtinai žemi. Šie rezultatai parodė efektyvumo kitimą priklausomai nuo saulės spinduliuotės pokyčio, tačiau prie pastovaus, palyginti nedidelio, tiekiamojo oro debito nuo kurio šis dydis irgi priklauso. Todėl žemiau yra pateikiamas grafikas 28 pav., kuriame atsispindi kolektoriaus efektyvumas esant skirtingiems tiekiamojo oro debitams:



28 pav. Efektyvumo kitimas priklausomai nuo saulės spinduliuotės ir debito pokyčio (Sausio 9 d.)

Iš grafiko yra matyti, kad kolektoriaus efektyvumas, esant skirtingiems tiekiamojo oro debitams ir didėjančiai saulės spinduliuotei, kaip ir ankstesniu atveju yra mažėjantis. Tačiau šiuo atveju pačios efektyvumo reikšmės yra skirtingos priklausomai nuo tuo metu buvusio nustatyto oro debito.

Atliekant kolektoriaus efektyvumo palyginimą, esant kintamam ir pastoviam debitui, yra įsitikinta, kad gautos reikšmės yra panašios – 27 pav., esant 400 W/m^2 saulės spinduliuotei, kolektoriaus efektyvumas yra apytiksliai 22 %, o 28 pav. esant tai pačiai saulės spinduliuotei ir $650 \text{ m}^3/\text{h}$ – 21 %.

Grafike yra matyti, kad gautos kolektoriaus efektyvumo reikšmės yra augančios sulig kiekviena didinta tiekiamojo oro debito pakopa. Žemiau esančioje 1 lentelėje pateikiamos šio matavimo laikotarpio apskaičiuotos vidutinės reikšmės:

3 lentelė. Efektyvumo ir išmatuotų parametrų vidutinės reikšmės esant kintamam debitui

Debitas , m ³ /h	Saulės spinduliuotė, W/m ²	Temperatūros prieaugis, °C	Temperatūros išeiga, W/m ² °C	Efektyvumas
650	305	12,3	24,8	22 %
850	390	12,1	32,2	27 %
1100	406	13,0	31,2	36 %
1350	500	14,2	35,2	39 %
1600	493	13,6	36,2	44 %
1850	574	14,2	40,4	49 %
2150	496	12,6	39,3	55 %

Esant 650 m³/h debitui kolektoriaus efektyvumas yra 5 % aukštesnis nei apskaičiuotas vidutinis Kovo 8 d., nes tuo metu saulės spinduliuotė mažėjo, o tiekiamojo oro temperatūros prieaugis buvo aukštesnis dėl išorinės atitvaros poveikio. Todėl šiomis reikšmėmis nederėtų naudotis analizuojant kolektoriaus efektyvumą.

Kaip matome iš 3 lentelės kolektoriaus efektyvumo augimas yra akivaizdus, esant didinamam tiekiamojo oro debitui. Remiantis skaičiavimo formule (28) šis kolektoriaus efektyvumo augimas atsiranda dėl permažo tiekiamojo oro temperatūros prieaugio sumažėjimo, esant didesniam oro debitui. Dėl riboto vėdinimo įrenginio našumo nebuvo galimybės nustatyti maksimalų kolektoriaus efektyvumą. Lyginant gautus duomenis Kovo 8 d., esant 650 m³/h, ir Sausio 9 d., esant 2150 m³/h, kolektoriaus efektyvumas išauga 3 kartus.

4 lentelėje yra įtraukta temperatūros išeigos skiltis. Šis santykinis dydis parodo reikalingą saulės spinduliuotės intensyvumą norint pakelti tiekiamojo oro temperatūrą 1 °C prie nurodyto debito. Apskaičiuoti dydžiai svyruoja 31÷41 W/m²°C ribose, tačiau įvertinus tai, jog šio matavimo laikotarpiu saulės spinduliuotė buvo nepastovi, šios reikšmės yra žemesnės. Žemiau pateikiamas trumpas vidutinių temperatūros išeigų Kovo 8 d. ir Sausio 9 d. palyginimas, esant apytiksliai 500 W/m² spinduliuotei:

4 lentelė. Temperatūros išeigų palyginimas

Saulės spinduliuotė, W/m ²	Temperatūros išeiga Sausio 9 d., W/m ² °C	Temperatūros išeiga Kovo 8 d., W/m ² °C	
		Pirmoje dienos pusėje	Antroje dienos pusėje
500	35,2 (1350 m ³ /h)	44,2	27,5
	36,2 (1600 m ³ /h)		
	39,3 (2150 m ³ /h)	Vidurkis – 34,7	

Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, kad Kovo 8 d. temperatūros išeiga pirmoje dienos pusėje ženkliai skiriasi nuo esamos antroje dienos pusėje, o jų bendras vidurkis yra artimas Sausio 9 d. apskaičiuotiems rezultatams. Tai tik patvirtina, kad šie rezultatai buvo gauti esant vidutiniai 500 W/m^2 , tačiau esant nemažiams spinduliuotės svyravimams.

4.5. Skyriaus apibendrinimas

Atlikus neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus eksperimentinį tyrimą šildymo sezono metu, pagal išmatuotų parametrų duomenis ir atliktus skaičiavimus išanalizuotas kolektoriaus veikimas. Įvardinti esminiai faktoriai lemiantys kolektoriaus našumą ir identifikuoti specifiniai reiškiniai.

Eksperimento metu patvirtintas faktas, kad kolektoriaus paviršiuje ir jo tūryje vyrauja temperatūrinis gradientas. Hoy-Yen Chan [29] eksperimentinio tyrimo metu nustatė, kad kolektoriuje cirkuliuojančio oro temperatūra auga tolygiai nuo jo apačios iki viršaus. Tačiau mano tyrimo metu nustatyta, kad vidurinėje kolektoriaus dalyje temperatūra yra aukštesnė nei viršutinėje. Šiuos skirtingus rezultatus galėjo lemti skirtingų gabaritų saulės kolektoriai, nes autorius tyrimą atliko naudodamas 2 m^2 kolektorių. Likusioje literatūros apžvalgoje, nei vienas autorius neužsimina apie šį specifinį temperatūros pasiskirstymą kolektoriuje. Remiantis literatūros šaltinių [18], suformuluota išvada, jog vidurinėje kolektoriaus dalyje temperatūra yra aukštesnė dėl mažesnio oro judėjimo greičio šiuose sluoksniuose.

Tyrimo metu taip pat pastebėta, kad nakties metu, esant neveikiančiam kolektoriui, jo paviršiaus temperatūra yra aukštesnė už oro temperatūrą.

Nustatyta, kad vakaro metu, staigiai mažėjant saulės spinduliuotei, dėl išorinės atitvaros šiluminės inercijos tiekiamojo oro temperatūra yra aukštesnė už kolektoriaus paviršiaus temperatūrą.

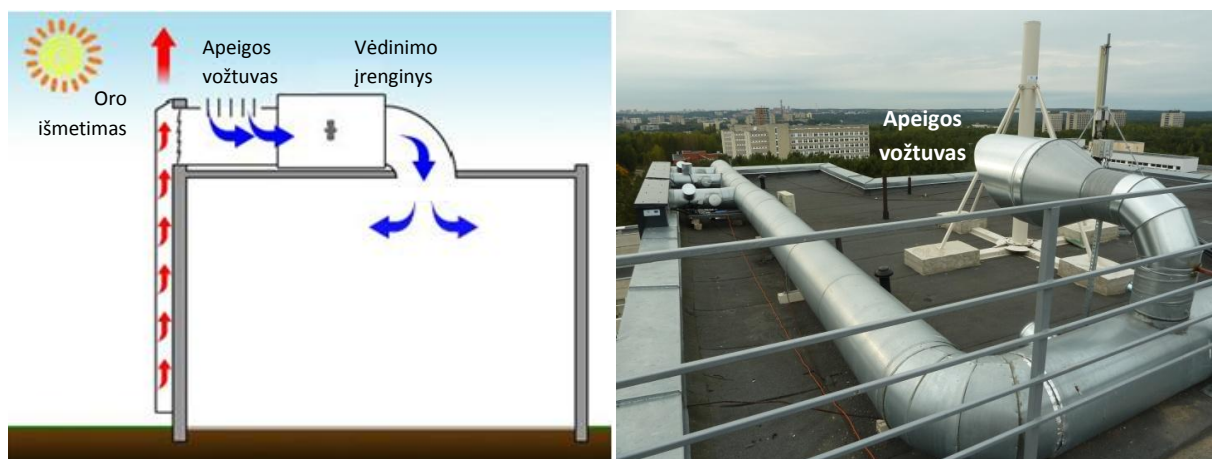
Atliekant tyrimą, kurio metu tiekiamojo oro debitas buvo sumažintas apytiksliai $1200 \text{ m}^3/\text{h}$, esant vidutiniai 500 W/m^2 saulės spinduliuotei, nustatytas nežymus 2°C tiekiamojo oro temperatūros prieaugio pokytis. Todėl šiuo atveju priimta išvada, kad tiekamo oro debitas turi nedidelę įtaką tiekiamojo oro temperatūros prieaugiui. Tačiau, norint tiksliau įvertinti šią priklausomybę, tyrimą reikėtų atlikti esant didesniems tiekiamo oro kiekiams.

Pagal gautus matavimų rezultatus apskaičiuotas kolektoriaus temperatūrinis ir bendras efektyvumas. Ištyrus abiejų rodiklių priklausomybę nuo saulės spinduliuotės intensyvumo, nustatyta, jog abejais atvejais efektyvumas yra mažėjantis, esant augančiai spinduliuotei. Aukštos efektyvumų vertės gautos ankstyvoje ir vėlyvoje paros dalyje dėl tuo metu vyrausio santykinai aukšto tiekiamojo oro temperatūros prieaugio, esant mažai saulės spinduliuotei. Tačiau, esant sąlyginai nusistovėjusioms aplinkos sąlygoms, kolektoriaus vidutinis

temperatūrinis efektyvumas yra 68 %, o bendras efektyvumas – 17 %. Kadangi šis ganėtinai žemas kolektoriaus efektyvumas gautas esant nustatytam 650 m³/h debitui, buvo papildomai įvertintas jo pokytis esant didesniems tiekiamojo oro kiekiams. Nustatyta, kad, didinant oro debitą, kolektoriaus efektyvumas taip pat auga ir perkopia 50 % ribą dėl pasisavinamo didesnio šilumos kiekio.

5. EKSPERIMENTINIS KOLEKTORIAUS TYRIMAS VASAROS SEZONO METU

Gamintojų teigimu [46], neišstiklintas pratakus saulės kolektorius gali būti išnaudojamas ne tik šildymo sezono metu, bet ir vasarą kaip tam tikras „vėsinimo“ įrenginys. Kolektoriaus veikimo principas vasaros sezono metu – ant pietinės išorinės pastato atitvaros įrengtas kolektorius absorbuoja tiesioginius saulės spindulius, o sušilęs oras, natūralios konvekcijos principu, yra pašalinamas per viršutinę kolektoriaus dalį. Šiuo atveju buvo susidurta su problema, nes kolektorius neturėjo oro pašalinimo sklendžių, todėl oras buvo šalinamas per atidarytą apeigos vožtuvą (angl. *bypass valve*), įrengtą ant pastato stogo (žr. 29 pav.). Tuo metu vėdinimo įrenginys buvo išjungtas. Tokiu principu kolektoriaus dengiamas išorinės atitvaros plotas yra apsaugomas nuo tiesioginių saulės spindulių ir sumažina šilumos pritekį į vidines pastato patalpas.



29 pav. Kolektoriaus principinė veikimo schema vasaros metu [46] ir stogo vaizdas su apeigos vožtuvu

Gamintojas „SolarWall“ [46] nenurodo kokia dalimi galima sumažinti pritekį ar vėsos poreikį, taip pat nėra informacijos dėl šios kolektoriaus funkcijos pritaikymo skirtingoms atitvarų konstrukcijoms, nes nuo jų fizikinių savybių priklauso šilumos pritekiai.

Gamintojo teigimu pratakus saulės kolektorius apsaugo išorinę atitvarą nuo tiesioginių saulės spindulių, tačiau nėra visiškai žinoma ar, nurodant šį „vėsinimo“ veikimo principą, yra

atsižvelgta į vykstančius šilumos mainus kolektoriaus vidinėje ertmėje tarp išorinės atitvaros ir cirkuliuojančio šilto oro, kuris vasaros metu sušyla iki daugiau nei 45 °C.

Todėl, norint įsitikinti šia apsaugine kolektoriaus funkcija ir nustatyti galimus šilumos pritekėjimus per išorinę pastato atitvarą vasaros metu, buvo atliktas eksperimentinis tyrimas. Šio tyrimo metodas buvo pagrįstas šilumos srauto per išorinę pastato atitvarą ir vidinio paviršiaus temperatūros matavimais. Gauti rezultatai buvo lyginami tarpusavyje pagal matavimo taškus, tai – išorinės atitvaros plotas kurį dengia pratakus saulės kolektorius ir gretimais esantis nedengiamas plotas.

5.1. Matavimo įrangos aprašymas

Atliekant šį eksperimentinį tyrimą ir nustatant galimus šilumos pritekėjimus iš išorės buvo parinkta matavimo ir duomenų kaupimo įranga. Naudojantis šilumos srauto plokštelėmis išmatuotas šilumos srauto dydis ir kryptis, o pritvirtintomis termoporomis – vidinio paviršiaus temperatūrų svyravimai. Detalesnis naudotos įrangos aprašymas:

- Daugiafunkcinis matavimo prietaisas ir duomenų kaupiklis *Ahlborn Almemo* 2890-9 (1 vnt.) - 9 įvesties kanalai išoriniams jutikliams, 2 išvesties kanalai, iki 100,000 išmatuotų duomenų išsaugojimas, duomenų kaupimo intervalas 1s÷1h ir didesnis, darbinė temperatūra -10 ÷ +60 °C, tikslumas ±0.02 % (esant 2,5 arba 10 matavimų per sekundę), ±0.05 % (esant 50 matavimų per sekundę), temperatūrinis nuokrypis 0.003 % / °C [48];



30 pav. Duomenų kaupiklis *Ahlborn Almemo* 2890-9 [48]

- Šilumos srauto plokštelė *Ahlborn Almemo* FQA019C (3 vnt.) – išmatavimai 250x250x1,5mm; matavimo ribos <8 W/m²; temperatūrinis stabilumas 80 °C, tikslumas 5 % esant 25 °C aplinkos temperatūrai [48];



31 pav. Šilumos srauto plokštelė FQA019C [48]

- Termopora *Ahlborn Almemo* FTA3900 (3vnt.) - matavimo ribos $-25 \div +400$ °C [48].

Tiekiamojo oro temperatūros rezultatai yra imami iš duomenų bazės SCADA. Šiuo atveju pasirinktos termoporos yra sumontuotos ortakio atšakose, tarp pratakaus saulės kolektoriaus ir magistralinio ortakio 12 pav.(dešinėje).

Matavimo įrangos išdėstymas

Šilumos srauto plokštelių ir termoporų matavimų taškai buvo pasirinkti atsižvelgus į galimai didžiausią šilumos mainų vietą – aukščiausia kolektoriaus zona, nes, remiantis laisvosios konvekcijos teorija, šioje zonoje cirkuliuoja aukščiausios temperatūros oras, kuris turi didžiausią šilumos mainų potencialą, todėl įranga buvo sumontuota fakulteto 8-ame aukšte ant atitvaros vidinio paviršiaus. Pasirinktos šilumos srauto plokštelės ir termoporos buvo išdėstytos vienodame aukštyje, tačiau skirtinguose taškuose dėl galimybės palyginti gautus duomenis:

- **1 taškas** – saulės spinduliuotės tiesiogiai veikiamas išorinės atitvaros plotas;
- **2 taškas** – išorinės atitvaros dalis, kurią dengia kraštinė kolektoriaus dalis;
- **3 taškas** – išorinė atitvaros dalis, kurią dengia centrinė kolektoriaus dalis.

Žemiau esančiame 32 pav. pateikiami įrangos išdėstymo taškai.



32 pav. Matavimo įrangos išdėstymas (kairėje – pagalbinė patalpa, dešinėje – laiptinė)

Duomenų kaupimas buvo atliekamas nuo 2012 metų Birželio 25 d. iki Liepos 16 d., tačiau duomenų analizei pasirinktos Birželio 29–30 d., esant intensyviai, tačiau nepastoviai saulės spinduliuotei ir apytiksliai vidutiniai 21 °C lauko oro temperatūrai dienos metu, bei Liepos 7 d., esant intensyviausiai ir pastoviausiai saulės spinduliuotei, ir apytiksliai vidutiniai 34 °C lauko oro temperatūrai.

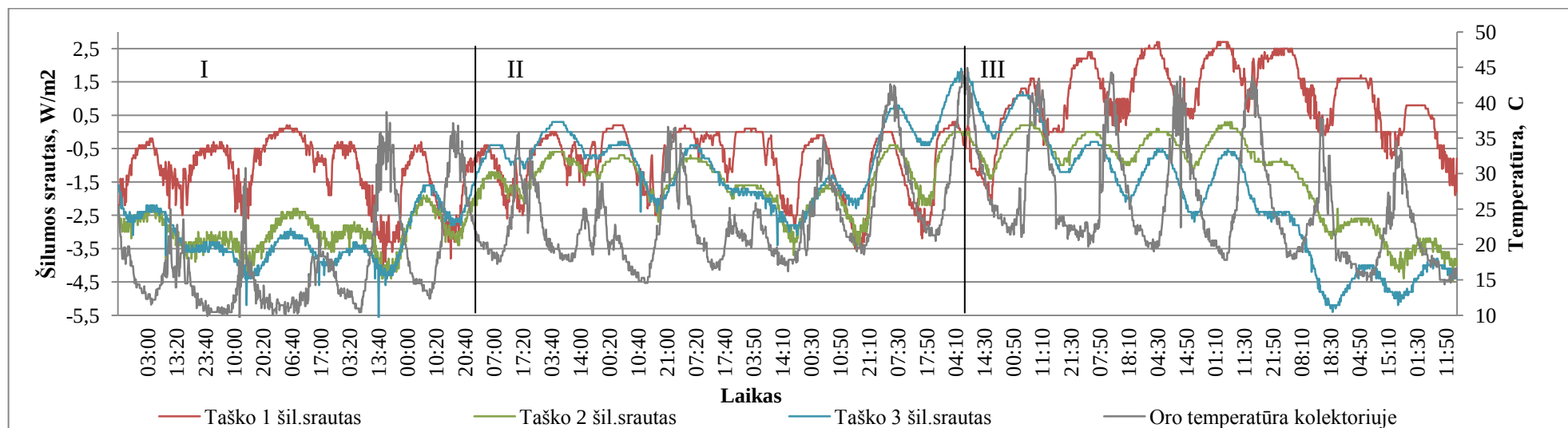
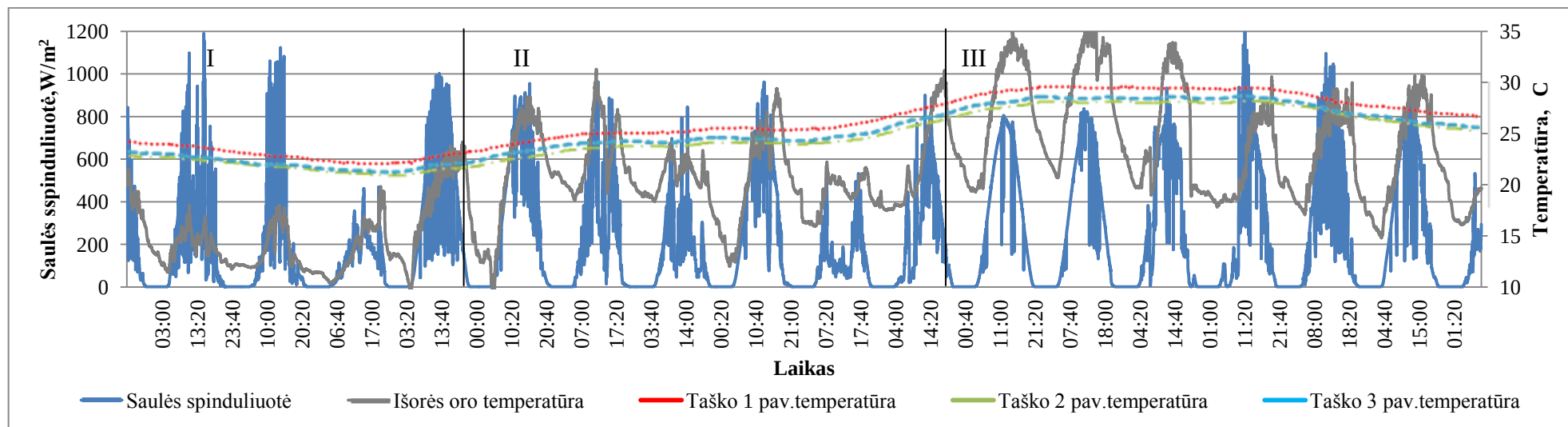
5.2. Matavimo duomenų rezultatai

Viso matavimo laikotarpio rezultatai

Nurodyto tiriamojo laikotarpio gauti matavimų duomenys yra pateikiami 33 pav. ir 34 pav. Šilumos srauto per išorinę atitvarą (žr. 34 pav.) gautos matavimų reikšmės kinta nuo neigiamų iki teigiamų reikšmių, kurių ženklas parodo šilumos srauto kryptį per išorinę atitvarą: neigiamos reikšmės – šilumos tekėjimas iš pastato vidaus į išorę, teigiamos – šilumos pritekėjimai. Pateiktuose paveiksluose vertikalios linijos išskiria nagrinėjamus laikotarpius (I, II, III).

Nagrinėjant I laikotarpį (žr. 34 pav.), dienos metu vyravo šilumos nuostoliai, kurie didžiausią vertę pasiekdavo vidurdienį, o nakties metu nuostoliai mažėdavo. Šis šilumos srauto vėlavimas atsiranda dėl masyvios išorinės atitvaros šiluminės inercijos, nes plokštelės šilumos srautą matuoja realiu laiku, tačiau prasiskverbusi šiluma yra užfiksuojama tik nakties metu. Lyginant matuojamų taškų rezultatus, dengiamo išorinės atitvaros ploto (Taškai 2 ir 3) šilumos srauto kitimo amplitudė yra mažesnė nei nedengiamo ploto. Tai parodo, kad neįstiklintas pratakus saulės kolektorius veikia kaip papildomas išorinės atitvaros apsauginis sluoksnis, kuris sumažina išorės veiksnio, šiuo atveju išorės oro temperatūros ir saulės spinduliuotės, įtaką išoriniai pastato atitvarai. Kadangi šiuo laikotarpiu dienos metu išorės oro ir kolektoriuje cirkuliuojančio oro temperatūros buvo panašios, yra akivaizdu, kad šių taškų šilumos srautai kito daugiausiai dėl saulės spinduliuotės poveikio. Kadangi Taško 1 išorinis atitvaros paviršius nėra apsaugotas nuo tiesioginių saulės spindulių, jo šilumos srautas kito intensyviau nei apsaugoto paviršiaus. Dėl kolektoriaus poveikio išoriniai atitvarai grafike yra matomas didesnis Taškų 2–3 kreivių atotrūkis nuo Taško 1. Dėl šiuo laikotarpiu lauke vyravusios žemesnės oro temperatūros nei pastato viduje ir dėl apsaugos nuo tiesioginių saulės spindulių, Taškuose 2-3 buvo didesni šilumos nuostoliai nei Taške 1. Nakties metu pastarojo taško šilumos nuostoliai buvo kompensuojami dienos metu sukaupta šiluma.

Lyginant 33 pav. ir 34 pav. temperatūras, nustatyta, kad pirmosios dienos 4 val. ryto išorės oro temperatūra buvo 12 °C, o tuo metu oro temperatūra kolektoriuje – 13,2 °C. Iš pirmo žvilgsnio, lyginant šias temperatūras, atrodytų, jog nedengiamo ploto vidinio paviršiaus temperatūra turėtų būti žemesnė dėl žemesnės oro temperatūros kitoje paviršiaus pusėje ir šilumos srauto tankio, tačiau paradoksalu, nes tuo metu nedengiamo vidinio paviršiaus temperatūra buvo 1°C aukštesnė už dengiamo ploto. Šiam gautam rezultatui įtakos galėjo turėti matuojamų taškų pasirinkimas, kadangi Taško 1 matavimo įranga sumontuota uždaroje patalpoje, o likusieji taškai – pastato laiptinėje. Todėl šie temperatūrų rezultatai galėjo būti iškreipti dėl mažesnės oro apykaitos uždaroje patalpoje. Taip pat šiuose rezultatuose nėra atsižvelgta į matavimo įrangos paklaidas.



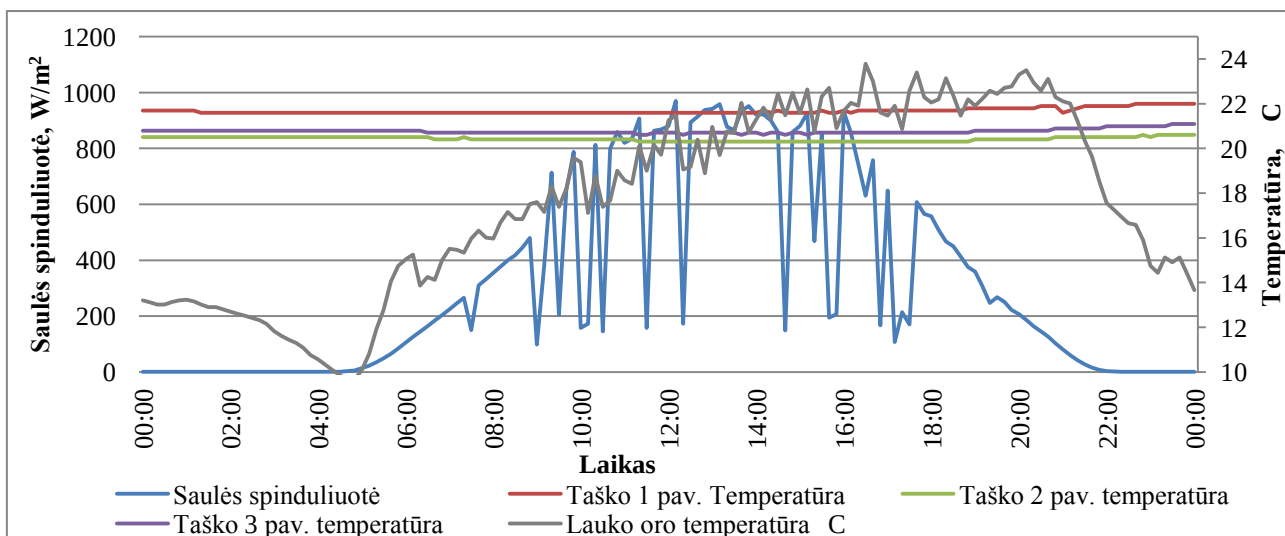
Nagrinėjant II laikotarpį, pirmoje jo dalyje kolektoriaus dengiamo ploto šilumos srautas sumažėja ir tampa panašus į nedengiamo ploto. Tai įvyksta dėl augančios kolektoriuje esančio oro ir išorės oro temperatūros, kuri dienos metu susilygina arba tampa aukštesnė už vidinio paviršiaus temperatūrą. Tam tikrais momentais, esant nykstamai mažam temperatūros gradientui, šilumos srauto tankis yra artimas nuliui. Tai patvirtina Furjė dėsnis, kuris teigia – šilumos srauto tankis yra proporcingas temperatūrų gradientui [52]. Tačiau šis procesas yra vėluojantis, dėl išorinės atitvaros inertiškumo. Nors šioje dalyje išorės oro temperatūra ir saulės spinduliuotės kiekis išaugo, tačiau šilumos pritekių atsiradimas nepastebimas.

III-oje nagrinėjamo laikotarpio dalyje išorės oro temperatūra dar labiau išauga ir pasiekia 35 °C dienos metu. Saulės spinduliuotės bendras kiekis taip pat padidėja dėl grafike matomų mažesnių svyravimų. Dėl šių priežasčių atsiranda šilumos pritekėjimai į pastato vidų iš išorės. Pirmosiomis dienomis šilumos pritekiai atsiranda Taške 3, o praėjus trims paroms jie tampa nuostoliais, nors maksimali 43 °C oro temperatūra dienos metu kolektoriuje išlieka dar papildomai tris dienas. Šio taško šilumos pritekėjimų pasikeitimą nuostoliais galima paaiškinti naudojantis 33 pav. vidinio paviršiaus temperatūrų kitimu. Yra matyti, kad šilumos pritekėjimai atsiranda tik tuo laikotarpiu, kai vidinio paviršiaus temperatūra auga, o jai nusistovėjus – šilumos pritekiai pereina į nuostolius.

Likusiu laikotarpiu šilumos pritekiai vyrauja tik nedengiamo atitvaros ploto zonoje, tačiau kaip ir ankstesniais atvejais, šie pritekiai vėluoja dėl atitvaros inertiškumo.

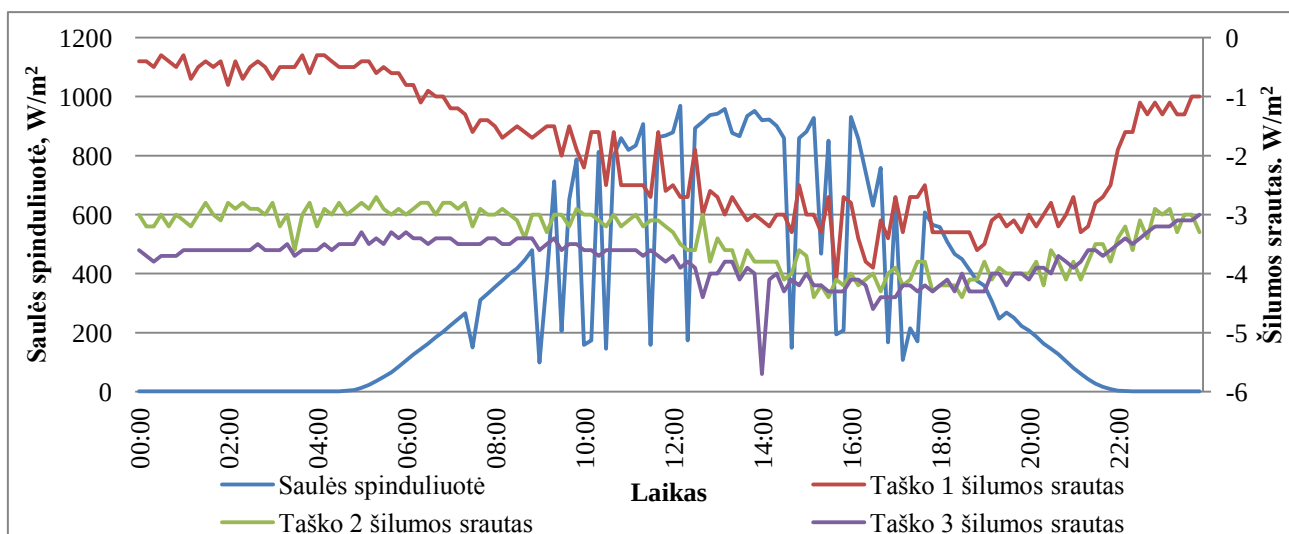
Birželio 29d. matavimų rezultatai

Žemiau esančiame 35 pav. yra pateikiamas detalesnis išmatuotų temperatūrų ir saulės spinduliuotės intensyvumo kitimas Birželio 29 d.:



35 pav. Lauko oro ir vidinių paviršių temperatūrų bei saulės spinduliuotės kitimas (Birželio 29 d.)

Grafike matyti, jog paviršiaus, kurio nedengia kolektorius, temperatūra yra apytiksliai 1°C aukštesnė, nei paviršių kurie yra apsaugoti nuo tiesioginių saulės spindulių. Laikotarpio metu visų matuojamų taškų temperatūros nekinta ir tik apie 20 val. yra pastebimas nežymus $0,1^{\circ}\text{C}/\text{val.}$ augimas. Šis vėlavimas atsiranda dėl atitvaros šiluminės inercijos.



36 pav. Vidinio paviršiaus šilumos srauto kitimas priklausomai nuo saulės intensyvumo (Birželio 29 d.)

Iš 36 pav. matyti, jog Taško 1 paviršiaus šilumos srautas yra daugiau nei 3 kartus mažesnis nakties metu ir artimas nuliui, nei paviršių, kurie yra dengiami kolektoriaus. Tai parodo, kad nakties metu šis išorinės atitvaros plotas patiria minimalius šilumos nuostolius, kurie didėja dienos metu. Kadangi nakties metu išorės oro temperatūra yra apytiksliai 10°C žemesnė nei vidinio paviršiaus (žr. 35 pav.), vidinės patalpos turėtų patirti šilumos nuostolius, tačiau dienos metu sukauptas šilumos kiekis, dėl saulės spinduliuotės, padengia šiuos nuostolius nakties metu, kurie vėluoja dėl atitvaros šiluminės inercijos. Viso šio laikotarpio metu Taškų 2-3 šilumos srautas buvo didesnis nei Taško 1, todėl, remiantis šiais duomenimis, kolektoriaus dengiamas plotas patyrė didesnius šilumos nuostolius nei nedengiamas, tačiau mažesnius šilumos pritekėjimus dienos metu.

5.3. Skyriaus apibendrinimas

Vasaros sezono metu, remiantis šilumos srauto metodu, buvo atliktas eksperimentinis tyrimas nustatant galimus šilumos pritekėjimus per išorinę pastato atitvarą. Pagal gautus matavimų rezultatus nustatyta, kad šilumos pritekėjimams didžiausią įtaką turi ne išorinė oro temperatūra, o saulės spinduliuotės intensyvumas, kuris labiausiai lemia atitvaros išorinio paviršiaus temperatūrą.

Taip pat nustatyta, kad kolektoriaus dengiamas išorinis atitvaros plotas patiria didesnius šilumos nuostolius nei neapsaugotas paviršius. Dėl šios priežasties sumažėja šilumos pritekių tikimybė.

Nustatyta, kad dėl išorinės atitvaros masyvumo ir šiluminės inercijos, šilumos srautas yra vėluojantis. Tačiau, esant žemoms išorės oro temperatūroms nakties metu ir saulėtoms dienoms, šis šilumos srauto vėlavimas gali būti išnaudojamas šilumos nuostolių sumažinimui nakties metu.

Neįstiklintas pratakus saulės kolektorius atlieka svarbią funkciją, apsaugodamas išorinę pastato atitvarą nuo tiesioginių saulės spindulių ir sumažina šilumos pritekį vasaros metu.

6. EKONOMINIS IR ENERGINIS VERTINIMAS

Šioje dalyje yra atliekamas neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus ekonominis ir energinis vertinimas, naudojantis „RETScreen“ (angl. *RET's – renewable energy technologies*) programa [50] ir jo metu yra nustatomi pagrindiniai šio įrenginio rodikliai – atsipirkimo laikas, grynoji dabartinė vertė, energijos generavimas ir kt.

Tai *Excel* pagrindu sukurta programa, kuri yra naudojama energijos (elektros, vėsos, šilumos ir pan.) modeliavimui. Gamintojo teigimu [50] ši programa leidžia priimti sprendimus, nustatant atsinaujinančios energijos sistemų efektyvumą bei kogeneracinių projektų technines, finansines ir technologines galimybes. Žemiau pateikiamas „RETScreen“ programos pradinio darbalaukio vaizdas 37 pav.:



37 pav. „RETScreen“ programos pradinis darbalaukis [50]

Pagrindinės programos galimybės [50]:

- Galimybė įvertinti energijos panaudojimo ar gamybos efektyvumą gyvenamiesiems, komerciniams, pramoniniams ar viešosios paskirties pastatams bei įvairiems įrenginiams;

- Energijos sutaupymai, finansiniai srautai ir emisijos sumažinimas, modeliuojant „švariosios“ energijos projektus;
- „Švariosios“ ir tradicinės energijos technologijų palyginimas.

Šioje programoje taip pat galima atlikti neįstiklinto pratakiaus saulės kolektoriaus modeliavimą (programoje angl. SAH - *solar air heater*). Pagal nustatytus įvesties duomenis t.y. veikimo režimas, temperatūros, saulės spinduliuotės intensyvumas (kiekvienam mėnesiui atskiras) ir kitus parametrus, galime stebėti kaip kinta generuojamas energijos kiekis reikalingas orui pašildyti, taip pat atgaunami šilumos nuostoliai per išorinę atitvarą. Finansinėje analizėje yra identifikuojami kasmetiniai sutaupymai bei įrenginio atsipirkimo laikas.

6.1. Priimti rodikliai

Atliekant neįstiklinto pratakiaus saulės kolektoriaus ekonominį vertinimą, modeliavimo programoje yra apskaičiuojamas metinis generuojamos šiluminės energijos kiekis. Šis sutaupyta šiluminės energijos kiekis yra lyginamas su alternatyviais, labiausiai paplitusiais, šildymo būdais:

- Šildymas elektra – veikimo efektyvumas 100 %, elektros kaina – 50,1 ct/kWh;
- Centralizuotas šildymas – 30 ct/kWh;
- Dujinis katilas – sezoninis efektyvumas 80 %, dujų kaina 2,17 Lt/m³.

Modelyje meteorologiniai duomenys yra imami iš NASA duomenų bazės [49]. Modelyje analizuojamas 8 mėn. laikotarpis.

Pagrindiniai modelio įvesties duomenys:

- Vidaus patalpų temperatūra – 20 °C;
- Išorinės atitvaros varža – 2 m²- °C/W;
- Tiekiamo oro debitas – 2000 m³/h;
- Darbo laikas – 5 d./sav., 10 val./dieną;
- Kolektoriaus paviršiaus spinduliavimo sugerties koeficientas – 0,86;
- Kolektoriaus plotas – 100 m².

Įvesties duomenų darbalaukio vaizdas pateikiamas Priede Nr. 2

Naudojantis NASA [49] interneto prieiga ir įvedus kolektoriaus padėties koordinates: platumą – 54.722, ilgumą – 25.337, gauti šie meteorologiniai duomenys:

5 lentelė. NASA atmosferinių parametrų duomenys

Mėnuo	Vidutinis mėnesio paros saulės spinduliuotės intensyvumas į horizontalų paviršių, kWh/m ² /dieną	Vidutinis mėnesio paros saulės spinduliuotės intensyvumas į kolektoriaus paviršių, kWh/m ² /dieną	Vidutinė mėnesio oro temperatūra	Vidutinis mėnesio vėjo greitis, m/s
Sausis	0,75	2,5	-4,4	4,3
Vasaris	1,51	3,36	-4,1	3,8
Kovas	2,63	3,21	-0,1	3,9
Balandis	3,71	2,87	7,0	3,6
Rugsėjis	2,72	2,62	12,9	3,5
Spalis	1,44	2,15	7,4	3,9
Lapkritis	0,75	1,77	1,0	4,0
Gruodis	0,54	1,94	-3,6	4,1

Pagal šiuos Lentelėje Nr. 5 pateiktus duomenis, toliau yra apskaičiuojamas kolektoriaus energinis našumas ir ekonominiai rodikliai.

6.2. Rezultatai

Atlikus šio įrenginio modeliavimą pagal programoje užsiduotus parametrus ir NASA meteorologinius duomenis, buvo gauti šie rezultatai:

6 lentelė. Energijos išeigos rezultatai pagal NASA duomenis

Parametras (8 mėnesių)	Rezultatai
Kolektoriaus specifinis našumas	145 kWh/m ²
Kolektoriaus efektyvumas	30 %
Atsinaujinančios energijos generavimas	12,6 MWh
Pastato šilumos nuostolių atgavimas	1,9 MWh
Atsinaujinančios energijos suteikimas	14,5 MWh

Atliekant modelio ekonominį vertinimą yra nustatomas atsipirkimo laikas, vidinė grąžos norma (VGN), grynoji dabartinė vertė (GDV) ir kiti rodikliai. Priimtos šios prielaidos:

- Projekto investiciniai kaštai – 72000Lt (720 lt/m²);
- Projekto gyvavimo trukmė – 30 metų;
- Infliacijos lygis – 3 %;
- Energetinių išteklių kainų didėjimo rodiklis – 3% (angl. *Energy cost escalation rate*);
- Palūkanų norma – 0 %.

Įvesties duomenų darbalaikio vaizdas pateikiamas Priedas Nr. 2.

Pagal šiuos rodiklius gauti šie rezultatai:

7 lentelė. Ekonominis palyginimas

Rodiklis	Šildymas elektra	Centralizuotas šildymas	Dujinis katilas
Vidinė gražos norma (VGN)	13 %	7,5 %	6,4 %
Papr.atsipirkimo laikas (PAL)	9,6 metai	16,6 metai	19,0 metai
Laikotarpis iki teigiamo pinigų srauto	8,4 metai	13,3 metai	14,9 metai
Grynoji dabartinė vertė (GDV)	293.683 Lt	140.607 Lt	114.175 Lt
Metiniai gyvavimo ciklo sutaupymai	9789 Lt	4687 Lt	3806 Lt
Metiniai šildymo sutaupymai	7463 Lt	4339 Lt	3799 Lt

Iš gautų rezultatų matome, jog neįstiklintas pratakus saulės kolektorius greičiausiai atsipirks pastate, kuris šildymui naudojama elektros energija – 9,6 metai.

Buvo priimta, kad neįstiklintas pratakus saulės kolektorius tarnauja 30 metų, tačiau faktiškai šio įrenginio gyvavimo trukmė yra kur kas ilgesnė ir tolygi statinio gyvavimo trukmei [50]. Įvertinus šį faktą kolektoriaus GDV ir VGN yra aukštesnės.

6.3. Gautų rezultatų palyginimas su faktiniais duomenimis

„RETScreen“ modeliavimo programoje kolektoriaus energijos išeigos rezultatai labiausiai priklauso nuo meteorologinių duomenų bazės. Ši programa naudoja antžeminės meteorologinės stoties arba globalinio palydovo matavimo duomenis. Ankščiau nagrinėto modelio atveju buvo naudojami NASA duomenys, nes pačioje programoje yra tik Kauno miesto meteorologinės stoties duomenys.

Šiame skyrelyje yra atliekamas gautų kolektoriaus energijos išeigų, naudojantis NASA meteorologiniais duomenimis, palyginimas su faktiniais 2011 metų išmatuotais meteorologiniais duomenimis. Skaičiavimuose naudojami faktiniai duomenys yra paimti iš Pastatų Energetinių Sistemų ir Mikroklimato laboratorijos (PEMS) meteorologinės stoties duomenų bazės.

Vidutinis mėnesio paros saulės spinduliuotės intensyvumas į horizontalų paviršių Q_s yra apskaičiuojamas:

$$Q_s = \frac{I_{vid.} \cdot h}{d};$$

Čia:

$I_{vid.}$ – vidutinis paros saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m^2 ;

h – saulės spinduliuotės valandų skaičius, val.;

d – mėnesio parų skaičius.

Skaičiavimuose naudojamas vidutinis paros saulės spinduliuotės intensyvumas ir valandų skaičius yra imamas nuo to momento kai saulės intensyvumas pradeda augti ryte ir nustoja vakaro metu. Gauti šie meteorologiniai rezultatai:

8 lentelė. Faktinių ir NASA duomenų palyginimas

Mėnuo	Vidutinis mėnesio paros saulės spinduliuotės intensyvumas į horizontalų paviršių, kWh/m ² /dieną		Vidutinė išorės oro temperatūra, °C		Vidutinis vėjo greitis, m/s	
	Faktiniai	NASA	Faktiniai	NASA	Faktiniai	NASA
Sausis	0,39	0,75	-3,13	-4,40	3,00	4,3
Vasaris	1,41	1,51	-7,48	-4,10	2,85	3,8
Kovas	2,56	2,63	0,29	-0,10	3,08	3,9
Balandis	3,65	3,71	9,43	7,00	2,50	3,6
Rugsėjis	2,79	2,72	13,89	12,90	2,33	3,5
Spalis	1,51	1,44	7,30	7,40	2,43	3,9
Lapkritis	0,40	0,75	2,62	1,00	2,43	4
Gruodis	0,25	0,54	1,42	-3,60	3,05	4,1
Vidurkis	1,62	1,76	3,04	2,01	2,71	3,89

Iš gautų rezultatų yra matyti, kad faktiniai rezultatai skiriasi nuo NASA duomenų visais atvejais. Nustatyta, kad faktinis vidutinis mėnesio paros saulės spinduliuotės intensyvumas į horizontalų paviršių ir vidutinis vėjo greitis yra mažesni nei NASA pateikiami, o vidutinė nagrinėjamų aštuonių mėnesių vidutinė temperatūra yra 1 °C aukštesnė.

Kadangi šiais duomenimis yra sudėtinga nusakyti kokia būtų neįstiklinto pratakais saulės kolektoriaus šiluminės energijos išeiga, nes saulės intensyvumas abejais atvejais yra pateikiamas į horizontalų paviršių, šie duomenys yra perskaičiuojami pagal vertikalų kolektoriaus pasvirimo kampą, naudojantis „RETScreen“ programa. Žemiau yra pateikiami gauti duomenys:

9 lentelė. Energijos išeigų palyginimas

Rodiklis (8 mėnesių)	Rezultatai	
	NASA	Faktinis
Kolektoriaus specifinis našumas, kWh/m ²	145	135
Kolektoriaus efektyvumas	30 %	33 %
Atsinaujinančios energijos generavimas, MWh	12,6	11,7
Pastato šilumos nuostolių atgavimas, MWh	1,9	1,8
Atsinaujinančios energijos suteikimas, MWh	14,5	13,5

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad faktinis kolektoriaus šiluminės energijos generavimas yra mažesnis nei gautas naudojantis NASA duomenimis. Tačiau kolektoriaus efektyvumas yra 3 % aukštesnis dėl mažesnio vidutinio vėjo greičio.

Kadangi faktinis kolektoriaus generuojamos šiluminės energijos kiekis yra mažesnis, atitinkamai atsipirkimo laikotarpis irgi pailgėja. Ankstesniame skyrelyje buvo nustatyta, kad kolektorius atsipirks per 9,6 metus (žr. 7 lentelė) lyginant su šildymo elektra baziniu variantu. Šiuo atveju faktinis atsipirkimas pailgėja iki 10,7 metų.

Išvados

1. Magistrinio darbo tema atliktoje literatūros apžvalgoje buvo pasigęsta atliktų eksperimentinių tyrimų Lietuvoje ir kaimyninėse valstybėse, esančiose panašaus klimato zonoje.
2. Eksperimentinio tyrimo metu patvirtintas faktas, kad, esant veikiančiam kolektoriui, jo paviršiuje ir tūryje vyrauja temperatūrinis gradientas, o vidurinėje dalyje temperatūra yra aukštesnės nei viršutinėje (didžiausias užfiksuotas skirtumas Kovo 8 d. – 6 °C).
3. Tiekiamojo oro temperatūros prieaugis labiausiai priklauso nuo saulės spinduliuotės intensyvumo, o debito pokytis turi nežymų poveikį šiam prieaugiui. Lyginant gautus duomenis su gamintojo „SolarWall“ deklaruojamais, faktinis temperatūros prieaugis yra 6 °C žemesnis už nurodomą.
4. Didžiausias temperatūros prieaugis užfiksuotas 2013 m. Kovo 7 d. – 25 °C , esant 825 m³/h tiekiamo oro debitui ir 904 W/m² saulės spinduliuotės intensyvumui.
5. Pagal gautus matavimų duomenis apskaičiuotas kolektoriaus temperatūrinis efektyvumas, kurio vidutinis dydis siekia 71 %.
6. Tyrimo metu nustatyta, kad, esant augančiai saulės spinduliuotei, kolektoriaus efektyvumas mažėja, tačiau padidinus tiekiamojo oro debitą jis išauga. Nustatytas 55 % efektyvumas, esant 2150 m³/h debitui, apytiksliai 500 W/m² saulės spinduliuotei ir 12,6 °C tiekiamojo oro temperatūros prieaugiui.
7. Nustatyta, kad pastato išorinė atitvara turi reikšmingą poveikį kolektoriaus veikimui. Dėl atitvaros šiluminės inercijos dienos metu pasireiškia tiekiamojo oro temperatūros augimo vėlavimas, tačiau per dieną sukaupia šiluma yra atiduodama vakaro metu.
8. Išanalizavus kolektoriaus apsauginę funkciją nuo tiesioginių saulės spindulių pastato išoriniai atitvarai, nustatyta, kad vasarą dienos metu kolektorius sumažina šilumos pritekėjimus, bet padidina šilumos nuostolius naktį, bei žiemos laikotarpiu.
9. Atlikus kolektoriaus modeliavimą „RETScreen“ programa gauta, kad kolektorius per 2011 m. 8 mėnesių šildymo laikotarpį būtų pagaminęs 11,7 MWh šiluminės energijos ir atgavęs 1,8 MWh šilumos nuostolių, o jo efektyvumas būtų siekęs 33 %. Taip pat nustatyta, kad šie faktiniai energijos rezultatai yra 7 % mažesni nei gauti, naudojantis NASA duomenimis.

Problemos

Kiekvieno eksperimentinio tyrimo metu yra neišvengiamas susidūrimas su išskylančiomis problemomis. Todėl, siekiant gauti kuo tikslesnius tyrimo rezultatus, turi būti užtikrintas šių problemų likvidavimas ir stabili tyrimo eiga.

Atliekant kolektoriaus eksperimentinį tyrimą pirmiausia buvo apžvelgti literatūros šaltiniai, kuriuose aptiktas teiginys, kad neįstiklinto pratakaus saulės kolektoriaus paviršiuje vyrauja temperatūros gradientas. Dauguma autorių atlikdami tyrimus priimdavo prielaidą, kad kolektoriaus paviršiaus temperatūra yra vienoda. Šiame darbe buvo kelios išeitys – priimti šias prielaidas atliekant skaičiavimus arba išmatuoti. Buvo pasirinktas matavimo variantas, nes šioje situacijoje pagelbėjo Civilinės inžinerijos mokslo centros (CIMC) Pastatų energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorija, kuri suteikė reikalingą įrangą. Montavimo darbai buvo atlikti 2012 m. vasaros metu, atliekant mokslinės veiklos praktiką. Nuotraukos iš šių darbų pateikiamos Priede Nr. 1. Iš viso buvo panaudota 14 vnt. termoporų, tačiau dėl nežinomų priežasčių funkcionuojančių yra tik 9 vnt. Tai parodo, kad, naudojant didesnius kiekius matavimo įrangos, yra susiduriama su jos funkcionalumo užtikrinimo problemomis.

Gautų matavimo duomenų analizės stadijoje buvo susidurta su duomenų surinkimo sistemos SCADA problema. Pastebėta, kad termoporų, kurios fiksuoja oro temperatūrą kolektoriuje, gauti rezultatai dubliuojasi laiko atžvilgiu su skirtingomis reikšmėmis, o juos analizuojant yra sudėtinga vertinti nes atsiranda laiko paklaida. Atliekant tyrimus duomenų dubliai buvo panaikinti. Tačiau šios įrangos rangovai turėtų ištaisyti šią klaidą.

Tolimesnių tyrimų gairės

Eksperimentinio tyrimo metu, analizuojant gautus duomenis, buvo pateiktos rezultatų išvalgos. Tačiau netinkamas metodikos pasirinkimas ar ribotos matavimų sąlygos gali lemti galutinį rezultatą. Todėl patobulinti tolimesni tyrimai turėtų pagrįsti arba paneigti šio eksperimentinio tyrimo metu gautus rezultatus ir suformuluotas išvadas.

Šio eksperimento metu, atliekant temperatūros priaugio tyrimą esant kintamam tiekiamojo oro debitui, buvo gauta, kad tiekiamojo oro debito pokytis turėjo nežymų poveikį temperatūros priaugiu. Tačiau tyrimo metu tiekiamojo oro debitas buvo keičiamas ganėtinai trumpais laiko intervalais 10 – 15 min., o visas debitas nuo 2150 m³/h iki 650 m³/h sumažintas per apytiksliai 2 val. Kadangi eksperimento metu buvo pastebėtas pastato išorinės atitvaros poveikis tiekiamojo oro temperatūrai, todėl, įvertinus šį reiškinį, pasirinktas laiko tarpas galėjo būti per trumpas, norint įvertinti debito pokyčio įtaką tiekiamojo oro temperatūros priaugiu. Siūloma, esant galimybei, šiuos laiko tarpus prailginti arba pasirinkti didesnę tiekiamojo oro debito pokytį ilgesniu laiko periodu.

Analizuojant šilumos srautą per pastato išorinę atitvarą, matavimo įranga buvo sudėta 8-ame fakulteto aukšte, o Taškas 1 buvo uždaroje patalpoje ir tai galėjo lemti galutinį rezultatą. Norint tiksliai įvertinti analizuojamus skirtingus taškus, oro temperatūra patalpose turėtų būti vienoda. Todėl yra siūloma perkelti matavimus į žemesnį aukštą, kur matavimo taškai nebūtų atskirti. Taip pat, pagal gautus temperatūros pasiskirstymo kolektoriuje rezultatus, yra siūloma atlikti stebėjimus šilumos srauto vidurinėje kolektoriaus dalyje, kurioje oro temperatūra yra aukščiausia.

Apskaičiavus kolektoriaus efektyvumą, buvo gauta, kad jis priklauso nuo tiekiamojo oro debito – didėjant tiekiamojo oro debitui, kolektoriaus efektyvumas auga. Tačiau dėl riboto vėdinimo įrenginio našumo, nebuvo nustatytas kolektoriaus maksimalus efektyvumas. Todėl, esant galimybei, yra siūloma padidinti vėdinimo įrenginio ventiliatoriaus našumą arba esamu didžiausiu oro debitu apkrauti tik 1-ąją kolektoriaus sekciją, nes jos plotas yra mažiausias, o santykinis dydis m³/h/m² būtų didžiausias. Tokiu atveju būtų nustatytas aukštesnis kolektoriaus efektyvumas. Taip pat nėra visiškai aišku, prie kokio debito kolektoriaus efektyvumas pradėtų mažėti.

Literatūros sąrašas

1. STR 2.01.09:2005 Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas
2. Christensen C, Kutscher C. *Cost and performance predictions for advanced active solar concepts*. Solar energy research institute. Boulder, Colorado. 1990.
3. Kutscher C. *Unglazed transpired solar collectors - an analytical model and test-results*. 1991.
4. Hollands KGT. *Principles of the transpired-plate air heating collector: the solarwall*. 1998.
5. Solar World Congress. 1999. Interneto prieiga:
http://books.google.lt/books?id=lai9aMTvo2kC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
6. Biona M. *Performance curve generation of an unglazed transpired collector for solar drying applications*. Department of Mechanical Engineering, Philippines. 2010.
7. Motahar S. *An analysis of unglazed transpired solar collectors based on exergetic performance criteria*. Department of Mechanical Engineering, Iran. 2010.
8. Gao L. *Numerical Simulation of the Thermal Performance of Solarwall*. Washington. 2011.
9. Kutscher C. *An investigation of heat transfer for air flow through low porosity perforated plates*. Boulder, Colorado. 1992.
10. Gunnewiek L.H. *An investigation of the flow distribution through unglazed transpired-plate solar air heaters*. Department of Mechanical Engineering, Canada. 1994.
11. Gunnewiek L.H. *Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area*. Solar Energy. Department of Mechanical Engineering, Canada. 1996.
12. Gunnewiek L.H. *Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired-plate collectors*. Solar Energy. Department of Mechanical Engineering, Canada. 2002.
13. Summers D.N. *Thermal Simulation and Economic Assessment of Unglazed Transpired Collector Systems*. Solar energy laboratory. Madison. 1995.
14. Summers D.N. *Thermal simulation and economic assessment of unglazed transpired collector systems*. Solar energy laboratory. Madison. 1996.
15. Dymond C.S., Kutscher C.F. *A computer design model for transpired solar collector systems*. 1995.
16. Dymond C, Kutscher C. *Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors*. National Renewable Energy Laboratory. 1997.

17. Carpenter S., Meloche N. *The Restscreen model for simulating the performance of solar air heating systems*. 2002.
18. Wang C. *Numerical simulation study on transpired solar air collector*. Shenzhen, China. 2006.
19. Frank E. *Experimental and Theoretical Investigation of Unglazed Transpired Air Collectors in a Multicomponent Solar Thermal System*. Eurosun, Glasgow. 2006.
20. Leon M.A., Kumar S. *Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors*. Thailand. 2007.
21. Delisle V. *Analytical and experimental study of a PV/thermal transpired solar collector*. Waterloo. 2008.
22. Moaveni S. *A Numerical Model for Thermal Performance of an Unglazed Transpired Solar Collector*. Washington. 2011.
23. Shukla A. *A state of art review on the performance of transpired solar collector*. 2012
24. Kutscher C.F. *Heat-exchange effectiveness and pressure-drop for air-flow through perforated plates with and without crosswind*. 1994.
25. Weerakoon A. *Use of perforated roofing sheets as solar collectors*. International Heat transfer Conference 2006.
26. Badache M. *A full 34 factorial experimental design for efficiency optimization of an unglazed transpired solar collector prototype*. 2012.
27. Gao L. *Experimental Study of Solar Air Heating System Based on Unglazed Transpired Collector*. Washington. 2011.
28. Moaveni S. *The Magnitude of the Thermal Energy Stored in a Building Wall Adjacent to an Unglazed Transpired Solar Collector*. Washington. 2011.
29. Chan H. *Experimental performance of unglazed transpired solar collector for air heating*. Sweden. 2011.
30. Hollick J.C. *Solar cogeneration panels*. 1998.
31. Naveed A.T. *Effect of Unglazed Transpired Collector on the Performance of a Polycrystalline Silicon Photovoltaic Module*. 2006.
32. Athienitis A.K. *A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector*. Canada. 2011.
33. Barker G. *Pressure Drop as a Function of Air Flow Rate for Roll-Punched Transpired Solar Collectors With Different Porosities*. 2011.
34. Fleck B.A *A field study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector*. Canada. 2002.
35. Maurer C.C. *Field study and modeling of an unglazed transpired solar collector system*. Carolina. 2004.

36. Cordeau S. *Performance of unglazed solar ventilation air pre-heaters for broiler barns*. 2011.
37. Bambara J. *Design and performance of a photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector*. Canada. 2011.
38. Tebbe P.A., Moaveni S. *Study of Unglazed Transpired Solar Collector Installations in the Twin Cities Minnesota Climate*. 2011.
39. Kozubal E. *Evaluating the Performance and Economics of Transpired Solar Collectors for Commercial Applications*. 2008.
40. Pesaran A.A. *Use of unglazed transpired solar collectors for desiccant cooling*. 1994.
41. Brunger A.P. *Low cost, high performance solar air-heating systems using perforated absorbers*. 1999.
42. Hollick J.C. *Commercial scale solar drying*. 1999.
43. Leon M.A. *Design and Performance Evaluation of a Solar-Assisted Biomass Drying System with Thermal Storage*. 2008.
44. Hassanain A.A. *Unglazed Transpired Solar Dryers for Medicinal Plants*. 2010.
45. Meier R.M. *Wind effects on the performance of a Solarwall collector*. Royal Military College of Canada. 2000.
46. Conservall Engineering SolarWall. Žiūrėta 2013-01-20. Prieiga per internetą: <http://solarwall.com/en/home.php>
47. Onset Hobo. Žiūrėta 2012-11-25. Prieiga per internetą: <http://www.onsetcomp.com/>
48. Ahlborn. Žiūrėta 2012-11-25. Prieiga per internetą: <http://www.ahlborn.com/>
49. NASA. Žiūrėta 2013-05-03. Prieiga per internet: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
50. RETScreen. Žiūrėta 2012-01-05. Prieiga per internetą: <http://www.etscreen.net/>
51. Juodis E. *Vėdinimas*. Vilnius. 1998. p. 327.
52. Šiluminis laidumas. Žiūrėta 2013-03-20. Prieiga per internetą: http://lt.wikipedia.org/wiki/%C5%A0iluminis_laidumas

PRIEDAI

1 priedas. Įrangos montavimo darbai



RETScreen® Energy Model - Solar Air Heating Project

[Training & Support](#)Units: **Metric**

Site Conditions		Estimate	Notes/Range
Project name		vgtu	See Online Manual
Project location		vilnius	
Nearest location for weather data		vilnius	→ Complete SR sheet
Annual solar radiation (tilted surface)	MWh/m²	0,62	
Annual average temperature	°C	1,3	
Annual average wind speed	m/s	2,6	

System Characteristics		Estimate	Notes/Range
Heating application type	-	Ventilation air	
Base Case Heating System			
Heating fuel type	-	Electricity	
Heating system seasonal efficiency	%	100%	0% to 350%
Building			
Building type	-	Commercial	
Indoor temperature	°C	20,0	20,0 to 25,0
Maximum delivered air temperature	°C	40,0	
RSI-value of building wall	m² - °C/W	2,0	0,1 to 10,0
Airflow Requirements			
Design airflow rate	m³/h	2.000	50 to 1.000.000
Operating days per week (weekday)	d/w	5,0	0,0 to 5,0
Operating hours per day (weekday)	h/d	10,0	5,0 to 24,0
Operating days per week (weekend)	d/w	0,0	0,0 to 2,0
Operating hours per day (weekend)	h/d	10,0	5,0 to 24,0
Solar Collector			
Design objective	-	Standard operation	
Collector colour	-	Rocky Grey	See Product Database
Solar absorptivity	-	0,86	0,20 to 0,99
Suggested solar collector area	m²	22	
Solar collector area	m²	100	
Percent shading during season of use	%	0%	0% to 50%
SAH fan flow rate	m³/h/m²	20	
Average air temperature rise	°C	11,9	
Incremental fan power	W/m²	0,0	0,0 to 7,0

Annual Energy Production (8,0 months analysed)		Estimate	Notes/Range
Incremental fan energy	MWh	0,0	
Specific yield	kWh/m²	145	
Collector efficiency	%	30%	
Solar availability while operating	%	67%	
Renewable energy collected	MWh	12,6	
Building heat loss recaptured	MWh	1,9	
Renewable energy delivered	MWh	14,5	
	GJ	52,1	

[Complete Cost Analysis sheet](#)

Annual Energy Balance

Project name		vgtu	Electricity required	MWh	-
Project location		vilnius			
Renewable energy delivered	MWh	14,5			
Heating fuel displaced	-	Electricity			

Financial Parameters

Avoided cost of heating energy	LTL/KWh	0,516	Debt ratio	%	0,0%
			Income tax analysis?	yes/no	No
Retail price of electricity	LTL/KWh	-			
Energy cost escalation rate	%	3,0%			
Inflation	%	3,0%			
Discount rate	%	0,0%			
Project life	yr	30			

Project Costs and Savings

Initial Costs			Annual Costs and Debt		
Feasibility study	0,0%	LTL	-	O&M	LTL
Development	0,0%	LTL	-	Fuel/Electricity	LTL
Engineering	0,0%	LTL	-		
Energy equipment	100,0%	LTL	72.000	Annual Costs - Total	LTL
Balance of equipment	0,0%	LTL	-		-
Miscellaneous	0,0%	LTL	-	Annual Savings or Income	
Initial Costs - Total	100,0%	LTL	72.000	Heating energy savings/income	LTL 7.463
Incentives/Grants		LTL	-		
				Annual Savings - Total	LTL 7.463
Periodic Costs (Credits)		LTL	-		
		LTL	-		
		LTL	-		
End of project life -		LTL	-		

Financial Feasibility

Pre-tax IRR and ROI	%	13,0%	Project equity	LTL	72.000
After-tax IRR and ROI	%	13,0%			
Simple Payback	yr	9,6			
Year-to-positive cash flow	yr	8,4			
Net Present Value - NPV	LTL	293.683			
Annual Life Cycle Savings	LTL	9.789			
Benefit-Cost (B-C) ratio	-	5,08			

Yearly Cash Flows

Year	Pre-tax LTL	After-tax LTL	Cumulative LTL
0	(72.000)	(72.000)	(72.000)
1	7.686	7.686	(64.314)
2	7.917	7.917	(56.397)
3	8.154	8.154	(48.242)
4	8.399	8.399	(39.843)
5	8.651	8.651	(31.192)
6	8.911	8.911	(22.281)
7	9.178	9.178	(13.103)
8	9.453	9.453	(3.650)
9	9.737	9.737	6.087
10	10.029	10.029	16.116
11	10.330	10.330	26.446
12	10.640	10.640	37.086
13	10.959	10.959	48.044
14	11.288	11.288	59.332
15	11.626	11.626	70.959
16	11.975	11.975	82.934
17	12.334	12.334	95.268
18	12.704	12.704	107.973
19	13.086	13.086	121.058
20	13.478	13.478	134.536
21	13.882	13.882	148.419
22	14.299	14.299	162.718
23	14.728	14.728	177.446
24	15.170	15.170	192.615
25	15.625	15.625	208.240
26	16.094	16.094	224.334
27	16.576	16.576	240.910
28	17.074	17.074	257.984
29	17.586	17.586	275.570
30	18.113	18.113	293.683

RETScreen® Solar Resource - Solar Air Heating Project

Site Latitude and Collector Orientation			Estimate	Notes/Range
Nearest location for weather data			vilnius	See Weather Database
Latitude of project location	°N		54,7	-90.0 to 90.0
Slope of solar collector	°		90,0	0.0 to 90.0
Azimuth of solar collector	°		0,0	0.0 to 180.0

Monthly Inputs

Month	Fraction of month used (0 - 1)	Monthly average daily radiation on horizontal surface (kWh/m²/d)	Monthly average temperature (°C)	Monthly average wind speed (m/s)	Monthly average daily radiation in plane of solar collector (kWh/m²/d)
January	1,00	0,75	-4,4	4,3	2,50
February	1,00	1,51	-4,1	3,8	3,36
March	1,00	2,63	-0,1	3,9	3,21
April	1,00	3,71	7,0	3,6	2,87
May	0,00				0,00
June	0,00				0,00
July	0,00				0,00
August	0,00				0,00
September	1,00	2,72	12,9	3,5	2,62
October	1,00	1,44	7,4	3,9	2,15
November	1,00	0,75	1,0	4,0	1,77
December	1,00	0,54	-3,6	4,1	1,94

		Annual	Season of use
Solar radiation (horizontal)	MWh/m²	0,42	0,42
Solar radiation (tilted surface)	MWh/m²	0,62	0,62
Average temperature	°C	1,3	2,0
Average wind speed	m/s	2,6	3,9

[Return to Energy Model sheet](#)

Version 3.1

© Minister of Natural Resources Canada 1997 - 2005

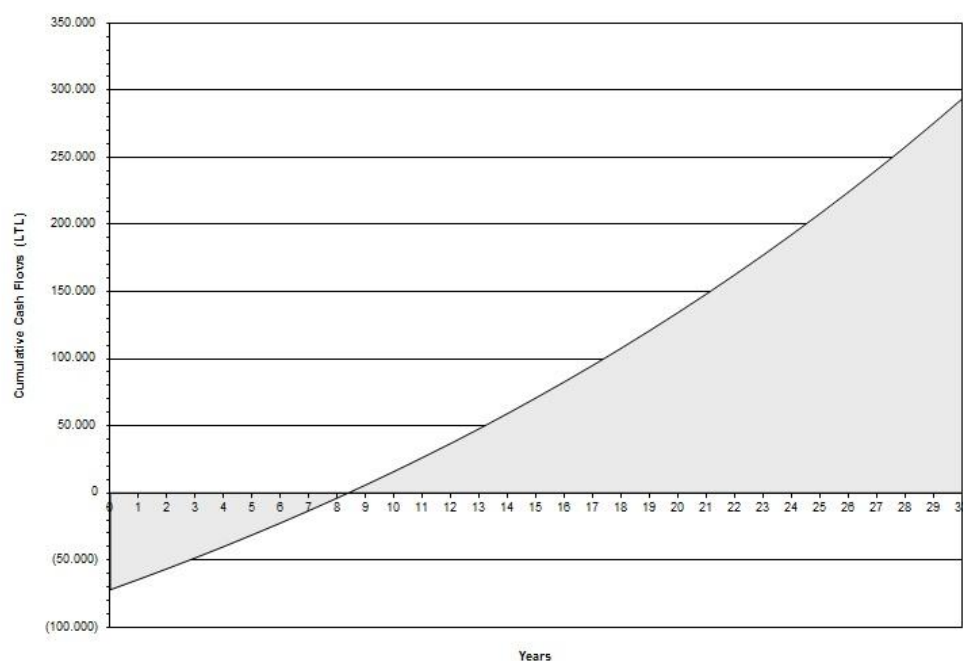
NRCCan/CETC - Varennes

Cumulative Cash Flows Graph

SAH Project Cumulative Cash Flows vgtu, vilnius

Renewable energy delivered (MWh/yr): 14

Total Initial Costs: LTL 72.000



IRR and ROI: 13%

Year-to-positive cash flow: 8,4 yr

Net Present Value: LTL 293.683