

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Juozas BIELSKUS

SAULĖS ENERGIJĄ NAUDOJANČIOS
MIKROKLIMATO SISTEMOS
TERMODINAMINIO IR FUNKCINIO
EFEKTYVUMO TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2017

Disertacija rengta 2012–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Nariai:

prof. dr. Arnas KAČENIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

doc. dr. Artūras KILIKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

dr. Raimondas PABARČIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – 06T),

prof. habil. dr. Miroslaw ŻUKOWSKI (Balstogės technologijos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. balandžio 26 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. kovo 24 d.

Disertaciją galima peržerti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-006-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-004-4

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017

© Juozas Bielskus, 2017

juozas.bielskus@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Juozas BIELSKUS

**THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL
EFFICIENCY ANALYSIS OF SOLAR
ENERGY USING INDOOR CLIMATE
SYSTEM**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2017.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T).

Members:

Prof. Dr Arnas KAČENIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Assoc. Prof. Dr Artūras KILIKEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Dr Raimondas PABARČIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – 06T),

Prof. Dr Habil. Mirosław ŻUKOWSKI (Bialystok University of Technology, Mechanical Engineering – 09T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 26 April 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 24 March 2017.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziუმэ

Disertacijoje taikant sisteminés, termodinaminés, šilumos ir masés mainų bei parametrinés analizés metodus tiriamas saulés energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminis efektyvumas, apribojamas funkciniu efektyvumu. Tiriama šios sistemos įtaka galutiniam pastato vartotojui – žmogui. Šalia savo pagrindinés funkcijos – pakankamos šiluminés aplinkos užtikrinimo – sistema privalo būti termodinamiškai efektyvi. Pagrindinis disertacijos tikslas – nustatyti termodinaminį efektyvumą ir funkcionalumą integruojančias sąsajas mažai energijos vartojančiam pastatui kaip saulés energiją naudojančiai mikroklimato sistemai.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: pirmasis – atliekama sienų šiluminio talpumo įtakos pastato energijos poreikiams analizė; antrasis – termodinaminiu požiūriu atliekama saulés energiją naudojančios mikroklimato sistemos analizė; trečiasis – algoritmo, skirto eksergijos sąnaudoms pastato inžinerinėse sistemose mažinti, sudarymas derinant termodinaminés ir funkcinés analizés metodus.

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai bei šeši priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, mokslinis darbo naujumas, ginamieji teiginiai, pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiami keliami saulés energiją naudojančių mikroklimato sistemų reikalavimai. Taip pat apžvelgtos mikroklimato sistemos, naudojančios saulés energiją, bei analizei taikomi vertinimo metodai. Atlikta tyrimų apžvalga leidžia nustatyti tyrimų kryptį ir suformuluoti uždavinius, leidžiančius pasiekti tyrimo tikslą.

Antrajame skyriuje pristatomas sudaryto saulés energiją vartojančios sistemos termodinaminio vertinimo algoritmas, kai atsižvelgiama į pasyvias ir aktyvias mikroklimato sistemas bei į šiluminio komforto lygį patalpoje. Aprašomi veiksmų algoritmai ir sudaryti matematiniai modeliai.

Trečiajame skyriuje pateikti saulés energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio ir funkcinio efektyvumo vertinimo tyrimų rezultatai. Rezultatai gauti taikant šių sistemų sukurtą vertinimo modelį.

Abstract

This doctoral thesis analyses the thermodynamic efficiency bound by functional efficiency of a solar microclimate system in a building by applying systematic, thermodynamic, heat and mass exchange and parametric analysis methods. The effect of such a system on the end user of the building is analysed. Along with its main function – ensuring an adequate thermal environment, the system must be thermodynamically efficient. The purpose of this thesis is to determine the thermodynamic efficiency and the correlation that integrates functionality for a low-energy building as a solar microclimate system.

The thesis focuses on several main objectives: first, the influence of the thermal capacity of walls on the building energy demand is analysed; second, a solar microclimate system is analysed from the thermodynamic point of view; third, an algorithm to reduce exergy expenditure of building services is compiled by combining the methods of thermodynamic and functional analysis.

The thesis consists of an introduction, three chapters, general conclusions, a reference list and a list of publications on the topic of the thesis by the author as well as six appendices.

In the introductory chapter the research question and the relevance of the thesis are discussed, the subject of the analysis is described, the purpose and the tasks of the thesis are formulated, the methodology of the analysis, the scientific novelty of the thesis, the thesis statements are described, and the publications on the topic of the thesis published by the author, presentations in conference and the structure of the thesis are presented.

The first chapter presents the requirements for solar microclimate systems. Solar microclimate systems as well as assessment methods applied to the analysis are reviewed. The literature review allows to establish the research direction and to formulate the goals that allow fulfilling the purpose of the analysis.

The second chapter presents the compiled thermodynamic assessment algorithm for a system that uses solar energy when passive and active microclimate systems and the level of the indoor thermal comfort are taken into consideration. Action algorithms and the compiled mathematical models are described.

In the third chapter, the results of the assessment of the thermodynamic and functional efficiency of the solar microclimate system are provided. The results are obtained by applying the assessment model compiled by these systems.

Žymėjimai

Simboliai

E – eksergijos srautas;

v – greitis;

z – aukštis;

g – laisvojo kritimo pagreitis;

μ – cheminis potencialas;

N – molių skaičius;

U – vidinė energija;

P – aplinkos slėgis;

V – tūris;

T – temperatūra;

S – entropija;

H – entalpija;

Q – šilumos kiekis;

L – eksergijos nuostoliai;

C – atitvaros aktyvioji šiluminė talpa;

H – savitieji pastato nuostoliai;

τ – pastovioji laiko konstanta.

Santrumpos

AMKPs – aktyvi mikroklimato ir kondicionavimo posistemė;

BEM – baigtinių elementų metodas;

DB – duomenų bazė;
ET – efektyvi temperatūra;
ES – Europos Sąjunga;
FKM – fazę keičiančios medžiagos;
KVU – Kanzaso valstybinis universitetas (angl. *Kansas State University*);
MADKK – mažo anglies dioksido kiekio kuras;
MKS – mikroklimato sistema;
NVĮ – numatomas vidutinis įvertis (angl. *PMV – predicted mean vote*);
PMKPs – pasyvi mikroklimato ir kondicionavimo posistemė;
PV – saulės fotoelementai (angl. *Photovoltaics*);
PV/T – kombinuoti saulės kolektoriai (angl. *photovoltaic thermal hybrid solar collector*);
SD – santykinė drėgmė (angl. *RH – relative humidity*);
SENMS – saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos;
SET – standartinė efektyvi temperatūra;
ŠAT – šilumos akumuliacinės talpos;
ŠVOK – šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistema;
TNS – tikėtinas nepatenkintųjų skaičius (angl. *PPD – predicted percentage of dissatisfied*).

Turinys

ĮVADAS.....	1
Problemos formavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai.....	3
Tyrimų metodika.....	4
Darbo mokslinis naujumas.....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....	5
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. SAULĖS ENERGIJĄ NAUDOJANČIŲ SISTEMŲ TERMODINAMINĖS IR FUNKCINĖS ANALIZĖS APŽVALGA.....	7
1.1. Mikroklimato kondicionavimo sistemų funkcionalumas.....	8
1.1.1. Šiluminio komforto reikalavimai.....	10
1.1.2. Adaptyvus šiluminis komfortas.....	12
1.2. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos.....	13
1.2.1. Pasyvios technologijos.....	14
1.2.2. Aktyvios technologijos.....	16

1.3. Saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų vertinimo metodai	23
1.3.1. Energijos tiekimo grandinės.....	23
1.3.2. Termodinaminė (ekserginė) analizė.....	24
1.3.3. Atitvarų šiluminės inercijos rodikliai.....	27
1.3.4. Nestacionaraus šilumos režimo skaičiavimo metodai.....	30
1.3.5. Sisteminė analizė	32
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	34
2. SAULĖS ENERGIJĄ NAUDOJANČIOS MIKROKLIMATO SISTEMOS TERMODINAMINIO IR FUNKCINIO EFEKTYVUMO TYRIMO MODELIO SUDARYMAS.....	37
2.1. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio funkcinio vertinimo modelio algoritmas.....	38
2.2. Išorės parametrai	42
2.3. Patalpos parametrai	43
2.4. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos ekserginis efektyvumas .	53
2.4.1. Pagrindiniai posistemės įrenginiai	54
2.4.2. Pagalbiniai posistemės įrenginiai.....	61
2.4.3. Sistemos ekserginis efektyvumas.....	65
2.5. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos komforto ir parametrinė analizė.....	66
2.6. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos vertinimo modelis	71
2.7. Antrojo skyriaus išvados	75
3. SAULĖS ENERGIJĄ NAUDOJANČIOS MIKROKLIMATO SISTEMOS TERMODINAMINIO IR FUNKCINIO EFEKTYVUMO REZULTATAI	77
3.1. Išorės ir patalpos parametrų įvertinimas.....	77
3.1.1. Konstrukcijų šiluminės talpos vertinimas	78
3.1.2. Patalpos šilumos ir vėsos poreikis.....	85
3.2. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos ekserginis efektyvumas .	89
3.3. Pastato mikroklimato sistemos naudojančios saulės energiją funkcinio efektyvumo įvertinimo rezultatai.....	98
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	102
BENDROSIOS IŠVADOS	105
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	107
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	115
SUMMARY IN ENGLISH.....	117
PRIEDAI ¹	133

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

A priedas. Atitvaros aktyvaus šilumos slauksnio nustatymo metodika paremta tarptautiniu standartu ISO 13786:2007.....	135
B priedas. Šiluminio komforto vertinimo metodika paremta tarptautiniu standartu EN ISO 7730 2005.	137
C priedas. Atitvaros aktyvios šiluminės talpos vertinimo Matlab kodas pagal ISO 13786:2007.....	138
D priedas. Ekserginių rodiklių skaičiavimas	150
E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	156
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	166

Contents

INTRODUCTION.....	1
Research problem.....	1
Importance of the thesis.....	2
Research object.....	3
The aim of the thesis.....	3
Thesis objectives.....	3
The research methods.....	4
Scientific novelty.....	4
Practical significance of achieved results.....	5
Defended statements.....	5
Approval of the research results.....	5
Thesis structure.....	6
1. REVIEW OF THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF SOLAR MICROCLIMATE SYSTEMS.....	7
1.1. Functionality of microclimate ventilation systems.....	8
1.1.1. Requirements for thermal comfort.....	10
1.1.2. Adaptive thermal comfort.....	12
1.2. Solar microclimate systems.....	13
1.2.1. Passive technologies.....	14
1.2.2. Active technologies.....	16

1.3. Assessment methods for solar microclimate systems.....	23
1.3.1. Energy supply chains	23
1.3.2. Thermodynamic (exergy) analysis	24
1.3.3. Indices of thermal inertia of walls.....	27
1.3.4. Methods of calculating non-stationary thermal regime.....	30
1.3.5. Systemic analysis	32
1.4. Conclusions of the first chapter and formulating the thesis objectives	34
2. DEVELOPING THE ANALYSIS MODEL OF THE THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL EFFICIENCY OF SOLAR MICROCLIMATE SYSTEM.....	37
2.1. The algorithm of the thermodynamic functional assessment model for a solar microclimate system	38
2.2. External parameters	42
2.3. Indoor parameters.....	43
2.4. Exergy efficiency of a solar microclimate system.....	53
2.4.1. Main devices of a subsystem	54
2.4.2. Auxiliary devices of a system	61
2.4.3. Exergy efficiency of a system	65
2.5. Comfort and parametric analysis of a solar microclimate system	66
2.6. Assessment model of a solar microclimate system	71
2.7. Conclusions of the second chapter	75
3. THE RESULTS OF THE THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL EFFICIENCY OF A SOLAR MICROCLIMATE SYSTEM.....	77
3.1. Assessment of indoor and external parameters	77
3.1.1. Assessment of the thermal capacity of structure	78
3.1.2. Heating and cooling demand of a room	85
3.2. Exergy efficiency of a solar microclimate system.....	89
3.3. The results of the functional efficiency assessment of the solar microclimate system of a building.....	98
3.4. Conclusions of the third chapter.....	102
GENERAL CONCLUSIONS	105
REFERENCES	107
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	115
SUMMARY IN ENGLISH.....	117
ANNEXES ²	133

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Annex A. Thermal capacity assessment of the wall in accordance with the ISO 13786:2007 internal standard	135
Annex B. Thermal comfort assessment methodology based on the EN ISO 7730 2005 international standard	137
Annex C. The Matlab code for the thermal capacity assessment of the wall in accordance with ISO 13786:2007.....	138
Annex D. Calculating exergy indices	150
Annex E. The co-authors agreement to present publications in the dissertation	156
Annex F. Copies of author scientific publications on the topic of dissertation	166

Įvadas

Problemos formavimas

Globaliai daug energijos suvartojama pastatuose siekiant užtikrinti deramas gyvenimo ir veiklos sąlygas. Darnios plėtros kaip vieno pagrindinių XXI a. politikos principų kontekste šis klausimas yra politikos dėmesio centre. Europos Taryba nuolatos kelia naujus tikslus siekdama sumažinti degalų vartojimą bei išmetamų teršalų kiekį į aplinką. Siekiama energijai gauti naudojamą iškastinį kurą pakeisti iš atsinaujinančiosios energijos šaltinių gaunamu mažo anglies dioksido kiekio kuru (MADKK).

Šiluminį ir oro kokybės komfortą patalpose kuriančių pastato mechaninių įrenginių visuma vadinama šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo (ŠVOK) sistemomis. Patalpų mikroklimato (komforto) palaikymo procese šios sistemos ir pastatas kartu yra vadinama mikroklimato sistema (MKS). Energijos vartojimo efektyvumo didinimas ir atsinaujinančiųjų energijos išteklių naudojimas yra pagrindinės priemonės taršaus kuro vartojimui pastatų, jų MKS poreikiams sumažinti. To siekiama skatinant beveik nulinės energijos pastatų bei geofizinę atsinaujinančiąją energiją naudojančių technologijų plėtrą. Tam bene geriausiai tinka saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos, nes saulės energija yra prak-

tiškai neišsenkantis energijos šaltinis. Sprendžiant šias globalias energetines ir aplinkosaugines problemas svarbu kiekviename pastate išsaugoti MKS funkcionalumą – užtikrinti reikalingą patalpų komfortą.

Pasaulyje atlikta nemažai tyrimų, analizuojančių saulės energiją vartojančias mikroklimato sistemas, bet trūksta darbų, kurie sietų pasyvių ir aktyvių saulės mikroklimato sistemų sąveiką, sistemiškai sujungtų jų efektyvumą ir funkcionalumą. Toks integruotas vertinimas padėtų tinkamai parengti projektinių sprendinių (matmenų, medžiagų, galių ir naudojimo sąnaudų) modelius.

Darbo aktualumas

Šildymo ir vėsinimo sektorius – didžiausias Europos Sąjungoje (ES) energetikos sektorius. 2012 m. jam teko 50 % suvartoto galutinės energijos kiekio (Europos komisija 2016). ES tikslas – iki 2030 m. sumažinti ne mažiau kaip 40 % šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, lyginant su 1990 m. (European Council 2014). Todėl ES susitelkia į dvi kryptis: „Energijos vartojimo efektyvumas“ ir „Mažo anglies dioksido kiekio kuras“. Energijos vartojimo efektyvumo siekiama skatinant statyti mažai energijos vartojančius pastatus. Dioksido kiekio kuro kryptis skatina atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą. Kita vertus, įgyvendindama šiuos politinius tikslus ES nuolatos siekia ir gerovės visuomenės bei globalaus konkurencingumo tikslų. Geresnei gyvenimo kokybei ir darbo našumui užtikrinti svarbu sukurti komfortišką aplinką gyvenimo ir darbo vietose. Tai tiesiogiai susiję su darbo produktyvumu ir darbdavio veiklos rezultatais, todėl projektuojant patalpas jų funkcionalumas ir komforto rodiklių poveikis darbuotojams turėtų būti viena pagrindinių išeities sąlygų. Patalpų funkcionalumą suformuoja šilumai, apšvietimui, triukšmui, erdvei ir baldams keliami penki reikalavimai (Pathak *et al.* 2014). Tarp šių penkių reikalavimų geriausiai ištirtas mokslškai pagrįstas ir detaliosiai parametrizuotas šiluminis komfortas. Jam sudaryti naudojamas pasyvusis (PMKPs) ir aktyvusis (AMKPs) mikroklimato posistemiai. PMKPs sudaro pastato patalpos ir atitvaros. Jis laikomas pasyviuoju, nes jam pagaminti ir sumontuoti reikia tam tikro energijos kiekio, tačiau jį naudoti specialių energijos sąnaudų nereikia. AMKPs paprastai sudaro šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo, karšto vandens ir apšvietimo sistemos, kurioms veikti nuolatos naudojama energija (Martinaitis 2001). Toks struktūrizavimas sudaro prielaidų patalpų funkcionalumą matematinio modeliavimo priemonėmis susieti su MKS technologiniais parametrais.

Deja, šiomis prielaidomis, jų sąlygojamomis galimybėmis kol kas pasinaudojama gana ribotai. Tai galima pasakyti ir apie technologinę, inžinerinę sąsają tarp aukščiau minėtų darnųjų vystymąsi atitinkančių uždavinių. Ji lieka silpna, sto-

koja integruoto projektavimo ir veikimo tyrimų, vertinimo algoritmų. Tai pasakytina tiek apie minėtų AMKPs ir PMKPs sąveiką, tiek apie atskirus procesus ar technologijas juose. Tokių tyrimų, jų pagrindu parengtų MKS efektyvumo ir funkcionalumo vertinimo algoritmų kūrimas, tolesnis jų taikymas pastato integruoto modeliavimo procese yra aktualus tiek Lietuvai, tiek kitoms šalims.

MKS sistemų kūrimas remiasi integraliais mechaninės inžinerijos disciplinų – techninės termodinamikos, skysčių mechanikos, šilumos mainų – principais. Šiam uždaviniui spręsti pasitelkiama termodinaminės, ekserginės analizės, Fangerio šiluminio komforto, parametrinės analizės, baigtinių elementų metodai. Jų pagrindu sukurti modelio komponentai taikant sisteminę analizę sujungiami į vieną visumą. Darbo tikslui pasiekti naudojami kompiuterinio modeliavimo įrankiai: „*METEONORM*“, „*ANSYS*“, „*TRNSYS*“ bei „*MATLAB*“.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – mažai energijos vartojančių pastatų saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos.

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – nustatyti termodinaminį efektyvumą ir funkcionalumą integruojančias sąsajas mažai energijos vartojančiam pastatui kaip saulės energiją naudojančiai mikroklimato sistemai.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinių tyrimų analizę, susijusią su saulės energiją naudojančiomis mikroklimato sistemomis (SENMS) ir juos struktūrizuoti pritaikyti atliekamiems tyrimams.
2. Sudaryti SENMS energinę grandinę bei formalizuoti energijos virsmų jos komponentuose termodinaminį (tame tarpe ir ekserginį) efektyvumą, integruojant sistemos kiekybinius rodiklius ir funkcionalumo parametrus.
3. Sukurti SENMS pasyvių ir aktyvių posistemių komponentų derinius bei įvertinti jų kiekybinių rodiklių įtaką sukuriamam komfortui.

4. Suformuoti SENMS termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelio struktūrą, tinkamą pastato informacinio modeliavimo procesui.
5. Parengti mažai energijos vartojančio pastato kaip SENMS termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelį.
6. Pateikti ir interpretuoti skaitinį atvejį, gautą naudojant parengtą vertinimo modelį.

Tyrimų metodika

Šiame darbe saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų vertinimas atliekamas taikant sisteminės analizės ir kitus specialiuosius analizės metodus – ekserginės analizės, Fangerio šiluminio komforto, parametrinės analizės, baigtinių elementų. Taip pat darbo tikslui pasiekti naudojami kompiuterinio modeliavimo įrankiai: „*METEONORM*“, „*ANSYS*“, „*TRNSYS*“ bei „*MATLAB*“. Tyrimo rezultatams apdoroti taikomi standartiniai statistiniai metodai.

Darbo mokslinis naujumas

1. Šiame darbe panaudotas autoriaus sukurtas patalpų oro kokybės valdymo ir užtikrinimo algoritmas, gautas sprendžiant atvirkščią Fangerio uždavinį, t. y. patalpos oro temperatūra gaunama kaip saulės spinduliuotės formuojamos atitvarų paviršių temperatūros funkcija.
2. Sudarytas metodas, kuris taikant ekserginę analizę vertinant energijos transformavimo procesus atskiruose komponentuose ir sistemose leido gauti tiems procesams ne tik kiekybinius, bet ir kokybinius (ekserginius) rodiklius.
3. Parengtas saulės energijos panaudojimo galimybių vertinimo mažaeenergiuose pastatuose modelis leidžia gauti funkcionalius tokių pastatų ir jų aprūpinimo energija sistemų technologijų projektinius sprendinius.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Šiame darbe pateiktas saulės energiją naudojančios mažai energijos vartojančio pastato mikroklimato sistemos termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelis. Šio modelio taikymas pastato planavimo ir projektavimo etape leistų patikimiau parengti saulės energiją vartojančių mikroklimato sistemų sprendinius atsižvelgiant į atitvarų šilumos talpumą ir vartotojų ar normatyvų užsibrėžtą komforto lygį. Jo praktinė vertė ypač svarbi dabartiniu tvarių pastatų informacinio modeliavimo plėtros laikotarpiu.

Ginamieji teiginiai

1. Struktūrizavus mikroklimato sistemos pasyvųjų ir aktyvųjų posistemius į energinės grandinės komponentus, gaunami algoritmai, leidžiantys atlikti tų komponentų integralią parametrinę analizę, susietą su kiekybiniais komforto parametrais.
2. Algoritme įdiegtas atvirkščias Fangerio uždavinys įgalina patalpos oro temperatūrą valdyti pagal siekiamą šiluminio komforto lygį. Šis būdas leidžia techninėmis priemonėmis valdyti šiluminio komforto lygį patalpoje.
3. Ekserginės analizės taikymas vertinant energijos transformavimo procesus atskiruose komponentuose ir sistemose leidžia gauti tiems procesams ne tik kiekybinius, bet ir kokybinius (ekserginius) rodiklius.
4. Saulės energiją naudojančių mikroklimato (PMKPs ir AMKPs) sistemų vertinimo modeliu galima kiekybiškai pagrįstai parengti šių sistemų sprendinius, atsižvelgiant į atitvarų šilumos talpumą ir vartotojų ar normatyvų užsibrėžtą komforto lygį.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 9 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą (Martinaitis *et al.* 2016), (Martinaitis *et al.* 2017); vienas – mokslo žurnale įtrauktame į „ISI Proceedings“ sąrašą (Januševičius *et al.* 2014); penki – mokslo žurnaluose esančiuose kitose DB (Bielskus *et al.* 2013; Bielskus *et al.* 2013; Bielskus *et al.* 2014; Januševičius *et al.* 2015; Rimdžius *et al.* 2016); vienas – kitame recenzuojamame mokslo leidinyje (Bielskus *et al.* 2013).

Disertacijoje teikiama medžiaga buvo skelbiama 3 konferencijose:

1. Tarptautinė konferencija „International conference on advances in mechanical engineering Istanbul 2015 (ICAME'15)“, YILDIZ, Stambulas, Turkija.
2. Mokslinėje konferencijoje „16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis““ Vilnius, Technika, 2013.
3. Tarptautinėje konferencijoje „Aukštųjų mokyklų vaidmuo visuomenėje: iššūkiai, tendencijos ir perspektyvos“ Alytus: Alytaus kolegija, 2013.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir šeši priedai.

Darbo apimtis 133 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 88 sunumeruotos formulės, 63 paveikslai ir 4 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 116 literatūros šaltinių.

Saulės energiją naudojančių sistemų termodinaminės ir funkcinės analizės apžvalga

Darbe nagrinėjamos saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos. Atliekamas šių sistemų tyrimas taikant termodinaminės bei sisteminės analizės metodus. Analizės tikslas – parengti mažai energijos vartojančio pastato ir saulės energiją naudojančių jo mikroklimato sistemų termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelį. Šis modelis turi užtikrinti tinkamą žmogui šiluminį komfortą patalpose.

Tyrimo taikoma ekserginė analizė, kuri įvertina ne tik energijos kiekį (PTD), bet ir kokybę (ATD). Taip pat vertinamas funkcinis saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų efektyvumas.

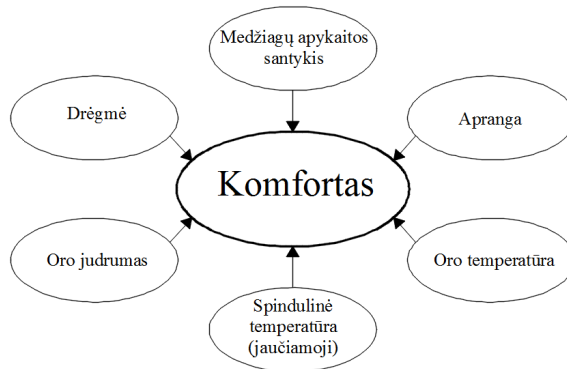
Atsižvelgiant į tiriamąjį objektą – „mažai energijos vartojančių pastatų saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos“ – neišvengiamai tenka naudoti sisteminės analizės metodą, leidžiantį nustatyti ryšius tarp atskirų sistemas sudarančių elementų bei sistemos veikimą valdančias funkcijas.

Skyriaus tematika paskelbti 2 autoriaus straipsniai (Bielskus *et al.* 2013; Januševičius *et al.* 2014).

1.1. Mikroklimato kondicionavimo sistemų funkcionalumas

MKS sistemos turi ne tik vartoti mažai energijos, bet ir užtikrinti savo pagrindinę funkciją – sukurti komfortišką aplinką galutiniam vartotojui. Pagrindinis MKS tikslas – šiluminio komforto užtikrinimas (Doherty *et al.* 1988). Šiluminis komfortas – tai proto būseną, išreiškianti pasitenkinimą šilumine aplinka, jis vertinamas subjektyviai (Fanger 1970), bet pagrindiniai fiziniai veiksniai, darantys įtaką šiluminiam komfortui ir aplinkos sukeltam temperatūriniam jautrumui, yra žmogaus kūno temperatūra ir fizinės odos paviršiaus savybės (Doherty *v* 1988). Matematinė paieškos tikslo formuluotė visuomet turi funkciją (Dambrauskas 1995).

Šeši pagrindiniai faktoriai (1.1 pav.) apibūdina šiluminį komfortą, o šalutiniai faktoriai gali paveikti komfortą tik tam tikromis sąlygomis.



1.1 pav. Komfortą apibūdinantys faktoriai
Fig. 1.1. Factors that define comfort

1.1 paveiksle pateikti komfortą apibūdinantys faktoriai (Liaison *et al.* 2010): medžiagų apykaitos santykis, aprangos tipas, oro temperatūra, spindulinė temperatūra, oro judrumas, drėgmė.

Šiluminio komforto vertinimo koncepcijai vertinti naudojami du metodai: šilumos balanso priartėjimas ir adaptyvus priartėjimas. Pirmasis, taip pat žinomas kaip racionalus priartėjimas, naudojamas apdorojant klimatinės kameros duomenis, tuo tarpu antrasis paprastai siejamas su praktiniais tyrimais. Fangerio modelis yra pirmas metodo etapas, kai šiluminis komfortas yra nustatomas pagal viso kūno pasitenkinimą. Vietinis diskomfortas nustatomas pagal aukščiau minėtus šešis

faktorius, o pagrindiniai indeksai, apibūdinantys komfortą, yra numatomas vidutinis įvertis (NVI) ir prognozuojamas procentas nepatenkintųjų (PPN) (Buratti *et al.* 2013).

Šiluminio komforto modelių yra keletas, iš kurių galima išskirti keturis:

1. Fangerio komforto modelis.
2. Pierce'o dviejų mazgų modelis.
3. KSU dviejų mazgų modelis.
4. ASHRAE Standartas 55-2004 Šiluminės aplinkos žmogaus užimtumui.

Fangerio šiluminio komforto modelis pirmą kartą buvo išplėtotas P. O. Fangerio Kanzaso valstijos universitete ir Danijos technikos universitete 1967 m. bei publikuotas 1972 m.. Šis modelis atsižvelgia į pagrindinius žmogaus kūno energijos nuostolius, kai laikoma, kad asmuo yra ramios būsenos. Modelis koreliuojamas su eksperimentiniais duomenimis ir remiasi numatomo vidutinio įverčio skaičiavimu, kuris nustatomas pagal šią lygtį (Lee and Strand 2001):

$$NVI = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot (H - L), \quad (1.1)$$

čia H – vidinės šilumos gamybos santykis tenkantis sėdinčiojo ploto vienetui ($=M - W$), W/m^2 ; L – kūno energijos nuostoliai, W/m^2 ; W – efektyvi mechaninė galia, W/m^2 ; M – medžiagų apykaitos santykis, W/m^2 .

Numatomas vidutinis įvertis (NVI) yra didelės žmonių grupės išreikštas šilumos pojūčio vertinimas balais pagal komfortą apibūdinančius faktorius, pateiktus 1.2 paveiksle.

Šilumos pojūtį siūloma vertinti 7 balais (McGraw-Hill 1970): +3 – karšta; +2 – šilta; +1 – šiltoka; 0 – neutralu; -1 – vėsoka; -2 – vėsu; -3 – šalta.

1970 m. Johno B. Pierce'as Jeilio universitete išplėtojo šiluminio komforto matematinio modelį. Pierce'o modelis žmogaus kūną dalija į dvi izotermiines, koncentrinis dalis. Viena jų skirta vidinei kūno daliai arba kūno centrui (joje vyksta visi metaboliniai procesai ir tarsi sudaro apvalkalą kitai daliai). Tai leidžia vyksti pasyviai šilumos laidumui nuo vidinės dalies į išorę odos link. Ribinė linija tarp šių dviejų dalių kinta pagal kraujo cirkuliacijos srautą odos paviršiaus ploto vieneto atžvilgiu (angl. Skin blood flow rate per unit skin surface area – SKBF, matuojama $l/(h \cdot m^2)$) ir nustatoma kaip bedimensinis koeficientas – bendros kūno masės dalis odoje. Modelyje įvertinami ir nuokrypiai nuo centro (kūno branduolio), odos bei bendros kūno temperatūros, atsižvelgiant į atitinkamus taškus. Termoreguliacinio efekto mechanizmai (prakaitavimas, kraujotaka odoje ir drebulys) yra apibrėžiami kaip šiluminiai signalai iš centro, odos ir viso kūno (Designbuilder 2005). Pierce'o modelio rezultatai yra pateikiami skalėje, panašioje į naudojamą Fangerio modelio NVI skaičiavime (Lee and Strand 2001).

Autoriai Doherty ir Arens lygino Pierce'o bei Fangerio modelių galimybes fiziologinėms sąlygoms, sudarančioms šiluminio komforto pagrindą mažai ir aktyviai judantiems žmonėms plačiu aplinkos sąlygų diapazonu, numatyti (Doherty, T. J., Arens 1988). Nustatė, kad Pierce'o modelis pakankamai tiksliai įvertina mažai judančius žmones, tačiau gana netiksliai vertina aktyviai judančius žmones. Fangerio metodas taip pat pakankamai tiksliai vertina mažai judančius žmones (sėdima darbo vieta), bet šio modelio patikimumas mažėja kalbant apie aktyviai judančius žmones. Tikslumas priklauso nuo efektyvios temperatūros (*ET*) ir yra didžiausias, kai ši temperatūra būna intervale $26\text{ }^{\circ}\text{C} < ET < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

KSU dviejų mazgų modelis buvo sukurtas Kanzaso valstybinio universiteto ir pirmą kartą paskelbtas 1974 metais. KSU modelis yra labai panašus į Pierce'o Foundation modelį (Designbuilder 2005). Pagrindinis jų skirtumas – KSU modelis numato šilumos jutimą atskirai šiltai ir šaltai aplinkoms. KSU dviejų žingsnių modelis yra paremtas pokyčiais, atsirandančiais dėl šiluminio laidumo tarp centrinės dalies ir odos šaltoje aplinkoje, o šiltoje aplinkoje modelis sudaromas pagal odos drėgnumą (Doherty, T. J., Arens 1988). KSU dviejų mazgų modelio gaunamas rezultatas yra šiluminio jautrumo įvertis, kuris naudoja tą pačią skalę kaip Fangerio ir Pierce'o modeliai.

Komfortui vertinti reikalingas ir dar vienas rodiklis – diskomforto valandos. Tai rodiklis, kuris išreiškiamas diskomforto pojūčio trukme valandomis, kai santykinio oro drėgnumo ir jaučiamosios temperatūros derinys nėra tinkamas vasaros ar žiemos sezono metu pagal aprangos lygį, reglamentuojamą ASHRAE 55 – 2004.

Plačiausiai naudojami metodai yra aprašomi žinyuose ir tarptautiniuose standartuose. ASHRAE 55 metodas pagrįstas standartine efektyvia temperatūra (SET), apskaičiuota pagal Pierce'o dviejų mazgų žmogaus termoreguliacijos modelį. ISO 7730 standartas pateiktas modelis grindžiamas numatomu vidutiniu balsavimu (NVI), apskaičiuotu pagal Fangerio komforto lygtis ir / ar susijusias komforto diagramas (Doherty, T. J., Arens 1988).

Šiluminio komforto vertinimo metodika yra griežtai apribota standartų. Šiame darbe bus vadovaujama ISO 7730 tarptautiniu standartu, nes Fangerio šilumos komforto modelis dažniausiai taikomas mokslininkų tiriant supančios aplinkos šiluminį komfortą.

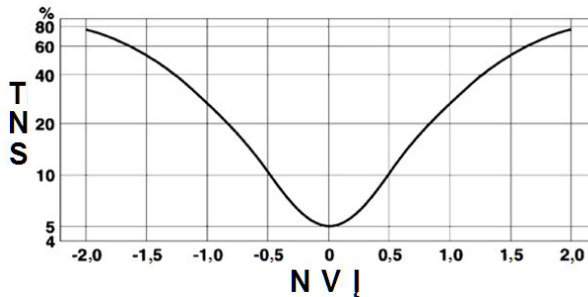
1.1.1. Šiluminio komforto reikalavimai

Nors šiluminis komfortas yra subjektyvus, jis yra griežtai apribotas tarptautinių standartų, tokių kaip EN 15251 ir ASHRAE Standard 55. Pirmuoju standartu vadovaujasi dauguma Europos šalių, sudarinėdamos nacionalinius standartus, o antroju atveju – Jungtinės Amerikos Valstijos ir daugelis kitų šalių. Europos standartas EN 15251 vertina patalpų apšvietumą, triukšmą ir šiluminį komfortą.

Šiluminio komforto dalis paremta tarptautiniu standartu ISO 7730. Šis standartas apibūdina šiluminį komfortą patalpose bei jo vertinimo metodiką. EN ISO 7730 apima vidutinės šiluminės aplinkos vertinimą ir buvo išvystytas lygiagrečiai su pataisytu ASHRAE Standard 55. Šis yra vienas iš ISO dokumentų serijos, apibrėžiančios matavimo metodus, įvertinančius vidutines ir ekstremalias šiluminės aplinkas, veikiančias žmones (EN ISO 7730 2005).

ISO 7730 standartas pateikia metodus bendrajam žmonių, veikiamų vidutinės šiluminės aplinkos, šiluminiam pojūčiui bei diskomforto laipsniui (šiluminiam diskomfortui) prognozuoti. Šis metodas leidžia atlikti analitinį vertinimą ir sudaryti šiluminio komforto interpretaciją taikant NVĮ (numatomas vidutinis įvertis) ir TNS (tikėtinas nepatenkintųjų skaičius) skaičiavimo metodikas. Šis skaičiavimas taikomas sveikiems vyrams ir moterims eksploatuojamoje uždaroje aplinkoje (EN ISO 7730 2005).

Tikėtinas nepatenkintųjų skaičius TNS yra rodiklis, kuris nustato kiekybinius šiluma nepatenkintų žmonių, kurie jaučia, kad per šilta ar per šalta, tikėtimumo procentinius dydžius (EN ISO 7730 2005).



1.2 pav. Šiluminio komforto vertinimas ir tikėtinas nepatenkintų žmonių nuošimtis (EN ISO 7730 2005)

Fig. 1.2. Assessment of thermal comfort and the expected per cent of dissatisfied persons (EN ISO 7730 2005)

Standartas ISO 7730 nereikalauja garantuoti, kad patalpų mikroklimato parametrai užtikrins 100 % šiluminio komforto. Dėl individualių skirtumų gali būti sunku patenkinti visų, esančių patalpoje šiluminius poreikius, bet derinant su asmens individualia adaptacija (apranga, aktyvumas), būtų padidintas priimtimumo šiluminio komforto lygmuo (Olesen and Parsons 2002).

Anksčiau minėtas standartas apibūdina tik šiluminę aplinką, o Europos standartas EN 15251 apima vidaus aplinkos projektavimo rodiklius. Šis standartas pateikia rekomenduojamą patalpų skirstymą į kategorijas bei rekomenduojamas TNS ribas, kurios pateikiamos 1.1 lentelėje. Sudarant NVĮ-TNS indeksus atsižvelgiama į 6 šiluminius parametrus, pateiktus ankstesniuose skyriuose.

1.1 lentelė. Kategorijų taikymo aprašymai bei rekomenduojamų projektavimo kategorijų pavyzdžiai mechaninio šildymo ir vėsinimo pastatuose (EN 15251 2007)

Table 1.1. Descriptions of category application and examples of the recommended design categories in buildings with mechanical heating and cooling (EN 15251 2007)

Kategorija	Apibūdinimas	Šiluminė kūno būseną	
		TNS, %	Numatomas vidutinis įvertis (NVI)
I	Aukštų lūkesčių lygio. Rekomenduojama užimtoms erdvėms, kuriose yra labai jautrių ir silpnų žmonių, turinčių specialiųjų poreikių, pvz., neįgalieji, ligoniai, maži vaikai ir vyresnio amžiaus asmenys.	<6	$-0,2 < \text{NVI} < 0,2$
II	Normalių lūkesčių lygio. Turi būti užtikrinama naujuose ir renovuojamuose pastatuose.	<10	$-0,5 < \text{NVI} < +0,5$
III	Priimtinių vidutinių lūkesčių lygio. Gali būti pritaikyta esamuose pastatuose.	<15	$-0,7 < \text{NVI} < 0,7$
IV	Lygis žemesnis nei anksčiau minėtų kategorijų. Ši kategorija gali būti pritaikyta priimtina ribotai metų daliai.	>15	$\text{NVI} < -0,7$; ar $+0,7 < \text{NVI}$

Iš 1.1 lentelės matyti, kad naujai statomi bei modernizuojami namai priskiriami II kategorijai, tuomet TNS < 10. Todėl disertacijoje pasirenkama II šiluminio komforto kategorija, kurią turi užtikrinti saulės energiją naudojančios MKS.

1.1.2. Adaptyvus šiluminis komfortas

Šiluminį komfortą lemia ne tik aplinkos parametrai bei standartų nustatytos kategorijos ir jų vertės, bet ir žmogaus elgsena. Taigi, žmonės turi natūralų polinkį prisitaikyti prie kintančių sąlygų aplinkoje ir asmeniškai keisti pasitenkinimą šilumine aplinka. Tai natūrali reakcija, išreiškianti prisitaikymo požiūrį į šilumą (Nicol and Humphreys 2002).

Nustatyta, kad žmonės šilto klimato zonose nori aukštesnės temperatūros patalpose, negu žmonės, gyvenantys šalto klimato zonoje, o tai prieštarauja komforto standartui, kuris remiasi NVI/TNS modeliu (Halawa and van Hoof 2012) (Olesen and Parsons 2002).

Adaptacinį šiluminį komfortą galima suskirstyti į: fiziologinę, psichologinę ir elgesio adaptacijas (Liu *et al.* 2012).

Fiziologine adaptacija paprastai laikoma termoreguliacija žmogaus organizme. Bet kokie fiziologiniai pokyčiai reaguojant į šiluminius aplinkos pokyčius yra apibūdinami kaip fiziologinis prisitaikymas. Ši kategorija apima dvi subkategorijas: genetinės (iš kartos į kartą) ir aklimatizacijos (per vieną kartą). Prakaitavimas ir drebulys – pagrindiniai fiziologinės adaptacijos reiškiniai.

Elgesio adaptacija yra ta, kuri gali būti daugiausia stebima realioje aplinkoje, todėl gali būti daugiausia tiriama. Šis prisitaikymas apima sąmoningą ir nesąmoningą elgesį aplinkoje. Elgesio prisiderinimas gali būti trijų pogrūpių: asmens (pvz., apsirengiant ar nusirengiant), technologijų (įjungiant oro kondicionierių) ir kultūros. Žmonių adaptyvus elgesys yra dinamiškas procesas ir elgsenos dažnis priklauso nuo daugybės faktorių, pvz., klimato, kultūros ir ekonomikos, kontrolės ir reguliavimo veiksmų, atskirų savybių ir gyventojų šiluminės aplinkos.

Psichologinė adaptacija negali būti tiesiogiai stebima. Tokia nematoma charakteristika negali būti lengvai aprašyta ir įvertinta. Pakitęs suvokimas ir reakcija į sensorinę informaciją dėl subjektyvios šiluminės patirties ir šiluminių lūkesčių paprastai laikomas psichologiniu prisitaikymu.

Žmonių gebėjimas sukurti komfortišką šiluminę aplinką ne tik padidina šiluminį priimtinumą ir procentinį pasitenkinimą rezultatu, bet ir turi įtakos pastato energijos suvartojimui ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo mažinimui (Liu *et al.* 2012). Todėl jeigu šiluminė aplinka netenkina vartotojo, jis gali keisti savo elgseną, kol pasieks pasitenkinimą supančia aplinka. Įvertinus elgesio adaptaciją patalpose galima palaikyti žemesnę temperatūrą nei nustato šiluminio komforto vertinimo metodikos.

1.2. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos

Patalpos mikroklimatą (komfortą) sukuria pastatas su ŠVOK įrenginių visuma ir šiuo požiūriu tai vadinama mikroklimato kondicionavimo sistema (MKS). Tai tinkamiausias pastato ir visos jo mikroklimato sudarymo infrastruktūros pavadinimas (Martinaitis 2001).

Saulės energiją naudojančios MKS – vienos iš sistemų, kurios užtikrina šiluminį pastatų komfortą. Yra pakankamai daug saulės energiją transformuojančių technologijų, todėl šiuo etapu labai svarbu tinkamai pasirinkti jų derinį saulės energiją naudojančiose MKS.

Mikroklimatui sudaryti naudojamos pasyvioji (PMKPs) ir aktyvioji (AMKPs) mikroklimato kondicionavimo posistemės. PMKPs sudaro pastato apvalkalas, jis laikomas pasyviuoju, nes pats energijos srauto nesukuria ir nevartoja,

o tik riboja. Jam pagaminti ir sumontuoti reikia tam tikro energijos kiekio, tačiau jį naudoti ir prižiūrėti specialių energijos sąnaudų nereikia. AMKPs paprastai sudaro šildymo, karšto vandens, vėdinimo, oro kondicionavimo, apšvietimo sistemos (Martinaitis 2001).

Saulės mikroklimato sistemas galima suskirstyti į dvi grupes – aktyvias (AMKPs) bei pasyvias sistemas (PMKPs). Aktyvios sistemos – tai sistemos, kurios tiesiogiai gautą saulės energiją verčia kita energijos rūšimi. Pasyviomis įvardytos sistemos (atitvaros, kiti konstrukciniai pastato elementai) vienu metu gali sugerti saulės energiją ir ją kaupti, saugoti, o kitu metu ją paskleisti patalpoje. Svarbiu uždaviniu lieka suderinti galimybes ir poreikius, proceso efektyvumą ir funkcionalumą. Su „pasyviu saulės šildymu“ siejami šilumos kaupimo ir sklaidos (dar vadinami „akumuliacija“, „saugojimu“) procesai savo prigimtimi yra tarsi tarpiniai tarp įvardytų aktyvių ir pasyvių procesų, sistemų. Jų vaidmuo svarbus naudojant atsinaujinančių energijos išteklių energiją.

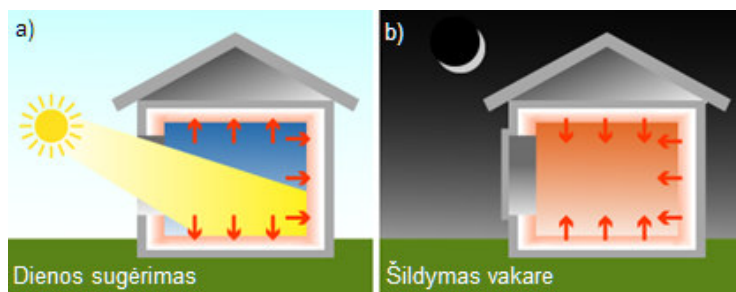
Kai kurie autoriai teigia, kad pasyvus saulės šildymas, derinamas su energiją taupančiomis pastato konstrukcijomis, gali sumažinti šilumos poreikį patalpoms šildyti iki 30 %. Aktyvios saulės sistemos gali sumažinti kuro vartojimą nuo 50 % iki 70 % karštam vandeniui ir 40–60 % patalpoms šildyti (Buker and Riffat 2015).

Tolesniuose poskyriuose bus nagrinėjamos pasyvios, aktyvios ir kaupimo sistemos, o šios analizės tikslas – pasirinkti tinkamiausias sistemas, kurios bus naudojamos pagrindinei pastato / patalpos funkcijai – mikroklimatui – užtikrinti.

1.2.1. Pasyvios technologijos

Kaip minėta, PMKPs eksploatuoti specialių energijos sąnaudų nereikia, o šioms sistemoms gali būti priskiriami konstrukciniai pastato elementai: sienos, langai, durys, grindys, perdangos ir stogai. Reguluoti šiluminius ir drėgninius parametrus patalpoje galima pasyviai, pasitelkiant šiluminį pastato konstrukcijų talpumą. Senų pastatų atitvarų konstrukcijos buvo formuojamos iš sunkių medžiagų ir laikomos pagrindiniu pasyviu metodu vidaus aplinkos elgesiui kontroliuoti. Tyrimai parodė, kad kiti parametrai, tokie kaip saulės pritekiai ir oro kaita, taip pat daro įtaką vidaus aplinkai (Orosa and Oliveira 2012). Saulės pritekiai, gauti per skaidrias pastato atitvaras, yra akumuliuojami pastato konstrukcijose. Nakties metu masyvos aukštesnės temperatūros konstrukcijos atiduoda gautą šilumą ir sumažina šildymo poreikį šaltuoju periodu (1.3 pav.).

Pasyvus pastatų saulės šildymas naudojant šilumos akumuliaciją sienose buvo daugelio tyrimų, susijusių su Trombės siena, objektas (Zalewski *et al.* 1997), (Jaber and Ajib 2011), (Krüger *et al.* 2013), (Bajc *et al.* 2014).



1.3 pav. Pasyvus saulės šildymas: a) saulės energijos sugėrimas;
 b) pasyvus šilumos energijos vartojimas vakare
Fig. 1.3. Passive solar heating: a) solar energy absorption;
 b) passive thermal energy consumption in the evening

Projektuojant pastatus dažniausiai atsižvelgiama į vieną atitvarų rodiklį, kuris daro įtaką energijos vartojimui. Šis rodiklis žinomas kaip šilumos perdavimo koeficientas (U – vertė). Be šilumos perdavimo koeficiento, taip pat turi būti atsižvelgta į šiluminę pastato talpą (masyvumą) (Aste *et al.* 2009). Taikant šių rodiklių derinį galima sumažinti pastatui energiją generuojančių įrenginių galią bei išlaidas jai. Atitvarų šiluminė talpa gali sumažinti šilumos poreikį nuo kelių procentų iki daugiau nei 80 % (Aste *et al.* 2009). Autorius Aste taip pat teigia, kad šiluminės talpos poveikis sustiprėja, jei jis taikomas su kitomis energijos taupymo priemonėmis ir efektyviu pastato naudojimu (Aste *et al.* 2009).

Autoriai Asan ir San siekė nustatyti plaušamolio / nedegtų plytų pastato sienos storio ir termofizikinių savybių įtaką, šilumos bangos vėlavimo savybes bei silpnėjimo faktorių (Asan and San 1998). Buvo nustatyta, kad termofizikinės savybės turi labai didelį poveikį laiko vėlavimui ir silpnėjimo faktoriui. Autoriai skaičiavimus pakartojo su įvairiomis statybinėmis medžiagomis ir teigia, kad jų atlikto tyrimo rezultatai yra naudingi projektuojant energiškai efektyvius pastatus.

Autorius Kontoleon detalai nagrinėjo atitvarų tankio ir šilumos laidumo pokyčių mažėjimo faktoriaus įtaką ir šešių izoliuotų sienų mazgų laiko atsilikimą (Kontoleon *et al.* 2013). Vertinime pasirinkta pagrindinė šilumos laidumo lygtis kiekvienam homogeniniam sienos sluoksniui taškui laiko srityje. Jie taip pat vertino ir saulės spinduliuotės įtaką, bet saulės spinduliuotė buvo vertinama perskaičiuojant saulės oro temperatūrą (angl. *Sol-air temperature*). Asan ir San (Asan and San 1998) pateikia analogiškus skaičiavimus. Saulės oro temperatūra, įvertinanti saulės spinduliuotės įtaką, įvedama į šilumos laidumo lygtį.

Autorius Orosa, atlikęs tyrimus su mokyklomis, nustatė, kad atitvarų masyvumas pereinamuoju laikotarpiu gali sumažinti šildymo galią. Daugelis autorių

nustatė, kad skirtingų izoliacijų masės konfigūracijos daro įtaką šildymo ir vėsinimo suvartojimui, vidaus komforto kitimui ir dažnai įgauna priešingą efektą (Stazi *et al.* 2014), (Al-Sanea *et al.* 2013).

Autoriai Al-Sanea ir Zedan analizavo bei optimizavo izoliacijos sluoksnio storį, padėtį sienoje bei kiekybiškai optimizavo dinaminį poveikį pastatų sienų šiluminėms charakteristikoms (Al-Sanea and Zedan 2011). Autorius Ling nagrinėjo naujo tipo sieną, kuri yra sudaryta iš kelių sluoksnių (Ling *et al.* 2014). Šioje sienoje buvo fazę keičiančios medžiagos (FKM) bei suformuoti kanalai, kuriais perduodama saulės kolektoriuose pagaminta šiluma. Tokia sienos konstrukcija padidina šilumos talpumą bei kaupiamos šilumos kiekį naudojant aktyvią saulės sistemą.

Iš literatūros apžvalgos matyti, kad šiluminė sienų talpa yra potencialiai efektyvi, bet siekiant darnaus energijos vartojimo pastatuose šiai priemonei pagrįsti reikia išsamesnių tyrimų.

1.2.2. Aktyvios technologijos

AMKPs priskiriamos tos sistemos, kurioms naudoti, veikti nuolatos ar periodiškai reikia naudoti energiją. AMKPs paprastai sudaro šildymo, karšto vandens, vėdinimo, oro kondicionavimo (vėsinimo), apšvietimo sistemos. Komfortui užtikrinti reikia visų išvardytų priemonių, bet disertacijos darbe nagrinėjamas šiluminis komfortas, todėl apšvietimo sistemos neaptiriamos.

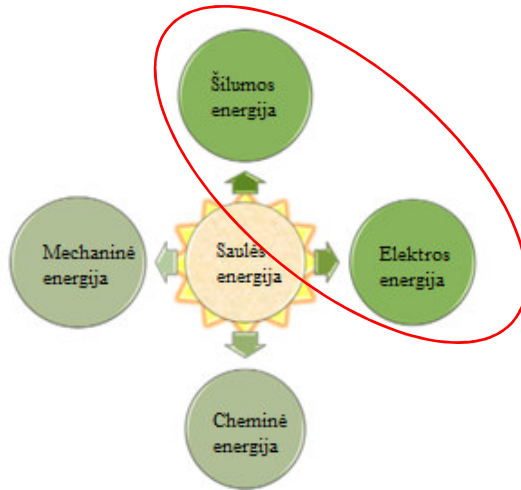
Nors saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų vis dažniau pastebime pastatuose, jos negali užtikrinti 100 % pastatui reikiamo energijos kiekio per metus. Vis dėlto gerėjant šiluminėms pastato savybėms reikėtų naudoti daugiau saulės energijos ir taip sumažinti iškastinio kuro vartojimą pastatuose.

Tiesioginių saulės energijos transformatorių yra pakankamai daug. Autorius Suman atliko literatūros apžvalgą ir suskirstė saulės energijos transformatorius į kelias posistemas (1.4 pav.) (Suman *et al.* 2015).

Iš 1.4 paveikslo matyti, kad saulės energija gali būti transformuojama į cheminę energiją naudojant fotosintezės procesus. Taip pat galima saulės energiją transformuoti į mechaninę energiją taikant garavimo procesus vandens telkiniuose ir keičiant vėjo elgseną. Bet šiuo metu plačiausiai naudojami du saulės energijos transformacijos būdai: saulės – elektros (PV elementai) ir saulės – šilumos (saulės kolektoriai) (Suman *et al.* 2015). Šios technologijos dažniausiai naudojamos įvairios paskirties pastatuose (žiūrėti 1.4 pav., apibrėžtą raudonu ovalu), todėl toliau aptiriamos tik jos.

Saulės šviesos fotoelementai (PV) šiuo metu pagamina tik mažą dalį pasaulyje suvartojamos elektros energijos, bet ši dalis nuolat didėja. Ši technologija yra pagrįsta puslaidininkiais, kuriuose elektronus sužadina saulės šviesa, t. y. sukuria

elektrinį potencialą. PV elementų efektyvumas paprastai būna 10–20 %, bet laboratorijose pasiekama ir 40 % naudojant retas medžiagas (SILVA 2016).



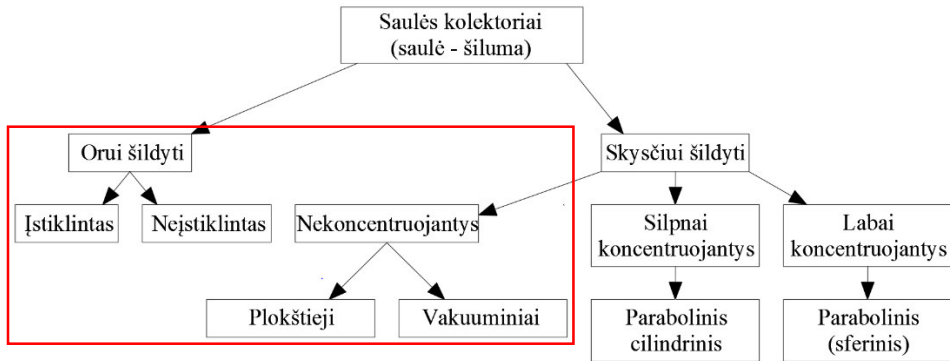
1.4 pav. Saulės energijos transformavimas į kitas formas
(Suman *et al.* 2015)

Fig. 1.4. Transformation of solar energy into other forms
(Suman *et al.* 2015)

Su saulės fotovoltiniais elementais (PV) atlikta nemažai tyrimų, kurie juos klasifikuoja pagal sandarą (Kiela 2012). Fotovoltiniai elementai tyrinėjami ir dinaminiu požiūriu, o gauti rezultatai gali padėti efektyviau projektuoti sistemas (Illanes *et al.* 2014). Taip pat atlikta nemažai tyrimų, kai PV naudojami hibridinėse energijos aprūpinimo sistemose (Ashhab *et al.* 2013), (Prasanna and Umanand 2011).

Kitas tiesioginės saulės energijos transformatorius yra saulės kolektorius. Šiame įrenginyje panaudojant saulės energiją šildomas vanduo, o tai pats paprasčiausias, patikimas bei daugelyje šalių taikomas būdas aprūpinti nemokamu karštu vandeniu (Hammad 1994). Tiesioginės saulės šilumos naudojimas yra dominuojantis saulės energijos naudojimas pastatams šildyti bei karštam vandeniui ruošti. Saulės kolektoriuose pagaminta šiluma yra kaupiama šilumos talpyklose, o ši šiluma naudojama atsiradus šilumos poreikiui.

Saulės kolektorių yra įvairių tipų ir konstrukcijų. Autorius Jesko suklasifikavo saulės kolektorius pagal įvairius kriterijus (Jesko 2008). Supaprastinta saulės kolektorių klasifikacija pateikta 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Saulės kolektorių klasifikavimas
Fig. 1.5. Classification of solar collectors

1.5 paveiksle pateikta saulės kolektorių klasifikacija pagal šilumnešio tipą (oras; vanduo) bei saulės spinduliuotės koncentravimo ypatumus. Iš pastate pritaikomų technologijų galima išskirti kolektorius orui šildyti ir skysčiui šildyti nekoncentruojančius saulės kolektorius (Buker and Riffat 2015) (1.5 pav. į raudoną stačiakampį). Šiuo metu dažniausiai integruojami į pastatus skysčiui šildyti nekoncentruojantys kolektoriai, todėl tolesnėje analizėje ir nagrinėjamos sistemos su šiais kolektoriais.

Su saulės kolektoriais atlikta nemažai tyrimų. Autoriai (Colangelo *et al.* 2016) atliko apžvalgą, kurios tikslas – apžvelgti saulės kolektorių inovacijas per pastaruosius 10 metų. Autorius Yan pristatė supaprastintą metodą, kaip optimizuoti pagrindinius saulės energija vandenį šildančių sistemų parametrus remiantis gyvavimo ciklo energijos analize, atsižvelgiant į energijos netolygumo reiškinis (Yan *et al.* 2015). Kiti autoriai nagrinėjo saulės kolektorių sistemas pagal dinaminį skaičiavimą (Dongellini *et al.* 2015).

Nemažai darbų jau atlikta taikant ekserginę analizę (t. y. taikant antrojo termodinamikos dėsnio apribojimus). Daugiausia ekserginių tyrimų atlikta su pačiais generatoriais, o ne visa sistema. Jau yra bandyta nustatyti optimalią ištekėjimo temperatūrą iš kolektoriaus kaip saulės spinduliuotės funkciją (Torío *et al.* 2009) bei kolektorių valdymo principą iš kokybinio į kiekybinį (Ceylan 2012). Keli autoriai bandė įvertinti saulės kolektoriaus ekserginį efektyvumą, vertinimo rezultatai buvo pagrįsti eksperimentiniais tyrimais (Torío *et al.* 2009). Kiti autoriai, taikydami ekserginę analizę, optimizavo kolektorių veikimą atlikdami kokybinį ar kiekybinį šilumnešio reguliavimą keičiant vamzdžių skersmenį, vėjo greitį, optinį efektyvumą, saulės spinduliuotės dydį ir pan. (Farahat *et al.* 2009), (Jafarkazemi and Ahmadifard 2012). Kai kurie autoriai eksergiškai nagrinėjo naujos koncepci-

jos saulės kolektorius (Fiaschi and Bertolli 2012), o kiti vertino energinius ir ekserginčius saulės kolektorių sistemas, skirtas karšto vandens gamybai, efektyvumus (Gunerhan and Hepbasli 2007).

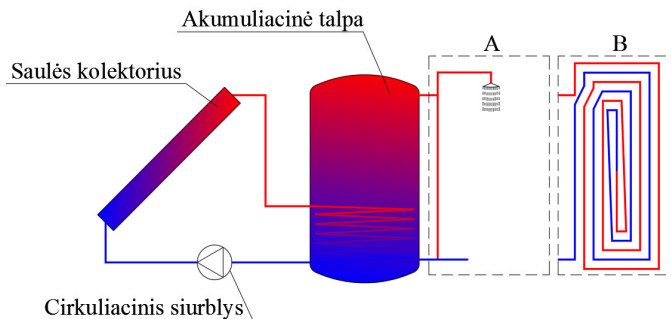
Keletas autorių taikė ekserginčius tyrimus kombinuotiems saulės kolektoriams (PV/T) ir jų sistemoms (Agrawal and Tiwari 2010) bei vertino, kokią įtaką daro kiekybinis ir kokybinis šilumnešio reguliavimas kolektoriaus efektyvumui (Tiwari *et al.* 2009). Autoriai Baetschmann ir Leibundgut atliko tyrimus sujungdami kombinuotus saulės kolektorius su šilumos siurbliu, aprūpinant pastatą šiluma bei elektra atliko (Baetschmann and Leibundgut 2012).

Gauti autorių rezultatai atskleidžia, kad net ir optimaliomis eksploataavimo sąlygomis saulės kolektorių ekserginis efektyvumas yra labai mažas, tik apie 3 % (Torío *et al.* 2009). Autoriai taip pat atliko saulės sistemų tyrimus, kai saulės kolektoriai buvo derinami su kitais energijos šaltiniais. Jie nustatė, kad ekserginis efektyvumas yra apie 5 % (Torío and Sc 2007). Saitoh nustatė, kad kolektorių efektyvumas yra 4,4 %, tačiau kombinuotų saulės kolektorių su PV elementais efektyvumas pasiekia net 13,3 % (Saitoh *et al.* 2003).

Matyti, kad saulės kolektorių pasirinkimas yra platus, bet dažniausiai naudojami nekonzentruotieji saulės kolektoriai vandeniui šildyti. Šie įrenginiai yra tik pirminiai transformatoriai, jie turi būti derinami su mikroklimato sistemomis. disertacijoje daugiausia dėmesio skiriama šio tipo saulės kolektoriams, integruotiems į komfortą palaikančias mikroklimato sistemas.

Iš esmės saulės kolektorių sistemos karštam vandeniui ruošti nedaug skiriasi nuo šildymo sistemų – tik energijos vartojimo įtaisais, sukuriančiais komforto paslaugą (1.6 pav.).

1.6 paveiksle pateikta saulės kolektoriaus, skirto karštam vandeniui ruošti bei šildyti, principinė schema. Iš šio paveikslo matyti, kad saulės kolektorių žiedas yra tinkamas abiem sistemoms, tik skiriasi galutinio vartojimo įtaisais (A – įtaisas karšto vandens paslaugai, B – įtaisas šildymo paslaugai).



1.6 pav. Principinė saulės kolektoriaus schema

Fig. 1.6. Circuit diagram of a solar collector

Karšto vandens poreikis yra itin svarbus veiksnys, kuris lemia žmogaus pasitenkinimą gyvenimo kokybe. Jau anksčiau yra minėta, kad naudojant saulės energiją galima sumažinti kuro suvartojimą karštam vandeniui ruošti nuo 50 % iki 70 % (Buker and Riffat 2015). Kai kurie autoriai nagrinėjo saulės kolektorių sistemas karštam vandeniui ruošti pritaikydami eksperimentinius tyrimus (Gunerhan and Hepbasli 2007). Dongellini ir kiti atliko dinaminį saulės kolektorių vertinimą elementų dydžiams parinkti pritaikydami „F-chart“ metodą (Dongellini *et al.* 2015). Bendri rezultatai parodė, kad karštam vandeniui ruošti tinkamiausia technologija yra saulės kolektorių technologija (Žėkas 2014).

Mažai energijos vartojančiuose pastatuose svarbus dėmesys skiriamas šilumos skleidimo būdai. Iš saulės gautą šilumą galima skleisti naudojant aukštatemperatūros ar žematemperatūros šildymo sistemas. Nustatyta, kad žematemperatūre šildymo sistema gali sumažinti pirminės energijos vartojimą (Hasan *et al.* 2009). Šis šildymo būdas naudoja mažiau eksperimentinio ir yra tvaresnis energijos vartojimas (Rekstad *et al.* 2003), (Ren *et al.* 2010). Suderinus šias sistemas su saulės kolektoriais pasiekiamas didesnis saulės energijos įsisavinimas.

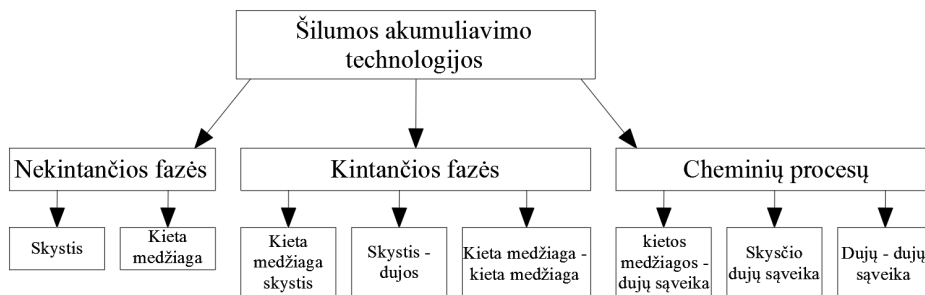
Žematemperatūre sistemos sėkmingai suvienija tradicinius ir inovatyvius šildymo metodus. Įprastai šiluma perduodama į patalpą per orines ar vandenines sistemas, tos pačios sistemos gali būti naudojamos ir vėsinti (VTT finland 2004).

Tyrimai atskleidžia, kad žmonės, gyvenantys pastatuose, kuriuose yra žematemperatūre šildymo sistema, yra labiau patenkinti patalpų mikroklimatu, nei žmonės, gyvenantys pastatuose, kuriuose yra aukštatemperatūre šildymo sistema (VTT finland 2004), (Ala-Juusela 2004).

Atsižvelgus į aukščiau pateiktus argumentus tikslinga naudoti žematemperatūre šildymo sistemas, todėl disertacijoje atliekama šių sistemų analizė. Tačiau taikant saulės energiją naudojančias sistemas svarbus vaidmuo tenka energijos saugojimui.

Saulės kolektoriai ir šilumos akumuliacinė talpa (ŠAT) yra kiekvienos saulės vandens šildymo sistemos pagrindiniai komponentai (Alghoul *et al.* 2009). Saulės kolektorių pagamintos šilumos akumuliacija padeda valdyti neatitikimus laike tarp šilumos vartojimo ir gamybos. ŠAT yra naudojamos skirtingos technologijos (1.7 pav.): nekintančios fazės medžiagos ŠAT (sensible heat storage tank); kintančios fazės medžiagos ŠAT (phase change heat storage tank); cheminių procesų ŠAT (chemical heat storage) (Sunliang 2010), (Pfleger *et al.* 2015), (Tian and Zhao 2013).

Daugybė medžiagų gali būti naudojamos šilumos akumuliacijai tikslams. Medžiagos, skirtos savitosios šilumos akumuliacijai, turi būti plačiai paplitusios, nebrangios, atitinkančios aplinkosaugos reikalavimus, nedegios, nesprogios, neuodingos, nekorozinės ir suderinamos su ŠVOK įranga (Streckienė 2011).



1.7 pav. Šilumos akumuliacijos technologijų klasifikavimas
 Fig. 1.7. Classification of thermal storage technologies

Nekintančios fazės šilumos akumuliacija yra labiausiai paplitęs metodas šilumai ir vėšai saugoti (Navarro *et al.* 2015), nors šiuo metu daugiausia mokslinių tyrimų atliekama kintančios fazės ŠAT (Ezan *et al.* 2011), (Al-abidi *et al.* 2013). Kai kurie autoriai teigia, kad ši technologija patrauklesnė nei nekintančios fazės, nes jos turi didesnę saugojimo tankį bei mažesnę temperatūros svyravimą (Ho *et al.* 2016). Cheminių procesų ŠAT vis dar yra ankstyvuose tyrinėjimo etapuose (Zhang *et al.* 2016). Nekintančios fazės ŠAT pasižymi tuo, kad yra kur kas pigesnė nei kintančios fazės (Zhang *et al.* 2016), jas lengviau valdyti (Li 2015), taip pat dažniausiai šiose talpose naudojama medžiaga yra vanduo. Vanduo turi didelę savitąją šilumą ir mažą šilumos laidumo koeficientą, $0,56 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$, esant $0 \text{ }^\circ\text{C}$, kuris padidėja iki $0,68 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$, esant $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (Streckienė 2011).

Skysčio nekintamos fazės akumuliacinės talpos yra daugiausia aprašytos (Zhang *et al.* 2016), o naujausi tyrimai, kurie atliekami pritaikant ekserginę analizę, rodo, kad jos ne ką mažiau svarbios nei kitų tipų ŠAT (Li 2015). Šiame darbe toliau bus koncentruojamasi į dažniausiai naudojamą nekintančios fazės skysčio ŠAT.

Šiuolaikinių beveik nulinės energijos pastatų mažų bendrųjų energijos poreikių didžiąją dalį turėtų sudaryti atsinaujinančių išteklių energija, tačiau elektros poreikiai ir oro kiekis vėdinimui, tikėtina, didės. Aukštam vėdinimo sistemos efektyvumui pasiekti bus reikalingas specialus dėmesys. Esant nepakankamam oro kiekiui, pastato konstrukcijose ir ant jų kaupiasi drėgmė, formuojasi pelėsis, žmonės gali susirgti įvairiomis kvėpavimo takų ir kitomis ligomis (European Consumer Protection Commission 2003). Per pastaruosius dešimtmečius mokslininkai iš įvairių perspektyvų pateikė daug įrodymų, kad patalpų oro tarša turi poveikį žmonių sveikatai, komfortui ir produktyvumui (Laverge and Janssens 2012).

Pastatų vėdinimas gali būti organizuojamas pasitelkiant natūralų vėdinimą bei mechaninį vėdinimą. Mažai energijos vartojančiuose pastatuose taikomos tik

mechaninės vėdinimo sistemos su šilumogražos įrenginiais. Mechaninį vėdinimo įrenginį sujungus su saulės kolektorių sistema galima sumažinti energijos naudojimą iš išorinių šaltinių. Autoriaus Ozyogurtcu atlikta ekonominė analizė parodė, kad galima sumažinti ŠVOK sistemoje energijos poreikį iš pagalbinių šildytuvų sujungus šilumogražą ir saulės energijos transformatorius (Ozyogurtcu *et al.* 2014). Nustatyta, kad akumuliacinės talpos tūrio ir saulės kolektorių ploto derinys turi reikšmingą vaidmenį energijos vartojimui ir investavimo kainai. Nagrinėjamu atveju saulės kolektorių sistema gali 85 % sumažinti energijos vartojimą vėdinimo sistemoje. Vis dėlto išskirtinai daug dėmesio skiriama vėdinimo įrenginių šilumogražiams, nes daugiausia jie naudojami energijos sąnaudoms ir jos kainai sumažinti (Zmeureanu and Yu Wu 2007). Laikoma, kad čia slypi neišnaudotas potencialas energijai taupyti bei bendram termodinaminiam sistemos efektyvumui didinti (Nyman and Simonson 2005), (Misevičiūtė 2011), (Torío *et al.* 2009). Boelman ir Skulpipatsin atliko ekserginę šilumogražių analizę ir tyrė, kaip kinta ekserginis efektyvumas, kai jie veikia esant aplinkai artimai temperatūrai (Boelman and Sakulpipatsin 2005).

Šilumogražos įrenginiai gali būti rotaciniai, plokšteliniai ir atskirų srautų. Pačios paprasčiausios ir dažniausiai taikomos plokštelinį šilumogražį naudojančios vėdinimo sistemos. Jų privalumas yra tas, kad šis šilumogražis tinkamas daugeliu atvejų (Misevičiūtė 2011). Darbe bus nagrinėjamos vėdinimo sistemos su plokšteliniu šilumogražiu.

Griežtėjantys gyvenimo kokybės bei komforto lygio reikalavimai darbo ir gyvenamojoje aplinkoje iš vienos pusės bei stiklo atitvarų populiarumas iš kitos pusės didina vėsos poreikį šiltuoju metų laikotarpiu (Zhai and Wang 2010). Didžiausi vėsos poreikiai būdingi pietinėms Europos Sąjungos valstybėms, tačiau šis poreikis pastebimai auga ir Šiaurės šalyse, ypač komercinės paskirties pastatuose. Saulės energijos naudojimas vėsos gamyboje gali gerokai sumažinti iškastinių energijos šaltinių poreikį ir šiltnamio dujų emisiją (Mateus and Oliveira 2009), (Sekret and Turski 2012).

Didžiąją dalį praktikoje naudojamų vėsinimo įrenginių sudaro kompresorinės vėsinimo mašinos. Pagrindinis jų energijos šaltinis yra elektra, kuri dažniausiai gaminama naudojant iškastinį kūrą. Tokių įrenginių vėsos transformavimo koeficientas (COP) įprastai būna didesnis nei 1. Bet šiuo metu populiarėja kiti vėsinimo būdai, kurie leidžia panaudoti ir atsinaujinančiuosius išteklius. Tai absorbcinis, adsorbcinis ir desikantinis vėsinimas. Pagrindinė šių įrenginių energijos rūšis yra šiluma, gaunama iš atliekinės šilumos arba naudojama saulės ar kitų šaltinių šiluma.

Disertacijoje galimybė vėsinti taikant saulės energiją naudojančias technologijas neplanuojama nagrinėti, todėl detaliam neanalizuojami jų veikimo principai.

Iš atliktų mokslinių tyrimų galima pastebėti, kad nuolat auga ekserginės analizės taikymas vertinant atsinaujinančius energijos šaltinius bei technologijas. disertacijoje šiai analizei, jos taikymo šioje specifinėje srityje metodikos tobulinimui skiriama daug dėmesio.

1.3. Saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų vertinimo metodai

Šiame poskyryje pristatomi metodai, kurie bus taikomi atliekant energinius ir ekserginis saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų vertinimus. Kai kurie jų šiame darbe bus patobulinti, išplėtoti.

1.3.1. Energijos tiekimo grandinės

Energijos tiekimo grandinę kaip techninę sistemą sudaro įrenginių bei komponentų derinys, kuris sujungiamas į technologijas, skirtas transformuoti, tiekti, paskirstyti energiją ir suteikti reikalingą energinę paslaugą, t. y. užtikrinti sistemos paskirties funkcionalumą. Energijos tiekimo grandinė įprastai vadinamas ir struktūrinis modelis, kuriame atspindima technologijų ir energijos srautų seka nuo pirminės energijos iki energinės paslaugos. Tokia energijos tiekimo grandinė padeda vienareikšmiai apibrėžti vertinamos sistemos ribas bei visos grandinės efektyvumą. Siekiant patenkinti poreikius, padidinti šilumos ir vėsos tiekimo efektyvumą pastatuose, turi būti vertinama visa energijos tiekimo grandinė (Torío *et al.* 2009).

Energijos tiekimo grandinės vaidmenį energinėje analizėje pradėta akcentuoti palyginti neseniai, bet taikymo pavyzdžiai sparčiai plinta. Deja, trūksta bendro susitarimo, kaip turi atrodyti energijos tiekimo grandinė, tiksliau sakant, struktūrinis jos modelis. Daugelio atsinaujinančiosios energijos tiekimo grandinių komponentų analizė apima fizinius, informacijos ir finansinius srautus (Wee *et al.* 2012). Autorius Wee atliko apžvalgą, kurioje įvertino atsinaujinančius energijos šaltinius tiekimo grandinės požiūriu bei sutelkė dėmesį į keturis pagrindinius komponentus: atsinaujinančiosios energijos tiekimo grandinę, atsinaujinančiosios energijos efektyvumą, kliūtis ir strategiją į plėtrą (Wee *et al.* 2012). Jie taip pat sudarė skirtingų atsinaujinančiosios energijos formų, tarp kurių yra ir saulės energija, energijos tiekimo grandines. Jo sudarytų grandinių energijos srautai pateikiami pradėdant nuo šaltinio, toliau eina pirminis rezultatas, antrinis procesas ir vartojimas. Šio autoriaus sudarytose grandinėse nepateiktos energijos nuostolių dedamosios dėl technologinio įrenginių netobulumo ir energijos virsmo procesų negrįžtamumo.

Per pastaruosius dešimtmečius pastatų aprūpinimo energija technologinė sudėtis labai pasikeitė. Šildymas deginant kurą efektyviuose ir automatizuotuose dujiniuose katiluose jau tapo ribotu sprendiniu. Energijos formos – darbas ir šiluma – šiuolaikinėje grandinėje dalyvauja daugybėje transformacinių procesų. Tai procesai, vykstantys atsinaujinančiosios energijos transformatoriuose, kogeneratoriuose, šilumos siurbliuose, šilumokaičiuose, energijos akumulatoriuose, cirkuliaciniuose šilumnešių siurbliuose ir ventiliatoriuose, valdymo bei reguliavimo įrangoje ir kt. Tokia procesų įvairovė ir kaita laike technologiškai objektyviai turėtų būti įvertinama universaliomis termodinaminės, ekserginės analizės priemonėmis (PatenMod).

Darbe bus sukuriama saulės energiją naudojančios MKS energinės grandinės struktūra ir srautų modelis, o pasitelkus ekserginę analizę bus nustatomas termodinaminis grandinės efektyvumas.

1.3.2. Termodinaminė (ekserginė) analizė

Ekserginė analizė šiuo metu vis plačiau taikoma vertinant atsinaujinančiosios energijos technologijas (Lucia 2013), (Torio *et al.* 2009). Dažnai ji taikoma analizuojant saulės energijos transformavimo įrenginius (Farahat *et al.* 2009), (Jafarkazemi and Ahmadifard 2012). Ji taikoma analizuojant šiluminį komfortą pastatuose (Simone *et al.* 2011), (Dovjak *et al.* 2011). Tai rodo, kad ekserginė analizė – tinkamiausias metodas vertinant energines sistemas.

Pirmame termodinamikos dėsnyje teigiama, kad energija negali būti nei sukurta, nei sunaikinta. Tai reiškia, kad energijos kiekis visatoje yra pastovus. Tradiciškai susiformavo terminologija, kad tik pirmuoju termodinamikos dėsniu apsiribojanti analizė nėra laikoma termodinamine. Taigi termodinaminė analizė yra ta, kurioje įvertinami ATD apribojimai. Eksergijoje būtent tai ir įvertinama (Biekša 2008).

Antrasis termodinamikos dėsnis yra labai galingas įrankis optimizuojant procesus, kadangi jis leidžia nustatyti vietas, tipus, atliekų kiekius, identifikuoti nuostolių dydžius ir nustatyti termodinaminį efektyvumą (Pons 2012).

Eksergija – tai apibrėžtomis apsuptyties sąlygomis (temperatūros, slėgio) vykstančio energijos virsmų proceso rezultatas – didžiausias galimas gauti darbas. Eksergijos, kaip galimos transformuoti į darbą energijos dalies, sąvoka ir esmė apima PTD ir ATD. Kiekvienas realus termodinaminis procesas, esant aplinkos temperatūrai T_0 , neatsiejamas nuo eksergijos nuostolių. Eksergijos nuostoliai – galimybės atlikti darbą sumažėjimas dėl vidinio sistemos negrįžtamumo. Jie kiekybiškai išreiškia kokybinę energijos nuvertėjimo (degradacijos) sąvoką (Martinaitis 2007).

Ekserginė analizė buvo taikoma nuo 1970-ųjų pradžios, jos tikslas buvo rasti racionaliausią energijos vartojimo būdą, o tai reiškia tuo pačiu metu sumažinti

iškastinio kuro vartojimą, taikant energijos efektyvumo ir atitinkamos energijos tiekimo ir vartojimo kokybės lygį (Torío *et al.* 2009). Ekserginės analizės metodas remiasi masės ir energijos tvermės bei antruoju termodinamikos dėsniais. Šis metodas taikomas analizuojant, projektuojant ir tobulinant energijos ar kitas sistemas (Dincer and Rosen 2007). Eksergija įvertina įvairių energijos rūšių kokybę.

Virsmo eksergija uždarei masės sistemai ar nesrautinei eksergijai gali būti užrašyta šia matematine lygtimi (Dincer and Rosen, 2007):

$$E_{nesrautinis} = Ex_{w,nesrautinis,f} + Ex_0 + Ex_{kin} + Ex_{pot}, \quad (1.2)$$

čia kinetinė ir potencinė eksergija (Oliveira 2013):

$$Ex_{kin} = \frac{v^2}{2}, \quad (1.3)$$

$$Ex = z \cdot g, \quad (1.4)$$

cheminė eksergija:

$$Ex_0 = \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00}) \cdot N_i, \quad (1.5)$$

fizinė eksergija:

$$E_{w,nesrautinis,f}^{+,-} = (U - U_0) + P_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0), \quad (1.6)$$

čia turima sistemos temperatūra – T , slėgis – P , cheminis potencialas – μ_i rūšiai – i , entropija – S , tūris – V , vidinė energija – U , greitis – v , aukštis – z , laisvojo kritimo pagreitis – g ir molių skaičius rūšies – i . Nariai su indeksu žymi aplinkos parametrus.

Kalbant apie fizinės, cheminės, kinetinės ir potencinės energijos komponentus srautinių procesų eksergija gali būti išskleista naudojant (1.2) formulę.

$$E_{srautas} = Ex_{w,srautinis,f} + Ex_0 + Ex_{kin} + Ex_{pot}, \quad (1.7)$$

čia kinetinė, potencinė ir cheminė eksergija pateikta (1.3), (1.4), (1.5) formulėse, o fizinė eksergija išreiškiama:

$$E_{w,srautinis,f}^{+,-} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0), \quad (1.8)$$

čia sistemai suteikta ir pašalinta entalpija – H , o kiti dydžiai identiški ankstesnėms formulėms.

Kaip matyti iš priklausomybių, fizinę eksergiją galima laikyti kintamu parametru, kuris tiesiogiai priklauso nuo pasirinktos apsupties būsenos. Apsupties būseną gali būti pasirinkta atitinkanti sistemos aplinkos parametrus arba natūralios aplinkos būseną, kuri neturi pusiausvyros su sistema (Szargut *et al.* 1988).

Aukščiau pateiktose formuluotėse pateikiamos uždaros sistemos ir srauto eksergijos. tačiau dažnai šiluminiuose procesuose vertinama ir šiluminė eksergija.

Šiluminė eksergija kaip didžiausias galimas darbas, gautas iš tiekiamos šilumos rezervuaro šiluminės energijos Q , gali būti išreiškiama:

$$E_{qi}^{+,-} = \int_i^j \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q, \quad (1.9)$$

čia ΔQ – šilumos perdavimas ir integralas nuo pradinės (i) iki galinės būsenos (j).

Bedimensis dydis naudojamas eksergijos skaičiavimams vadinamas Karno rodikliu ir išreiškiamas:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_0}{T}. \quad (1.10)$$

Jeigu kontrolinės masės temperatūra yra pastovi, šilumos eksergijos perdavimas įvertinamas su šilumos perdavimu:

$$E_{qi}^{+,-} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q = \eta_C \cdot Q. \quad (1.11)$$

Mechaninio darbo ir elektros transformaciją į šilumą galima laikyti idealia, t. y. 100 % efektyvumo, nes šiluma, priklausomai nuo ją generuojančios temperatūros, turi mažesnę eksergiją. Tačiau šiluma negali būti konvertuojama į darbą su 100 % energijos efektyvumu. Konvertavimas gali būti teoriškai pasiektas su 100 % ekserginium efektyvumu. Taigi ekserginė analizė padeda identifikuoti viršutinę energijos vertę (Dincer and Rosen 2007).

Pastato mikroklimato sistemose įprastai sutinkama elektros ar darbo eksergija, šilumos ir virsmo eksergija, o mažiau – kinetinė, potencinė ir cheminė. Šiame darbe vertinamos tik dažniausios eksergijos formos.

Apimdamas antrąjį termodinamikos dėsnį ekserginis vertinimas įvertina proceso negrįžtamumo laipsnį. Todėl bendroji eksergijos balanso lygtis gali būti skleidžiama taip (Borel and Favrat 2010):

$$\sum_k \left[\dot{E}_{e,k}^{+,-} \right] + \sum_i \left[\dot{E}_{qi}^{+,-} \right] + \sum_n \left[\dot{E}_w^{+,-} \right] = \dot{L} \geq 0, \quad (1.12)$$

čia $\dot{E}_{e,k}^{+,-}$ – techninio (arba elektros energija) darbo galia, gauta (+) arba atiduota (-) sistemos per įrenginį k ; $\dot{E}_{qi}^{+,-}$ – sistemos gauta (+) arba atiduota (-) šiluminės eksergijos galia iš šaltinio, kurio temperatūra T_i ; $\dot{E}_w^{+,-}$ – sistemos gauta (+) arba atiduota (-) virsmo (transformavimo) galia; \dot{L} – bendri sistemos eksergijos galios nuostoliai (sukurtos entropijos rezultatas).

1.3.3. Atitvarų šiluminės inercijos rodikliai

Konstrukciniai pastato elementai atlieka pasyvios MKS funkciją. Pasyvus būdas reguliuoti šiluminius ir drėgninius parametrus patalpoje galimas pasitelkiant šiluminę pastato konstrukcijų talpumą (inerciją). Pastato atitvarų šiluminė inercija gali būti vertinama keliais dydžiais, tokiais kaip:

- laiko pastovioji (ISO 13970 2008);
- bangos slopinimo kriterijus (Kontoleon *et al.* 2013);
- pastato šiluminė laiko pastovioji „TTC“ (Givoni 1998);
- šiluminės inercijos dydis (Valančius 2006).

Laiko pastovioji – tai dydis, apibūdinantis šiluminę kūno inerciją. Jis parodo laiką, per kurį temperatūros skirtumo tarp išorės ir vidaus pradiniu laiko momentu Q_1 santykis su temperatūros skirtumu tarp išorės ir vidaus galutiniu laiko momentu Q_2 lygus natūrinio logaritmo pagrindo dydžiui.

Laiko pastovioji žymima simboliu τ , o matuojama sekundėmis. Tačiau praktinėje veikloje patogiau matuoti valandomis. Šis šiluminės inercijos dydis naudojamas pastato šildomosios erdvės šiluminės inercijos lygiui matuoti.

Laiko pastovioji išreiškiama pastato viduje egzistuojančių paviršių aktyviosios šiluminės talpos C ir pastato savitųjų nuostolių koeficiento santykiu:

$$\tau = \frac{C}{H}, \quad (1.13)$$

čia C – pastato šiluminė talpa, J/K ; H – pastato savitieji šilumos nuostoliai, W/K .

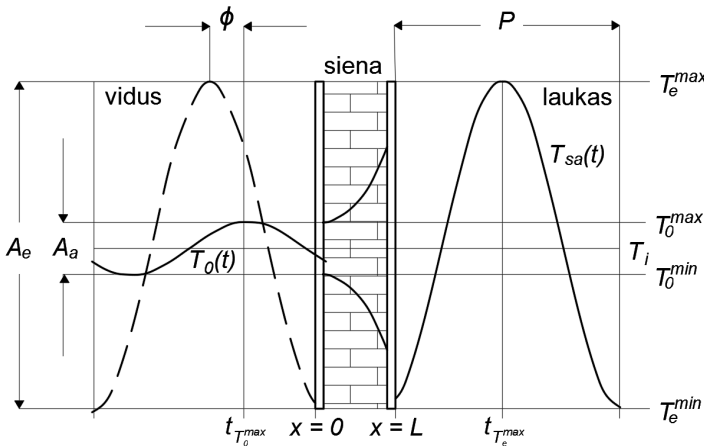
Bangos vėlavimo ir slopinimo veiksniai labai svarbios charakteristikos, kurios lemia kiekvienos medžiagos šilumos talpumo galimybes. Laiko trukmė, kurios metu šilumos banga sklinda nuo išorinio paviršiaus iki vidinio paviršiaus, vadinama „laiko vėlavimu“, o mažėjantis amplitudės santykis per procesą vadinamas „slopinimo veiksniu“ (Asan 2000). Laiko vėlavimo ir slopinimo veiksnio schema pateikta 1.8 paveiksle.

1.8 paveiksle pateiktas išorinės bangos sklidimas sienoje, kai įvertinta saulės įtaka sienai. Ši įtaka vertinama per saulės oro temperatūrą (T_{sa}). Saulės oro temperatūra yra menama išorės oro temperatūra, ta, kuri, nesant spinduliuotės mainams tarp sienos ar stogo paviršiaus, suteiktų tą patį šilumos kiekį per sieną ar stogą kaip realus šilumos perdavimo procesas tarp saulės, stogo ir sienos paviršiaus, lauko oro ir aplinkos (Uba and Sarsah 2013). Ši temperatūra apima saulės spinduliuotę ir lauko oro temperatūrą, ir periodiškai keičiasi (Asan 2000).

Saulės oro temperatūra skaičiuojama:

$$T_{sa} = T_0 + \frac{\alpha_{sol} \cdot q_{sol}}{h_e} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_e}, \quad (1.14)$$

čia T_0 – lauko oro temperatūra; α_{sol} – išorinės sienos paviršiaus saulės įgertis (absorbicija); q_{sol} – krintanti saulės spinduliuotė; $\varepsilon \cdot \Delta R / h_e$ – pataisos faktorius; ΔR – ilgųjų bangų spinduliuotės mainai tarp sienos su dangumi ir gruntu (jeigu paviršius juodas). Vertikalių sienos elementų pataisos faktorius (1.14) lygtyje paprastai laikomas nereikšmingu, nes šilumos spinduliavimą į dangų kompensuoja šilumos pritekiai nuo grunto paviršiaus. Todėl grynasis ilgųjų bangų spinduliavimo padidėjimas yra gana nedidelis ir gali būti ignoruojamas (Kontoleon *et al.* 2013).



1.8 pav. Schema, pristatanti laiko vėlavimo ϕ ir slopinimo f veiksnius (Asan 2000)

Fig. 1.8. Scheme depicting time delay ϕ and suppression f factors

ASHRAE standartas rekomenduoja pataisos faktoriumi, $\varepsilon \cdot \Delta R / h_e$, suteikti 4 °C horizontaliems paviršiams, kurie yra nukreipti paviršiumi į viršų. Tuomet, saulės oro temperatūra yra 4 °C dėl sumažėjusio infraraudonųjų spindulių kiekio iš dangaus (Ulgen 2002).

Dauguma autorių saulės oro temperatūrai vertinti naudoja supaprastintą skaičiavimo išraišką. Naudojant šią išraišką patogų šią temperatūrą parodyti kaip sinuso periodo pokytį. Saulės oro temperatūra išreiškiama (Kontoleon *et al.* 2013), (Asan 2000):

$$T_{sa} = \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} + T_{\min} + \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1.15)$$

kur kintamas greitis išreiškiamas ω :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu, \quad (1.16)$$

čia v – bangos kitimo greitis ($v = 1/86400$ s); T_{min} ir T_{max} – minimali ir maksimali vertinamojo laikotarpio temperatūros, °C.

Laiko tarpas tarp bangos vėlavimo išreiškiamas taip (Asan 2000):

$$\varphi = \begin{cases} \theta_0^{\max} > \theta_e^{\max} \Rightarrow \theta_0^{\max} - \theta_e^{\max} \\ \theta_0^{\max} < \theta_e^{\max} \Rightarrow \theta_0^{\max} - \theta_e^{\max} + P, \\ \theta_0^{\max} = \theta_e^{\max} \Rightarrow P \end{cases} \quad (1.17)$$

čia θ_0^{\max} ir θ_e^{\max} – laiko taškai, kai vidaus ir išorės temperatūra yra didžiausia, h ; P – bangos periodas, 24 h .

Bangos slopinimo veiksnys randamas taip (Asan 2000):

$$f = \frac{A_0}{A_e} = \frac{\theta_0^{\max} - \theta_0^{\min}}{\theta_e^{\max} - \theta_e^{\min}}, \quad (1.18)$$

čia A_0 ir A_e – bangos amplitudės ant vidinio ir išorinio paviršiaus; θ_0^{\max} , θ_0^{\min} , θ_e^{\max} ir θ_e^{\min} – didžiausia ir mažiausia temperatūra ant vidinio ir išorinio paviršių, °C.

Bangos slopinimo veiksnys yra bedimensis dydis, kintantis nuo 0 iki 1 intervalu (arba nuo 0 % iki 100 %), kuris parodo temperatūros tarp lauko ir vidaus svyravimų nuslopimą. Praktine prasme galima teigti, kad kuo šio veiksnio vertė artimesnė nuliui, tuo šiluminė medžiagos inercija yra didesnė (Adakauskas 2015). Mažai energijos vartojančio pastato sienose naudojama šilumos izoliacija beveik visą šilumos bangą, kuri sklinda iš išorės, nuslopina, todėl praktiniais atvejais šilumos pritekėjimo per išorines sienas netikslinga vertinti.

Kitas inercijos rodiklis – pastato šiluminė laiko pastovioji „TTC“ – tai pastato šiluminio inertiškumo rodiklis, nusakantis naudingąją šiluminę talpą ir parodantis laikotarpį, per kurį heterogeninis kūnas (pastatas) vėsta ar šyla iki aplinkos temperatūros, kūno komponentams termiškai sąveikaujant su vėsesne ar šiltesne aplinka (Givoni 1998).

Kūno atvėsimo greitis – tai dydis eksponentiškai mažėjantis laike. Pastato šiluminė laiko pastovioji yra apibūdinama kaip atitvarų šiluminės talpos CA bei atitvarų pasipriešinimo šilumos perdavimui RA į aplinką sandauga. Pastato šiluminė laiko pastovioji išreiškia tikrąją pastato šiluminę talpą. Vienalytės bei daugiasluoksnės atitvaros šiluminė laiko pastovioji TTCA yra skaičiuojama nuo jos išorės iki vidurio. Pagrindinis šiluminės pastoviosios rodiklio TTC skaičiavimo privalumas yra tas, jog ši metodika įvertina tiek pastato apvaskalo, tiek vidaus pertvarų šiluminį inertiškumą. Taip pat šis rodiklis įvertina ir vėdinimo bei infiltracijos poveikį. Baldų šiluminės inercijos poveikis nėra įvertinamas.

Autoriaus Givoni metodika įgalina parinkti patalpų mikroklimato kondicionavimo sistemas (Givoni 1998). Ji įvertina pastatų atitvarų šiluminės akumuliacinės savybės, slopinant išorės oro svyravimų poveikį pastato vidaus atžvilgiu, išlaikant maksimaliai pastovų pastato vidaus oro temperatūros svyravimą higienos normų nustatytais ribomis.

Atitvarų šiluminės inercijos dydis (D) – tai atitvarų savybė palaikyti pastovia temperatūrą, kintant aplinkos šiluminiams veiksniams, t. y. kintant lauko arba patalpos oro temperatūrai ir pereinančio per atitvarą šilumos srauto tankiui (Valančius 2006). Atitvaros yra skirstomos pagal inertiškumo rodiklį D , kuris yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D = \sum R_i \cdot S_i, \quad (1.20)$$

čia R_i – skirtingų sluoksnių šiluminės varžos, $(m^2 \cdot K)/W$; S_i – atskirų sluoksnių medžiagos šilumos imlumo koeficientai, $W/(m^2 \cdot K)$.

Šiluminę inerciją apibūdinančio dydžio D prasmė suprantama kaip sąlyginio sluoksnio storis, kuriame vyksta apčiuopiami temperatūros svyravimai. Dydis D nurodo sluoksnio storį, kuriame temperatūros svyravimo amplitudė nuslopsta 50 % nuo pradinės savo vertės.

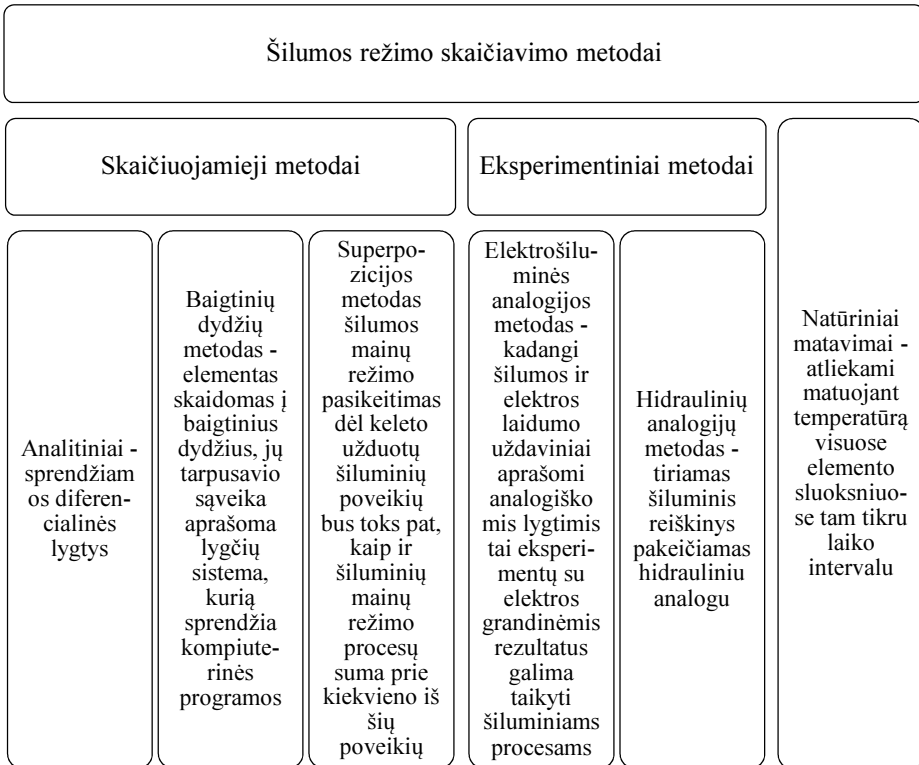
Aktyvų sluoksnio storį galima vertinti pasitelkus tarptautinį standartą ISO 13786:2007. Pagal šį standartą aktyvusis sluoksnis vertinamas dviem skirtingais metodais. Šio standarto sluoksnio vertinimo privalumas toks, kad aktyviojo sluoksnio skaičiavimams atlikti nereikia vertinti paviršiaus temperatūros. Standarto ISO 13786:2007 metodika nepateikiama, nes pakankamai plačiai aprašyta jame.

Remiantis šia analize galima teigti, kad visas sienos storis neakumuliuoja šilumos energijos, gautos iš saulės, o tik tam tikras jos sluoksnio storis. Todėl darbe pasirenkama metodika, kuria įvertinamas aktyvusis šilumos sluoksnis, t. y. toliau bus naudojamas tarptautinis standartas ISO 13786:2007.

1.3.4. Nestacionaraus šilumos režimo skaičiavimo metodai

Realiomis sąlygomis šilumos mainų procesai visada yra nestacionarūs. Kai kuriais atvejais sudėtingi nestacionarūs procesai supaprastinami ir skaičiuojami kaip stacionarūs. Šilumos kaupimas talpose ar pastato konstrukcijose ir jos sklaida yra laikytinas ir vertinamas kaip nestacionarus šilumos mainų procesas. Daroma prielaidų, kad parametrai yra pastovūs arba procesas nagrinėjamas kuriuo nors laiko momentu (Valančius 2006). Atitvaroje ir šilumos talpyklose vykstančių stacionarių ir nestacionarių šilumos mainų skaičiavimo metodai skirstomi į analitinius ir eksperimentinius (Jóhannesson 1981). Analitiniuose skaičiavimuose plačiai taikomi panašumo teorijos duomenys, leidžiantys, naudojant panašumo kriterijus,

bendru pavidalu pateikti eksperimentų ir vietinių skaičiavimų rezultatus. Konkretų apibrėžimų nestacionarių šilumos mainų uždavinių sprendimui taikomi praktiniai skaičiavimo metodai. Praktinių uždavinių skaičiavimams plačiai naudojami baigtinių dydžių, elektros analogijos, hidroanalogijos metodai. Autorius Adakauskas susistemino ir pateikė metodų suvestinę (1.9 pav.) (Adakauskas 2015).



1.9 pav. Šilumos režimo skaičiavimo metodų suvestinė (Adakauskas 2015)

Fig. 1.9. Summary of methods of calculating thermal regime (Adakauskas 2015)

Geriausias atitvarų ir šilumos talpyklos talpumo analizės būdas yra eksperimentinis, bet šis būdas dažnai atvejais ilgai užtrunka ir brangus, todėl dažnai taikomi analitiniai ir skaičiuojamieji metodai, kurie sutaupo laiko ir sąnaudų.

Baigtinių elementų metodas (BEM) yra plačiausiai daugelio inžinerinių specialybių taikomas skaičiuojamosios mechanikos metodas. Metodo idėja kilo skaičiuojant inžinerines konstrukcijas ir yra labai artima deformuotų diskrečiųjų struktūrų mechanikai. Intuityvus diskretizavimas yra natūralus būdas, kurį taiko daug inžinierių sudėtingiems objektams modeliuoti.

Matematinis požiūriu baigtinių elementų metodas yra apytikslis metodas, skirtas diferencialinėms dalinių išvestinių lygtims spręsti, t. y. kontinualiosioms struktūroms modeliuoti. Kontinuumo tapatinimas su diskrečiąja struktūra tėra tik matematinės abstrakcijos rezultatas. Griežtų matematinių teiginių vienovė ir fizinis bei inžinerinis BEM interpretavimas yra labai svarbūs metodo ypatumai, lėmę jo paplitimą įvairiose mokslo ir technikos srityse.

Šiame darbe yra pasitelkiami analitiniai ir skaičiuojamieji metodai, kurie yra patvirtinti kitų autorių moksliniais tyrimais.

1.3.5. Sisteminė analizė

Ankstesniuose skyriuose aprašytus specializuotus metodus vienija sisteminė analizė. Sisteminė analizė (SA) arba sistemų teorija – tai visuma metodų, skirtų tirti, konstruoti, modeliuoti ypač sudėtingus objektus. Čia priskiriamos modernios techninės sistemos, socialinės, ekonominės ir gamtinės sistemos. Bendrosios sistemų teorijos pradininkas yra biologas Karlas Liudwigas von Bertalanffy (Wec-kowicz 2000). Jis teigė: „Fizikas, biologas ar sociologas, vaizdžiai tariant, yra užsidarę savo privačiose visatose ir ištraukti žodį iš tokio kokono yra labai sunku.“ Jo iškeltos idėjos, jungiančios platų disciplinų spektrą, tapo moderniosios sisteminės analizės pagrindu (Biekša 2008). Daugumai sistemų būdinga: turi ribas; struktūrą; apibendrintą realybę, tam tikru būdu veikia; tarp sistemų elementų yra struktūrinis ir sąveikos ryšys; sistemų veikimas sukelia medžiagų, energijos bei informacijos vidinius (tarp posistemų) bei perduodamus (per sistemos ribas) srautus; sistemos veikimas reikalauja vyraujančių jėgų ar energijos šaltinio; sistemos turi tam tikrą integralumo laipsnį. Visi šie sistemų apibūdinimai taikomi termodinamikoje, ypač techninėje.

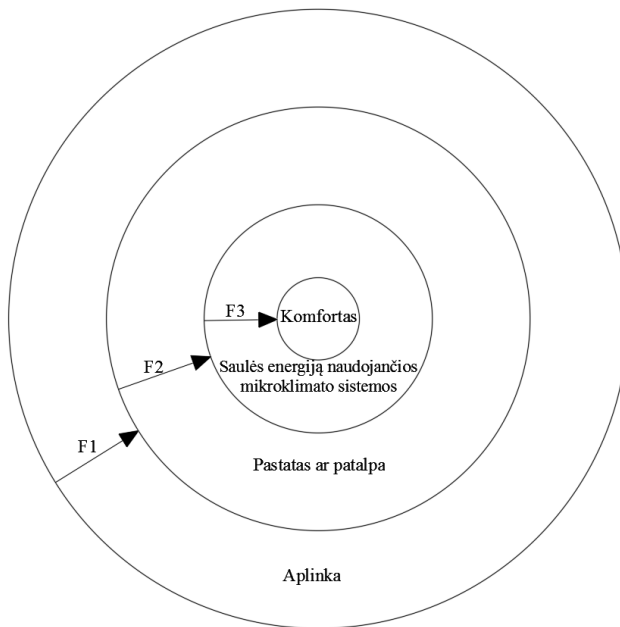
Nors terminas „sistema“ vartojamas labai plačiai, iki šiol dar nėra nusistovėjusio, visuotinai priimto sąvokos „sistema“ apibrėžtumo. Skirtingi autoriai ne visi vienodai interpretuoja šią sąvoką, todėl sukuria skirtingus jos apibrėžimus (Šukys 2005). Informacinių srautų sistemų tyrimuose nustovėjęs sistemos apibrėžimas yra šis: „Sistema“ – objektas, kurį sudaro ne mažiau kaip du elementai (elementas – pirminė sudėtinė grandis, iš kurių sudaryta sistema), susieti bendro pobūdžio ryšiais (tarpusavyje susietų ryšių). Kokybės požiūriu, sistema visada yra aukštesnės kokybės objektas nei atskiras į ją įeinantis elementas.

SA daugiausia dėmesio yra skiriama sistemų kompleksiskumo ir tarpusavyo sąveikos savybių tyrimams. Analizė grindžiama sisteminio arba „sveiko mąstymo“ principu, kuris savo ruožtu remiasi į sudėtingų, visų pirma, techninių sistemų ribų, struktūros, savybių, veikimo, elementų ir procesų, apimančių medžiagų, energijos ir informacijos srautų bei vyraujančių jėgų tarpusavyo sąveikos, bendrojo integralumo, taip pat sąveikos su apsuptimi atpažinimui reikalingas žinias (Biekša 2008).

Sisteminės analizės taikymas yra paplitęs kuriant ar nagrinėjant technines sistemas. Techninių sistemų analizė taikoma ir inžinerijoje, kuri vadinama „sistemų inžinerija“. Sistemų inžinerija – tarpdisciplininis požiūris, kuris reiškia sėkmingų sistemų realizavimą bei diegimą. Tai galima laikyti kaip inžinerinių technikų taikymą sistemoms (Thome 1993).

Techninė sistema – tai nustatyta tvarka tarpusavyje sąveikaujančių elementų visuma, skirta nustatytai naudingai funkcijai atlikti (Сибиряков and Семенова 2000).

Šio darbo kontekste sisteminės analizės objektu būtų keturių posistemų derinys, kaip parodyta 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Sisteminės analizės objektas
Fig. 1.10. Object of systemic analysis

1.10 paveiksle pateiktas sisteminės analizės objektas, sudarytas sekos pagrindu. Išorinį apvalkalą sudaro aplinka (F1), pastatas ar patalpa (F2), pagrindinė šio apvalkalo funkcija – apsaugoti joje esančius žmones nuo aplinkos poveikio. O pagrindinė trečiojo apvalkalo funkcija (F3) – užtikrinti, kad žmonės gerai jaustųsi juos supančioje aplinkoje. Visų apvalkalų funkcija – užtikrinti tinkamą patalpų funkcionalumą. O toliau reikia išskirti objektą ir nagrinėjamo objekto dalis.

Tam, kad būtų įvertintas saulės energiją naudojančių MKS termodinaminis ir funkcinis efektyvumas, vien atskirai kiekvienos dalies nagrinėti neužtenka, reikia

sistemiškai sujungti skirtingas metodikas bei jas siejančias nagrinėjamo objekto dalis.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Pirmajame skyriuje apžvelgus saulės mikroklimato sistemoms taikomus metodus ir jų detalumą paaiškėjo:

1. PMKPs ir AMKPs saulės energijos naudojimas pastatuose gali smarkiai sumažinti energijos vartojimą iš taršaus kuro išlaikant užsibrėžtą pastatų funkcionalumą. Vis dėlto taikant saulės energiją naudojančias mikroklimato sistemas turi būti sutelktas dėmesys į energijos kaupimo technologijas, kurios pagerina šių sistemų veikimo efektyvumą ir laiduoja sklandų veikimą.
2. Dažnai atvejais atliekamas tik vienos saulės energiją vartojančios technologijos šiluminio komforto vertinimas, todėl pasigendama tyrimų, kurie vertintų PMKPs ir AMKPs veikimą bei sąveiką integraliai naudojant saulės energiją.
3. Analizuojant saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų tyrimus matyti, kad sparčiai populiarėja ekserginis vertinimo metodas. Vis dėlto dažniausiai šis metodas taikomas saulės transformatoriams, o ne visai energinei grandinei. Nedaug bei neišsamūs dinaminio vertinimo atvejai, kuriuose sistemos ekserginis efektyvumas bei funkcionalumas būtų įvertintas ilgam (sezono, metų) laikotarpiui.

Apžvelgus tyrimus nustatyta, kad tikslinga tirti mikroklimato sistemų termodinaminį efektyvumą, kurio vertinimas atsižvelgia į funkcinį efektyvumą, bei parengti technologinį PMKPs ir AMKPs sąveikos, naudojant saulės energiją, vertinimo modelį. Tam reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinių tyrimų analizę, susijusią su saulės energiją naudojančiomis mikroklimato sistemomis (SENMS) ir juos struktūrizuoti pritaikyti atliekamiems tyrimams.
2. Sudaryti SENMS energinę grandinę bei formalizuoti energijos virsmų jos komponentuose termodinaminį (tame tarpe ir ekserginį) efektyvumą, integruojant sistemos kiekybinius rodiklius ir funkcionalumo parametrus.
3. Sukurti SENMS pasyvių ir aktyvių posistemų komponentų derinius bei įvertinti jų kiekybinių rodiklių įtaką sukuriamam komfortui.

4. Suformuoti SENMS termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelio struktūrą, tinkamą pastato informacinio modeliavimo procesui.
5. Parengti mažai energijos vartojančio pastato kaip SENMS termodinaminio efektyvumo ir funkcionalumo integruoto vertinimo modelį.
6. Pateikti ir interpretuoti skaitinį atvejį, gautą naudojant parengtą vertinimo modelį.

2

Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio ir funkcinio efektyvumo tyrimo modelio sudarymas

Šiame skyriuje pateiktas mažaenergių pastato ir jo saulės energiją naudojančių energinių sistemų integruoto vertinimo modelis, kuriuo nustatomas termodinaminis ir funkcinis efektyvumas. Šiam modeliui vertinti pasitelkiami specialieji analizės metodai, tokie kaip ekserginės analizės, Fangerio šiluminio komforto, parametrinės analizės, baigtinių elementų metodai. Šių metodų pagrindu taikant sisteminę analizę sukurti modeliai sujungiami į vieną energinę grandinę sudarančią visumą. Darbo tikslui pasiekti naudojami kompiuterinio modeliavimo įrankiai: „*METEONORM*“, „*ANSYS*“, „*TRNSYS*“ bei „*MATLAB*“.

Skyriaus tematika paskelbti 8 autoriaus straipsniai (Bielskus *et al.* 2013 a; 2013 b; Januševičius *et al.* 2014; Bielskus *et al.* 2014; Januševičius *et al.* 2015; Rimdžius *et al.* 2016; Martinaitis *et al.* 2016; Martinaitis *et al.* 2017).

2.1. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio funkcinio vertinimo modelio algoritmas

Darnumas su aplinka pasiekiamas sėkmingiau tuomet, kai saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminis ir funkcinis efektyvumas vertinamas pasitelkus sisteminės analizės metodą. Jo požiūriu sistemos elementų derinys sudaro įrenginį, o įrenginių visuma sudaro vieną ar kelias technologijas, formuojančias energinę grandinę.

Standartinės energijos tiekimo grandinės pradedamos nagrinėti nuo pirminės energijos, bet šiuolaikiniai pastatai yra išmanūs ir jų energijos vartojimas yra minimalus bei kintantis, todėl prie jų turi derintis energiją tiekianti grandinės dalis. Energijos grandinės kaip loginės funkcijos argumentu yra vartotojas, energinė paslauga jam. Vartojimas formuoja visos grandinės, ją sudarančių ir tarpusavyje derančių technologijų užduotį. 2.1 pav. pateikiama darbe tiriamos grandinės loginė struktūra.

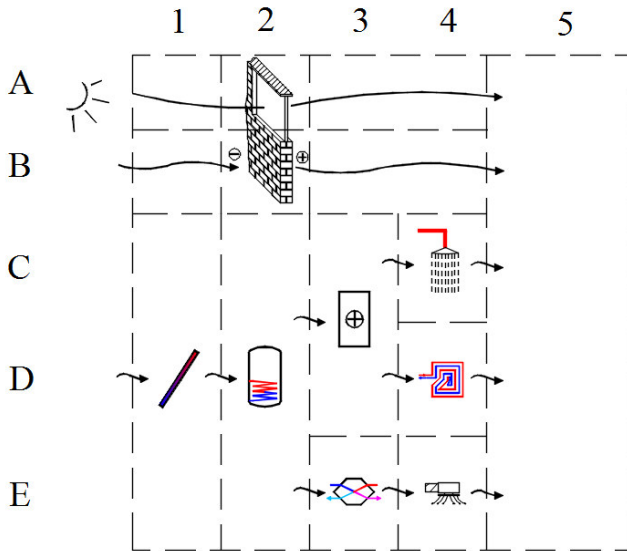


2.1 pav. Energinės grandinės loginė struktūra
Fig. 2.1. Logical chain of the energy chain

Siekis plačiau panaudoti atsinaujinančius energijos išteklius praplečia tam reikalingų technologijų ir jose vykstančių procesų skaičių, jų sąveiką padaro sudėtingesnę. 2.2 paveiksle tiriamos energinės grandinės loginė struktūra išplėtojama į technologijas, pagrindinius jų įrenginius. Taip pateikta grandinė apibūdina sisteminės analizės objektą, kurį sudaro pastatas (nagrinėjamos sistemos elementas) bei inžinerinių sistemų energijos transformatoriai ir akumuliatoriai su savo fizikinėmis savybėmis. Tokio objekto analizė turėtų prasidėti nuo patalpos komforto sąlygų, kurioms sukurti reikalingos dvi energijos formos, t. y. šiluma elektra (darbas), atkreipiant dėmesį į tai, kad šilumą gaminti naudojant darbą termodinaminio požiūriu nėra racionalu.

2.2 paveiksle parodyta energijos virsmų grandinės technologijų sudėtis nuo paslaugos iki pirminės energijos. Stulpelyje kairėje vaizduojama pirminė energija suteikiama aplinkos, 1 stulpelyje – generatorius / transformatorius, 2 – energijos akumuliavimas pasyviomis ir aktyviomis priemonėmis, 3 – trūkstamos šilumos energijos suteikimas iš išorinių šaltinių bei atgaunama šilumos energija iš šalina-

mos šilumos, 4 – energijos skleidimas, 5 – patalpoje sukuriamas komfortas / paslauga. Paveiksle išskirtos penkios technologijų eilės A, B, C, D ir E. Technologijos A ir B priskiriamos pasyvioms sistemoms, o C, D ir E aktyvioms.



2.2 pav. Tyrimo objekto technologinė struktūra
Fig. 2.2. Technological structure of the research object

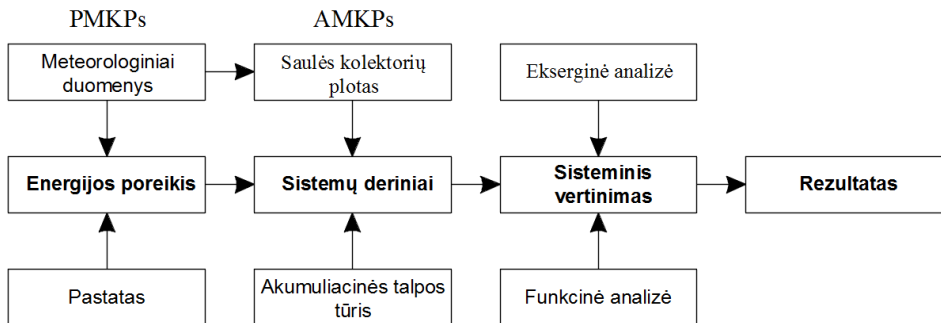
Pastatuose yra šiluma, akumuliuojama (kaupiama) pastato atitvarose. Ši energija į pastatą patenka per skaidrias atitvaras esant saulėtai dienai (vaizduojama A eilutėje), o atitvarose sukaupta šiluma (B eilutė) nakties metu atiduoda šilumą patalpai. Šis metodas yra pasyvus būdas reguliuoti šiluminius procesus patalpose.

C eilėje pateikiama aktyvi pirminės energijos transformavimo – saugojimo – skleidimo grandinė, kurios pagrindinė funkcija – užtikrinti karšto vandens ruošimą vartotojui. D – užtikrinti pasirinktą šiluminį komforto lygį patalpose (šildymas), o E – užtikrinti, kad patalpoje būtų tinkama oro kaita ir kokybė. Visų šių grandinės technologijų tikslas – pasiekti užsibrėžtą komfortą. Matoma, kad C, D ir E technologijas šiluma aprūpina saulės suteikta šiluma, kurios dalis kaupiama talpoje (4 stulpelis). Yra žinoma, kad saulės energija negali užtikrinti užsibrėžto komforto lygio naudojant tik ją, todėl, kai trūksta energijos funkcionalumui užtikrinti, tenka naudoti išorinį šilumos tiekimą. Patalpoms šildyti naudojama žematemperatūrė šildymo sistema. Greta termodinaminių tokios sistemos privalumų nustatyta, kad naudojant šią sistemą pasiekiamas aukščiausias komforto lygis, palyginti su kitomis šildymo sistemomis (VTT finland 2004).

Patalpoms vėdinti naudojamas vėdinimo įrenginys, kuriame vienas pagrindinių komponentų yra šilumogražos įrenginys. Šis įrenginys šviežią lauko orą sušildo naudodamas šalinamą šiltą patalpos orą. Vėliau šviežias oras, pašildytas šiluma, kuri gaunama iš saulės kolektorių, tiekiamas į patalpą.

Žinoma, šiltuoju periodu saulės kolektoriuose pagaminta šiluma nereikalinga patalpoms šildyti. Ši šiluma šiltuoju laikotarpiu gali būti atiduodama aplinkai („išmetama“) arba nukreipiama į krašto vandens ruošimo sistemą. Disertacijoje nagrinėjama karšto vandens sistemos termodinaminis efektyvumas ir funkcionalumas, o visas dėmesys skiriamas patalpos šiluminio komforto užtikrinimui vertinti.

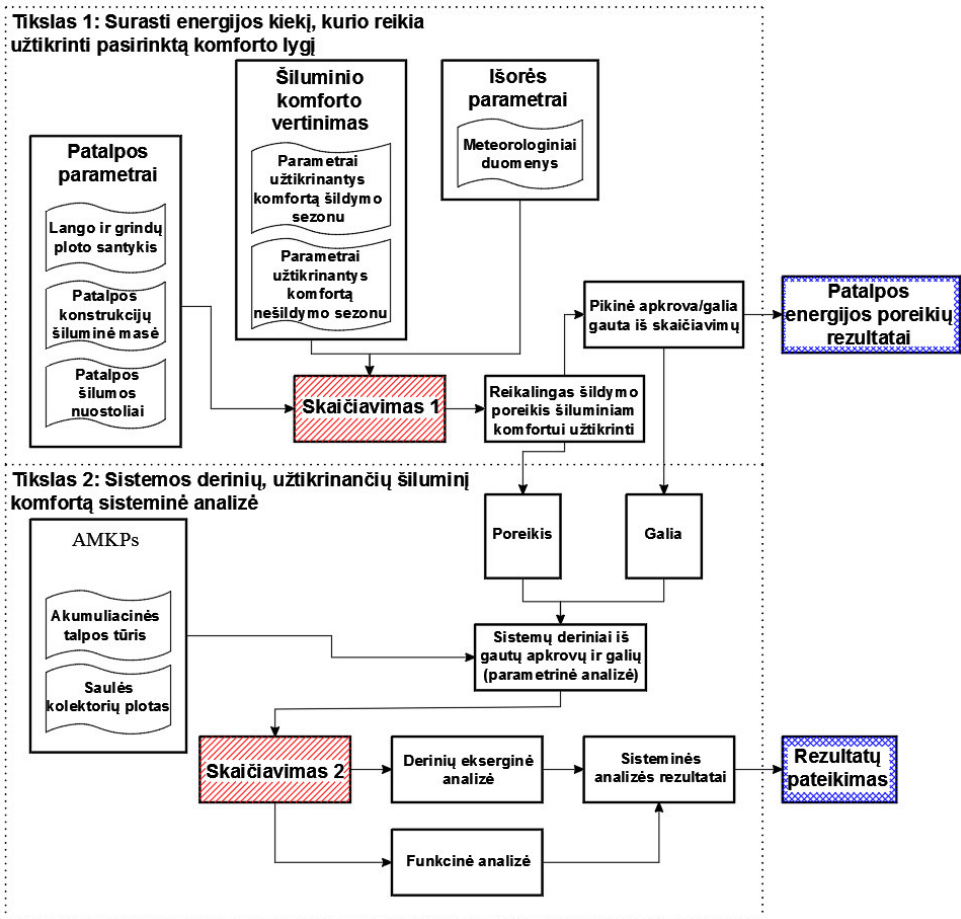
Turint technologinę modelio struktūrą pereinama prie procesų skaičiavimo algoritmo formavimo. Pradžioje nustatomas bendras energijos poreikis, kurį visų pirma lemia dvi duomenų grupės. Tai fizikinės (visų pirma terminės) pastato savybės ir jį supančios aplinkos meteorologiniai duomenys. Santykinai daugiausia dėmesio skiriama PMKPs. Antruoju etapu (AMKPs) skaičiuojami technologijų deriniai taip pat iš dviejų duomenų grupių – saulės kolektoriams ir šilumos kauptykloms. Šiuo etapu taip pat vertinami energijos poreikiai mechaniniam vėdinimui. Esminės jame vykstančių procesų ypatybės – pastovus tiekiamo šviežio oro kiekis ir kintanti lauko oro temperatūra. Trečiuoju etapu atliekama pirmojo (PMKPs) ir antrojo (AMKPs) etapų procesų sisteminė analizė, kurią sudaro du pagrindiniai komponentai – eksserginė ir funkcinė analizė. Paskutini etapu vertinamas pirmųjų trijų modelio etapų bendras rezultatas (2.3 pav.).



2.3 pav. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos modelio skaičiavimo etapai ir pagrindiniai informaciniai struktūros komponentai
Fig. 2.3. Calculation stages and the main informational structure components of the model for a solar microclimate system

Daktaro disertacijoje sprendžiamas sisteminis uždavinys, kuris sujungia funkcionalumą bei termodinaminę analizę. Toliau detalizuojant modelio struktūrą parengtas šiam uždaviniui spręsti skirtas algoritmas pateikiamas 2.4 paveiksle.

2.4 paveiksle matyti, kad visas algoritmas skaidomas į dvi dalis. Pirmojoje dalyje nustatomas energijos kiekis, reikalingas šiluminiam komfortui patalpose užtikrinti. Antrojoje dalyje nagrinėjamos aktyviosios sistemos pritaikius sisteminę ir ekserginę analizę. Abiejose dalyse taikomas parametrinės analizės metodas.



2.4 pav. Saulės energiją naudojančios mikroklimate sistemos ekserginio ir funkcinio efektyvumo nustatymo algoritmas

Fig. 2.4. Algorithm of assessing the exergy and functional efficiency of a solar microclimate system

Pirmoje dalyje atliekama geriausio įstiklinimo ploto ir sienos šiluminio talpumo derinio paieška, kai reikalingas mažiausias metinis energijos kiekis patalpai

šildyti bei vėsinti (minimumo paieška). Ieškant šio minimumo keičiami parametrai: sienų aktyvus šilumos talpumas ir įstiklinimo plotas.

Antruoju etapu atliekamas geriausių parametų patalpos ekserginis vertinimas. Šiuo etapu taip pat atliekama parametrinė analizė, kurios tikslas – rasti tinkamiausią saulės kolektorių, šilumos kaupyklos ir pagalbinio šildytuvo dydžius, kai pasiekiamas didžiausias (maksimumo paieška) sistemos efektyvumas ir saulės frakcijos dydis. Ieškant šio maksimumo keičiami parametrai: saulės kolektorių plotas, šilumos kaupyklos tūris bei pagalbinio šildytuvo galia.

Pagrindinė 2.3 ir 2.4 paveikslų schemose parodytų technologijų ir jose vykstančių procesų funkcija – užtikrinti, kad galutinis vartotojas patalpoje būtų patenkintas šilumine aplinka.

Šią funkciją galima išreikšti taip:

$$NVI = f(t_a, \bar{t}_r, v, SD, \dots),$$

čia t_a – oro temperatūra, °C; \bar{t}_r – vidutinė spinduliavimo temperatūra, °C; v – santykinis oro greitis, (m/s); SD – santykinė drėgmė.

Šioje funkcijoje pateikti dydžiai, kurie priklauso nuo fizikinių pastato savybių bei inžinerinių jo sistemų, o ne nuo vartotojo elgsenos (apsirengimo tipo ar judėjimo intensyvumo). Kituose skyriuose detalai pristatomi saulės energiją naudojančios MKS ekserginio ir funkcinio efektyvumo nustatymo etapai ir sistemos vertinimo algoritmo sudėtinės dalys.

2.2. Išorės parametrai

Išorės (lauko) parametrai yra kraštinės uždavinio sąlygos, kurios nusakomos prieš sprendžiant uždavinį. Patalpos energiniai ir ekserginiai srautai tiesiogiai priklauso nuo klimatinių išorės duomenų, t. y. oro temperatūros, saulės spinduliuotės ir t. t. Atliekama saulės energiją naudojančių mikroklimato sistemų dinaminė analizė vienų metų periodu. Todėl reikalingi dinaminiai klimatiniai duomenys.

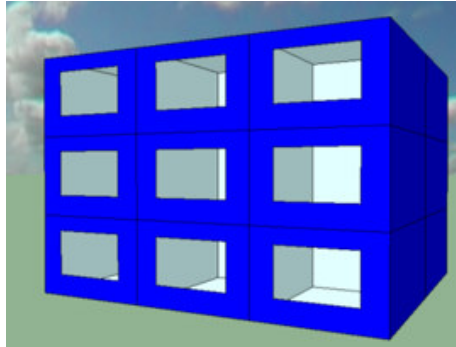
Klimatiniai duomenys generuojami naudojantis „*METEONORM*“ kompiuterine programa (2.4 pav.). Ši programa pasirinktos vietovės klimatinius duomenis interpoliuoja naudojantis artimiausių klimatinių stočių išmatuotomis reikšmėmis. Reikalingi duomenys skaičiavimams: oro temperatūra, santykinė drėgmė, vėjo greitis, kryptis, atmosferos slėgis, debesuotumas ir saulės spinduliuotė. Klimatiniai duomenys interpoliuojami vienų metų 1 valandos žingsniu, o „*METEONORM*“ išvesties failo formatas pritaikomas „*TRNSYS*“ kompiuterinei programai.

„*METEONORM*“ programa galima konvertuoti realiai išmatuotus klimatinius parametrus į tinkamus išvesties parametų duomenis.

2.3. Patalpos parametrai

Patalpos parametrus sudaro: įstiklinimo plotas; šiluminė konstrukcijų talpa, jų plotai bei šilumos nuostoliai. Pradedama nagrinėti nuo paties pastato geometrijos.

Pagrindinis pastato komponentas yra patalpa, o patalpos savybės priklauso nuo orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu, padėties pastate, geometrijos ir paskirties. 2.5 paveiksle pateikiama nagrinėjamo pastato koncepcija.



2.5 pav. Nagrinėjamo pastato koncepcija

Fig. 2.5. The analysed concept of building

2.5 pav. pavaizduoto hipotetinio pastato paskirtis yra įvairiapusė, jis gali būti gyvenamosios arba administracinės paskirties. Pastate patalpos išdėstytos taip, kad jos visos bent viena atitvara ribojasi su lauku. Pagrindiniai duomenys apie pastatą:

- paskirtis – gyvenamoji arba administracinė;
- plotas – 360 m²;
- tūris – 972 m³;
- aukštis – 8,13 m;
- išorinių atitvarų plotas – 356,4 m²;
- orientacija – kintanti;
- $H = 138 \text{ W/K}$;
- oro infiltracija – 0,6 h⁻¹ esant 50 Pa pertekliniam slėgiui pastate (Feist *et al.* 2005).

Autorius Bulow atliko išsamią apžvalgą, kurios tikslas nustatyti gyventojams priimtina sienos įstiklinimo ploto santykį. Apibendrinant šio tyrimo rezultatus, galima teigti, kad priimtinausias įstiklinimo santykis su patalpos grindų plotu nuo 18 % iki 49 % (Bülow-hübe 2001).

Pastato atitvaros atitinka mažoenergetinio pastato atitvaroms keliamus reikalavimus. Pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai U pateikiami 2.1. lentelėje.

2.1 lentelė. Pastato atitvarų šilumos perdavimo koeficientai

Table 2.1. Heat transfer coefficients of the walls of the building

Atitvara	U , W/(m ² ·K)
Sienos	0,1
Stogas	0,08
Langai	0,70

Visų patalpų plotas, tūris ir aukštis vienodi, atitinkamai yra 20 m², 54 m³ ir 2,7 m. Pastato energijos suvartojimui įtakos turi išorinių sienų masyvumas, todėl tolesniame skyriuje pateikta metodika, kurios algoritmu remiantis vertinamas atitvarų masyvumas.

Standartiniu būdu projektuojant pastatus atsižvelgiama į atitvarų masyvumą renkantis projektinę išorės temperatūrą, o skaičiuojant poreikius į tai neatsižvelgiama. Pastato sienos saulės suteiktą šilumą gali akumuliuoti savyje bei atiduoti sukauptą energiją patalpai. Saulės energijos akumuliacija bei jos skleidimas patalpoje nėra valdomas procesas, t. y. jis vyksta savaime. Šis procesas yra pirmoji priemonė, kuri padeda pasyviai kontroliuoti šiluminį komfortą patalpose (PMKPs).

Literatūros apžvalgoje buvo nuspręsta, kad sienų šilumos talpumui įvertinti bus naudojama analitinio skaičiavimo metodika, kuri nustato aktyvų šilumos sluoksnį. Vertinimas atliekamas pasitelkiant tarptautinį standartą ISO 13786:2007. Šis standartas pateikia dvi šilumos talpumo metodikas – paprastąjį bei kompiuterinio programavimo. Paprastasis metodas yra ribotas vertinamų atvejų skaičiumi ir rezultatų patikimumu, o kompiuterinis programavimas reikalauja skaičiavimų su kompleksiniais skaičiais. Pasirinktas darbe vertinimo metodas yra kompiuterinis, kuris bus atliktas naudojant „MATLAB“ kompiuterinę programą. Priede A pateikta konkreti algoritme naudojama metodika, kuria atliekamas atitvaros aktyvaus šilumos sluoksnio skaičiavimas.

Algoritmui reikalingi šie parametrai:

- sienos storis (d);
- sieną sudarančios medžiagos šilumos laidumas (λ);
- tankis (ρ);
- specifinė šiluminė talpa (c);
- periodas (T).

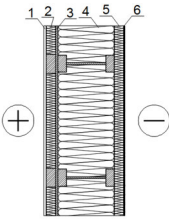
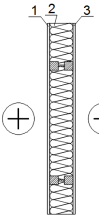
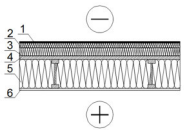
Nagrinėjant šilumos perdavimą per atitvaras priimama, kad visos naudojamos medžiagos yra izotropinės, t. y. šilumos laidumo dydis visomis kryptimis yra vienodas.

Algoritmo patikimumas tikrinamas lyginant su standarte ISO 13786:2007 pateiktos sienos skaičiavimo rezultatais.

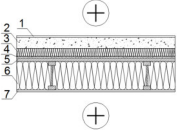

Atlikus skaičiavimus gaunamas vidinio paviršiaus šilumos talpumas, kurio matavimo vienetai $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Šis gautas talpumas skaičiuojamas pasirinktu laiko periodu ir atliekama sinchronizacija su kompiuterine programa „TRNSYS“.

Iš ankstesnių skyrių žinoma, kad darbe atliekama parametrinė analizė. Pirmojo etapo parametrinės analizės tikslas – surasti optimalų sienos šilumos talpumo derinį su įstiklinimo plotu. Analizei pasirinktos įvairaus šiluminio talpumo konstrukcijos, jos pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Parametrinėje analizėje taikomos pastato konstrukcijų parametrai
Table 2.2. Building constructions parameters applied for the parametric analysis

Nr.	Atitvara	Sluoksnio pavadinimas (storis)	λ , $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	ρ , kg/m^3	C_p , $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
1.		1) Gipso kartono plokštė (12 mm) 2) Medžio tašai (600 mm + mineralinė vata 50 mm) 3) OSB plokštė (12 mm) 4) Medžio karkasas (I formos) + mineralinė vata (295 mm) 5) Tinkuojama mineralinė vata (50 mm) 6) Tinkas (5 mm)	1) 0,25 2) 0,06 3) 0,13 4) 0,042 5) 0,035 6) 0,8	1) 900 2) 150 3) 650 4) 77 5) 18,5 6) 1600	1) 1000 2) 1475 3) 1700 4) 1460 5) 1450 6) 1000
2.		1) Gipso kartono plokštė (12 mm) 2) Medžio karkasas (I formos) + mineralinė vata (120 mm) 3) Gipso kartono plokštė (12 mm)	1) 0,25 2) 0,052 3) 0,25	1) 900 2) 80 3) 900	1) 1000 2) 1459 3) 1000
3.		1) Dviejų sluoksnių bituminė danga (10 mm) 2) Akmens vata (viršutinis sluoksnis) (30 mm)	1) 0,17 2) 0,036	1) 1050 2) 40	1) 1000 2) 1450

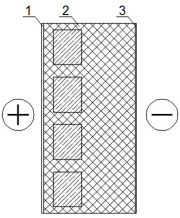
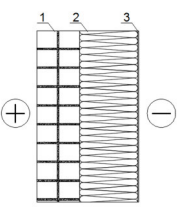
2.2 lentelės tęsinys

Nr.	Atitvara	Sluoksnio pavadinimas (storis)	λ , W/(m·K)	ρ , kg/m ³	C_p , J(kg·K)
		3) Akmens vata (apatinis sluoksnis) (50 mm)	3) 0,036	3) 18,5	3) 1450
		4) OSB plokštė (22 mm)	4) 0,13	4) 650	4) 1700
		5) Medžio karkasas (I formos) + mineralinė vata (395 mm)	5) 0,039	5) 61	5) 1456
		6) Gipso kartono plokštė (12 mm)	6) 0,25	6) 900	6) 1000
4.		1) Laminatinės grindys (10 mm)	1) 0,18	1) 700	1) 1600
		2) Armuotas lyginamasis sluoksnis (70 mm)	2) 2,3	2) 2300	2) 1000
		3) Putų polistirenas „EPS 100“ (50 mm)	3) 0,037	3) 18,5	3) 1450
		4) Plokštės su cemento rišikliu (10 mm)	4) 0,23	4) 1200	4) 1500
		5) OSB plokštė (22 mm)	5) 0,13	5) 650	5) 1700
		6) Medžio karkasas (I formos) + mineralinė vata (200 mm)	6) 0,047	6) 89	6) 1463
		7) Gipso kartono plokštė (12 mm)	7) 0,25	7) 900	7) 1000
5.		1) Gelžbetonio vidinis laikantysis sluoksnis (150 mm)	1) 2,3	1) 2300	1) 1000
		2) Vidinis termoizoliacinis sluoksnis (246 mm) sluoksnis (100 mm)	2) 0,025	2) 60	2) 1400
		3) Gelžbetonio išorinis apdailinis	3) 2,3	3) 2300	3) 1000

2.2 lentelės tęsinys

Nr.	Atitvara	Sluoksnio pavadinimas (storis)	λ , W/(m·K)	ρ , kg/m ³	C_p , J(kg·K)
6.		1) Dviejų sluoksnių bituminė danga (10 mm) 2) Akmens vata (50 mm) 3) Putų polistirenas (395 mm) 4) Kiaurymėtoji gelžbetoninė perdanga (220 mm)	1) 0,17 2) 0,036 3) 0,037 4) 2,5	1) 1050 2) 40 3) 18,5 4) 2400	1) 1000 2) 1450 3) 1450 4) 1000
7.		1) Laminatinės grindys (10 mm) 2) Armuotas išlyginamasis sluoksnis (70 mm) 3) Putų polistirenas (100 mm) 4) Kiaurymėtoji gelžbetoninė perdanga (220 mm)	1) 0,18 2) 2,3 3) 0,037 4) 2,5	1) 700 2) 2300 3) 8,5 4) 2400	1) 1600 2) 1000 3) 1450 4) 1000
8.		1) Tinkas (10 mm) 2) Pilnavidurės silikatinės plytos su cemento skiediniu (120 mm) 3) Tinkas (10 mm)	1) 0,8 2) 1 3) 0,8	1) 1600 2) 1800 3) 1600	1) 1000 2) 1000 3) 1000
9.		1) Akytojo betono blokas (400 mm) 2) Termoizoliacinis sluoksnis (233 mm) 3) Tinkas (5 mm)	1) 0,12 2) 0,035 3) 0,8	1) 600 2) 8,5 3) 1600	1) 900 2) 1450 3) 1000

2.2 lentelės pabaiga

Nr.	Atitvara	Sluoksnio pavadinimas (storis)	λ , W/(m·K)	ρ , kg/m ³	C_p , J(kg·K)
10.		1) Tinkas (10 mm) 2) Putų polistireno siena su armuoto betono užpildu (480 mm) 3) Tinkas (5 mm)	1) 0,8 2) 0,049 3) 0,8	1) 1600 2) 658 3) 1600	1) 1000 2) 1419 3) 1000
11.		1) Pilnavidurės silikatinės plytos su cemento skiediniu (250 mm) 2) Termoizoliacinis sluoksnis (340 mm) 3) Tinkas (5 mm)	1) 1 2) 0,035 3) 0,8	1) 1800 2) 18,5 3) 1600	1) 1000 2) 1450 3) 1000

čia λ ; ρ ir c_p – žiūrėti 2.1 formulę.

Parametrinei analizei sudaromi 5 konstrukcijų deriniai, kurie bus taikomi atliekant skaičiavimus. Naudojami deriniai:

- 1 derinys: 1, 2, 3 ir 4 (žiūrėti į 2.2 lentelę);
- 2 derinys: 5, 6, 7 ir 8;
- 3 derinys: 11, 6, 7 ir 8;
- 4 derinys: 9, 6, 7 ir 8;
- 5 derinys: 10, 6, 7 ir 8;

Pagal aukščiau pateiktą metodiką atitvarų aktyvios šiluminės talpos dydis, kai vertinimo periodas – 12 valandų (Valančius 2006).

Tarptautinio standarto ISO 13786:2007 metodika patikimai vertina vienasluoksnes ir daugiasluoksnes atitvaras, tai rodo ir kitų autorių atlikti tyrimai (Faye *et al.* 2015). Bet vertinant daugiasluoksnes nevienalytes sienas, tokias kaip 2.2 lentelės nr. 1, priimamos prielaidos, kurios įneša paklaidas. Šių paklaidų dydžiams įvertinti geriausiai tinka eksperimentinis metodas, bet šis metodas yra brangus ir ilgai trunkantis. Eksperimentinį matavimą galima pakeisti skaitiniu modeliu. Disertacijoje atliekamas skaitinis modeliavimas, paremtas Faye ir kitų autorių sudaryta metodika (Faye *et al.* 2015).

Skaitinis metodas – tai metodas, kuris atlieka diferencialinių matematinių lygčių sprendimą pritaikant iteracinį skaičiavimą. Skaitinis skaičiavimas atliekamas pasitelkiant kompiuterines programas. Skaičiavimai atliekami aprašant matematinį uždavinį ir sprendžiant šilumos laidumo bei talpumo lygtis.

Norint išspręsti šilumos laidumo ir talpumo uždavinį reikia jį aprašyti matematiškai. Todėl žemiau pateikiamas sprendžiamo matematinio uždavinio aprašymas.

Trimačio lauko šilumos laidumo pagrindinė lygtis išreiškiama:

$$\lambda \cdot \Delta T + Q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.1)$$

čia λ – šilumos laidumas, W/(m·K); Δ – Laplaso operatorius; Q – šilumos energijos gamyba; ρ – tankis, kg/m³; c_p – šiluminė talpa, kJ/(K·kg); T – temperatūra, K; t – laikas, s.

Laplaso operatorius:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2.2)$$

Tuomet šilumos laidumo per atitvarą lygtis:

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.3)$$

čia x , y ir z – Dekarto koordinatės trimatėje erdvėje.

Šiame darbe atitvara nr. 1 nagrinėjama dvimačiame lauke, nes šiluma per ją sklinda dviem kryptimis (x ir y). Todėl šilumos laidumo lygtis supaprastinama iki:

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Norint išspręsti (2.4) lygtį privaloma viena pradinė sąlyga ir dvi kraštinės sąlygos. Kaip pradinė sąlyga yra laikoma stacionarus problemos sprendimas, kai $t = 0$. Abiejose sienos pusėse Niutono dėsnis nustato kraštines sąlygas dėl konvekcijos. Išorinio paviršiaus sienos yra veikiamos (a) konvekcinio šilumos perdavimo q_c , (b) ilgųjų bangų spinduliuotės į laukę supančią aplinką ir (c) krintančios tiesioginės saulės spinduliuotės. Kraštinės sąlygos yra apibūdinamos taip:

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} + \frac{\partial T(0,t)}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(0,y_0)} = h_e \cdot (T_a - T_e), \quad (2.5)$$

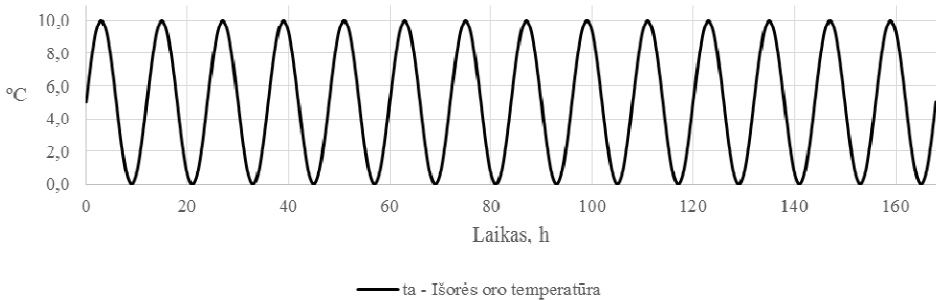
čia h_e – sienos išorinio paviršiaus konvekcinių šilumos mainų koeficientas $h_e = 25$ W/(m²·K); T_a – aplinkos oro temperatūra, °C; T_e – išorinės sienos paviršiaus temperatūra, °C, y_0 – laisvai pasirenkamas y ašyje ilgyje l.

Siekiant skaitiniu ir / ar eksperimentiniu būdu nustatyti šilumos talpumą bei bangos slopinimo dydį reikia lauko oro temperatūrą keisti pagal sinusoidinę bangą. Atliekant skaičiavimą stebina kaip kinta temperatūra vidinėje sienos pusėje. Išorės oro temperatūra (T_a) vertinama pagal formulę (Faye *et al.* 2015):

$$T_a = 5 + 5 \cdot \sin\left(t \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{P}\right)\right). \quad (2.6)$$

čia t – laikas, s; P – periodas, s.

2.6 formulėje pateikiamas išorės (lauko) oro temperatūros periodinis kitimo vertinimas. Kai $P = 12$ h, gaunama išorės oro temperatūra, kuri pateikta 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Išorės oro temperatūros periodinis kitimas
Fig. 2.6. The periodic change of the external temperature

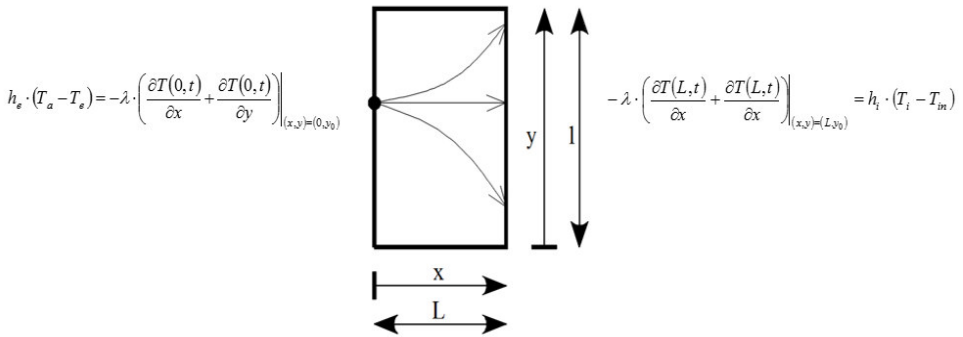
2.6 paveiksle pateikta išorės oro temperatūrinė banga, kuri naudojama skaitiniame vertinime.

Vidinio paviršiaus sienos konvekcinius šilumos perdavimas, įskaitant ilgųjų bangų spinduliuotę į vidaus erdvę, vertinamas (Kontoleon *et al.* 2013):

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T(L,t)}{\partial x} + \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} \right) \Bigg|_{(x,y)=(L,y_0)} = h_i \cdot (T_i - T_{in}). \quad (2.7)$$

čia h_i – bendras šilumos perdavimo koeficientas (konvekcijos ir spinduliuoties), $h_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_i – sienos vidinio paviršiaus temperatūra ($x = L$); T_{in} – vidaus temperatūra (skaitiniame vertiniame laikoma nekintama, ji lygi $20 \text{ }^\circ\text{C}$.).

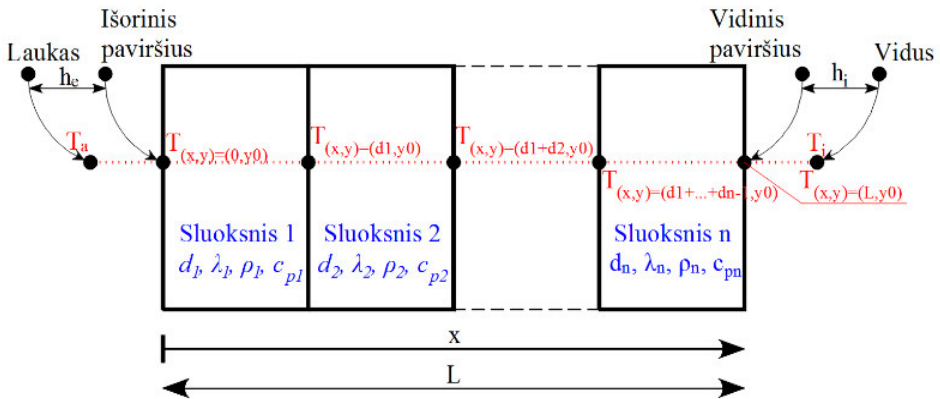
Žemiau pateikiama schema su uždavinio sprendimo pradinėmis ir kraštinėmis sąlygomis. Pradinės visos temperatūros yra $T = T_0$ ($t = 0$).



2.7 pav. Sprendžiama problema dvimatėje stacionaraus šilumos srauto nevienalytėje atitvaroje

Fig. 2.7. The analysed problem in a two-dimensional non-uniform wall of a stationary thermal flow

2.7 paveiksle pateikiamas stacionaraus šilumos srauto dvimatėje nevienalytėje atitvaroje sprendimas. Šilumos srautas nuo lauko oro iki paviršiaus sklinda x kryptimi, o atitvaroje dėl jos nevienalytiškumo pasikirsto x ir y kryptimi. Bet sienų šiluminei inercijai ir jos slopinimo lygiui turi būti sprendžiamas laike kintantis šilumos srauto uždavinys. Šį uždavinį galima aprašyti naudojantis 2.8 paveikslu.



2.8 pav. Sprendžiama laike kintančio šilumos srauto sklidimas dvimatėje nevienalytėje atitvaroje

Fig. 2.8. The analysed spread of a thermal flow that changes in time in a two-dimensional non-uniform wall

2.8 paveiksle pateikiama nevienalytė n sluoksnių turinti atitvara. Pagrindinės šilumos srauto lygtys išreiškiamos taip:

$$\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) = \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad (2.8)$$

$$\lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) = \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t}, \quad (2.9)$$

$$\lambda_{n-1} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_{n-1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{n-1}}{\partial y^2} \right) = \rho_{n-1} \cdot c_{pn-1} \cdot \frac{\partial T_{n-1}}{\partial t}, \quad (2.10)$$

$$\lambda_n \cdot \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right) = \rho_n \cdot c_{pn} \cdot \frac{\partial T_n}{\partial t}. \quad (2.11)$$

Kraštinės sąlygos yra:

$$-\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(0,y_0)} = h_e \cdot (T_a - T_e), \quad (2.12)$$

$$-\lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1,y_0)} = -\lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2,y_0)}, \quad (2.13)$$

$$-\lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2,y_0)} = -\lambda_{n-1} \cdot \left(\frac{\partial T_{n-1}}{\partial x} + \frac{\partial T_{n-1}}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2+\dots+dn-1,y_0)}, \quad (2.14)$$

$$-\lambda_{n-1} \cdot \left(\frac{\partial T_{n-1}}{\partial x} + \frac{\partial T_{n-1}}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2+\dots+dn-1,y_0)} = -\lambda_n \cdot \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} + \frac{\partial T_n}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2+\dots+dn,y_0)}, \quad (2.15)$$

$$-\lambda_n \cdot \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} + \frac{\partial T_n}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)=(d1+d2+\dots+dn,y_0)} = h_i \cdot (T_i - T_m). \quad (2.16)$$

Šiam termodinaminiam uždaviniui spręsti galima naudoti baigtinių elementų metodus (BEM).

Atlikus skaičiavimus su BEM programa gaunami išvesties duomenys: vidinio ir išorinio paviršių temperatūra, šilumos srauto svyravimų amplitudės bei periodai. Gauti išvesties duomenys apdorojami pagal Faye ir kitų autorių pateiktą metodiką (Faye *et al.* 2015).

Literatūros apžvalgoje buvo pastebėta, kad dažniausiai pirmoji priemonė patato efektyvumui įvertinti yra šilumos perdavimo koeficiento nustatymas. Čia taip pat pasitelkiama ši priemonė, kurios pagalba nustatomi patalpos šilumos nuostoliai. Šilumos nuostoliai vertinami pasitelkiant šilumos perdavimo koeficientą ir išreiškiami per savituosius šilumos nuostolius (H). Patalpos savitieji nuostoliai vertinami pagal formulę:

$$H = \sum A \cdot U, \quad (2.17)$$

čia A – atitvarų plotas, m^2 ; U – šilumos perdavimo koeficientas, W/K .

O šilumos nuostoliai vertinami 2.17 formulę padauginus iš vidaus oro ir lauko oro temperatūros skirtumo. Šis vertinimas atliekamas su kompiuterine programa „TRNSYS“.

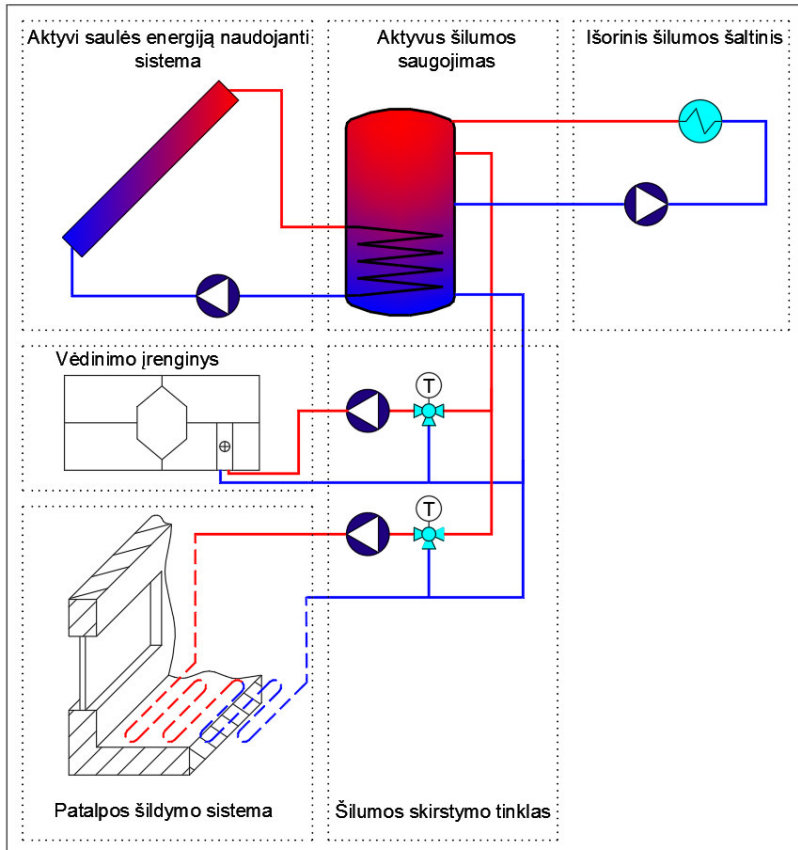
Disertacijoje patalpos energijos poreikiams nustatyti naudojamos visos priemonės, pateiktos 2.3 skyriuje. Taip pasiekiamas kompleksinis sprendimas, nuo kurio priklauso saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos elementų dydžiai bei sistemos efektyvumas. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos efektyvumo vertinimo metodika pateikta kitame šio skyriaus poskyryje.

2.4. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos ekserginis efektyvumas

Iš ankstesnių skyrių žinome, kad PMKPs negali užtikrinti 100 % reikalingos energijos patalpos šiluminiam komfortui. Todėl naudojamos AMKPs, o šioms sistemoms vien energinio vertinimo neužtenka. Šis vertinimas neatspindi esamos situacijos dėl skirtingų energijos rūšių naudojimo. Tam geriausiai tinka ekserginė analizė, kuri ir bus taikoma AMKPs.

Dažniausiai ekserginė analizė nagrinėja stacionarius procesus, bet jeigu nagrinėjamas dinaminis procesas, jis kiekvienu laiko momentu supaprastinamas į nusistovėjusį režimą (stacionarų). Šioje dalyje apžvelgiami pagrindiniai energijos ir eksergijos vertinimo principai. Ši analizė atliekama tik AMKPs, kuri pateikta 2.9 paveiksle.

Iš 2.9 paveikslo matyti, kad nagrinėjamą sistemą sudaro pagrindinės ir pagalbinės posistemės. Pagrindinės posistemės – tai: saulės kolektoriai, šilumos kaupimo talpa ir vėdinimo įrenginys, o pagalbinės: pagalbinis šilumos šaltinis, šildymo sistema ir cirkuliaciniai siurbliai. Toliau šio skyriaus dalyse detalios nagrinėjami pagrindiniai ir pagalbiniai įrenginiai bei jų elementai. Tik išnagrinėjus sistemos elementus galima sudaryti visos sistemos ekserginį balansą bei nustatyti ekserginį jos efektyvumą.



2.9 pav. Aktyvi saulės energiją naudojanti mikroklimate sistema
 Fig. 2.9. Active solar microclimate system

Bet kuriuo atveju ekserginis efektyvumas apibūdina nagrinėjamos sistemos tobulumo laipsnį. Šio laipsnio vertė kinta intervale $0 \leq \eta_{ex} \leq 1$. Jei techninė sistema neatiduotų jokios eksergijos jis turėtų būti lygus nuliui, taigi idealioje sistemoje jis būtų lygus 1.

2.4.1. Pagrindiniai posistemės įrenginiai

Šiame poskyryje nagrinėjami pagrindiniai sistemos įrenginiai, tai yra: saulės kolektoriai, šilumos kaupimo talpa ir vėdinimo įrenginys. Analizė pradeda nuo saulės kolektorių, o baigiama vėdinimo įrenginiu ir jo elementais.

Disertacijoje priimta, kad visuose sistemos elementuose esančio šilumnešio specifinė šiluma ir tankis nepriklauso nuo temperatūros, nes šilumnešio temperatūrai kintant nuo 20 °C iki 60 °C (sistemos minimali ir maksimali šilumnešio temperatūra) specifinė šiluma pasikeičia tik 0,4 %, o tankio pokytis yra iki 1,6 % (Anon 2011).

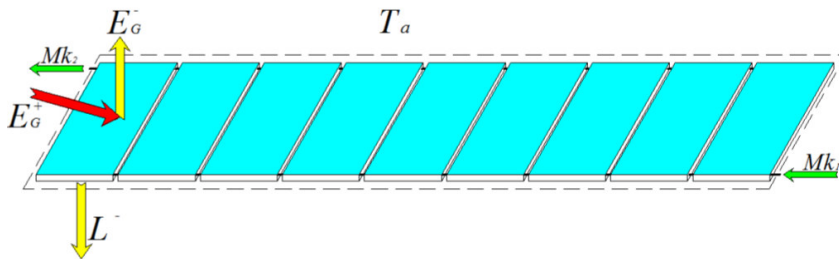
Saulės kolektorių energinio ir ekserginio balanso lygtis sudaroma iš įeinančių, išeinančių energijos ir eksergijos bei iš nuostolių srautų. Įtekančiojo ir ištekančiojo ekserginio srauto skirtumas yra ekserginiai nuostoliai, kurie nurodo darbo sumažėjimą dėl sistemos negrįžtamumo. Jie kiekybiškai išreiškia kokybinę energijos nuvertėjimo (degradacijos) sąvoką (Martinaitis 2007).

Toliau šiame skyriuje pateikiama saulės kolektorių skaičiavimo metodika. Kadangi ekserginis vertinimas glaudžiai susijęs su pirmu termodinamikos dėsniu, pateikiami ir energiniai balansai. Pradedama sistemą nagrinėti nuo principinės schemos, kuri pateikta (2.10 pav.).

Saulės kolektorių energinis balansas:

$$A \cdot G^+ = M_1 \cdot (h_1 - h_2) + G^-, \quad (2.18)$$

čia G^+ – saulės kolektoriams suteiktas saulės spinduliuotės kiekis, kJ/m²; A – saulės kolektorių plotas, m²; G^- – kolektorių energijos nuostoliai dėl atspindėtos saulės spinduliuotės ir nuostolių per sienelės, kJ/m²; h_1 ir h_2 – entalpija įtekanči ir ištekanči iš saulės kolektorių, kJ/kg; M_1 – masinis debitas pratekantis per saulės kolektorius, kg.



2.10 pav. Saulės kolektoriai su sistemos ribomis ir įeinančiais (išeinančiais) ekserginiais srautais

Fig. 2.10. Solar collectors with system limitations and entering (exiting) flows

Entalpija skaičiuojama:

$$h_i = c_p \cdot t_i, \quad (2.19)$$

čia i – indeksas nurodantis nagrinėjamo ruožo numerį; c_p – šilumnešio specifinė šiluma, kJ/(kg·K); t – šilumnešio temperatūra skaičiuojamame ruože, °C;

Saulės kolektoriaus patiriami nuostoliai skaičiuojami:

$$G^- = G^+ \cdot A \cdot (1 - \varepsilon_{sol}), \quad (2.20)$$

čia A – saulės kolektorių plotas, m^2 ; ε_{sol} – saulės kolektorių energinis efektyvumas.
Ekserginis saulės kolektoriaus balansas:

$$E_G^+ = E_G^- + M_1 \cdot (k_2 - k_1) + L_s, \quad (2.21)$$

čia E_G^+ – saulės energijos suteiktas eksergijos kiekis, kJ; E_G^- – eksergijos srautas aplinkai, kJ; k_1 ir k_2 – koentalpija įtekanti į sistemą ir ištekanti iš sistemos, kJ/kg; L_s – saulės kolektorių ekserginiai nuostoliai, kJ.

Saulės suteiktas eksergijos kiekis nustatomas pagal formulę (Petela 2003):

$$E_G^+ = A \cdot G \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right), \quad (2.22)$$

čia T_a – sistemą supančios aplinkos temperatūra, K; T_s – saulės paviršiaus temperatūra, K (6000 K).

Petelos pateikta formulė yra kritikuojama autoriaus (Pons 2012), jis teigia, kad šioje formulėje vertinama tik tiesioginė saulės spinduliuotė, o išsklaidyta ir atspindėta nevertinama. Nors Petelos pasiūlytas metodas kritikuojamas, bet jis dominuoja moksliniuose tyrimuose. Todėl ir šioje disertacijoje naudojamas šis vertinimo metodas.

Eksergijos srautas dėl šilumos nuostolių vertinamas pasitelkus Karno faktorių:

$$E_G^- = G^- \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right), \quad (2.23)$$

čia $\left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right)$ – Karno faktorius;

Eksergijos srautas aplinkai yra lygus nuliui, nes šiluma atiduodama aplinkai. Šilumnešio srauto koentalpija skaičiuojama:

$$k_i = h_i - c_p \cdot T_a \cdot \ln \left(\frac{T_i}{273,15} \right). \quad (2.24)$$

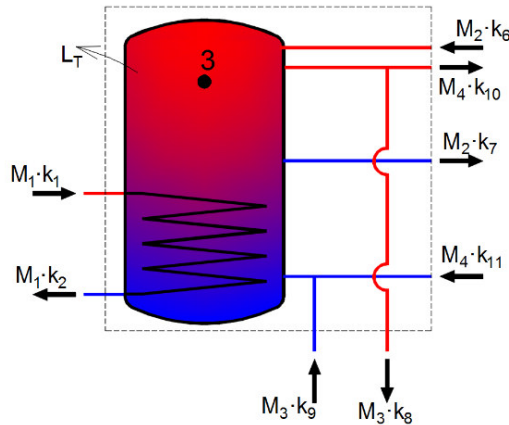
Visi formulėje nurodyti dydžiai paminėti ankstesnėse formulėse.

Saulės kolektoriaus momentinis šiluminis efektyvumas pagal antrą termodinamikos dėsnį gali būti apibrėžtas kaip faktinės pagamintos naudingos eksergijos

ir saulės suteiktos eksergijos kolektoriaus bendram ploto dydžiui santykis, jis apskaičiuojamas taip:

$$\eta_s = \frac{M \cdot (k_2 - k_1)}{\dot{E}_G^+}. \quad (2.25)$$

Saulės kolektorių veikimas derinamas su akumuliacine talpa, todėl reikia ap-
tarti, į kokius ciklus skaidomi akumuliacinės talpyklos darbo režimai. Suskaidžius
procesą į atskirus etapus, galima gauti kiekvieno iš jų energinį ir ekserginį efek-
tyvumus. ŠAS vyksta trys pagrindiniai procesai, kai šiluma talpai perduodama,
laikoma joje ir paimama. Šilumos talpos vertinimas atliekamas naudojantis auto-
rių (Dincer and Rosen 2007) sudaryta vertinimo metodika. 2.11 paveiksle patei-
kiama nagrinėjama šilumos kaupykla su ekserginiais srautais.



2.11 pav. Šilumos akumuliacinėje sistemoje vykstantys pagrindiniai procesai
Fig. 2.11. The main processes that take place in the thermal storage system

Nagrinėjant šilumos talpą priimta, kad ji neturi šilumos nuostolių su aplinka, t. y. ji idealiai izoliuota nuo išorės poveikio. Taip pat priimama, kad šilumos perdavimas per talpos šilumokaitį yra idealus. Žemiau pateikiamos įkrovimo, laikymo ir iškrovimo procesų energijos ir eksergijos lygtys.

Įkrovimo procesas:

$$M_1 \cdot (h_1 - h_2) + M_2 \cdot (h_6 - h_7) = \Delta U_1, \quad (2.26)$$

$$M_1 \cdot (k_1 - k_2) + M_2 \cdot (k_6 - k_7) = L_1 + \Delta E_1, \quad (2.27)$$

čia ΔU_1 – vidinės energijos pokytis talpoje, po įkrovimo proceso; ΔE_1 – koenergijos pokytis talpoje po įkrovimo proceso. Kiti dydžiai minėti ankstesnėse formulėse.

Vidinės energijos ir koenergijos pokytis skaičiuojamas:

$$\Delta U_1 = M_t \cdot (h_3 - h_{3-1}), \quad (2.28)$$

$$\Delta E_1 = M_t \cdot (k_3 - k_{3-1}), \quad (2.29)$$

čia h_{3-1} ir h_3 – entalpija proceso pradžioje ir pabaigoje; k_{3-1} ir k_3 – koentalpija proceso pradžioje ir pabaigoje; M_t – šilumos talpos tūris, kg.

Laikymo proceso metu vidinės energijos pokytis $\Delta U_2 = 0$, nes talpa neturi šilumos nuostolių su aplinka, o ekserginis balansas užrašomas taip:

$$\Delta E_2 - L_2 = 0. \quad (2.30)$$

Iškrovimo procesas:

$$-(M_3 \cdot (h_8 - h_9) + M_4 \cdot (h_{10} - h_{11})) = \Delta U_3, \quad (2.31)$$

$$-(M_3 \cdot (k_8 - k_9) + M_4 \cdot (k_{10} - k_{11})) = \Delta E_3 + L_3. \quad (2.32)$$

Vidinės energijos ir koenergijos pokytis skaičiuojamas kaip ir įkrovimo proceso.

Viso proceso energijos ir eksergijos balanso lygtys gali būti užrašytos tokia bendra forma:

$$M_1 \cdot (h_1 - h_2) + M_2 \cdot (h_6 - h_7) - (M_3 \cdot (h_8 - h_9) + M_4 \cdot (h_{10} - h_{11})) = \Delta U, \quad (2.33)$$

$$M_1 \cdot (k_1 - k_2) + M_2 \cdot (k_6 - k_7) - (M_3 \cdot (k_8 - k_9) + M_4 \cdot (k_{10} - k_{11})) = \Delta E + L, \quad (2.34)$$

čia visi žymėjimai naudoti ankstesnėse formulėse.

Viso ciklo (įkrovimo, laikymo ir iškrovimo) šilumos akumuliacinių talpų bendras energijos efektyvumas gali būti išreiškiamas pateikta formule:

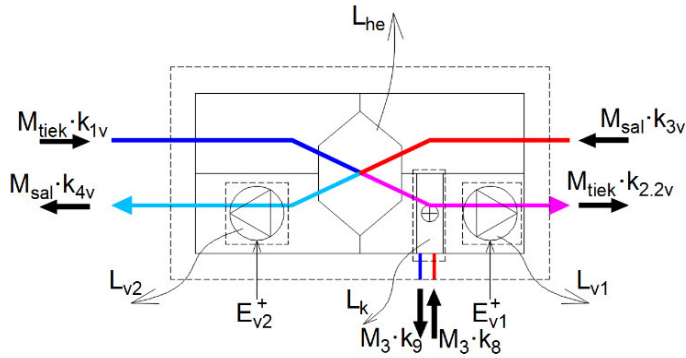
$$\varepsilon = \frac{(M_3 \cdot (h_8 - h_9) + M_4 \cdot (h_{10} - h_{11}))}{(M_1 \cdot (h_1 - h_2) + M_2 \cdot (h_6 - h_7))} = 1 - \frac{(\Delta U)}{(M_1 \cdot (h_1 - h_2) + M_2 \cdot (h_6 - h_7))}. \quad (2.35)$$

Analogiškai užrašomas ekserginis efektyvumas:

$$\eta = \frac{(M_3 \cdot (k_8 - k_9) + M_4 \cdot (k_{10} - k_{11}))}{(M_1 \cdot (k_1 - k_2) + M_2 \cdot (k_6 - k_7))} = 1 - \frac{(E_r + L + \Delta E)}{(M_1 \cdot (k_1 - k_2) + M_2 \cdot (k_6 - k_7))}. \quad (2.36)$$

Šis akumuliacinių talpų metodas yra efektyvus kai nagrinėjamas stacionarus nusistovėjęs procesas.

Šiuolaikinis mažai energijos vartojantis pastatas yra neišsivaizduojamas be šviežio oro tiekimo į patalpas, o tai padidina šiluminį patalpų komfortą. Vėdinimo įrenginį sudarantys pagrindiniai elementai: elektriniai ventiliatoriai, šilumogražas įrenginys ir oro šildytuvas. Žemiau paveiksle pateikiama nagrinėjama principinė schema.



2.12 pav. Vėdinimo įrenginio schema su ekserginiais srautais
Fig. 2.12. The diagram of the ventilation device with exergy flows

2.12 paveiksle pateikta vėdinimo schema su ekserginiais srautais. Kaip ir ankstesniuose skyriuose pirma sudaromas energinis sistemos balansas, kuris yra:

$$\begin{aligned} h_{1v} \cdot M_{\text{tiek}} + h_{3v} \cdot M_{\text{šal}} + E_{v1}^+ + E_{v2}^+ + h_8 \cdot M_3 &= \\ = h_{2.2v} \cdot M_{\text{tiek}} + h_{4v} \cdot M_{\text{šal}} + h_9 \cdot M_3 + Q_{v1}^- + Q_{v2}^-, \end{aligned} \quad (2.37)$$

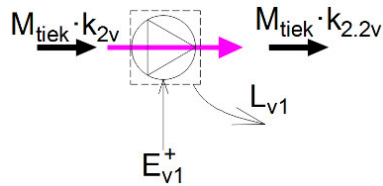
čia M_{tiek} – tiekiamo oro debitas, kg/h; $M_{\text{šal}}$ – šalinamo oro debitas, kg/h; h_{1v} , $h_{2.2v}$, h_{3v} ir h_{4v} – ėmimo, tiekimo, šalinimo ir išmetamo oro entalpijos, kJ/kg; E_{v1}^+ ir E_{v2}^+ – tiekimo ir šalinimo ventiliatoriaus suvartojama energija, kJ/h; h_8 ir h_9 – entalpijos į ir iš vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos, kJ/kg; M_3 – šilumnešio debitas į ir iš vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos, kg/h; Q_{v1}^- ir Q_{v2}^- – tiekimo ir šalinimo ventiliatorių energijos nuostoliai, kJ/h.

Ekserginis vėdinimo įrenginio balansas:

$$\begin{aligned} k_{1v} \cdot M_{\text{tiek}} + k_{3v} \cdot M_{\text{šal}} + E_{v1}^+ + E_{v2}^+ + k_8 \cdot M_3 &= \\ = k_{2.2v} \cdot M_{\text{tiek}} + k_{4v} \cdot M_{\text{šal}} + k_9 \cdot M_3 + L_{v1} + L_{v2} + L_{he}, \end{aligned} \quad (2.38)$$

čia k_{1v} , $k_{2.2v}$, k_{3v} ir k_{4v} – ėmimo, tiekimo, šalinimo ir išmetamo oro koentalpijos, kJ/kg; k_8 ir k_9 – koentalpijos į ir iš vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos, kJ/kg; L_{v1} , L_{v2} ir L_{he} – tiekimo ir šalinimo ventiliatorių, bei šilumogrąžos įrenginio eksergijos nuostoliai, kJ/h.

Tiekimo ventiliatorius vertinamas priimant, kad jis sukuria oro srautą, o oro srautui šilumos suteiktas šilumos kiekis yra nežymus ir srauto temperatūros padidėjimas nevertinamas (2.13 pav.). Darbe priimama, kad ventiliatoriaus efektyvumas yra $\varepsilon_v = 0,7$.



2.13 pav. Ventiliatoriaus schema su ekserginiais srautais

Fig. 2.13. The diagram of a fan with exergy flows

Ventiliatoriaus galia, reikalinga oro srautui pernešti, randama pagal formulę:

$$E_{v1}^+ = 3,6 \cdot \left(0,225 \cdot \frac{M_{tiek}}{\rho} \right), \quad (2.39)$$

čia ρ – oro tankis, kg/m^3 .

Ventiliatoriaus sukuriama šilumos nuostoliai:

$$Q_{v1}^- = E_{v1}^+ \cdot (1 - \varepsilon_v). \quad (2.40)$$

Ventiliatoriaus ekserginio balanso lygtis:

$$E_{v1}^+ + M_{tiek} \cdot (k_{2.2v} - k_{2v}) = E_{q1}^- + L_{v1}, \quad (2.41)$$

čia k_{2v} – tiekimo po šilumogražos įrenginio oro koentalpija, kJ/kg ; E_{q1}^- – šilumos eksergija tenkanti oro srautui, kJ .

Šiluminė eksergija patenkanti į srautą, skaičiuojama:

$$E_{q1}^- = Q_{v1}^- \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{2v}} \right), \quad (2.42)$$

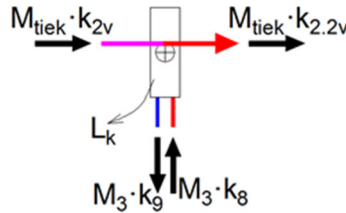
čia T_{2v} – oro srauto temperatūra, K ;

Eksergijos nuostoliai skaičiuojami:

$$L_{v1} = E_{v1}^+ + M_{tiek} \cdot (k_{2.2v} - k_{2v}) - E_{q1}^-. \quad (2.43)$$

Analogiškai skaičiuojama ir šalinimo ventiliatoriaus suteikta eksergija bei eksergijos nuostoliai.

Vėdinimo įrenginio šildymo sekcija vertinama pasitelkus 2.14 paveikslą.



2.14 pav. Vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos schema su ekserginiais srautais

Fig. 2.14. The diagram of the heating section of the ventilation device with exergy flows

2.14 paveiksle pateikta vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos schema su ekserginiais srautais. Šio įrenginio energinis ir ekserginis balansai:

$$h_{2v} \cdot M_{tiek} + h_8 \cdot M_3 = h_{2.2v} \cdot M_{tiek} + h_9 \cdot M_3, \quad (2.44)$$

ir

$$k_{2v} \cdot M_{tiek} + k_8 \cdot M_3 = k_{2.2v} \cdot M_{tiek} + k_9 \cdot M_3 + L_k, \quad (2.45)$$

čia $k_{2.2v}$ ir k_{2v} – tiekimo po šildymo įrenginio oro entalpija ir koentalpija, kJ/kg. L_k – šildymo sekcijos eksergijos nuostoliai, kJ/h. Eksergijos nuostoliai skaičiuojami:

$$L_k = M_3 \cdot (k_8 - k_9) - M_{tiek} \cdot (k_{2.2v} \cdot k_{2v}). \quad (2.46)$$

Šilumogražos įrenginio skaičiavimo metodika detalai nepateikiama. Ji aprašyta Martinaičio ir kitų autorių straipsnyje „Exergy analysis of heat recovery exchangers for air handling units using state parameter – coenthalpy“ (Martinaitis *et al.* 2016).

Vėdinimo įrenginio ekserginis efektyvumas vertinamas pagal formulę:

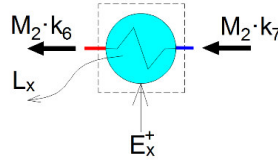
$$\eta_v = 1 - \frac{L_{v1} + L_{v2} + L_{he} + L_k}{E_{v1}^+ + E_{v2}^+ + M_3 \cdot (k_8 - k_9) + M_{tiek} \cdot (k_{3v} - k_{4v})}. \quad (2.47)$$

Vėdinimo įrenginiui reikalinga šiluma orui pašildyti tiekama iš saulės kolektorių, o kai jie negali aprūpinti šiluma, naudojamas išorinis (pagalbinis) šildytuvas.

2.4.2. Pagalbiniai posistemės įrenginiai

Šiame poskyryje nagrinėjami pagalbiniai sistemos įrenginiai – tai: pagalbinis šilumos šaltinis, šildymo sistema ir cirkuliaciniai siurbliai. Analizė pradeda nuo pagalbinio šildytuvo, o baigiama cirkuliaciniu siurbliu.

Žinoma, kad saulės energija negali užtikrinti 100 % reikiamos energijos, todėl naudojamas papildomas šildytuvas. Šildytuvu gali būti bet koks energijos šaltinis, pvz.: elektrinis kaitinimo elementas, šilumos siurblys ir pan. Svarbiausia išorinio šaltinio charakteristika, apibūdinanti jį, yra efektyvumas ir šilumnešio temperatūros. Darbe priimama, kad pagalbinis šilumos šaltinis bus elektrinis šildytuvas. Šildytuvo schema su ekserginiais srautais pateikiama 2.15 paveiksle.



2.15 pav. Išorinio šildytuvo principinė schema su ekserginiais srautais

Fig. 2.15. Circuit diagram of the external heater with exergy flows

Naudojantis 2.15 paveikslu sudaromas šaltinio energijos ir eksergijos srautų balansai:

$$Q_x^+ = M_2 \cdot (h_6 - h_7) + Q_x^+ \cdot (1 - \varepsilon_{sil}), \quad (2.48)$$

ir

$$E_x^+ = M_2 \cdot (k_6 - k_7) + E_x^- + L_x, \quad (2.49)$$

čia h_6 ir h_7 – ištekančio ir įtekančio į išorinį šildytuvą šilumnešio entalpijos, kJ/kg; k_6 ir k_7 – ištekančio ir įtekančio į išorinį šildytuvą šilumnešio koentalpijos, kJ/kg; ε_{sil} – pagalbinio šaltinio efektyvumas. Kadangi šildytuvas elektrinis, jo efektyvumas yra 1; L_x – šildytuvo eksergijos nuostoliai, kJ/h; E_x^- – šildytuvo eksergijos nuostoliai į aplinką lygūs 0, nes šildytuvo efektyvumas 1.

Eksergijos nuostoliai vertinami pagal formulę:

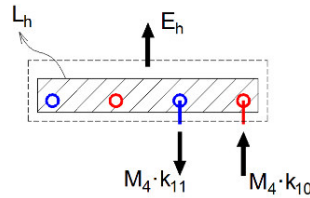
$$L_x = E_x^+ - M_2 \cdot (k_6 - k_7), \quad (2.50)$$

O efektyvumas:

$$\eta_x = 1 - \frac{L_x}{E_x^+}, \quad (2.51)$$

Didžiausias šilumos vartotojas pastate yra šilumos skleistuvas, o jo tipas gali daryti įtaką ekserginiam sistemos efektyvumui.

Literatūros apžvalgoje nustatyta, kad geriausiai šiluminį komfortą užtikrina bei sumažina suvartojamos eksergijos kiekį patalpose žematemperatūrės šildymo sistemos. Todėl sudaromas eksergijos balansas šiai sistemai. Elemento eksergijos balansas pateikiamas 2.16 paveiksle.



2.16 pav. Šilumos skleistuvo principinė schema su ekserginiais srautais
Fig. 2.16. Circuit diagram of the heat distributor with exergy flows

Žematemperatūrio šildymo energinis ir ekserginis balansai yra:

$$Q_h^- = M_4 \cdot (h_{10} - h_{11}), \quad (2.52)$$

ir

$$k_{10} \cdot M_4 = E_h^- + k_{11} \cdot M_4 + L_h, \quad (2.53)$$

čia h_{11} ir h_{10} – ištekancio ir įtekančio į žematemperatūrę šildymo sistemą šilumnešio entalpijos, kJ/kg; k_{11} ir k_{10} – ištekancio ir įtekančio į žematemperatūrę šildymo sistemą šilumnešio koentalpijos, kJ/kg; Q_h^- – šilumos kiekis suteiktas patalpai, kJ/h; L_h – žematemperatūrės šildymo sistemos eksergijos nuostoliai, kJ/h; E_h^- – žematemperatūrės šildymo sistemos eksergijos nuostoliai į aplinką.

Žematemperatūrės šildymo sistemos suteikta eksergija patalpai skaičiuojama:

$$E_h^- = M_4 \cdot c \cdot (t_{10} - t_{11}) \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right), \quad (2.54)$$

čia M_4 – šilumnešio debitas pratekantis per žematemperatūrę šildymo sistemą, kg/h; t_{11} ir t_{10} – ištekancio ir įtekančio į žematemperatūrinę šildymo sistemą temperatūros, °C; T_a – aplinkos temperatūra, K; T_p – žematemperatūrės šildymo sistemos paviršiaus temperatūra, K, c – šilumnešio specifinė šiluma, kJ/(kg·K).

Sistemos eksergijos nuostoliai skaičiuojami naudojantis formule:

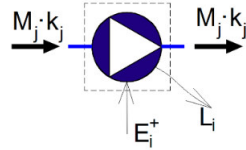
$$L_h = M_4 (k_{10} - k_{11}) - E_h^-. \quad (2.55)$$

Šios sistemos ekserginis efektyvumas vertinamas:

$$\eta_f = 1 - \frac{L_f}{M_4 \cdot (k_{10} - k_{11})}. \quad (2.56)$$

Cirkuliaciniai siurbliai vertinami priimant, kad jie sukuria šilumnešio srautą, o srautui šilumos suteiktas šilumos kiekis yra nežymus ir srauto temperatūros padidėjimas nevertinamas (2.17 pav.).

Siurbliai yra vieni pagrindinių įrenginių, kurie priverčia sistemą veikti, todėl šioje dalyje jiems sudaromas ekserginis balansas. Cirkuliacinio siurblio schema su ekserginiais srautais pateikta 2.17 paveiksle.



2.17 pav. Cirkuliacinio siurblio schema su ekserginiais srautais
Fig. 2.17. Circuit diagram of the circulatory pump with exergy flows

Šiame darbe vertinama, kad cirkuliaciniai siurbliai yra A energinės klasės. O jų veikimui reikalingas energijos kiekis skaičiuojamas pasitelkus Europos komiteto komisijos išleistą komunikatą.

Siurblio hidraulinis galimumas (Komisijos reglamentas (EB) Nr. 641/2009 2009):

$$P_{hid} = H_s \cdot M_j / \rho. \quad (2.57)$$

Siurblio nominali galia (Komisijos reglamentas (EB) Nr. 641/2009 2009):

$$P_{nom} = 1,7 \cdot P_{hid} \cdot +17 \cdot \left(1 - e^{-0,3 \cdot P_{hid}}\right). \quad (2.58)$$

Cirkuliacinio siurblio energinis efektyvumas:

$$\varepsilon_s = \frac{P_{hid}}{P_{nom}}, \quad (2.59)$$

čia ρ – šilumnešio tankis, kg/m^3 ; H_j – cirkuliacinio siurblio sukuriamas slėgio aukštis, m. Darbe vertinama, kad visi siurbliai sukuria 8 m slėgį.

Cirkuliacinio siurblio šilumos nuostoliai:

$$Q_i^- = P_{nom}^+ \cdot (1 - \varepsilon_s). \quad (2.60)$$

Siurblio ekserginio balanso lygtis:

$$E_i^+ = E_{qi}^- + M_j \cdot (k_{jj} - k_j) + L_i, \quad (2.61)$$

čia M_j – šilumnešis, pratekantis per cirkuliacinį siurblį, kg/h ; k_{jj} ir k_j – ištekančio ir įtekančio į cirkuliacinį siurblį šilumnešio koentalpijos, kJ/kg ; E_i^+ – cirkuliaciniam siurbliui suteikta eksergija, kuri yra lygi, kJ/h ; L_h – cirkuliacinio siurblio

eksergijos nuostoliai, kJ/h; E_{qi}^- – šilumos eksergija tenkanti pratekančiam srautui, kJ.

Šiluminė eksergija patenkanti į srautą, skaičiuojama:

$$E_{qi}^- = Q_{vi}^- \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_j} \right), \quad (2.62)$$

čia T_j – oro srauto temperatūra, K;

Eksergijos nuostoliai skaičiuojami:

$$L = E_i^+ - M_j \cdot (k_{ij} - k_j) - E_{qi}^-. \quad (2.63)$$

O cirkuliacinio siurblio ekserginis efektyvumas skaičiuojamas:

$$\eta_i = 1 - \frac{L_i}{E_i^+}. \quad (2.64)$$

Poskyriuose nuo 2.4.1 iki 2.4.2 buvo nagrinėjami sistemos elementai, o kitame poskyryje pateikiama visos sistemos efektyvumo vertinimo metodika.

2.4.3. Sistemos ekserginis efektyvumas

Iš ankstesnių skyrių galima pastebėti, kad saulės energiją naudojanti mikroklimato sistema sudaryta iš elementų, kuriuos sujungus galimas patikimas jos veikimas. Todėl šiame skyriuje pateikiama visos nagrinėjamos sistemos ekserginio efektyvumo skaičiavimo metodika. Sistemos principinė schema su ekserginiais srautais pateikta 2.18 paveiksle.

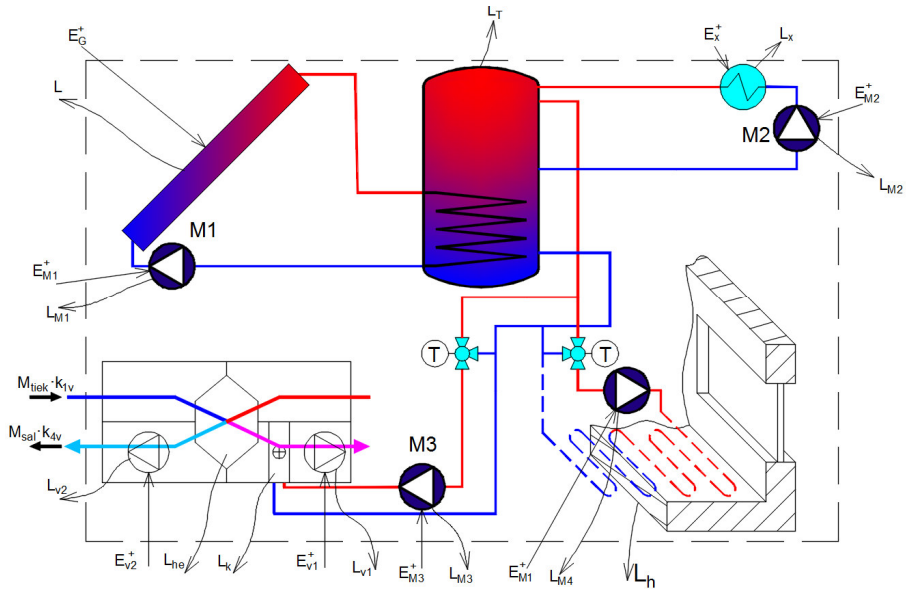
AMKPs ekserginio balanso lygtis atrodo taip:

$$\begin{aligned} E_G^+ + E_x^+ + E_G^+ + E_{M1}^+ + E_{M2}^+ + E_{M3}^+ + E_{M4}^+ + E_{v1}^+ + E_{v2}^+ + k_{1v} \cdot M_{tiek} = \\ = k_{4v} \cdot M_{sal} + L_G + L_x + L_{M1} + L_{M2} + L_{M3} + L_{M4} + L_T + L_{v1} + L_{v2} + L_h + L_k + L_{he}, \end{aligned} \quad (2.65)$$

čia visi dydžiai yra anksčiau minėti darbe.

Tuomet saulės energiją naudojančios sistemos ekserginis efektyvumas vertinamas:

$$\eta_{sis} = 1 - \frac{L_G + L_x + L_{M1} + L_{M2} + L_{M3} + L_{M4} + L_T + L_{v1} + L_{v2} + L_h + L_k + L_{he}}{E_G^+ + E_x^+ + E_G^+ + E_{M1}^+ + E_{M2}^+ + E_{M3}^+ + E_{M4}^+ + E_{v1}^+ + E_{v2}^+ + k_{1v} \cdot M_{tiek}}. \quad (2.66)$$



2.18 pav. Aktyvi saulės energiją naudojanti mikroklimato sistema su ekserginiais srautais

Fig. 2.18. Active solar microclimate system with exergy flows

2.4 skyriuje pateikta metodika leidžia funkcinę sistemos veikimą vertinti pagal ekserginį jos efektyvumą. Šis efektyvumas nurodo sistemos tobulumo laipsnį, kuris gali būti didinamas. Disertacijos darbe atliekamas sistemos ekserginis vertinimas, kurio dydis priklauso nuo sistemos funkcinio efektyvumo. Todėl kitame skyriuje aprašoma funkcinio efektyvumo vertinimo metodika bei atliekamos parametrinės analizės algoritmas.

2.5. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos komforto ir parametrinė analizė

Iš 2.4 paveikslų algoritmo matyti, kad komforto skaičiavimas atliekamas abiem etapais. Tiek pirmuoju tiek antruoju etapu naudojamas Fangerio šiluminio komforto vertinimo modelis, nes jis šiuo metu labiausiai paplitęs. Šis modelis atlieka vertinimą naudojantis NVĮ, kaip ir dauguma standartų (EN ISO 7730 2005), (CEN 2007), (ASHRAE 55 2004). O norint įvertinti, kaip pasyvus ir aktyvus energijos kaupimas veikia funkcinę efektyvumą atliekama parametrinė analizė. Trūksta holistinio sistemų tyrimų, kurie susietų aktyvų ir pasyvų energijos kaupimą naudojant pastato konstrukcinę masyvumą bei šilumos talpas, aktyvų ir pasyvų saulės

panaudojimą per saulės kolektorius ir patalpų įstiklinimą. Parametrinė analizė leidžia atlikti holistinį sistemos vertinimą.

Tarptautinis standartas ISO 7730 pateikia metodus numatyti žmonių šiluminį pojūtį ir diskomforto laipsnį, veikiamų vidutinės šiluminės aplinkos. Šiluminio komforto pojūčiui apibūdinti naudojama NVĮ (numatomas vidutinis įvertis) ir TNS (tikėtinas nepatenkintųjų skaičius) interpretacija (EN ISO 7730 2005).

Numatomo vidutinio įverčio NVĮ vertei skaičiuoti naudojama metodika, kuri pateikta A priede.

Atliekant NVĮ skaičiavimus priimama žmogaus medžiagų apykaita yra lygi 1,2 met arba 70 W/m², o apsirengimo lygis yra clo arba 0,155 m²·°C/W.

Tikėtinas nepatenkintųjų skaičius (TNS) yra rodiklis, kuris priklauso nuo NVĮ, jis nustato kiekybinius (procentinius) dydžius šiluma nepatenkintų asmenų, kurie jaučia ar šilta, ar šalta (EN ISO 7730 2005).

TNS vertė skaičiuojama:

$$TNS = 100 - 95 \cdot \exp\left(-0,03353 \cdot NVI^4 - 0,2179 \cdot NVI^2\right). \quad (2.67)$$

Komforto sąlygos dažnai tiriamos ilgu laikotarpiu skirtingų tipų pastatuose, ŠVOK projektavimą atliekant kompiuterinio modeliavimo programomis. Būtina įvertinti ilgalaikes komforto sąlygas pritaikant tam tikrus indeksus, bei palyginti alternatyvius projektus (Olesen and Parsons 2002).

Šis komforto vertinimo algoritmas (toliau kodas) suvedamas į kompiuterinę programą „MATLAB“. Kodas naudojamas pirmuoju ir antruoju algoritmo etapu. Pirmame algoritme jis pagal patalpos būsenos parametrus nurodo, kokia turi būti patalpos oro temperatūra, kad būtų pasiektas užsibrėžtas šiluminis komfortas, t. y. patalpos oro kokybės valdymas pagal šiluminio komforto modelį. Taikant šį valdymo algoritmą gaunama patalpos oro temperatūra, kurią turi užtikrinti PMKPs ir AMKPs. O antruoju etapu naudojant šį kodą vertinama, ar buvo užtikrintas užsibrėžtas komforto lygis.

Ilgam šiluminio komforto periodui vertinti pasitelkiamas santykis tarp faktinio NVĮ (ar TNS) ir pasirinkto (žiūrėti į 1.1. lentelę). Šis santykis skaičiuojamas:

$$Wf = \frac{TNS_{actual\ NVI}}{TNS_{NVI\ limit}}, \quad (2.68)$$

čia $TNS_{actual\ NVI}$ – faktinis NVĮ; $TNS_{NVI\ limit}$ – NVĮ nustatytoji ribomis;

Reikšmė, pagal kurią galima įvertinti ilgą laikotarpį gali būti išreiškiama „svoriu laiku“, kuris vertinamas kaip sandauga tarp svorio vertės (wf) ir laiko (t), o rezultatas išreiškiamas valandomis:

Šiltam laikotarpiui: $\sum wf \cdot laikas$, kur $NVI > NVI_{limit}$.

Šaltam laikotarpiui: $\sum wf \cdot laikas$, kur $NVI < NVI_{limit}$.

Darbe siekiama II šiluminio komforto kategoriją, kuri atitinka normalių lūkesčių lygį ir yra naudojamas naujuose ir renovuojamuose pastatuose ($TNS \leq 10\%$).

Iš anksčiau žinome, kad naudojant išorinį šaltinį galima užtikrinti reikiamą komforto lygį, bet šio darbo tikslas rasti santykį tarp saulės kolektorių sistemos ir išorinio šaltinio dydžio. Saulės energija yra naudojama tam, kad būtų sumažintas pagrindinės patalpų šildymo sistemos energijos suvartojimas, taip padidinant atsinaujančiosios energijos integraciją. Šios kombinuotos jungtinės sistemos tikslas – išlaikyti tinkamą patalpų komforto lygį.

Disertacijoje taikoma parametrinė analizė. Šios analizės tikslas – rasti tinkamiausią sistemos derinį, kuris tenkintų vartotoją. Derinių vartotojui kombinacija svarbi dėl to, kad galutinis vartotojas turi individualių poreikių, o šiems poreikiams užtikrinti standartinės sistemos nepakanka. Vieni vartotojai nori vėsesnės aplinkos, tokiu atveju galima naudoti didesnę saulės kolektorių plotą, o kiti mėgsta šiltesnę aplinką ir tam reikia daugiau papildomos energijos iš išorinio šaltinio.

Saulės energiją naudojančios MKS ekserginio ir funkcinio efektyvumo nustatymo algoritmas skaidomas į dvi dalis (2.3 pav.). Todėl ir parametrinė analizė atliekama pirmoje ir antroje dalyje. Pirmosios dalies parametrinės analizės tikslas – nustatyti tinkamiausią sienos talpumo dydžio su įstiklinimo plotu santykį, kai pasiekiamos mažiausios šildymo ir vėsinimo energijos sąnaudos (2.18 pav.).

Pirmuoju etapu keičiami du parametrai:

- patalpos įstiklinimo plotas;
- sienos masyvumas (šilumos talpumas).

Įstiklinimo plotas turi įtakos pasyviai saulės energijos vartojimui, todėl parametrinėje analizėje vienas iš keičiamų parametrų yra langų įstiklinimo plotas, kuris išreiškiamas santykiniu įstiklinimo plotu (langų ploto santykis su grindų plotu). Analizėje naudojami santykiniai langų plotai yra: 0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 ir 1. Langai orientuoti į pietus.

Sienos šiluminė talpa yra priskiriama PMKPs. Sienų masyvumas daro įtaką pastato energijos vartojimui šaltuoju bei šiltuoju sezonu, todėl parametrinei analizei sudaromi 5 konstrukcijų deriniai iš 2.2 lentelėje pateiktų konstrukcijų. Konstrukcijų deriniai, kurie bus naudojami parametrinei analizei:

- 1, 2, 3 ir 4 (žiūrėti į 2.2 lentelę);
- 5, 6, 7 ir 8;
- 11, 6, 7 ir 8;
- 9, 6, 7 ir 8;
- 10, 6, 7 ir 8.

Atliekama patalpos parametrinė analizė įvertinant atitvaras nuo labai lengvų iki sunkių.

Nustačius tinkamiausią sienos talpumo dydžio su įstiklinimo plotu santykį, kai pasiekiamos mažiausios energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui, atliekamas antrojo etapo algoritmo vertinimas su pasirinktais parametrais.

Saulės kolektoriuose pagaminta energija yra naudojama tam, kad būtų sumažintas pagrindinės patalpų šildymo sistemos energijos suvartojimas bei iškastinio kuro gaunama energija, taip padidinant atsinaujinančiosios energijos integraciją pastate. Žinoma, kad saulės kolektorių sistema negali tinkamai veikti be šilumos talpyklų, o nuo jų dydžio priklauso pagamintas šilumos kiekis saulės kolektoriuose. Todėl antrojo etapo parametrinėje analizėje keičiami šilumos gamybos šaltinių dydžiai, t. y. saulės kolektorių plotas ir šilumos šaltinio galia. Taip pat analizuojama sistemos efektyvumo priklausomybė nuo šilumos talpyklos tūrio.

Saulės kolektorių plotas parametrinei analizei pateikiamas santykiu su patalpos grindų plotu. Ploto santykiai: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 ir 1,25 (patalpos grindų plotas yra 20 m²).

Saulės kolektorių tipas, jo savybės ir posvyrio kampas pasirenkamas atsižvelgiant į disertacijos autoriaus publikuotus tyrimus (Bielskus *et al.* 2013 a; 2013 b; Januševičius *et al.* 2014).

Šiuose straipsniuose lyginamos plokščiųjų ir vakuuminių saulės kolektorių sistemos. Lyginimas atliktas naudojant „TRNSYS“ modeliavimo programą, kurios rezultatų patikimumas validuojamas su realiais matavimais. Eksperimentiniai matavimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Civilinės inžinerijos mokslo centro Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijoje. Nustatyta, kad plokščiųjų saulės kolektorių ekserginis efektyvumas didesnis nei vakuuminių, todėl šio tipo saulės kolektoriai ir naudojami darbe.

Naudojamų saulės kolektorių parametrai:

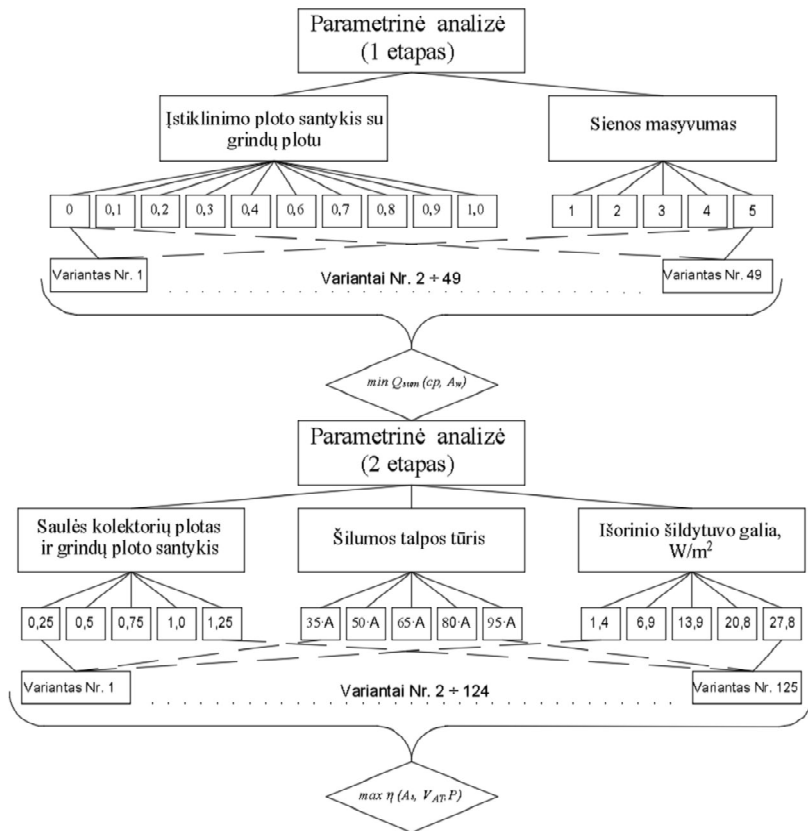
- tipas – plokštieji;
- optinis efektyvumas, η_0 – 80,4 %;
- šilumos nuostoliai, k_1 – 3,235 W/(m²·K);
- šilumos nuostoliai, k_2 – 0,0117 W/(m²·K²);
- orientacija – pietų;
- posvyrio kampas – 65 % (kampas parinktas atsižvelgus į šildymo sezono saulės deklinacijos kampą).

Šilumos talpos dydis įvairiuose šaltiniuose rekomenduojamas skirtingas, todėl svarbu nustatyti koks talpos dydis bei saulės kolektorių plotas tinkamiausias pasirinktam komforto lygiui. Talpos tūris yra susietas su saulės kolektorių plotu, o parametrinėje analizėje vertinami tūriai:

- 35·A, t. y. 35 litrai akumuliacinės talpos tenka 1 m² saulės kolektorių;
- 50·A;
- 65·A;
- 80·A;
- 95·A.

Šalto klimato šalyse saulės vandens šildymo sistemos turi trūkumų. Žiemą jie yra tokie: dienos trukmė trumpa ir saulės kolektorių šilumos nuostoliai didesni. Todėl saulės vandens šildymo sistema negali gaminti pakankamai energijos, kad būtų galima naudoti ją be jokio papildomo energijos šaltinio sistemoje. Tai reiškia, kad saulės vandens šildymo sistemai reikia išorinio šilumos šaltinio ir šilumos saugojimo talpos (Mori and Kawamura 2014).

Parametrinėje analizėje norima nustatyti, kokią įtaką daro šaltinio dydis, todėl jis vertinamas parametrinėje analizėje. Darbe vertinamos išorinio šildytuvo galios yra: 1,4 W/m², 6,9 W/m², 13,9 W/m², 20,8 W/m², 27,8 W/m². Antrojo etapo parametrinės analizės tikslas – rasti saulės kolektorių, talpos dydžio bei pagalbinio šildytuvo galios derinį, kai pasiekiamas aukščiausias ekserginis efektyvumas ir didžiausias saulės energijos panaudos dydis (saulės frakcija). Parametrinės analizės algoritmas pateiktas 2.19 paveiksle.



2.19 pav. Parametrinės analizės taikymo algoritmas
Fig. 2.19. The parametric analysis application algorithm

Parametrinė analizė ir ekserginio efektyvumo skaičiavimas atliekami naudojant „TRNSYS“ ir „MATLAB“ programų derinį. Šio derinio aprašymas pateiktas žemiau esančiame skyriuje.

2.6. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos vertinimo modelis

Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio ir funkcinio efektyvumo tyrimui buvo naudojamas kompiuterinių programų derinys. Algoritmas pradamas nuo patalpos energijos poreikio nustatymo. Energijos poreikis priklauso nuo klimatinių parametrų ir paties pastato šilumos nuostolių bei palaikomo šiluminio komforto lygio patalpose. Šiame algoritme naudojamas patalpos temperatūros valdymas pagal šiluminio komforto funkciją, t. y. nuolatos skaičiuojama, kokią ŠVOK sistema turi palaikyti patalpoje oro temperatūrą, kad būtų pasiektas užsibrėžtas tikslas. Šiluminiam komfortui vertinti sudarytas „MATLAB“ kodas, jis pateiktas C priede. Pastato energijos poreikis priklauso nuo atitvarų šilumos talpumo, todėl aktyviam šilumos sluoksniui vertinti sudarytas „MATLAB“ kodas, kuris vadovaujasi standartu ISO 13786:2007. Sienos aktyvaus sluoksnio skaičiavimo kodas pateiktas D priede. Energijos poreikis skaičiuojamas pasitelkus „TRNSYS“ modeliavimo programą. „TRNSYS“ programa sujungiama su „MATLAB“ komforto vertinimo kodu.

Imitacinis modelis buvo sukurtas „TRNSYS“ modeliavimo aplinkoje, o komforto lygio skaičiavimai buvo atlikti su „MATLAB“ kodu, įtraukiant jį į pagrindinį modeliavimo įrankį. „TRNSYS“ yra dinaminio modeliavimo priemonė, sukurta daugiau nei prieš 30 metų. „TRNSYS“ modelis yra sukurtas „STUDIO“ modeliavimo aplinkoje. Ši modulinės struktūros programinė įranga buvo sukurta sudėtingoms energinių sistemų problemoms spręsti. Ji skaido problemą į mažesnių komponentų serijas, žinomų kaip „Types“ – iš anksto apibrėžti komponentai ir algoritmai, kurie modeliuoja bendrą sistemų elgesį. Modelis yra išsaugomas „ACI“ tekstiniu formatu per „deck“ failą (.DCK), kuris saugo tipus ir sąsajas tarp failų. Modelis yra sudarytas per programą „TRNEXE“ algebrinėms ir diferencialinėms lygtimis spręsti, kuri keletą kartų skaičiuoja sistemos būseną kiekvienu laiko žingsniu – šiuo atveju 12 min. Šis žingsnis yra būtinas siekiant parodyti pastovų kontrolės laiką. Kadangi modelis yra saugomas tekstiniaame faile, jis gali būti apdorojamas naudojant programavimo kalbą, tokią kaip „MATLAB“.

„TRNSYS“ programoje buvo sudarytas pastato modelis. Modeliui pasirinktas 88 tipas. Šis tipas įvertina vieną šiluminę erdvę ir šiluminį sienos talpumą su vidiniais pritekiais. Jis buvo pasirinktas tyrimams dėl galimybės įtraukti drėgmės mainus modelyje, didelio skaičiavimo greičio, paprasto šilumos ir drėgmės balanso. Šis modelis, atsižvelgiant į vidaus pritekius, paprastai grupuoja vienos

zonos šiluminės talpas. Tai reiškia, kad visos struktūros U vertė bendra. Modelis skiriasi nuo kitų paprastų pastato modelių tuo, kad įvertina valdymo sistemą. Jis naudingas dėl savo greičio, kuriuo pastato šildymo ir / ar vėsinimo apkrova gali būti pridėta prie sistemos modeliavimo.

Komfortui vertinti naudojamas Fangerio komforto modelis, kuris aprašytas 2.5. skyriuje. Komforto vertinimui yra suformuotas „script“ „MATLAB“ programos aplinkoje. Šis procesas buvo integruotas į „TRNSYS“ parametrinį modeliavimą per tipą 155 „Type 155“.

Šiluminiai aplinkai įvertinti buvo pasirinkta patalpų II kategorija, kai $NV\dot{I} = \pm 0,5$; $TNS \leq 10\%$. Skaičiavimuose priimtos šios prielaidos (EN ISO 7730 2005):

- $M = 70 \text{ W/m}^2$ ar 1,2 met;
- $W = 0 \text{ W/m}^2$;
- $I_{cl} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ar 1 clo;
- $v = 0,116 \text{ m/s}$.

M , W , I_{cl} , ir v – priimamos šildymo laikotarpio konstantos. Kiti parametrai, tokie kaip oro temperatūra, spindulinė temperatūra ir santykinė drėgmė, yra kintamieji ir gaunami iš sudaryto modelio.

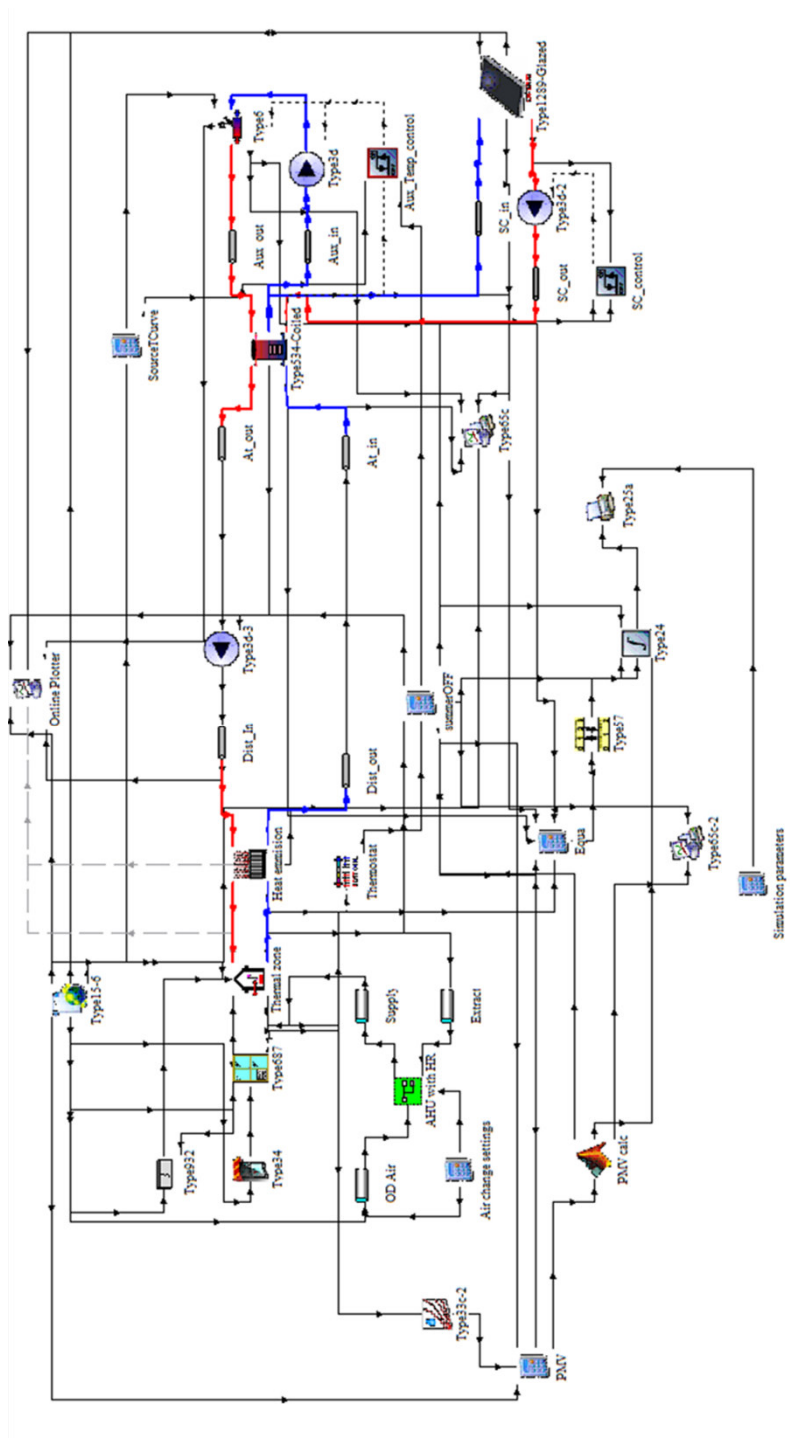
Modeliavime naudojami tipiniai klimatinių metų (TMY) duomenys Vilniaus miestui iš „METEONORM“ programos. Tipas 16-6 „Type 15-6“ buvo naudojamas modelyje.

Oro kaitos šilumos balanso komponentas yra skirstomas į dvi dalis: oro kaita sukelta infiltracijos ir mechaninės vėdinimo sistemos su šilumos atgavimu. Infiltracijos oro kaita yra modeliuojama kaip kintamo greičio, kai pastato sandarumo slėgio skirtumas esant 50 Pa prie $0,6 \text{ h}^{-1}$. Šis poveikis yra įtraukiamas per 932 tipą „932 type“, kuris remiasi „Sherman Grimsrud“ infiltracijos modeliu aprašytu ASHRAE pagrindiniame žinyne, 2005 m.

Nustačius pastato energijos sąnaudas atliekamas antrasis algoritmo žingsnis, kurio metu modeliuojamos aktyviosios pastato saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos. Antrajam žingsniui aktyviomis pastato mikroklimato sistemomis papildomas pirmojo vertinimo „TRNSYS“ modelis (2.20 pav.).

Modelio makro struktūra gali būti suskirstyta į penkis pagrindinius vandeningus kontūrus (2.19 pav.):

1. Nuo saulės kolektorių iki akumuliacinės talpos;
2. Nuo išorinio šildytuvo iki akumuliacinės talpos;
3. Šilumos skirstymo tinklas nuo akumuliacinės talpos iki vėdinimo įrenginio šildymo sekcijos;
4. Šilumos skirstymo tinklas nuo akumuliacinės talpos iki šilumos skleistuvų;
5. Nuo šilumos skleistuvų į patalpas.



2.20 pav. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos atvaizdavimas „TRNSYS“ grafinio modeliavimo lange
 Fig. 2.20. The depiction of a solar-powered microclimate system in the graphic modelling window of TRNSYS

Vėdinimo įrenginiui naudojamas tipas 112 „Type 112“ ir 67 „Type 67“. Šie tipai apima ventiliatorius ir oras – oras šilumokaitį bei leidžia įvesti absoliučios drėgmės dydį (Thomton *et al.* 2012).

Tipas 1231 „type 1231“ naudojamas žemos temperatūros hidrauliniams šilumos skirstymo įrenginiams, tokiems kaip radiatorius, konvektorius, grindjuostės ir briaunuoti vamzdžiai. Šio tipo įrenginiai šilumą skleidžia spinduliavimu ir konvekcija be ventiliatorių. Matematinis modelis įgyvendinamas remiantis pateiktu ASHRAE žinynu – „HVAC Systems and Equipment“.

Plokštieji saulės kolektoriai skaičiuojami taikant 1289 tipą „Type 1289“. Šis tipas vertina kolektorių dinaminį efektyvumą kaip įtekančios temperatūros funkciją. Ši funkcija gali būti išreikšta naudojantis Hottel-Whillier formule:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_{in} - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_{in} - T_a)^2}{G}, \quad (2.69)$$

čia η_0 – optinis efektyvumas; a_1 ir a_2 – šilumos nuostolių koeficientai, atitinkamai $W/(m^2 \cdot K)$ ir $W/(m^2 \cdot K^2)$; T_{in} – įtekančio į kolektorius vandens temperatūra, °C; T_a – aplinkos oro temperatūra, °C; G – tiesioginė saulės spinduliuotė tenkanti 1 m^2 saulės kolektoriaus.

Šilumos saugojimas modeliuojamas stratifikuotoje 10 mazgų (tipas 534 „type 534“) saugojimo talpoje. Talpoje skystis sąveikauja su šilumokaičiu, kurio viduje naudojamas skystis. Talpa padalyta į izoterminius mazgus. Kiekvienas pastovaus tūrio mazgas yra laikomas izoterminiu ir termiškai sąveikauja su mazgais viršuje ir apačioje per keletą mechanizmų.

Pagalbiniui šildytuvui naudojamas 6 tipas yra išorinis šildytuvas, kuris pakeičia srauto temperatūrą kai jo temperatūra sumažėja iki nustatytos ribos. Jis veikia kaip išorinis įrenginys su funkcija ON/OFF. Išorinis šaltinis šilumą talpai suteikia per šilumokaitį, esantį talpoje. Šildytuvo galia keičiama nuo $1,4 \text{ W/m}^2$ iki $27,8 \text{ W/m}^2$, nustatytoji temperatūra yra $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aktyvioje MKS sistemoje naudojami keturi cirkuliaciniai siurbliai, kurie yra modeliuojami su tipu 3 „type 3“. Į energijos nuostolius nėra atsižvelgiama.

Sudarius modelį atliekamas sistemos veikimo imitavimas, o gauti rezultatai naudojami sistemos termodinaminiam efektyvumui nustatyti. Termodinaminis (ekserginis efektyvumas) nustatomas pagal 2.4 skyriuje pateiktą metodiką. Šiam vertinimui iš „TRNSYS“ programos gaunami visos sistemos energinių srautų parametrai, tai:

- įtekančio ir ištekančio į / iš įrenginio srautų temperatūros bei debitas;
- klimatiniai duomenys (saulės spinduliuotė ir oro temperatūra);
- patalpos oro temperatūra, santykinė drėgmė;
- žematemperatūrės šildymo sistemos paviršiaus temperatūra.

Ekserginiam skaičiavimui sukurtas „*MATLAB*“ kodas, kuris apdoroja „*TRNSYS*“ išvesties duomenis ir pateikia ekserginį efektyvumą, saulės frakcijos dydį ir pan. Šis kodas pateiktas D priede.

Tyrimo buvo atlikta parametrinė analizė, kurios seka tokia: pirmiausia buvo sukurtas sistemos modelis naudojant „*TRNSYS*“ studio, tuomet buvo parametruotas naudojant tekstinius kintamuosius ir nustatyti tinkami išvesties failai. Modelis buvo išsaugotas kaip „*DCK*“ failas. Naudojant „*MATLAB*“ programą buvo kopijuojamas „*DCK*“ failas, kad duomenys nebūtų iškraipyti. Parametrai buvo atnaujinami per paiešką ir pakeisti atitinkami skirsniai „*DCK*“ faile. Be to, „*MATLAB*“ programa buvo ieškoma ir pakeičiama kiekvieno projektuoto kintamojo vertė. Atnaujinus „*DCK*“ failus buvo vykdoma funkcija „*TRNEXE*“ naudojant „*dos()*“ komandą „*MATLAB*“, kuri yra paprasta komandinės eilutės prieigos funkcija. „*TRNSYS*“ programa modeliavimo rezultatas su išvesties duomenimis buvo išsaugotas „*CSV*“ faile. O sukurtas „*MATLAB*“ kodas automatiškai failą „pasiėmė“ ir atliko skaičiavimus su jo duomenimis. Atlikus skaičiavimus pasitelkus „*MATLAB*“ kodą rezultatai buvo įrašomi į „*XLS*“ failą. Į „*XLS*“ failą duomenys saugomi, nes tokio tipo failai išlieka, net jeigu kompiuteris persikrovė ar buvo padaryta vartotojo klaida ir išjungtas modeliavimas. Atlikus pirmąjį skaičiavimo ciklą buvo keičiamas parametras (saulės kolektorių plotas ir / ar talpos tūris ir / ar pagalbinio šildytuvo galia ir pan.) ir kartojamas skaičiavimas pagal sudarytą galimų kintamųjų matricą. Baigus modeliavimą, „*XLS*“ failas buvo nuskaitytas „*MATLAB*“ programos ir apdorotas kreivių sudarymo įrankiu „*MATLAB*“ programoje. Viso algoritmo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 3 skyriuje.

2.7. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudarytas saulės energiją naudojančios mikroklimate sistemos algoritmas kompleksiniam vertinimui bei pasiūlytos priemonės, kurios gali būti taikomos pastato skaitmeninio modeliavimo procesui.
2. Suformuota saulės energiją naudojanti aktyvi mikroklimate sistema ir pasiūlyta ją nagrinėti taikant termodinaminės analizės principus, kurios rezultatai vertinami atsižvelgus į funkcinį efektyvumą pritaikant sisteminės ir parametrinės analizės metodus.
3. Parengtas algoritmas vertinantis sistemos efektyvumo optimumą, kai energijos sąnaudos šildymui ir vėsinimui mažiausios, derinant atitvarų aktyvų šiluminės talpos dydį bei langų plotą.

4. Sudarytas optimizavimo algoritmas, kurio tikslas – rasti didžiausią energinį ir ekserginį efektyvumą ir saulės frakcijos dydį derinant elementų dydžius (saulės kolektorių plotas, šilumos talpos tūris ir pagalbino šildytuvo galia).

3

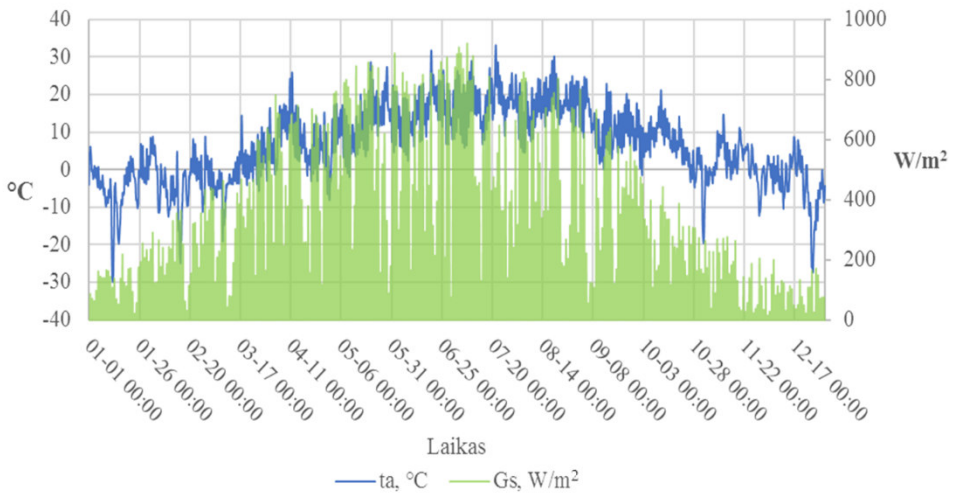
Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos termodinaminio ir funkcinio efektyvumo rezultatai

Skyriaus tematika paskelbti 2 autoriaus straipsniai (Martinaitis *et al.* 2016; Martinaitis *et al.* 2017).

3.1. Išorės ir patalpos parametrų įvertinimas

Pirmojo etapo tyrimų metodikos pritaikymui (2.2 pav.) patikrinti buvo atlikta parametrinė analizė. Analizės metu pasirinkta vertinti Vilniaus mieste esantį pastatą, todėl ir naudojami šio miesto klimatiniai duomenys. Skaičiavimams reikalingi duomenys paimami iš kompiuterine programa „*METEONORM*“ sugeneruotų meteorologinių duomenų masyvo. Pasirinktos vietovės meteorologiniai duomenys interpoliacijos būdu sugeneruojami pagal artimiausių meteorologinių stočių pateiktus realius duomenis (10 metų vidurkius).

Mažai energijos vartojančio pastato šilumos poreikiui įvertinti buvo sugeneruoti 1 metų 1 valandos žingsniu oro temperatūra bei saulės spinduliuotė, kuri krinta į horizontalų paviršių (3.1 pav.).



3.1 pav. Analizuojami klimatiniai duomenys

Fig. 3.1. The analysed climate data

Pastato šildymo ir vėsinimo poreikiui įvertinti naudojami šiltojo ir šaltojo periodo duomenys, o AMKPs sistemos ekserginis efektyvumas vertinamas tik šaltuoju periodu, t. y. šildymui. Pagal RSN 156 – 96 (Lietuvos statybinė klimatologija) šildymo periodas Vilniaus mieste prasideda rugsėjo 20 dieną, o baigiasi gegužės 3 dieną, iš viso trunka 225 dienas. Vėsinimo periodas nevertinamas, nes patalpose vėsinimas nėra privalomas.

Oro temperatūra bei tiesioginė saulės spinduliuotė, kuri patenka į patalpas per skaidrias atitvaras, tiesiogiai veikia patalpos šilumos ir vėsos poreikį, kuris užtikrintų pasirinktą šiluminio komforto vertę ($TNS \leq 10\%$). Be šių parametru, šilumos bei energijos poreikiui daro įtaką skaidrių atitvarų plotas, atitvarų šilumos perdavimo koeficientas bei jų šilumos talpumo dydis. Pirmojo etapo (2.2 pav.) metu nustatoma, kokį poveikį turi lango dydis bei sienų šiluminės talpos dydis energijos poreikiui šildymui bei vėsinimui.

3.1.1. Konstrukcijų šiluminės talpos vertinimas

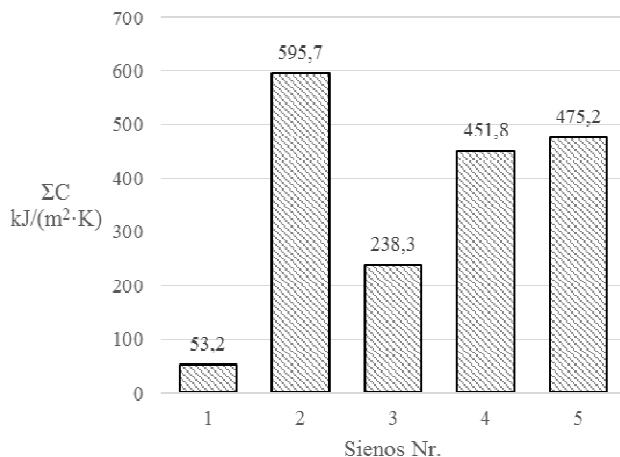
Darbe siekiama įvertinti konstrukcijų aktyvios šiluminės talpos įtaką patalpos sezoniniams šilumos bei vėsos poreikiams. 2.2 lentelėje pateiktos konstrukcijos, kurios vertinamos šiame darbe. Šiluminės talpos vertinimas atliktas pritaikius analitinį skaičiavimą, kuris paremtas tarptautiniu standartu ISO 13786:2007, o vertinimo periodas yra 12 valandų (Valančius 2006). Šis skaičiavimas atliktas kompiuterine programa „MATLAB“, o rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Pastato konstrukcijų šiluminė talpa, aktyvaus sluoksnio šilumos talpa ir bangos slopinimo veiksnys

Table 3.1. Thermal capacity of the building structures, thermal capacity of the active layer and the wave suppression factor

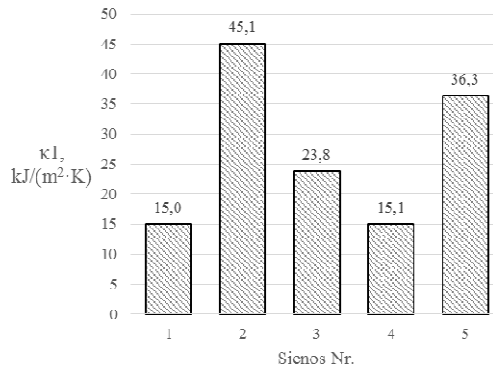
Nr.	ΣC , kJ/(m ² ·K)	κ_1 , kJ/(m ² ·K)	f
1	53,2	15,0	0,024
2	35,6	15,1	0,770
3	84,0	13,3	0,009
4	252,6	18,0	0,058
5	595,7	45,1	0,013
6	281,3	51,7	0,025
7	432,2	34,7	0,037
8	248,0	41,4	0,310
9	238,3	23,8	0,001
10	451,8	15,1	0,007
11	475,2	36,3	0,013

3.1 lentelės eilučių numeracija atitinka 2.2 lentelės numeraciją, kuri nurodo vertinamos atitvaros tipą. Šioje lentelėje pateikta visos atitvaros šiluminė talpa, aktyvaus vidinio sluoksnio talpa bei bangos slopinimo faktorius. Žemiau esančiuose paveiksluose, nuo 3.2 iki 3.4, pateikiami tik išorinių sienų grafinius rezultatus interpretavimas.



3.2 pav. Sienų šiluminė talpa
Fig. 3.2. Thermal capacity of walls

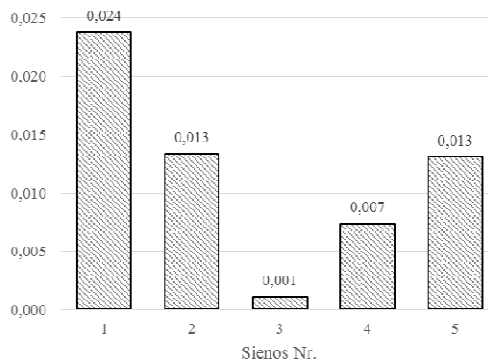
3.2 paveiksle pateikta visos atitvaros šiluminė talpa, kuri dažnai vertinama skaičiuojant pastato šilumos ir vėsos poreikius. Matome, kad didžiausią šilumos talpumą turi 5 (trisluksnė) siena, o mažiausią – 1 (medžio karkaso konstrukcija). Žemiau esančiame paveiksle pateikiama sienų aktyvaus sluoksnio šiluminės talpos.



3.3 pav. Skirtingų išorinės sienų aktyvaus sluoksnio šiluminės talpos
Fig. 3.3. Thermal capacities of the active layer of different external walls

3.3 paveiksle matyti, kad šilumos kiekis akumuliuojamas aktyviame sienos sluoksnyje sumažėjo nuo 3 (1 atitvara) iki 30 (10 atitvara) kartų. 10 atitvara yra masyvi dėl savo konstrukcijos, kuri yra iš polistireno putų, pripildytų betono, bet įvertinus aktyvų sluoksnį ši konstrukcija gali sukaupti tiek pat šilumos, kiek ir medžio karkaso siena. Iš visų šių atitvarų daugiausia šilumos kaupia 5 ir 11 atitvaros, kurios atitinkamai yra iš betono ir silikatinių plytų.

Kitas dydis, kuris padeda įvertinti sienų masyvumą, yra bangos slopinimo rodiklis. 3.4 paveiksle pateiktas visų išorinių sienų rodiklis.



3.4 pav. Išorinės sienos temperatūrinės bangos slopinimo rodiklis
Fig. 3.4. Temperature wave suppression factor for the external model

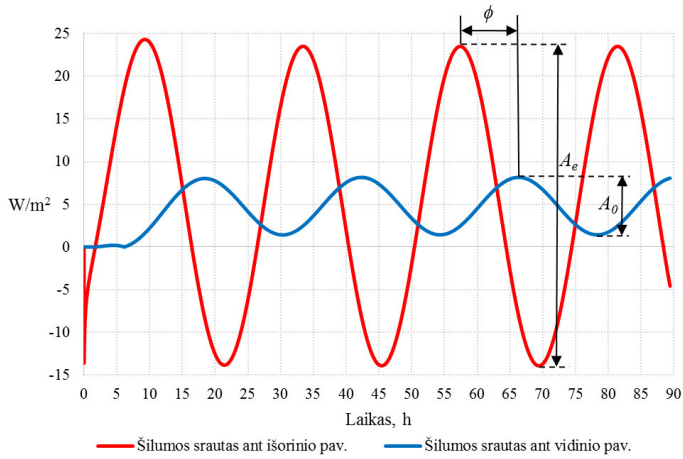
Jau ankstesniuose skyriuose minėta – kad kuo mažesnis slopinimo rodiklis, tuo siena yra mažiau veikiama išorinių klimatinių veiksnių. Jeigu išorinis sienos paviršius buvo sušildytas tiesioginių saulės spindulių, tai tik dalis energijos pasieks vidinį sienos paviršių. Iš 3.4 paveikslo matyti, kad mažiausias slopinimo veiksnys yra 9 sienos (aktyvo betono blokelių) – 0,001, o didžiausias 1 sienos – 0,024. Taigi, vidinė sienos dalis gaus nuo 0,1 % iki 2,4 % energijos nuo suteiktos išorinei sienos daliai. Kadangi banga beveik visiškai nuslopinama, analizėje ir nebuvo vertinami šilumos pritekiai per išorines pastato atitvaras.

Atitvarų aktyvaus šilumos sluoksnio skaičiavimas atliktas taikant analitinį vertinimą, o šis vertinimas tinkamas elementams, sudarytiems iš homogeninių vienalyčių sluoksnių. Vertinant 1 ir 10 sienų aktyvų šilumos talpumą atitvaros atskirų sluoksnių laidumas, tankis ir talpumas vertinami svoriniu būdu. Toks vertinimas įneša į skaičiavimą paklaidą, todėl atliktas 1 sienos skaitinis skaičiavimas. Šio skaičiavimo tikslas – nustatyti, ar analitinio skaičiavimo rezultatas yra patikimas.

Skaitinis vertinimas atliekamas kompiuterinio skaičiavimo programa „*ANSYS WORKBENCH*“. Ši programa – tai daugiafunkcis baigtinių elementų programinis (BEM) paketas, skirtas mechanikos, elektrotechnikos, skysčių dinamikos bei kitiems inžineriniams – fizikiniams uždaviniams spręsti ir analizuoti.

Prieš 1 atitvaros skaitinį vertinimą atlikta skaitinio modelio validacija, kurioje vertinama ar priimtoms prielaidoms yra teisingos. Modelio patikimumo vertinimas atliekamas pasitelkus Jin ir kitų autorių atliktus tyrimus (Jin *et al.* 2012). „*ANSYS WORKBENCH*“ programoje buvo sudaryta atitvara, kurios storis – 240 mm, šilumos laidumas – 0,36 W/(m·K), tankis – 700 kg/m³ ir savitoji šiluma 1050 J/(kg·K). Suformuotos kraštinės sąlygos, t. y. lauko oro temperatūros periodinė banga ($P = 24$ h), kuri svyruoja nuo 25–35 °C, patalpos oro temperatūra – 26 °C. Išorinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas – 18,6 W/(m²·K), vidinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas – 8,7 W/(m²·K). Skaičiavimo laiko žingsnis – 300 s, o trukmė – 90 valandų. 3.5 paveiksle pateiktas gautas rezultatas, kuris palyginamas su Jin ir kitų autorių rezultatais (Jin *et al.* 2012).

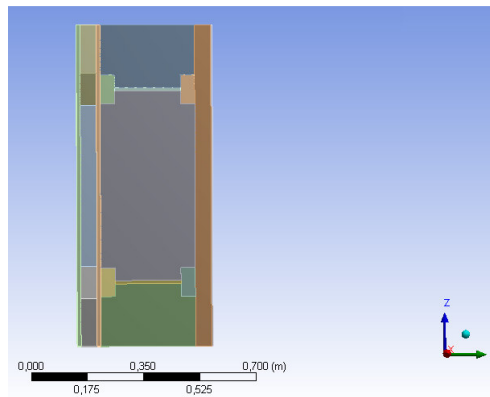
3.5 paveiksle pateikiama šilumos srauto banga ant išorinio paviršiaus (raudona kreivė) ir ant vidinio paviršiaus (mėlyna kreivė). Šiuo atveju nustatomi šilumos srauto slopinimo dydis ir bangos vėlavimo trukmė. Pagal šiuos dydžius nustatoma, ar modelis teisingas. Šilumos srauto slopinimo veiksnys vertinamas analogiškai temperatūriniam (1.18 formulė). Šilumos srauto amplitudė ant išorinės sienos yra $A_e = 37,39$ W/m², ant vidinės – $A_0 = 6,72$ W/m² (3.5 pav.). Pasitelkus formulę nustatyta, kad bangos slopinimo veiksnys 0,1797, o Jin ir kitų autorių pateiktas 0,1805. Skirtumas tarp rezultatų yra 0,44 %. Bangos vėlavimo trukmė Φ yra lygi 8,9 h, o Jin ir kitų autorių – 9,0 h, t. y. 1,1 % paklaida tarp rezultatų.



3.5 pav. Validuojamo skaičiavimo modelio rezultatai
Fig. 3.5. Results of the validated calculation model

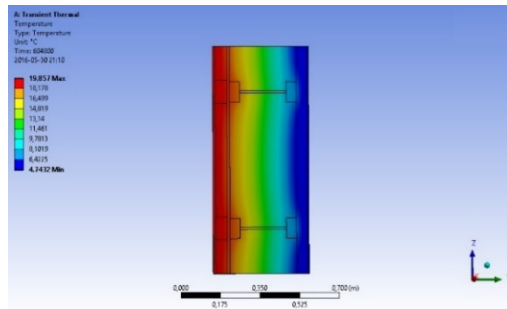
Sudaryto skaitinio modelio rezultatai sutampa su Jin ir kitų autorių pateiktais skaičiavimo rezultatais ir turi nedidelį nesutapimo laipsnį (Jin *et al.* 2012). Todėl teigiama, kad skaitinio modelio vertinimas kompiuterine programa „*ANSYS WORKBENCH*“ yra patikimas ir nekelia abejonių gauti rezultatai.

Naudojant „*ANSYS WORKBENCH*“ sukuriamas pirmos sienos (medžio karkaso) 2 D modelis, kurio vaizdinė interpretacija pateikta 3.6 paveiksle.



3.6 pav. 1 sienos 2D modelis
Fig. 3.6. 2D model of wall 1

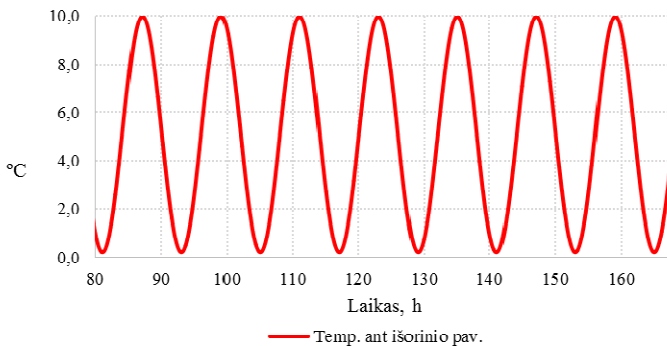
3.6 paveiksle pateiktas sienos modelis, kuriam sudaromas baigtinių elementų tinklas. Maksimalus tinklo elemento dydis yra 0,008 mm. Modeliui suformuojamos kraštinės sąlygos, t. y. išoriniam sienos paviršiui nustatoma oro temperatūra, kuri kinta sinusoide (2.6 pav.), o išorinio paviršiaus atidavimo koeficientas – $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Vidinėje sienos pusėje oro temperatūra parenkama $20 \text{ }^\circ\text{C}$, o paviršiaus atidavimo koeficientas – $7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Pradinė viso modelio temperatūra – $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Skaičiavimo laiko žingsnis parenkamas 150 s, o trukmė – 168 valandos. Atlikus skaičiavimą gaunamas temperatūrinis sienos pasiskirstymas, kuris pateiktas 3.7 paveiksle.



3.7 pav. 1 sienos temperatūros pasiskirstymas pateiktas skaitinio modeliavimo programos

Fig. 3.7. Temperature distribution for wall 1 provided by the numeric modelling program

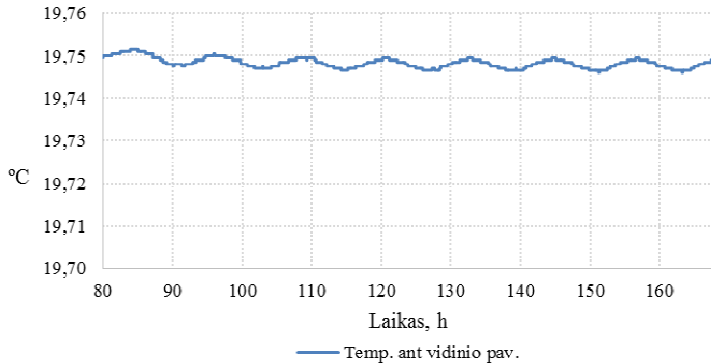
3.7 paveiksle pateiktas temperatūrinis sienos pasiskirstymas proceso pabaigoje, t. y. po 168 valandų (po 7 dienų). Iš šio paveikslo matyti, kad šilumos pasiskirstymas sienoje yra nevienalytis ir didžiausi temperatūros nukrypimai yra ties mediniais atititvaros elementais.



3.8 pav. Išorinio sienos paviršiaus temperatūros kitimas

Fig. 3.8. Temperature change of the surface of the external wall

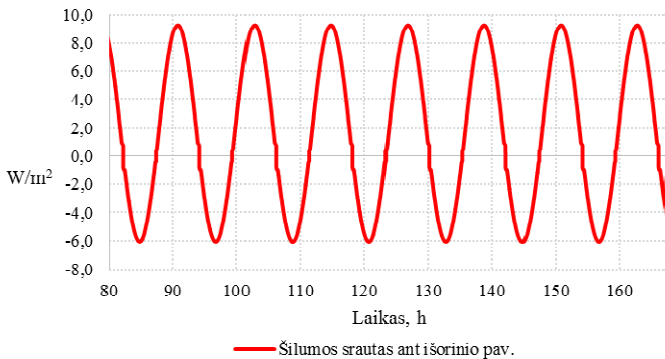
Siekiant nustatyti aktyvaus vidinio sienos sluoksnio talpą bei bangos slopinimo rodiklį reikalingos vidinio bei išorinio sienos paviršių temperatūros bei šilumos srautai. 3.8 paveiksle, pateikiamas temperatūros kitimas išoriniame sienos paviršiuje, o 3.9 pav. – vidiniame sienos paviršiuje.



3.9 pav. Vidinio sienos paviršiaus temperatūros kitimas
Fig. 3.9. Temperature change of the surface of the internal wall

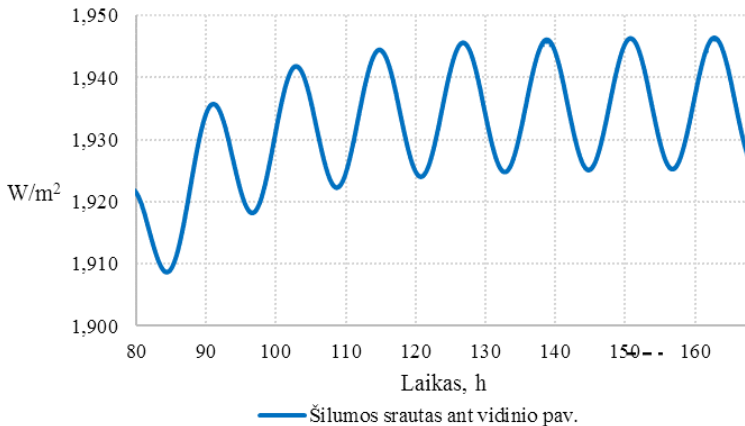
3.9 paveiksle matyti, kad mažai energijos naudojančio pastato siena efektyviai slopina temperatūrinės bangos poveikį iš išorės, nes vidinės sienos paviršiaus temperatūros svyravimas yra nežymus. O slopinimo bangos rodiklis vertinamas naudojantis (1.18) formule.

Sienos aktyvaus šilumos sluoksnio dydžiui nustatyti pasitelkiama Faye ir kitų autorių sudaryta metodika (Faye *et al.* 2015). Šiam tikslui iš skaitinio modelio gaunamas išorinio paviršiaus šilumos srautas (3.10 pav.) ir vidinio paviršiaus šilumos srautas (3.11 pav.).



3.10 pav. Išorinio sienos paviršiaus šilumos srauto kitimas
Fig. 3.10. Change of the thermal flow of the surface of the external wall

3.10 paveiksle matyti, kad šilumos srautas keičia kryptį iš teigiamo į neigiamą. 3.11 paveiksle pateikiamas šilumos srautas ant vidinio sienos paviršiaus.



3.11 pav. Vidinio sienos paviršiaus šilumos srauto kitimas
Fig. 3.11. Change of the thermal flow of the surface
of the internal wall

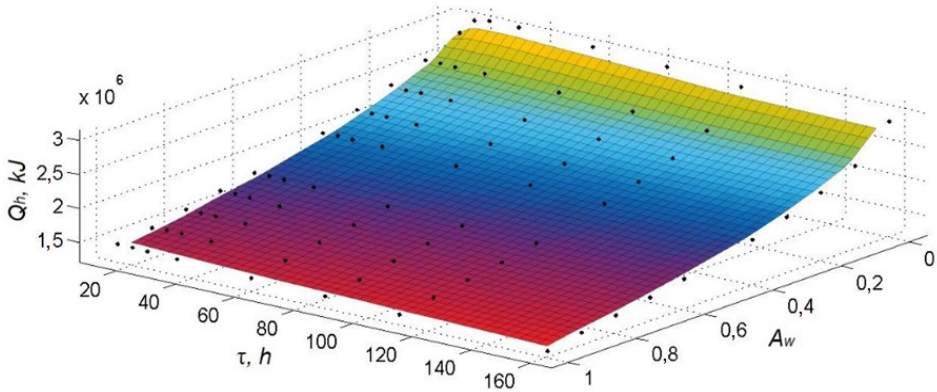
Naudojantis 3.8, 3.9, 3.10 ir 3.11 paveikslais gaunamos srautų fazės bei amplitudės, kuriomis įvertinamas aktyvaus šilumos sluoksnio dydis. Nustatyta, kad vidinio paviršiaus šiluminė talpa yra $16,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ir nustatytas šilumos talpumo dydis nuo analitinio vertinimo skiriasi $1,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Todėl galime vertinti, kad analitinio skaičiavimo rezultato patikimumas yra vidutinio lygio (kai paklaida tarp analitinio ir skaitinio metodo yra iki 10 %).

Įvertinus atitvarų vidinio sluoksnio šiluminės talpas bei šio skaičiavimo patikimumą (skaitiniais metodais), atliekamas patalpos energijos poreikių skaičiavimas pasitelkiant kompiuterinio modeliavimo programą „TRNSYS“.

3.1.2. Patalpos šilumos ir vėsos poreikis

Įvertinus atitvarų aktyvaus šilumos sluoksnio talpumą formuojamas „TRNSYS“ modelis, kuriame sukuriama patalpa su atitvaromis, kurios pateiktos anksčiau, ir jų šiluminėmis bei talpumo savybėmis. Šio modelio tikslas nustatyti šilumos ir vėsos poreikio kitimą esant skirtingoms atitvarų šiluminėms talpoms bei skirtingam įstiklinimo plotui. Šilumos ir vėsos poreikio vertinime, pirmuoju etapu, buvo nustatoma patalpos oro temperatūra taikant šiluminio komforto skaičiavimo modelį, t. y. patalpos oro kokybės valdymą pagal šiluminio komforto modelį. Santykinis langų įstiklinimo plotas keičiamas nuo 0 iki 1. Darbe priimama, kad savitieji

patalpos šilumos nuostoliai nekinta, jie yra 20 W/K. Šie nuostoliai yra nustatyti kaip vidutiniai nuostoliai, kai langų santykinis plotas kinta nuo 0 iki 1. Žemiau pateikiami grafikai, kurie suformuoti laikant, kad savitieji šilumos nuostoliai yra 20 W/K.



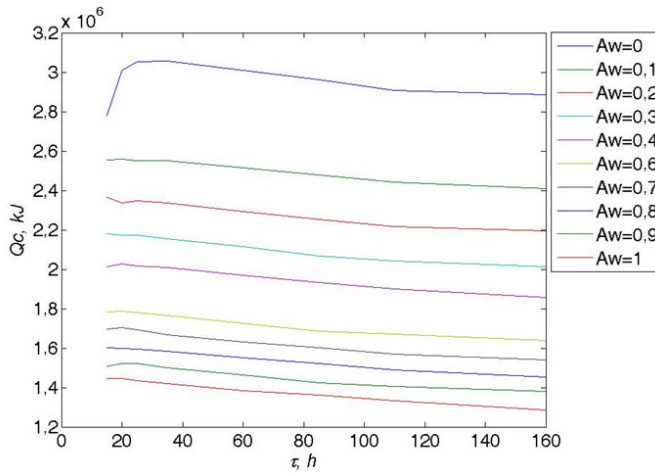
3.12 pav. Šildymo sezono šilumos poreikis,
kai $H = 20$ W/K

Fig. 3.12. Heating demand during the heating season
when $H = 20$ W/K

3.12 paveiksle pateikta šilumos nuostolių priklausomybė nuo įstiklinimo ploto santykio su grindų plotu bei patalpos atitvarų aktyvaus sluoksnio šiluminės talpos (pateikiama kaip laiko pastovioji (1.13 formulė)), kai savitieji patalpos šilumos nuostoliai yra 20 W/K. Iš šios priklausomybės matyti, kad didėjant sienų šilumos talpumui energijos poreikis šildymui mažėja. Taip pat pastebima, kad didėjant įstiklinimo plotui energijos poreikis mažėja, nes patekusi saulės spinduliuotė per langus šildo patalpas, o jos perteklius kaupiamas atitvarose. Šiame vertinime priimta, kad lango orientacija yra pietų, kitos orientacijos neanalizuojamos. 3.13 paveiksle pateikta kita interpretacija, kurioje lengviau vertinti kintamų parametrų įtaką.

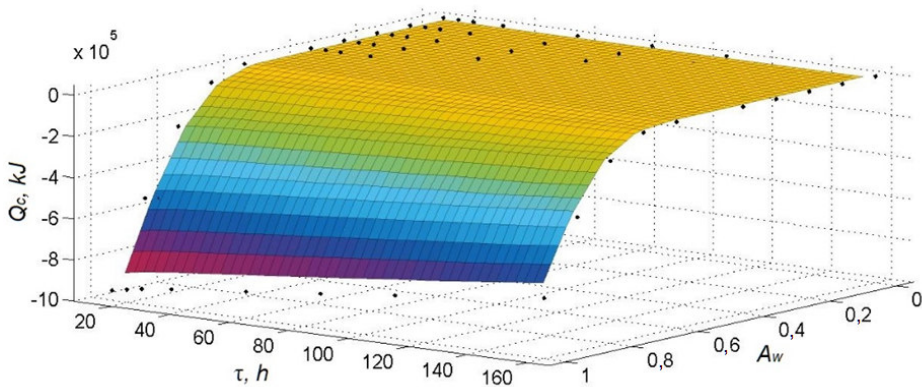
Iš 3.13 paveikslo matyti, kad atitvarų šilumos talpumas sumažina patalpos šilumos poreikį. Pasirinkus didžiausio šiluminio talpumo ir įstiklinimo ploto atitvaras galima sumažinti energijos poreikį šildymui 11 %, palyginti su mažo talpumo atitvaromis.

Ne ką mažiau svarbus ir vėsinimo sezonas, todėl 3.14 ir 3.15 paveiksle pateikiami vėsos sezono poreikiai. Nors šiame darbe pateikiamas ir vėsos poreikis, termodinaminė sistemos analizė neatliekama.



3.13 pav. Šildymo sezono šilumos poreikio priklausomybė nuo τ ir santykinio langų dydžio

Fig. 3.13. The dependence of the heating demand during the heating season on τ and the relative area of windows

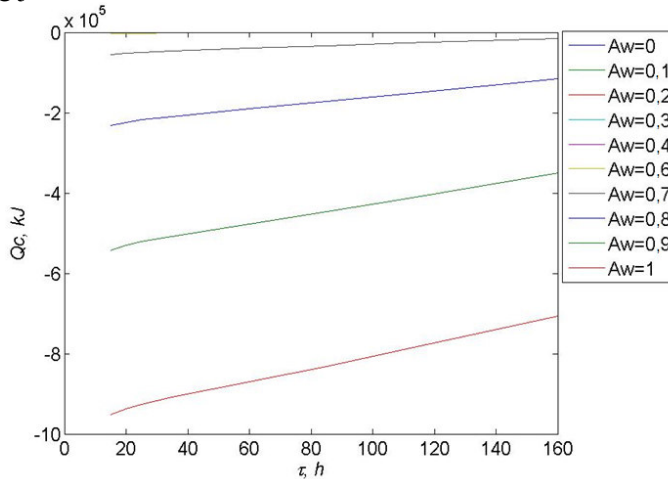


3.14 pav. Vėsinimo sezono vėsos poreikis, kai $H = 20$ W/K

Fig. 3.14. Cooling demand during the cooling season when $H = 20$ W/K

3.14 paveiksle pateikta vėsos poreikio priklausomybė nuo įstiklinimo ploto bei patalpos atitvarų aktyvaus sluoksnio šiluminės talpos, kai savitieji patalpos šilumos nuostoliai yra 20 W/K. Iš šios priklausomybės matyti, kad didėjant sienų šilumos talpumui energijos poreikis vėsinimui mažėja. Galima matyti, kad didė-

jant įstiklinimo plotui energijos poreikis vėsinimui didėja, nes per skaidrias atitvaras patekusi saulės spinduliuotė šildo patalpas, o kuo daugiau jos patenka tuo daugiau energijos vėsinimui reikia.



3.15 pav. Vėsinimo sezono vėsos poreikio priklausomybė nuo τ ir santykinio langų dydžio

Fig. 3.15. The dependence of the heating demand during the colling season on τ and the relative area of windows

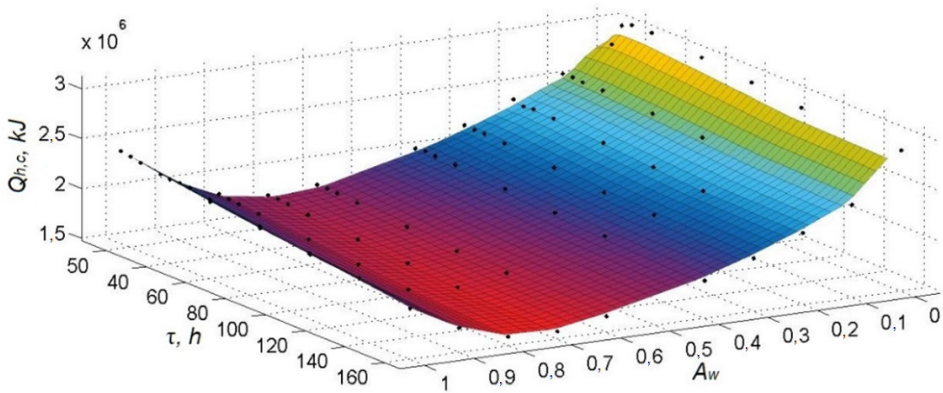
Iš 3.15 paveikslo matyti, kad atitvarų šilumos talpumas sumažina patalpos vėsos poreikį. Pasirinkus didžiausio šiluminio talpumo ir įstiklinimo ploto atitvaras galima sumažinti energijos poreikį vėsinimui 26 %, palyginti su mažo talpumo atitvaromis.

3.12 ir 3.14 paveiksluose pastebima priešinga tendencija dėl įstiklinimo ploto, todėl taikomas optimizavimas sienos šilumos talpumo dydžiui ir langų plotui parinkti, esant mažiausiam suminiam šilumos ir vėsos poreikiui. 3.16 paveiksle pateiktas suminis šildymo ir vėsinimo energijos poreikis.

Minimumo radimo funkciją galima užrašyti taip (minimalaus šilumos ir vėsos poreikio):

$$\min Q_{sum} = f(A_{win}, Cp).$$

Atlikus optimizavimą nustatyta, kad mažiausias suminis energijos vartojimas pasiektas kai laiko pastovioji (τ) 150 h, o santykinis langų įstiklinimo plotas yra 0,7. Šis įstiklinimo plotas yra tinkamas, kad žmogus jaustų pasitenkinimą aplinka (Bülow-hübe 2001).



3.16 pav. Metinis šilumos ir vėsos poreikis, kai $H=20$ W/K
Fig. 3.16. Annual heating and cooling demand when $H=20$ W/K

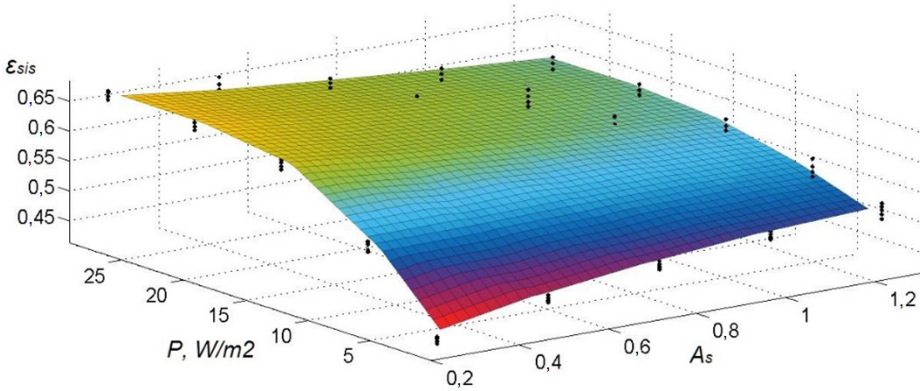
Įvertinus patalpos atitvarų šiluminį talpumą nustatyta, kad atitvaros, turinčios didžiausią laiko pastoviąją gali sumažinti šildymo ir vėsos poreikius. Langų įstiklinimas taip pat svarbus sprendžiant pastato energijos vartojimo mažinimo klausimus. Norint pasiekti didžiausius taupymo rodiklius patalpų šildymui reikia didžiausio įstiklinimo ploto, bet tuomet pasiekiamas atvirkščias efektas, kuris padidina vėsinimo poreikį. Mažiausias suminis energijos vartojimas pasiektas, kai laiko pastovioji – 150 h, o langų plotas – 0,7. Ne ką mažiau dėmesio turi būti skirta aktyvioms pastato mikroklimato sistemoms, todėl kitu etapu vertinamas šios sistemos termodinaminis efektyvumas šildymo sezonui.

3.2. Saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos eksperimentinis efektyvumas

Buvo atlikta parametrinė sistemų analizė, kurios metu buvo keičiamas saulės kolektorių plotas, akumuliacinės talpos dydis bei pagalbinio šildytuvo galia (2.18 pav.). Šiai analizei su „TRNSYS“ programa buvo sukurtas modelis (2.19 pav.), kuris atliko sistemų skaičiavimus. Atlikusi skaičiavimus programa sukuria išvesties failą „CSV“ formatu, kuriame pateikti 12 minučių žingsniu įeinanti ir išeinanti iš įrenginių (saulės kolektorius, šilumos kaupimo talpa, vėdinimo įrenginys, išorinis šildytuvas ir šilumos skleistuvas) srautų temperatūra, debitai, aplinkos temperatūra ir saulės spinduliuotė. Vertinime priimta, kad vamzdynai ir šilumos kaupimo bakas neturi šilumos mainų su aplinka. Išvesties failas yra kelių tūkstančių eilučių kodas, kuris duomenis apdoroja automatiškai pasitelkus „MATLAB“ kompiuterinę programą. Šis įvesties kodas pateiktas D priede.

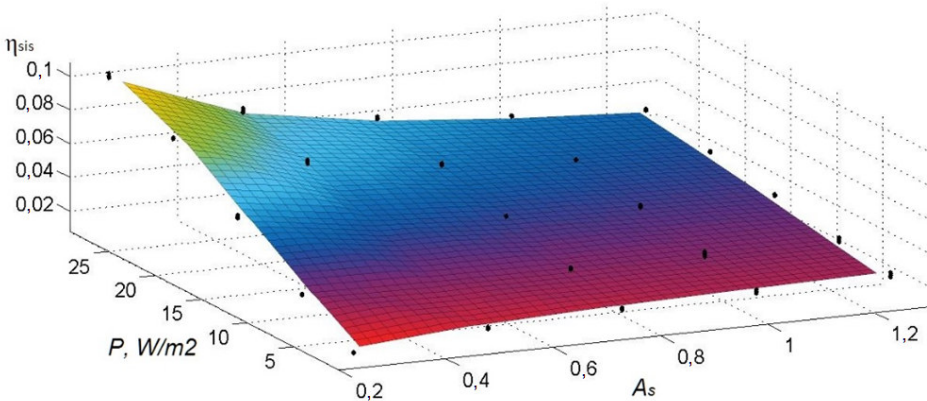
Atlikus parametrinę analizę įvertintos energinio, ekserginio ir funkcinio efektyvumo kitimo tendencijos, kai kinta saulės kolektorių plotas, pagalbinio šaltinio galia bei šilumos talpyklos tūris.

3.17 paveiksle pateikta energinio efektyvumo priklausomybė nuo santykinio saulės kolektorių ploto (A_s) ir pagalbinio šildytuvo galios, tenkančios 1 m^2 (P).



3.17 pav. Energinio efektyvumo kitimo priklausomybė nuo saulės kolektorių santykinio ploto ir pagalbinio šildytuvo galios

Fig. 3.17. The dependency of the change of energy efficiency on the solar collector area and the power of the auxiliary heater



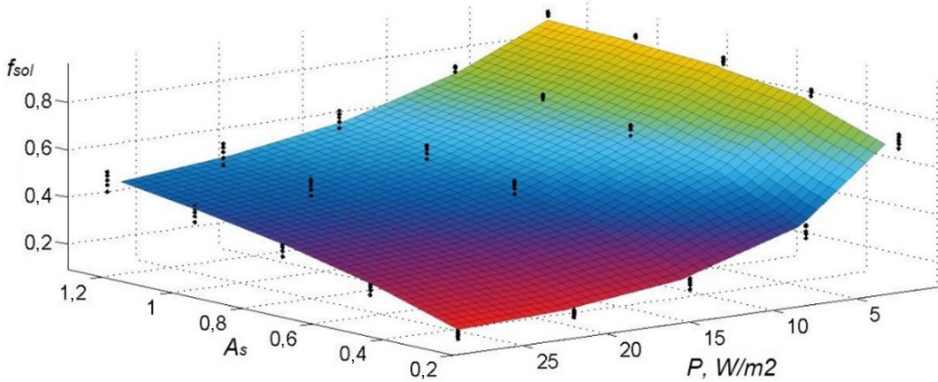
3.18 pav. Ekserginio efektyvumo kitimo priklausomybė nuo saulės kolektorių santykinio ploto ir pagalbinio šildytuvo galios

Fig. 3.18. The dependence of the change of exergy efficiency on the solar collector area and the power of the auxiliary heater

Iš 3.17 paveikslo matyti, kad sistemos energinis efektyvumas didėja didėjant pagalbinio šildytuvo galiai ir mažėjant saulės kolektorių plotui. Ši tendencija pastebima todėl, kad pagalbinio šildytuvo galia yra 1. Galima pastebėti, kad energinis efektyvumas kinta nuo 45 % iki 65 %. Panaši tendencija pastebima su ekserginio sistemos efektyvumu (3.18 pav.).

Iš 3.18 paveikslo matyti, kad sistemos ekserginis efektyvumas didėja didėjant pagalbinio šildytuvo galiai ir mažėjant saulės kolektorių plotui. Įvertinus energijos kokybę gautas ekserginis efektyvumas svyruoja nuo 2 % iki 9 %, o tai yra net iki 22 kartų mažesnis nei energinis. Tai pat pastebima, kad eksergijos pokytis yra tolygiai kintantis palyginti su energiniu efektyvumu.

Visiškai priešinga tendencija pastebima dėl saulės frakcijos dydžio (3.19 pav.).

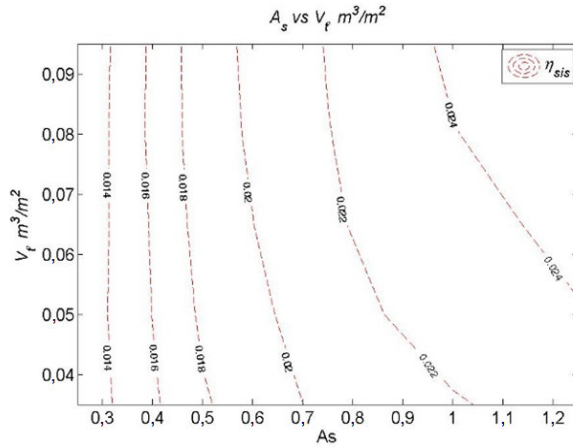


3.19 pav. Saulės frakcijos kitimo priklausomybė nuo saulės kolektorių ploto ir pagalbinio šildytuvo galios

Fig. 3.19. The dependence of the change of solar fraction on the solar collector area and the power of the auxiliary heater

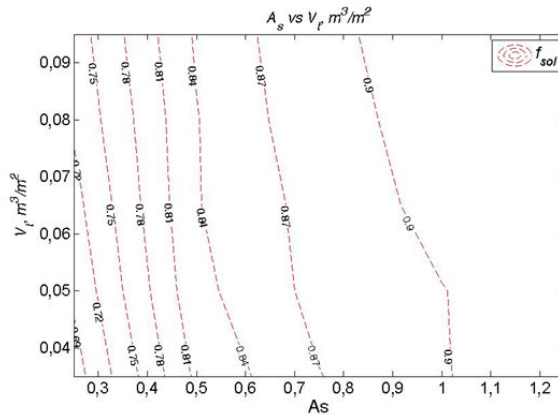
Iš 3.19 paveikslo matyti, kad saulės frakcija didėja didėjant saulės kolektorių plotui ir mažėjant pagalbinio šildytuvo galiai. O tai yra komplikacija ieškant geriausio sistemos elementų derinio. Žemiau, 3.20 ir 3.21 paveiksluose, pateikta ekserginio efektyvumo ir saulės frakcijos priklausomybė nuo šilumos talpos tūrio, tenkančio $1 m^2$, ir santykinio saulės kolektorių ploto.

3.20 ir 3.21 paveiksluose pateikta pagalbinio šildytuvo galia yra mažiausia ($1.4 W/m^2$). Iš 3.20 paveikslo matyti, kad talpos tūris padidina efektyvumą, ypač jeigu saulės kolektorių santykinis plotas ne mažesnis nei 0,5. Tokia pat tendencija pastebima ir 3.21 paveiksle. Galima teigti, kad akumuliacinė talpa – labai svarbus komponentas sistemoje, nuo kurio priklauso ne tik sistemos patikimumas, bet ir efektyvumas.



3.20 pav. Sistemos ekserginio efektyvumo kitimo priklausomybė nuo saulės kolektorių ploto ir šilumos talpyklos tūrio tenkančio 1 m^2 saulės kolektorių ploto

Fig. 3.20. The dependence of the exergy efficiency of the system on the solar collector area and the thermal storage capacity for 1 m^2 of the solar collector area



3.21 pav. Saulės frakcijos kitimo priklausomybė nuo saulės kolektorių ploto ir šilumos talpyklos tūrio tenkančio 1 m^2 saulės kolektorių ploto

Fig. 3.21. The dependence of the solar fraction change on the solar collector area and the thermal storage capacity for 1 m^2 of the solar collector area

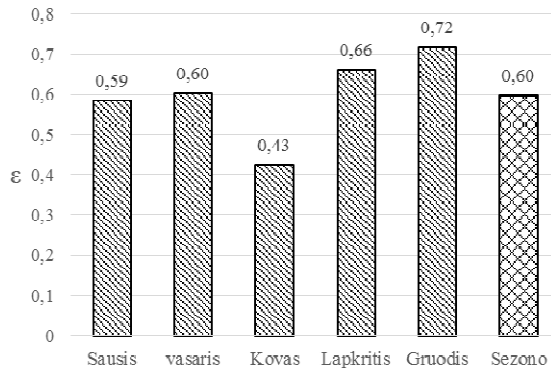
Atlikus parametrinę analizę ir įvertinus visų variantų eksergijos efektyvumą atliekama saulės kolektorių santykinio ploto optimizacija šilumos talpai ir pagal-

biniam šaltinio dydžiui nustatyti, kai pasiekiamas didžiausias ekserginis efektyvumas ir saulės frakcija. Šį atvejį apriboja ir užsibrėžtas komforto lygis, kuris yra 10 % ($TNS \leq 10\%$). Maksimumo radimą galima užrašyti taip:

$$\max \eta_{sis}, f_{sol} = f(A_{sil}, V_t, TNS).$$

Žinoma, kad ekserginio efektyvumo tendencija yra priešinga saulės frakcijai, todėl šiame darbe pasirenkama, kad tiek efektyvumas, tiek frakcija yra vienodai svarbūs. Kitais atvejais reikia atsižvelgti į aplinkosauginius ar politinius aspektus. Jeigu siekiama daugiau panaudoti atsinaujinančiosios energijos sistemoje, tai sąmoningai prastinamas visos sistemos efektyvumas ir saulės frakcijai skiriamas didesnis svorinis koeficientas negu ekserginiam efektyvumui. Ir priešingai, kai svarbus yra efektyvumas, didžiausias svorinis koeficientas skiriamas efektyvumui.

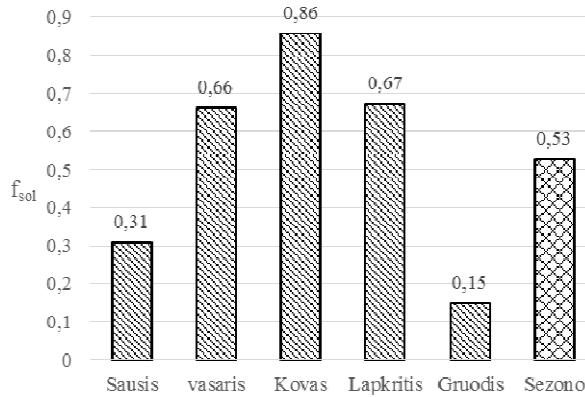
Kai sistemos efektyvumo ir saulės frakcijos svorinis koeficientas yra vienodas, nustatyta, kad geriausias saulės kolektorių santykinis plotas yra 1,25, talpos tūris – 0,95 tenkantis 1 m², o papildomo šildytuvo galia – 20 W/m² (visais klimatiniais atvejais užtikrinamas užsibrėžtas komforto lygis). Geriausio derinio atveju gautos energijos kiekis – 6,42 GJ (1,78 MWh). Žemiau esančiuose paveiksluose pateikiami detalūs termodinaminės analizės rezultatai.



3.22 pav. Aktyvios saulės mikroklimato sistemos energinis efektyvumas
Fig. 3.22. Energy efficiency of the active solar microclimate system

3.22 paveiksle pateiktas mėnesinis ir sezoninis energinis efektyvumas. Matoma, kad energinis efektyvumas mažiausias kovo mėnesį (43 %), o didžiausias gruodį (72 %), nes gruodžio mėnesį saulės kolektoriais pagaminama mažiausiai energijos, o daugiausia pagaminama pagalbinio šildytuvu, kurio energinis efektyvumas yra 1. Šiltojo sezono (nuo balandžio iki spalio) mėnesiais sistema patalpų neaprupino šiluma, nes pakankamai šilumos buvo pasisavinta per skaidrias atitvaras. Bendras šildymo sezono energinis efektyvumas siekė 60 %.

Kitame paveiksle pateikiami rezultatai kiek sistema pasisavino saulės kolektoriuose pagamintos šilumos.

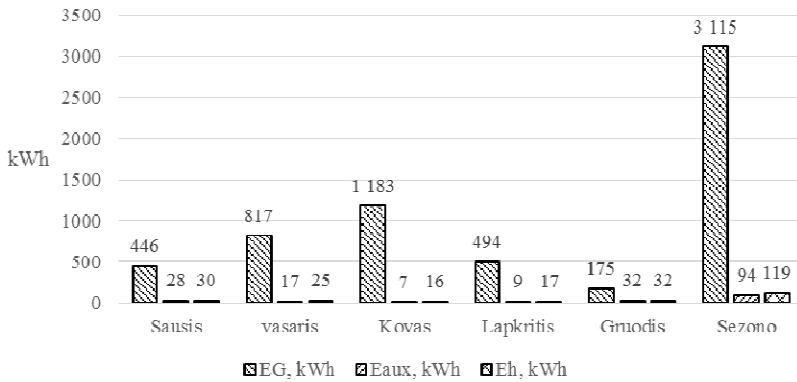


3.23 pav. Aktyvios mikroklimato sistemos saulės frakcijos dydis
Fig. 3.23. Solar fraction value of the active microclimate system

3.23 paveiksle pateiktas mėnesinis ir šildymo sezono saulės frakcijos dydžiai, t. y. nurodoma kokią dalį energijos patalpa gavo per aktyvias sistemas iš saulės. Matoma, kad saulės frakcija mažiausia yra gruodžio (15 %) ir sausio (31 %) mėnesiais, nes šiuo periodu analizuojamojoje teritorijoje mažiausia saulės spinduliuotė. Didžiausia saulės frakcija pasiekta vasario, kovo ir lapkričio mėnesiais, atitinkamai 66 %, 86 % ir 67 %. Šildymo sezono saulės frakcijos siekia 53 %. Likusiais mėnesiais sistema nebuvo naudojama patalpoms šildyti.

Kitame paveiksle pateikiami rezultatai, kiek sistema gavo eksergijos iš saulės ir pagalbinio šildytuvo ir kiek jos reikėjo patalpai užtikrinant tinkamą šiluminį komfortą (3.24 pav.).

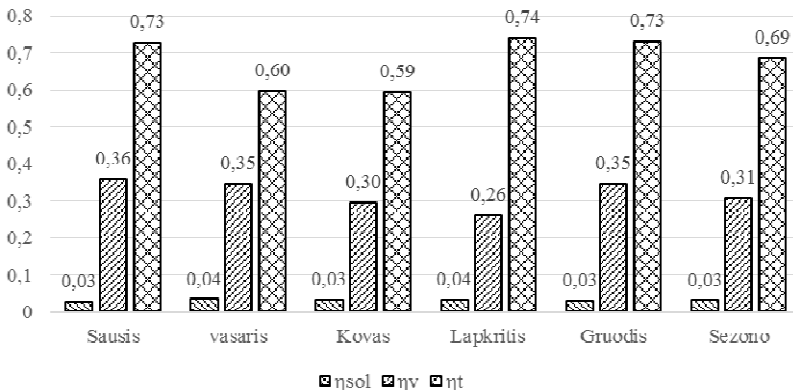
3.24 paveiksle pateikta, kiek eksergijos sistema gavo iš saulės (E_G) ir pagalbinio šildytuvo (E_{aux}) bei kiek jos pareikalavo patalpa (E_h). Matoma, kad sistema gavo didelę eksergijos kiekį iš saulės ir kiek mažiau iš pagalbinio šildytuvo. Iš saulės sistema daugiausia gavo kovo mėnesį, o iš pagalbinio šildytuvo gruodį. Mažiausiai eksergijos gavo tais pačiais mėnesiais tik su priešinga tendencija, t. y. iš saulės – gruodžio mėnesį, o iš šildytuvo – kovo mėnesį. Didžiausias patalpos eksergijos poreikis buvo gruodžio mėnesį. Iš šio paveikslo matyti, kad sistema gavo didelį eksergijos kiekį iš saulės, bet dėl sistemos netobulumo pasisavino nedidelį jos kiekį. Likusiais mėnesiais sistema neveikė.



3.24 pav. Aktyvios mikroklimato sistemos gautas eksergijos kiekis iš saulės ir pagalbinio šildytuvo bei patalpos poreikis

Fig. 3.24. The amount of exergy received by the active microclimate system from the Sun and the demand of the auxiliary heater and the room

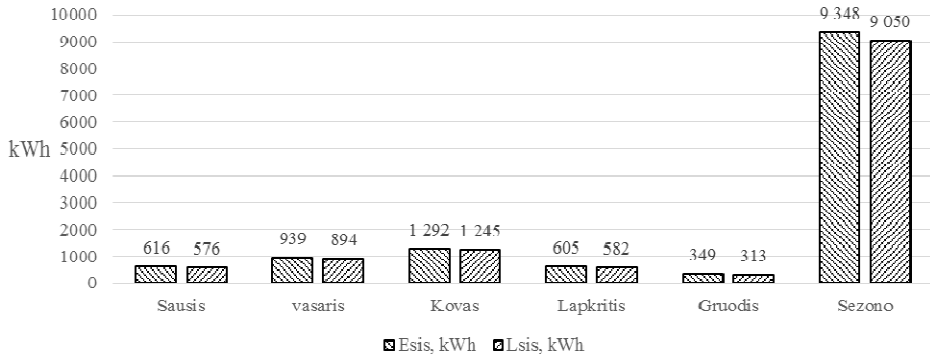
3.25 paveiksle pateiktas saulės kolektorių, vėdinimo įrenginio ir akumuliacinės talpos efektyvumas. Matoma, kad saulės kolektorių efektyvumas yra nedidelis tik, 3–4 %, todėl galima teigti, kad ši technologija turi ribas, kur gali būti tobulinama. Vėdinimo įrenginio ekserginis efektyvumas kinta nuo 26 % iki 36 %, o šilumos talpos efektyvumas nuo 59 % iki 75 %. Kitais mėnesiais sistema neveikė, nes nebuvo reikalinga šiluma patalpoms šildyti. Šildymo sezono saulės kolektorių bendras efektyvumas siekia 3 %, vėdinimo įrenginio – 31 %, talpos – 69 %.



3.25 pav. Aktyvios mikroklimato sistemos atskirų įrenginių mėnesinių ekserginis efektyvumas

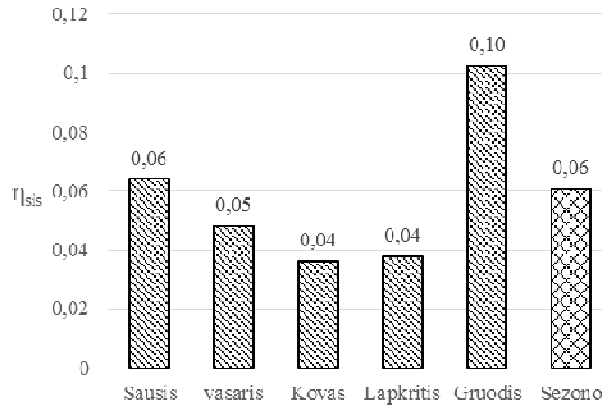
Fig. 3.25. Monthly exergy efficiency of individual devices of the active microclimate system

Šio darbo tikslas – nustatyti saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos ekserginį efektyvumą, kai užtikrinama pakankama šiluminė aplinka, kuri šiuo atveju yra II kategorijos. Todėl toliau pateikiami kas mėnesiniai visos sistemos ekserginiai parametrai, t. y. sistemos gauti ir prarasti eksergijos kiekiai bei ekserginis efektyvumas.



3.26 pav. Aktyviai mikroklimato sistemai suteiktas eksergijos ir prarastas kiekis

Fig. 3.26. The amount of exergy supplied by active microclimate to the system and the amount lost



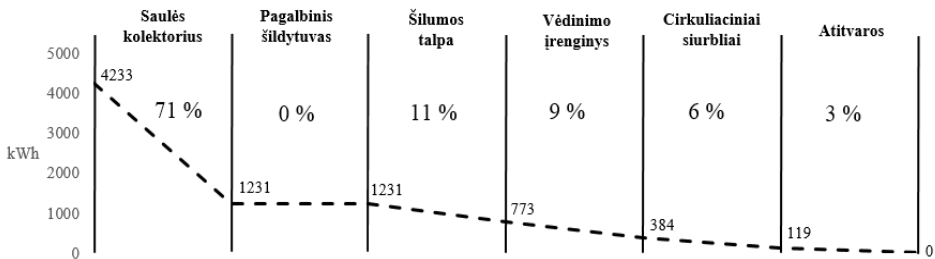
3.27 pav. Aktyvios mikroklimato sistemos efektyvumas

Fig. 3.27. Efficiency of the active microclimate system

3.26 paveiksle pateikti sistemos gautas ir prarastas eksergijos kiekis kiekvieną analizuojamą šildymo sezono mėnesį bei sezoniniai kiekiai. Nustatyta, kad

mažiausią eksergijos kiekį sistema gavo gruodžio mėnesį (349 kWh), o didžiausią – kovo mėnesį (1292 kWh). Atitinkamai eksergijos nuostoliai yra 313 kWh ir 1245 kWh. Šildymo sezono metu sistema gavo 9348 kWh eksergijos, o eksergijos nuostoliai – 9050 kWh.

3.27 paveiksle AMKPs pateikiamas sistemos efektyvumas kiekvieną mėnesį. Mažiausias efektyvumas yra lapkričio ir kovo mėnesiais (4 %), o didžiausias – gruodžio mėnesį (10 %). Bendras šildymo sezono sistemos ekserginis efektyvumas siekia 6 %.



3.28 pav. Sistemos eksergijos nuostolių grandinė

Fig. 3.28. Exergy loss chain of a system

3.28 paveiksle pateikta eksergijos nuostolių grandinė. Šio paveikslo dešinėje rodoma kiek eksergijos gavo visa sistema (4233 kWh), ir vėliau pateikiama kiek jos prarado, palyginti su visai sistemai suteiktu kiekiu. Iš šio paveikslo matyti, kad saulės kolektorių eksergijos nuostoliai sudaro net 71 % nuo visos sistemos bendrų eksergijos nuostolių. Pagalbinis šildytuvas neturi nuostolių, nes darbe vertintas šildytuvas, kurio efektyvumas – 1. Kiek mažiau eksergijos nuostolių patiriama talpoje, šie nuostoliai sudaro 11 %, vėdinimo įrenginyje – 9 %, visų cirkuliacinių siurblių – 6, o per atitvaras patiriami eksergijos nuostoliai sudaro tik 3 % visų nuostolių. Todėl galima teigti, kad sistema turi būti pradėta tobulinti nuo elementų, kurie sudaro didžiausius nuostolius, šiuo atveju – saulės kolektoriai.

Sistemos elementų dydžiai parinkti esant optimaliems sezoniniams saulės frakcijos ir ekserginio efektyvumo rodikliams. Todėl nustatyti optimalios sistemos parametrai, o ši sistema efektyviai panaudojo 53 % reikiamos energijos iš saulės, jos efektyvumas siekė 6 %.

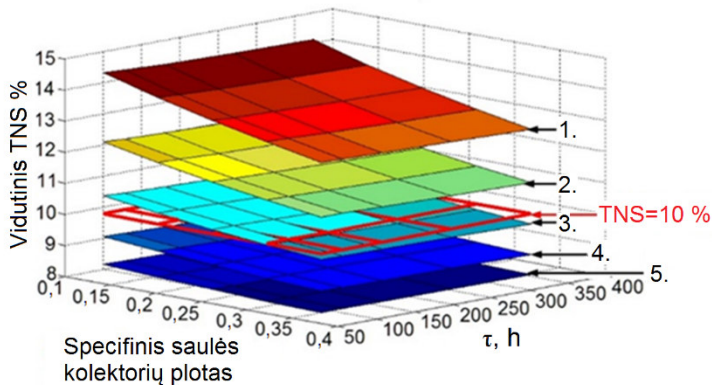
Atliekant aktyviosios sistemos parametrinę analizę buvo keičiama išorinio šildytuvo galia, todėl patalpoje svyruoja šiluminio komforto lygis. Kitame skyriuje pateikiamas mikroklimato sistemos naudojančios saulės energiją funkcinio efektyvumo įvertinimas.

3.3. Pastato mikroklimato sistemos naudojančios saulės energiją funkcinio efektyvumo įvertinimo rezultatai

Daktaro disertacijoje atliktas tyrimas, kurio tikslas – nustatyti šiluminio komforto priklausomybę nuo saulės kolektorių ploto, sienos šiluminio talpumo ir pagalbinio šildytuvo galios. Šiame skyriuje rezultatai pateikti naudojant pastoviąją laiko konstantą τ , kuri nusako atitvaros šilumos talpumo dydį, specifinį saulės kolektorių plotą (santykis tarp saulės kolektorių ir patalpos grindų ploto) ir pagalbinio šildytuvo galią, tenkančią 1 m^2 . Vertinime naudoti parametrinės analizės rezultatai, kai skaičiavimuose naudota $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$ ir $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$. Rezultatai apdoroti naudojant „MATLAB“ kompiuterinę programą. Tyrimo rezultatai pateikia šiluminio komforto ir saulės frakcijos priklausomybę nuo anksčiau minėtų parametrų (žiūrėti į 3.28 ir nuo 3.30 iki 3.32 paveikslus). Paveikslai vaizduoja vidutines TNS reikšmes per šildymo sezoną. Šis parametras padeda įvertinti šildymo sistemos funkcinį efektyvumą. TNS vertė neturi viršyti 10 %.

Paveikslai nuo 3.31 iki 3.33 buvo sukurti iš dviejų polinominių paviršių, siekiant parodyti parametrinės analizės rezultatus, sukuriant izolinijos diagramas (nomogramas). Pavyzdžiui, 3.29 paveiksle nurodyta vidutinė TNS (TNS_{avg}) priklausomybė nuo specifinio saulės kolektorių ploto ir šiluminės pastato konstantos. Specifinis saulės kolektorių plotas yra santykinis dydis tarp šių kolektorių ir patalpos grindų ploto.

Atlikus skaičiavimus nustatyta saulės frakcijos priklausomybė nuo šiluminės pastato konstantos ir TNS (3.30 pav.).

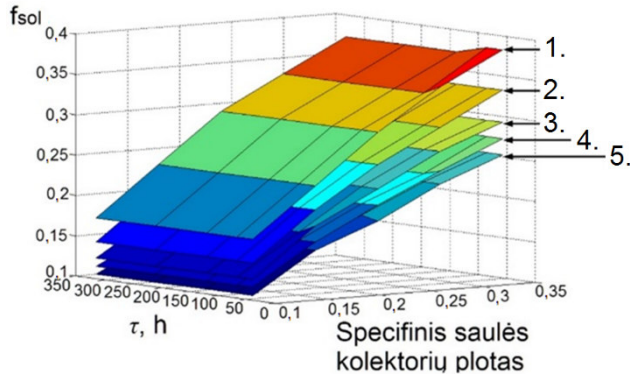


3.29 pav. Tikėtinas nepatenkintųjų skaičiaus kitimas, kai šilumos šaltinio galia yra skirtinga

Fig. 3.29. Change of predicted percentage of dissatisfied when the power of the heat source varies

3.29 paveiksle penktas (5) paviršius pristato TNSavg vertes, kai naudojama maksimali šilumos šaltinio galia (30 W/m^2). Ketvirtas paviršius (4) pristato tokius pačius rezultatus, bet šiuo atveju naudojama $7/8$ šilumos šaltinio galios ($26,25 \text{ W/m}^2$), trečias (3) – naudojama $6/8$ ($22,5 \text{ W/m}^2$), antras (2) – naudojama $5/8$ ($18,75 \text{ W/m}^2$) ir pirmas (1) – naudojama $1/2$ (15 W/m^2) reikalingos galios.

Raudonas plotas pristato kraštinę sąlygą kai TNSavg yra 10 %. Paviršiai, kurie yra aukščiau šios kraštinės sąlygos netenkina užsibrėžto šiluminio komforto (TNSavg > 10 %).



3.30 pav. f_{sol} kitimas, kai šilumos šaltinio galia yra skirtinga
Fig. 3.30. Change of f_{sol} when the power of the heat source varies

3.30 paveiksle penktas (5) paviršius pristato saulės frakcijos (f_{sol}) vertes, kai naudojama $1/2$ (15 W/m^2) reikalingos galios. Ketvirtas paviršius (4) pristato tokius pačius rezultatus, kai naudojama $5/8$ šilumos šaltinio galios ($18,75 \text{ W/m}^2$), trečias (3) – naudojama $6/8$ ($22,5 \text{ W/m}^2$), antras (2) – naudojama $7/8$ ($26,25 \text{ W/m}^2$), ir pirmas (1) – naudojama maksimali šilumos šaltinio galia (30 W/m^2).

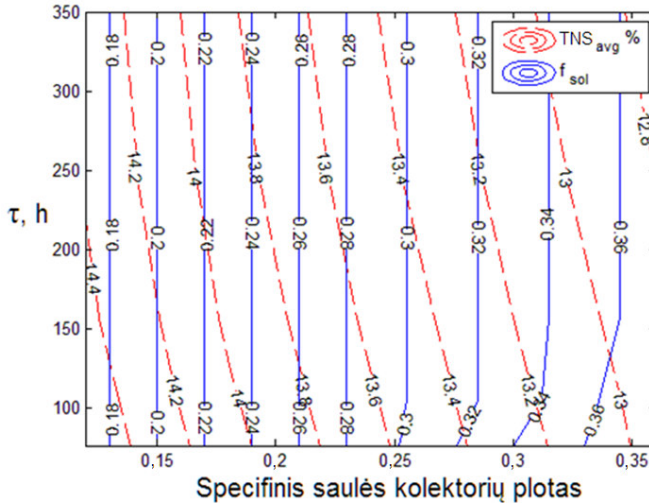
Jeigu į šiuos grafikus (3.29 ir 3.30 pav.) yra žiūrima iš Z ašies perspektyvos (iš viršaus) ir skirtingų altitudžių, yra išreiškiamos izolinijos, kurios apima šiuos du paveikslus, derinant grafikų rezultatus į nomogramas. Šios nomogramos gali būti naudojamos prognozuojant efektyvesnę projektinių parametru atranką kai projektuojamas pastatas ir saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos.

Paveiksluose nuo 3.31 iki 3.33 pateikta TNSavg ir f_{sol} priklausomybė nuo šiluminės pastato konstantos (y ašis) ir saulės kolektorių specifinio ploto (X ašis).

3.31 paveiksle pateiktas TNSavg ir f_{sol} , kai naudojamo šilumos šaltinio galia yra $1/2$ (15 W/m^2) reikalingos šaltinio galios (30 W/m^2). Paveikslai 3.31 ir 3.33 pristato tuos pačius kiekius kaip ir 3.31 paveikslas. Šilumos šaltinio galios $6/8$ ($22,5 \text{ W/m}^2$) ir $7/8$ ($26,25 \text{ W/m}^2$) atitinkamai.

Buvo pastebėta, kad TNS_{avg} pasiekia priimtina lygį, kai šilumos šaltinio galia yra $5/8$ ($18,75 \text{ W/m}^2$) ir 1 (30 W/m^2).

Paveiksluose nuo 3.31 iki 3.33 raudona punktyrinė linija vaizduoja TNS_{avg} , o mėlyna linija vaizduoja f_{sol} .



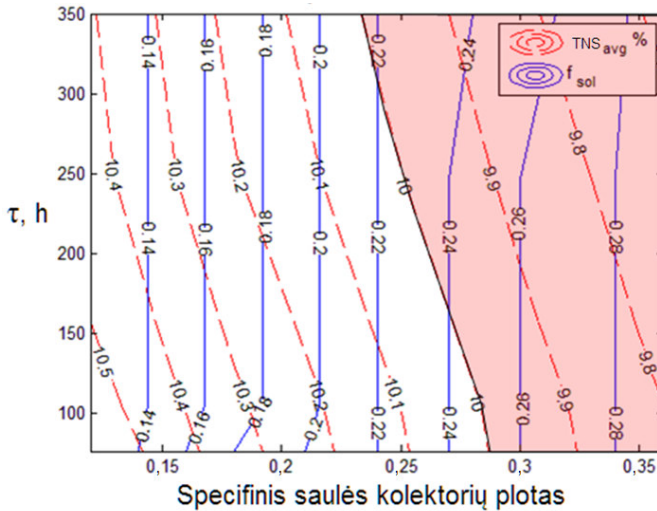
3.31 pav. TNS ir saulės frakcijos (f_{sol}) kitimas, kai šilumos šaltinio galia yra 15 W/m^2

Fig. 3.31. Changes of the TNS and the solar fraction (f_{sol}) when the power of the heat source is 15 W/m^2

3.31 paveiksle punktyrinės izolinijos vaizduoja TNS vertę, o mėlyna – saulės frakciją. Iš šio paveikslo matyti, kad didėjanti šiluminė konstanta ir specifinis saulės kolektorių plotas gerina TNS vertę šildymo sezonu (nuo 14,4 % iki 12,8 %), t. y. tikėtinas nepatenkintųjų skaičius mažėja. TNS vertė kinta nuo 12,2 % iki 11,2 %, kai naudojama šilumos šaltinio galia yra $5/8$ reikalingos galios ($18,75 \text{ W/m}^2$). Didėjantis specifinis saulės kolektorių plotas daro įtaką komforto lygiui ir saulės frakcijai. Ši elgsena yra gana nuspėjama dėl didėjančios galimybės panaudoti saulę, kai didinami saulės kolektorių plotai. Svarbu pažymėti, kad sąlygų derinys, šiluminės konstantos ir specifinio saulės kolektorių ploto, turėtų užtikrinti aukščiausią komforto lygį naudojant mažiausiai energijos. Pastabėta, kad naudojant šilumos šaltinį, kuris naudoja pusę reikalingos galios pasiekama aukščiausia saulės frakcija (0,36), o naudojant $5/8$ šaltinio galios, pagamintos saulės frakcijos dydis sumažėja ir yra lygus 0,32, bet pasiekiamas didesnis komforto lygis nei su $1/2$ galios šaltiniu, nors vidutinė šildymo temperatūra aukštesnė nei 20°C .

Šiuo atveju diskomforto trukmė ($TNS > 10\%$) trunka 17 % (svyruoja nuo 16 % iki 18 %.) viso šildymo sezono laiko ir priklauso nuo projektinių parametų.

O antruoju atveju ($18,75 \text{ W/m}^2$) diskomfortas svyruoja nuo 14 % iki 15 % vertinamojo laikotarpio.



3.32 pav. TNS ir saulės frakcijos (f_{sol}) kitimas, kai šilumos šaltinio galia yra $22,5 \text{ W/m}^2$

Fig. 3.32. Changes of the TNS and the solar fraction (f_{sol}) when the power of the heat source is 22.5 W/m^2

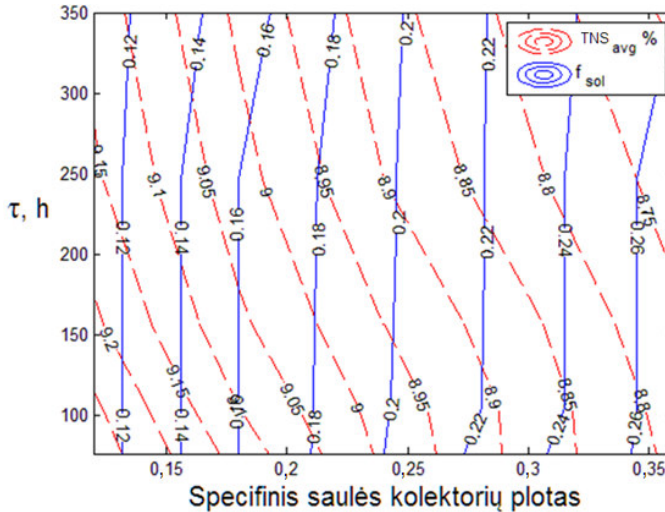
3.32 paveikslas vaizduoja TNS_{avg} ir f_{sol} priklausomybę nuo tų pačių parametru, kai šilumos šaltinio projektinė galia 6/8 reikalingos galios. Šiame paveiksle galima identifikuoti lūžį, kai didėjant šiluminei konstantai ir specifiniam saulės kolektorių plotui TNS_{avg} tampa priimtinas ir tikėtinas nepatenkintųjų skaičius nukrinta žemiau 10 % (3.32 pav.). Į dešinę nuo $TNS_{avg} = 10\%$ ribos (šešėliuotas plotas) turime priimtinas komforto sąlygas. Šiuo atveju didžiausia galimai pasiekama frakcija yra lygi 0,26. Šiomis sąlygomis komforto sąlygos neužtikrinamos apie 14 ÷ 15% šildymo sezono trukmės.

Atveju, kai naudojama 7/8 galios ir visa reikalinga šaltinio galia (30 W/m^2) TNS_{avg} pasiekia priimtina visų projektinių parametru lygį (3.33 pav.). Pasiektos saulės frakcijos yra 0,26 ir 0,24 atitinkamai. Šiluminio komforto reikalavimai nebuvo užtikrinti 10 % ÷ 12% šildymo sezono trukmės.

Atlikę rezultatų analizę galime teigti, kad didesnės šiluminės masės ir specifinio saulės kolektorių ploto derinys padeda sumažinti išorinio šilumos šaltinio galią patalpų šildymui, bet blogina šiluminio komforto lygį.

Tyrimu nustatyta, kad didžiausias saulės frakcijos kiekis užtikrinamas tuomet, kai naudojamas mažiausios galios išorinis šilumos šaltinis. Šiomis sąlygomis

šiluminio komforto lygis nėra užtikrintas (TNS yra apytiksliai 17 %) ir šis derinys negali būti naudojamas, nes neužtikrina tinkamo komforto lygio.



3.33 pav. TNS ir saulės frakcijos (f_{sol}) kitimas, kai šilumos šaltinio galia yra 30 W/m^2

Fig. 3.33. Changes of the TNS and the solar fraction (f_{sol}) when the power of the heat source is 30 W/m^2

Geriausiu atveju nustatyta, kad komforto lygis nėra užtikrinamas 10 % šildymo sezono trukmės, šiuo atveju patalpos temperatūra buvo $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Tai rodo, kad temperatūra yra svarbi, bet diskomforto pojūtį gali sukelti ir santykinės drėgmės bei spinduliavimo temperatūra. Iš globalios perspektyvos oro greitis daro didelę įtaką komforto lygiui, tačiau šiuo atveju buvo vertinama, kad yra pastovus. Šių parametru d building erinys sukelia sunkumų užtikrinant komforto lygį per visą šildymo sezoną.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Įvertinus patalpos atitvarų šiluminę talpumą nustatyta, kad atitvaros turinčios didžiausią šilumos talpumą gali sumažinti šildymo poreikį 11 % ir vėsos poreikį iki 26 %.
2. Nustatyta, kad patalpos įstiklinimo ploto dydis šaltuoju periodu gali sumažinti šilumos poreikius šildymui, bet turi priešingą poveikį vėsinimui. Naudojantis parametrinės analizės rezultatais parinktas tin-

kamiausias įstiklinimo plotas, kai pasiekiami mažiausi šilumos ir vėsos poreikiai (santykinis įstiklinimo plotas yra 0,7, o sienų laiko pastovioji – 160 h).

3. Suformuoti pastato saulės energiją naudojančios mikroklimato sistemos komponentų derinių elementų dydžiai, kurie užtikrina šiluminį komfortą. Atlikta parametrinė ir ekserginė šių derinių analizės. Nustatyta, kad pasirinkto tinkamiausio derinio energinis efektyvumas šildymo sezonu – 60 %, saulės frakcija – 53 %, o ekserginis efektyvumas – 6 %.
4. Atlikus vertinimą nustatyta, kad siekiant didžiausio saulės energijos kiekio panaudojimo sistemoje nukenčia patalpų šiluminio komforto lygis. Saulės frakcija lygi 26 %, tad šiluminis patalpos komfortas neužtikrinamas apie 14–15 % šildymo sezono trukmės.

Bendrosios išvados

1. Mokslinėje literatūroje gausu atliktų tyrimų, kai atskirai nagrinėjami pasyvieji (PMKPs) ir aktyvieji (AMKPs) pastato posistemiai taikant termodinamikos ir funkcionalumo principus sprendžiant saulės energijos panaudojimo uždavinius. Tačiau trūksta skaitmeninių priemonių, vertinančių šių posistemų parametrų derinį, kai integralia ir galimai optimalia funkcija yra siekiamo komforto termodinaminis ir funkcinis efektyvumas.
2. Sudaryta struktūrizuota mikroklimato sistemos pasyvųjų ir aktyvųjų posistemius jungianti energinė grandinė ir parengti jos komponentus aprašantys algoritmai leido nustatyti jų specifinius funkcionalumo sąlygojamus kiekybinius parametrus.
 - 2.1. Pasitelkus atitvarų (PMKPs) šiluminės talpos vertinimo analitinį skaičiavimo metodą, nustatyta, kad atitvaros, turinčios didžiausią šiluminį talpumą gali sumažinti šildymo poreikį 11 %, o vėsos poreikį iki – 26 %. Skaitinė atvejo analizė parodė, kad hipotetinio pastato patalpa mažiausiai suvartoja reikalingos šildymui ir vėsinimui energijos, kai santykinis įstiklinimo plotas yra 0,7 (14 m²), o sienų laiko pastovioji – 160 h.
 - 2.2. Nustatyta, kad siekiant didžiausio saulės energijos kiekio panaudojimo aktyviame posistemyje (AMKPs) nukenčia patalpų šiluminio komforto sąlygos, t. y. jo lygis nepriimtinais svyruoja patalpoje. Atvejo analizė parodė,

kad saulės frakcijai pasiekus 26 % patalpoje pasirinktas šiluminio komforto lygis (II kategorija) neužtikrinamas apie 15 % šildymo sezono trukmės.

3. Parengtu modeliu atlikus bendrą PMKPs ir AMKPs parametrinę analizę, susietą su kiekybiniais komforto parametrais, buvo gauti saulės energijos panaudojimo procesą integruojantys MKS termodinaminiai ir funkciniai rodikliai.
 - 3.1. Nustatyta pasiekama didžiausia saulės energijos panaudojimo galimybė su aukščiausiu ekserginium efektyvumu ir užtikrinamas užsibrėžtas šiluminis komfortas. Nustatyta, kad pasirinkto tinkamiausio derinio šildymo sezono energinis efektyvumas – 60 %, saulės frakcija – 53 %, o bendras sistemos ekserginis efektyvumas siekė 6 %.
 - 3.2. Sistemos ekserginiam efektyvumui didžiausią įtaką daro saulės kolektorių veikimo principas, dėl kurio eksergijos nuostoliai juose sudaro 71 % bendrų eksergijos nuostolių ir pasirinkus šią technologiją jų paveikti praktiškai neįmanoma.
 - 3.3. Galimuose pasirinkti sprendimuose didžiausią įtaką ekserginiam efektyvumui turi šilumos kaupyklos tūris. Kintant lyginamajam jos rodikliui (m^3 tūris tenkantis m^2 saulės kolektoriui) nuo 0,035 iki 0,095 sistemos bendras efektyvumas kinta iki 11 %.
4. Projektuotojai ir planuotojai, taikydami saulės energiją naudojančių sistemų vertinimo modelį, galės kiekybiškai pagrįstai parengti saulės energiją vartojančių mikroklimato sistemų sprendinius atsižvelgdami į atitvarų šilumos talpumą ir vartotojų ar normatyvų užsibrėžtą komforto lygį.

Literatūra ir šaltiniai

Adakauskas, M. 2015. *Akumuliacinių atitvarų savybių tyrimas*. Magistro darbas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: 58 p.

Agrawal, B.; Tiwari, G.N., 2010. Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions. *Applied Energy*, 87 (2): 417–426.

Al-abidi, A. a. *et al.*, 2013. CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 353–363.

Ala-Juusela, M., 2004. Heating and cooling with focus on increased energy efficiency and improved comfort: Guidebook to IEA ECBCS annex 37 low exergy systems for heating and cooling of buildings summary report. *VTT Tiedotteita – Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*: 3–44.

Alghoul, M. a. *et al.*, 2009. Performance of a dual-purpose solar continuous adsorption system. *Renewable Energy* 34 (3): 920–927.

Al-Sanea, S. a. & Zedan, M.F., 2011. Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass. *Applied Energy* 88(9): 3113–3124.

Al-Sanea, S. a., Zedan, M.F. & Al-Hussain, S.N., 2013. Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls. *Applied Energy* 102: 1063–1070.

Anon, 2011. Thermophysical properties of brines Models. [interaktyvus]. [žrėta 2015 gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.mrc-eng.com/Downloads/Brine Properties.pdf>>.

Asan, H., 2000. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings* 32 (2): 197–203.

Asan, H. & San, Y.S., 1998. Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 28 (2): 159–166.

Ashhab, M.S.S., Kaylani, H. & Abdallah, A., 2013. PV solar system feasibility study. *Energy Conversion and Management* 65: 777–782.

ASHRAE 55 *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Center for the Built Environment at the University of California Berkeley. 2004. 54 p.

Aste, N., Angelotti, A. & Buzzetti, M., 2009. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings* 41 (11): 1181–1187.

Baetschmann, M. & Leibundgut, H., 2012. LowEx Solar Building System: Integration of PV/T Collectors into Low Exergy Building Systems. *Energy Procedia* 30: 1052–1059.

Bajc, T., Todorović, M.N. & Svorcan, J., 2014. CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand. *Energy and Buildings* 98 (1): 39–44.

Biekša, D., 2008. *Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 88 p.

Boelman, E. & Sakulpipatsin, P., 2005. Critical Analysis of Exergy Efficiency Definitions-PART 1: Heat Exchanger at Near-Environmental Temperatures. *Proceedings of the 2nd International Exergy, Energy and Environment Symposium*: 1–6.

Borel, L. & Favrat, D., 2010. *Thermodynamics and Energy Systems Analysis: From Energy to Exergy*: 800 p.

Buker, M.S. & Riffat, S.B., 2015. Building integrated solar thermal collectors – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 327–346.

Bülöw-hübe, H., 2001. *Energy-Efficient Window Systems in Buildings*. Lund: 248 p.

Buratti, C., Ricciardi, P. & Vergoni, M., 2013. HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments. *Applied Energy* 104: 117–127.

EN 15251: *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. European Committee for Standardization. Brussels, 2007. 225 1–52.

Ceylan, I., 2012. Energy and exergy analyses of a temperature controlled solar water heater. *Energy and Buildings* 47: 630–635.

Colangelo, G. *et al.*, 2016. Innovation in fl at solar thermal collectors: A review of the last

ten years experimental results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57:1141–1159.

Dambrauskas, A., 1995. *Simpleksinės paieškos metodai*, Vilnius: Technika, 1995. 230 p.
designbuilder, 2005. EnergyPlus Thermal Comfort. [Interaktyvus]. [žrėta 2014 gruodžio 11 d.]. Prieiga per internetą:
< http://www.designbuilder.co.uk/helpv1/Content/Thermal_Comfort.htm>.

Dincer, I. & Rosen, M., 2007. *Exergy: energy, environment and sustainable development*, Elsevier LTD. Burlington: 576 p.

Doherty, T. J., Arens, E., 1988. Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models. *ASHRAE Transactions* 98 (1): 1371–1385.

Dongellini, M., Falcioni, S. & Morini, G.L., 2015. Dynamic Simulation of Solar Thermal Collectors for Domestic Hot Water Production. *Energy Procedia*, 82: 630–636.

Dovjak, M. *et al.*, 2011. Exergy analysis: the effect of relative humidity, air temperature and effective clothing insulation on thermal comfort. *2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium*: 1–9.

EN ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PVM and PPD indices and local thermal comfort criteria. European Committee for Standardization. Brussels, 2005. 3–60.

Environment and Quality of Life Ventilation, Good Indoor Air Quality. European Consumer Protection Commission: 2003.

EUCO 169/14. 2030 Climate and energy policy framework. European Council. 2014: 1–15.

Komisijos komunikatas europos parlamentui, tarybai, europos ekonomikos ir socialinių reikalų komitetui ir regionų komitetui. ES šildymo ir vėsinimo strategija. Europos komisija. 2016.

Ezan, M.A., Ereğ, A. & Dincer, I., 2011. Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system. *Energy* 36 (11): 6375–6386.

Fanger, P.O., 1970. *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish: 244 p.

Farahat, S., Sarhaddi, F. & Ajam, H., 2009. Exergetic optimization of flat plate solar collectors. *Renewable Energy* 34 (4): 1169–1174.

Faye, M., Lartigue, B. & Sambou, V., 2015. A new procedure for the experimental measurement of the effective heat capacity of wall elements. *Energy and Buildings* 103: 62–69.

Feist, W. *et al.*, 2005. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings* 37: 1186–1203.

Fiaschi, D. & Bertolli, A., 2012. Design and exergy analysis of solar roofs: A viable solution with esthetic appeal to collect solar heat. *Renewable Energy* 46: 60–71.

- Givoni, B., 1998. *Climate considerations in building and urban design*. Reinhold: 464p.
- Gunerhan, H. & Hepbasli, A., 2007. Exergetic modeling and performance evaluation of solar water heating systems for building applications. *Energy and Buildings* 39 (5): 509–516.
- Halawa, E. & van Hoof, J., 2012. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *Energy and Buildings* 51: 101–110.
- Hammad, M. a., 1994. Experimental study of the performance of a solar thermal-photo-voltaic integrated system. *Renewable Energy* 4 (8): 897–905.
- Hasan, A., Kurnitski, J. & Jokiranta, K., 2009. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. *Energy and Buildings* 41 (5): 470–479.
- Ho, C.J., Chen, C.-C. & Yan, W.-M., 2016. Experimental and numerical study on transient thermal energy storage of microencapsulated phase change material particles in an enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 94: 191–198.
- Illanes, R. *et al.*, 2014. Dynamic simulation and modelling of stand-alone PV systems by using state equations and numerical integration methods. *Applied Energy* 135: 440–449.
- ISO 13790 Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. European Committee for Standardization. Brussels, 2008. 174 p.
- Jaber, S. & Ajib, S., 2011. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy* 85 (9): 1891–1898.
- Jafarkazemi, F. & Ahmadifard, E., 2012. Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*: 1–9.
- Jesko, Ž., 2008. Classification of solar collectors. *Engineering for rural development*. Jelgava: 22–27.
- Jin, X. *et al.*, 2012. Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 47: 369–374.
- Jóhannesson, G., 1981. Active heat capacity models and parameters for the thermal performance of buildings. *Lund: Division of Building Technology, Lund Institute of Technology*: 169 p.
- Kiela, K., 2012. Fotovoltiniai elementai. *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4 (1): 56–62.
- Komisijos reglamentas (EB) Nr. 641/2009. 2009 m. liepos 22 d. kuriuo įgyvendinant Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2005/32/EB nustatomi autonominių beriebokšlių apytakinių siurblių ir į gaminius įmontuojamų beriebokšlių apytakinių siurblių ekologin. Europos Sąjungos oficialusis leidinys*: 35–41.
- Kontoleon, K.J., Theodosiou, T.G. & Tsikaloudaki, K.G., 2013. The influence of concrete density and conductivity on walls' thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements. *Applied Energy* 112: 325–337.
- Krüger, E., Suzuki, E. & Matoski, A., 2013. Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings* 66: 364–372.

Laverge, J. & Janssens, A., 2012. Heat recovery ventilation operation traded off against natural and simple exhaust ventilation in Europe by primary energy factor, carbon dioxide emission, household consumer price and exergy. *Energy and Buildings* 50: 315–323.

Lee, J. & Strand, R., 2001. An analysis of the effect of the building envelope on thermal comfort using the EnergyPlus program. [Interaktyvus]. School of Architecture, University of Illinois at Urbana-Champaign. [žrėta 2016 spalio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<http://infohouse.p2ric.org/ref/36/35813.pdf>>.

Li, G., 2015. Energy and exergy performance assessments for latent heat thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 926–954.

Liaison, S. *et al.*, 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE: 54 p.

Ling, H. *et al.*, 2014. Active heat storage characteristics of active–passive triple wall with phase change material. *Solar Energy* 110: 276–285.

Liu, J., Yao, R. & McCloy, R., 2012. A method to weight three categories of adaptive thermal comfort. *Energy and Buildings* 47: 312–320.

Lucia, U., 2013. Adsorber efficiency in adsorption refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 570–575.

Martinaitis, V., 2001. Pastato gyvavimo ciklo termodinaminės analizės modelis. In *Technika*, p. 171.

Martinaitis, V., 2007. *Termodinaminė analizė*, Vilnius: Technika, 208 p.

Martinaitis, V., Pastato ir atsinaujinančio energijos vartojimo tvarumo modelis (PatentMod). Nr. ATE-03/2012,

Martinaitis, V. *et al.*, 2016. The exergy efficiency assessment of heat recovery exchanger for air handling units, using a state property – Coenthalpy. *Applied Thermal Engineering* 108: 388–397.

Mateus, T. & Oliveira, A.C., 2009. Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates. *Applied Energy* 86 (6): 949–957.

McGraw-Hill ed., 1970. *Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering*, la Universidad de Michigan.

Misevičiūtė, V., 2011. *Procesų integravimo vėdinimo įrenginiuose galimybių vertinimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 109 p.

Mori, T. & Kawamura, A., 2014. Design of Solar Water Heating System for Detached House in Cold Climate Area. *Energy Procedia* 48: 1392–1400.

Navarro, L. *et al.*, 2015. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renewable Energy* 88: 1–23.

Nicol, J.F. & Humphreys, M. a., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34 (6): 563–572.

- Nyman, M. & Simonson, C.J., 2005. Life cycle assessment of residential ventilation units in a cold climate. *Building and Environment* 40 (1): 15–27.
- Olesen, B.W. & Parsons, K.C., 2002. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings* 34 (6): 537–548.
- Oliveira, S. de, 2013. *Exergy: production, cost and renewability*. Springer: 338 p.
- Orosa, J. a. & Oliveira, A.C., 2012. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. *Renewable Energy* 37 (1): 89–96.
- Ozyogurtcu, G., Mobedi, M. & Ozerdem, B., 2014. Techno-economic evaluation of a ventilation system assisted with exhaust air heat recovery, electrical heater and solar energy. *Energy and Buildings* 72: 17–23.
- Pathak, P.M., Dongre, A.R. & Shiwalkar, J.P., 2014. Impact of Spatial, Thermal and Lighting Parameters on the Efficiency and Comfort of Users in Indian Workspaces. *Journal of Sustainable Development* 7 (4): 111–123.
- Petela, R., 2003. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy* 74 (6): 469–488.
- Pfleger, N. *et al.*, 2015. Thermal energy storage – overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage. *Beilstein Journal of Nanotechnology* 6:1487–1497.
- Pons, M., 2012. Exergy analysis of solar collectors, from incident radiation to dissipation. *Renewable Energy* 47: 194–202
- Prasanna, U.R. & Umanand, L., 2011. Modeling and design of a solar thermal system for hybrid cooking application. *Applied Energy* 88 (5): 1740–1755.
- Rekstad, J., Meir, M. & Kristoffersen, A.R., 2003. Control and energy metering in low temperature heating systems. *Energy and Buildings* 35: 281–291.
- Ren, J. *et al.*, 2010. Very low temperature radiant heating/cooling indoor end system for efficient use of renewable energies. *Solar Energy* 84 (6): 1072–1083.
- Saitoh, H. *et al.*, 2003. Field experiments and analyses on a hybrid solar collector. *Applied Thermal Engineering* 23 (16): 2089–2105.
- Sekret, R. & Turski, M., 2012. Research on an adsorption cooling system supplied by solar energy. *Energy and Buildings* 51: 15–20.
- SILVA, W. DA, 2016. Milestone in solar cell efficiency by UNSW engineers. [Interaktyvus]. Sidnėjus. [žrėta 2016 gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <<https://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/milestone-solar-cell-efficiency-unsw-engineers>>.
- Simone, A. *et al.*, 2011. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation. *Energy and Buildings* 43 (1): 1–9.
- Stazi, F. *et al.*, 2014. The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible? *Energy and Buildings* 88: 367–383.

- Streckienė, G., 2011. *Kogeneracines jegainės šilumos akumuliacinės talpos veikimo režimu tyrimai*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 144 p.
- Šukys, A., 2005. Matematinės sistemos tyros pradmenys. [Interaktyvus]. [Žrėta 2015 sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.mif.vu.lt/~sukys/Failai/09-1.6.%20skyrius.pdf>>
- Suman, S., Khan, M.K. & Pathak, M., 2015. Performance enhancement of solar collectors—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 192–210.
- Sunliang, C., 2010. *State of the Art Thermal Energy Storage Solutions for High Performance Buildings*. Magistro darbas. University of Jyväskylä Department of Physics: 201 p.
- Szargut, J., Morris, D.R. & Steward, F.R., 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York : Hemisphere: 332 p.
- Thome, B., 1993. *Systems Engineering Principles and Practice of Computer-based Systems Engineering*. Wiley: 416 p.
- Tian, Y. & Zhao, C.Y., 2013. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy* 104: 538–553.
- Tiwari, A. *et al.*, 2009. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes. *Applied Energy* 86 (12): 2592–2597.
- Torío, H., Angelotti, A.; Schmidt, D. 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view. *Energy and Buildings* 41 (3): 248–271.
- Torío, H.; Sc, M., 2007. Exergetic assessment and contribution of solar energy systems to the energy performance of buildings.
- Uba, F.A.; Sarsah, E.A. 2013. Cooling Load Temperature Differential Values For Buildings In Ghana. *Scientific and technology research* 2 (12): 229–235.
- Ulgen, K., 2002. Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings* 34 (3): 273–278.
- Valančius, K., 2006. *Pastato aktyviosios šiluminės talpos įtaka patalpų mikroklimatui bei energijos poreikiams*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 95 p.
- VTT finland, 2004. *Heating and cooling with focuson increased energy efficiency and improved comfort*. Helsinki: 54p.
- Weckowicz, T.E., 2000. Ludwig von Bertalanffy. A Pioneer of General Systems Theory. University of Alberta Center for Systems Research. Canada: 151-152.
- Wee, H.-M. *et al.*, 2012. Renewable energy supply chains, performance, application barriers, and strategies for further development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (8): 5451–5465.

- Yan, C. *et al.*, 2015. A simplified method for optimal design of solar water heating systems based on life-cycle energy analysis. *Renewable Energy* 74: 271–278.
- Zalewski, L. *et al.*, 1997. Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings* 25 (1): 7–18.
- Žėkas, V., 2014. *Sklypo atsinaujinanč ius energijos išteklius naudojan čių technologijų atranko s metodas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 130 p.
- Zhai, X.Q. & Wang, R.Z., 2010. Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage. *Applied Energy* 87 (3): 824–835.
- Zhang, H. *et al.*, 2016. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science* 53: 1–40.
- Zmeureanu, R. & Yu Wu, X., 2007. Energy and exergy performance of residential heating systems with separate mechanical ventilation. *Energy* 32 (3): 187–195.
- Сибиряков, В.Г. & Семенова, Н.Л., 2000. Из прошлого – в будущее технология прогнозирования развития систем с помощью триз.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Martinaitis, V.; Streckienė, G.; Biekša, D.; Bielskus, J. 2016. The exergy efficiency assessment of heat recovery exchanger for air handling units, using a state property – Co-enthalpy, *Applied Thermal Engineering*. Oxford: Elsevier Ltd. Vol. 108, p. 388–397. ISSN 1359-4311.

Martinaitis, V.; Bielskus, J.; Januševičius, K. 2017. Exergy efficiency of ventilation heat recovery exchanger for variable reference temperature, *Mechanika*. Kaunas: Technologija. Vol. 23 (1): 70–77. ISSN 1392-1207.

Januševičius, K.; Bielskus, J.; Martinaitis, V. 2014. Thermodynamic simulation of solar thermal system, *9th International Conference „Environmental Engineering“*, May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers. Vilnius: Technika, p. 1–9. ISSN 2029-7092, ISBN 9786094576409.

Bielskus, J.; Januševičius, K.; Martinaitis, V. 2013. Vakuuminių ir plokščiųjų saulės kolektorių sistemų ekserginių efektyvumų palyginimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos*. Vilnius: Technika. T. 5, nr. 4, p. 404–409. ISSN 2029-2341.

Bielskus, J.; Šiupšinskas, G.; Bielskus, J. 2013. Saulės kolektorių panaudojimas karšto vandens ruošimui daugiabučiuose pastatuose, *Aukštųjų mokyklų vaidmuo visuomenėje: iššūkiai, tendencijos ir perspektyvos*. Alytus: Alytaus kolegija. T. 1, Nr. 2, p. 35–41. ISSN 2029-9311.

Bielskus, J.; Šiupšinskas, G.; Čiuprinskas, K. 2014. Adsorbicinio iki 8 kW vėsos galios įrenginio eksperimentinis efektyvumo tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija*. Vilnius: Technika. T. 6, nr. 4, p. 427–431. ISSN 2029-2341.

Januševičius, K.; Streckienė, G.; Bielskus, J.; Martinaitis, V. 2016. Validation of unglazed transpired solar collector assisted air source heat pump simulation model, *Energy Procedia. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”*, CONECT 2015, 14–16 October 2015, Riga, Latvia. Amsterdam: Elsevier Ltd. Vol. 95 (2016), p. 167–174. ISSN 1876-6102.

Rimdžius, D.; Martinaitis, V.; Bielskus, J. 2016. Neįstiklinto orinio saulės kolektoriaus efektyvaus veikimo tyrimas, *Mokslas - Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija* Vilnius: Technika. T. 8, Nr. 4, p. 443–448. ISSN 2029-2341.

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Bielskus, J.; Januševičius, K.; Martinaitis, V. 2013. Saulės kolektorių sistemos metinių eksperimentinių rodiklių nustatymas, 16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2013 metų teminės konferencijos "Pastatų inžinerinės sistemos", 2013 m. balandžio 25–26 d. straipsnių rinkinys Vilnius: Technika, p. 38–44. 2013. ISSN 2029-7157, ISBN 9786094574665.

Januševičius, Karolis; Bielskus, Juozas; Martinaitis, Vytautas. Thermodynamic simulation of solar thermal system, *9th International Conference “Environmental Engineering”*, May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers CD. Vilnius: Technika, p. 1–9. ISBN 9786094576904.

Summary in English

Introduction

Research problem

Globally, a lot of energy in buildings is consumed to ensure appropriate living and working conditions. In the context of sustainable development as one of the main political principles of the 21st century, this issue is the focus of politics. The Council of Europe constantly raises new goals in order to reduce fuel consumption and the amount of pollutants in the environment. The goal is to replace fossil fuel used for energy with low-carbon fuel (LCF) obtained from renewable energy sources.

The entirety of mechanical devices in a building that ensure indoor thermal and air quality is defined as heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. In the process of maintaining indoor microclimate (comfort), these systems and the building together are called a microclimate system (MCS). Increasing efficient energy use and using renewable energy sources are the main measures to reduce the usage of polluting fuel for buildings and their MCS needs. In order to ensure this, the development of nearly-zero energy buildings and the geophysical development of technologies that use renewable energy is encouraged. Solar microclimate systems are likely the best choice for this as solar energy is a practically inexhaustible energy source. When solving these global energy and environmental issues, it is important to maintain the functionality of MCS in each building, i.e. to ensure the necessary indoor comfort.

There have been a lot of studies conducted in the world the focus on solar microclimate systems, but there is a lack of research that would link passive and active solar

microclimate systems and would systematically combine their efficiency and functionality. Such an integrated assessment would help to properly prepare models of design solutions (size, materials, power and usage costs).

Importance of the thesis

The heating and cooling sector is the largest energy sector in the European Union (EU). In 2012, it accounted for 50% of the EU's final energy consumption (European Commission 2016). Energy and climate goals of the EU are to cut greenhouse emissions by at least 40% compared to 1990 (European Council 2014). Thus, the EU focuses on two: efficient energy use and low-carbon fuel. Efficient energy use is expected to be achieved by encouraging the construction of low-energy buildings. Low-carbon fuel direction, promote the usage of renewable sources. On the other hand, by implementing these goals the EU constantly seeks for society's well-being as well as the goals of global competitiveness. In order to ensure better quality of life and labour productivity, it is important to create a comfortable environment at homes and workplaces. It is directly linked to the product of labour and the employer's results, so during the design process, the functionality and the effect the features of rooms have on employees should be one of the most important reference points. Five requirements set for heating, lighting, space and furniture constitute the functionality of buildings (Pathak *et al.* 2014). Out of these five requirements, thermal comfort has been researched the most thoroughly, is the most scientifically sound and has been parameterised at the most detail. In order to create it, passive (PMCS) and the active (AMCS) climate subsystems are used. PMCS consists of the rooms and the building envelope. It is considered to be passive because it requires a certain amount of energy to be made but its usage does not lead to special energy costs. AMCS usually consists of heating, ventilation, air conditioning, hot water and lighting systems which constantly require energy in order to run (Martinaitis 2001). Such structuration allows to link the functionality of rooms to the technological parameters of MCS using mathematical modelling.

Research object

The research object of the thesis is solar microclimate systems of low-energy buildings.

The aim of the thesis

The aim of this thesis is to determine the thermodynamic efficiency and the correlation that integrates functionality for a low-energy building as a solar microclimate system.

Thesis objectives

In order to meet the aim of the thesis, the following objectives have to be achieved:

1. Implementing the analysis of scientific research relating to solar microclimate systems (SMS) and structurally apply it in the ongoing research.
2. Compiling a SMS energy chain and formalising the thermodynamic (including exergy) efficiency of energy transformations in its components by integrating the quantitative properties and functionality parameters of the system.

3. Creating combinations of components of passive and active subsystems of SMS and assessing the influence of their quantitative indices on the provided comfort.
4. Forming the structure of the integrated assessment model of the thermodynamic efficiency and functionality of SMS that is suitable for the building informational modelling process.
5. Preparing the integrated assessment model of the thermodynamic efficiency and functionality of a low-energy building as SMS.
6. Providing and interpreting the numeric case, obtained by using the prepared assessment model.

The research methodology

In this thesis, the assessment of solar microclimate systems is conducted by using systemic analysis and by applying the specific methods of analysis, such as exergy analysis, Fanger's thermal comfort, parametric analysis and finite elements. In order to achieve the aim of the thesis, computer simulation methods are used: *METEONORM*, *ANSYS*, *TRNSYS* and *MATLAB*. To process the results of the thesis, standard statistical methods are used.

Scientific novelty

1. The algorithm of managing and ensuring indoor air quality developed by the author by solving the reverse Fanger's problem, i.e. the indoor air temperature is obtained as the function of the surface temperature of the building envelope formed by solar radiation.
2. The method that allows to obtain both quantitative and qualitative (exergy) indices of energy transformation processes by assessing these processes in separate components and systems has been developed.
3. The developed assessment model of the potential of using solar energy in low-energy buildings allows to obtain functional design solutions regarding technologies of such buildings and their energy supply systems.

Practical significance of achieved results

This thesis provides an integrated assessment model of the thermodynamic efficiency and functionality of a low-energy building as a solar microsystem. Using this model during the process of planning and designing a building would allow a more reliable preparation of solutions for solar microclimate systems by taking into consideration the thermal capacity of the building envelope and the comfort level set by consumers or standards. Its practical value is especially important in the context of the current development stage of informational modelling of sustainable buildings.

Defended statements

1. Structuring the passive and the active subsystems of a microclimate system into the components of an energy chain leads to the development of algorithms that allow conducting integral parametric analysis of such components linked to quantitative comfort parameters.
2. Reverse Fanger's problem included in the algorithm allows managing the indoor air temperature in accordance with the pursued level of thermal comfort. This method allows managing the level of thermal comfort indoors by using mechanical means.
3. The application of exergy analysis by assessing energy transformation processes in separate components and systems allows obtaining not only quantitative but also qualitative (exergy) indices for these processes.
4. The assessment model for solar microclimate systems (PMCS and AMCS) allows to prepare based on the quantitative solutions for these systems by taking into consideration the thermal capacity of the building envelope and the level of thermal comfort set by consumers or standards.

Approval of the research results

9 scientific articles have been published on the topic of the thesis: two in a scientific journal which is included in the Thomson ISI list (Martinaitis *et al.* 2016), (Martinaitis *et al.* 2017); one in a scientific journal which is included in the ISI Proceedings list (Januševičius *et al.* 2014); five in scientific journals that are included in other databases (Bielskus *et al.* 2013; Bielskus *et al.* 2013; Bielskus *et al.* 2014; Januševičius *et al.* 2015; Rimdžius *et al.* 2016); one in other peer-reviewed scientific publications (Bielskus *et al.* 2013).

Material provided in the thesis was presented in 3 conferences:

1. The International Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul 2015 (ICAME'15), Yıldız, Istanbul, Turkey.
2. The 16th Conference of Young Lithuanian Scientists: Science is the Future of Lithuania („16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“) Vilnius, Technika, 2013.
3. The Role of Higher Education Institutions in the Society: Challenges, Trends and Prospects International Conference („Aukštųjų mokyklų vaidmuo visuomenėje: iššūkiai, tendencijos ir perspektyvos“) Alytus: Alytus College, 2013.

Thesis structure

The thesis consists of the introduction, three chapters, the general conclusions and six appendices.

The volume of the thesis is 133 pages excluding appendices, 88 numbered equations, 63 figures and 4 tables were used in the text. 116 literature sources were used when writing the thesis.

1. Review of thermodynamic and functional analysis of solar microclimate systems

In the first chapter, solar microclimate systems and their assessment methods are reviewed. Microclimate systems (MCS) not only have to use little energy but also ensure their main function, i.e. create a comfortable environment for the end user, so the main goal of MCS is to ensure thermal comfort (Doherty and Arens 1988). Thermal comfort is a mental state that expresses satisfaction in the thermal environment, it is assessed subjectively (Fanger 1970). Thermal comfort has been widely researched, several assessment methods exist but the Fanger's comfort model has been the most comprehensively discussed and interpreted. The most widely used methods are defined in manuals and international standards. The ISO 7730 standard, based on the predicted mean vote (PMV) is calculated in accordance with Fanger's comfort equations and (or) related comfort diagrams. (Doherty and Arens 1988). The ISO 7330 standard does not require a guarantee that the indoor microclimate parameters will ensure 100% of thermal comfort. Due to individual differences it might be difficult to meet the thermal needs of all consumers in the room, but certain separate environment management forms, combined with individual adaptation (apparel, level of activity) (Liu *et al.* 2012) will increase the level of acceptability (Olesen and Parsons 2002).

Solar heating of PMCS buildings by using thermal storage in the walls was a subject of many studies related to the Trombe wall (Zalewski *et al.* 1997), (Jaber and Ajib 2011), (Krüger *et al.* 2013), (Bajc *et al.* 2014), ordinary walls have also received a lot of attention (Aste *et al.* 2009), (Kontoleon *et al.* 2013), (Asan and San 1998), (Al-Sanea and Zedan 2011).

It has been determined that physical thermal processes that take place in the building envelope might reduce the demand for heating energy (Orosa and Oliveira 2012). Some authors claim that passive solar heating combined with energy-saving constructions of a building might reduce thermal needs for heating by up to 30% (Buker and Riffat 2015) and others state that the drop might vary from several per cent to more than 80% (Aste *et al.* 2009).

AMCS systems usually consist of heating, hot water, ventilation, air conditioning (cooling) and lighting systems. This thesis focuses on solar heating and cooling systems.

Solar energy can be transformed into several forms of energy. Currently, two methods of transforming solar energy in various types of buildings are used: sun-to-electricity (PV cells) and sun-to-heat (solar thermal collectors) (Suman *et al.* 2015).

Exergy analysis is used to analyse AMCS systems. This type of analysis is currently gaining popularity in the assessment of renewable energy technologies (Lucia 2013), (Torio *et al.* 2009), it is especially common in the analysis of solar energy conversion devices (Farahat *et al.* 2009), (Jafarkazemi and Ahmadifard 2012). It is applied when analysing thermal comfort in buildings as well (Simone *et al.* 2011), (Dovjak *et al.* 2011). This shows that exergy analysis is the most suitable method for assessing energy systems. However, this method is usually applied to solar transformers instead of the entire energy chain. There are very few or incomprehensive cases of dynamic assessment where exergy efficiency and functionality of a system would be reflected in the long term (a season or a year).

Often only one solar-based technology is assessed in terms of thermal comfort, thus there is a lack of research that would assess the operation and interaction between PMCS and AMCS when solar energy is used integrally.

Research overview suggests that it is purposeful to study the thermodynamic efficiency of microclimate systems, the assessment of which takes into consideration the functional efficiency, and also to prepare a technological assessment model for the interaction between PMCS and AMCS when solar energy is used.

2. Developing the analysis model of the thermodynamic and functional efficiency of solar microclimate system

This chapter presents an integrated assessment model of a low-energy building and its solar energy systems by using which the thermodynamic and functional efficiency is determined. Specific methods of analysis, such as methods of exergy analysis, Fanger's thermal comfort, parametric analysis, and the finite elements are used to assess this model. Models developed by applying systematic analysis on the basis of these methods are combined into one energy chain that constitutes the whole. In order to achieve the purpose of the thesis, computer simulation tools *METEONORM*, *ANSYS*, *TRNSYS* and *MATLAB* are used.

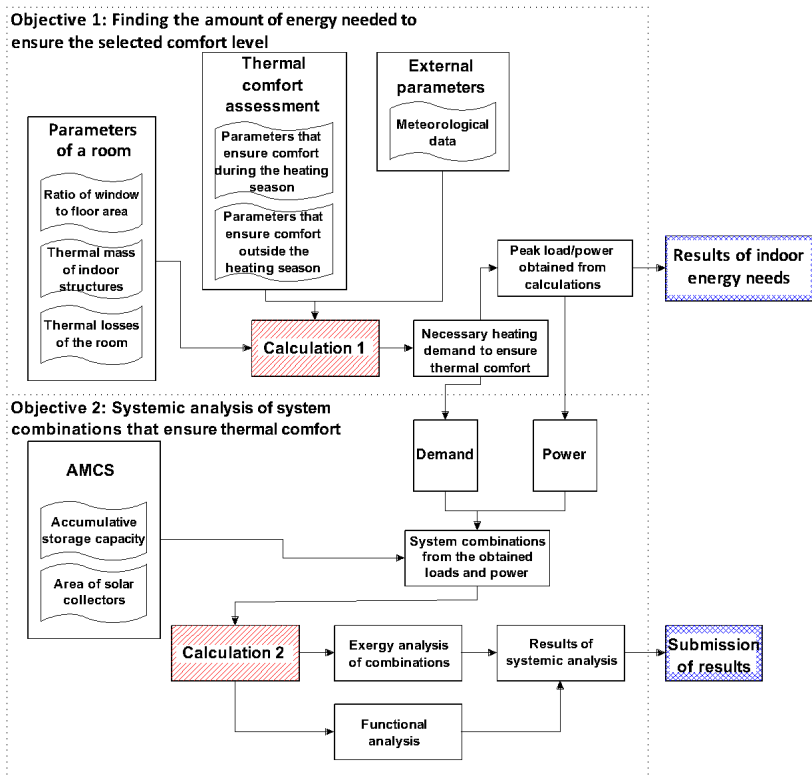


Fig. S2.1. Algorithm of assessing the exergy and functional efficiency of a solar microclimate system

A systemic problem that combines functionality and thermodynamic analysis is solved in the doctoral thesis. To make the structure of the model more detailed, an algorithm for this problem has been developed. It is depicted in Fig S2.1.

Figure S2.1 shows that the entire algorithm is divided into two sections. The first section defines the amount of energy needed to ensure indoor thermal comfort. In the second section, active systems are analysed by applying systemic and exergy analysis. In both sections the method of parametric analysis is used.

In the first section, the search for the best combination of the glazed area and the thermal capacity of a wall is carried out when the lowest amount of energy is needed to heat and cool the room (the search for the minimum). In order to determine this minimum, the following parameters are altered: the active thermal capacity of walls and the glazed area.

In the second stage, the exergy assessment of a room with the best parameters is performed. Parametric analysis is also carried out during this stage which aims at determining the most suitable solar collector and values of the thermal storage and the auxiliary heater when the maximum efficiency (the search for the maximum) and the maximum value of solar fraction are achieved. In order to determine this maximum, the following parameters are altered: the area of solar collectors, the thermal storage capacity and the power of the auxiliary heater.

The main function of the technologies depicted in the diagram in Fig S2.1 and the processes taking place thereof is to ensure that the end-user in the room is satisfied with the thermal environment.

In the thesis the analysis starts with the building. The building is hypothetical and multipurpose; it can be residential or administrative. Its walls comply with the requirements for the walls of a low-energy building.

When buildings are designed in the standard manner, the size of their envelope is taken into consideration when selecting the designed external temperature. When the needs are assessed, it is not considered. Storage and emission of solar energy indoors is not a manageable process, i.e. it takes place automatically. This process is the first measure that helps to passively control the indoor thermal comfort (PMCS). In the thesis it is considered that the analytical method will be used to assess the thermal capacity. The credibility of this method is assessed by applying numerical modelling software.

The analytical assessment has been carried out by using the international ISO 13786:2007 standard. This assessment was conducted by using the *MATLAB* computer program.

The methodology of the international standard (ISO 13786:2007) views one-layered and multi-layered walls as credible. The research conducted by other authors supports this (Faye *et al.* 2015). However, when multi-layered non-uniform walls are assessed, premises that lead to errors are assumed. The experimental method is the most suitable to assess the margins of tolerance of such errors but it is expensive and time-consuming. Thus experimental measuring might be replaced with the numerical model. Numerical model has been compiled using the *ANSYS* computer program. In order to determine the thermal capacity and the value of wave suppression, the outdoor air temperature has to be altered according to the sinusoidal wave. During the calculation process, changes of the temperature of the internal side of the wall are monitored.

Having completed the calculations using the finite element method program, the software produces the output data: the temperatures of the internal and external surfaces as well as the amplitudes and period of thermal flow fluctuations. The obtained output data is processed in accordance with the methodology provided by (Faye *et al.* 2015) and the result is compared to the one obtained by using the analytical method.

Using the PMCS calculation methods, we arrive at a complex solution on which the values of the elements of a solar microclimate system as well as the efficiency of the system depend. The system of a solar AMCS is provided in Figure S2.2.

Figure S2.2 shows that the analysed system consists of basic and auxiliary subsystems. The basic subsystems are: solar collectors, the thermal storage and the ventilation device while the auxiliary systems are: the auxiliary heating source, heating system and circulatory pumps. The fundamentals of the thermodynamic (exergy) analysis are used to assess the efficiency of all subsystems and the system. Efficiency indicates the level of perfection of a system which can be increased. In the thesis, exergy analysis of a system the value of which depends on the functional efficiency of the system is carried out.

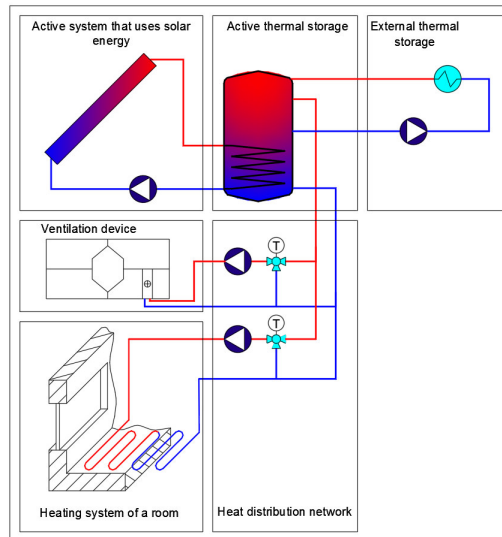


Fig. S2.2. Active solar microclimate system

The algorithm depicted in Fig S2.1 shows that calculations of comfort are completed in two stages. In both stages Fanger's thermal comfort assessment model is being used because it is the most widely spread at the moment. This model uses PMV to complete the assessment like the majority of standards (EN ISO 7730 2005), (Cen 2007), (ASHRAE 55 2004). In order to assess how passive and active energy storage affects functional efficiency, parametric analysis has to be carried out. There is a lack of holistic studies that link active and passive energy storage by using thermal tanks and the structural size of the building as well as active and passive usage of solar energy via solar collectors and glazing. Parametric analysis allows holistic assessment of the system.

In thermal comfort calculations it is assumed that the metabolism of a person equals 1.2 met or 70 W/m² and that the level of clothing is clo or 0,155 m²·°C/W. The desired category of thermal comfort in the thesis is II which matches the normal level of expectations and is used in new and renovated buildings, i. e. PPD ≤ 10 %.

The assessment algorithm of exergy and functional efficiency of solar MCS is divided into two stages (see Figure S2.1). As a result, the parametric analysis is carried out in the first and the second stage. The goal of the parametric analysis of the first stage is to determine the most suitable ratio of the size of the wall capacity to the glazed area when the lowest energy costs of heating and cooling are achieved.

In the first stage, two parameters are altered: the glazed area of the room; the size (thermal capacity) of the wall (Fig. S2.3).

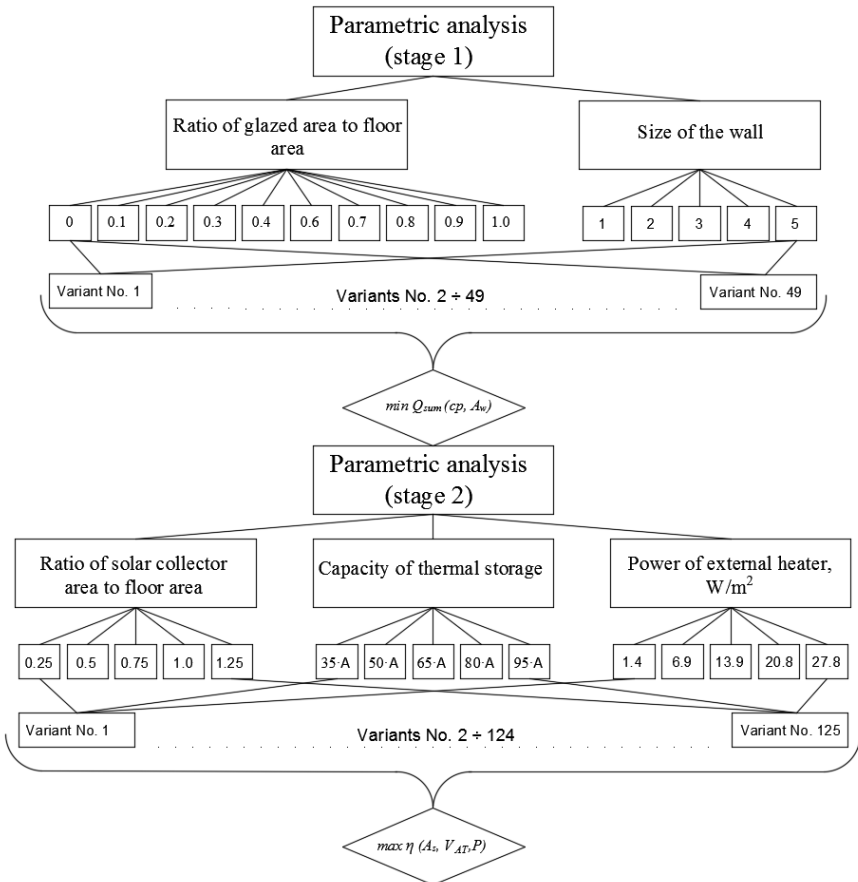


Fig. S2.3. The parametric analysis application algorithm

In the parametric analysis, the glazed area of the room is one of the adjustable parameters which is expressed in the relative glazed area (the ratio of the windows to the floor area (20 m²)). The relative window areas used in the analysis are: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5,

0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1. The windows are oriented towards the South. The other variable value in the parametric analysis is constructions with varying thermal capacity. 5 construction combinations are compiled for the analysis by ranking the walls from very light to heavy.

After determining the most suitable ratio of the wall capacity to the glazed area when the lowest energy costs of heating and cooling are achieved, the second stage of the assessment using the algorithm with the selected parameters is carried out.

In the second stage of the parametric analysis the values of heat production sources are altered, i. e. the area of solar collectors and the power of the heat source (Fig. S2.3). The dependence of the efficiency of the system on the thermal storage capacity is also analysed. The area of solar collectors is provided as a ratio to the floor area of the room for the parametric analysis. The ratios of the area are: 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 and 1.25 (the floor area of the room is 20 m²). Various sources recommend different sizes of the storage, so it is essential to determine the size of the storage and the area of solar collectors that are the most suitable for the selected comfort level. The capacity of the storage is linked to the area of solar collectors and the capacities are assessed in the parametric analysis: 35·A, i.e. 35 litres of storage capacity for 1 m² of solar collectors; 50·A; 65·A; 80·A; 95·A.

This analysis aims to determine the effect of the size of the source, so it is assessed as well. The power values of the external heater assessed in the thesis are: 1.4 W/m², 6.9 W/m², 13.9 W/m², 20.8 W/m², 27.8 W/m². The goal of the second stage of the parametric analysis is to find the combination of solar collectors, the value of capacity and the power of the auxiliary heater when the highest exergy efficiency and the highest amount of solar energy utilisation (solar fraction) is achieved.

The parametric analysis and the exergy efficiency calculation are carried out using the combination *TRNSYS* and *MATLAB* program.

3. The results of the thermodynamic and functional efficiency of a solar microclimate system

To test the application of the methodology of the first stage, a parametric analysis was conducted. A building located in Vilnius city was selected for the analysis, so as a result the climate data for this city is used. The data required for calculations have been retrieved from the meteorological data array generated by the *METEONORM* computer program. The meteorological data for the selected location is generated based on the real data provided by the nearest meteorological stations (averages of 10 years) using the method of interpolation.

This thesis aims to assess the effect of an active thermal capacity of constructions on the seasonal heating and cooling needs of a room. Firstly, the analytical results prepared in accordance with the international ISO 13786:2007 standard were tested and the calculations were conducted using the *MATLAB* computer program. Numeric assessment is conducted by the *ANSYS WORKBENCH* computer calculation program. The reliability of the model is tested in accordance with the studies conducted by authors (Jin *et al.* 2012). By using the equation it has been determined that the numeric assessment results for the wave assessment factor and wave delay vary 0.44% and 1.1%, respectively, from the results provided by Jin. The results of the compiled numeric model correspond with the calculation results provided by (Jin *et al.* 2012), varying only slightly. As a result, we can

state that the assessment of the numeric model using the *ANSYS WORKBENCH* program is reliable and its credibility does not raise any doubts.

Having assessed the capacity of the active thermal layer of the walls, the *TRNSYS* model is compiled where a room with walls with different features is created. The goal of this model is to determine the variation of heating and cooling needs under different thermal capacities of walls and varying glazed area. During the first stage of the of heating and cooling demand assessment, the indoor air temperature is determined by applying the thermal comfort calculation model, i.e. the management of indoor air quality based on the thermal comfort model. The relative glazed area is altered from 0 to 1. In this thesis it is assumed that the specific thermal losses of a room do not change and equal 20 W/K. These losses are set as the average losses when the relative glazed area varies from 0 to 1. Charts compiled under the assumption that the specific thermal losses are at 20 W/K are provided below.

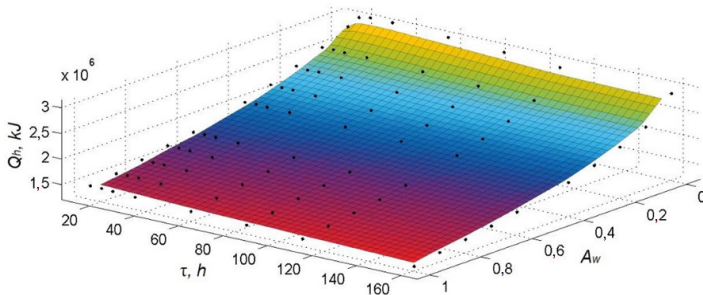


Fig. S3.1. Heating demand during the heating season when $H = 20$ W/K

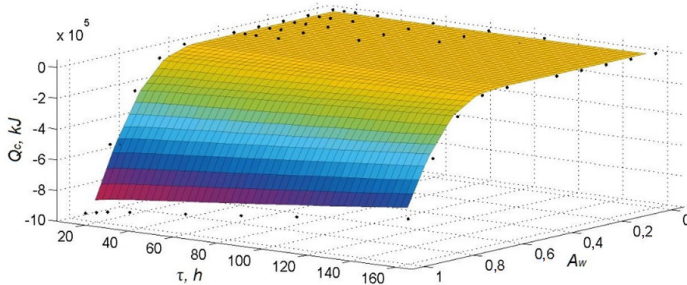


Fig. S3.2. Cooling demand during the cooling season when $H = 20$ W/K

Figure S3.1 shows the dependence of thermal losses on the ratio of the glazed area to the floor area and the thermal capacity of the active layer of the walls of the room (given as the time constant) when the specific thermal losses of the room equal 20 W/K. This dependency shows that as the thermal capacity of walls go up, the energy demand for heating drops. It is also noted that the energy demand decreases when the glazed area increases because the solar radiation that enters the room through windows heats up the room and its excess amount is accumulated in the walls. The thermal capacity of the walls reduces the heating demand of a room. Choosing walls with the highest thermal capacity

and the largest glazed area might reduce the energy demand for heating by 11%, compared to low-capacity walls.

The cooling season is just as important, so Figure S3.2 depicts the cooling season demands. Despite the demand for cooling being provided in this thesis, the thermodynamic analysis of the system has not been conducted.

The dependency shown in Fig. S3.2 demonstrates that as the thermal capacity of walls goes up, the energy demand for cooling drops. It can also be seen that as the glazing area increases, the demand for cooling grows, because having entered through transparent partitions solar radiation heats up the room and the more radiation enters the room, the more energy is needed for cooling. Choosing the walls with the highest thermal capacity and the largest glazed area might reduce the energy demand for cooling by 26 %, compared to low-capacity walls.

Fig. S3.1 and S3.2 demonstrate opposing trends regarding the glazed area, so optimisation is applied in order to select the thermal capacity of the wall and the area of windows when the total demand for heating and cooling is at its lowest. Figure S3.3 depicts the total energy demand for heating and cooling.

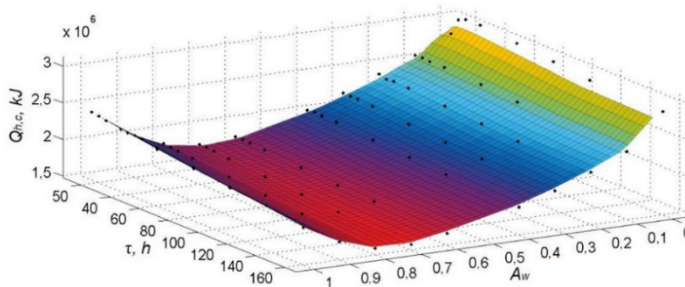


Fig. S3.3. Annual heating and cooling demand when $H = 20$ W/K

Having optimised, it was determined that the lowest total energy usage is achieved when the time constant (τ) is 150 h and the relative glazed area of windows is 0.7. This glazed area is sufficient for a person to be satisfied with the surroundings.

Completing the assessment of stage one (Fig. S2.1.) has resulted in optimal values of the thermal capacity of the wall and the glazed area of the room in a hypothetical building which are used in stage two. In stage two, the efficiency of an active solar microclimate system (Fig. S2.2) is assessed during the heating season.

In stage two, a parametric analysis of systems is conducted in which the area of solar collectors, the size of the accumulative storage and the power of the auxiliary heater are altered (Fig. S2.3). For the purpose of this analysis, a model was compiled using the TRN-SYS program which conducted system calculations. Having completed the calculations, the program creates the output file in the *.CSV format where the flow temperature, debits, ambient temperature and solar radiation entering and exiting the devices are provided for every 12 minutes. The output file consists of several thousand lines of code which process the data automatically using the *MATLAB* computer program.

Figure S3.4 shows the dependency of energy efficiency on the relative solar collector area (A_s) and the power of the auxiliary heater per 1 m² (P).

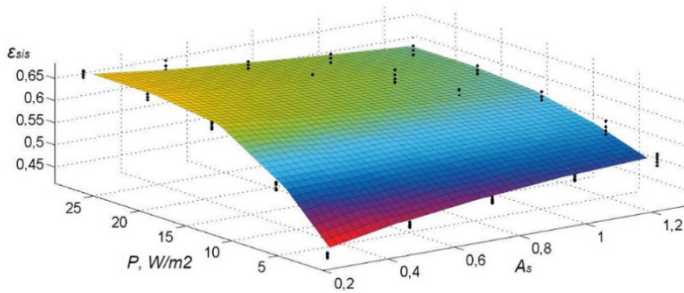


Fig. S3.4. The dependency of the change of energy efficiency on the solar collector area and the power of the auxiliary heater

Fig. S3.4 shows that the energy efficiency of a system goes up as the power of the auxiliary heater goes up and as the solar collector area goes down. This trend is noticed due to the fact that the power of the auxiliary heater equals 1. We can also note that the energy efficiency varies from 45% to 65%. A similar trend with regards to the exergy efficiency of the system is also noticed (Figure S3.5).

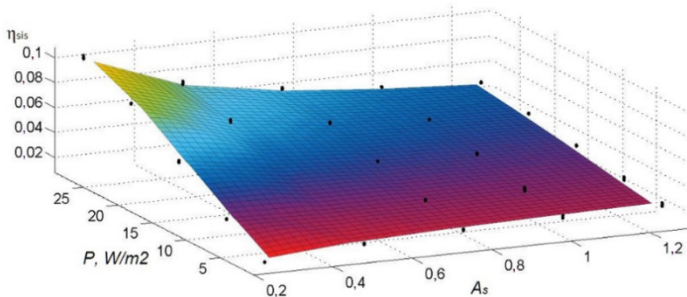


Fig. S3.5. The dependence of the change of exergy efficiency on the solar collector area and the power of the auxiliary heater

Fig. S3.5 shows that the exergy efficiency of a system goes up as the power of the auxiliary heater goes up and as the solar collector area goes down. Having assessed the quality of the energy, the obtained exergy efficiency varies from 2% to 9% which is up to 22 times lower than the energy efficiency. It is also noted that the change of exergy gradually changes compared to the energy efficiency.

The opposite trend is noticed regarding the value of the solar fraction (Figure 3.6).

Fig. S3.6 shows that the solar fraction goes up as the solar collector area goes up and as the power of the auxiliary heater goes down which complicates the search for the best combination of the elements in the system.

It has been determined that when the power of the auxiliary heater is the lowest ($1.4 W/m^2$), the storage capacity increases the efficiency, especially if the relative solar collector area is at least 0.5. It can be stated that the storage capacity is a very important component in the system on which not only the reliability but also the efficiency of the

system depends. As its comparative index (m^3 of capacity for m^2 of the solar collector) fluctuates from 0.035 to 0.095, the total efficiency of the system changes up to 11%.

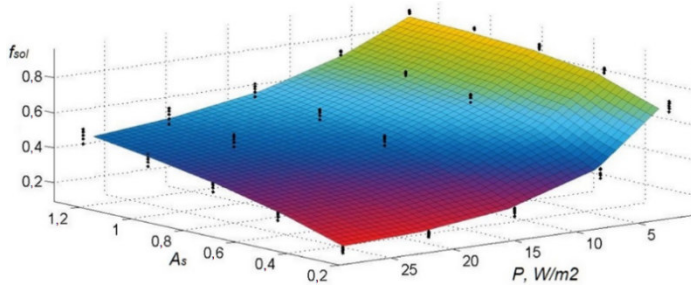


Fig. S3.6. The dependence of the change of solar fraction on the solar collector area and the power of the auxiliary heater

After the parametric analysis is completed and the exergy efficiency of all variations is assessed, the optimisation of the relative area of solar collectors is conducted in order to determine the thermal capacity and the value of the auxiliary source when the highest exergy efficiency and solar fraction are achieved. The desired comfort level which is at 10% ($\text{PPD} \leq 10\%$) also restricts this case.

It has been determined that when the weighting coefficient of the solar fraction and the efficiency of a system are identical, the optimal relative area of solar collectors is 1.25 m^2 , the thermal capacity is 0.95 per 1 m^2 and the power of the auxiliary heater is 20 W/m^2 (in all climatic cases the established level of comfort is ensured).

It has been found that the energy efficiency of the most suitable combination during the heating season is 60%, the solar fraction is 53% and the total exergy efficiency of the system reaches 6%.

The lowest exergy efficiency of AMCS is in November and March (4%) and the highest is reached in December (10%). The total exergy efficiency of the system during the heating season reaches 6%.

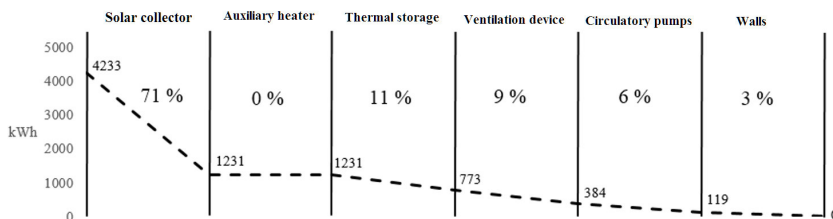


Fig. S3.7. Exergy loss chain of a system

In Figure S3.7 the exergy loss chain of a system is depicted. To the right of the graph it is indicated how much exergy was supplied to the entire system (4233 kWh) and then it is indicated how much of it was lost compared to the amount supplied to the entire system. It is demonstrated that the exergy losses of solar collectors constitute as much as 71% of

the total exergy losses of the entire system. The auxiliary heater does not suffer losses because the heater studied in the thesis has the efficiency of 1. The amount of losses in the tank is slightly lower, amounting to 11%, in the ventilation device they amount to 9%, in circulation pumps – 6% while the exergy losses that occur through the walls constitute merely 3% of all losses. It can be stated that the improvement of the system should start with elements that cause the greatest losses, in this case it is the solar collectors.

A separate study which aims to determine the dependence of the thermal comfort on the solar collector area, the thermal capacity of the wall and the power of the auxiliary heater is also conducted. The results are provided by using the time constant τ which defines the thermal capacity of a wall, the specific solar collector area (the ratio of solar collector area to the floor area) and the power of the auxiliary heater per 1 m². In the assessment the results of the parametric analysis were used where 1 met = 58 W/m² ir 1 clo = 0,155 m²·°C/W were used in the calculations. The results were processed using the *MATLAB* computer program.

Having completed the calculations, a nomogram was drawn which can be used to predict a more efficient selection of design parameters during the design process of a building and solar microclimate systems.

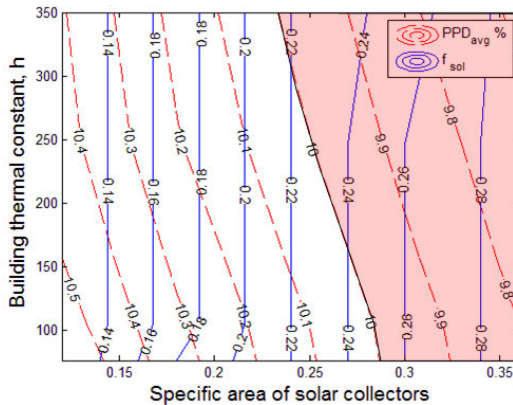


Fig. S3.8. Changes of the PPD and the solar fraction (f_{sol}) when the power of the heat source is 22.5 W/m²

Fig. S3.8 depicts the dependency of the PPD_{avg} and f_{sol} on the same parameters when the designed power of the heat source equals 6/8 of the needed power. The turning-point can be identified in this chart: while the thermal constant and the specific solar collector area keeps increasing, the PPD_{avg} becomes acceptable and the number of the dissatisfied people drops below 10% (Fig. S3.8). To the right of the limit of $PPD_{avg} = 10\%$ (the shaded area) we can see the acceptable conditions. In this case, the highest possible fraction equals 0.26. Under these conditions, the conditions for comfort are not ensured for about 14% to 15% of the heating season.

Having completed the analysis of the results we can claim that the combination of a greater thermal mass and the specific solar collector area helps to reduce the power of the external heat source needed for indoor heating but worsens the level of thermal comfort.

General conclusions

1. There have been a lot of studies provided in scientific literature where the passive (PMCS) and active (AMCS) subsystems of a building are analysed in accordance with the thermodynamic and functionality principles in solving the tasks relating to solar energy use. However, there is a lack of digital tools that assess the parametric combinations of these systems under the condition that the integral and likely optimal function is achieving the thermodynamic and functional efficiency of the desired comfort.
2. A structured energy chain, combining the passive and active subsystems of a microclimate system, and algorithms describing its components have been compiled, allowing to determine their specific quantitative parameters conditioned by functionality.
 - 2.1. Using the analytical calculation method of assessing the thermal capacity of the building envelope (PMCS), it has been determined that walls with the highest thermal capacity can reduce the heating demand by 11% and the cooling demand by up to 26%. The numeric case study demonstrated that the room in a hypothetical building uses the lowest amount of energy required for heating and cooling when the relative glazed area is 0.7 (14 m²) and the time constant for walls is 160 h.
 - 2.2. It has been determined that in order to achieve the most solar energy content utilization in the Active Subsystem (AMCS), the indoor thermal comfort conditions of hate, I.E. The level of thermal com-fort fluctuates Unacceptable. The case study has shown That When The solar fraction Reaches 26%, the thermal comfort level selected for the room (category II) is not ensured for about 15% of the heating season.
3. The joint parametric analysis of PMCS and AMCS, linked to the quantitative comfort parameters, conducted using the compiled model has resulted in thermodynamic and functional indices for MCS that integrate the solar energy utilisation process.
 - 3.1. The highest possible opportunity to use solar energy with the highest exergy efficiency and the highest ensured thermal comfort has been determined. It has been found that the energy efficiency during the heating season of the most suitable selected combination is 60%, the solar fraction is 53% and the total exergy efficiency of the system reaches 6%.
 - 3.2. The operating principle of solar collectors has the biggest effect on the exergy efficiency of a system. Due to this principle the exergy losses in the collectors constitute 71% of the total exergy losses and it is impossible to affect them having chosen this technology.
 - 3.3. Among the possible solutions, the thermal storage capacity has the biggest effect on the exergy efficiency. As its comparative index (capacity m³ for m² of the solar collector) fluctuates from 0.035 to 0.095, the total efficiency of the system varies by up to 11%.
4. When applying the assessment model on systems that use solar energy, designers and planners will be able to prepare based on the quantitative solutions for solar microclimate systems, taking into consideration the thermal capacity of the walls and the comfort level set by consumers or standards.

Priedai³

A priedas. Atitvaros aktyvaus šilumos sluoksnio nustatymo metodika paremta tarptautiniu standartu ISO 13786:2007

B priedas. Šiluminio komforto vertinimo metodika paremta tarptautiniu standartu EN ISO 7730 2005

C priedas. Šiluminio komforto vertinimo metodika paremta tarptautiniu standartu EN ISO 7730 2005

D priedas. Ekserginių rodiklių skaičiavimas

E priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Juozas BIELSKUS

SAULĖS ENERGIJĄ NAUDOJANČIOS MIKROKLIMATO
SISTEMOS TERMODINAMINIO IR FUNKCINIO
EFEKTYVUMO TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Mechanikos inžinerija (09T)

THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL EFFICIENCY
ANALYSIS OF SOLAR ENERGY USING INDOOR
CLIMATE SYSTEM

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2017 03 24. 12,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino BJ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius