VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Violeta MISEVIČIŪTĖ

PROCESŲ INTEGRAVIMO VĖDINIMO ĮRENGINIUOSE GALIMYBIŲ VERTINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ENERGETIKA IR TERMOMINŽINERIJA (06T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Konsultantas

prof. dr. Egidijus Saulius JUODIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 1946-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-066-7

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2011
© Violeta, Misevičiūtė, 2011
vmis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Violeta MISEVIČIŪTĖ

EVALUATION OF POSSIBILITIES FOR PROCESSES INTEGRATION IN VENTILATION EQUIPMENT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENERGETICS AND POWER ENGINEERING (06T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Vytautas MARTINAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T).

Consultant

Prof Dr Egidijus Saulius JUODIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos procesų integracijos metodo taikymo galimybės sprendžiant efektyvaus energijos vartojimo pastatų inžinerinėse sistemose problemas. Tarp pastato inžinerinių sistemų darbe išskiriamos ženkliu energiją naudojančios, mikroklimatą pastatuose formuojančios sistemos. Klasikiniai tyrimo metodai, skirti šilumos mainams šilumokaičiuose, kurie atlieka šilumos perdavimo funkciją, nagrinėti pateikia gana ribotus sprendinius, kaip efektyviai naudoti energiją juose.

Pagrindinis disertacijos tikslas – įvertinti procesų integravimo metodo taikymo galimybes viešųjų pastatų inžinerinių sistemų termodinaminiam efektyvumui nustatyti ir gerinti. Disertacijoje taip pat siekiama derinti procesų integracijos galimybes inžinerinėse sistemose siekiant minimizuoti eksergijos srautus jose.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: probleminių, energinio efektyvumo požiūriu, pastato inžinerinių sistemų, įrenginių ir procesų jose nustatymas, vėdinimo sistemų projektinių sprendimų ypatybių nustatymas, algoritmo, skirto procesų eksergijos sąnaudoms mažinti pastato inžinerinėse sistemose sudarymas derinant termodinaminės ir Pinch analizės metodus.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autorės paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta metodų, skirtų procesų integracijai inžinerinėse sistemose, apžvalga, tų metodų privalumai, trūkumai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje aptariama metodika, siejama su procesų inžinerinėse sistemose integravimu. Trečiajame skyriuje tiriamos vėdinimo taip pat ir kitų inžinerinių sistemų integracijos galimybės. Ketvirtajame skyriuje siūlomas algoritmas procesams minėtose sistemose integruoti.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: vienas – žurnale, įtraukta į ISI Web of Science sąrašą, vienas – ICONDA duomenų bazėje referuojamame žurnale bei 4 tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose.

Abstract

The dissertation investigates the issues of efficient energy use in building engineering systems possibilities by applying processes integration. Indoor climate formation systems are indicated as signally energy use building engineering systems. Traditional methods for evaluation of heat transfer in heat exchangers tender limited solutions for efficiency use of energy in them.

The main object of dissertation is to evaluate processes integration method application possibilities for determination and improving of public buildings engineering systems. The dissertation also focuses on combine the possibilities of processes integration in building engineering systems with minimizing exergy streams in the systems.

The paper approaches a few major tasks: determination of problematic building engineering systems, equipment and processes by viewpoint of energy efficiency, analysis of ventilation design solutions, creation of algorithm for exergy input minimizing in building engineering systems processes by combination of thermodynamical and Pinch analysis methods.

The dissertation consists of four parts including Introduction, 4 chapters, Conclusions and References.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises used literature. There is presented review of methods for processes integration in building engineering systems, advantages, disadvantages. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered. Chapter 2 presents methodology for processes integration in building engineering systems. Chapter 3 investigates the possibilities to integrate processes in ventilation as well as in other building engineering systems. Chapter 4 suggests the algorithm for integration of processes in mentioned systems.

6 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: one article – in the journal quoted by ISI Web of Science data base, one article – in the journal quoted by ICONDA data base and four articles – in proceedings of international and national conferences.

Žymėjimai

Santrumpos

AMS – aktyvios mikroklimato sistemos;
ATD – antrasis termodinamikos dėsnis;
GCA – gyvavimo ciklo analizė;
MKS – mikroklimato kondicionavimo sistemos;
PAVS – pastato automatizuoto valdymo sistema;
PA – Pinch analizė;
PTD – pirmasis termodinamikos dėsnis;
PI – procesų integracija;
PMS – pasyvios mikroklimato sistemos;
PT – Pinch taškas;
PTK – Pinch taškas karštiesiems;
PTŠ – Pinch taškas šaltiems.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	3
Tyrimų objektas.....	4
Darbo tikslas.....	4
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
 1. PROCESŲ INTEGRACIJOS PASTATO INŽINERINĖSE SISTEMOSE TYRIMŲ APŽVALGA	 9
1.1. Procesų pastato inžinerinėse sistemose integralumas	9
1.2. Šiluminių procesų integracija	12
1.3. Metodai procesų integracijai	14
1.3.1. Termodinaminė (ekserginė) analizė	14
1.3.2. Procesų integracijos metodas.....	16

1.3.3. Metodų, naudojamų procesų integracijai, palyginimas	17
1.4. Šilumokaičiai pastato inžinerinėse sistemose, juose vykstantys procesai ir jų tyrimo metodai.....	19
1.5. Procesų ir įrenginių, naudojamų pastato inžinerinėse sistemose, ekserginis naudingumas bei integralumas.....	24
1.6. Pirmojo skyriaus apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas	26
 2. PROCESŲ INTEGRACIJOS NAUDOJIMO PASTATŲ INŽINERINĖSE SISTEMOSE YPATYBĖS.....	27
2.1. Nagrinėjama sistema	28
2.2. Energijos, naudojamos mikroklimatą formuojančiose sistemose, poreikis	36
2.3. Faktoriai, turintys įtakos energijos naudojimui pastato inžinerinėse sistemose	39
2.3.1. Klimato sąlygų įtaka pastato energijos poreikiui.....	39
2.3.2. Pastato automatizuoto valdymo sistemos ir jų nauda procesų integracijai	41
2.4. Procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose Pinch analizės taikymas ...	41
2.5. Atliekinės šilumos srantai pastato inžinerinėse sistemose vykstančiuose procesuose	43
2.6. Antrojo skyriaus apibendrinimas.....	45
 3. VĖDINIMO SISTEMŲ PROCESŲ INTEGRACIJOS REZULTATŲ ANALIZĖ ..	47
3.1. Vėdinimo įrenginio eksergijos poreikių kitimas orui šildyti šildymo sezono metu	48
3.2. Vėdinimo sistemų procesų integracijos Pinch analizės metodu seka	52
3.3. Vėdinimo sistemų šilumokaičių formavimas Pinch analizės pagrindu	65
3.4. Atliekinės šilumos srautų taikymas procesų integracijai vėdinimo sistemose ..	75
3.5. Integruotų procesų energijos ir eksergijos poreikių analizė	81
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	84
 4. ALGORITMAS PROCESŲ INTEGRACIJAI PASTATO INŽINERINĖSE SISTEMOSE	87
4.1. Pastatų energinio naudingumo ryšys su pastate suvartojama energija	88
4.2. Algoritmas procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose	89
4.3. Rekomendacijos procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose	92
4.4. Gautų rezultatų palyginimas su kitais tyrimais.....	92
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados	94
 BENDROSIOS IŠVADOS	97
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	99
 AUTORĖS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	107

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Importance of the thesis	3
The object of research	4
The goal of the thesis.....	4
The tasks of the thesis	4
Research methodology	4
Importance of scientific novelty	5
Practical significance of achieved results	5
The defended statements	5
Approval of the results	6
Dissertation structure.....	7
 1. SURVEY OF THE RESEARCH WORKS OF PROCESSES INTEGRATION IN BUILDING ENGINEERING SYSTEMS.....	 9
1.1. Integrity of processes in systems	9
1.2. Integration of thermal processes.....	12
1.3. Survey of methods for processes integration.....	14
1.3.1. Thermodynamical (exergy) analysis.....	14
1.3.2. Processes integration method	16
1.3.3. Comparison of methods for processes integration.....	17
1.4. Heat exchangers, processes in building engineering systems and their analysis methods.....	19
1.5. Thermodynamical efficiency and integrity of processes and equipments of the building engineering systems	24
1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of tasks of dissertation.....	26

2. PROPERTIES OF PROCESSES INTEGRATION USE IN BUILDING ENGINEERING SYSTEMS	27
2.1. Research object	28
2.2. Demand of energy used for microclimate forming systems	36
2.3. Indicators those affect energy use in building engineering systems	39
2.3.1. Infuence of climate conditions to energy demand	39
2.3.2. Building management systems and their affect on processes integration...	41
2.4. Application of Pinch analysis for processes integration of building engineering systems	41
2.5. Waste heat of processes in building engineering systems	43
2.6. Summary of the second chapter	45
3. ANALYSIS OF VENTILATION SYSTEMS PROCESSES INTEGRATION RESULTS	47
3.1. Air handling unit exergy demand change for air heating during the heating season	48
3.2. Sequence for Pinch analysis of ventilation systems‘ processes integration.....	52
3.3. Formation of ventilation system‘ heat exchanger using Pinch analysis	65
3.4. Application of waste heat streams for processes integration of ventilation systems	75
3.5. Analysis of energy and exergy analysis for processes integration	81
3.6. Conclusions of the third chapter	84
4. ALGORITHM FOR PROCESSES INTEGRATION IN BUILDING ENGINEERING SYSTEMS.....	87
4.1. Relation of building energy perfomance to the energy consumption	88
4.2. Algorithm for processes integration in building engineering systems.....	89
4.3. Recomendations for processes integration in building engineering systems.....	92
4.4. Comparison of obtained results with other research.....	92
4.5. Conclusions of the fourth chapter.....	94
GENERAL CONCLUSIONS	97
REFERENCES	99
LIST OF AUTHOR‘S PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	107

Įvadas

Problemos formulavimas

Pastato inžinerinės sistemos energetiniu požiūriu yra įvairialypės. Šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo, šilumos gamybos, karšto vandens ruošimo ir apšvietimo sistemose termodinaminiu požiūriu vyksta įvairaus temperatūrinio lygio šilumos, masės mainų, tekėjimo bei darbo procesai.

Termodinaminiu požiūriu efektyvesnės tos pastato inžinerinės sistemos, kuriose šilumos mainai vyksta esant nedideliems sistemų veikimą sukeliantiems temperatūrų skirtumams. Galima teigti, kad tradicinėse energetinėse sistemose neefektyviai išnaudojamas turimas potencialas energijai taupyti, nes šilumos mainams naudojami aukštų temperatūrų šilumnešiai (virš 100 °C), nors galima būtų panaudoti žymiai žemesnių parametrų šilumnešius analogiškiems šilumos mainams vykdyti. Be to, pastato inžinerinės sistemos dažniausiai projektuojamos pavieniui, individualiai, nepakankamai susiejant sistemų, jas sudarančių įrenginių ir juose vykstančių procesų tarpusavio veikimą. Vadinas, skiriamas nepakankamas dėmesys kompleksiniam pastato inžinerinių sistemų vertinimui, t. y. tų sistemų procesų integralumui. Toks vertinimas galėtų išspręsti vėliau, pastato inžinerinių sistemų eksploatacijos metu, atsirandančias problemas, visų pirma dėl nesuderintų pastate esančių sistemų veikimo susidarančias didesnes šilumos ir elektros sąnaudas.

Viešųjų pastatų mikroklimatą formuojančiose inžinerinėse sistemose slypi neišnaudotas energijos taupymo potencialas (30 %) (Europos Bendrijų Komisija 2006). Naudojant sparčiai plintančią viso pastato integruoto projektavimo proceso koncepciją siekiama užtikrinti, kad būsimieji pastatai būtų sveikesni, tausojantys aplinką ir darnūs. Šildymo ir vėdinimo sistemos išlieka pagrindinėmis pastatuose energiją vartojančiomis sistemomis, taip pat auga energijos poreikis viešiesiems pastatams vėsinti. Pastebima, kad senos statybos renovuotuose ir šiuolaikiniuose pastatuose vis daugiau energijos sunaudoja vėdinimo sistemos. Energijos sąnaudų didėjimą vėdinimo sistemose lemia griežtėjantys reikalavimai pastato atitvarų šiluminėms charakteristikoms, todėl mažėja energijos sąnaudos pastatams šildyti, o jiems vėdinti šios sąnaudos santykinai didėja. Vėdinimui reikalingas energijos kiekis priklauso nuo oro kaitos, vėjo, natūralios traukos ir pastato sandarumo sąveikos, vėdinimo sistemose naudojamų šilumokaičių, kitos vėdinimo įrangos efektyvumo bei vėdinimo sistemų pastate naudojimo režimo.

Nagrinėjant pastato inžinerines sistemas dažnai susiduriama su energiją transformuojančiais įrenginiais – šilumokaičiais, nuo kuriuose vykstančių procesų priklauso visos sistemos naudingumas, efektyvumas. Sudėtingėjančiose viešųjų pastatų inžinerinėse sistemose energijos efektyvumo jų šilumokaičiuose didinimo galimybių įvertinimui vien tik tradicinių metodų nebepakanka. Todėl tikslinga pasitelkti metodus, naudojamus energijai imliems pramonės procesams nagrinėti.

Sprendžiant energijos efektyvumo pastatų inžinerinėse sistemose didinimo klausimus, stinga tyrimų, kuriais remiantis galima būtų įvertinti būdus sumažinti pirminės energijos suvartojimą tiek kiekvienoje pastato inžinerinėje sistemoje, tiek jų integruotame sprendinyje.

Vienas būdas didinti energijos efektyvumą pastatuose ir jų inžinerinėse sistemose – procesų integracija jose. Didinant energijos efektyvumą stengiamasi įdiegti naujas, atsinaujinančios energijos šaltinius naudojančias pastato inžinerines sistemas, tačiau kartu ar net prieš tai reikia rasti sprendimus, kaip projektuojamas arba jau esamas pastato inžinerines sistemas efektyviai sujungti tarpusavyje.

Disertacijoje atliekami analitiniai tyrimai ir sprendžiama metodų, skirtų procesų integracijai, taikymo pastato inžinerinėms sistemoms problema. Šie metodai leidžia spręsti sistemų projektavimo uždavinius tais atvejais, kai yra žinomi pastato inžinerinių sistemų šilumnešių parametrai arba kai jie nežinomi, bet gali būti pasirenkami atsižvelgiant į energijos kokybę.

Darbo aktualumas

Pastatai sunaudoja apie 40 % galutinės energijos sunaudojamos Europos Sąjungoje (toliau – ES) ir išskiria apytikriai tiek pat anglies dvideginio (Europos Parlamentas ir Taryba 2010; Eurostat 2010). Gyvavimo ciklo požiūriu didžioji pirminės energijos dalis (iki 90 %) suvartojama pastato inžinerinėse sistemose (Avgelis, Papadopoulos 2009; Kofoworola, Gheewala 2009).

Didėjant galutinės energijos sunaudojimui (Bertoldi, Antanuosiu 2007; Statistikos departamentas 2011), senka pirminės energijos ištekliai (Pe’rez-Lombard *et al.* 2007). Prognozuojama, kad dėl gyventojų skaičiaus, komforto lygio augimo bei dėl to sąlygojamo ilgesnio buvimo pastate, energijos poreikiai ir toliau didės (Eurostat 2010; LR Vyriausybė 2010). Intensyvus energijos naudojimas taip pat glaudžiai susijęs su neefektyviu pastato inžinerinėse sistemose vykstančių procesų naudojimu.

Dažniausiai projektuojant pastatui inžinerines sistemas neatsižvelgiama į tai, kad procesai tose sistemose būtų integruojami jau pradinėje pastato projektavimo fazėje. Kiekviena sistema projektuojama pastatui deramai neįvertinant kiekvienos iš jų įtakos viena kitai. Tradicinė procesų integracija, naudojama pramonės procesuose, apima pagrindinius šilumokaičių tyrimo klausimus ir yra susijusi su optimizavimo metodais. Šiame darbe procesų integracija suprantama kaip veiksmas, kuriuo siekiama apjungti skirtingose pastato inžinerinėse sistemose esančius šilumos srautus. Šios problemos sprendimo rezultatai turi didelę reikšmę kuriant procesų integracijos pastato inžinerinėse sistemose vertinimo algoritmą.

Kaip rodo atlikta tyrimų apžvalga, šiame darbe pastato inžinerinėms sistemoms integruoti pirmą kartą pritaikyta Pinch analizė. Sprendžiant pastato inžinerinių sistemų veikimo optimizavimo uždavinius efektyvaus energijos vartojimo požiūriu, nustatomi inžinerinių sistemų energijos poreikiai, parametrai, jų kitimo arba valdymo įtakos dėsniumai. Tokiems uždaviniams spręsti nepakanka vien tik klasikinių metodų, tinkamų tradicinėms sistemoms nagrinėti, nes sistemos tampa didesnės ir sudėtingesnės. Todėl pramonės objektams taikomas būdas procesams juose integruoti gali būti perkeliamas į mažesnio mastelio energetines sistemas ypač tuomet, kai pastate yra skirtingų procesuose dalyvaujančių energijos (šilumos) srautų. Šiuos srautus racionaliai apjungiant, t. y. formuojant iš jų efektyvų šilumokaičių tinklą, galima būtų pasiekti geresnių energijos naudojimo pastato inžinerinėse sistemose rodiklių. Pažymėtina, kad šių sistemų veikimo režimai, skirtingai nuo pramoninių sistemų, susiję su nuolatos kintančiais išorės oro parametrais.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – viešosios paskirties pastatų vėdinimo sistemų įrenginiai ir procesų juose kartu su atliekiniais šilumos srautais kitose inžinerinėse sistemose integracija.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – įvertinti procesų integravimo metodo taikymo galimybes viešųjų pastatų inžinerinių sistemų termodinaminiam efektyvumui nustatyti ir gerinti.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe sprendžiami šie uždaviniai:

1. Nustatyti pastato inžinerinių sistemų energinio efektyvumo požiūriu problemines sistemas, įrenginius ir procesus.
2. Nustatyti pastato vėdinimo sistemų, kurioms reikalingas energijos tiekimas, projektinių sprendimų ypatybes.
3. Įvertinti tradicinės procesų integravimo metodikos – Pinch analizės – naudojimo pastato inžinerinėms sistemos galimybes bei nustatyti ypatybes.
4. Sukurti algoritmą termodinamiškai optimaliam pastato inžinerinių sistemų integruotam sprendiniui rasti derinant termodinaminės ir Pinch analizės metodus.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi sisteminės analizės, termodinaminės (ekserginės) analizės ir procesų integravimo (Pinch) analizės metodai. Sisteminė analizė leidžia nustatyti sistemų elementus bei jų tarpusavio ryšius. Ekserginė analizė leidžia atlikti termodinamiškai pagrįstą skirtingos kokybės energijos rūšių vertinimą. Procesų integravimo (Pinch) analizė leidžia panaudoti pramoniniams procesams taikomas procedūras termodinamiškai optimaliam šilumokaičių tinklui nustatyti.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie termoinžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pritaikyti procesų integracijos metodai, susiejantys energišškai efektyvių pastato inžinerinių sistemų sprendinių radimą su inžinerinėse sistemose numatomų naudoti šilumnešių parametrų deriniais. Pateikti vėdinimo, kaip perspektyvoje energijai imliausių įrenginių, integravimo pavyzdžiai.
2. Vėdinimo sistemų šilumogrąžių tinklui optimizuoti, jų šilumnešių deriniams rasti ir procesams pastato inžinerinėse sistemose integruoti pirmą kartą pritaikytas Pinch metodas, kuris iki šiol buvo taikomas tik pramoniniams procesams.
3. Darbe parengta metodika įvertinama, ar galima integruoti ir kaip integruoti tiek projektuojamas, tiek esamas pastato inžinerines sistemas, randant tų sistemų didesnio sezoninio termodinaminio (ekserginio) naudingumo sprendinį.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami įvairių pastato inžinerinių sistemų šilumokaičių tinklo projektavimo uždaviniams spręsti, rasti eksploatuojamų šilumokaičių arba jų tinklų optimalius parametrus, jų kitimo dėsningumus, šilumokaičių arba jų tinklo veikimo laike priklausomybę mišrioje klimatinėje zonoje esančių viešosios paskirties pastatų grupei, kai žinomi arba ieškomi šilumos srautų, dalyvaujančių pastato inžinerinėse sistemose, parametrai.

Ginamieji teiginiai

1. Vis plačiau pramonės procesuose taikomas Pinch analizės metodas pastato inžinerinių sistemų procesams praktiškai nenaudojamas, nors dėl savo metodinių pagrindų ir tikslo kartu su termodinamine (eksergine) analize turėtų būti naudojami efektyvių, integruotų pastato inžinerinių sistemų sprendinių radimui.
2. Procesų integracijos ypatybės pastatų inžinerinėse sistemose suformuoja sezoninę vietovės lauko oro temperatūrų raidą, vėdinimo sistemose naudojamų šilumogrąžių sprendiniai ir jų efektyvumas. Šios ypatybės ap-

sprendžia temperatūros, prie kurios Pinch analizės procedūromis nustatomas optimalus šilumokaičių tinklas ir minimalaus temperatūrų skirtumo šilumokaičiuose, pasirinkimą.

3. Gautieji procesų integracijos ir ekserginės analizių pastato inžinerinėse sistemose rezultatai rodo, kad procesų integracija leidžia rasti didesnio sistemos termodinaminio naudingumo sprendinius, o integruotos sistemos naudoja mažiau eksergijos lyginant su neintegruotomis.
4. Pasiūlytas algoritmas skirtas siekti procesų integralumo pastato inžinerinėse sistemose ar jam įvertinti. Šis algoritmas gali būti pritaikytas pastate naudojamų eksergijos srautų minimizavimui, todėl jis gali būti pritaikytas projektuojant pastatų inžinerines sistemas. Tokia procesų integracija inicijuoja naudoti žemų potencialų šilumos srautus (pastate dažniausiai atliekinės), o tai leidžia efektyviau išnaudoti pastate esančius šilumos srautus nei naudojant tradicinius aukštų parametrų tiekiamos šilumos srautus.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtraukta į ISI Web of Science sąrašą (Misevičiūtė *et al.* 2010); vienas – recenzuojamame periodiniame žurnale (Misevičiūtė *et al.* 2011), du – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Misevičiūtė, Martinaitis 2008, 2011), du – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose (Misevičiūtė, Martinaitis 2008, 2011).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti keturiuose mokslinėse konferencijose Lietuvoje:

- Respublikinėje konferencijoje „*Pastatų inžinerinės sistemos*“ 2008, Vilniuje;
- Doktorantų ir jaunųjų mokslininkų kasmetinės konferencijos „*Jaunoji energetika 2008*“ 2008 m. Kaune;
- Respublikinėje konferencijoje „*Šilumos energetika ir technologijos-2011*“ 2011, Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Environmental Engineering*“ 2011 m. Vilniuje.

Disertācijas struktūra

Disertāciju sudaro ģvadas, keturi skyriai ir rezultātu apibendrinimas.

Darbo apimtis yra 108 puslapiai, tekste panaudotos 24 numeruotos formulės, 62 paveikslai ir 7 lentelės. Rašant disertāciju buvo panaudota 109 literatūros šaltiniai.

Procesų integracijos pastato inžinerinėse sistemose tyrimų apžvalga

Pirmajame skyriuje atliekama procesų pastato inžinerinėse sistemose integracijos apžvalga, analizuojami procesų vykstančių pastato inžinerinėse sistemose integravimo, optimizavimo būdai, aprašomi procesų integravimui naudojami metodai ir jų naudojimo ypatybės. Atsižvelgiant į sisteminį požiūrį darbe pasirinkta įvertinti pagal antrąją termodinamikos dėsnį (ATD) optimalią vartotojui reikalingos energijos formą, reikalingos temperatūros šilumą, išnaudojant ją pagal kokybę inžinerinėse sistemose.

1.1. Procesų pastato inžinerinėse sistemose integralumas

Sąvoka *procesų integracija*, turinti daug įvairių reikšmių, įvairiuose moksluose apibūdinama savaip. Technologijos mokslams tinkamiausias būtų šis apibūdinimas:

mas: *dalių, elementų jungimas(is) į visumą* (Tarptautinių žodžių žodynas 2008). Smith (2005) šią sąvoką apibūdina kaip cheminės inžinerijos terminą, kuriuo apibrėžiamas proceso projektavimas, atsižvelgiant į sąsajas tarp skirtingų elementų veikimo ir jų optimizavimo. Cheminės inžinerijos atstovai procesų integraciją įvardija kaip holistinį procesų projektavimą ir optimizavimą, kai išnaudojamos sąsajos tarp skirtingų elementų efektyviai naudojant išteklius ir mažinant sąnaudas.

Procesų integracija taip pat dar gali būti vadinama integruotu procesų projektavimu arba procesų sinteze (El-Halwagi 1997, 2006). Kaip pabrėžia (Cussler and Moggridge 2001) svarbiausias žingsnis projektuojant yra gaminio projektas, kuriame formuluojamos gaminio paskirtį tenkinančios sąlygos (1.1 pav.). Šiame darbe procesų integracija tapatinama su procesų pastato inžinerinėse sistemose jungimu. Jungiant procesus pastato inžinerinėse sistemose siekiama sudaryti naujus sistemų junginius (modifikuoti) arba (ir) kurti naujas sistemas.

1.1 pav. Proceso projektas (BuildingGreen 2001)

Fig. 1.1. Design of the process (BuildingGreen 2001)

Kaip rodo 1.1 paveikslas, kuo labiau proceso projekto įgyvendinimas artėja link pabaigos, tuo galimybės įgyvendinti efektyvų energijos taupymą mažėja. Tai reiškia, kad kuo ankstesniame etape būtina pradėti spręsti efektyvaus energijos naudojimo klausimus (EERE 2001).

Procesų integracija susideda iš kritinio esamų sistemų įvertinimo ir galimų technologinių sprendimų, kuriant darnias energetines sistemas nustatymo (Gundersen 2000). Nagrinėjant pastatą kaip energijai imlią sistemą reikia atsižvelgti į tai, kad procesų integracija siejama su energijos taupymu. Pastatą ir jo mikroklimatą formuojančias sistemas galima pavaizduoti tokiu būdu (1.2 pav.).

1.2 pav. Pastatas ir jo mikroklimatą formuojančios sistemos
Fig. 1.2. Building and its indoor climate forming systems

Pastatas charakterizuojamas kaip sistema, kurią sudaro pasyvios ir aktyvios mikroklimatą formuojančios sistemos. Visas pastatą sudarantis apvalkalas, turintis įtakos mikroklimato sistemų veikimui ir energijos sąnaudoms, vadinamas pasyviomis mikroklimato sistemomis (PMS). Mikroklimatą pastate kuria aktyvios mikroklimato (šildymo, vėdinimo, vėsinimo, oro kondicionavimo, apšvietimo) sistemos (AMS). Inžinerija AMS priskiria pastato inžinerinėms sistemoms.

Viešieji pastatai ir jų inžinerinės sistemos yra imlios energijai sistemos. JAV viešieji pastatai sunaudoja 46,2 % pirminės energijos, o tai sudaro 18,4 % visoje šalyje sunaudojamos pirminės energijos (EERE 2011). Nuo 32 % iki 50 % energijos sunaudojama mikroklimato sistemoms naudoti. Viešuosiuose pastatuose egzistuoja iki 38 % energijos taupymo potencialas (WBCSD 2009).

Šiuolaikiniuose pastatuose dėl jų sandarumo vėdinimo įtaka didėja, todėl sunaudojamos vėdinimui energijos kiekis gali siekti net iki 50 % visos pastate sunaudojamos energijos (Europos Komisija 2003).

Siekiant optimalaus sprendimo projektuojant bei norint padidinti pastato inžinerinių sistemų veikimo efektyvumą jų naudojimo etape būtina nagrinėti jas integracijos požiūriu. Pastato inžinerinių sistemų integracijos sprendiniai turi būti paremti aiškiu procesų, įrenginių ir sistemų individualiu ir palyginamuoju energijos poreikių nagrinėjimu. Todėl pastato inžinerinių sistemų integracija taip pat galėtų būti traktuojama kaip subalansuotas atskirų pavienių sistemų projektavimo, įrengimo, naudojimo ir priežiūros apjungimas.

Pastato inžinerinių sistemų integralumo būdai skirtinguose tyrimuose sprendžiami savaip, be to, dažniausiai siejami su naujų, naudojančių atsinaujinančią energiją šaltinius sistemų įdiegimu į jau esamas (Pavlas *et al.* 2010; Söderman, Athila 2010) arba projektuojamas sistemas (Bahaj *et al.* 2007).

Dažniausiai integruojamos energijos (šilumos, elektros arba ir šilumos, ir elektros) gamybos sistemos (Puigjaner 1997; Böszörményi, Böszörményi 2001; Smejkal *et al.* 2009; Fu, Gundersen 2010), rečiau – pastatų inžinerinės sistemos (Hestnes 1999). Tačiau vis dažniau procesų integracija aptinkama ir pastato inžinerinių sistemų srityje. Procesų integracija šiose sistemose savo ruožtu būtina, nes, integruojant procesus, galima sudaryti sistemų junginius bei kurti naudojamos energijos kokybės požiūriu naujas, efektyviau gamtinius išteklius naudojančias, sistemas (Kralj *et al.* 2002; Zhelev, Ridolfi 2006).

1.2. Šiluminių procesų integracija

Šiluminių procesų gausybė pasižymi pramonės įmonėse vykdoma veikla. Jose ir buvo pradėta taikyti procesų integracija (Kemp 2007) siekiant sujungti (suintegruoti) atskirus procesus, vykstančius gamyboje, taip padidinant šiluminių procesų energinį efektyvumą.

Šiluminiais procesams priskiriami procesai, vykstantys šilumos mainų įrenginiuose – šilumokaičiuose, kurių metu išskiriama arba panaudojama šiluma. Šiluminiai procesai integruojami todėl, kad energijos transformavimo pobūdžiu tai – energiška, neefektyvūs procesai (Kemp 2007). Juose norint pasiekti norimą tikslą naudojami aukštų parametrų (temperatūrų) šilumnešiai, nors toks pats rezultatas gali būti pasiektas naudojant kiek žemesnių parametrų šilumnešius. Prie tokių procesų galima priskirti tradicinėje šildymo sistemoje vykstantį procesą, kuriame šilumnešiui, reikalingam šilumai nuo šildymo prietaiso perduoti į patalpą reikia 90 °C/70 °C temperatūros šilumnešio, nors tereikia palaikyti norminę 20 °C temperatūrą patalpoje.

Šiuo metu dėl savo masto labai svarbūs šiluminiai procesai, vykstantys pastato inžinerinėse sistemose. Tam, kad jie vyktų, stengiamasi naudoti atsinaujinančią energiją išteklius: saulės, vėjo energiją, kitus energijos gamybos būdus (Deacon 2008), juos integruojant į pastato mikroklimatą formuojančias sistemas, procesus. Šiuo atveju, dėl ribotų atsinaujinančiais energijos šaltiniais suformuojamų energijos srautų parametrų dar aktualesnė tampa inžinerinėse sistemose vykstančių procesų optimizacija energijos kokybės poreikių požiūriu. Pagal integruojamų procesų dažnumą galima teigti, kad dažniausiai integruojami būtent šiluminiai procesai (Kemp 2007; Bandyopadhyay *et al.* 2010).

Energijos (gamybos, transformavimo, perdavimo, paskirstymo ir naudojimo) grandinę galima pavaizduoti tokiu būdu (1.3 pav.). Šio paveikslėlio viršutinėje dalyje nurodyta galutinių vartotojų sunaudojama šiluma, apatinėje – elektra.

1.3 pav. Energijos grandinė (Schmidt 2009)

Fig. 1.3. The energy chain (Schmidt 2009)

Ši energijos grandinė vaizduoja, kaip, transformuojant pirminę energiją, galutinį vartotoją pasiekia energija, suteikdama jam energetines paslaugas. Iki galutinio vartotojo energijos kokybė sumažėja, nes patiriami energijos, daugiausia – šilumos, nuostoliai.

Esant dabartiniam technologiniam lygiui, t. y. plačiai naudojant centralizuotą kuro, dažniausiai – iškastinio, deginimą, didžiausia įtaka integruotai energijos tiekimo grandinei tenka energijos gamybos etape. Kaip rodo atlikti eksergijos poreikių mikroklimatui (Biekša, Martinaitis 2004, 2007) tyrimai, lemiamas vaidmuo čia tenka būtent energijos gamybos etapui. Vykdydamas detalesnę analizę siūloma įvertinti, kokią įtaką eksergijos poreikiams turi besikeičiančios išorės klimato sąlygos (Biekša *et al.* 2006; Torio *et al.* 2009).

Senkant energijos ištekliais, siekiant efektyvaus energijos vartojimo bei darnaus vystymosi, vis dažniau taikomas procesų integracijos metodas. Procesų integracijos esmė – tobulinti technologinius procesus didinant jų termodinaminį (ekserginį) efektyvumą nedidinant ekonominio poveikio įtakos. Dincer (2002) aprašo, kokią įtaką ekserginis proceso naudingumas turi aplinkos ir darnumo poveikiui. Artėjant link maksimalaus ekserginio naudingumo darla didėja, o poveikis aplinkai mažėja. Vadinas, būtina siekti termodinamiškai naudingų procesų diegimo, naudojimo ir pastatų inžinerinėse sistemose.

Kitame poskyryje pateikiama metodų, skirtų procesų integracijai, apžvalga.

1.3. Metodai procesų integracijai

Procesų integracijai pramonės procesams nagrinėti pasitelkiami įvairūs metodai, dalis jų – sudėtingi, todėl nelengva juos pritaikyti nagrinėjant termodinامينius procesus pastato inžinerinėse sistemose. Čia apžvelgiami termodinامينiams procesams taikomi integracijos metodai: termodinaminė (ekserginė), Pinch analizė ir kiti termodinamikos pagrindu išsivystę metodai.

1.3.1. Termodinaminė (ekserginė) analizė

Tiriant šiluminių procesų netobulumą (Шаргют, Петела 1968), ekserginė analizė išsivystė kaip ATD pasekmė. Daug ekserginės analizės tyrimuose yra nuveikę Baehr (1980), Szargut *et al.* (1988), Borel (1991). Energijos kokybės vertinimo rodikliu pasirinkta eksergija (Borel 1975; Szargut 2005; Martinaitis 2007) rodo sistemos galimybę atlikti darbą. Remiantis ekserginiu metodu galima nustatyti, kaip gerinti ir optimizuoti procesų ar įrenginių projektavimą (Kanoglu *et al.* 2009), įvertinti galimybes patobulinti šiluminius, cheminius procesus bei sistemas.

Vienas iš metodų, galimų taikyti procesų integracijai, yra termodinaminė (ekserginė) analizė. Tradiciškai susiformavo terminologija, kad tik pirmuoju termodinamikos dėsniu (PTD) apsiribojanti sistemų analizė nėra laikoma termodinamine. Taigi termodinaminė analizė yra ta, kurioje įvertinami ATD apribojimai. Eksergijoje būtent tai ir įvertinama. Ši analizė išsivystė Europoje (1960 – 1970 metais), po 1980 metų šia analize susidomėjo ir Amerika (Szargut 2005). Termodinamikoje eksergija apibūdinama kaip maksimalus galimas gauti darbas, sistemų energetikoje – beentropė energija.

Ekserginė analizė taikoma šilumai atgauti chemijos ir procesų pramonėse, taip pat pastatams, kuriuose šilumos perdavimui tenka svarbus vaidmuo. Inžinerijoje šis metodas taikomas chemijos gamyklų atskiriems procesams nagrinėti. Vienas iš energijos ir eksergijos metodų, naudojamų inžinerijoje, tikslų yra įvertinti energijos ir medžiagų balansus tarp įeinančių ir išeinančių į gamyklą srautų (energijos, medžiagų) keliems galimiems projektams prieš pastatant gamyklą (Szargut 2005).

Ekserginės analizės metodu nusakomas proceso virsmo maksimalus poveikis, gaunamas mažinant išteklių sąnaudas ir poveikį aplinkai. Nagrinėjant procesus sistemose ekserginės analizės metodu tampa aišku, kur galimas proceso patobulinimas (Schmidt 2009).

Kadangi šilumos mainų tyrimai bei plėtra svarbi ne tik energetinėms technologijoms, bet ir kitoms sritims, tobulinimas apima naujus, efektyvius šilumokaičius, naujus šilumos perdavimo įrenginius bei jų įvedimą į pramonės procesus (Szargut 2005).

Procesus, vykstančius pastate, eksergijos požiūriu nagrinėja Dincer, Rosen (2007), taip pat Szargut (2005) bei Torio, Schmidt (2009, 2007). Pastatas – tai sudėtinga sistema, kurią sudaro technologiniai ir netechnologiniai energijos (eksergijos) srautai. Bendras pastato inžinerinių sistemų eksergijos srautas gali būti suskaidytas į du komponentus (Martinaitis 2001): 1) neišvengiamus eksergijos srautus, kurie nepriklauso nuo naudojamos technologijos ir yra sąlygojami vien tik pastato vidaus ir išorės aplinkos sąlygų; 2) technologinius eksergijos srautus, kurie savo ruožtu gali būti suskirstyti į:

- srautus procesuose, priklausančius nuo energijos transportavimo ir sklaidos būdų, t. y. nuo technologijos;
- srautus įrenginiuose, tiesiogiai susijusius su įrenginiais ir tiekiamos energijos efektyviu naudojimu.

Šių srautų minimizavimas – vienas iš tikslų siekiant efektyvaus energijos naudojimo pastato inžinerinėse sistemose. Didžioji pasaulio sunaudojamos energijos dalis priskiriama pastatų šildymui ir vėsinimui (Pe'rez-Lombard *et al.* 2007). Todėl, siekiant didinti energijos naudojimo efektyvumą, reikia ieškoti būdų eksergijos srautams minėtose sistemose mažinti – tam siūloma naudotis eksergine analize.

Termodinaminės analizės požiūriu, eksergiškai efektyvesni procesai vykdomi artinant šilumnešių naudojamų sistemų procesuose temperatūras. Pavyzdžiui, atkreipiamas dėmesys (Hepbasli, Balta 2007) į tai, kad kompresoriaus galia, priklausanti nuo pradinio ir galinio slėgių, sumažėja artinant šilumokaičių (kondensatoriaus ir garintuvo) temperatūras. Tai akivaizdus eksergijos kaip darbo sąnaudų sumažėjimas sumažinus temperatūrų skirtumą.

Šildymo procesams generuojama šiluma gaunama iš iškastinio kuro, t. y. naudojamas kuras arba elektra. Szargut (2005), nagrinėjęs tradicinių šilumos šaltinių eksergijos tausojimo problemą, kogeneruotą šilumos gamybą su šilumos akumuliacija priskiria prie energijos vartojimo efektyvumą didinančių pramonėje būdų.

Ekserginiu naudingumu nusakomas proceso efektyvumas, t. y. kuo mažiau prarasti ir sunaikinti galimo gauti darbo iš duotosios energijos. Tai galima būtų apibūdinti mažesniu eksergijos praradimu procese.

Naudojantis (Dincer *et al.* 2004; Utlu, Hepbasli 2003; Hepbasli 2008) pateiktomis metodikomis yra paskaičiuotas kai kurių energijų naudojančių įrenginių, skirtų mikroklimatui formuoti (oro kondicionieriaus, vandens šildytuvo), ekserginis naudingumas. Saidura *et al.* (2007) atliktas tyrimas rodo, kad daugiausia eksergijos sunaudoja šaldytuvo šaldiklis, toliau seka oro kondicionierius, kuriame daugiausia elektros, t. y. eksergijos naudoja kompresorius.

Detalūs ryšiai tarp energijos ir eksergijos, tarp eksergijos ir aplinkos bei energijos ir darnaus vystymosi bei energetikos politikos buvo paskelbti Dincer (2002) ir Szargut (2005). Ekserginė analizė čia taip pat apibrėžta kaip kritinė

analizė, apimanti energetikos planavimą, išteklių optimizavimą bei visuotinę aplinkos, regioninės ir nacionalinės taršos mažinimą.

Kitas metodas, naudojamas procesams integruoti – procesų integracija. Sąvoka *procesų integracija* gali turėti dvi reikšmes: vienu atveju tai metodas, taikomas procesams jungti (integruoti), kitu – veiksmas, kurio metu vykdoma integracija.

1.3.2. Procesų integracijos metodas

Kitas metodas, siejamas su ekserginės analizės metodu, įvertinantis procesų virsmų veiksmingumą – procesų integracija. Daug energijos galima būtų sutaupyti naudojant integruotą sistemų projektavimo būdą (Szargut 2005; Kemp 2007). Sąvoka *procesų integracija*, kilusi chemijos inžinerijoje, turi dvi galimas reikšmes:

- 1) holistiniu požiūriu – tai proceso projektavimas atsižvelgiant į sąsajas tarp skirtingų elementų veikimo iš pat pradžių nei optimizuojant juos atskirai. Tai taip pat dar gali būti vadinama integruotu procesų projektavimu arba procesų sinteze (El-Halwagi 1997, 2006; Smith 2000, 2005).
- 2) Pinch analizė – metodika, skirta procesams projektuoti siekiant sumažinti energijos sunaudojimą ir padidinti šilumos atgavimą, taip pat žinoma kaip šilumos integracija arba Pinch technologija. Ši metodika skirta skaičiuoti duotojo proceso galimus pasiekti energijos rodiklius ir priemonių tam tikslui pasiekti nustatymui (Linnhoff *et al.* 1982). Pinch analizė daugiausia naudojama pramoniniams procesams analizuoti.

Tarptautinė energetikos agentūra (angl. *International Energy Agency (IEA)*) procesų integraciją 1993 metais apibrėžė kaip sisteminius ir bendruosius metodus, jungiančius individualius procesus į visumą, pabrėžiančius efektyvų energijos vartojimą ir poveikio aplinkai mažinimą, skirtus integruotos gamybos sistemoms projektuoti (Gundersen 2002).

Procesų integracija priskiriama perspektyviai sričiai, kuria siekiama pagerinti darbo našumo, energijos naudojimo, poveikio aplinkai, investicijų efektyvumo, procesų projektavimo ir procesų valdymo kontrolę bei valdymą (El-Sayed 2002). Procesų integracija išsirutuliojo iš šilumos atgavimo metodikos į pagrindinę strateginę projektavimo ir planavimo technologiją, galinčią pasitarnauti siekiant smarkiai sumažinti egzistuojančios įrangos eksploatavimo išlaidas, o naujiems projektams – taip pat ir investicines išlaidas.

Šilumos (energijos) integracijos (dar vadinamos Pinch technologija) metodas buvo plačiai pritaikytas cheminių procesų pramonėje projektuojant ir sintezuojant naujus procesus. Derinant procesų modeliavimo paketus su energijos integracijos metodikomis įmanoma suprojektuoti itin integruotas sistemas (Godat, Marechal 2003).

Modeliuojant procesus sisteminės analizės būdu galima analizuoti pramonės procesus ir sąveikas tarp atskirų jos dalių. Todėl procesų integracijos metodas gali būti taikomas (Natural resources Canada 2003): 1) taupyti energiją ir mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų susidarymą; 2) kritiškiems sistemų elementams duotuose procesuose nustatyti; 3) optimizuoti maišymo procesus; 4) optimizuoti vandenilio naudojimą; 5) gerinti reaktorių projektavimą bei valdymą; 6) minimizuoti vandens naudojimą bei nuotekų susidarymą; 7) mažinti atliekas; 8) optimizuoti komunalinių paslaugų įmonių procesus.

Galima teigti, kad procesų integracija skatina ekologišką termodinamiką, kurios pagrindiniai principai buvo nustatyti 2003 metų gegužės mėnesį įvykusioje vyriausybės, mokslininkų, inžinierių ir kitų veikėjų konferencijoje „Ekologiška inžinerija: nustatant principus“ (JAV). Joje pabrėžta, jog tam, kad inžineriniai procesai ir gaminiai būtų holistiški, jiems turėtų būti naudojama sisteminė analizė ir integruotas aplinkos poveikių nustatymas, o visa inžinerinė veikla būtų vertinama naudojant gyvavimo ciklo sampratą. Gyvavimo ciklas apima sistemų kūrimą, naudojimą ir sunaikinimą.

Kuriant bei taikant inžinerinius sprendimus taip pat turėtų būti atsižvelgiama į vietinę geografinę padėtį, siekius ir kultūras. Siekiant darnumo, reikėtų skatinti priimti inžinerinius sprendimus esančioms arba vyraujančioms technologijoms gerinti, atnaujinti ir išrasti naujas technologijas. Ekologinis projektavimo naudojimas reikalauja šių principų jau ankstesnėje projektavimo ir proceso (gaminio) kūrime, nes šiame etape tenka didžiausias poveikis aplinkai (Cengel 2007).

Procesų integracija susideda iš optimalių sąveikų tarp įvairių rodiklių ir jų ryšių paieškos. Ekonominiu požiūriu procesų integracija apibūdinama kaip efektyvi priemonė, leidžianti pramonei padidinti pelningumą mažinant energijos, vandens ir žaliavų suvartojimą, šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą bei atliekų susidarymą. Pinch analizė yra viena iš plačiai naudojamų procesų integracijos metodų, nes tai gana paprastas metodas, pasauliniu mastu pasižymintis efektyviais atliktų projektų rezultatais (Смит *et al.* 2004).

1.3.3. Metodų, naudojamų procesų integracijai, palyginimas

Čia pateikiama palyginamoji metodų, naudojamų procesų integracijai, analizė. Palyginimo rezultatai pateikiami 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Metodų skirtų procesų integracijai palyginimas**Table 1.1.** Comparison of methods for process integration

Metodas	Privalumai	Trūkumai	Naudojimo sritys	Palyginimas
1	2	3	4	5
Ekserginė analizė	Galimybė įvertinti energijos kokybę, poveikį aplinkai su naudojamos pirminės energijos atžvilgiu, galima nustatyti galimybes tobulinti šiluminius, cheminius procesus ir sistemas.	Sudėtingas metodas, nes būtina gerai išmanyti energiją vartojančių sistemų veikimą bei procesų termodinamiką, jose vykstančius procesus.	Energetikos objektai, pastatai, pramonė, energetikos planavimas, išteklių optimizavimas.	Lyginant su kitais metodais eksergine analize galima įvertinti energijos kokybę. Pagal šią analizę integruoti procesai gali būti optimizuoti atsižvelgus į pasirinkamų procesų termodinaminį naudingumą.
Procesų integracija (PI)	Nesudėtinga metodika.	Reikalauja didelių laiko sąnaudų duomenims rinkti.	Dideliems bei sudėtingiems pramonės ir energetikos procesams analizuoti bei optimizuoti.	Artimas metodas ekserginei analizei
Pinch analizė (PA)	Plati tyrimo objektų sritis (nuo vandens iki vandenilio), suprantama ir nesudėtinga metodika.	Laikui imlus metodas, būtinai tikslus duomenų rinkimas, nes nuo jų patikimumo priklausys galutinis rezultatas.	Pramonė.	Nagrinėja cheminių procesų integraciją. PA yra PI taikomas metodas.

1.1 lentelėje pateikti procesų integracijai naudojami metodai pagrįsti termodinamika. Gyvavimo ciklo analizės (GCA) metodas, nepaminėtas 1.1 lentelėje, labiau susijęs su ekonominiu, aplinkosauginiu, požiūriais taip pat galėtų būti

taikomas procesų integracijai nagrinėti, bet dėl reikiamo detalaus daugybės duomenų surinkimo čia nenagrinėjamas.

Sujungus ekserginę ir GCA galima nustatyti ilgalaikio išteklių tausojimo požiūriu optimalią įrenginio (pavyzdžiui, šilumokaičio) konstrukciją. Visoms energetinėms sistemoms, kuriose galima suderinti energijos taupymą veikimo metu ir energijos naudojimą konstruojant sistemą, šių metodų naudojimas turėtų būti pritaikytas gauti optimumą gamtinių išteklių eksergijos taupymo atžvilgiu (Cornelissen, Hirs 1997).

Pinch analizės naudojimo tikslumą įrodo platus jos taikymas pramonėje, taip pat šio metodo suprantamumas ir paprasta metodika. Dabartinė Pinch analizė nagrinėja cheminius procesus ir procesų integraciją, t. y. trigeneracijos procesų šilumos integraciją (Zhelev 2007).

Energetinių sistemų projektavimui tobulinti (Giannantoni *et al.* 2005) siūlomas daugiakriterinis įvertinimo būdas apima energinę, ekserginę, termoeconomines, poveikių įvertinimo, emergijos sintezės, mikro ir makro ekonomikos bei išorės įvertinimo metodus.

Iš atlikto metodų taikomų PI palyginimo nustatyta, kad priimtinausia naudoti ekserginės ir Pinch analizės metodus dėl jų glaudaus tarpusavio ryšio: naudojamų parametrų analizei, šių metodų nesudėtingo pritaikymo pastato inžinerinėms sistemoms nagrinėti.

1.4. Šilumokaičiai pastato inžinerinėse sistemose, juose vykstantys procesai ir jų tyrimo metodai

Vykdamas ir intensyvinantis įvairius technologinius procesus fluidai šildomi arba aušinami naudojant šilumokaičius. Šilumokaičiuose vykstančių procesų metu šiluma (vėsa) perduodama nuo vieno (α) (karštesnio arba vėsesnio) šilumnešio kitam (β). Šie procesai pavaizduoti 1.4 paveiksle.

1.4 pav. Šilumos mainai šilumokaityje
Fig. 1.4. Heat exchange in heat exchanger

Bet kokiam procesui įvykti būtinas potencialų (koncentracijų, temperatūrų, slėgių, įtampų ir kt.) skirtumas. Nagrinėjant šiluminius procesus inžinerinėse sistemose pagrindinis potencialų skirtumas yra temperatūrų skirtumas, kuris ir

yra jų veikimo priežastis. Apibendrinančiu temperatūrų skirtumu šilumokaičių šiluminiuose skaičiavimuose yra vadinamasis šilumokaičio vidutinis temperatūrų skirtumas. Priklausomai nuo šilumnešių tekėjimo krypties šilumokaityje, skirtingai apskaičiuojamas vidutinis temperatūrų skirtumas ΔT_m , naudojamas šilumos perdavimo lygtyje (1.1).

$$Q = A \cdot k \cdot \Delta T_m, \quad (1.1)$$

čia Q – šilumokaičio galia, (W); k – šilumos perdavimo koeficientas, (W/m²K); A – šilumos perdavimo plotas, (m²); ΔT_m – vidutinis temperatūrų skirtumas, K.

Dydžių A ir k sandauga traktuojama šilumokaičių šiluminiu pralaidumu. Kai šilumnešiai šilumokaityje teka priešsroviui, šilumnešių temperatūrų skirtumo skaičiavimo atvejai pateikiami 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Šilumnešių temperatūrų skirtumo skaičiavimo atvejai

Table 1.2. The cases of calculation of streams temperature difference

Šilumnešių temperatūrų skirtumas $\Delta T'$ tame šilumokaičio gale, kur jis yra didesnis	Šilumnešių temperatūrų skirtumas $\Delta T''$ tame šilumokaičio gale, kur jis yra mažesnis
Jeigu $T'_1 - T'_2 > T''_1 - T''_2$, tai $T'_1 - T'_2$	$T''_1 - T''_2$
Jeigu $T'_1 - T'_2 < T''_1 - T''_2$, tai $T''_1 - T''_2$	$T'_1 - T'_2$
Jeigu $\frac{\Delta T'}{\Delta T''} < 2$, tuomet ΔT_m apskaičiuojamas kaip aritmetinis vidurkis.	
Jeigu $\frac{\Delta T'}{\Delta T''} > 2$, tuomet ΔT_m apskaičiuojamas kaip vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas (angl. <i>Log-Mean Temperature Difference (LMTD)</i>), t.y.: $\Delta T_m = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \frac{\Delta T'}{\Delta T''}}$.	

Pagrindiniai pastato inžinerinėse sistemose naudojamuose šilumokaičiuose vykstantys procesai: šildymas (a), vėsinimas (b), kondensavimas (c) ir garavimas (d) apibendrintai gali būti pavaizduoti (1.5 pav.).

Įtaką šilumos mainams šilumokaičiuose turi kintamos jais tekančių šilumnešių fizinės savybės. Kintant temperatūrai, kinta ir šilumnešių fizinės savybės: dinaminis klampumas (μ) ir tankis (ρ), šilumos laidumo koeficientas (λ), tankis (ρ) ir savitoji šiluma (c_p). Šilumnešių fizinės savybės šiame darbe vertinamos pagal (Бажан 1989) pateiktas analitines priklausomybes.

1.5 pav. Šilumokaityje vykstantys procesai
Fig. 1.5. Processes in heat exchanger

Pastato inžinerinių sistemų šilumokaičiuose vykstantys procesai ir veikimo režimai priklauso visų pirma nuo lauko oro temperatūros, apskritai nuo klimatinio parametro reikšmių – suprantama, kad jo nuolatos kinta.

Šilumokaičių šiluminis skaičiavimas remiasi šilumos balanso (1.2) ir šilumos perdavimo (1.1) lygtimis. Šilumos balanso lygtis, kai nėra šilumos mainų su šilumokaitį supančia aplinka, atrodo taip:

$$Q = M_1 \cdot c_{p1} \cdot (T'_1 - T''_1) = M_2 \cdot c_{p2} \cdot (T''_2 - T'_2) = CP_1 \cdot (T'_1 - T''_1) = CP_2 \cdot (T''_2 - T'_2), \quad (1.2)$$

čia c_p – šilumnešio savitoji šiluma, (J/kg·K); M – šilumnešio masinis debitas, (kg/s); CP – srauto šiluminė talpa, (kW/°C); indeksu „1“ žymimas šildantysis šilumnešis, „2“ – šildomasis šilumnešis. Pradinė (T') ir galinė (T'') šilumnešių temperatūros.

Kai nėra pakankamai duomenų vidutiniam logaritminiam temperatūrų skirtumui apskaičiuoti, naudojamas alternatyvus metodas šilumokaičių analizei – NTU (angl. *Number of Transfer Units (NTU)*) (Incropere, Dewitt 2002).

Žinant šilumokaičio šilumos perdavimo koeficientą, naudojant šį metodą gali būti nustatytos iš šilumokaičio išeinančių šilumnešių temperatūros. Iš pradžių apibrėžiamas maksimalus šilumokaičio perduodamas šilumos kiekis (q_{max}), kuris priešsroviam šilumokaityje galėtų būti pasiektas, jei jis turėtų begalinį ilgį, t. y. begalinį šildomą paviršiaus plotą.

Atsižvelgiant į šilumnešių masinius debitus (M) ir savitąsias šilumas (c_p), gaunamos srautų šiluminės talpos (CP), kurios išreiškiamos masinių debitų ir savitųjų šilumų sandauga (1.3-1.4):

$$M_2 \cdot c_{p2} < M_1 \cdot c_{p1}, \quad (1.3)$$

$$CP_2 < CP_1. \quad (1.4)$$

Kadangi $\Delta T_2 > \Delta T_1$, dėl begalinio šilumokaičio ilgio šaltės šilumnešis galėtų būti sušildytas iki šiltesnio šilumnešio temperatūros ($T_2'' = T_1'$). Tuomet gauname, kad:

$$M_2 \cdot c_{p_2} < M_1 c_{p_1} \rightarrow q_{\max} = M_2 \cdot c_{p_2} \cdot (T_1' - T_2'), \quad (1.5)$$

Bendrai galima užrašyti:

$$q_{\max} = (M \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_2'), \quad (1.6)$$

Faktiško ir maksimalaus galimo šilumos perdavimo santykis išreiškia šilumokaičio efektyvumą (Janna 2000):

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} = \frac{M_2 \cdot c_{p_2} \cdot (T_2'' - T_2')}{(M \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_2')} = \frac{M_1 \cdot c_{p_1} \cdot (T_1' - T_1'')}{(M \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_2')}, \quad (1.7)$$

čia $(M \cdot c_p)_{\min}$ – šiluminė talpa, atitinkanti mažesniąją šiluminę talpą.

Supaprastinus užrašytas šilumokaičio efektyvumo skaičiavimo formules, kai šaltės šilumnešio masinio debito ir savitosios šilumos sandauga ($M \cdot c_p$) atitinka minimumą, šilumokaičio efektyvumas apskaičiuojamas pagal (1.7) formulę, kitu atveju, kai šiltesnio šilumnešio masinio debito ir savitosios šilumos sandauga atitinka minimumą – pagal (1.8) formulę:

$$\varepsilon = \frac{T_2'' - T_2'}{T_1' - T_2'}, \quad (1.8)$$

$$\varepsilon = \frac{T_1' - T_1''}{T_1' - T_2'}. \quad (1.9)$$

Žinant šilumokaičio efektyvumą, galima rasti perduodamos šilumos kiekį (1.10):

$$q = \varepsilon \cdot (M \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_2'). \quad (1.10)$$

Kadangi anksčiau pateiktos lygtys šilumokaičio efektyvumui nustatyti neįvertina šilumokaičio tipo, tam yra įvedama NTU reikšmė:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{(M \cdot c_p)_{\min}}, \quad (1.11)$$

čia U – šilumos perdavimo koeficientas, (W/m²K); A – šilumos perdavimo plotas, (m²); $(M \cdot c_p)_{\min}$ – minimalus šilumnešio masinio debito ir savitosios šilumos sandaugos dydis.

Žinant šilumokaičio tipą, jo efektyvumą ir NTU galima nustatyti naudojantis (Incropere, Dewitt 2002) pateiktomis skaičiavimo formulėmis.

Šilumokaičių tyrimo metodus galima apibendrintai pavaizduoti taip (1.6 pav.):

1.6 pav. Šilumokaičių tyrimo metodai
Fig. 1.6. Methods for heat exchangers analysis

Pirmuosius du 1.6 paveiksle pateiktus metodus galima priskirti klasikinams, likusius – universaliems metodams. Aptarti du šilumokaičių skaičiavimo metodai vienodai tinka šilumokaičių skaičiavimams, tačiau NTU metodas yra patogesnis skaičiavimo būdas. Vidutinio logaritminio temperatūrų skirtumo (LMTD) skaičiavimo metodas, nors ir naudojamas šilumokaičių eksploataciniam skaičiavimui, bet skaičiavimai laiko požiūriu trunka ilgiau (Incropere, Dewitt 2002).

Nors šilumokaičiai lyginami pagal jų efektyvumą, vis dažniau tam panaudojamas šilumokaičių ekserginio naudingumo vertinimas.

Naudojant pirmąjį ir antrąjį šilumokaičių analizės metodus (1.6 pav.) gauti lygiaverčiai rezultatai, tačiau NTU metodas, palyginus su pirmuoju, žymiai

paprastesnis. Kiti du 1.6 paveiksle pateikti metodai gali detaliau apibūdinti nagrinėjamos šilumokaičių sistemos rodiklius, apibūdinančius efektyvų energijos naudojimą juose arba šilumokaičius naudojančiose sistemose.

1.5. Procesų ir įrenginių, naudojamų pastato inžinerinėse sistemose, ekserginis naudingumas bei integralumas

El-Sayed (2001) teigia, kad didesnio efektyvumo energijai imlių sistemų projektavimas mažesnėmis išlaidomis – būtina sąlyga darniam vystymuisi, be to, pateikia principus, kuriais remiantis galima būtų sumažinti energijos transformavimo sistemos sąnaudas, kurioms sumažėjus sumažėtų ir sistemos energijos sąnaudos bei būtų gauta energijos sąnaudų požiūriu optimali sistema.

Kaip rodo tyrimų apžvalga, dažnai įvairiais požiūriais nagrinėjamas šilumokaičių ekserginis naudingumas. Ekserginės analizės, ekserginio naudingumo sąvokos išsamiai išnagrinėtos (Boelman, Sakulpipatsin 2004), pateikta, kaip skirtingos ekserginio naudingumo sąvokos gali būti pritaikytos paprasčiausiam šilumokaičiui bei apibūdinamos pasirinktų šilumnešių temperatūrų derinių naudojimo atvejai. Taip pat apibrėžiama bei naudojama bedimensė temperatūra, kurios atžvilgiu nagrinėjamas šilumokaitis, o skaičiavimai atlikti keičiant pradinės šilumnešių ir aplinkos temperatūras bei šilumokaičio efektyvumą.

Naudojant ekserginę ir GCA gali būti nustatyta optimali eksergijos nuostolių požiūriu šilumokaičio konstrukcija. Gauta, kad optimalūs eksergijos nuostoliai auga didėjant garų debitui kondensatoriuje (Haseli *et al.* 2008).

Cornelissen ir Hirs (1999) pateiktame darbe, kuriame aptariama priešsrovio šilumokaičio termodinaminė (ekserginė) optimizacija, nurodomos išraiškos eksergijos nuostoliams šilumokaityje nustatyti dėl šilumnešių srautų šilumos perdavimo ir slėgio kritimo. Atsižvelgdami į eksergiją šie tyrėjai ieškojo ir optimalių šilumnešių temperatūrų šilumokaityje.

Haseli ir kt. (2008), nagrinėdami kondensatorių, nustatė kondensacijos proceso prisotintų vandens garų vėsinimo vandens optimalią temperatūrą minimizuojant eksergijos nuostolius, išreiškė eksergijos nuostolius kaip funkciją nuo veikimo temperatūrų ir garų bei aušinančio šilumnešių debito.

Galovic *et al.* (2003) žinomais bedimensiais skaičiais išreiškė priklausomybę tarp entropijos gamybos ir pasrovio šilumnešių tekėjimo šilumokaičio efektyvumo, o gautą modelį siūlė naudoti optimizuojant tokio tipo šilumokaičius. Čia bedimensiais dydžiais vietoj šilumokaičiams reikiamų nagrinėti 6 dimensinių dydžių (A , k , c_{p1} , c_{p2} , T_1' , T_2') siūloma naudoti tris bedimensius.

Anantharaman *et al.* (2006) pateikta metodika energijos integravimui, kuri yra ekserginės analizės ir sudėtinių kreivių (naudojamų Pinch technologijoje) sinergija yra pirmasis metodinis bandymas pateikti šiluminę, mechaninę ir cheminę energiją grafiniu pavidalu, panašiu į sudėtines kreives, naudojamas intensyvių procesų energijos integravimui. Deja, pagrindinis šių autorių pateiktos energijos lygio sudėtinių kreivių metodikos trūkumas – nėra galimybės gauti rodiklius geriausiam eksploatavimui ir tolesniam sisteminio projektavimo procesui nagrinėjant šiuos rodiklius.

Pasitelkus eksergoekonominę arba termoekonominę analizę, jungiančią ekserginę ir ekonominę analizę, siekiama nustatyti „kompromisinę“ tarp šių dviejų požiūrių energijos vertę (Li, Chang 2005). Szargut (2005) termodinaminiam procesų naudingumui didinti siūlo naudoti procesų integracijos ir Pinch analizės metodus. Renkantis šilumokaičiui srautus reikia stengtis, kad vieno iš srautų galinė temperatūra būtų artima pradinei kito srauto temperatūrai. Šie metodai skirti procesams projektuoti siekiant sumažinti energijos sunaudojimą ir maksimizuoti šilumos atgavimą. Energijai tausoti pasiūlyti 7 būdai (1.7 pav.).

1.7 pav. Ekologiškos termodinamikos principai
Fig. 1.7. Principles of ecological thermodynamics

Pirmieji trys 1.7 paveiksle siūlomi principai gerai atspindi, į ką reikia orientotis siekiant efektyvaus energijos naudojimo tiek procesuose, tiek įrenginiuose bei juos naudojančiose sistemose.

Žinant mikroklimato sistemoje naudojamus įrenginius, tų įrenginių bei visos sistemos ekserginis naudingumas gali būti įvertinamas naudojantis Nikulshin *et*

al. (2002) pateiktomis išraiškomis atskirų sistemų elementų eksperimentiniam naudojimui nustatyti.

1.6. Pirmojo skyriaus apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas

Pirmajame skyriuje aptarti metodai, skirti procesams integruoti energijos transformavimo sistemose, taip pat su energijos vartojimu susijusiose pastato inžinerinėse sistemose. Atliktų tyrimų apžvalga liudija, kad termodinaminė analizė, procesų integracija plačiąja prasme leidžia surasti tų sistemų energinio efektyvumo didinimo kelius. Iš apžvalgos disertacijos tema matyti, kad pastatų inžinerinės sistemos nepakankamai arba visiškai netirtos procesų integracijos šiuolaikinių metodų požiūriu, t. y. trūksta tyrimų tiek įvertinančių galimybes integruoti procesus, tiek juos integruoti pastato inžinerinėse sistemose.

Klasikiniai metodai naudojami šilumokaičiams projektuoti, nagrinėti jau nebegali suteikti sprendimų, kuriais remiantis galima būtų suprojektuoti vis efektyviau energiją naudojančias sistemas ir įrenginius. Todėl būtina ieškoti, kurti, pritaikyti, tobulinti būdus, įgalinančius rasti sprendinius efektyvesniam energijos naudojimui šilumokaičius turinčiose pastato inžinerinėse sistemose.

Pagal apžvalgoje sutiktus procesų integracijos tyrimus ir taikymo pavyzdžius galima išskirti dvi esmines grupes – pramoniniai procesai ir energetinės sistemos. Energetinės sistemos apima ne tik pastato inžinerines sistemas, bet ir energijos gamybos, gamybos, transformavimo, aprūpinimo ir paslaugų sistemas.

Remiantis atlikta tyrimų apžvalga disertaciniame darbe sprendžiami tokie uždaviniai:

- Nustatyti pastato inžinerinių sistemų energinio efektyvumo požiūriu problemines sistemas, įrenginius ir procesus.
- Nustatyti pastato vėdinimo sistemų, kurioms reikalingas energijos tiekimas, projektinių sprendimų ypatybes.
- Įvertinti tradicinės procesų integravimo metodikos – Pinch analizės – naudojimo pastato inžinerinėms sistemos galimybes bei nustatyti ypatybes.
- Sukurti algoritmą termodinamiškai optimaliam pastato inžinerinių sistemų integruotam sprendiniui rasti derinant termodinaminės ir Pinch analizės metodus.

Procesų integracijos naudojimo pastatų inžinerinėse sistemose ypatybės

Kaip teigia Perez-Lombard *et al.* (2007), pastato inžinerinės sistemos naudoja sąlyginai didelį energijos kiekį – joms tenka 50 % pastatuose sunaudojamos energijos (JAV). Procesų, vykstančių pastato inžinerinėse sistemose integracija – vienas iš būdų efektyviau naudoti jose energiją. Efektyvus energijos vartojimas yra viena iš Lietuvos energetikos politikos prioritetinių tikslų (LR Vyriausybė 2006, 2010).

Pastato inžinerinės sistemos energetiniu požiūriu yra įvairialypės sistemos, kuriose termodinaminiu požiūriu vyksta įvairaus temperatūrinio lygio šilumos, masės mainų, tekėjimo ir darbo procesai. Šios sistemos dažniausiai projektuojamos pavieniui, individualiai, nepakankamai susiejant sistemų, jas sudarančių įrenginių ir juose vykstančių procesų tarpusavio veikimo priklausomybes.

Kiekviena pastato inžinerinė sistema prieš nagrinėjant ją integracijos požiūriu turi būti įvertinama palyginant energijos naudojimą joje su visose pastato inžinerinėse sistemose naudojama energija. Tam tikslui sistemas reiktų vertinti

gyvavimo ciklo požiūriu, t. y. išnagrinėti sąlygas, kurios turi įtakos sistemų projektavimui, pagaminimui, naudojimui, priežiūrai bei sunaikinimui.

2.1. Nagrinėjama sistema

Atliktų tyrimų apžvalga parodė, kad imliausi energijai pastato inžinerinėse sistemose yra energiją transformuojantys įrenginiai – šilumokaičiai, šildytuvai, kurie ir pasirinkti toliau nagrinėti darbe. Didžiausias dėmesys čia skiriamas vėdinimo įrenginiuose naudojamiems šilumokaičiams, nes čia (Nyman, Simonson 2005; Torio *et al.* 2009) slypi neišnaudotas potencialas energijai taupyti arba didinti termodinaminį sistemos naudingumą.

Vėdinimo kaip proceso tikslas – užtikrinti geros kokybės oro tiekimą ir jo palaikymą patalpose (STR 2.09.02:2005). Oro kokybė pastatuose bei jų patalpose daro įtaką tiek pastatų, tiek juose esančių bei dirbančių žmonių savijautai. Esant nepakankamam oro kiekiui, pastato atitvarose kaupiasi drėgmė, formuojasi pelėsis, žmonės gali susirgti įvairiomis kvėpavimo ir kitomis ligomis (Seppänen 2008).

Vėdinimo orui paruošti ir jam tiekti naudojami įvairios paskirties vėdinimo įrenginiai. Dažnai, bet ne visuomet, pasirenkami vėdinimo įrenginiai su šilumogražiais, nors tokių vėdinimo įrenginių naudojimas skatinamas ne tik Lietuvos teisės aktuose (STR 2.09.02:2005), bet ir Europos Sąjungos bei kituose normatyviniuose dokumentuose (2010/31/EB; LST EN 13779:2007).

Priverstinės vėdinimo sistemos paprastai naudojamos viešosios paskirties pastatams vėdinti. Darbe baziniu nagrinėjamu atveju pasirinkta vėdinimo sistema, naudojama viešosios paskirties pastate. Čia numatyta atgauti dalį šalinamo iš patalpų oro šilumos ir ją panaudoti tiekiamam į patalpą orui iš dalies pašildyti. Šiam tikslui gali būti naudojami įvairūs šilumogražiai.

Vėdinimo sistemą bendruoju atveju sudaro šie elementai (2.1 pav.).

2.1 pav. Vėdinimo sistemos bendroji schema

Fig. 2.1. Principle scheme of ventilation system

Vėdinimo įrenginyje (a) paruoštas oras ortakiu (b) paskirstomas į patalpą naudojant oro skirstytuvą (c) ir ištraukiamas iš jos per groteles (d) bei ortakiu (f) grąžinamas į vėdinimo įrenginį (a).

Vienas vėdinimo įrenginio elementų – šilumogražis. Vėdinimo įrenginių su šilumogražiais palyginimas pateikiamas 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Vėdinimo įrenginių su šilumogražiais palyginimas

Table 2.1. Comparison of air handling units with heat recovery units

Šilumogražis	Temperatūrinis efektyvumas, %	Privalumai	Trūkumai
Plokštinis	62,4	Naudojama ten, kur reikia ypač švaraus oro.	Užšalimo pavojus.
Rotacinis	72,8	Maksimalus energijos taupymas; kompaktiškas.	Reikalinga papildoma energija rotorui veikti.
Atskirtų srautų šilumokaitis be tarpinio šilumnešio šildymo	45,5	Tinkamas, kai įrenginius būtina (reikia) atskirti.	Reikia cirkuliacinio siurblio tarpiniam šilumnešiui cirkuliuoti.
Atskirtų srautų šilumokaitis su tarpinio šilumnešio šildymu	60,0	Galimybė panaudoti atliekinę šilumą pastate.	

Temperatūrinis šilumogražio efektyvumas nustatytas pagal Flaktwoods programą EU2000. Pasirinkti tokie įvesties duomenys: projektinė išorės oro temperatūra -20°C , patalpos temperatūra (20°C) – norminė viešosios paskirties patalpų temperatūra, vėdinimo sistemai ortakių slėgio nuostoliai (LST EN 13779:2007) pasirenkami pagal normalaus slėgio sistemai rekomenduojamus ir tiekimo sistemoje lygūs 300 Pa, o ištraukimo sistemoje 200 Pa. Į pastatą tiekama ir iš jo ištraukiama $10000\text{ m}^3/\text{h}$ oro. Analogiškos šilumogražio temperatūrinio efektyvumo reikšmės gaunamos naudojantis (2.1) formule.

Nagrinėjant pastato inžinerines sistemas, kurias sudaro ne tik 2.1 lentelėje aptarti įrenginiai, naudojami 2.2 lentelėje pavaizduoti žymėjimai.

2.2 lentelė. Žymėjimai, naudojami schemose**Table 2.2.** Notations in schemes

Įrenginys, procesas	Šilumokaitis	Šildytuvas	Aušintuvas	Ventiliatorius	Filtras	Triukšmo slopintuvas	Cirkuliacinis siurblys	Karštas srautas (jo numeris), pradinė temperatūra (°C)	Šaltas srautas (jo numeris), pradinė temperatūra (°C)
Žymėjimas									
Pastato inžinerinės sistemos	<div>⊕</div> <div>⊖</div> <div>↻</div>	<div>⊕</div>	<div>⊖</div>	<div>⊙</div>	<div>⌵</div>	<div>⌵</div>	<div>⊙</div>	-	-
Pinch analizė šilumokaičių tinklas	<div>○—○</div>	<div>⊙</div>	<div>⊙</div>					<div>H(1)</div> <div>20</div>	<div>C(1)</div> <div>5</div>

Pačios paprasčiausios ir dažniausiai taikomos plokštinį šilumogrąžį (2.2 pav.) naudojančios vėdinimo sistemos (2.3 pav.) privalumas yra tas, kad šis šilumogrąžis tinkamas beveik visais atvejais.

2.2 pav. Plokštinio šilumogrąžio schema**Fig. 2.2.** Scheme of plate heat exchanger

2.3 pav. Vėdinimo įrenginys E su plokštiniu šilumogrąžiu
Fig. 2.3. Air handling unit (AHU) E with plate heat exchanger

Schemoje (2.3 pav.) dydžiais $Q^{+(-)}$ ir indeksu „+“ žymimi į sistemą patenkantys, o indeksu „-“ iš sistemos išeinantys šilumnešių šilumos srautai. Raide E žymimas patalpą D aptarnaujančios vėdinimo sistemos įrenginys. Šiame vėdinimo įrenginyje E imamas iš lauko oras yra išvalomas tiekiamo oro filtru (1), šiek tiek pašildomas naudojant plokštelinį šilumogrąžį (2) arba šilumokaitį su tarpiniu šilumnešiu, toliau iki reikiamos tiekiamo į patalpą oro temperatūros oras sušyla šilumokaityje – kaloriferyje (3). Taip paruoštas oras tiekiamo oro ventiliatoriaus dėka (4) tiekiamas į patalpą per groteles (5). Per ištraukiamo oro groteles (6) oras ištraukiamas, išvalomas filtre (7) ir ventiliatoriumi (8) pašalinamas iš patalpos D.

2.3 paveiksle pavaizduotos vėdinimo schemos trūkumas – ji gali būti taikoma tam tikram oro kiekiui tiekti ir ištraukti, be to, yra pavojus, kad užšals šilumogrąžio plokštelės.

Kai naudojamas rotacinis šilumokaičio (2.4.pav.), vėdinimo sistemos schema (2.5 pav.).

2.4 pav. Rotacinio šilumokaičio schema
Fig. 2.4. Scheme of rotary heat exchanger

2.5 pav. Vėdinimo įrenginys E su rotaciniu šilumogrąžiu

Fig. 2.5. Air handling unit (AHU) E with rotary heat exchanger

Pagrindinis pateiktos vėdinimo schemos (2.5 pav.) trūkumas – šilumogrąžiui veikti reikia energijos (elektros).

Esant dideliam atstumui tarp oro tiekimo ir ištraukimo stovų, patogi vėdinimo schema su šilumogrąžiu, naudojančiu tarpinį šilumnešį (2.6 pav.). Nagrinėjami du tokių schemų atvejai (2.7 pav. ir 2.8 pav.).

2.6 pav. Šilumogrąžis su tarpiniu šilumnešiu

Fig. 2.6. Heat exchanger with run around coil

2.7 pav. Vėdinimo įrenginys su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumogražiu be tarpinio šilumnešio pašildymo

Fig. 2.7. Air handling unit (AHU) E with run around coil heat exchanger without intermediate stream preheating

2.8 pav. Vėdinimo įrenginys su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumogražiu su tarpinio šilumnešiu pašildymu

Fig. 2.8. Air handling unit (AHU) E with run around coil heat exchanger with intermediate stream preheating

2.7 paveiksle esanti schema atitinka vėdinimo sistemą, kurioje naudojamas tarpinis šilumnešis šilumai iš šalinamo oro atgauti. Tokiu būdu imamas iš lauko oras šiek tiek sušildomas šilumokaityje X, o baigiamas šildyti iki tiekiamos į patalpą oro temperatūros šildytuve Z. Šildytuvą Z, naudodamas pastato šilumos

punkte įrengto šilumokaičio šilumnešį, sušildo orą iki reikiamos į patalpą tiekio oro temperatūros.

Tuo tarpu 2.8 paveiksle pavaizduoto vėdinimo įrenginio schemeje, kurioje naudojamas šilumogražis su tarpiniu šilumnešiu, privalumas lyginant su kitais šilumogražiais yra tas, kad juose šilumos mainams vykdyti gali būti naudojami įvairūs pastate esantys atliekinės šilumos srautai. Šios vėdinimo įrenginio schemos privalumas – nereikia naudoti papildomo šilumokaičio (šildytuvo, kalorifero), kuriame oras sušiltų iki reikiamos patalpos temperatūros, nes jau po šilumogražio pasiekama reikiama oro temperatūra. Taip pat naudojant šaltnešį reikiamu metu galima atvėsinti į patalpą tiekiamą orą.

X žymimas šilumokaitis, kuriame pratekėjęs iš lauko patenkantis oras iš dalies sušyla nuo T_1 (lauko oro temperatūros) iki T_2' (pašilusio X šilumokaityje oro temperatūros), į patalpą tiekiamo oro temperatūra – T_2 . Y šilumokaityje vyksta šilumos mainai tarp ištraukiamo iš patalpos T_3 temperatūros oro ir tarpinio šilumnešio (vandens – glikolio tirpalo), kurio temperatūros GT_{41} , GT_{42} . Z šilumokaityje (2.7 pav.) vyksta šilumos mainai tarp oro, kuris prieš patekdamas į patalpą sušyla šilumokaityje ir pastato šilumos punkte esančių T_8 ir T_1 temperatūros šilumnešio, o (2.8 pav.) šilumos mainai vyksta tarp tarpinio šilumnešio ir minėto šilumnešio prieš tai.

Dar vienas būdas šilumai iš šalinamo oro atgauti – šilumos siurblio naudojimas (2.9 pav.). Toks vėdinimo įrenginys geras tuo, kad bet koku atveju šalinamo iš patalpos oro šilumos nepakaks sušildyti tiekiamo į patalpą oro, todėl šilumos siurblio šilumokaičiai (kondensatorius bei garintuvas) gali tam pasitarnauti. Tokiu būdu iš šalinamo iš patalpos oro būtų atgaunama ir perduodama daugiau šilumos tiekiamam orui sušildyti.

2.9 pav. Vėdinimo įrenginys su šilumos siurbliu
Fig. 2.9. Air handling unit with heat pump

Ši vėdinimo įrenginio schema panaši į 2.7 paveiksle pateiktą schemą, kurioje taip pat naudojamas tarpinis šilumnešis, tačiau čia tarpinis šilumnešis cirkuliuoja šilumos siurblyje. Šilumos siurblių sudarančiais elementais: kompresoriumi (9), kondensatoriumi (3), droseliu (11) ir garintuvu (10) teka freonas, atlikdamas ciklą.

Vėdinimo šilumogrąžių šilumos atgavimas vertinamas šiais 2.10 paveiksle pateiktais efektyvumo rodikliais.

2.10 pav. Vėdinimo šilumokaičių efektyvumo vertinimas

Fig. 2.10. Effectiveness of heat exchanger for ventilation

Dažniausiai vertinamas temperatūrinis efektyvumas, parodantis santykį tarp to, kiek laipsnių tiekiamasis oras pašilo šilumogrąžyje bei šalinamo oro ir lauko oro temperatūrų skirtumo, t. y. kiek galėjo pašilti idealiu atveju (2.1) (analogiškai kaip ir apskaičiuojamas šilumokaičio efektyvumas įvertinant faktiškai ir maksimaliai galimo perduoti šilumos santykį):

$$\varepsilon_t = \frac{\hat{T}_\beta'' - \hat{T}_\beta'}{\hat{T}_\alpha' - \hat{T}_\beta'} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

čia $\hat{T}_\beta'$ – pradinė tiekiamo oro temperatūra, paprastai lygi lauko oro temperatūrai, (°C), $\hat{T}_\beta''$ – pašilusio tiekiamo oro temperatūra, (°C), $\hat{T}_\alpha'$ – pradinė šalinamo oro temperatūra, (°C).

Tuo atveju, kai šalinamo ir tiekiamo oro kiekiai lygūs, temperatūrinis efektyvumas lygus šiluminiam efektyvumui. Šiluminis efektyvumas parodo santykį tarp atgautos $\Phi_{atg.}$ ir šalinamo oro šiluminės galios $\Phi_{šal.}$, papildomai įvertinamas tiekiamo ir šalinamo oro kiekiai bei tankiai.

$$\varepsilon_{šil.} = \frac{\Phi_{atg.}}{\Phi_{šal.}} = \frac{L_{tiek} \cdot \rho_{tiek} \cdot (\hat{T}_\beta'' - \hat{T}_\beta')}{L_{šal} \cdot \rho_{šal} \cdot (\hat{T}_\alpha' - \hat{T}_\beta')}, \quad (2.2)$$

čia L_{tiek} , $L_{šal}$ – tiekiamo, šalinamo oro debitai, (m³/h), ρ_{tiek} , $\rho_{šal}$ – tiekiamo, šalinamo oro tankis, (kg/m³), $\hat{T}_\alpha'$, $\hat{T}_\beta''$, $\hat{T}_\beta'$ – tokios pat kaip pateiktos prie (2.1) formulės.

Retai arba visiškai nevertinamas ekserginis naudingumas, kuris yra mažesnis ir priklausomai nuo aplinkos oro temperatūros kinta, kai tuo tarpu temperatūrinis efektyvumas išlieka pastovus. Ekserginis naudingumas išreiškiamas (2.3) išraiška.

$$\eta = \frac{E_{w\beta}^-}{E_{\alpha 1}^+} = \frac{M_{\beta} \cdot (k_{\beta}'' - k_{\beta}')}{M_{\alpha} \cdot (k_{\alpha}' - k_{\alpha}'')} = 1 - \frac{\dot{L}}{E_{w\alpha}^-}, \quad (2.3)$$

čia $E_{\alpha 1}^+$ – viršminės eksergijos galia, kurią nuo šildančio šilumnešio gavo sistema, (kW); $E_{w\beta}^-$ – viršminės eksergijos galia, kurią sistema suteikė šildomam šilumnešiui, (kW); M_{α} , M_{β} – šilumnešių debitai, (kg/s); k_i – koentalpijos įeinant ir išeinant iš kontūro, (kJ/kg); $\dot{L}$ – eksergijos nuostoliai, (kW).

Koentalpijos savo ruožtu įvertinamos pagal (2.4) formulę.

$$k_i = h_i - T_a \cdot s, \quad (2.4)$$

čia h_i – entalpija, (kJ/kg); T_a – aplinkos temperatūra, (K); s – entropija, (kJ/kgK).

Šilumogražos efektyvumas priklauso nuo šilumogražio tipo, klimato sąlygų, tiekiamo ir šalinamo oro temperatūrų ir ypač nuo veikimo trukmės per metus.

2.2. Energijos, naudojamos mikroklimatą formuojančiose sistemose, poreikis

Europos Komisijos komunikate dėl 2020 metų energetikos energijos vartojimo efektyvumas laikomas 2020 metų ES energetikos strategijos pagrindu (COM/2010/0639). Didelis energinio efektyvumo didinimo potencialas egzistuoja galutinio vartojimo lygmenyje (30 % ES viešosios paskirties pastatų sektoriuje). Energijos naudojimas gyvenamuosiuose ir viešuosiuose pastatuose sudaro didžiąją dalį (apie 40 %) ES bendro galutinio energijos vartojimo ir CO₂ emisijos. Racionalus energijos taupymas yra esminis veiksnys, lemiantis reikšmingą ekonominę, socialinę ir aplinkosauginę naudą. Pastatų energinis efektyvumas taip pat svarbus siekiant energijos ir klimato kaitos tikslų (2010/31/EB).

Viešųjų pastatų inžinerinėse sistemose esantis energijos taupymo potencialas nėra pilnai išnaudotas, be to, šios paskirties pastatuose yra didesnė inžinerinių sistemų įvairovė lyginant su gyvenamosios paskirties pastatuose esančiomis inžinerinėmis sistemomis.

Pastato inžinerines sistemas galima išskirti į mikroklimatą formuojančias ir kitas sistemas, kurios užtikrina šalto, karšto vandens tiekimą bei apšvietimą pastatuose. Pastato inžinerinėse sistemose naudojamą energiją galima būtų išskirti į įrenginių veikimui arba procesų vyksmui reikalingą elektros arba šilumos naudojimą. Pagrindines energiją naudojančias inžinerines sistemas pastate galima suskirstyti į naudojančias tik šilumą, tik elektrą arba abi energijos rūšis (2.11 pav.).

2.11 pav. Viešosios paskirties pastato inžinerinių sistemų naudojamos energijos formos
Fig. 2.11. Energy forms used for public buildings engineering systems

Šildymui ir vėsinimui ES gyvenamuosiuose pastatuose sunaudojama apie 40 %, o viešosios paskirties pastatuose – 32 % energijos (WBCSD 2009). Išsivysčiusiose šalyse pastatai sunaudoja 20–40 % galutinės energijos. Šie rodikliai kinta, pavyzdžiui, kasmet Jungtinėje Karalystėje pastatuose sunaudojama 0,5 % daugiau energijos, tuo tarpu Ispanijoje šis prieaugis siekia 4,2 %. Pagrindinės priežastys, kurios turi įtakos energijos, naudojamos pastatuose, augimą siejamos su pastatų sektoriaus bei jame naudojamų inžinerinių (ypač šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo) sistemų plėtra (Perez-Lombard *et al.* 2008).

Nors vėdinimo ir šildymo sistemos naudoja abiejų rūšių energiją, vėdinimo sistema, veikdama ištisus metus, santykinai sunaudoja daugiau elektros. Elektros sąnaudoms įtakos turi sistemoms naudojamų ventiliatorių, kurie transportuoja orą, veikimas. Taip pat šioms sąnaudoms priskiriamos ir cirkuliacinių siurblių elektros sąnaudos, kurias tiesiogiai veikia energijos poreikiai šildymui, vėdinimui ir vėsinimui (Motuzienė 2010). Tačiau vėdinimo ir vėsinimo sistemų cirkuliaciniai siurbliai yra mažesnio galingumo, lyginant su šildymo sistemoje naudojamais cirkuliaciniais siurbliais.

Atsižvelgiant į tai, kad didėja pastatų sandarumas, o vėdinimo energijos vartojimo efektyvumo vaidmuo stiprėja, būtina atsižvelgti į didesnę energijos poreikį pastatams vėdinti. Pagrindinis dėmesys šiame darbe skiriamas vėdinimo sis-

temai ir kitose inžinerinėse sistemose naudojamų srautų integravimui vėdinimo įrenginyje procesams vykdyti.

Tariant, kad vienam žmogui reikiamo tiekti minimalaus oro kiekis yra 10 l/s (STR 2.09.02:2005), visiems Lietuvos gyventojams reiktų tiekti 36000 m³/s oro. Šiam orui patiekti būtų sunaudojama 94 GWh elektros, jei savitoji ventiliatoriaus priimama galia (SPF – angl. *specific fan power*) lygi 1000 Wm⁻³s (LST EN 13779:2007). Taip pat tokį oro kiekį reiktų pašildyti šaltuoju metų laiku, tam būtų sunaudojama 1929 TWh šilumos. Lyginant gautus elektros ir šilumos poreikius su Lietuvoje (Statistikos departamentas 2011) sunaudojama energija, atitinkamai apskaičiuoti poreikiai sudarytų 3 % ir 81 %.

Nyman ir Simonson (2005), nagrinėdami du gyvenamųjų namų Suomijoje vėdinimo įrenginius su šilumogrąžiais, nustatė, kad ventiliatorių naudojama energija per 50 metų gyvavimo ciklą viršija energiją, sunaudojamą tiems įrenginiams pagaminti. Taip pat jų atlikto tyrimo rezultatai parodė, kad šilumogrąžio naudojama energija kompensuoja energiją, sunaudotą jam pagaminti.

Tuo remiantis galima teigti, kad gyvavimo ciklo požiūriu, naudojimo etapas (2.12 pav.) priskiriamas imliausiam energijos vartojimo etapui. Pirminės energijos (eksergijos) poreikius pastato gyvavimo cikle nagrinėjo Cole, Kernan (1996), Junnila *et al.* (2006). Tyrėjai (Nyman, Simonson 2005; Motuzienė 2010), nagrinėję energijos poreikius pastato inžinerinėms sistemoms per jų gyvavimo ciklą pabrėžia, kad energetines sistemas reikia nagrinėti kompleksiskai bei vertinti jų poveikį aplinkai per jų gyvavimo ciklą, o ypač daug dėmesio skirti energijos, naudojamos sistemos naudojimo etape, tyrimams.

2.12 pav. Pastato inžinerinės sistemos gyvavimo ciklas

Fig. 2.12. Life cycle of buildings' engineering system

Biekša (2008), išnagrinėjęs pastato mikroklimato sistemas, nustatė, kad administracinės paskirties pastato vėdinimo sistemos naudojimo etapui tenka 88 % visos gyvavimo ciklo metu sunaudojamos pirminės energijos. Todėl šiame darbe išsamiai nagrinėjamas sistemų naudojimo etapas, kuris siejamas su didžiausiu energijos naudojimu ir išmetalų susidarymu.

2.3. Faktoriai, turintys įtakos energijos naudojimui pastato inžinerinėse sistemose

Energijos naudojimui pastato inžinerinėse sistemose turi įtakos keli faktoriai. Visų pirma – klimatas, kuris formuoja sąlygas pasyvioms mikroklimatą formuojančioms sistemoms (PMS) – pastato atitvaroms. Iš dalies nuo jų priklauso, kokios bus aktyvių mikroklimatą formuojančių sistemų (AMS) galios.

Savo ruožtu pastatui ar jo sistemoms energija šilumos ar elektros pavidalu generuojama naudojant energijos generatorius (jėgaines, katilus) arba energijos transformavimo įrenginius – šilumokaičius, kurie priskiriami prie AMS įrenginių.

Dar vienas veiksnys, nuo kurio priklauso energijos naudojimas pastato inžinerinėse sistemose, jų veikimo ar naudojimo režimas, kontrolė bei valdymas – pastato automatizuoto valdymo sistemos (PAVS) (angl. *BMS – building management systems*). Jos, kontroliuodamos pastato inžinerinių sistemų veikimą, galėtų užtikrinti, kad energija pastate ir jo inžinerinėse sistemose būtų naudojama efektyviai.

Bene labiausiai inžinerinių sistemų veikimui turintis įtakos veiksnys – klimatas. Klimatinės sąlygos, dažniausiai apibūdinamos oro temperatūra, lemia, kada bus pradėtas šildymas pastate, t. y. pradės veikti šildymo sistema. Taigi čia svarbu įvertinti jų įtaką pastato inžinerinėms sistemoms, t. y. energijos poreikiui joms veikti.

2.3.1. Klimato sąlygų įtaka pastato energijos poreikiui

Pastato šilumos poreikis priklauso nuo projektinės išorės oro temperatūros bei vidutinės šildymo sezoną apibūdinančios temperatūros. Projektuojant mikroklimato sistemas naudojami statistiniai klimatologiniai duomenys (RSN 156 – 94), kurie vertinant šilumos poreikius šioms sistemoms eksploatuoti, turi būti perskaičiuojami į normines sąlygas.

Realūs klimatologiniai duomenys (Gismeteo 2011; Degree Days 2011) gali būti naudojami sistemų energijos poreikių analizei atlikti. Duomenų pateikimo intervalas svyruoja nuo 3 iki 12 valandų tarpsnio, galima pasirinkti norimą intervalą ir nagrinėti duotuosius duomenis arba naudoti juos detaliems skaičiavimams atlikti.

Nagrinėjant pastato inžinerines sistemas, kurios veikia ne tik šaltuoju, bet ir šiltuoju metų laiku, būtina atsižvelgti į tų sistemų skirtingą veikimo pobūdį. Vėdinimo sistema, veikdama šaltuoju metų laiku, patalpoms vėdinti naudoja papildomą skirtingos kokybės energiją. Siekiant efektyvaus energijos panaudojimo, vėdinimo sistemose tradiciškai naudojami šilumogrąžiai šiltuoju metų laikotar-

piu gali būti panaudoti vėsos grąžai. Todėl būtina nagrinėti, kaip veikia šilumos mainų įrenginiai ištisus metus ir kaip kinta jų efektyvumas metų eigoje.

Svarbus rodiklis, naudojamas įvertinti šilumos poreikiams šildymui – dienolaipsniai. Pagal juos Lietuvos klimatinės sąlygos priskiriamos mišraus tipo klimato zonai (Laustsen 2008), kurioje maždaug po vienodai dienolaipsnių tenka tiek šildymui, tiek vėsinimui, t. y. tenkinamos šios sąlygos: $2000 \leq \text{HDD } 18^\circ\text{C}$ ir $1000 \leq \text{CDD } 18^\circ\text{C}$, čia HDD – šildymo dienolaipsniai, CDD – vėsinimo dienolaipsniai.

Išorės oro temperatūros kitimas gali būti apibūdinamas kumuliacine temperatūrų kitimo kreive. Ši kreivė (2.13 pav.), charakterizuodama būdingus mikroklimato sistemų veikimo taškus, nurodo, kiek trunka atitinkamos sistemos veikimas (Martinaitis *et al.* 2010). Patalpų vėdinimas, nors ir ne nuolatos visose klimatinėse zonose, vyksta ištisus metus, o šildymo sezonas mišrioje klimatinėje zonoje trunka pusę metų laikotarpio.

2.13 pav. Kumuliacinė temperatūrų trukmės kreivė
Fig. 2. 13. Cumulative temperatures distribution curve

Klimatą galima priskirti prie veiksnių, ženkliai veikiančių energijos naudojimą pastate bei jame mikroklimatą formuojančiose sistemose. Pastato inžinerinės sistemos gali būti kontroliuojamos ir valdomos pagal oro temperatūrą naudojantis PAVS.

2.3.2. Pastato automatizuoto valdymo sistemos ir jų nauda procesų integracijai

Ryšys tarp PAVS, AMS, PMS bei klimato gali būti pavaizduotas tokiu būdu (2.14 pav.).

2.14 pav. Ryšys tarp PAVS, AMS, PMS ir klimato

Fig. 2.14. Relation between BMS, active, passive microclimate systems and climate

AMS veikimą įtakančios PMS gali būti kontroliuojamos naudojant PAVS. AMS veikimas priklauso nuo klimato ir iš dalies nuo pasirinktų sistemų veikimo režimų pastate.

PAVS taikymą pastatuose vykstantiems procesams kontroliuoti iš dalies galima priskirti procesų integracijai, nes ši sistema apima procesų pastato inžinerinėse sistemose veikimą.

2.4. Procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose Pinch analizės taikymas

Procesus, vykstančius pastato inžinerinėse sistemose, priimta apibūdinti įvairiais parametrais, dažniausiai temperatūromis.

Atsižvelgiant į pramonės procesų integracijai naudojamus metodus, pastato inžinerinėms sistemoms integruoti pasirinktoms mikroklimato sistemoms integruoti, naudojami ekserginės ir Pinch analizės metodai. Remiantis šių dviejų metodų taikymu, įvertinamos galimybės integruoti procesus inžinerinėse sistemose: modifikuojant esamus arba projektuojant naujus šilumokaičių tinklus, naudojant inžinerinėse sistemose šilumos mainams vykdyti. Modifikuoti reiškia per-

tvarkyti, pakeisti jau įrengtą ar suprojektuotą šilumokaičių tinklą keičiant šilumokaičių skaičių ir pan.

Nagrinėjant procesą Pinch analizės metodu, nepriklausomai nuo proceso (ar tai naujas, ar modifikuojamas) naudojamosi tokia žingsnių seka (Kemp 2007) (2.15 pav.).

2.15 pav. Pinch analizės atlikimo seka
Fig. 2.15. The sequence of Pinch analysis performance

Bene svarbiausias Pinch analizės žingsnis – duomenų analizei pasirinkimas. Nuo tyrimų tikslo priklauso jiems pasirenkamų duomenų tikslumas. Jei tai tik apytikris skaičiavimas, tuomet pakanka priimti preliminarūs, inžinerinėse sistemose naudojamų srautų, duomenis. Jei reikalinga kruopštesnė analizė, tada ypač svarbu pasirinkti patikimus duomenis – ir yra vienas iš Pinch analizės žingsnių (2.15 pav.).

Modifikuojant esamas, jau veikiančias pastato inžinerines sistemas, analizei naudojami faktiniai klimatologiniai bei PAVS duomenys. Kiti duomenys arba nežinomi dydžiai įvertinami naudojant šilumos balanso lygtį (1.2).

Remiantis Pinch analize, iš pradžių surenkami duomenys apie sistemoje vykstančius procesus. Reikiami duomenys analizei pavaizduoti 2.16 paveiksle.

2.16 pav. Duomenys procesų integracijos analizei
Fig. 2.16. Data for processes integration analysis

Iš pradžių, žinant srautų debitus (M), jų šiluminės talpas (CP) bei pradines ir galines srautų temperatūras ($\hat{T}'$, $\hat{T}''$), yra nustatomi šilumos srautų dydžiai (Q). Nustatoma, kurie srautai yra karšto pobūdžio, o kurie – šalto. Karštais vadinami srautai, kurie procesų metu turi būti atvėsinti, šalti – turi būti sušildyti.

Šie duomenys gaunami iš PAVS naudojant joje sukauptus duomenis apie šilumnešių (temperatūras, slėgius), dalyvaujančių pastato inžinerinių sistemų procesuose. Remiantis šilumos balansu nustatomi minėtų sistemų procesuose dalyvaujančių šilumnešių (srautų) debitai, srautų šiluminės talpos bei šilumos srautų dydžiai. Šis būdas, naudojant PAVS duomenis analizei, naudojamas modifikuojant jau esamas pastate inžinerines sistemas.

Kai projektuojamos naujos inžinerinės sistemos, būtina žinoti, kokios tų sistemų šiluminės galios, numatyti, kokių temperatūrų srautai galėtų būti naudojami jose. Toliau žinomus ir numatomus naudoti srautus, naudojantis 2.15 paveiksle pateikta metodika, galima nagrinėti Pinch analizės metodu.

2.5. Atliekinės šilumos srautai pastato inžinerinėse sistemose vykstančiuose procesuose

Griežtėjantys reikalavimai energijos naudojimui pastatuose skatina ieškoti būdų efektyvaus energijos naudojimui juose didinti. Įvertinant, kad pastatuose vyksta daugybė procesų, kurių metu naudojama vienokios arba kitokios rūšies energija, būtina įvertinti galimybes panaudoti tuos procesus juos integruojant į kitų sistemų veikimą.

Vienas iš procesų integravimo būdų yra srautų procesuose jungimas formuojant šilumokaičius. Įprasta, kad kiekviena AMS projektuojama su savo šilumnešiu neįvertinant galimybių įvesti vienos ar kitos sistemos atliekinį, dar naudingai galimą panaudoti srautą arba srautus.

Pramonės įmonėse, vykstančių technologinių ir pastato inžinerinių sistemų procesų esminis skirtumas – egzistuojantis temperatūrinis potencialas, t. y. temperatūrų skirtumas. Todėl, norint įvertinti integravimo galimybes pastato inžinerinėse sistemose, gali tecti ieškoti potencialų atliekinės šilumos srautuose pačiame pastate arba šalia pastato.

Prie pastate esančių šilumos srautų potencialų galima priskirti į ir iš pastato tiekiamą ir grąžinamą šilumnešį centralizuoto šilumos tiekimo sistemomis. Taip pat, kai nagrinėjami viešosios paskirties pastatai, gali būti naudojamas technologinio proceso šiltas vanduo, buitinio vandens nuotekos.

Visų pirma, turi būti išgryninami šilumos srautai, kurie yra atliekiniai pastate ar pastato inžinerinėse sistemose. Pastate esantys šilumos srautai, kurie gali būti panaudoti kaip atliekinės šilumos šaltiniai pavaizduoti 2.17 paveiksle.

2.17 pav. Atliekinė šiluma pastate
Fig. 2.17. Heat waste in the building

2.17 paveiksle pateikti atliekinės šilumos srautai galėtų būti praplėsti iki dar įvairesnių, tačiau, apsiribojant tik pastato ribose esančiais srautais, nagrinėjami keli nurodyti šiame paveiksle.

Patys elementariausi ir lengviausiai pritaikyti galimi atliekinės šilumos pastate atvejai gali būti šilumnešio tiekiamo į ir grąžinamo iš šildymo sistemos panaudojimas. Toliau sektų karšto vandens ruošimui naudojamo šilumnešio pritaikymas bei technologinio proceso šilto vandens naudojimas, bet šie atvejai galimi, jei pastate atliekamas technologinis procesas arba kai jame yra didelis karšto vandens poreikis.

Pagal (UNEP 2006) pateiktą atliekinės šilumos srautų klasifikaciją, apibendrintai galima juos išskirti į aukštos, vidutinės ir žemos temperatūros atliekinės

šilumos srautus. Procesų integracijai pramonėje tinkamiausi taikyti aukštos ir vidutinės temperatūros atliekinės šilumos srautai, tuo tarpu pastato inžinerinių sistemų procesams integruoti tinkamiausi būtų žemų temperatūrų atliekinės šilumos srautai. Šiems atliekinės šilumos šaltiniams galima priskirti oro kompresorius (27–50 °C), siurblius (27–88 °C), oro kondicionavimo ir vėsinimo sistemų kondensatorius (32–43 °C).

Šilumos siurblio, šaldymo mašinos bei aušintuvių naudojimas gali būti nagrinėjimas, jei pastatas yra kondicionuojamas. Lyginant pastatų mikroklimato sistemoms naudojamas aušintuves su pramonei naudojamomis, jos žymiai mažesnės. Aušintuvės naudoja šaldymo mašinos atliekamą šilumą (White paper 2005). Šilumnešiu gali būti tiek vanduo, tiek oras, bet vandeniu aušinamos šaldymo mašinos energijos naudojimo požiūriu efektyvesnės nei oru aušinamos

Įprastai šilumos siurblys veikia šildymo režimu, tačiau įmanomas ir reversinis veikimas – vėsinimo režimu, kai aušintuvė šilumą iš vandens kontūro išmeta į aplinką. Tuo tarpu šilumos siurbliui veikiant šildymo režimu kondensatoriai nukreipia šilumą iš vandens kontūro ir panaudoja ją šildymui. Šilumos siurbLIAI naudoja oro, grunto, vandens šilumą. Taip pat gali panaudoti kitus šilumos išteklius – buitinę ar pramoninę pastatų arba pramonės šilumą. Šilumos siurbLIAI ypatingi tuo, kad naudoja mažiau pirminės energijos nei tradicinės šildymo sistemos (EERE 2011). Šilumos siurbLIAI naudojami siekiant sumažinti klimato kaitą skatinančių dujų (CO₂, SO₂ ir NO_x) emisiją į aplinką. Didelių pastatų vėdinimo sistemose šilumos siurbLIAI gali būti panaudoti kaip šilumogrąžos įrenginiai.

Siekiant įvertinti galimybes taikyti šiuos srautus procesams pastato inžinerinėse sistemose nagrinėti, pasirenkama tyrimų apimtis nuo viduje vėdinimo įrenginio vykstančių procesų integracijos iki atliekinės šilumos srautų naudojimo.

2.6. Antrojo skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje aptartos vėdinimo įrenginių, naudojančių šilumogrąžius schemas, šių schemų privalumai bei trūkumai, kurie rodo, kad jos turėtų būti analizuojamos ir tobulinamos siekiant efektyvesnio energijos panaudojimo pastato inžinerinėse sistemose.

Nurodyti pagrindiniai faktoriai, turintys įtakos energijos naudojimui pastato inžinerinėse sistemose. Energijos naudojimas žymia dalimi veikiamas klimatinių sąlygų, todėl, nagrinėjant pastato inžinerinių sistemų energijos naudojimą, turi būti atsižvelgiama į parametrų ir energijos poreikių kitimo priklausomybę nuo klimato.

Pateikta Pinch analizės, naudojamos pramonės šiluminiais procesams integruoti, vykdymo seka. Aptarti būdai, kaip gaunami duomenys Pinch analizei vykdyti, jei modifikuojamos esamos arba projektuojamos naujos pastato inžine-

rinės sistemos. Išnagrinėta, kokie atliekinės šilumos pastate srautai gali būti taikomi procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose.

Vėdinimo sistemų procesų integracijos rezultatų analizė

Tyrimų tikslas – kurti ir tobulinti procesų integracijos metodus juos jungiant su kitais metodais, leidžiančiais projektuoti integruotas pastato inžinerines sistemas. Šiame skyriuje procesų integracijos požiūriu analizuojamos antrame skyriuje aptartos vėdinimo sistemų įrenginių schemos.

Naudojant du vienas kitą papildančius metodus (ekserginę ir Pinch analizę), įvertinamos galimybės integruoti procesus vėdinimo įrenginyje. Ekserginės analizės pagrindu įvertinta, kokiai lauko oro temperatūrai esant gaunami didžiausi eksergijos poreikiai orui šildyti. Taip pat nustatyta, kaip kinta ekserginis sistemos naudingumas.

Pinch analizės metodo pavyzdžiu pateikta jos vykdymo seka. Nustatyta, kaip kinta procesų integravimo galimybės naudojant šilumos srautus, esančius vėdinimo sistemos viduje, atliekinės šilumos srautus pastate.

Skyriaus tematika paskelbti trys autorės straipsniai (Misevičiūtė ir Martinaitis 2008a, 2008b; Misevičiūtė *et al.* 2011).

3.1. Vėdinimo įrenginio eksergijos poreikių kitimas orui šildyti šildymo sezono metu

Vėdinimo sistemos sudaro daugybę elementų, kuriuose vykstantiems procesams naudojama įvairių rūšių energija. Pagrindiniai elementai, naudojantys energiją vėdinimo sistemose, yra ventiliatoriai, šilumokaičiai bei šildytuvai, kurie daro reikšmingą poveikį tiek viešosios paskirties pastato energijos poreikiams, tiek ir sistemos ekserginiam naudingumui.

Seppänen (2008) atlikti tyrimai patvirtino hipotezę, kad šilumos atgavimas naudojant priešsrovinius šilumokaičius atitinka šiuos vėdinimo sistemoms keliamus reikalavimus (STR 2.09.02:2005): energijos efektyvumą, vidaus oro kokybę, šiluminį komfortą ir triukšmo lygį. Be to, šilumos (vėsos) atgavimas iš vėdinimo oro didina galimybę sumažinti bendrą šilumos (vėsos) poreikį.

Iš ekserginio principo seka, kad, siekiant efektyvesnio eksergijos naudojimo šilumokaičiuose, procesus šilumokaičiuose rekomenduojama vykdyti esant kuo mažesniai temperatūrų skirtumui, tačiau dėl to didėja šilumokaičių plotas. Nairinėjant mikroklimato sistemose naudojamų šilumokaičių ekserginį naudingumą (Misevičiūtė, Martinaitis 2008), ekserginis principas apie temperatūrų skirtumo mažėjimo įtaką ekserginiam šilumokaičio naudingumui buvo patvirtintas.

Procesų šilumokaičiuose kokybė priklauso ne tik nuo šilumnešių projektinių parametrų, bet ir nuo šilumokaičių veikimo režimo, o tiksliau – sistemų, kuriose jie naudojami, veikimo režimų. Kaip pabrėžiama Sakulpipatsin *et al.* (2010), dažnai, vertinant pastato inžinerinių sistemų efektyvumą, kiekviena sistema vertinama atskirai, bet ne jų visuma.

Šilumokaičių efektyvumas pagal energijos balanso lygtį, t. y. pagal PTD, išreiškiamas viršminių energijos galių santykiu, aprašomu (3.1) formule, kuri nieko nepasako apie šilumokaičio veikimo termodinaminį, ekserginį naudingumą (Martinaitis 2007):

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_{\beta}^{-}}{\dot{W}_{\alpha}^{+}} = \frac{\dot{M}_{\beta} (h_{\beta}'' - h_{\beta}')}{\dot{M}_{\alpha} (h_{\alpha}' - h_{\alpha}'')} = 1, \quad (3.1)$$

čia ε – šilumokaičio efektyvumas; $\dot{W}_{\alpha}^{+}, \dot{W}_{\beta}^{-}$ – viršminės energijos galios, (kW); $\dot{M}_{\alpha}, \dot{M}_{\beta}$ – masiniai šilumnešių (α, β) debitai, (kg/s); $h_{\alpha}', h_{\alpha}'', h_{\beta}', h_{\beta}''$ – šilumnešių (α, β) entalpijos įeinant į ir išeinant iš šilumokaičio, (kJ/kg).

Dažniausiai šilumogražio, naudojamo vėdinimo įrenginyje, efektyvumas išreiškiamas temperatūriniu efektyvumu, kuris įvairiais aspektais nagrinėtas skirtinguose darbuose: Parfentyeva ir kt. (2011), nagrinėdami rotacinio šilumogra-

žio, naudojamo vienodo tiekiamo ir šalinamo oro kiekio vėdinimo sistemose, gavo nesudėtingą išraišką tokio tipo šilumogražio temperatūriniam efektyvumui nustatyti. Pavlovskaja ir Juodis (2006), remiantis realiais duomenimis, nagrinėdami šilumogražių efektyvumą nustatė, kad jis smarkiai priklauso nuo išorės oro temperatūros svyravimo. Todėl, vertinant šilumogražių efektyvumą, būtina atsižvelgti į jų naudojimą ištisus metus, o ne vien tik jų naudojimą šaltuoju metų laiku.

Vėdinimo sistemos veikimo efektyvumas glaudžiai susijęs su klimatu, tiksliau – su aplinkos oro temperatūra. Pažymėtina, kad kaip tik ekserginis vertinimas savo esme ir yra susietas su aplinkos oro temperatūra. Kaip jau buvo minėta anksčiau, rodiklis, apibūdinantis efektyvų energijos naudojimą sistemoje, yra tos sistemos ar procesų joje ekserginis naudingumas.

Šilumokaičio ekserginis naudingumas gali būti išreiškiamas ne vien tik pagal (2.3) formulę, bet ir pagal eksergijos kiekių santykį, įvertinamą šilumnešio šilumos srauto ($\dot{Q}$) ir Karno daugiklio (η_c) sandauga. Šilumokaičių (naudojamų 2.5 paveiksle) šilumnešiams suteikiamą ir gaunamą eksergijas galima pavaizduoti tokiu būdu (3.1 pav.).

3.1 pav. Šilumokaičių šilumnešių suteikta bei gauta eksergija

Fig. 3.1. Supplied and obtained exergy of heat agents in heat exchangers

3.1 paveiksle plotu 7-5-6-8-7 vaizduojamas šildytuve Z (2.5 pav.) šilumnešiui suteiktas šiluminės eksergijos srautas ($\dot{E}_Z^+$), plotu 8-3-4-9-8 – šilumogrąžyje X (2.5 pav.) šilumnešiui suteiktas šiluminės eksergijos srautas ($\dot{E}_X^+$). Atitinkamai šilumnešio šildytuve ($\dot{E}_Z^-$) ir šilumogrąžyje ($\dot{E}_X^-$) gautas šiluminės eksergijos srautas – 7-2'-2-8-7 ir 8-2-1-9-8 plotais. Eksergijos nuostoliai vaizduojami užbrūkšniuotu plotu – 2'-5-6-3-4-1-2-2'.

Be Martinaičio (1998), klimato, apibūdinamo maksimalia ir minimalia bei tų temperatūrų vidurkio reikšme, kuriomis galima formalizuoti klimato raidą, šis ir kt. (2010) autoriai pasiūlė patogų ir naudingą būdą įvertinti klimato įtakojamus absoliučius ir santykinius eksergijos poreikių rodiklius. Čia siūloma naudoti eksergijos dienolaipsnių metodą. Šiuo būdu nustatant būtiną į pastatą tiekti eksergiją tuo pačiu gali būti įvertinimas termodinaminio proceso tobulumas, išreiškiamas ekserginiu naudingumu.

Nagrinėjant vėdinimo bei kitas pastato mikroklimato sistemas naudinga žinoti, kaip kinta jų veikimas keičiantis aplinkos oro temperatūrai. Pagal Martinaičio *et al.* (2010) pateiktas analitines išraiškas dienolaipsniams skaičiuoti įvertinama, kaip kinta ekserginis šildytuvo, šilumogrąžio ir bendras oro šildymo įrenginių naudingumai, kai šildytuvui naudojamas šilumnešis, kurio pradinė ir galinė temperatūros atitinkamai lygios 30 °C ir 22 °C (3.2 paveikslas). Tokios temperatūros pasirinktos atsižvelgus į tai, kad, esant nedideliam skirtumui tarp šilumnešių pradinių ir galinių temperatūrų, galima pasiekti didesnę šilumokaičio ekserginį naudingumą. Be to, šiuo atveju 3.1 paveiksle esanti 5–6 atkarpa įgytų kitą padėtį (pažymėta punktyru), t. y. pajudėtų žemyn link patalpai artimos temperatūros (atitiktų 3 taško temperatūrą).

Kaip matyti iš 3.2 paveiksle pateiktų ekserginių naudingumų priklausomybių nuo išorės oro temperatūrų, šilumogrąžio ekserginis naudingumas mažėja pagal tiesinę priklausomybę, o šildytuvo ir bendras šių dviejų oro šildymo įrenginių ekserginiai naudingumai mažėja pagal netiesinę priklausomybę.

Esant aplinkos oro temperatūrai lygiai –20 °C šilumogrąžio ekserginis naudingumas yra didžiausias ir lygus 37 %. Kai aplinkos oro temperatūra lygi 15 °C, ekserginis šilumogrąžio naudingumas – 35 %. Tuo tarpu šildytuvo ekserginis naudingumas esant minėtoms temperatūroms sumažėja nuo 70 % iki 40 %, o bendras šilumogrąžio ir šildytuvo ekserginis naudingumas sumažėja nuo 56 % iki 34 %.

3.2 pav. Šilumogražio, šildytuvo bei bendras jų ekserginis naudingumas

Fig. 3.2. Exergy efficiencies of heat recovery unit, heater and total

Būtina didinti sistemos efektyvumą ten, kur yra maksimalus eksergijos poreikis. Vertinant kiekvieną oro šildymui naudojamą šilumokaitį, nustatoma, kokia turi būti jam suteikta ir gauta eksergija (3.3 pav.).

3.3 pav. Eksergijos poreikio orui šildyti pasiskirstymas pagal temperatūrų trukmes

Fig. 3.3. Exergy demand for air heating distribution by the temperatures duration

Kaip matyti 3.3 paveiksle, didžiausias eksergijos kiekis suteikiamas ir gaunamas esant aplinkos oro temperatūros lygiai $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kiekviename oro šildymo įrenginyje maksimalus suteikiamos ir gaunamos eksergijos poreikis gaunamas esant šiai temperatūrai.

3.3 paveiksle pateikti duomenys artimi Lietuvos klimatinėms sąlygoms, todėl, remiantis čia gautais rezultatais, galima būtų rekomenduoti, atsižvelgiant į šias sąlygas, projektuoti aukšto termodinaminio naudingumo pastato inžinerines sistemas. Tokią projektinę temperatūrą nagrinėjamu atveju atitiktų $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, t. y. ji rodo didžiausią eksergijos poreikį atitinkančią lauko oro temperatūrą (pažymėta taškine linija).

3.3 paveiksle pateikti skaičiavimo rezultatai, kurie pavaizduoja vėdinimo sistemos šilumokaičių eksergijos poreikius, įvertintus atsižvelgiant į lauko oro temperatūros trukmę. Todėl projektuotojams rekomenduotina vėdinimo sistemas projektuoti pagal temperatūrą atitinkančią maksimalius eksergijos poreikius, siekiant kuo efektyviau išnaudoti šilumogrąžį sistemoje.

3.2. Vėdinimo sistemų procesų integracijos Pinch analizės metodu seka

Pagal Pinch analizės žingsnių seką, pateiktą 2.15 paveiksle, konkretaus atvejo pavyzdžiu parodoma, kaip atliekama Pinch analizė turint įvesties duomenis.

Atliekant procesų, vykstančių pastato inžinerinėse sistemose integraciją Pinch analizės pagrindu, paprastai prireikia faktinių duomenų apie procesuose dalyvaujančių šilumnešių parametrus – tam gali pasitarnauti PAVS kaupiami duomenys. Toks duomenų gavimo būdas naudojamas ir tinkamas, jei nagrinėjama jau esama sistema, kurią norima modifikuoti. Turint realius pastato inžinerinėse sistemose vykstančių procesų parametrų duomenis, įmanoma nagrinėti realių pastate veikiančių inžinerinių sistemų veikimo naudingumą eksergijos naudojimo požiūriu.

Tuo atveju, kai nagrinėjamos galimybės integruoti procesus naujai projektuojamose sistemose, reikia duomenų apie pastate numatomų projektuoti sistemų rodiklius, pavyzdžiui, šildymo, vėdinimo, oro kondicionavimo sistemų, karšto vandentiekio šiluminės galias.

Iš pradžių nustatomi (veikiančiose) ar numatomi (naujai projektuojamose) sistemose esantys (numatyti) karšti ir šalti šilumnešių srautai. Srauto pobūdį lemia jo pradinė ir galinė temperatūros: jei pradinė šilumnešio temperatūra yra žemesnė už galinę, tuomet srautas laikomas šaltu (C), priešingu atveju – karštu (H).

Žinant srautų pradines ir galines temperatūras, tolimesniems skaičiavimams, taikant 2.5 paveiksle pavaizduotą vėdinimo sistemos su rotaciniu šilumogrąžiu

schema, 3.4 paveiksle atskiromis linijomis vaizduojami du karšti (H1, H2) ir vienas šaltas (C1) srautai. Šie srautai galėtų dalyvauti šilumos mainuose, pavyzdžiui, šilumokaičiuose tarp (H1–C1) ir (arba) (H2–C1). Skaičiavimams priimti duomenys pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Srautų Pinch analizei duomenys

Table 3.1. Data of streams for Pinch analysis

Srautas	$\hat{T}$, °C		c_p , kJ/kg °C	M, kg/s	CP, kW/°C	Q, kW
	Pradinė	Galinė				
H1	22,00	16,00	1,00	16,70	16,70	100,20
H2	30,00	22,00	4,20	3,48	14,61	116,90
C1	7,00	20,00	1,00	16,70	16,70	217,00

Pavienių srautų linijos braižomos iš pradžių susižymėjus temperatūras, ordinačių ašyje bei pavaizdavus kiekvieną srautą atskirai. Karštieji srautai vaizduojami iš dešinės į kairę, o šaltieji – priešingai (3.4 pav.).

3.4 paveiksle pavaizduoto atvejo, kuriame yra 2 karšti ir 1 šaltas srautas, čia taip pat pažymėtos jų temperatūros.

3.4 pav. Karštų ir šaltų srautų pavienės linijos
Fig. 3.4. Lines of separated hot and cold streams

H1 srautas yra dujinės būsenos iš patalpos ištraukiamas oras, H2 – skystos būsenos, C1 – tiekiamas į patalpą oras (dujinės būsenos). C1 srauto pradinė temperatūra sutampa su aplinkos oro temperatūra lygia 7 °C. Be minėtų temperatūrų, kiekvienas srautas apibūdinamas dar ir šilumine talpa (CP), įvertinama srauto savitosios šilumos (c_p) ir masinio debito (M) sandauga.

Nustačius srautus, pasirenkamas minimalus temperatūrų skirtumas. Minimalus temperatūrų skirtumas ($\Delta \hat{T}_{\min}$) – tai toks temperatūrų skirtumas, kuris, projektuojant šilumokaitį, tiek viename, tiek kitame šilumokaičio gale turėtų išlikti toks, koks priimtas, bet ne mažesnis už šį skirtumą. Kelios rekomendacijos, kaip pasirinkti minimalų temperatūrų skirtumą pateikiamos Kemp (2007) ir Pinch online tools (2010). Pirmasis būdas – pagal srautų fizinę būseną, antrasis – pagal procesų pobūdį, kuriuose dalyvauja srautai. Pagal srautų fizinę būseną, Kemp (2007) siūlo naudoti tokį minimalų temperatūrų skirtumą: skystiems srautams 10 °C, skystiems/dujiniams – 15 °C, o dujiniams – 20 °C. Tuo tarpu pasirenkant minėtą temperatūrų skirtumą pagal antrąjį būdą: cheminiams procesams bei procesams, vykstantiems naftos cheminiuose produktuose – 10–20 °C, žemų temperatūrų procesuose – 3–5 °C. Šio minimalaus temperatūrų skirtumo pusė reikšmės yra atimama iš kiekvieno karšto srauto pradinės ir galinės temperatūros reikšmės, o prie šaltų srautų atitinkamų temperatūrų yra pridėjama pusė šio skirtumo. Tokiu būdu srautams gaunamos modifikuotos temperatūros, nustatytos pagal (3.2) formulę.

$$\hat{T}'_k = \hat{T}_k \pm \frac{\Delta \hat{T}_{\min}}{2}, \quad (3.2)$$

čia $\hat{T}'_k$ – modifikuota $1/2 \Delta \hat{T}_{\min}$ k-tojo srauto pradinė (galinė) temperatūra, (°C); $\hat{T}_k$ – pradinė (galinė) k-tojo srauto temperatūra, (°C); $\Delta \hat{T}_{\min}$ – minimalus temperatūrų skirtumas, (°C).

Pagal srautų linijas (3.4 pav.) nustatomi temperatūriniai intervalai ir pagal (3.3) formulę atitinkamai apskaičiuojamos galios nustatytuose temperatūriniuose intervaluose.

$$\Delta Q_i = (\hat{T}'_i - \hat{T}'_{i+1}) \cdot (\sum CP_H - \sum CP_C)_i, \quad (3.3)$$

čia $\hat{T}'_i$ – modifikuota $1/2 \Delta \hat{T}_{\min}$ i-tojo intervalo temperatūra, (°C); $\hat{T}'_{i+1}$ – modifikuota $1/2 \Delta \hat{T}_{\min}$ i+1 intervalo temperatūra, (°C); $\sum CP_H$ – i-ajame intervale esančių karštų srautų šiluminių talpų suma, (kW/°C); $\sum CP_C$ – i-ajame intervale esančių šaltų srautų šiluminių talpų suma, (kW/°C).

Išdėstant mažėjimo tvarka temperatūras, gautas atitinkamai modifikavus pradines ir galines srautų (pavaizduotų 3.4 paveiksle) temperatūras, gaunami temperatūriniai intervalai (3.5 pav. kairėje pusėje). Šiuo atveju modifikuotos srautų pradinės bei galinės temperatūros gautos pasirinkus 15 °C minimalų temperatūrų skirtumą, nes naudojami tiek skystos, tiek dujinės būsenos srautai.

Srautai (H1, H2, C1 ir C2) pradedami vaizduoti nuo tos temperatūrinio intervalo reikšmės, kuri atitinka pradinę atitinkamo srauto modifikuotą temperatūrą, o baigiama ta temperatūra, kuri atitinka galinę srauto modifikuotą temperatūrą.

3.5 pav. Modifikuotų temperatūrų intervalai, srautų išdėstymas ir galios juose
Fig. 3.5. Intervals of modified temperatures, distribution of streams and their capacities

Kiekviename gautame modifikuotos temperatūros intervale pagal (3.2) formulę nustatomos srautų galios (3.5 pav. penktasis stulpelis) tame intervale. Ties srautais (3.5 paveiksle pažymėta plusais), kurie yra nagrinėjamame intervale, pažymimos jų šiluminės talpos. Įvedus nulinę galios reikšmę ties didžiausią intervalo pradžią žyminčia temperatūra, sumuojamos galios temperatūrų intervaluose, o gauta mažiausia galios absoliutinė reikšmė (3.5 paveiksle apibrėžta apskritimu) pridedama prie kiekviename temperatūriniame intervale esančios galios. To temperatūrinio intervalo, kuriame galios reikšmė lygi nuliui (3.5 pav. paskutiniame stulpelyje esanti nulinė reikšmė), žemesnioji temperatūra ir yra Pinch taško (PT), apibūdinamo temperatūra, reikšmė. Nagrinėjamu atveju ją atitinka temperatūra 14,5 °C. Gauta PT temperatūra tiesiogiai skaičiavimuose nenaudojama, nes ji nepalanki šilumos mainams vykti, vietoj jos naudojamos pagal (3.4–3.5) formules gautos Pinch taško karšties (PTK) ir Pinch taško šalties (PTŠ) temperatūros.

$$\hat{T}_{PTK} = \hat{T}_{PT} + \frac{\Delta \hat{T}_{\min}}{2}, \quad (3.4)$$

$$\hat{T}_{PTŠ} = \hat{T}_{PT} - \frac{\Delta \hat{T}_{\min}}{2}, \quad (3.5)$$

čia $\hat{T}_{PTK}$ – Pinch taško karšties srautams temperatūra, (°C); $\hat{T}_{PTS}$ – Pinch taško šalties srautams temperatūra, (°C); $\hat{T}_{PT}$ – Pinch taško temperatūra, (°C); $\Delta\hat{T}_{\min}$ – minimalus temperatūrų skirtumas, (°C).

Todėl nagrinėjamu atveju šias temperatūras atitiktų 22 °C ir 7 °C, t. y. prie PT temperatūros (14,5 °C) pridėjus ir atėmus 7,5°C (pusę minimalaus temperatūrų skirtumo) reikšmės.

Viršutinė ir apatinė skaitinė reikšmė 3.5 paveiksle (paskutiniame stulpelyje) atitinkamai reiškia minimalias papildomų šildymo ir vėsinimo įrenginių galias. Jų reikia, jei srautų nepavyksta atvėsinti (ar sušildyti) iki privalomų temperatūrų. Aukščiau aptarta PT nustatymo eiga yra vienas iš būdų jam nustatyti. Kitas (grafinis) būdas, kai iš pavienių atitinkamų srautų linijų (3.4 pav.) formuojamos sudėtinės karštų ir šaltų srautų kreivės (punktyrinė ir taškinė linijos) (3.6 pav.).

3.6 pav. Kreivės, vaizduojančios karštų ir šaltų srautų sudėtinės kreives bei jų susikirtimo tašką – Pinch tašką

Fig. 3.6. Curves represented hot and cold shifted streams curves and the intersection – Pinch point

PT 3.6 paveiksle žymi karštos modifikuotos sudėtinės (ištininė linija žemiau punktų linijos) ir šaltos modifikuotos sudėtinės (pažymėtos ištininė linija virš taškinės linijos) susikirtimo tašką. Ištininė viršutinė linija žymi modifikuotą sudėtinę karštų srautų kreivę, apatinė – modifikuotą sudėtinę šaltų srautų kreivę.

Grafiškai PT gaunamas braižant šaltų ir karštų srautų sudėtinės kreives (punktų liniją ir taškinę linijas (3.6 pav.)) bei keičiant jų padėtį vertikaliai abscisių ašies atžvilgiu tol, kol mažiausias atstumas tarp jų atitinka pasirinktą minimalų

temperatūrų skirtumą. Toks būdas nėra patogus, todėl, siekiant patogesnio rezultato vaizdavimo ir lengvesnio skaičiavimo, naudojamas temperatūrų modifikavimo būdas, braižoma didžioji sudėtinė kreivė (3.7 pav.).

3.7 pav. Didžioji sudėtinė kreivė, Pinch taškas, minimalios šildymo (Q_{hmin}) ir vėsinimo (Q_{cmin}) galios

Fig. 3.7. Grand composite curve, Pinch point, minimal heat and cool capacities

3.7 paveiksle pateikiama didžioji sudėtinė srautų kreivė, kur matoma, kokia reikalinga minimali papildomų įrenginių (šildytuvų (Q_{hmin}), aušintuvų (Q_{cmin})) galia ir PT temperatūra.

Pagal ankstesnio skaičiavimo duomenis nustatomos minimalios papildomos šildymo (vėsinimo) galios esant skirtingiems minimaliems temperatūrų skirtumams (3.8 pav.).

3.8 pav. Pinch analizės rodiklių priklausomybė nuo $\Delta \hat{T}_{\min}$

Fig. 3.8. Dependency of Pinch analysis indicators on $\Delta \hat{T}_{\min}$

3.8 paveiksle nurodytos šildymo ir vėsinimo įrenginių galios bei Pinch temperatūros šaltiems ir karštiems srautams, kai minimalus temperatūrų skirtumas kinta nuo 5 °C iki 30 °C laipsnių. Kaip matyti 3.8 paveiksle, didėjant minimaliam temperatūrų skirtumui, didėja ir reikiamų papildomų šildymo ar vėsinimo įrenginių galios, o tai savo ruožtu veikia galimos atgauti šilumos galios mažėjimą. Papildomų įrenginių galias žyminčios linijos sutampa (3.8 pav.).

Vertikalios linijos (3.8 pav.) žymi minimalaus temperatūrų skirtumo ribas. Ties 15 °C laipsnių žymima rekomenduojama minimalaus temperatūrų skirtumo reikšmė pagal pramoniniuose procesuose naudojamų srautų būsenas, riba ties 5 °C – cheminiams procesams taikoma minimalaus temperatūrų skirtumo reikšmė. Nuo pasirinktos šios reikšmės priklausys, kokios bus minimalios papildomų įrenginių bei maksimalios galimos atgauti šilumos galios. Turint 3.8 paveiksle pateiktus duomenis, toliau bazinio (3.9 pav.) šilumokaičio tinklo pagrindu, kuris atitiktų esamą vėdinimo sistemą (2.7 pav.), formuojamas pradinis šilumokaičių tinklas, sudaroma šilumokaičių tinklinė diagrama, parodyta 3.10 paveiksle.

3.9 pav. Bazinis vėdinimo sistemos šilumokaičių tinklas
Fig. 3.9. Basic network of heat exchangers of ventilation system

3.10 pav. Principinė Pinch analizės schema procesams integruoti – šilumokaičių tinklinė diagrama
Fig. 3.10. Principal scheme of Pinch analysis for processes integration – net diagram of heat exchangers network

Viršutinėje kairėje pusėje (virš horizontalios punktyrinės linijos) iš kairės į dešinę vaizduojami karšti srautai (H1, H2), apačioje dešinėje pusėje (žemiau horizontalios punktyrinės linijos) iš dešinės į kairę vaizduojami šalti srautai (C1, C2). Vertikali punktyrinė linija skirta pažymėti Pinch temperatūros tiek karštiesiems (PTK), tiek šaltiems (PTS) srautams. Pradinis šilumokaičių (vaizduojamų linija sujungtais apskritimais) tinklas galėtų būti toks, koks pavaizduotas apibrėžtame stačiakampyje (3.10 pav.). Apskritimo viršuje esančiu romėnišku skaičiumi žymimas šilumokaičio numeris, apatine skaitine reikšme – jo galia.

Disponuojami srautai (H1, H2, C1, C2 ir kt.) ir jų pradinės temperatūros pateikiamos mažuose stačiakampiuose. Galinės srautų temperatūros gali būti dvejopo pobūdžio, t. y. privalomos ($\hat{T}_p$) ir laisvos ($\hat{T}_l$). Pirmosios turi būti griežtai išlaikomos, antrosios nebūtinai turi būti griežtai tokios, kurios numatomos analizės pradžioje. Šios temperatūros svarbios tuo, kad galima nenumatyti įrengti papildomo šildymo ar vėsinimo įrenginio jai pasiekti. Laisvos temperatūros schemose žymimos pasvirais, paryškintais skaičiais. Vėdinimo sistemose naudojamų šilumogražių ypatybės glaudžiai susijusios su šiomis temperatūromis, trys iš keturių su šilumogražio apibrėžtu efektyvumu susijusios temperatūros yra privalomo pobūdžio, ketvirtoji nors ir galėtų būti laisvo pobūdžio visgi dėl kitų trijų, t. y. dėl šilumos balanso, įgauna privalomą pobūdį.

Kartais vien tik disponuojamų srautų dėka veikiančių šilumokaičių nepakanka, norit pasiekti reikiamas procesams temperatūras – tam gali prireikti įrengti papildomus šildymo (H) ar vėsinimo (C) įrenginius (žymimi užbrūkšniuotose plotuose viršutinėje dešinėje ir apatinėje kairėje pusėse, 3.10 pav.).

Kairėje pusėje esančiuose stulpeliuose viršuje pažymėta srauto šiluminė talpa (CP), apačioje – srauto galia virš PT, dešinėje pusėje: viršuje srauto šiluminė talpa, apačioje – srauto galia žemiau PT.

Kaip minėta, papildomų šildymo (H) ir vėsinimo (C) įrenginių galima nevertinti, kai reikiama pasiekti proceso temperatūra yra laisvo pobūdžio, t. y. jos pasiekti nėra reikalo.

Šilumokaičių tinklas, pagal 3.10 paveikslą pateiktą tinklinę diagramą, pradedamas projektuoti nuo vertikaliu punktyru pažymėtos linijos. Pinch analizės metu be mažiausios papildomų įrenginių galios (3.8 pav.) taip pat nustatoma didžiausia galima atgauti šilumos galia (Q_R), kuri parodo, kiek šilumos galima atgauti formuojant šilumokaičius sistemoje.

Siekiant įvertinti, kokios įtakos turi minimalus temperatūrų skirtumas šilumokaičių tinklo formavimui, analizuojama, kaip keičiasi šilumokaičių skaičius ir jų galios prie skirtingų aplinkos oro temperatūrų, pavyzdžiui, prie pasirinktos 7° C būdingos metinei išorės oro temperatūros.

Tinklinę šilumokaičių diagramą, nagrinėjamu atveju atitinka 3.11 paveiksle pavaizduota diagrama, kurioje yra trys srautai (du karšti H1, H2 ir vienas šaltas C1). Šilumos manai vyksta tarp H2 ir C1 srautų esančių I šilumokaityje.

3.11 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai aplinkos oro temperatūra 7 °C

Fig. 3.11. Network of heat exchangers if outdoor air temperature is 7 °C

Kaip matyti, 3.11 paveiksle pavaizduotoje šilumokaičių tinklinėje diagramoje, vėdinimo orui šildyti turėtų būti numatytas šilumokaitis I, kuriame oras sušiltų iki 14 °C temperatūros, o baigtas šildyti naudojant papildomą šildymo įrenginį (HI). Kadangi karštų srautų temperatūros yra laisvo pobūdžio, t. y. jų pasiekti nebūtina, todėl ir papildomo vėsinimo įrenginio (CI) įrengti nereikėtų.

Suprojektuotą šilumokaičių tinklą pagal Pinch metodiką galima optimizuoti. Kemp (2007) tam siūlo rasti uždara kontūrą arba trajektoriją nuo vieno iki kito papildomo įrenginio. Kadangi ne visais atvejais galima rasti uždara kontūrą (A optimizacija), kuris gali būti vienu iš optimizacijos būdų, šilumokaičių tinklą taip pat galima optimizuoti naudojant B optimizaciją, kuri žymi variantą, kai bandoma pašalinti mažiausią poveikį šilumokaičių tinklui turintį šilumokaitį, kai einama nuo vieno prie kito papildomo įrenginio, esančio suprojektuotame pagal Pinch metodą šilumokaičių tinkle (Kemp 2007). Uždara kontūrą galima rasti, jei iš tų pačių srautų tiek virš PT, tiek žemiau jo yra sudaromi šilumokaičiai. Nereikšmingu šilumokaičių visada pasirenkamas mažiausią galią turintis šilumokaitis. Dėl optimizavimo, kai yra šalinami šilumokaičiai, padidėja išorinis vėsinimas ir šildymas, t. y. naudojami papildomi šildymo ar vėsinimo įrenginiai), mažėja atgaunama šilumos galia, tačiau paprastėja tinklo konfigūracija – gerėja ekonominiai rodikliai.

Nagrinėjamu atveju matyti, kad 3.11 paveiksle gautame šilumokaičių tinkle nėra galimybės optimizuoti šilumokaičių tinklo, naudojant A arba B optimizaciją. Šis atvejis parodo, kad šilumokaičio I, kurio šaltas srautas (C1) galėtų būti sušil-

dytas H1 srautu, t. y. numatant šilumogražą, išnykimą lemia minimalaus temperatūrų skirtumo pasirinkimas. Čia šis skirtumas buvo pasirinktas pagal rekomendacijas pramoniniams procesams. Todėl tolimesniuose skaičiavimuose analizuojama, kaip esančiame baziniame šilumokaičių tinkle minimalus temperatūrų skirtumas paveikia pradinio šilumokaičių tinklo projektavimą pagal Pinch metodą.

Baziniame šilumokaičių tinkle, esant tai pačiai $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, nagrinėjamu skaitiniu atveju minimalus temperatūrų skirtumas yra apie $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todėl, pasirinkus didesnę minimalų temperatūrų skirtumą, nepavyksta suformuoti šilumokaičių tinklo, kuriame reikiamus oro parametrus galima būtų gauti naudojant šilumogražius. Kadangi šilumogražiai išnyksta, vietoj jų reikia naudoti papildomus šildymo ir (ar) vėsinimo įrenginius. Nagrinėjamu atveju būtina sąlyga reikėtų laikyti ne technologinių procesų inžinerinėje praktikoje susiformavusį rekomenduojamą minimalų temperatūrų skirtumą, o šilumogražos panaudojimą nesant arba esant minimaliam papildomam šildymui. Todėl tikrinama, kaip keisis šilumokaičių tinklas, jei minimalus temperatūrų skirtumas bus lygus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gauti rezultatai pavaizduoti šilumokaičių tinklinės diagramos pavidalu (3.12 pav.).

3.12 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.12. Network of heat exchangers if minimal temperature difference is equal to $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Esant mažesniai minimaliam temperatūros skirtumui lyginant su anksčiau skaičiavimams priimtu ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$), matyti, kad šilumos atgavimas iš ištraukiamo iš patalpos oro gali būti vykdomas. Šilumogražį 3.12 paveiksle atitinka H1 ir C1

srautus jungiantis šilumokaitis, šildytuvą – srautus H2 ir C1 jungiantis šilumokaitis.

Esant didžiausiam eksergijos poreikiui, kai aplinkos oro temperatūra lygi $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, šilumokaičių tinklinės diagramos pavaizduotos 3.13 ir 3.14 paveiksluose.

3.13 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ esant didžiausiam eksergijos poreikiui

Fig. 3.13. Network of heat exchangers if minimal temperature difference is equal to $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, when exergy demand is maximal

3.14 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ esant didžiausiam eksergijos poreikiui

Fig. 3.14. Network of heat exchangers if minimal temperature difference is equal to $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, when exergy demand is maximal

Esant mažesniai minimaliam temperatūrų skirtumui suformuojamas šilumokaičių tinklas be papildomų šildymo ir vėsinimo įrenginių, o tai reiškia, kad bendra atgauti galima šilumos galia didesnė lyginant su gaunama esant didesniai minimalaus temperatūrų skirtumui. Esant $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ minimaliam temperatūrų skirtumui, šilumokaičių tinkle yra papildomi įrenginiai, tuo tarpu esant $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – papildomų įrenginių nėra.

Kai aplinkos oro temperatūra lygi vidutinei šildymo sezono temperatūrai, kuriai esant skaičiuojami šilumos poreikiai vėdinimo sistemoms, gaunamos tokios šilumokaičių tinklinės diagramos, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.15 pav.) ir $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3.16 pav.).

3.15 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, aplinkos oro temperatūrai esant lygiai $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.15. Network of heat exchangers if minimal temperature difference is equal to $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, if outdoor temperature is equal to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.16 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai minimalus temperatūrų skirtumas lygus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, aplinkos oro temperatūrai esant lygiai $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.16. Networks of heat exchangers if minimal temperature difference is equal to $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, if outdoor temperature is equal to $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Gauti panašūs rezultatai kaip ir nagrinėjant procesų integraciją esant 3 °C temperatūrai.

Remiantis šilumogražio efektyvumo (2.1) ir šilumnešių vidutinio temperatūrų skirtumo (1.1) lygtimis bei atliktų skaičiavimų rezultatais galima užrašyti tokią minimalaus ($\Delta \hat{T}_{\min}$) temperatūrų skirtumo priklausomybę nuo šilumogražio efektyvumo (3.6).

$$\Delta \hat{T}_{\min} = f(\varepsilon_t) \leq \frac{\hat{T}_3 \cdot (1 - \varepsilon_t) - \hat{T}_1 + \hat{T}_4 \cdot \varepsilon_t}{\varepsilon_t + 1}, \quad (3.6)$$

čia ε_t – temperatūrinis šilumogražio efektyvumas; $\Delta \hat{T}_{\min}$ – minimalus temperatūrų skirtumas, (°C); $\hat{T}_1$ – aplinkos oro temperatūra, (°C); $\hat{T}_3$ – iš patalpos ištraukiamo oro temperatūra, (°C); $\hat{T}_4$ – iš vėdinimo įrenginio šalinamo oro temperatūra, (°C); $\Delta \hat{T}_m$ – vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas, (°C).

Aktualu siekti didžiausio ekserginio naudingumo ten, kur sunaudojamas maksimalus eksergijos kiekis. Todėl, tiriant šilumogražius, būtina atsižvelgti į minimalaus temperatūrų skirtumo pasirinkimą, kurį lemia jo efektyvumas (ε_t), nuo kurio pasirinkimo visos keturios temperatūros įgyja privalomą pobūdį, nes šilumogražio efektyvumas, veikdamas pašilusio šilumogražyje oro temperatūrą ($\hat{T}_2$), lemia iš jo šalinamo oro temperatūrą ($\hat{T}_4$).

Nagrinėjant vėdinimo sistemas naudojančias šilumogražius inžinerinėje praktikoje siūlomas naudoti minimalus temperatūrų skirtumas galėtų būti priimamas ne 15 °C, o mažesnis arba artimas 5 °C, nes didesnio temperatūrų skirtumo pasirinkimas lemia šilumogražių ar net šilumokaičių išnykimą šilumokaičių tinkle.

3.3. Vėdinimo sistemų šilumokaičių formavimas Pinch analizės pagrindu

Nagrinėjami galimi šilumogražos atvejai vėdinimo sistemoje. Vėdinimo sistemoje, kurių įrenginiais E (3.17a pav. ir 3.17b pav.) tiekiamas ir ištraukiamas iš patalpų 50 000 m³/h oro, atitinkamai yra du (X, Z) arba trys šilumokaičiai (X, Y, Z), kuriuose yra po du srautus, tarp kurių vyksta šilumos mainai. Nurodytu oro kiekiu gali būti aptarnaujamas apie 10 tūkst. m² ploto administracinės paskirties pastatas.

3.17 pav. Vėdinimo įrenginys su plokštiniu šilumogrąžiu (a) ir naudojančiu tarpinį šilumnešį (b), srautai juose

Fig. 3.17. Air handling unit with plate heat exchanger (a) and with run around coil heat exchanger, streams in them

3.17a paveiksle tarp dviejų karštų (H1, H2) ir vieno šalto (C1) srautų vyksta šilumos mainai. H2 srautas – iš šilumos punkto kaloriferiui skirtas šilumnešis. Šie srautai charakterizuojami pradine ir galine, gautomis iš PAVS arba išskaičiuotomis iš šilumos balanso, temperatūromis.

Lauko oro temperatūra, pagal kurią vertinami šilumos poreikiai tiek šildymo, tiek vėdinimo sistemoms, apytikriai yra lygi 0 °C. Esant šiai temperatūrai,

pagal šilumos ir masės balansą gaunamas toks šilumogrąžio ir šildytuvo galių pasiskirstymas 3.17a paveiksle esančioje schemoje (3.18 pav.). Žinoma, nuo naudojamo šilumogrąžio temperatūrinio efektyvumo priklausys ir jo galia: ji bus tuo didesnė, kuo temperatūrinis efektyvumas bus didesnis, o šildytuvo galia – mažės didėjant šilumogrąžio galiai.

3.18 pav. Šilumokaičių galių pasiskirstymas esant 0 °C oro temperatūrai
Fig. 3.18. Distribution of heat exchangers capacities if outdoor air temperature is equal to 0 °C

3.18 paveiksle pavaizduotos vėdinimo sistemos šilumokaičių galių pasiskirstymas, kai šilumogrąžio temperatūrinis efektyvumas pasirinktas lygus 0,56. Esant tokiam temperatūriniam plokštinio šilumogrąžio efektyvumui, šildytuvo vienareikšmiškai gaunama galia šiuo atveju 33 % mažesnė už šilumogrąžio galia.

Plokštinio šilumogrąžio vėdinimo įrenginyje atveju, šilumos mainų tarp tiekiamo ir ištraukiamo iš patalpos oro kitokiu būdu vykdyti neįmanoma. Turint plokštinį šilumogrąžį, taikant šilumos ir masės balansą, nesudėtingai paskirstoma, kokią dalį galėtų susigrąžinti iš šalinamo oro tiekiamas oras, o kurią dalį tektų šildyti, naudojant šildytuvą. Taigi, esamo šilumogrąžio dydžio keisti, jį modifikuoti 3.17a paveiksle pateiktu atveju negalima, todėl prasminga analizuoti tokias vėdinimo įrenginių schemas, kurias galima modifikuoti, pavyzdžiui, 3.17b paveiksle pateiktą atvejį, kaip matysime toliau.

Šilumokaičių ekonominis rodiklis apibūdinamas šilumokaičio ploto (A) ir jo šilumos perdavimo koeficiento (k) sandauga (Ak) šiame darbe pavadintas šilumokaičio šiluminiu pralaidumu (3.7). Jis parodo, kiek šilumokaičio galios tenka 1 °C. Todėl, žinant šį dydį, nesudėtinga įvertinti šilumokaičio kainą.

$$Ak = \frac{Q}{\Delta T_m}, \quad (3.7)$$

čia Ak – šilumokaičio ploto ir šilumos perdavimo koeficiento sandauga, t. y. šilumokaičio šiluminis pralaidumas (kW/K); ΔT_m – vidutinis logaritminis temperatūrų skirtumas, (K), apskaičiuojamas remiantis 1.2 lentele.

H2 srauto temperatūrų keitimas jas didinant mažina šilumokaičio šiluminį pralaidumą, o jas mažinant – didina šilumokaičių pralaidumą. Pavyzdžiui, priimant, kad H2 srauto pradinė temperatūra lygi 80 °C, o galinė – 60 °C, šilumokaičio šiluminis pralaidumas, lyginant jį su 3.18 pav. pateiktu – 2,4 kartus mažesnis, o jei minėto srauto pradinė ir galinė temperatūros atitinkamai būtų lygios 30 °C ir 22 °C, tuomet šilumokaičio šiluminis pralaidumas būtų net 3,75 karto didesnis.

Nagrinėjant 3.17b paveiksle pateiktą schemą galima išskirti kelis charakteringus atvejus, kurie turi įtakos gaunamiems rezultatams.

Nagrinėtini atvejai, kai $Ak_Y = Ak_X$, $Ak_Y < Ak_X$ ir $Ak_Y > Ak_X$. Rezultatai gauti, kai $Ak_Y = Ak_X$ naudojant Pinch analizę, pavaizduoti 3.19 pav.

3.19 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai, esant 0 °C oro temperatūrai, $Ak_Y = Ak_X$

Fig. 3.19. Network of heat exchangers if outdoor temperature is equal to 0 °C in case of $Ak_Y = Ak_X$

Šilumokaičių tinklą, gautą taikant Pinch analizę, galima optimizuoti, t. y. pašalinti mažiausios galios šilumokaitį ar papildomą šildymo, ar vėsinimo įrenginį supaprastinant šilumokaičių tinklą. Galima naudoti dvejopą šilumokaičių tinklo optimizaciją pagal Pinch analizę: tiek ieškant uždaro kontūro

jame (A optimizacija), tiek trajektorijos nuo vieno iki kito išorinio įrenginio (B optimizacija).

Uždarą kontūrą gali sudaryti du šilumokaičiai jungiantys vienodus srautus – tokį atvejį nagrinėjamu (3.19 pav.) atveju atitiktų II ir IV šilumokaičius sujungiantis uždaras kontūras (taškinis kontūras 3.19 pav.). Po optimizacijos A, šilumokaičių tinklinė diagrama atrodo taip (3.20 pav.):

3.20 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama optimizavus ją pagal A optimizaciją
Fig. 3.20. Network of heat exchangers optimized according to the optimization A

3.20 paveiksle pateikta šilumokaičių tinklinė diagrama supaprastėjo, nes joje šilumokaičių skaičius sumažėjo iki trijų iš buvusių keturių (3.19 pav.). Čia C1 šaltas srautas yra sujungtas su C3 srautu, nes jų CP reikšmė yra vienoda, o C1 srautą reikia sušildyti iki C3 srauto galinės temperatūros. 3.20 paveiksle esantis šilumokaičių tinklas dar gali būti supaprastintas jam du kartus pritaikius B optimizaciją (taškinę ir ašinę linijas). Pirmą kartą iš šilumokaičių tinklo šalinant CI vėsinimo įrenginį, I šilumokaičio galia padidėja šalinamo vėsinimo įrenginio galios skaitine reikšme, o šildymo įrenginio šilumokaičių tinkle nebelieka. Optimizuojant šilumokaičių tinklą B optimizacija dar kartą 3.20 paveiksle pateiktoje šilumokaičių tinklinėje diagramoje nebelieka ir CII bei HIII papildomų įrenginių, o II šilumokaičio galia padidėja 2,7 kW, t. y. tampa lygi 205,7 kW.

Atlikus optimizaciją B du kartus, gaunama šilumokaičių tinklinė diagrama atrodo taip (3.21 pav.).

3.21 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama optimizavus ją pagal B optimizaciją du kartus
Fig. 3.21. Network of heat exchangers optimized twice according to the optimization B

3.21 paveiksle gautoji schema analogiška 3.17b pateiktai schemai, kurioje nėra raide W pažymėto šilumokaičio (3.22 pav.).

3.22 pav. Vėdinimo įrenginys su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumogražiu
Fig. 3.22. Air handling unit with run around coil heat exchanger

Kai $A_{k_Y} < A_{k_X}$ gaunama tokia šilumokaičių tinklinė diagrama (3.23 pav.). Šiuo atveju galimybės optimizuoti šilumokaičių tinklo nėra, dėl to šilumokaičių tinklas įgyja tokį pavidalą (3.24 pav.).

3.23 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai $Ak_Y < Ak_X$
Fig. 3.23. Network of heat exchangers if $Ak_Y < Ak_X$

Nagrinėjamas atvejis ir kai $Ak_Y > Ak_X$ – gaunami panašūs rezultatai į 3.24 paveiksle gautus rezultatus. Suminio šilumokaičių šiluminio pralaidumo reikšmės, gautos po procesų integracijos, atrodo taip (3.25 pav.), čia šilumokaičiai žymimi X, Y, Z, W raidėmis, ties sumos ženklų nurodomas suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas.

3.24 pav. Vėdinimo įrenginys su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumogražiu
Fig. 3.24. Air handling unit with run around coil heat exchanger

Kaip matyti iš 3.25 paveiksle gauto suminio šilumokaičių šiluminio pralaidumo pasiskirstymo, mažiausias suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas gautas, kai $A_{kX} > A_{kY}$, o didžiausias, kai A_{kX} lygi A_{kY} reikšmei. Didžiausią įtaką suminiam šilumokaičių šiluminiui pralaidumui turi A_{kX} ir A_{kY} reikšmių pasiskirstymas. Kuo didesnės šių dydžių skaitinės reikšmės, tuo gaunamas didesnis suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas.

3.25 pav. Suminiai šilumokaičių šiluminiai pralaidumai esant skirtingam A_{kX} ir A_{kY} pasiskirstymui

Fig. 3.25. Total heat transmittance of heat exchangers by different distribution of A_{kX} and A_{kY}

Nenagrinėjant ekonominiu požiūriu, t. y. tik technologiniu, suminio šilumokaičių šiluminio pralaidumo atžvilgiu, galimas optimalus sprendinys priklauso nuo Ak_X ir Ak_Y santykio. Taip pat optimalus sprendinys priklausys ir nuo šilumnešio naudojamų temperatūrų procesų integracijai.

Detaliai techninei ir ekonominei analizei reikia žinoti atskirų šilumokaičių (oras-oras, oras-vanduo ir vanduo-vanduo) derinius ir jų kainas. Bendros optimumo tendencijos išliktų, bet konkrečiam rodikliui priklausytų nuo šilumokaičio tipo kainos. Gautas optimalus suminio šilumokaičių šiluminio pralaidumo sprendinys turės įtakos ekonominiam sprendimui. Ryšį tarp suminio šilumokaičių šiluminio pralaidumo ir šilumokaičių derinio kainų galima išreikšti tokiais lygtimis (3.8–3.9).

$$Ak_{OO} + Ak_{OV} + Ak_{VV} = \Sigma Ak \quad , \quad (3.8)$$

$$K_{OO} \cdot Ak_{OO} + K_{OV} \cdot Ak_{OV} + K_{VV} \cdot Ak_{VV} = K_{\Sigma Ak} \quad . \quad (3.9)$$

čia Ak_{OO} – šilumokaičio oras-oras šiluminis pralaidumas, (kW/K); Ak_{OV} – šilumokaičio oras-vanduo šiluminis pralaidumas, (kW/K); Ak_{VV} – šilumokaičio vanduo-vanduo šiluminis pralaidumas, (kW/K); ΣAk – suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas, (kW/K); K_{OO} – šilumokaičio oras-oras kaina, Lt/(kW/K); K_{OV} – šilumokaičio oras-vanduo kaina, Lt/(kW/K); K_{VV} – šilumokaičio vanduo-vanduo kaina, Lt/(kW/K); $K_{\Sigma Ak}$ – bendra šilumokaičių kaina, Lt.

Procesų jungimo būdas pastato inžinerinėse sistemose gali būti vertingas ieškant tinkamų atliekinės šilumos srautų pastate naudojimo taikymo galimybių procesams integruoti, taip siekiant aukštesnio pastato inžinerinių sistemų derinio pastate energinio efektyvumo.

Nagrinėtinos galimybės integruoti procesus, kai nenaudojamas papildomas šildytuvas (3.26 pav.). Šiuo atveju tarp šilumnešių (H1, C1+C3, H2, C2, H3) vyksta šilumos mainai, yra trys šilumokaičiai (I, II, III), kuriuose ir vykdomi šie mainai tarp minėtų šilumnešių.

I šilumokaityje šilumos mainuose dalyvauja H1 ir C1+C3 srautai, II šilumokaityje – H3 ir C2, o III šilumokaityje – H2 ir C2 srautai. Tiekiamas į patalpą oras sušildomas I šilumokaityje, t. y. naudojant šilumogražį. Tarpinis šilumnešis (C2) nuo 20 °C iki 34 °C temperatūros sušildomas naudojant H3 srautą.

3.26 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai nėra šildytuvo

Fig. 3.26. Network of heat exchangers without heater

3.26 paveiksle pavaizduotu atveju šilumokaičių tinklas vėdinimo įrenginyje supaprastėja iki schemos 3.17b, kurioje nėra Z šilumokaičio (3.27 pav.).

3.27 pav. Vėdinimo įrenginys su šilumokaičių išdėstymu jame

Fig. 3.27. Air handling unit with heat exchangers

Šiuo atveju pakanka žemesnių parametrų šilumnešių, ir todėl, kad ištraukiamas oras iš patalpos atvėsta iki 12 °C, vykdomi efektyvesni mainai, be to, nenaudojamas šildytuvas orui, išeinančiam iš šilumogražio sušildyti. Toliau nagrinėjamos atliekinės šilumos srautų pastate integravimo galimybės.

3.4. Atliekinės šilumos srautų taikymas procesų integracijai vėdinimo sistemose

Nagrinėjant atliekinės šilumos srautų pastate integravimo galimybes pasirinkti keturi atvejai, kurie toliau aptariami šiame poskyryje.

Praktikoje tarpinį šilumnešį naudojantis vėdinimo įrenginys vėdinimo sistemai pasirenkamas neatsižvelgiant į tai, kaip naudingai bus panaudota papildoma, atliekinė, esanti kitose pastato inžinerinėse sistemose arba technologinių procesų atliekinės, šiluma. Toks vėdinimo įrenginys pasirinktas nagrinėjimui siekiant įvertinti galimybes integruoti įvairiose pastato inžinerinėse sistemose esančius šilumos srautus. Dažniausiai oras papildomai pašildomas naudojant šilumnešį, tiekiamą iš šilumos punkte įrengto šilumokačio arba elektriniame oro šildytuve.

3.2 lentelėje pateikiami nagrinėjami atvejai, kai procesų integracijai naudojami įvairūs atliekinės šilumos srautai, esantys pastate. Skaičiavimams priimama, kad į patalpą tiekiamo oro temperatūra lygi 20 °C, iš patalpos ištraukiamo oro temperatūra yra 22 °C, o šilumos pritekiai nevertinami. Taip pat atliekant skaičiavimus priimta, kad patenkantis į vėdinimo įrenginį oras turėtų būti pašildomas ne žemesne nei 11 °C galine šilumnešio temperatūra, nes priešingu atveju jau vyktų ne šilumos, bet vėsos atgavimo procesas. Be to, minėta temperatūra pasirenkama aukštesnė už galimą didžiausią šaltojo laikotarpio temperatūrą.

Papildomi srautai turi jiems būdingas pastovias ar kintamas temperatūras, jie yra naudojami už juos nemokant, įprastu atveju jie tiesiog nepanaudojami. Pastaruoju metu šilumos tiekimo įmonės yra suinteresuotos, kad į šilumos tiekimo tinklus būtų grąžinami žemų temperatūrų parametrų šilumnešiai ir dėl to galima tikėtis žemesnių taip panaudotos šilumos kainų. 3.2 lentelėje pasirinktos temperatūros būdingos tam tikriems šilumnešiams, kurie ir apibūdinti šioje lentelėje.

3.2 lentelė. Atvejų, panaudojant atliekinės šilumos srautus procesų integracijai, aprašymas

Table 3.2. Description of cases for use of waste heat flows for processes integration

Atvejis	Apibūdinimas	Atliekinės šilumos srauto pradinė temperatūra, °C
1	naudojami oro srautai cirkuliuojantys vėdinimo sistemoje ir į šildymo sistemą tiekiamo šilumnešio srautas	60 °C
2	vėdinimo sistemos oro srautai ir papildomas, iš šildymo sistemos grąžinamas šilumnešio srautas	50 °C
3	vėdinimo sistemos oro srautai ir technologinio proceso šiltas vanduo	40 °C
4	vėdinimo sistemos oro srautai ir iš šildymo sistemos grąžinamas šilumnešio srautas bei technologinio proceso šiltas vanduo	50 °C ir 40 °C

Vertinant procesų integracijos galimybes naudojant atliekinės šilumos srautus, priimama, kad nagrinėjamame pastate įrengtos šildymo sistemos galia apie 200 kW. Šildymo sistema pasirenkama siekiant įvertinti, kaip galima panaudoti joje naudojamus šilumnešius procesų vėdinimo įrenginyje integracijai. Tiekiamo ir grąžinamo į ir iš šildymo sistemos šilumnešio temperatūros pasirenkamos pagal šilumnešių kokybinio reguliavimo grafiko skaičiavimo metodiką.

Pinch analizės metu iki šiol taikytos imliems energijai pramonės procesams nagrinėti (Klemeš *et al.* 2010; Tuomaala *et al.* 2010), nustatant maksimalią šilumokaičiais galimą atgauti šilumos bei minimalias šildymo ir vėsinimo įrenginių galias, galima parinkti optimalų (ekonominiu požiūriu) šilumokaičių derinį. Šis metodas, atskleidamas galimybes, parodo prasmę jungti skirtingose pastato inžinerinėse sistemose naudojamus šilumnešius.

Procesų integracijos rezultatai, gauti panaudojant 3.2 lentelėje pateiktus atliekinės šilumos srautus, pavaizduoti 3.28–3.30 paveiksluose, o pagal jas sudarytos vėdinimo įrenginių schemas 3.31–3.33 paveiksluose.

3.28–3.29 paveiksluose pavaizduotos šilumokaičių tinklinės diagramos gautos procesų integracijai naudojant į šildymo sistemą tiekiamą šilumnešį ir iš šildymo sistemos grąžinamą šilumnešį. 3.30 paveiksle pateikti rezultatai, šilumokaičių tinklinės diagramos pavidalu, kai naudojamas technologinio proceso šiltas vanduo ir grąžinamas iš šildymo sistemos šilumnešis.

3.28 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai naudojamas į šildymo sistemą tiekiamas šilumnešis

Fig. 3.28. Network of heat exchangers when the supply for heating system heat agent is used

3.29 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai naudojamas iš šildymo sistemos grąžinamas šilumnešis

Fig. 3.29. Network of heat exchangers when return heat agent from heating system is used

3.30 pav. Šilumokaičių tinklinė diagrama, kai naudojami abu 2 ir 3 atvejais nurodyti šilumnešiai

Fig. 3.30. Network of heat exchangers when both 2 and 3 cases agents are used

3.31 pav. Vėdinimo įrenginio su tarpinį šilumnešį naudojančiu šilumogražiu schema procesų integracijai naudojant į šildymo sistemą tiekiamą šilumnešį

Fig. 3.31. Scheme of air handling unit with run around coil heat exchanger, processes integration using supply heat stream

3.32 pav. Vėdinimo įrenginio su tarpinių šilumnešių naudojančiu šilumogražiu schema procesų integracijai naudojant grąžinamą iš šildymo sistemos šilumnešį

Fig. 3.32. Scheme of air handling unit with run around coil heat exchanger, processes integration using return heat stream from the heating system

3.33 pav. Vėdinimo įrenginio su tarpinių šilumnešių naudojančiu šilumogražiu schema procesų integracijai naudojant abu 2 ir 3 atvejais nurodytus šilumnešius

Fig. 3.33. Scheme of air handling unit with run around coil heat exchanger, processes integration using both in 2 and 3 cases used heat streams

Vėdinimo sistemose vykdomai šilumogražai tinkamą, optimalų šilumokaičių tinklą galima suformuoti jungiant įvairiose pastato inžinerinėse sistemose esančius šilumnešius.

3.33 paveiksle pateiktos schemos esant temperatūrai, lygiai 3 °C, kuriai esant gaunami didžiausi eksergijos poreikiai ir atsižvelgiant į tai, kad suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas yra mažiausias, taip pat reikia įvertinti ir tai, kad esant aplinkos oro temperatūroms žemesnėms arba aukštesnėms už šią temperatūrą, šilumos poreikis skirsis, nes jis priklauso nuo klimato sąlygų. Šilumos poreikis gali būti kompensuojamas dviem būdais: keičiant šilumnešių parametrus arba numatant papildomus šildytuvus vėdinimo įrenginyje. Privaloma kompensuoti šilumą esant įvairioms aplinkos temperatūroms ir šilumos tiekimo šilumnešio pradinės ir galinės temperatūrų kitimas pateikiamas 3.34 paveiksle.

3.34 pav. Šilumos poreikis, esant įvairioms aplinkos temperatūroms

Fig. 3.34. Heat demand at various outdoor air temperatures

Trūkstamas šilumos poreikis turi būti kompensuojamas, tam, kaip jau buvo minėta, gali būti naudojami papildomi šildymo įrenginiai, kurie galėtų naudoti vandenį arba elektrą. Tam galėtų būti panaudotas ir šilumos tiekimo tinklų šilumnešis, kurio temperatūros pateiktos 3.34 paveiksle. Priimant, kad oras galėtų būti sušildytas šilumogražyje 12 °C, iki reikiamos temperatūros oras

sušildomas šildytuve, kuriame, keičiant šilumnešio temperatūras, gali būti užtikrinamas reikiamos temperatūros oro paruošimas. Atstumas nuo horizontalios ištisinės (3.34 pav.) iki punktyrinės linijos vaizduoja trūkstamą šilumos poreikį, kuris gali būti kompensuojamas naudojant tam tikros tiekiamo ir grąžinamo šilumos tiekimo tinklą šilumnešio temperatūrų ar debito derinį.

Naudojant kokybinį šilumos tinklų reguliavimo būdą, keičiant šilumnešio temperatūras pagal 3.34 paveiksle pateiktą grafiką bei naudojant kiekybinį reguliavimo būdą, keičiant sistemos debitą (kaip parodyta 3.34 pav.), galima būtų kompensuoti šilumos trūkumą. Tam trūkumui padengti taip pat galimas kokybinio ir kiekybinio reguliavimo būdų derinimas.

Priimama, kad reikiamam temperatūrų skirtumui, t. y. nuo 3 °C iki 20 °C, pašildyti naudojami atitinkami schemose 3.28 paveiksle III ir I, 3.29 paveiksle I ir III, o 3.30 paveiksle III, IV numeriu pažymėti šilumokaičiai.

Šilumogražiui tektų sušildyti orą 12 °C (nuo 3 °C iki 15 °C), o šildytuve oras jau sušiltų iki reikiamos 20 °C patalpos oro temperatūros. Esant kitoms aplinkos oro temperatūroms, analogiškai oras būtų pašildomas 12 °C nuo tuo metu esančios aplinkos oro temperatūros. Pavyzdžiui, aplinkos oro temperatūra lygi –23 °C, oras šilumogražyje sušyla iki –11 °C, dar penkiais laipsniais iki –6 °C šilumokaityje (šildytuve), iki reikiamos 20 °C patalpos oro temperatūros reikia sušildyti dar 26 °C, tam būtų reikalingas 434 kW galios šildytuvai.

Parenkant vėdinimo įrenginį su šilumograža derėtų atsižvelgti į tai, kad maksimaliu režimu įranga, veikdama tik nedidelį laiko tarpą esant žiemos išorės oro projektinei temperatūrai, truncančiai vos keletą parų, energiją vartos neefektyviai. Todėl rekomenduotina įvertinti disponuojamų šilumos srautų kiekių (kitose pastato inžinerinėse sistemose), parametrų ir kainų bei šiluminio pralaidumo derinį prie charakteringų temperatūrų ir įvertinti, kada tikėtinas suvartoti didžiausias eksergijos kiekis.

3.5. Integruotų procesų energijos ir eksergijos poreikių analizė

Siekiant įvertinti, kaip procesų integracija įtakoja vėdinimo įrenginių, naudojančių skirtingus šilumogražius, energijos ir eksergijos poreikius, 3.1 poskyryje gauti rezultatai (3.3 pav.) lyginami su 3.35 paveiksle pateiktais energijos ir 3.36 paveiksle eksergijos poreikiais, gautais prieš ir po procesų integracijos, matyti, kad prieš integraciją sezoniniai energijos poreikiai 1,26 karto didesni už gautus po integracijos.

Energijos ir eksergijos poreikiai įvertinti, jei šilumnešiui reguliuoti būtų taikomas kokybinis reguliavimas. Esant išorės temperatūrai (–23 °C), lyginant prieš integraciją gautus energijos poreikius su po integracijos gautais energijos

poreikiais, jie yra 1,25 karto didesni. Kai išorės oro temperatūra lygi 3 °C, energijos poreikiai prieš integraciją yra 1,18 karto didesni už energijos poreikius integruotame vėdinimo įrenginio šilumokaičių tinkle.

3.35 pav. Energijos poreikis šilumokaičių tinklui esant įvairioms aplinkos temperatūroms

Fig. 3.35. Energy demand for the network of heat exchangers at various outdoor temperatures

Energijos poreikių skirtumą lemia tai, kad po procesų integracijos procedūros susiformavusios naujos šilumnešių temperatūros pagerina šilumogražio efektyvumą. Paaiškinti didelį energijos sąnaudų sumažėjimą lyginant prieš integraciją ir po integracijos atvejus galima tuo, kad dėl realiai veikiančioje sistemoje taikyto prasto mišraus galios reguliavimo (ir temperatūra, ir debitu), vyksta šilumos pereikvojimas, ypač pasireiškiantis esant teigiamoms lauko oro temperatūroms, kurių trukmė yra didelė.

Be to, po integracijos dėl naujo temperatūrinio režimo pagerėja šilumogražio efektyvumas. Tuo tarpu pagal Pinch metodą integruotame šilumokaičių tinkle (3.33 pav.) naudojami du atliekiniai šilumos srautai (grąžinamas iš šildymo sistemos šilumos srautas ir technologinio proceso šiltas vanduo) vietoj šilumos punkte vėdinimui numatyto šilumnešio. Energijos poreikių sumažėjimą lemia efektyvesnis šilumogražio veikimas ir žemesnio potencialo temperatūrų šilumnešio naudojimas oro šildytuvui.

3.36 pav. Eksergijos poreikis šilumokaičių tinklui esant įvairioms aplinkos temperatūroms

Fig. 3.36. Exergy demand for the network of heat exchangers at various outdoor temperatures

Atliekinės šilumos srautai, pasižymėdami žemesnėmis temperatūromis, debitaais, sąlygoja efektyvesnį jų panaudojimą energijos kokybės požiūriu. Sezoniniai eksergijos poreikiai kintant aplinkos oro temperatūrai turi tokį kitimo pobūdį (3.36 pav.) ir neintegruotoje sistemoje, lyginant su integruota, yra 1,45 karto didesni. Esant aplinkos oro temperatūrai, lygiai $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, eksergijos poreikis neintegruotame šilumokaičių tinkle 1,42 karto didesnis nei integruotame, o $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ – net 1,56 karto didesnis.

Neintegruotą vėdinimo sistemos procesų schemą atitinka schema, pateikta 2.7 paveiksle, kurios šilumnešių temperatūros žinomos iš PAVS (3.37 pav.). Joje naudojamas šilumos punkte numatytas šilumnešis, kurio parametrai (tiekiama (TE1) ir grąžinama (TE8) temperatūra) kinta priklausomai nuo aplinkos oro temperatūros, be to, yra pakankamai aukštų temperatūrų, būdingų tradicinėms pastato inžinerinėms sistemoms. 3.37 paveiksle taip pat pateiktos ir kitų šilumnešių, kurių parametrai kaupiami PAVS, temperatūros bei jų priklausomybės nuo išorės oro temperatūros. Šios temperatūros vaizduojamos tiesinėmis priklausomybėmis.

3.37 pav. Realios sistemos duomenų pasiskirstymas pagal aplinkos oro temperatūrą
Fig. 3.37. Data distribution of real system by the outdoor temperature

Kaip rodo gauti rezultatai, procesų integracijos – Pinch metodo taikymas pastato inžinerinių sistemų procesams integruoti gali pateikti energiniu ir ekserginio požiūriu efektyvesnių šių sistemų kompleksinio projektavimo sprendinių.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikti procesų integracijai taikomo Pinch metodų taikymo procesų, vykstančių pastato inžinerinėse sistemose, ir ekserginės analizės rezultatai:

1. Konkrečioms klimatinėms sąlygoms yra lauko oro temperatūra, kai vėdinimo sistemai veikiant visą šildymo sezoną suvartojamas maksimalus šiluminės eksergijos kiekis. Todėl, siekiant minimizuoti eksergijos kiekius, vėdinimo sistemos šilumokaičių tinklas optimizuojamas, esant šiai temperatūrai. Lietuvos klimatinėmis sąlygomis ši lauko oro temperatūra yra apie 3 °C.

2. Vėdinimo įrenginyje naudojamo šilumogrąžio pasirinkimas lemia procesų vėdinimo įrenginyje integracijos poreikį ir galimybes. Esant plokštiniam vienpakopiam šilumogrąžiui, vėdinimo įrenginyje papildomas šilumokaitis tiesiog parenkamas pagal energijos balansą, netaikant procesų integravimo proce-

dūrų. Šios procedūros taikytinos esant sudėtingesniai šilumogražių ir kitų šilumokaičių sprendiniui, pvz., šilumogražiui su tarpiniu šilumnešiu.

3. Atlikta analizė rodo, kad procesų integracijos procedūroms, o ribiniu atveju ir galimybėms vėdinimo įrenginyje ypač svarbus yra minimalaus temperatūrų skirtumo tarp šilumnešių pasirinkimas. Remiantis šilumogražio šilumos perdavimo ir temperatūrinio efektyvumo lygtimis, nustatyta priklausomybė tarp šilumogražio temperatūrinio efektyvumo ir minimalaus temperatūrų skirtumo (žiūr. 3.6 formulę). Tyrimais nustatyta, kad procesams vėdinimo įrenginyje integruoti reikėtų rinktis artimas $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ reikšmės, t. y. mažesnes nei pramoninėse sistemose rekomenduojamas, apie $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ minimalaus temperatūrų skirtumo, reikšmės.

4. Laikantis Pinch analizės atlikimo sekos išnagrinėta, kaip procesų integracijos rezultatus veikia atliekinės šilumos srautų kiekis bei tų srautų kokybiniai parametrai (temperatūros) šilumogražiui su tarpiniu šilumnešiu (2.7 pav.), kurio šilumokaičiai apibūdinami Ak_X ir Ak_Y , t. y. šiluminiais pralaidumais (šilumos mainų paviršiaus ir šilumos perdavimo koeficiento sandaugomis). Didžiausias suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas (ΣAk), kai naudojami žemesnių temperatūrų srautai (pradinė temperatūra yra intervale nuo $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), gaunamas esant $Ak_X = Ak_Y$ reikšmei, mažiausias – kai $Ak_X > Ak_Y$. Todėl galima, teigti, kad technologiškai optimaliam sprendiniui įtakos turi Ak_X ir Ak_Y santykis.

5. Šilumokaičių tinklą optimizuojant prie siūlomos, maksimalius eksergijos poreikius atitinkančios aplinkos temperatūros (nagrinėjamai vietai $3\text{ }^{\circ}\text{C}$), atsižvelgiant į sezoninę lauko oro temperatūros raidą trūkstamam šilumos poreikiui kompensuoti gali būti naudojami papildomi šildymo įrenginiai, taip pat gali būti panaudotas ir šilumos tiekimo tinklų šilumnešis, kurio parametrai gali būti keičiami taikant kokybinį arba kiekybinį šilumos tinklų šilumnešio reguliavimą. Galimas kokybinio ir kiekybinio šilumnešio reguliavimo būdų derinimas.

6. Lyginant energijos ir eksergijos poreikius gautus prieš procesų integraciją ir po jos, sezoniniai energijos poreikiai neintegruotoje sistemoje yra 1,26 karto didesni nei integruotoje (3.32), o sezoniniai eksergijos poreikiai atitinkamai 1,45 karto didesni neintegruotoje sistemoje (3.33 pav.). Paaiškinti didelį energijos sąnaudų sumažėjimą lyginant atvejus prieš ir po integracijos galima tuo, kad dėl realiai veikiančioje sistemoje taikyto prasto mišraus galios reguliavimo (ir temperatūra, ir debitu) vyksta šilumos pereikvojimas, ypač pasireiškiantis esant teigiamoms lauko oro temperatūroms, kurių trukmė yra didelė. Be to, po integracijos dėl naujo temperatūrinio režimo pagerėja šilumogražio efektyvumas.

7. Remiantis rezultatais, gautais analizuojant procesų integravimo rodiklius pastato inžinerinėse sistemose, rekomenduotina įvertinti disponuojamų šilumos srautų kiekių (kitose pastato inžinerinėse sistemose), parametrų, šiluminio pralaidumo derinį esant charakteringoms temperatūroms ir pagal tai pasirinkti lauko oro temperatūrą inžinerinėms sistemoms projektuoti. Termodinaminiu

požiūriu ja galėtų būti temperatūra, kuriai esant yra eksergijos poreikis didžiausias.

Algoritmas procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose

Kadangi vienas tyrimo tikslų – kurti ir tobulinti algoritmus procesų integracijos pastato inžinerinėse sistemose uždaviniams spręsti, leidžiančius projektuoti energijos požiūriu efektyviai energiją naudojančias pastato inžinerines sistemas, tai šiame skyriuje pateikiamas algoritmas minėtiems procesams integruoti. Algoritmas leidžia jau projektiniame inžinerinių sistemų etape parinkti tinkamus atliekinės šilumos srautus pastate ar jo inžinerinėse sistemose, tarp kurių būtų vykdomi efektyvesni, lyginant su tradicinius šilumos srautus naudojančiomis sistemomis, šilumos mainai.

Pateikiamos aprašomojo pobūdžio rekomendacijos, kuriomis remiantis galima spręsti procesų integracijos tikslingumą pastato inžinerinėse sistemose. Skirstant procesų integraciją, kai projektuojamos naujos pastato inžinerinės sistemos ir kai modifikuojamos jau esamos, skiriasi galimybės įgyvendinti procesų integraciją. Daugiau galimybių procesų integracijai visgi tenka projektuojant naujas inžinerines sistemas, tuo tarpu modifikuojant jas galimybės – ribotos.

Nors aptarti tik vėdinimo sistemos procesų integracijos atvejai, bet algoritmas, jo etapai bei principai tinkami ir kitoms pastato inžinerinėms sistemoms bei jų visumai integruoti.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Misevičiūtė, Martinaitis 2011).

4.1. Pastatų energinio naudingumo ryšys su pastate suvartojama energija

Siekiant nustatyti ribas, kuriomis apsiribojama, kokius energijos suvartojančius pastatus ir jų inžinerines sistemas verta nagrinėti integracijos požiūriu, tyrimų apžvalga nustatoma, kokie tai pastatai. Energijos suvartojimas pastate yra susijęs su jame esančių inžinerinių sistemų veikimui naudojamų šilumnešių parametrais, kurie ir nulemia energijos sąnaudas jose.

Šiaurinėse ES šalyse pastatai jau pasiekė aukštą šiluminio komforto ir sandarumo lygį (Händel 2011), dėl to sąlygojamas energijos poreikio vėdinimui didėjimas gali būti sumažintas sumažinus oro kiekius arba atgaunant vėdinimo šilumą. Suprantama, kad oro kiekis turėtų būti sumažintas iki tam tikros ribos išlaikant numatytus minimalius reikalavimus. Minimalus oro kiekis vienam žmogui – 10 l/s, už šį mažesnis oro kiekis sąlygoja blogesnę vidaus oro kokybę pastate (Seppänen 1999; Fisk 2000). Tuo tarpu oro kiekio vienam žmogui padidėjimas nuo 10 l/s iki 20-25 l/s pagerina oro kokybę biuruose, be to, sumažina „sergančio“ pastato sindromo požymius juose (Sundell, Levin 2007). Taip pat tyrimais įrodyta, kad oro kiekio biurų pastatuose padidėjimas iki 17 l/s žmogui padidina darbo produktyvumą tokios paskirties pastatuose (Seppänen *et al.* 2006). Taip pat būtina atsižvelgti ir į tai, kad didesnis oro kiekis sąlygoja didesnes energijos sąnaudas ir nuo jų priklausančias investicines vėdinimo įrenginio bei eksploatacines vėdinimo sistemos išlaidas.

Remiantis pastatų energinio naudingumo direktyva (2010/31/EB), pastatai skirstomi į klases ir kiekviena šalis turi savo pastatų skirstymo pagal energinio naudingumo klases sistemą. Rodiklis, pagal kurį gali būti įvertinamas pastatas pagal jame suvartojamą energiją – pastato energinio naudingumo klasė. Pagal energinio naudingumo klasifikaciją (STR 2.01.09:2005), Lietuvoje pastatai skirstomi į 7 energinio naudingumo klases (A, B, C, D, E, F, G). A klasei priskiriami mažiausiai energijos suvartojantys pastatai. B klasei priskirtini iki 95 kWh/m² energijos per metus suvartojantys pastatai (EPBD Buildings Platform 2008). Pagal pastatų energinio naudingumo direktyvą (2010/31/EB) naujai statomi pastatai neturėtų būti žemesnės nei C klasės, renovuoti – nei D klasės.

Pagal STR 2.01.09:2005, pastato energinis naudingumas įvertinamas naudojant rodiklį C, kuris priklauso nuo norminių, suminių, atskaitinių ir skaičiuojamųjų pastato energijos sąnaudų. Vertinant pastato energinį naudingumą įvertinamos ne tik PMS, bet ir AMS. Išskirtina tai, kad vėdinimui energijos poreikis (sąnaudos) vertinamas tik šildymo sezono metu, be to, į STR 2.01.09:2005 neįtraukti ir vėsinimo energijos poreikiai (sąnaudos).

Pastatai vertinami pagal rodiklį C, kurį lemia metinės energijos sąnaudos, tenkančios pastato ploto vienetui. Vėdinimo šilumos nuostoliai turi tendenciją nemažėti, kai tuo tarpu šilumos nuostoliai mažėja griežtinant pastatų atitvarų

šilumines charakteristikas, sąlygojančias šilumos nuostolių per atitvaras mažėjimą. Ypač efektyvi šilumograža susijusi su energijos poreikių (sąnaudų) vėdinimui mažėjimu.

Didžioji dalis pastatų (50 %), suvartojančių daugiau nei 200 kWh/m² energijos per metus Lietuvoje priskiriami D klasės pastatų grupei. 1970-1990 metais statyti pastatai atitinka E ir F energinio naudingumo klases, likusieji – senos statybos priskiriami G klasei (Build 2008).

Motuzienė (2010) siūlo, kad mažai energijos naudojančiu pastatu Lietuvoje būtų laikomas ne daugiau kaip 160 kWh/m² pirminės energijos grindų plotui per metus visoms reikmėms suvartojantis pastatas, pavyzdžiui, tai atitiktų apie 40 kWh/m² elektros ir 43 kWh/m² šilumos per metus suvartojantį pastatą. Šios energijos sąnaudos būtų gautos, kai pirminės energijos rodikliai elektrai bei šilumai, gaminamai dujiname katile, atitinkamai būtų lygūs 2,8 ir 1,10 (prEN 15315:2005).

Atsižvelgiant į tai, kad daugiausia pastatų atitinka energinio naudingumo D klasę ir į tai, kad nauji pastatai turi atitikti C klasę bei žiūrint į perspektyvas ir griežtėjančius energijos vartojimo pastatuose reikalavimus, apsiribojama nagrinėti nuo C iki G klasės pastatus. Taip pat tikslinga nagrinėti tuos viešuosius pastatus, kuriuose šilumogražai naudojami ne paprasti (plokštiniai, rotaciniai), o tarpinį šilumnešį naudojančios šilumogražiai. Tai ypač aktualu, kai pastate, t. y. jo inžinerinėse sistemose, yra atliekinės šilumos srautų arba neatsisakoma naudoti specialiai tam gaminamą bei perkamą šilumą.

4.2. Algoritmas procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose

Pagrindinė sudaryto algoritmo taikymo sritis – procesų viešosios paskirties pastatų inžinerinėse sistemose integracija. Vėdinimo įrenginyje vykstantiems šiluminiais procesams integruoti naudojami kitose pastato inžinerinėse sistemose esantys šilumos srautai, galimi atliekinės šilumos srautai. Atsižvelgiant ir į tai, kad Pinch analizės skirtos procesų integracijai ir dažniausiai taikomos pramonėje vykdomiems procesams analizuoti, šis algoritmas gali būti taikomas ir pramoninės paskirties pastatams. Tačiau šio algoritmo taikymas pramoninės paskirties pastatams ribojamas tik pramonės įmonėje vykstančių procesų integravimu į šiuose pastatuose esančias AMS.

Remiantis trečiame skyriuje atliktų tyrimų rezultatų analize, siūlomas algoritmas inžinerinių sistemų veiksmingumui didinti, eksergijos sąnaudoms jose nagrinėti ir mažinti pateikiamas 4.1 paveiksle. Jam atlikti siūlomi keli žingsniai. Priklausomai nuo nagrinėjamų pastato inžinerinių sistemų esamos padėties (są-

lygų), t. y. ar naujos, ar modifikuojamos sistemos, išskiriamos skirtingos algoritmo atlikimo žingsnių sekos.

Pirmuoju atveju, kai pastato inžinerinės sistemos yra projektuojamos, yra didesnis galimybių integruoti procesus pastato inžinerinėse sistemose pasirinkimas. Visų pirma, tai susiję su techninėmis procesų integracijos įgyvendinimo galimybėmis, nes kol sistemos nėra įrengtos pastate, galima numatyti, kur tinkamiausia būtų tas sistemas įrengti. Tuo atveju, kai inžinerinės sistemos pastate jau yra įrengtos, procesų integravimo galimybės jau ribojamos vien dėl to, kad tas sistemas tarpusavyje sujungti jau gali prireikti įvairių techninių sprendimų, pavyzdžiui, papildomų šrautų apjungimo, atjungimo elementų.

4.1 pav. Procesų pastato inžinerinėse sistemose integravimo algoritmas
Fig. 4.1 Algorithm of processes integration in building engineering systems

1. Nustatomos esamos ar numatomos projektuoti vėdinimo ir kitos inžinerinės sistemos pastate, jos aprašomos galiomis.
2. Nustatomos modifikuojamos vėdinimo sistemos energijos sąnaudos arba projektuojamos sistemos energijos poreikiai. Pirmuoju atveju naudojami skaitiklių, šilumos tiekimo įmonių duomenys, antruoju – inžinerinių sistemų realūs veikimo duomenys arba normatyviniai dokumentai (STR 2.09.04:2008; STR 2.01.09:2005). Remiantis klimatinių sąlygų eksergine analize nustatoma aplinkos oro temperatūra, kuriai esant gautami maksimalūs eksergijos poreikiai.
3. Pagal šilumogrąžius naudojamus arba numatomus naudoti šilumogrąžai, nustatomas minimalus temperatūrų skirtumas, kuris yra tiesiogiai priklausomas nuo šilumogrąžio temperatūrinio efektyvumo.
4. Įvertinama, ar naudojamą šilumogrąžį tinka naudoti procesų integracijai. Jei naudojami įprastiniai šilumogrąžiai (plokštinis arba rotacinis), algoritmas baigiamas šiuo žingsniu. Priešingu atveju, jei naudojamos kitos šilumogrąžos schemas, pvz., šilumogrąžis su tarpiniu šilumnešiu, toliau atliekamas kitas žingsnis.
5. Nagrinėjama, kokie atliekinės šilumos srautai yra pastate, tiksliau – pastato inžinerinėse sistemose, taip pat įvertinamos galimybės tiekti šilumą. Vykdamas kitą algoritmo žingsnį, nustatyti pastate esantys atliekinės arba numatomi pirkti šilumos srautai, aprašomi pradinėmis ($\hat{T}_i$) ir galinėmis ($\hat{T}_i''$) proceso temperatūromis bei jų šiluminėmis talpomis (CP_i). Ribiniu atveju gali būti analizuojami visi energijos ir medžiagų srautai pastate. Šis algoritmo veiksmas atliekamas, kai nagrinėjami bent du skirtingo pobūdžio srautai, t. y. karštas ir šaltas.
6. Projektuojamam šilumokaičių tinklui pasirenkami tokie atliekinės šilumos srautai, prie kurių vykdant procesų integraciją Pinch metodu gautamas mažiausias suminis šilumokaičių šiluminis pralaidumas. Tokiu būdu gautas šilumokaičių tinklas optimizuojamas prie temperatūros, kur buvo gauti didžiausi eksergijos poreikiai vėdinimo sistemai (2 algoritmo žingsnis).
7. Atliekamas šilumokaičių tinklo, turėto prieš procesų integraciją ir po jos energijos ir eksergijos poreikių įvertinimas ir palyginimas.
8. Įvertinamas ir pasirenkamas šilumnešio parametrų reguliavimo būdas šildymo sezono eigoje.

Naudojantis 4.1 paveiksle pateiktu algoritmu, galima įvertinti galimybes integruoti procesus tiek vėdinimo, tiek pastato inžinerinėse sistemose. Remiantis juo pateikiamos rekomendacijos procesams pastato inžinerinėse sistemose integruoti. Vertinimui pasirenkamas energinis kriterijus, kuris tiesiogiai apima ekonominį ir platesnį – termodinaminį – vertinimą.

4.3. Rekomendacijos procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose

Remiantis sudarytu algoritmu (4.1 pav.), pateikiamos rekomendacijos procesams pastato inžinerinėse sistemose integruoti. Norint integruoti procesus, dalyvaujančius pastato inžinerinėse sistemose, būtina nustatyti integracijos tikslingumą. Jei sistemos jau yra pastate arba tik projektinėje stadijoje, reikia įvertinti srautų kieki bei jų šiluminės charakteristikas (temperatūras, savitąsias šilumas ir kt.).

Nustačius, kiek ir kokių šilumos srautų yra, tikslinama, kokius šilumogrąžius numatyta naudoti vėdinimo įrenginyje. Jei tai plokštinis arba rotacinis šilumogrąžis, procesų integracija netaikoma. Tuo tarpu, kai naudojamas šilumogrąžis su tarpiniu šilumnešiu, procesų integracija galėtų būti tinkamas sprendimas pastato inžinerinių sistemų termodinaminiam naudingumui gerinti. Tokiu atveju būtų įmanomas ne tik tipiniams sprendiniams (pavyzdžiui, plokštinio ar rotacinio šilumogrąžos atveju) būdingo šildytuvo siūlymas, bet ir šilumos mainų tarp tarpinio šilumnešio ir atliekinės šilumos srautų vykdymas.

Svarbus rodiklis, nuo kurio priklauso procesų integracijos galimybės ir rezultatai, yra minimalaus temperatūrų skirtumo pasirinkimas – jį rekomenduotina naudoti artimą 5 °C nagrinėjant šilumogrąžius vėdinimo sistemoje.

Vėdinimo įrenginio, jį sudarančių elementų bei jo procesams naudojamų šilumos srautų ar šilumnešių šiluminiai parametrai turi įtakos efektyviam energijos naudojimui šilumokaičiuose, kurie šilumos mainams gali panaudoti ir kitose pastato inžinerinėse sistemose turimus šilumos srautus. Todėl sprendžiant, kokius procesus sistemose integruoti, būtina atsižvelgti į tų procesų kokybines savybes, apibūdinamas proceso pradine ir galine temperatūromis bei šilumine to srauto talpa. Jei procesų, kuriuos norima integruoti į sistemas, kokybinės savybės yra nepakankamos, t. y. per mažas skirtumas tarp pradinės ir galinės srauto temperatūros ar nežymi šiluminė galia, integracijos siūloma nevykdyti.

4.4. Gautų rezultatų palyginimas su kitais tyrimais

Kaip buvo minėta ir anksčiau, mokslinių darbų, nagrinėjančių procesų integravimo galimybes bei integruotą inžinerinių sistemų projektavimą trūksta. Todėl tyrimo rezultatai gali būti palyginti tik su keletos tyrėjų atliktų tyrimų rezultatais, kurie nagrinėjo procesų integraciją pastato inžinerinėse sistemose savais aspektais.

Lyginant rezultatus su Anantharaman *et al.* (2006) gautais tyrimų rezultatais pastebėta, kad neįvertintas šilumokaičių šiluminis pralaidumas, kuris kaip parodė atliktas darbe tyrimas, turi reikšmingą įtaką procesų integracijai. Šiuo dydžiu

be didelių ekonominių skaičiavimų galima nustatyti, koks tinkamiausias šilumokačių derinys energijos naudojimo požiūriu. Darbe gauta, kad mažiausias suminis šilumokačių šiluminis pralaidumas gaunamas, kai procesų integracija nagrinėjama vėdinimo įrenginyje su tarpiniu šilumnešiu (2.7 pav. arba 2.8 pav.), kurio $Ak_X > Ak_Y$. Anantharaman *et al.* (2006) savo darbe taip pat pateikė eksergijos ir sudėtinių kreivių, naudojamų Pinch analizėje, sinergiją, kurią taikė imliems energijai pramonės procesams nagrinėti.

Biekša (2008) nustatė, kad didelę įtaką energijos poreikiams administracinės paskirties pastatuose turi naudojami šilumokačiai bei ventiliatoriai vėdinimo sistemose. Šio autoriaus integracijai pasirinkto grindinio šildymo ir vėdinimo sistemos sujungimo įvertinimas parodė, kad pastato energijos poreikiams šilumnešių temperatūriniai režimai neturi žymios įtakos.

Kaip ir Biekšos (2008), taip ir šiame darbe buvo nustatyta, kad kokybinio ar kiekybinio šilumnešio reguliavimo būdas neturi žymios įtakos vėdinimo eksergijos poreikiams. Tačiau procesų integracija parodė, kad, lyginant su neintegruotais procesais, vėdinimo įrenginyje integruojant procesus sistemoje galima pasiekti apie 31% mažesnius energijos poreikius tiek kokybinio, tiek kiekybinio šilumnešio reguliavimo būdu.

4.1 lentelė. Disertacijos ir kitų panašių atliktų tyrimų palyginimas

Table 4.1. Comparison of dissertation and general similar surveys

Autorius	Disertacija	Marechal, Favrat	Torio <i>et. al</i>	Biekša
Objektas	Viešosios paskirties pastato vėdinimo sistema	Pramonės procesų energijos transformavimo sistemos	Šildymo ir vėsinimo sistemos, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius	Administracinio pastato mikroklimato sistemos
Vertinimo metodas	Ekserginė ir Pinch analizės	Ekserginė ir Pinch analizės	Ekserginė analizė	Ekserginė analizė
Kriterijus	Eksergijos poreikiai, šilumokačių šiluminis pralaidumas	Eksergijos nuostoliai	Eksergijos nuostoliai	Eksergijos nuostoliai, poreikiai

Šioje disertacijoje buvo nagrinėti procesai, vykstantys energijos (šilumos) transformavimo įrenginiuose – šilumokačiuose. Todėl gauti rezultatai skiriasi jau vien tuo, kad šiame darbe buvo vertinama tik šiluma kaip energijos trans-

formacijos forma. Taip pat šiame darbe pagrindine mikroklimato sistema pasirinkta vėdinimo sistema, į kurią ir integruojami kitose pastato inžinerinėse sistemose esantys šilumos srautai. Tuo tarpu kituose darbuose (Torio *et al.* 2009) sistemoms iš karto pasirenkami elementai, įrenginiai, kurie naudoja atsinaujinančius energijos išteklius. Šių autorių darbe buvo įvertinti vėdinimo sistemai naudojamo vėdinimo įrenginio komponentų eksergijos nuostoliai ir gauta, kad didžiausi eksergijos nuostoliai susidaro būtent šilumos atgavimo, šildymo ir sausinimo sekcijose.

Kaip ir Biekšos (2008), taip ir Marechal, Favrat (2005) atliktuose tyrimuose nustatyta, kad didelę įtaką procesų integracijai turi energijos gamybos technologija. Pavyzdžiui, gaminant šilumą katile ir naudojant kogeneraciją, antruoju atveju beveik per pusę sumažėja eksergijos poreikis pastato inžinerinių sistemų naudojimo etape.

Šiame darbe taip pat nustatyta, kad didelę įtaką inžinerinių sistemų energijos bei eksergijos poreikiams turi sezoninis lauko oro parametrų kitimas bei oro debitas, reikalingas tiekti į patalpas. Vėdinimo sistemos debitas sąlygoja įrenginių, reikalingų jam transportuoti bei šildyti, dydžius bei tam sunaudojamos energijos transformacijos naudingumą.

4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados

Palyginti kitų tyrėjų rezultatai, gauti nagrinėjant procesų integraciją pastato inžinerinėse sistemose, rodo, kad didelę įtaką energijos bei eksergijos poreikiams viešosios paskirties pastatuose turi vėdinimo sistemose naudojami šilumokaičiai bei ventiliatoriai. Vėdinimo sistema pasirenkama bazine procesų inžinerinėse sistemose integravimui pradėti.

Sukurtas algoritmas, kuriuo naudojantis galima atlikti procesų integracijos galimybių pastato inžinerinėse sistemose vertinimą. Algoritmas gali būti taikomas tiek viešosios, tiek pramoninės paskirties pastatų inžinerinėse sistemose vykstantiems procesams integruoti.

Taip pat pateikiamos rekomendacijos procesų integracijai jose. Rekomendacijos gali būti taikomos tiek projektuojant integruotas inžinerines sistemas naujam pastatui, tiek modifikuojant jau esamas pastate sistemas.

Kaip ir kitų tyrėjų, taip ir šiame darbe nustatyta, kad didelę įtaką inžinerinių sistemų energijos poreikiams turi sezoninis lauko oro parametrų kitimas bei oro debitas, reikalingas tiekti į patalpas. Vėdinimo sistemos debitas turi įtakos įrenginių, reikalingų jam transportuoti bei šildyti, dydžiams bei tam sunaudojamos energijos transformavimo naudingumui.

Didžioji dalis išnagrinėtų procesų integracijos variantų gali būti pritaikyti jau esamoms pastato inžinerinėms sistemoms integruoti jas modifikuojant. Siekiant išvengti techninių kliūčių įrengiant integruotas inžinerines sistemas pastate, rekomenduojama procesų integraciją taikyti jau pastato inžinerinių sistemų projektavimo etape, kai yra žinoma, kokios inžinerinės sistemos numatomos pastate.

Bendrosios išvados

1. Atlikta tyrimų procesų integracijos srityje apžvalga parodė, kad labai ribotas skaičius jų nagrinėja integraciją pastato inžinerinėse sistemose, o inžinerinėje praktikoje jie netaikomi. Todėl šiame darbe nagrinėjamos procesų integracijos metodo taikymo minėtose sistemose galimybės.

2. Atlikus tyrimų apžvalgos analizę bei eksperimentinės analizės metu gautų rezultatų palyginimą nustatyta, kad imliausi eksperimentai yra vėdinimo įrenginyje vykdomi šiluminiai procesai bei elementai, kuriuose tie procesai vykdomi: šilumokaičiai, šilumogrąžiai ir šildytuvai.

3. Tyrimais nustatyta, kad vėdinimo įrenginyje naudojamo šilumogrąžio pasirinkimas lemia procesų vėdinimo įrenginyje integracijos poreikį ir galimybes. Plokštiniam vienkopiam šilumogrąžiui papildomas šilumokaitis parenkamas pagal energijos balansą netaikant procesų integravimo procedūrų.

4. Nustatyta, kad procesų integracijos procedūroms, o ribiniu atveju ir galimybėms vėdinimo įrenginyje, ypač svarbus yra minimalaus temperatūrų skirtumo tarp šilumnešių pasirinkimas. Remiantis šilumogrąžio šilumos perdavimo ir temperatūrinio efektyvumo lygtimis nustatyta priklausomybė tarp šilumogrąžio temperatūrinio efektyvumo ir minimalaus temperatūrų skirtumo. Procesams vėdinimo įrenginyje integruoti siūloma pasirinkti artimas $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, t. y. mažesnes

nei pramoninėse sistemose rekomenduojamas apie $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ minimalaus temperatūrų skirtumo reikšmės.

5. Maksimalus šiluminės eksergijos kiekis suvartojamas, kai vėdinimo sistema veikia visą šildymo sezoną, esant tam tikrai nustatytai lauko oro temperatūrai. Todėl, siekiant minimizuoti eksergijos sąnaudas, vėdinimo sistemos šilumokaičių tinklas optimizuojamas, esant šiai temperatūrai. Ši temperatūra, Lietuvai būdingoms klimatinėmis sąlygomis, yra apie $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. Atlikus procesų integracijos inžinerinėse sistemose analizę taikant ekserginį ir Pinch metodus gauta, kad procesų integracijos pastato inžinerinėse sistemose galimybės ir rezultatai taip pat priklauso nuo naudojamų šilumos srautų kiekio ir temperatūrinio potencialo. Kelių srautų su žemesnėmis temperatūromis derinimas leidžia pasiekti racionalesnį energijos ir eksergijos panaudojimą lyginant su vieno srauto naudojimu arba su pernelyg aukštų temperatūrų šilumnešių naudojimu. Atliekinės šilumos srautai pastate turintys pradinę temperatūrą artimą $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, yra tinkamesni procesų integracijai už tuos srautus, kurių temperatūra aukštesnė už nurodytą.

7. Energijos ir eksergijos poreikių, gautų prieš procesų integraciją ir po jos, analizė parodė, kad sezoniniai energijos ir ypač eksergijos poreikiai neintegruotoje sistemoje yra didesni nei integruotoje. Nagrinėjamu atveju energijos poreikiai 1,26, o eksergijos net 1,45 karto didesni.

8. Sukurtas algoritmas procesams pastato inžinerinėse sistemose integruoti gali padėti projektuoti energijos požiūriu efektyvesnes inžinerines sistemas. Išsamesniam procesų integracijos pastato inžinerinėse sistemose galimybių vertinimui rekomenduojama sudaryti viso pastato šilumos srautų temperatūrinę diagramą, kuria naudojantis galima būtų įvertinti, kokius šilumos srautus tikslinga naudoti procesų integracijai pastato inžinerinėse sistemose.

Literatūra ir šaltiniai

Anantharaman, R.; Abbas, O. S.; Gundersen T. 2006. Energy Level Composite Curves – a new graphical methodology for the integration of energy intensive processes, *Applied Thermal Engineering* 26(13): 1378–1384.

Avgelis, A.; Papadopoulos, A. M. 2009. Application of multicriteria analysis in designing HVAC systems, *Energy and Buildings* 41(7): 774–780.

Baehr, H. D. 1980. Zur Thermodynamik des Heizens: I. Der zweite Hauptsatz und die konventionellen Heizsysteme. II. Primärenergieeinsparung durch Anergienutzung, *Exergy, Heat* 32(1-2): 9–15, 47.

Bahaj, A. S.; James, P. A. B.; Jentsch, M. F. 2007. Photovoltaics: added value of architectural integration, *Proceedings of ICE, Energy* 160(2):59–69.

Bandyopadhyay, S.; Varghese, J.; Bansal, V. 2010. Targeting for cogeneration potential through total site integration, *Applied Thermal Engineering* 30(1):6–14.

Bertoldi, P.; Atanuosiu, B. 2007. *Electricity Consumption and Efficiency Trends in the Enlarged European Union*. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities. 62 p. ISBN 978-92-79-05558-4.

Biekša, D.; Martinaitis, V. 2004. An estimation of life cycle exergy consumption of energy – intensive microclimate conditioning systems, in *Proceedings of 6th International Conference „Energy for buildings“*, October 7–8, 2004, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 205–219.

Biekša, D.; Martinaitis, V.; Šakmanas A. A. 2006. An estimation of exergy consumption patterns of energy-intensive building service systems, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(1): 37–42.

Biekša, D.; Martinaitis, V. 2007. Pastato inžinerinių sistemų tyrimas taikant ekserginį sistemų vertinimo metodą, *Energetika* 53(4): 84–89.

Biekša, D. 2008. *Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius: Technika. 87 p.

Boelman, E. C.; Sakulpipatsin, P. 2004. Critical analysis of exergy efficiency definitions applicable to buildings and building services. *Plea2004 – The 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture*, September 19–22, 2004, Eindhoven, The Netherlands. 1–6.

Borel, L. 1975. *Energy economics and exergy – Comparison of Different Heating Systems Based on the Theory of Exergy, Heat Pumps and Their Contribution to Energy Conservation Energy economics and exergy*. Noordhoff International Publishing, Leyden, Holland.

Borel, L. 1991. *Thermodynamique et energetique*. 3 ed. Lausanne: Presess polytechniques romandes. 710 p.

Böszörményi, G; Böszörményi, L. 2001. Some Problems of the Integration of Heat Pump Technology into a System of Combined Heat and Electricity Production, *Acta Polytechnica* 41(2): 44–47.

BuildingGreen 2001. *Greening Federal Facilities. An Energy, Environment, and Economic Resource Guide for Federal Facility Managers and Designers*. Second edition. 201 p.

Build 2008. *Pastatų energetinio naudingumo įdiegimo procedūra ir energetinio naudingumo sertifikavimas Lietuvoje: standartizacija, eiga, faktai, ekspertų komentarai* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.build.lt/news/index.php?option=com_content&view=article&id=69>.

Cengel, Y. A. 2007. Green thermodynamics, *International Journal of Energy Research*, 31(12): 1088–1104.

Cole, R. J.; Kernan, P. C. 1996. Life-cycle energy use in office buildings, *Building and Environment* 31(4): 307–317.

Cornelissen R. L.; Hirs G. G. 1997. Exergetic optimisation of a heat exchanger, *Energy Conversion Management* 38(15–17): 1567–1576.

Cornelissen, R. L.; Hirs, G. G. 1999. Thermodynamic optimisation of heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42(5): 951–960.

Cussler, E. L.; Moggridge, G. D. 2001. *Chemical Product Design*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521791839.

- Deacon, K. 2008. Development of the Kirklees renewable energy toolkit, UK, *Energy* 161(2):63–72.
- Degree Days 2011 [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. birželio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.degreedays.net/>>.
- Dincer, I. 2002. On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems, *International Journal of Energy Research* 26: 717–727.
- Dincer, I.; Hussain, M. M.; Al-Zaharnah, I. 2004. Analysis of sectoral energy and exergy use of Saudi Arabia, *International Journal of Energy Research*. 28(3): 205–243.
- Dincer, I.; Rosen, M. A. 2007. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Oxford: Elsevier Science & Technology. 472 p.
- EERE 2011. *Air-Source Heat Pumps* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. liepos 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12620>.
- EERE 2011. *Buildings Energy Data Book* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 6 d.]. Prieiga per internetą: <<http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro3.aspx>>.
- El-Halwagi, M. M. 2006. *Process Integration*. Elsevier. 398 p.
- El-Halwagi, M. M. 1997. *Pollution Prevention through Process Integration*. Academic Press. 318 p.
- El-Sayed Y. M. 2002. Application of exergy to design, *Energy Conversion and Management* 43(9-12): 1165–1185.
- Europos Komisija 2003. *Ventilation, Good Indoor Air Quality and Rational Use of Energy* [interaktyvus]. [žiūrėta 2007 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5CECA%5CECA_Report23.pdf>.
- Europos Bendrijų komisija 2006. *Komisijos komunikatas: Efektyvus energijos vartojimo veiksmų planas: išnaudoti potencialą* [interaktyvus]. KOM(2006)0545 galutinis [žiūrėta 2010 m. rugsėjo 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0545:FIN:LT:PDF>>.
- Europos Parlamentas ir Taryba 2010. *2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/EB dėl pastatų energinio naudingumo*. Europos Sąjungos oficialusis leidinys L 153:13–35.
- Europos Bendrijų komisija 2010. *Komisijos komunikatas: Energetika 2020. konkurencijos, darnios ir saugios energetikos strategija* [interaktyvus]. COM(2010)0639 galutinis [žiūrėta 2011 m. sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0639:FIN:EN:PDF>>.
- Eurostat 2010. *Europe in figures*. Luxembourg: Office for Publications of the European Union. 657 p. ISBN 978-92-79-14884-2.

Fisk, W. J. 2000. Health and Productivity Gains from Better Indoor Environment and their Relationship with Building Energy Efficiency, *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 537-566.

Fu, C; Gundersen, T. 2010. Heat Integration of an Oxy-Combustion Process for Coal Fired Power Plants with CO₂ Capture by Pinch Analysis, *Chemical Engineering Transactions* 21: 181-186.

Galovic, A.; Zivic, M.; Andrassy, M. 2003. Entropy Analysis of Parallel-Flow Heat Exchangers, *Strojniski vestnik. Journal of mechanical engineering* 49(2): 100-110.

Galovic, A.; Virag, Z.; Zivic, M.. 2003. Analytical Entropy Analysis of Recuperative Heat Exchangers, *Entropy* 5(5): 482-495.

Giannantoni, C., Lazzaretto, A., Macor, A., Mirandola, A., Stoppato, A., Tonon, S., Ulgiati, S. 2005. Multicriteria approach for the improvement of energy systems design, *Energy* 30(10): 1989-2016.

Gismeteo orų prognozė [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2011 m. birželio 27 d.]. Prieiga per internetą: <www.gismeteo.lt>.

Godat, J., Marechal, F. 2003. Optimization of a Fuel Cell System Using Process Integration Techniques, *Journal of Power Sources* 118(1-2): 411-432.

Gundersen, T. 2000. *A Process Integration Primer*. 3rd and Final version. Trondheim, Norway. 90 p.

Händel, C. 2011. Ventilation with heat recovery is a necessity in “nearly zero” energy buildings, *Rehva Journal* 48(3): 18-22.

Haseli, Y.; Dincer, I.; Naterer, G. F. 2008. Optimum Temperatures in a Shell and Tube Condenser with Respect to Exergy, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51(9-10): 2462-2470.

Hepbasli, A.; Balta M. T. 2007. A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings, *Building and Environment* 42(10): 3747-3756.

Hepbasli, A. 2008. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(3): 593-661.

Hestnes, A. G. 1999. Building Integration Of Solar Energy Systems, *Solar Energy* 67(4-6): 181-187.

Incropera, F. P.; Dewitt D. P. 2002. *Introduction to Heat Transfer*. Fourth Edition. Canada: John Wiley & Sons. 892 p.

Janna, W. S. 2000. *Engineering Heat Transfer*. Second Edition. Boca Raton: CRC Press. 683 p.

Junnila, S.; Horvath, A.; Guggemos, A. A. 2006. Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States, *Journal of Infrastructure Systems* 12(1): 10-17.

Kanoglu, M.; Dincer, I.; Cengel, Y. A. 2009. Exergy for better environment and sustainability, *Environment, Development and Sustainability* 11(5):971–988.

Kemp, I. C. 2007. *Pinch Analysis And Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. 2nd ed. Elsevier Science & Technology. 409 p. ISBN 978-0-75068-260-2.

Klemeš, J. J.; Varbanov, P. S.; Pierucci, S.; Huisinigh, D. 2010. Minimising emissions and energy wastage by improved industrial processes and integration of renewable energy, *Journal of Cleaner Production* 18(9): 843–847.

Kofoworola, O. F.; Gheewala, S. H. 2009. Life cycle energy assesment of a typical Office building in Thailand, *Energy and Buildings* 41(10): 1076–1083.

Kralj, A. K.; Glavič, P.; Krajnc, M. 2002. Waste heat integration between processes, *Applied Thermal Engineering* 22(11): 1259–1269.

Laustsen, J. 2008. *Energy Efficiency Requirements In Building Codes, Energy Efficiency Policies For New Buildings* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. birželio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.iea.org/g8/2008/Building_Codes.pdf>.

Li, J.; Chang, H. 2005. A new exergy method for process analysis and optimization, *Chemical Engineering Science* 60(10): 2771–2784.

Linnhoff, B.; Townsend, D. W.; Boland, D.; Hewitt, G. F.; Thomas, B. E. A.; Guy, A. R.; Marsland, R. H. 1982. *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. UK: IChemE. 247 p.

LST EN 13779:2007 *Negyvenamųjų pastatų ventiliacija. Ventiliacijos ir patalpų oro kondicionavimo sistemų eksploatacinių charakteristikų reikalavimai*. Vilnius, 2007. 72 p.

Marechal, F.; Favrat, D. 2005. Combined Exergy and Pinch Analysis for Optimal Energy Conversion Technologies Integration, in *The 18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Trondheim, Norway, 2005*. ECOS 2005 1: 177–184.

Martinaitis, V. 1998. Analytic calculation of degree-days for the regulated heating season, *Energy and Buildings* 28(2): 185–189.

Martinaitis, V. 2001. *Pastato gyvavimo ciklo termodinaminės analizės modelis: monografija*. Vilnius: Technika. 171 p. ISBN 9986054354.

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

Martinaitis, V.; Bieksa, D.; Miseviciute, V. 2010. Degree-days for the exergy analysis of buildings, *Energy and Buildings* 42(7): 1063–1069.

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2008. Dependence of exergy efficiency of recuperative heat exchanger on dimensionless temperature, in *Proceedings of The 5th conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2008)*, held in Kaunas on May 29, 2008, Kaunas, Lithuania. Kaunas: LEI: 57–63 [CD-ROM]. ISSN 1822-7554.

Motuzienė, V. 2010. *Ištiklinimo įtakos viešųjų pastatų energijos poreikiams kompleksinė analizė*: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika. 140 p.

LR Vyriausybė 2010. *Nacionalinė energetikos (energetinės nepriklausomybės) strategija*. Vilnius. 44 p.

LR Vyriausybė 2006. Nacionalinė energijos vartojimo efektyvumo didinimo 2006–2010 metų programa. Vilnius. 24 p.

Natural recourses Canada 2003. *Pinch Analysis: for the Efficient Use of Energy, Water & Hydrogen* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 10 01]. Prieiga per internetą: <http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2009-052/2009-052_PM-FAC_404-DEPLOI_e.pdf>.

Nikulshin, V.; Wub, C.; Nikulshina, V. 2002. Exergy efficiency calculation of energy intensive systems, *Exergy an International Journal* 2(2): 78–86.

Nyman, M.; Simonson, C. J. 2005. Life cycle assessment of residential ventilation units in a cold climate, *Building and Environment* 40(1): 15–27.

Online Pinch Analysis Tools [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2011 m. gegužės 3 d.]. Prieiga per internetą:

<http://www.uic-che.org/pinch/about_program.php#CrossPinchMatching>.

Parfentyeva, N.; Samarin, O.; Lushin, K.; Paulauskaite, S.; Valancius, K. 2011. Temperature efficiency of rotary heat recovery units in ventilation and air conditioning, in *The 8th International Conference “Environmental Engineering”*: Selected papers, vol. 2. Ed. by D. Cygas, K. D. Froehner. May 19–20, 2011, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 799–801.

Pavlas, M.; Stehlik, P.; Oral, J.; Klemeš, J.; Kim, J. K.; Firth, B. 2010. Heat integrated heat pumping for biomass gasification processing, *Applied Thermal Engineering* 30(1): 30–35.

Pavlovskaja, O.; Juodis E. 2006. Šalinamo vėdinimo oro šilumos atgavimo įrangos efektyvumo analizė, *respublikinės mokslinės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“, įvykusios Vilniuje 2006 m. balandžio 27–28 d. medžiaga*. Vilnius: Technika. 81–87 p.

Pe´rez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. 2008. A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings* 40(3): 394–398.

prEN 15315:2005 *Heating systems in buildings - Energy performance of buildings - Overall energy use, primary energy and CO2 emissions*. 2005. 45 p.

Puigjaner, L. 1997. Process integration with combined heat and power (CHP), *Applied Thermal Engineering* 17(8-10): 1015–1034.

RSN 156-94 Statybinė klimatologija. Vilnius, 1994.

Saidura, R.; Masjukia, H. H., Jamaluddinb, M. Y. 2007. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia, *Energy Policy* 35(2): 1050–1063.

Sakulpipatsin, P.; Itard, L. C. M.; Kooi, H. J. van der; Boelman, E. C., Luscure, P. G. 2010. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, *Energy and Buildings* 42(1): 90–99.

Schmidt, D. 2009. Low exergy systems for high-performance buildings and communities, *Energy and Buildings* 41(3): 331–336.

Seppänen, O. 1999. Estimated cost of indoor climate in Finnish buildings in *Proceedings of Indoor Air 99*. 3: 13–18.

Seppänen, O. 2008. Ventilation for Good Indoor Environment and Energy Efficiency, *Rehva Journal* 45(3): 24–28.

Smejkal, Q.; Šarlej, M.; Stehlik, P. 2009. New unit for clean energy production from contaminated biomass (1 to 3 MWt)-example of process design, *Chemical Engineering Transactions* 18: 57–62.

Smith, R. 2000. State of the art in process integration, *Applied Thermal Engineering* 20(15-16): 1337–1345.

Smith, R. M. 2005. *Chemical Process: Design and Integration*. John Wiley and Sons. 712 p. ISBN 978-0-471-48681-7.

Söderman, J.; Ahtila, P. 2010. Optimisation model for integration of cooling and heating systems in large industrial plants, *Applied Thermal Engineering* 30(1):15–22.

Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės, 2011. *Kuro ir energijos balansas: 2010*. Vilnius: Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos Vyriausybės, 53 p. ISSN 2029-5944.

STR 2.09.04:2008 Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui. Vilnius, 2008. 38 p.

STR 2.09.02:2005 Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas. Vilnius, 2005. 51 p.

STR 2.01.09:2005 Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. Vilnius, 2005. 54 p.

Szargut, J. 2005. *Exergy method: technical and ecological applications*. Southampton: WIT Press. 164 p.

Szargut, J.; Morris, D. R.; Steward, F. R. 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Amsterdam: Hemisphere Publishing Corporation. 332 p.

Tarptautinių žodžių žodynas 2011. *Integracija* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2008 m. rugsėjo 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.tzz.lt/search?searchword=integracijahttp://www.tzz.lt/search?searchword=integracija>>.

Torio, H.; Schmidt, D. 2007. More sustainable buildings through exergy analysis – Solar thermal and/or ventilation systems? in *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoor*. June 10-14, 2007, Helsinki, Finland. ISBN 978-952-99898-2-9.

Torio, 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.

Tuomaala, M.; Hurme, M.; Leino, M. M. 2010. Evaluating the efficiency of integrated systems in the process industry – case: steam cracker, *Applied Thermal Engineering* 30(1): 45–52.

UNEP 2006. *Energy Efficiency Guide for Industry in Asia* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 3 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.energyefficiencyasia.org/docs/ee_modules/Chapter-Waste%20Heat%20Recovery.pdf>.

Utlu, Z.; Hepbasli, A. 2003. A study on the evaluation of energy utilization efficiency in the Turkish residential-commercial sector using energy and exergy analyses, *Energy and Buildings* 35(11): 1145–1153.

Zhelev, T. K.; Ridolfi, R. 2006. Energy recovery and environmental concerns addressed through emergy–pinch analysis, *Energy* 31(13): 2486–2498.

Zhelev, T. 2007. The conceptual design approach – A process integration approach on the move, *Resources, Conservation and Recycling* 50(2): 143–157.

WBCSD 2009. *Energy Efficiency in Buildings* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 3 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.pewclimate.org/docUploads/EEBSummaryReportFINAL.pdf>>.

White Paper 2005. *Smart Use of Your HVAC Cooling Towers* [interaktyvus]. [žiūrėta 2011 m. liepos 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.csu.org/business/greenback/energy/library/item2344.pdf>>.

Бажан, П. И.; Каневец, Г. Е.; Селиверстов, В. М. 1989. *Справочник по теплообменным аппаратам* [Bažan, P. I.; Kanavec, G. E.; Seliverstov, V. M. Šilumokaičių žinynas]. Москва: Машиностроение. 368 с.

Смит, Р.; Клемеш, Й.; Товажнянский, Л. Л.; Капустенко, П. А.; Ульянов, Л. М. 2004. *Основы интеграции тепловых процессов* [Smit, R.; Klemeš, J.; Tovažnianskij, L. L.; Kapustenko, P. A.; Uljev, L. M. Šiluminių procesų integracijos pagrindai]. 458 с.

Шаргут, Я.; Петела, Р. 1968. *Эксергия* [Šargut, J.; Petela, R. Eksergija]. Перевод с польского под ред. Бродянского В. М. Москва: Энергия. 280 с.

Autorės publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V.; Šiupšinskas, G. 2011. Vėdinimo įrenginio šiluminio pralaidumo procesų integravimo atvejai, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(5): 89–97. ISSN 2029-2341. (ICONDA).

Martinaitis, V.; Biekša, D.; Misevičiūtė, V. 2010. Degree-days for the exergy analysis of buildings, *Energy and buildings* 42(7): 1063–1069. ISSN 0378-7788. (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2011a. Vėdinimo sistemos šilumokaičių tinklo integravimo atvejis taikant Pinch metodą, *respublikinės konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos-2011, įvykusios Kaune 2011 m. vasario 3–4 d.: mokslinių pranešimų rinkinyje*. Kaunas: 2011. 226–231. ISBN 978-9955-25-743-1

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2011b. Analysis of ventilation system's heat exchangers integration possibilities for heating season, in *Proceedings of The 8th International „Conference Environmental Engineering“, held in Vilnius on 19–20 May, 2011*. Selec-

ted papers. Vol II. Water Engineering. Energy for Buildings: 781–787. ISBN 978-9955-28-828-2.

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2008a. Priešsrovinio šilumokaičio naudojamo vėdinimo sistemoje ekserginė analizė, *respublikinės mokslinės konferencijos „Pastatų inžinerinės sistemos“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 24–25 d., mokslinių pranešimų medžiagoje*. Vilnius : Technika, 20–24. ISBN 978-9955-28-257-0.

Misevičiūtė, V.; Martinaitis, V. 2008b. Dependence of exergy efficiency of recuperative heat exchanger on dimensionless temperature, in *Proceedings of the 5th conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2008)*, held in Kaunas on May 29, 2008. Kaunas: LEI: 57–63 [elektroninis išteklius]. ISSN 1822-7554.

Violeta MISEVIČIŪTĖ

PROCESŲ INTEGRAVIMO VĖDINIMO ĮRENGINIUOSE GALIMYBIŲ VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Energetika ir termoinžinerija (06T)

EVALUATION OF POSSIBILITIES FOR PROCESSES INTEGRATION
IN VENTILATION EQUIPMENT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Energetics and Power Engineering (06T)

2011 12 29. 10,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius