



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

PAULIUS BAREIKA

**VĖDINIMO ĮRENGINIŲ SU INTEGRUOTAIS ŠILUMOS SIURBLIAIS
PROJEKTAVIMAS, TYRIMAS IR ANALIZĖ**

**DESIGN, RESEARCH AND ANALYSIS OF AIR HANDLING UNITS
WITH AIR SOURCE HEAT PUMPS**

Baigiamasis magistro darbas

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas **621E30003**

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKO INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Vytautas Martinaitis
(Vardas, pavardė)

(Data)

PAULIUS BAREIKA

VĖDINIMO ĮRENGINIŲ SU INTEGRUOTAIS ŠILUMOS SIURBLIAIS
PROJEKTAVIMAS, TYRIMAS IR ANALIZĖ

DESIGN, RESEARCH AND ANALYSIS OF AIR HANDLING UNITS
WITH AIR SOURCE HEAT PUMPS

Baigiamasis magistro darbas

Energetikos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas **621E30003**

Energetikos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vadovas

doc. dr. Darius Biekša

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

dr. Vytautas Šukys

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

Energijos inžinerija studijų kryptis

Energijos inžinerija ir planavimas studijų programa, valstybinis kodas 621E30003

Energijos inžinerijos specializacija

(parašas)

Vytautas Martinaitis

(vardas, pavardė)

2013 gegužės mėn. 07 d.

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Paulius Bareikis
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema Vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos
sąveikiams projektavimas, tyrimas ir analizė

Patvirtinta 2011 m. lapkričio 30 d.

Dekano įsakymu Nr. 415 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas

2013 m. birželio mėn. 09 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

svaidas. Problemos formulavimas. Mokslinių tyrimų ir rinkoje
veikiantis analogų apžvalga. Pagrindinių įrenginių elementų
prieštaiymas. Tyrimo ir faktinio eksperimento metodikos sudarymas
Faktinio eksperimento stendo montavimas. Tyrimo rezulta-
ty analizė. Bandymo metu iškilusių techninių problemų
sprendimas. Bandymo rezultatų techninio galimumo ir
ekserginio naudingumo įvertinimas. Gautų rezultatų patikrinimo
analizė. Išvadų formulavimas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: lekt. R. Žukienė
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) dr. Vytautas Šulys

Vadovas

.....
(parašas)

dr. Darius Biekša

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(parašas)
Paulius Bareika
(vardas, pavardė)

2013-06-06
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Energijos inžinerijos ir planavimo** programos baigiamasis darbas 4
(energijos inžinerija)

Pavadinimas **Vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais projektavimas,
tyrimas ir analizė**
Autorius **Paulius Bareika**
Vadovas **dr. Darius Biekša**

Kalba:
lietuvių

Anotacija

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjami vėdinimo įrenginiai su integruotais šilumos siurbliais. Darbe atliekama tokios rūšies įrenginių literatūros apžvalga. Apžvelgiami šilumos siurblio komponentai, darantys didžiausią įtaką jo darbui. Darbo metu atlikti įrenginių projektavimo ir konstravimo darbai. Pateikiamos projektavimo rekomendacijos. Lyginami skirtingi kompresorių galios moduliacijos principai. Nagrinėjami įrenginių darbo režimai, kylančios problemos eksploatacijos metu, ieškomi problemų sprendimų būdai. Pateikiamos kintamo sukimosi greičio kompresorių galių moduliacijos ribos. Atliekamos energinė ir ekserginė analizės pagal eksperimentinio bandymo duomenis. Nustatomi realūs termodinaminio efektyvumo ir naudingumo koeficientai. Jautrumo analizės metu atliekami elektrinio šildytuvo efektyvumo ir naudingumo skaičiavimai. Pateikiami rezultatai, išvados ir rekomendacijos tokios rūšies įrenginių tobulinimui ir tolimesniam vystymui.

Darbo apimtis – 94 psl. teksto be priedų, 66 iliustr., 7 lent., 43 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: Vėdinimo įrenginiai su oras-oras šilumos siurbliais, kompresorių galios kitimas, kintamo greičio kompresoriai, COP, EER, drėgno oro eksergija, šalinamo oro šilumos atgavimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Building Energetics

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

Master Degree Studies **Energy Engineering and Planning** study programme Final Work 4
(Energy Engineering)

Title	Design, Research and Analysis of Air Handling Units with Air Source Heat Pumps
Author	Paulius Bareika
Academic supervisor	Dr Darius Biekša

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Master's thesis examines air handling units with integrated air source heat pumps. Literature review about this type of units was carried out. An overview of mostly important heat pump's components are given. Thesis was an opportunity to design, construct and analyze these units. Different heat pump's operation modes examined and main issues turned out. Based on experimental data variable speed compressor's capacity modulation results defined. Moist air thermodynamic calculations have been made and air handling unit with integrated air source heat pump experimental energy and exergy efficiency was defined. Sensitivity evaluation changing heat pump with electric heater carried out. The main recommendation provided for units designing and further development.

Thesis consist of 94 p. text without appendixes, 66 pictures, 7 tables, 43 bibliographical entries.

Keywords: Air handling unit with air source heat pump, compressors capacity modulation, variable speed compressors COP, EER, moist air exergy, exhaust air heat recovery.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo
bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Bareika, 20073294

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Aplinkos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Energijos inžinerija ir planavimas, ENmf-11

(Studijų programa, akademinė grupė)

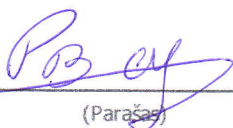
**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. birželio 4 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais projektavimas, tyrimas ir analizė“ patvirtintas 2011 m. lapkričio 30 d. dekanų potvarkiu Nr. 415ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė, Vytautas Sukys. Mano darbo vadovas dr. Darius Biekša.

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



(Parašas)

Paulius Bareika

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Padėka.....	11
Įvadas.....	12
1. Darbo problematika	13
2. Tikslas ir keliami uždaviniai	13
3. Literatūros apžvalga.....	15
3.1. Padėtis rinkoje.....	16
3.2. Moksliniai ir tiriamieji darbai	18
3.3. Reglamentuojantys dokumentai.....	20
3.4. Techninės literatūros apžvalga.....	20
3.5. Kompresorių apžvalga	22
3.5.1. Rotaciniai kompresoriai.....	23
3.5.2. Spiraliniai kompresoriai	24
3.5.3. Kompresorių galios moduliacija.....	24
4. Įrenginio projektavimas	30
4.1. Projektavimo koncepcija.....	30
4.1.1. Rezultatų apibendrinimas	34
4.2. Šilumos siurblio projektavimo principai.....	35
5. Tyrimo objektas	39
5.1. Vėdinimo įrenginio koncepcija.....	39
5.2. Vėdinimo įrenginių techninės charakteristikos.....	40
5.3. Šilumos siurblys.....	42
6. Tyrimo metodika.....	44
6.1. Matavimo duomenų apdorojimas	44
6.2. Energinė analizė.....	45
6.3. Ekserginė analizė	49
7. Eksperimentiniai tyrimai.....	52
7.1. Naudojama įranga	52
7.2. Bandomieji įrenginiai	54
8. Eksperimentinių tyrimų eiga ir rezultatai	57
8.1. Kompresorių galios kitimo nustatymas	58
8.1.1. Rezultatų apibendrinimas	61
8.2. Garintuvo apšalimas	61
8.2.1. Rezultatų apibendrinimas	69
8.3. Efektyvumo nustatymas.....	71
8.3.1. Šilumos siurblio efektyvumas ir jo vertinimas	71
8.3.2. Vėdinimo įrenginio efektyvumas	75
8.3.3. Rezultatų apibendrinimas	77
8.4. Naudingumo nustatymas.....	78
8.4.1. Rezultatų apibendrinimas	80

8.5. Jautrumo analizė	81
8.6. Vėsinimo režimas	82
8.6.1. Rezultatų apibendrinimas	85
Išvados.....	87
Naudota literatūra	90
Priedai.....	94

Santrumpos

DK – dažnio keitiklis.

HGBP – „hot gas by-pass“.

RŠ – rotacinis šilumokaitis.

ŠS – šilumos siurblys.

TE – termodinaminis efektyvumas.

TN – termodinaminis naudingumas.

VĮ – vėdinimo įrenginys.

Paveikslų sąrašas

1 pav. Literatūros apžvalgos etapai.....	15
2 pav. Vėdinimo įrenginys su integruotu ŠS ir plokšteline šilumokaičiu.....	16
3 pav. Vėdinimo įrenginys su RŠ ir ŠS, kai ŠS naudojamas kaip pirminis energijos atgavimo įrenginys	16
4 pav. Vėdinimo įrenginys su RŠ ir ŠS.....	17
5 pav. Šilumos atgavimo būdų palyginimas panaudojant ŠS ^[10]	18
6 pav. Šaldymo ciklo vaizdavimas P-H diagramoje	21
7 pav. Rotacinio kompresoriaus veikimas	23
8 pav. Spiralinio kompresoriaus veikimo taktai ^[20]	24
9 pav. ON/OFF kompresoriaus veikimo principa	25
10 pav. HGBP schema (I) ir proceso atvaizdavimas P-H diagramoje	26
11 pav. HGBP schema (II) ir proceso atvaizdavimas P-H diagramoje.....	27
12 pav. „Copeland Digital“ kompresoriaus sudėtis ^[36]	28
13 pav. Temperatūrų trukmės grafikas.....	31
14 pav. Energijos suvartojimas skirtingos galios kompresoriuose	32
15 pav. Orui perduodamos energijos kiekis.....	33
16 pav. Energijos balansas	34
17 pav. Įrenginių projektavimo algoritmas	35
18 pav. „Komfovent Verso“ programos duomenų įvedimo langas	36

19 pav. „Komfovent Verso“ programos rezultatų išsklotinė.....	36
20 pav. „Solkane“ skaičiavimo programos langas.....	38
21 pav. Principinė VĮ su ŠS schema šildymo režime.....	39
22 pav. Principinė VĮ su ŠS schema vėsinimo režime.....	40
23 pav. VĮ išskaidymas į nagrinėjamas posistemės	42
24 pav. ŠS hidraulinė schema su vienu kompresoriumi	42
25 pav. ŠS hidraulinė schema su dviem kompresoriais	43
26 pav. ŠS hidraulinė schema su trimis kompresoriais.....	43
27 pav. ŠS energijos srautai	45
28 pav. Parametrų įtaka ŠS efektyvumui	47
29 pav. „Komfovent Verso 10RHp“ srautų schema	48
30 pav. Naudota matavimo įranga	52
31 pav. „Komfovent Verso 10 RHp“ RŠ sekcija su integruoto ŠS mazgu.....	54
32 pav. „Komfovent Verso 10 RHp“ įrenginio schema.....	55
33 pav. „Komfovent Verso 60 RHp“ ŠS mazgas.....	55
34 pav. „Komfovent Verso 60 RHp“ schema	56
35 pav. „Komfovent Kompact Recu 1200“ įrenginio nuotrauka ir ŠS mazgas.....	56
36 pav. „Komfovent Kompact Recu 1200“ schema	57
37 pav. Įrenginio kondensacijos slėgio priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio ir oro kiekio vėsinimo režime	59
38 pav. Įrenginio kondensacijos slėgio priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio ir oro kiekio šildymo režime	59
39 pav. Kompresoriaus galios kitimas keičiant sukimosi dažnį vėsinimo režime.....	60
40 pav. Kompresoriaus galios kitimas keičiant sukimosi dažnį šildymo režime.....	60
41 pav. Apšalimo formavimosi sluoksniai ant šaltos sienelės	62
42 pav. Apšalęs garintuvas.....	62
43 pav. Uždelsto apšalimo atitirpinimo anomalijos vėdinimo įrenginyje.....	63
44 pav. Taško 12 parametrų parodymai	64
45 pav. Atitirpinimo įtaka ŠS darbui.....	65
46 pav. Įvairių parametrų įtaką	66
47 pav. Šerkšno susidarymo matavimo schema.....	67
48 pav. Apšalimo susidarymas bėgant laikui.....	67
49 pav. Apšalimo augimo tempai ant garintuvo paviršiaus. Esant švarioms plokštelėms ir su likusią drėgmę (a)	68
50 pav. Atitirpinimo režimo veikimas su valdymo algoritmu	70

51 pav. „Komfovent Verso 10RHp“ įrenginys matavimo metu	71
52 pav. ŠS COP kitimo priklausomybė nuo tiekiamo oro kiekio ir lauko oro temperatūros...	72
53 pav. ŠS COP kitimo priklausomybė nuo tiekiamo oro kiekio ir lauko oro temperatūros su ventiliatoriais	73
54 pav. Oro slėgio perkritis dėl ŠS sumontavimo	74
55 pav. COP kitimas įvertinus ventiliatorių galios padidėjimą dėl pasipriešinimo	74
56 pav. Ventiliatorių įvertinimas efektyvumo skaičiavime	75
57 pav. VĮ termodinaminio efektyvumo kitimas	76
58 pav. Įrenginio temperatūrinis efektyvumas	77
59 pav. ŠS termodinaminio naudingumo kitimas	78
60 pav. VĮ termodinaminio naudingumo kitimas	79
61 pav. Ekserginio naudingumo palyginimas	80
62 pav. II varianto termodinaminio efektyvumo ir naudingumo rezultatai	81
63 pav. Abiejų nagrinėjamų variantų palyginimas	82
64 pav. Vėsinimo galios priklausomybė nuo sukimosi dažnio ir oro kiekio	83
65 pav. Santykinės vėsinimo galios priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio.....	83
66 pav. „Verso 10RHp“ darbo specifiška vėsinimo režime	86

Lentelių sąrašas

1 lentelė. „Digital“ kompresoriaus darbo ciklai	28
2 lentelė. Galios reguliavimo technologijų santrauka	29
3 lentelė. Kompresorių duomenys.....	32
4 lentelė. Projektiniai parametrai	35
5 lentelė. Vėdinimo įrenginių techninės charakteristikos	41
6 lentelė. „Komfovent Verso 60RHp“ kompresorių duomenys.....	58
7 lentelė. Vėdinimo įrenginio apibendrinimas	88

PADĖKA

Už suteiktą galimybę rašyti darbą tema „Vėdinimo renginių su integruotais šilumos siurbliais projektavimas, tyrimas ir analizė“ norėčiau padėkoti įmonei UAB „Amalva“. Kuri suteikė galimybę bandyti vėdinimo įrenginius, rinkti informaciją ir ją publikuoti. Išskyrė reikalingus matavimo prietaisus ir patalpas bandymams.

Taip pat norėčiau pareikšti padėką UAB „Amalva“ Technikos direktoriui dr. Vytautui Šukiui už suteiktas konsultacijas tyrimo ir darbo rašymo metu.

IVADAS

Didėjant pirminės energijos pagamintos iš iškastinio kuro suvartojimui Europoje ir visame pasaulyje, dedamos vis didesnės pastangos sumažinti šiai problemai. Europos sąjungoje pastatai suvartoja apie 40 % visos suvartojamos pirminės energijos ^[41]. Pastatuose energija vartojama palaikyti tinkamas sąlygas pastatų naudotojams – užtikrinti mikroklimato parametrus. Bėgant laikui ir tobulėjant statybų technologijoms, pastatai tampa vis efektyvesni ir sandaresni, gerinamos atitvarų savybės, siekiant sumažinti šilumos nuostolius. Tačiau geras pastato sandarumas kelia mechaninio vėdinimo poreikį.

Administraciniai pastatai, jau nebeįsivaizduojami be priverstinio vėdinimo sistemų. Tačiau su vėdinimu yra pašalinama ne maža dalis šilumos – skaičiuojama, kad tai gali siekti 30-60 % viso pastato šilumos poreikių ^[29]. Norint tai sumažinti yra naudojami šilumogrąžos įrenginiai (rotaciniai ir plokšteliniai šilumokaičiai, šilumos vamzdžiai ir kt.) vėdinimo sistemose, kuomet dalis šilumos yra grąžinama. Tačiau, didėjant pastatų efektyvumui, įprasti šilumogrąžos būdai tampa nepakankamai efektyvūs. Jau nuo 2018 m. visi naujai statomi visuomeninės, o nuo 2020 m. ir privatūs pastatai privalės būti beveik nulinės energijos pastatais. Tai reiškia, kad reikės dar labiau padidinti pastatų energetinį efektyvumą, taupyti energiją ir propoguoti atsinaujinančią energetiką. Taip pat, didėjant įvairių sistemų poreikiui pastatuose, didėja techninių patalpų plotai.

Norint pakelti energijos vartojimo efektyvumą ir sumažinti kai kurių sistemų galias buvo pasirinktas sprendimas – integruoti oras – oras šilumos siurblius į vėdinimo įrenginius. Toks sprendimas padeda taupyti energiją ir sumažina tam tikrų atskirų sistemų galias (pvz., oro kondicionavimo arba šildymo), o tai tiesiogiai veikia sistemų užimamą erdvę pastatuose. Iki šiol šis sprendimas nebuvo labai populiarus, tačiau pingant šilumos siurblių pagaminimo savikainai - skinasi kelią į rinką. Šį principą pradėjo taikyti ir viena didžiausių Lietuvos vėdinimo įrangos gamintojų UAB „Amalva“, kurioje ir buvo atlikti šio darbo eksperimentiniai tyrimai. Įmonės gaminamuose įrenginiuose naudojami rotaciniai šilumokaičiai kartu su oras – oras šilumos siurbliais, efektyvesniam šilumos atgavimui ir oro kondicionavimui vėdinimo metu.

Kadangi šie įrenginiai yra naujovė, atsirado noras suprasti tokių vėdinimo įrenginių darbo principus ir režimus realiomis sąlygomis. Įrenginyje esantį šilumos siurblių stacionariomis sąlygomis apskaičiuoti nėra sunku, kaip ir nustatyti jo efektyvumą, tačiau tai neatspindės tikrojo šio įrenginio darbo. Atliekant eksperimentinius tyrimus būtų nustatyti įvairūs reiškiniai, lemiantys įrenginio efektyvumą ir naudingumą (šių žodžių reikšmės skiriasi). Nustatomos probleminės įrenginio vietos, kurioms reikalingas tobulinimas, siekiant pagerinti įrenginio darbo režimus, efektyvumą ir naudingumą. Taip pat suformuojami įgūdžiai šilumos siurblių projektavimo, ruošimo eksploatacijai ir tyrimo srityse.

1. DARBO PROBLEMATIKA

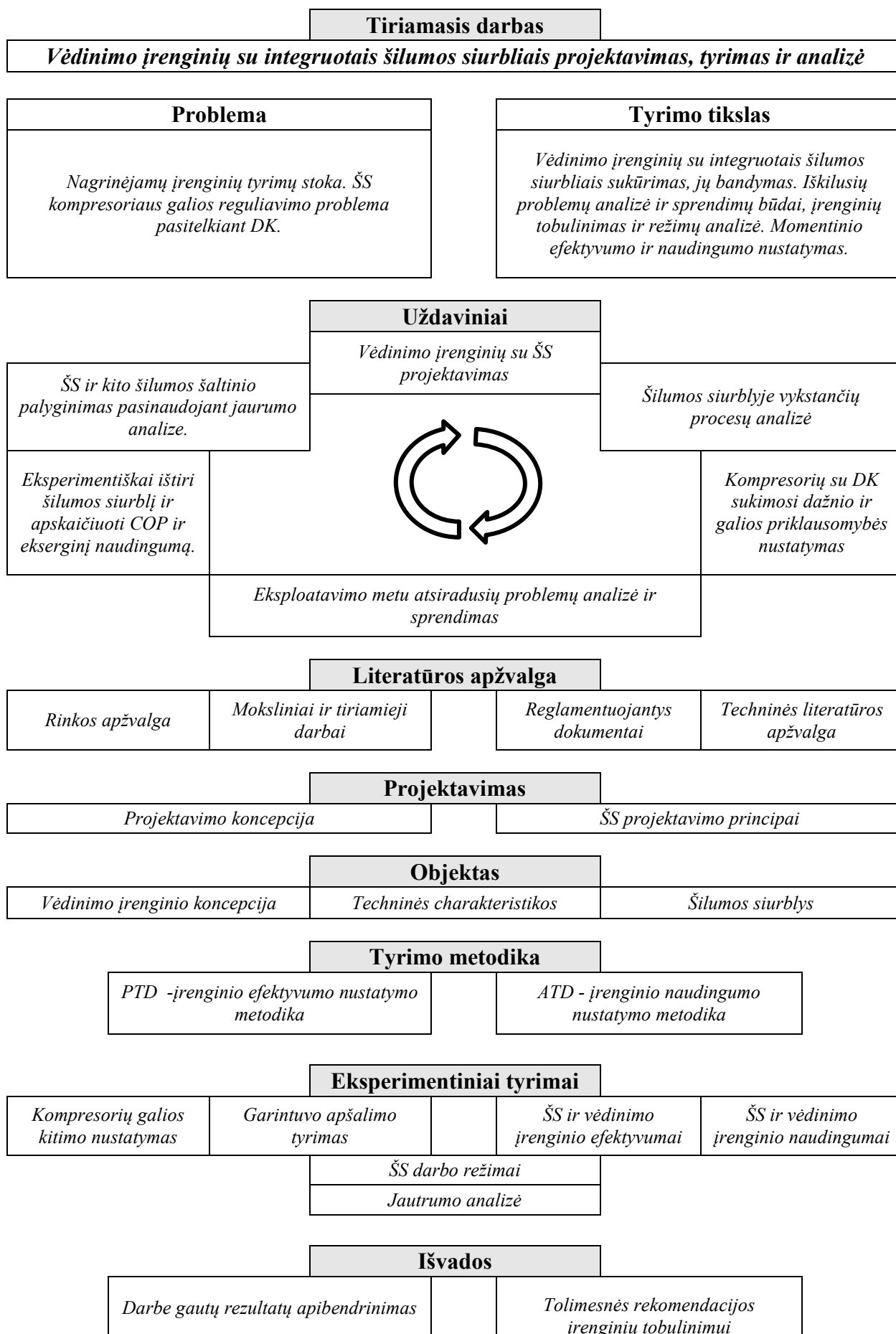
Vėdinimo įrenginiai su integruotais oras – oras šilumos siurbliais yra nauja koncepcija. Įrenginiuose integruotas šilumos siurblys leidžia atgauti energiją iš šalinamo oro ir ją perduoti tiekiamam orui arba atlikti atvirkštinį procesą. Tačiau kintamoms vidaus ir lauko klimato sąlygoms turi būti pritaikytas šilumos siurblio galios reguliavimas. Šiuo metu yra siūlomi įvairių tipų ir konstrukcijų kompresoriai – kintamo sukimosi greičio, su karštu dujų apėjimu ir t.t. Tačiau jų pritaikymas vėdinimo įrenginyje yra sudėtingas uždavinys. Reikalinga tiksli temperatūros kontrolė plačiame galios intervale. Rinkoje vyrauja mažesnės (iki 8kW) šaldymo galios arba galingesni (nuo 40kW) kompresoriai kurie leidžia atlikti galios reguliavimą plačiame diapazone (25-100%). Tačiau nagrinėjamuose įrenginiuose naudojami vidutinės galios kompresoriai, kurie nepatenka į minėtuosius intervalus. Galima koncepcija kuomet paprasti (ON/OFF) kompresoriai naudojami kartu su dažnio keitikliais galios reguliavimui, tačiau tokia koncepcija nėra plačiai išnagrinėta. Neaiški galios ir sukimosi dažnio priklausomybė, bei problemos kylančios tokios koncepcijos įgyvendinimo metu.

Apskritai nėra gausu informacijos apie tokiuose įrenginiuose vykstančius procesus, kylančias problemas jų projektavimo, gamybos ir eksploatavimo metu. Mažai ištirti tokio įrenginio efektyvumai, efektyvumo kitimas keičiantis tam tikriems parametrams. Neaiškus šilumos siurblio panaudojimo efektyvumas ir naudingumas lyginant su kitais šilumos šaltiniais integruotais vėdinimo įrenginiuose.

2. TIKSLAS IR KELIAMI UŽDAVINIAI

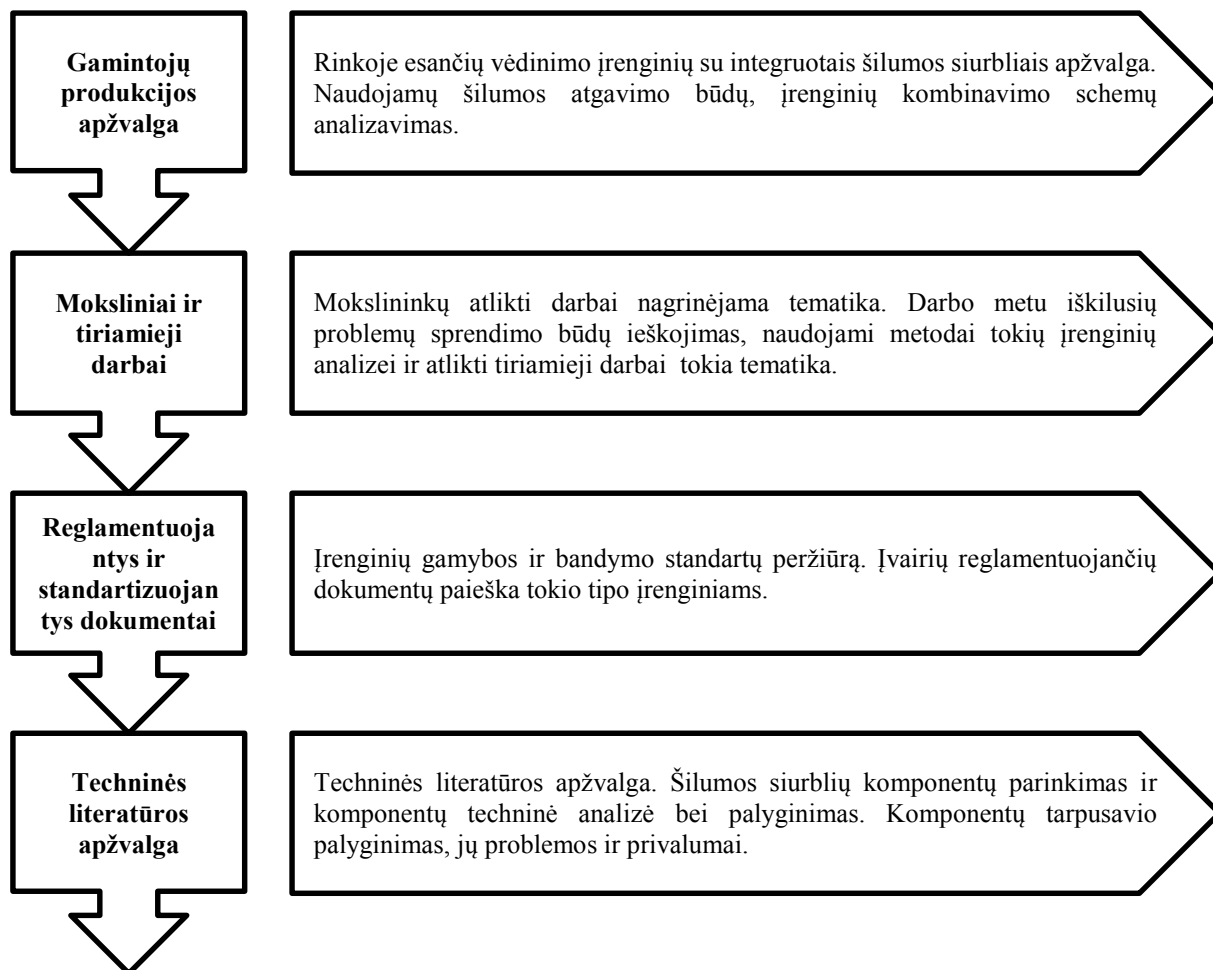
Darbas atliekamas siekiant sukurti, suprojektuoti ir ištirti vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais šilumogražos efektyvumą ir labiau įsigilinti į termodinaminius procesus vykstančius šilumos siurblyje, atliekant eksperimentinius bandymus. Nustatyti vėdinimo įrenginių ir šilumos siurblių termodinaminį efektyvumą ir juos lemiančius veiksnius, taip pat – juos suprasti. Iš eksperimentinių duomenų rasti momentinį šilumos siurblio energijos transformacijos koeficientą ir bendrąjį ekserginį efektyvumą. Atlikti įrenginių detalią analizę taikant ekserginės analizės metodą. Apžvelgti šilumos siurblio darbo režimus įvairiomis sąlygomis. Pateikti galimas rekomendacijas įrenginių tobulinimui ir tolimesniam vystymui, atsižvelgiant į gautus rezultatus ir jautrumo analizės išvadas. Suformuoti įgūdžius reikalingus tokių įrenginių projektavimui, tyrimui ir analizei.

Darbo schema



3. LITERATŪROS APŽVALGA

Literatūros apžvalgos tikslas išanalizuoti esamą padėtį su darbo tema susijusiais objektais, peržvelgti naudojamus metodus tokio tipo įrenginiams analizuoti, reglamentuojančius dokumentus, vyraujančius įrenginius rinkoje. Kadangi šiame darbe yra atliekamas įrenginio kūrimas, projektavimas ir analizė, literatūros apžvalga išskaidoma į kelias kategorijas (1 pav.).



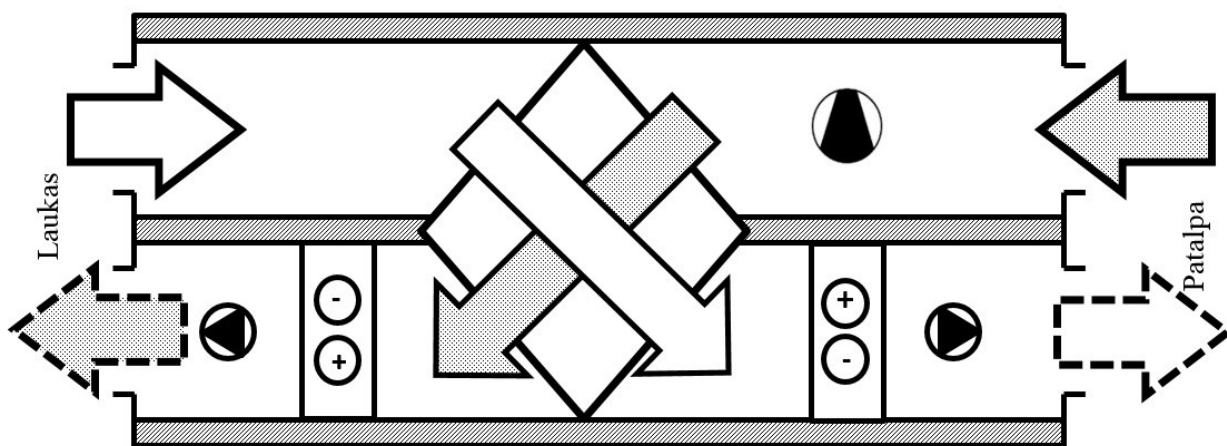
1 pav. Literatūros apžvalgos etapai¹

Didžiausias dėmesys skiriamas mokslinių darbų ir techninės literatūros apžvalgoms, kadangi tai padėjo ieškant sprendimų įrenginio kūrimui ir iškilusių problemų sprendimui. Atliekant apžvalgą nebuvo rasta daug tiriamųjų darbų šia tematika. Nesunkiai galima nuspėti šių tyrimų trūkumo priežastį – tai gana nauja koncepcija ir tik dabar pradedantis skintis kelią į rinką. Tas pats galioja ir reglamentuojančių dokumentų apžvalgai. Yra atskiri norminiai dokumentai vėdinimo įrenginiui ir šilumos siurbliui, tačiau vėdinimo įrenginio ir šilumos siurblio kombinacijai reglamentuojančių ir standartizuojančių dokumentų nebuvo rasta.

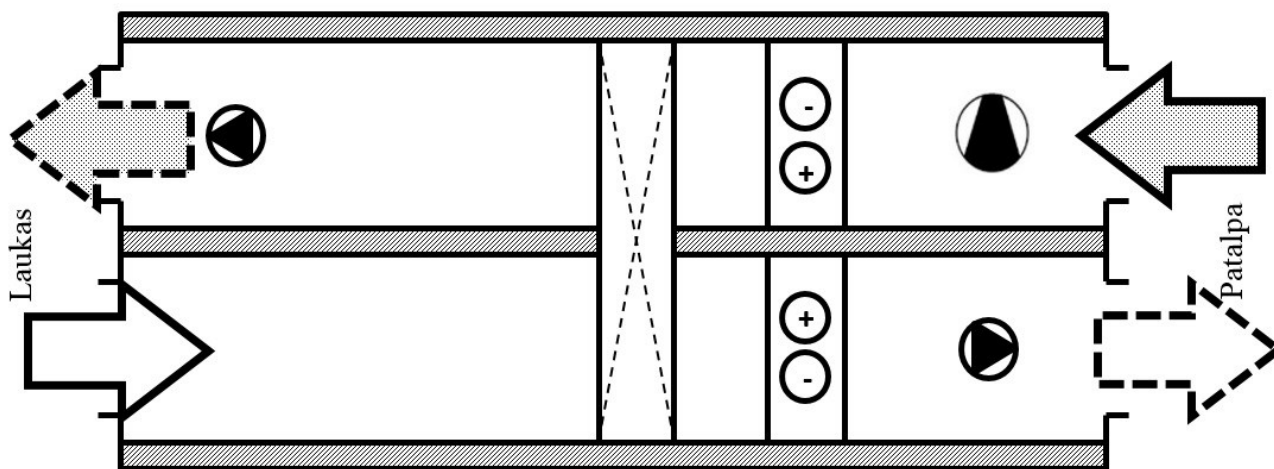
¹ Grafinė medžiaga, prie kurios nėra nurodytas šaltinis, yra darbo autoriaus.

3.1. Padėtis rinkoje

Atliekant literatūros apžvalgą buvo domėtasi ir kitais gamintojais, kurie gamina vėdinimo įrenginius su integruotais šilumos siurbliais, išnagrinėti šių įrenginių darbo principai ir skirtumai. Šis literatūros apžvalgos žingsnis svarbus todėl, kad projektuojant ir gaminant įrenginius svarbu neatsilikti nuo konkurentų, taip pat reikia pasiūlyti kuo patrauklesnį produktą ir žinoti, kodėl jis geresnis už daugumą šiuo metu vyraujančių rinkoje. Atlikus šios dalies apžvalgą būtų galima pasakyti tai, kad dauguma gamintojų šilumos siurblius montuoja kartu su plokšteliniais šilumokaičiais, juos naudodami kaip pirminį šilumogražos įreginį, o šilumos siurblių – kaip antrinį (2 pav.). Siekiant paaiškinti tokią technologiją, galima pasakyti, kad plokšteliniai šilumokaičiai yra mažiau efektyvesni nei rotaciniai, skirtumas siekia apie 10-20 % ^[15]. Tokiu atveju išmetamo oro temperatūros po plokštelinio šilumokaičio yra aukštesnės. Taigi taikant tokią schemą šilumos siurblio efektyvumas yra didesnis, kadangi jis gali atgauti didesnę energijos dalį, tačiau tam reikalinga kompresoriaus šaldymo galia taip pat išauga vidutiniškai apie 25 % (preliminariais skaičiavimais).



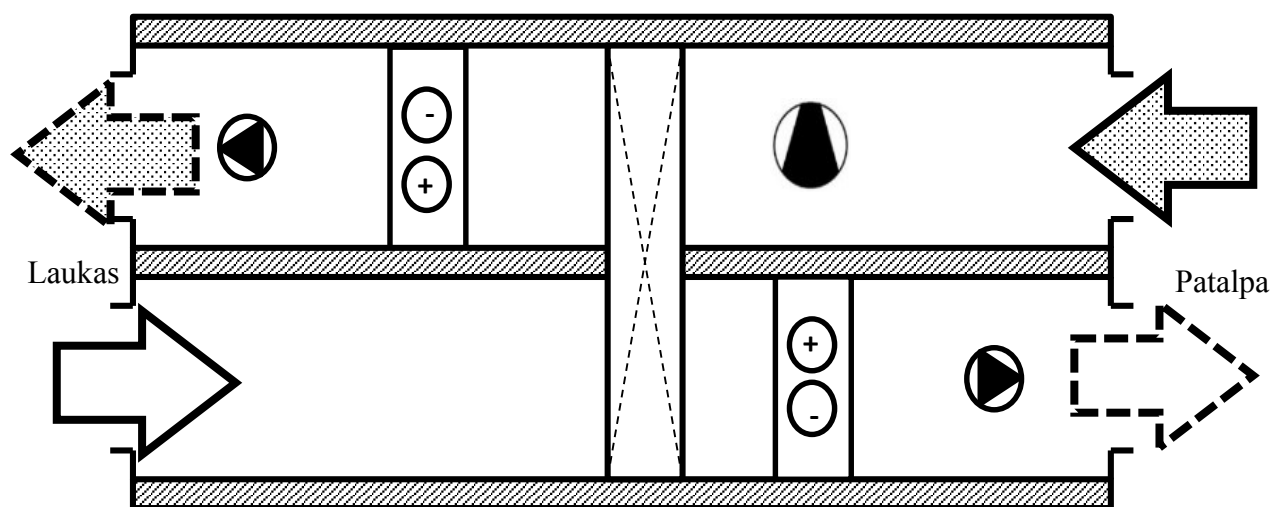
2 pav. Vėdinimo įrenginys su integruotu ŠS ir plokšteliniu šilumokaičiu



3 pav. Vėdinimo įrenginys su RŠ ir ŠS, kai ŠS naudojamas kaip pirminis energijos atgavimo įrenginys

Kitas skirtumas yra šilumos siurblio eiliškumas šilumogrąžos darbo principu. Čia pastebėtas skirtumas, kad nemažai kitų gamintojų (pvz. „Systemair“, „Novema“ ir t.t.) naudoja šilumos siurblių kaip pirminį, o rotacinį šilumokaitį – kaip antrinį šilumogrąžos įrenginį (3 pav.).

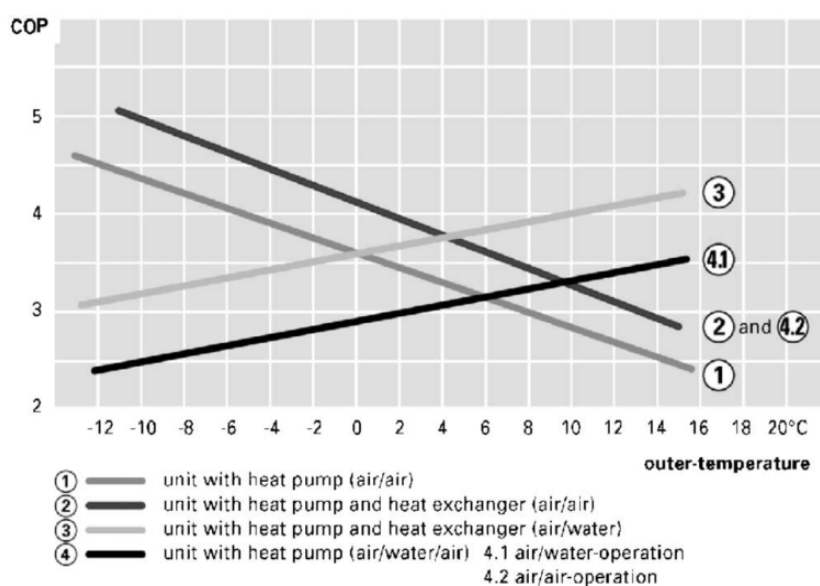
Siekiant paaiškinti UAB „Amalva“ strategiją naudoti rotacinį šilumokaitį kaip pirminį, o šilumos siurblių kaip antrinį šilumogrąžos įrenginį (4 pav.), galima pasakyti, kad šilumos siurblys yra brangus įrenginys. Tai ženkliai padidina investicijas į gaminamą įrenginį, o vartotojui – išlaidas įrenginio pirkimui ir eksploatacijai. Todėl naudojant brangų įrenginį, jis turėtų atgauti ne „lengvai“ pasiekiamą šilumą, o galutinę, kuri yra brangiausia (termodinamiškai) ir kurią susigražinti yra techniškai sudėtingiausia. Panagrinėjus įrenginius įdėmiau ir atlikus tam tikrus preliminarinius skaičiavimus buvo nustatyta, kad naudojant kitų gamintojų siūlomą darbo principą šilumos siurblio sistemoje yra atsikratoma vienos didžiausių problemų, su kuria teko susidurti ir šio darbo metu t.y. garintuvo apšalimo, šilumos atgavimo metu, šaltuoju metų laikotarpiu. Naudojant šilumos siurblių kaip pirminį šilumos atgavimo įrenginį į garintuvą, esant net labai žemai lauko oro temperatūrai (pvz. $\text{minus } 25^{\circ}\text{C}$) patenka teigiamos temperatūros oras (tiesiai iš patalpų šalinamas oras, 3 pav.). Taip turėtų būti padidinamas sezoninis šilumos siurblio ir viso įrenginio šilumogrąžos efektyvumas bei sumažinama šilumos siurblio galia šaltuoju metų laikotarpiu. Nagrinėjant šiltąjį metų laikotarpį pastebėta, kad tokia schema nėra efektyvi. Rotacinis šilumokaitis negali būti naudojamas kaip vėsos atgavimo įrenginys, o naudojant šilumos siurblių vėsinimas galimas tik esant ne aukštesnei nei 27°C (preliminariais apskaičiavimais) lauko oro temperatūrai. Tačiau minėtas būdas yra daug paprastesnis gamintojui: išleidžiama mažiau lėšų pačio įrenginio išleidimui į rinką, taip pat gali būti deklaruojamas aukštesnis šilumos siurblio efektyvumo koeficientas. Šios priežastys gali daryti didelę įtaką vartotojo pasirinkimui tarp dviejų iš pirmo žvilgsnio vienodų, tačiau, išanalizavus, visiškai skirtingų įrenginių.



4 pav. Vėdinimo įrenginys su RŠ ir ŠS

3.2. Moksliniai ir tiriamieji darbai

Kitas literatūros apžvalgos etapas buvo mokslinių, tiriamųjų ir magistrinių darbų apžvalga konferenciniuose leidiniuose bei duomenų bazėse. Buvo apžvelgti darbai vienoje populiariausioje „Science Direct“ duomenų bazėje, patentų bazės ir kiti literatūros šaltiniai, kurie atitinka tyrimo tematiką. Iš atliktų magistrinių darbų apžvalgos, galima išskirti tik vieną darbą ^[39] iš kurio buvo pasisemta pora idėjų šio darbo atlikimui. Vis dėlto, atlikus mokslinių straipsnių apžvalgą, pasigendama šios srities tyrimų. Daugumoje darbų, kurie nagrinėja vėdinimo įrenginius su integruotais šilumos siurbliais, buvo nagrinėjamos kitos schemas, kuriose atgauta šiluma naudojama karšto vandens ruošimui akumuliacinėse talpose. Tokie įrenginiai dažniausiai skirti buitinėms reikmėms. Rasti keli darbai, kuriuose atliekami eksperimentiniai tyrimai kuriant ir tobulinant nagrinėjamo principo vėdinimo įrenginius. Viena iš tokių darbų yra ^[28] atliekamas eksperimentinis tyrimas naudojant vėdinimo įrenginyje sumontuotą orinį šilumos siurbį kartu su plokšteline šilumokaičiu. Jų tyrimo metu buvo nustatyta šilumos siurblio šildymo efektyvumo koeficiento (COP) priklausomybė nuo tiekiamo ir šalinamo oro temperatūros. Taip pat, prie tokio tipo straipsnių būtų galima priskirti darbą ^[9] kuriame buvo keičiama ne šilumos siurblio schema efektyvesniam darbui, o vėdinimo įrenginio konstrukcija, keičiant oro tekėjimo kryptį bei darant „bypass“ funkciją, kuri leidžia atlikti laisvą vėsinimą. Svarbus etapas įrenginių kūrimo ir vystymo yra kompiuterinis modeliavimas. Jo dėka, galima rasti tam tikras problemas teoriniame lygmenyje. Atliktas, vėdinimo metu šalinamos šilumos atgavimo modeliavimas, panaudojant „EES“ ir „TRNSYS“ kompiuterines programas ^[11]. Darbo metu gauti rezultatai parodė, kad orinio šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje yra daug efektyvesnis ir pigesnis būdas atgauti šilumą, nei panaudojant kitus šilumos siurblių taikymus šildymui.



5 pav. Šilumos atgavimo būdų palyginimas panaudojant ŠS ^[10]

Vokietijos ir Skandinavijos mokslininkai ^[10] savo darbe atlieka įvairių šilumos siurblių būdų panaudojimą šalinamo oro energijai atgauti. Darbo metu nustatytas COP kitimas esant įvairiems šilumos siurblio panaudojimo schemoms, kintant išorės oro temperatūrai (5 pav.). Matome, kad oras – oras šilumos siurbliai praranda efektyvumą kylant lauko oro temperatūrai, o oras – vanduo šilumos siurblių efektyvumas kyla, kylant lauko oro temperatūrai.

Apžvelgus darbus pastebėta, jog mažai tiriamųjų ir eksperimentinių darbų yra atlikta su vėdinimo įrenginiais kuriuose naudojami oras – oras šilumos siurbliai tiesioginiam oro pašildymui. Pagrindiniai darbai atliekami su vėdinimo įrenginiais, kuriuose šiluma atgaunama ir perduodama oras – vanduo šilumos siurblio. Tokia energijos atgavimo schema šiuo metu yra daug populiarnesnė, kadangi tai leidžia sutaupyti išlaidas karšto vandens ruošimui arba šildymui ^[32]. Nagrinėjant literatūrą, sutiktas įdomus darbas ^[5], kuriame nagrinėjama 268 kW šildymo galios šilumos siurblių jėgainė. Kurioje stovi keturi absorbciniai vanduo-vanduo šilumos siurbliai naudojami šalinamo oro energijos atgavimui, tiekiamo oro pašildymui ir patalpų šildymui.

Ekserginis metodas – tai vienas iš analizės metodų, naudojamų šiame darbe. Jis paremtas antruoju termodinamikos dėsniu (*ATD*), taip pat vis plačiau taikomas sistemų nagrinėjimui (kaip vertinimo metodas). Metodo pritaikomumas gali būti panaudotas įvairioms pastato inžinerinėms sistemoms nagrinėti ^[4]. Siekiant nagrinėti realias su oru susijusias sistemas reikia įvertinti ore esančios drėgmės kiekį ir pasirinkti tinkamą atskaitos tašką ^[7,31,33,37]. Viena populiarnesnių ekserginio metodo nagrinėjamų sistemų yra šilumos siurbliai, kadangi tai patogi sistema tokios analizės taikymui. Galima sutikti darbų, kuriuose nagrinėjama visa šilumos siurblio sistema, netgi sudaroma tam tikra metodika tokiam vertinimui ^[14]. Pasitelkiant jau minėtą eksergijos vertinimo metodiką buvo atliktas šilumos siurblio oras-vanduo teorinis modeliavimas ^[13] panaudojant du skirtingus kompresorių valdymo tipus, kurie abu nagrinėjami ir šiame darbe t.y. įsijungimo/išsijungimo kompresorius ir kintamo sukimosi greičio kompresorius. Modeliavimo metu buvo gauta, jog kintamos galios šilumos siurblio ekserginis naudingumas yra 10-20 % didesnis lyginant su pastovios galios. Tačiau modeliavimo metu nebuvo kreipiamas dėmesys į tam tikrus realius faktorius, pavyzdžiui – ore esančios drėgmės kiekis.

Literatūroje plačiai nagrinėjami šilumos siurbliuose vykstantys procesai bei modeliuojamas įvairių šilumos siurblių komponentų darbas ^[27,30]. Tačiau pagrindinė to idėja yra sukurti šilumos siurblio modeliavimo algoritmą, kurių šiuo metu yra gana nemažai ir sekant naujausius mokslinius straipsnius yra pastebima, kad jie yra modifikuojami, paprastinami ir vis labiau tikslesni ^[12]. Nemažai darbų lygina modeliavimo rezultatus su praktiniais matavimais. Kiek pastebėta, šie rezultatai yra gana tikslūs ir nedaug skiriasi nuo praktinių matavimų. Tačiau nemaža dalis visų tų modelių yra paremta empirinėmis formulėmis, kurie yra gauti atliekant panašius eksperimentus. Taip pat plačiai

nagrinėjama šilumos siurblių garintuvų užšalimo problema, modeliuojamos užšalimo įtakos šilumos siurblio darbui, kompresoriaus elgsenos užšalimo ir atitirpinimo metu ^[1,19,22,23,35].

Apibendrinus literatūros apžvalgą galima teigti, kad lietuviškose šaltiniuose nebuvo rasta tokio vėdinimo įrenginio tyrimų ar skaičiavimų. Užsienio leidiniuose taip pat nėra plačiai nagrinėjami tokios tipo įrenginiai. Viena iš priežasčių yra tai, kad tokios schemos taikymas yra inovatyvus ir šilumos siurbLIAI yra brangi technologija ir tik laikui bėgant kainų kritimai leidžia taikyti tokias priemones įvairiose srityse.

3.3. Reglamentuojantys dokumentai

Paskutinis apžvalgos etapas buvo reglamentuojančių dokumentų apžvalga. Buvo ieškomi dokumentai kurie reglamentuotų tokių įrenginių efektyvumo nustatymą. Siekiant nustatyti vėdinimo įrenginio efektyvumą, daugumoje šalių yra naudojami „Eurovent“ standartai. Kuriuose yra reglamentuojama nustatymo tvarka. Lietuvoje, privalomų teisinių reglamentų tokio tipo įrenginių efektyvumui nustatyti nebuvo rasta. Tačiau iš rekomendacinio pobūdžio reglamentų galima būtų paminėti vienintelį „LST EN 14511:2008“ standartą, kurį sudaro 4 dalys. Šiame standarte yra reglamentuojamas šilumos siurblių ir oro kondicionavimo įrenginių sezoninio efektyvumo nustatymas, aprašomi būdai šilumos siurblių galios nustatymui ir nustatymo metodika. Europos komisija yra priėmusi direktyvą, kurioje numatytas oro kondicionierių efektyvumo žymėjimas, tačiau tik iki 12 kW vėsinimo galios ^[40]. Taip pat, nėra aišku ar nagrinėjami vėdinimo įrenginiai su integruotais šilumos siurbLIAIS priklauso tokiai klasifikacijai ar ne, dėl savo konstrukcinių savybių.

Kiekvienas gaminys kuriame yra naudojamos f-dujos privalo būti specialiai ženklinamas, siekiant jį realizuoti Europos Sąjungos teritorijoje. Tokių produktų ženklinimo kriterijai yra nustatyti direktyvoje ^[40].

3.4. Techninės literatūros apžvalga

Šią apžvalgos dalį galima išskaidyti į dvi dalis:

- Šilumogrąžos įrenginių apžvalga;
- Šilumos siurblių pagrindinių komponentų apžvalga.

Šilumogrąža yra reikalinga sumažinti šilumos poreikį dėl vėdinimo metu pašalinamos šilumos iš patalpų. Praktikoje yra naudojami kelių tipų šilumogrąžos įrenginiai:

- Plokšteliniai šilumokaičiai;
- Rotaciniai šilumokaičiai;
- Šilumokaičiai su trapiniu šilumnešiu;
- Šilumos vamzdžiai;
- Šilumos siurbLIAI.

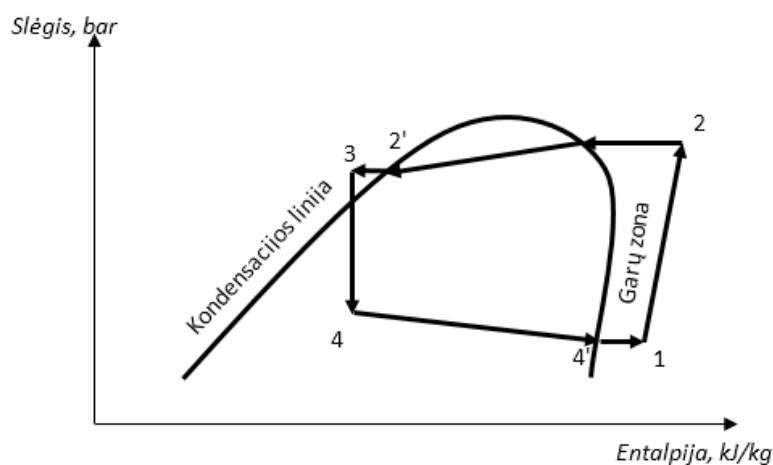
Populiariausi yra plokšteliniai ir rotaciniai šilumokaičiai. Tai yra vieni pigiausių ir efektyviausių būdų šilumai gražinti iš šalinamo oro. Rotacinių šilumokaičių temperatūrinis efektyvumas svyruoja 65-85 % ^[21], o plokštelių 55-75 % ^[21]. Tačiau rotaciniai šilumokaičiai, turi pritaikomumo ribas. Jų negalima naudoti sistemose, kur neleidžiamas srautų maišymasis. Tuo tarpu plokšteliniai šilumokaičiai gali būti naudojami visur, tačiau juos naudojant atsiranda apšalimo tikimybė, tai sumažina tokio tipo šilumokaičių efektyvumą.

Kitas šilumogrąžos tipas yra šilumokaičiai su tarpiniu šilumnešiu. Tačiau šių šilumokaičių efektyvumas yra labai mažas, iki 50 % ^[15]. Taip pat, juose yra judančių dalių, reikalinga papildoma energija (cirkuliaciniam siurbliui). Bet didžiausias privalumas yra tai, kad tiekiamo ir šalinamo oro srautai gali būti ne vienoje vietoje. Šis šilumogrąžos tipas nėra dažnai naudojamas. Dar vienas šilumogrąžos tipas yra šiluminiai vamzdžiai. Juose šiluma yra pernešama žemoje temperatūroje verdančio fluido. Tokio šilumogrąžio efektyvumas yra 45–65 % ^[21].

Šilumos siurbliai - efektyvus šilumos atgavimo būdas iš įvairių šaltinių (grunto, oro, vandens). Orinio šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje leidžia atgauti su oru šalinamą šilumą. Vasarą jį galima naudoti kaip centralizuotą vėsinimo įrenginį.

Šilumos siurblio darbo principas paremtas karno darbo ciklu. Šilumos siurblio veikimo principą sudaro keli termodinaminiai procesai, vykstantys jo viduje (6 pav.):

- Šaltnešio adiabatinis suspaudimas (1-2);
- Šaltnešio kondensacija (2-2');
- Šaltnešio atšaldymas (2'-3);
- Šaltnešio droseliavimas (3-4);
- Šaltnešio išgarinimas (4-4')
- Šaltnešio perkaitinimas (4'-1);



6 pav. Šaldymo ciklo vaizdavimas P-H diagramoje

Siekiant optimalaus kompresoriaus veikimo, reikalingas stabilus ir užtikrintas šaltnešio perkaitinimas (7-10 °C). Kompresorius atlieka darbą (spaudžią šaltnešį), jei iki suspaudimo trakto atkeliaus tik garo pavidalo šaltnešis, jis bus suspaustas ir atliks tolimesnį savo darbą. Tačiau, jei į kompresorių pateks ne visai išgarintas šaltnešis (su skysčio lašeliais), patekęs į kompresorių mechaniškai jį sugadins.

Perkaitinimas yra atliekamas garintuve, perkaitinimą reguliuoja ir užtikrina išsiplėtimo vožtuvas. Jis, pagal išeinančių iš garintuvo dujų temperatūrą, valdo šaltnešio debitą patenkantį į garintuvą. Esant didesniam, nei nustatytas perkaitinimas, išsiplėtimo vožtuvas didina įeinantį šaltnešio srauto kiekį, o esant per mažam – mažina. Šaldymo agento atšaldymas reikalingas efektyvesniam šilumos siurblio darbui. Pagrindinė jo priežastis yra geras išsiplėtimo vožtuvo veikimas. Peršaldymas užtikrina, kad po kondenserio į išsiplėtimo vožtuvą pateks tik skysčio pavidalo šaltnešis.

Dėl šaltnešio trinties į vamzdelius, išsišakojimų ir kitų veiksnių atsiranda hidrauliniai, o dėl šilumos laidumo per vamzdelius – terminiai nuostoliai. Projektuojant sistemą, parenkant sistemos komponentus yra svarbu žinoti hidraulinius nuostolius svarbiuose sistemos taškuose. Atsiranda papildomi nuostoliai kondensavimosi ir garinimo linijose (2-2' ir 4-4' procesai, 6 pav.). Pagrindinė šių nuostolių atsiradimo priežastis yra šaltnešio tekėjimas per šilumokaičius. Didėjant hidrauliniams nuostoliams garintuve (4-4' procesas, 6 pav.) mažėja garinimo temperatūra, tačiau šiuos nuostolius sistema kompensuoja pasiimdama šilumą iš aplinkos (šiuo atveju oro). Taigi, dalis energijos turi būti suteikta nuostoliams kompensuoti.

3.5. Kompresorių apžvalga

Kompresoriniuose šilumos siurbliuose, oro kondicionieriuose ar šaldymo agregatuose - kompresorius yra pagrindinis komponentas, kurio valdymas ir konstrukcija daro didžiausią įtaką visam mašinos darbui ir efektyvumui. Kompresoriaus dėka šilumos siurbliui yra suteikiamas darbas, kuris yra reikalingas žemesnio potencialo energijai paversti į aukštesnio potencialo energiją.

Šiuo metu galima sutikti kelių skirtingų tipų kompresorius:

- **Rotaciniai** – naudojami šiuolaikiniuose šilumos siurbliuose ir oro kondicionieriuose ypač mažesniuose įrenginiuose iki 8 kW galios. Šiuo metu kintamos elektros srovės kompresorius rinkoje sparčiai keičia nuolatinės srovės (DC) kintamo sukimosi dažnio kompresoriai. Kurių galios reguliavimo diapazonas yra 10-100%.
- **Spiraliniai** – populiariausio tipo kompresoriai, šiuo metu naudojami visuose kompresoriniuose įrenginiuose. Didelės galios diapazonas (5-200 kW) leidžia šiuos kompresorius panaudoti įvairiuose įrenginiuose (šilumos siurbliai, aušintuvės, kondicionieriai, šaldikliai). Didelė rinkos dalis priverstė šių kompresorių gamintojus

juos tobulinti ir šiuo metu jie gali pasiūlyti kompresorius kurių galia gali būti valdoma 10-100 % ribose.

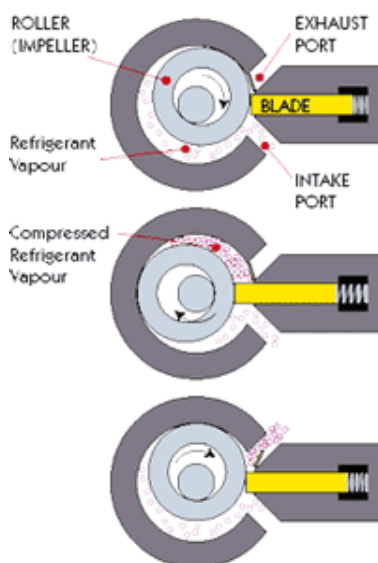
- **Stūmoklinius** – seniausio tipo kompresoriai, kurie vis dar naudojami ir tobulinami. Gaminami nuo pačių mažiausių iki didesnės nei 1 MW galios kompresorių. Dažniausiai naudojami šaldymo agregatuose, tačiau galima sutikti kompresorių, kurie tinkamai naudoti ir šilumos siurbliuose.

- **Sraigtinis** – didelių galių ir gabaritų kompresoriai. Naudojami pramoniniam šaldymui.

Atliekant kompresorių pasirinkimą į projektuojamus šilumos siurblius buvo renkamasi iš dviejų kompresorių tipų - rotacinio ir spiralinio. Likę kompresorių tipai buvo atmesti dėl netinkamų darbo sąlygų, šaldymo agento rūšies, galios reguliavimo nebuvimo, efektyvumo stokos, galios ir gabaritų neatitikimo poreikiui. Todėl toliau patiekiami tik minėtų tipų kompresorių detalesnės apžvalgos.

3.5.1. Rotaciniai kompresoriai

Kompresoriaus darbo principas yra išcentriškas besisukantis ritinys (7 pav.). Kuris sukdamasis liečiasi prie cilindro sienelių ir taip spaudžia šaltnešį tuo pačiu užtikrindamas jo cirkuliaciją.

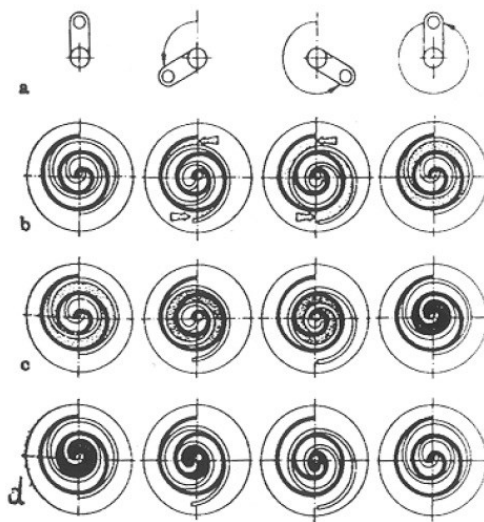


7 pav. Rotacinio kompresoriaus veikimas

Tokio tipo kompresoriai dažnai naudojami kompaktiškuose ir mažų galių įrenginiuose. Ten jie naudojami dėl savo santykinai žemesnės kainos lyginant su kitos rūšies kompresoriais ir aukšto efektyvumo (kompresoriaus COP iki 5,0). Taip pat, šiuo metu šie kompresoriai populiarėja su sąlyginai naujais BLDC (*angl. Brushless direct current*) varikliais, kurie leidžia lanksčiai reguliuoti kompresorių darbą ir yra efektyvesni energijos vartojimo požiūriu. Panaudojus kompresoriui pritaikytą valdiklį, galima kompresoriaus galią reguliuoti 25-100 % ribose, keičiant sukimosi dažnį. Ir tai atlikti yra ekonomiškai nebrangu.

3.5.2. *Spiraliniai kompresoriai*

Darbe nagrinėjamuose įrenginiuose naudojami spiraliniai kompresoriai (8 pav.). Šie kompresoriai yra populiariausi vidutinių dydžių sistemose, dėl savo patikimumo ir efektyvumo.



8 pav. Spiralinio kompresoriaus veikimo taktai [20]

Įtraukiamas išgarintas šaldymo agentas yra suspaudžiamas tarp besitrinančių mentelių, kurios yra spiralės formos. Šaltnešis privalo būti tik garų pavidalo, kadangi, bet kokie skysčio lašeliai patekę į vidų, gali sukelti mechaninius smūgius. Šaltnešio garai yra suspaudžiami ir taip, mechaninio darbo pagalba yra perduodama elektros energija. Diagramoje (6 pav.) šis procesas atitinka taškus (1) ir (2).

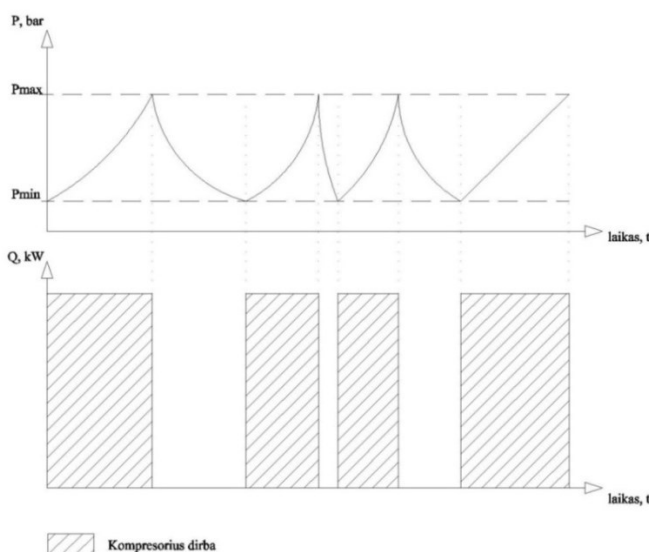
3.5.3. *Kompresorių galios moduliacija*

Svarbus aspektas darantis didelę įtaką ne momentiniam, bet sezoniniam šilumos siurblio efektyvumui yra kompresoriaus galios moduliacija. Šiuo metu yra žinomi šie moduliacijos tipai:

- Paprasti, veikiantys įsijungimo/išsijungimo (*angl. ON/OFF*) režimu, kompresoriai;
- Keli vienodos arba skirtingos galios įsijungimo/išsijungimo kompresoriai sujungti į vieną kontūrą;
- Moduliavimas keičiant kompresoriaus apsisukimų skaičių;
- „Digital“ technologijos kompresoriai;
- Galios valdymas pasitelkiant karštų dujų apėjimo metodą – HGBP (*angl. Hot gas bypass*) .

Pats paprasčiausias, plačiausiai naudojamas ir seniausias valdymo būdas paremtas išsijungimo ir įsijungimo (*ON/OFF*) režimu. Kompresorius veikia, kol sistemos slėgis pakyla iki numatyto didžiausio slėgio P_{max} (9 pav.) arba pasiekiamas kitas užduotas parametras (pvz., temperatūra), tuo metu daviklis perduoda impulsą ir kompresoriaus darbas yra nutraukiamas. Kompresoriaus paleidimas dažniausiai yra uždeliamas ir paleidžiamas tik tada, kai slėgis nukrinta iki P_{min} (arba pasiekiamas kitas užduotas parametras). Tam tikras laiko tarpas tarp pasileidimų reikalingas

kompresoriaus ilgaamžiškumui. Populiariausi spiralinių kompresorių gamintojai rekomenduoja, kad kompresoriaus pasileidimų skaičius neviršytų 10 kartų per valandą ir nebūtų dažnesnis nei 3 minutes. Siekiant pagerinti sistemos sezoninį efektyvumą, tokie kompresoriai dažniausiai jungiami lygiagrečiai iki 3 kompresorių į vieną hidraulinį kontūrą. Ir jų veikimas yra derinamas tarpusavyje, taip kiek galima lanksčiau prisitaikant prie poreikių ir sumažinant išsijunginėjimo dažnumą. Kompresorių skaičius viename hidrauliniam kontūre yra ribojamas dėl tepalo gražinimo problemų. Esant keliems kompresoriams viename hidrauliniam kontūre kyla grėsmė, jog tepalas netolygiai pasiskirstys kiekviename kompresoriuje, dėl skirtingų šaltnešio debitų, hidraulinių pasipriešinimų ar vamzdinių ilgių.

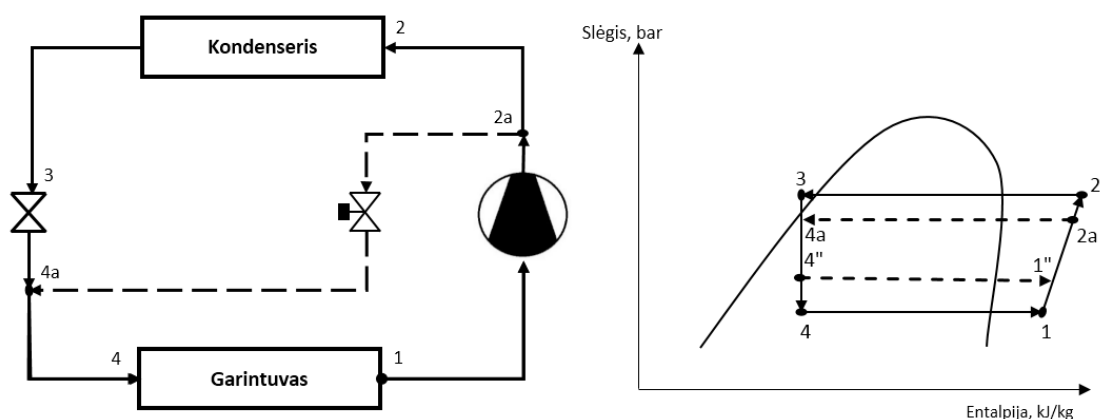


9 pav. ON/OFF kompresoriaus veikimo principas

Siekiant pagerinti valdymo lankstumą ir padidinti šaldymo agregatų galią, buvo sukurti kintamo sukimosi greičio kompresoriai. Reguliavimas vykdomas naudojant dažnių keitiklį arba valdiklį kurio pagalba mažinamas elektrinis dažnis ir taip mažinami kompresoriaus sūkiai. Dėl to mažėja šaltnešio debitas sistemoje ir galia. Toks reguliavimo tipas bus nagrinėjamas šiame darbe tyrimo metu. Pasak gamintojų toks būdas, priklausomai nuo kompresoriaus konstrukcijos, gali leisti galios kitimą 25-100 % ribose. Taip prisitaikant prie energijos poreikio ir palaikant reikalingus parametrus pakankamu tikslumu, taip pat mažinamos kompresoriaus vibracijos ir skleidžiami triukšmai į aplinką. Keičiant elektrinį dažnį patiriami tam tikri elektros energijos nuostoliai (dėl dažnių keitiklio), taip pat nėra visiškai aiškus kompresoriaus galios kitimas. Tokių problemų nagrinėjimas buvo aptiktas kituose darbuose. Nustatyta, kad dažnio keitiklis sumažina COP apie 2-5 %, kai kompresoriaus elektrinė galia yra 1,5-6,5 kW ribose [8]. Šiame darbe nagrinėjamų įrenginių elektrinės galios yra nurodytuose intervaluose. Atlikta ir nemažai tyrimų, kuomet nustatytos priklausomybės ir išvesti empiriniai modeliai kintamo greičio kompresoriams modeliuoti [24,34]. Tokių modelių didžiausias minusas yra tai, kad jie patikrinti, tik su kai kurių gamintojų kompresoriais arba pritaikyti tik tam tikram įrenginiui.

Siekiant tokius modelius pritaikyti naudojamiems kompresoriams reikalingi tam tikri koeficientai, kurie yra kompresorių gamintojų žinioje.

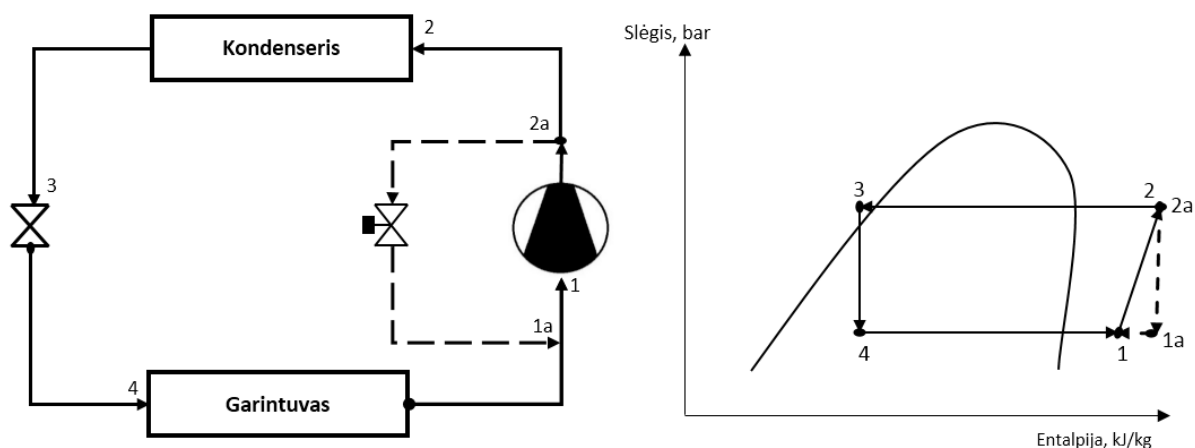
Nesudėtingas ir ekonomiškai pigus galios moduliavimo būdas yra paremtas HGBP (karštų dujų apėjimu) (10 pav.). Veikimo principas paremtas tuo, kad išmetamos karštos dujos iš kompresoriaus yra nuvedamos ne į kondenserį, o apeinant jį, paduodamos į garintuvą arba į kompresoriaus pasiurbimo vamzdyną (11 pav.), priklausomai nuo pasirinktos schemos.



10 pav. HGBP schema (I) ir proceso atvaizdavimas P-H diagramoje

Atsidarius solenoidiniam vožtuvui, dujos iš taško (2a) (10 pav.) patenka į tašką (4a). Kur vyksta srautų susimaišymas. Iš išsiplėtimo vožtuvo atitekėjęs skystis susijungia su karštais garais. Susijungimo metu pakyla išgarinimo slėgis iki taško (4''), dėl sumažėjusio dujų debito per kondenserį, bėgant laikui kondensavimosi slėgis (2-3) susilygina su slėgiu (2a-4a). Šios schemos privalumas yra tai, kad ji gali būti naudojama ne tik galios reguliavimui, bet ir atitirpinimo funkcijai atlikti, kadangi karštos dujos yra įleidžiamos prieš garintuvą, kas leidžia padidinti garintuvo temperatūrą ir atitirpdyti ledą.

Kita plačiai naudojama schema, kuomet karštos dujos iš kompresoriaus išmetimo vamzdžio paduodamos tiesiai į kompresoriaus pasiurbimo vamzdyną (11 pav.). Atsidarius solenoidiniam vožtuvui karštos dujos, iš taško (2a) teka iki taško (1a), susimaišo su perkaitintomis dujomis iš garintuvo. Taip dirbtinai sukeliami išgarinimo temperatūra ir sumažinama reikalinga kompresoriaus galia. Modeliavimo pagalba buvo atliekami įvairių HGBP schemų palyginimai ^[18], gauti rezultatai parodė, kad naudojamoji schema (I) mažina šilumos siurblio COP.



11 pav. HGBP schema (II) ir proceso atvaizdavimas P-H diagramoje

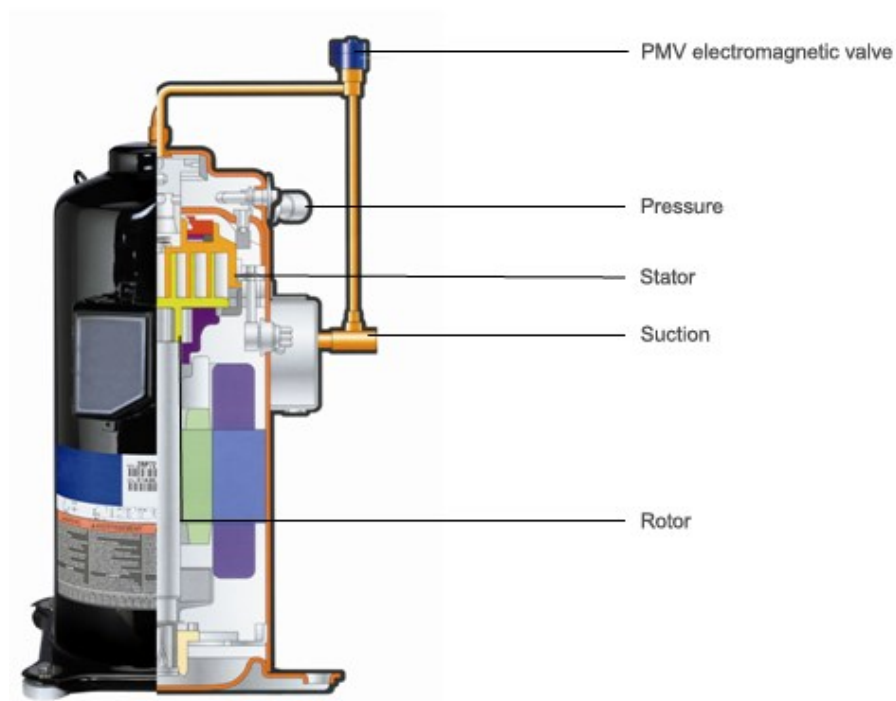
Atlikti eksperimentiniai tyrimai ^[38], kurių metu lygintos kelios HGBP schemos. Iš abiejų, šiame darbe, paminėtų schemų efektyviausia buvo schema (I) (10 pav.), esant mažesniai nei 70 % galios reguliavimui, esant didesniai COP išsilygina. Atlikus ekserginę analizę ^[38] rezultatai parodė, kad schema (I) yra 30 % termodinamiškai naudingesnė lyginant su schema (II).

Paskutinis ir pats naujausias kompresoriaus galios moduliavimas yra „Copeland“ patentuoti „Digital“ kompresoriai. Šiuo atveju yra pakeista pati kompresoriaus konstrukcija (12 pav.). Nurodomas kompresoriaus galios reguliavimas yra 10-100 % ribose. Šio tipo kompresoriai dirba tam tikrais intervalais. Didžiausias tokio darbo intervalas yra 20s. Kompresoriaus galia yra reguliuojama pasitelkus karštų dujų apėjimą (*angl. Hot gas by-pass*) ir naują konstrukciją – besikilnojančias spiralines menteles (didesnės galios kompresoriuose). Kompresoriaus galia reguliuojama mažinant jo darbinio intervalo (20 s) darbo ir nedarbo laiko trukmę (1 lentelė). Kompresoriai yra labai lankstūs galios reguliavimo atžvilgiu.

Kompresoriaus pagrindą sudaro solenoidinis vožtuvas (12 pav.) kuris esant energijos pertekliui atsidaro ir dujos cirkuliuoja ratu, taip mažinant kompresoriaus sukuriamą energiją. Atlikti tyrimai su „Digital“ kompresoriais parodė, kad vidiniai šaldymo bloko parametrai yra labai nepastovūs dirbant šiems kompresoriams, tačiau oro temperatūra reguliuojama net 0,2 °C tikslumu, kas nagrinėjamu atveju užtikrintų komfortinius oro parametrus ^[36]. Atlikti tyrimai su kanaliniiais oro kondicionieriais ^[17], kuriuose naudojami „Digital Scroll“ kompresoriai atskleidė panašias išvadas. Minimi šių kompresorių lankstaus valdymo ypatumai, kas juos daro patraukliais. Tačiau, rastuose darbuose pasigedau detalesnių tyrimų. Niekur nėra minimi elektros galios pasikeitimai atliekant moduliaciją, taip pat kiti svarbūs dalykai, kaip vibracijos, triukšmų padidėjimai ir t.t..

1 lentelė. „Digital“ kompresoriaus darbo ciklai

Eil. Nr.	Darbo trukmė, s	Nedarbo trukmė, s	Galia, %
1	20	0	100
2	18	2	90
3	16	4	80
4	14	6	70
5	12	8	60
6	10	10	50
7	8	12	40
8	6	14	30
9	4	16	20
10	2	18	10



12 pav. „Copeland Digital“ kompresoriaus sudėtis ^[36]

Neigiama šių kompresorių savybė yra kaina. Šie kompresoriai yra apie 35 % brangesni lyginant su paprastais „ON/OFF“ tipo kompresoriais. Jiems reikalingi specialūs valdikliai, kurie dar sudaro apie 30 % kompresoriaus kainos. Taip pat, atsižvelgiant į tai, kad yra toks lankstus galios valdymo diapazonas, reikalingi tikslesni ir brangesni elektroniniai išsiplėtimo vožtuvai (*angl. Electronic expansions valve - EXV*), kurie sugebėtų užtikrinti pastovų perkaitinimą, esant labai nepastoviams darbo režimams ^[36]. Vožtuvai sudaro dar apie 10 % „Digital“ kompresoriaus kainos. Taigi, įvertinus vien preliminarinius ekonominius kaštus, turime apie 75 % brangesnę sistemą lyginant su kitais variantais.

2 lentelė. Galios reguliavimo technologijų santrauka

Eil. Nr.	Valdymo technologija	Privalumai	Trūkumai
1	Paprasti ON/OFF tipo kompresoriai	• Populiarūs, didelis kompresorių pasirinkimas įvairiems šaltnešių tipams; • Nesudėtingi valdymo procesai, nereikalauja daug ir sudėtingų automatikos komponentų; • Galimas galios reguliavimas panaudojant kelis kompresorius viename įrenginyje; • Ekonomiška sistema.	• Kompresoriai dirba pilna galia arba visai nedirba (ON/OFF); • Sunku palaikyti pastovius reikiamus parametrus (temperatūrą tiekiamo oro); • Staigus kompresorių pasileidimas sąlygoja didelę pradinę srovę; • Dažnas kompresorių stabdymas ir paleidimas įtakoja kompresorių ilgaamžiškumą; • Naudojant kelis kompresorius kyla tepimo problemos; • Naudojant kelis kompresorius reikalingas kompresorių veikimo laiko matuoklis, kad naudojami kompresoriai veiktų panašų laiką.
2	HGBP metodas	• Paprastas ir pigus naudoti; • Galimas gana platus valdymo diapazonas; • Galima pakankamai tiksliai reguliuoti reikiamus parametrus arba prisitaikyti prie poreikio; • Pasirinkus teisingą schemą galima panaudoti atitirpinimui.	• Kompresoriaus suteikta energija švaistoma veltui ir neatlieka naudingo darbo; • Mažėja sistemos efektyvumas.
3	Kintamo greičio kompresorių valdymas	• Tikslus pasirinktų parametrų reguliavimas; • Atliekant reguliavimą nedaroma neigiama įtaka efektyvumui; • Sumažėja kompresorių trintis; • Greita reakcija į pasikeitusias sąlygas; • Lėtas paleidimas, užtikrinantis mažą srovę ir sumažinantis hidraulinių smūgių tikimybę; • Didesnis sezoninis efektyvumas.	• Padidėja elektros variklio nuostoliai mažinant apsisukimų greitį; • Galimos tepimo problemos esant mažiems apsisukimams; • Esant dideliame reguliavimo diapazonui galimas blogas mechaninio išsiplėtimo vožtuvo veikimas; • Dėl dažnio keitiklio atsiranda papildomi nuostoliai, mažinantys COP 2-5%.
4	„Digital“ technologijos kompresoriai	• Plačios galios reguliavimo ribos; • Tikslus temperatūros palaikymas; • Greita reakcija į pasikeitusias sąlygas.	• Lyginant su kitomis valdymo technologijomis ekonomiškai brangi; • Reikalinga sudėtinga ir brangi automatika; • Triukšmingai dirba; • Naudojamas HGBP metodas, kuris nepasižymi dideliu efektyvumu; • Nestabilios šaltnešio hidraulinio kontūro darbo sąlygos.

Apibendrintai reikėtų pasakyti, kad dauguma gamintojų naudoja paprastus „ON/OFF“ tipo kompresorius, kurie neužtikrina lankstaus prisitaikymo prie poreikių, greito reagavimo į pasikeitimus, aukštesnio sezoninio efektyvumo kintant poreikiams. Džiugina tai, kad palaipsniui į rinką veržiasi kompresoriai, kurie turi gana didelį galios moduliavimo diapazoną (10-100%). Kas palaipsniui daro oro kondicionierius, šilumos siurblius ir kitus šaldymo įrenginius patrauklesnius vartotojui ir efektyvesnius.

4. ĮRENGINIO PROJEKTAVIMAS

4.1. Projektavimo koncepcija

Projektuojant įrenginius yra atsižvelgiama į tam tikrus norminius dokumentus, o jiems nesant projektavimo ribos yra užsiduodamos žvelgiant į kitus gaminius arba projektuotojui nusistatant tam tikras ribas. Projektavimo tikslas yra teoriškai sukurti įrenginį, kuris kuo efektyviau dirbtų realiomis sąlygomis. Projektuojant reikėtų laikytis kuo naujesnių klimatologinių duomenų bei atsižvelgti į naujesnių – tobulesnių komponentų panaudojimą įrenginiuose. Tai yra vienas iš gero projektavimo bruožų, kitas labai svarbus aspektas yra projektavimo ir projekto vertinimo metodų pasirinkimas.

Tam tikra darbo dalis bus skiriama metodikos nusistatymui ir jos išbandymui. Vėdinimo įrenginiai su šilumos siurbliais yra skirti efektyviam šilumos atgavimui ir oro vėsinimui (šiuo atveju). Taigi, šilumos siurblių galia ir suvartojamos energijos kiekis priklauso nuo:

- Šilumos siurblio galios pasirinkimo;
- Vėdinimo įrenginio našumo;
- Naudojamų papildomų vėsinimo ir šildymo įrenginių galių vėdinimo įrenginyje.

Projektuojami įrenginiai jau turi savo projektinius oro našumus, kuriuos nurodo užsakovai, todėl šiame darbe tai nebus nagrinėjama. Lieka šilumos siurblio ir papildomų aušintuvų/šildytuvų galios nusistatymas. Klimatologiniai duomenys skiriasi kiekviename mieste, jau ką be kalbėti apie šalį, o nagrinėjami įrenginiai bus eksploatuojami tiek šilto, tiek šalto ar vidutinio klimato juostuose. Tačiau žinant tam tikras klimato zonas, kur bus naudojami projektuojami įrenginiai, galima pasirinkti tam tikrus projektinių temperatūrų intervalus ir nusistatyti reikalingas galias.

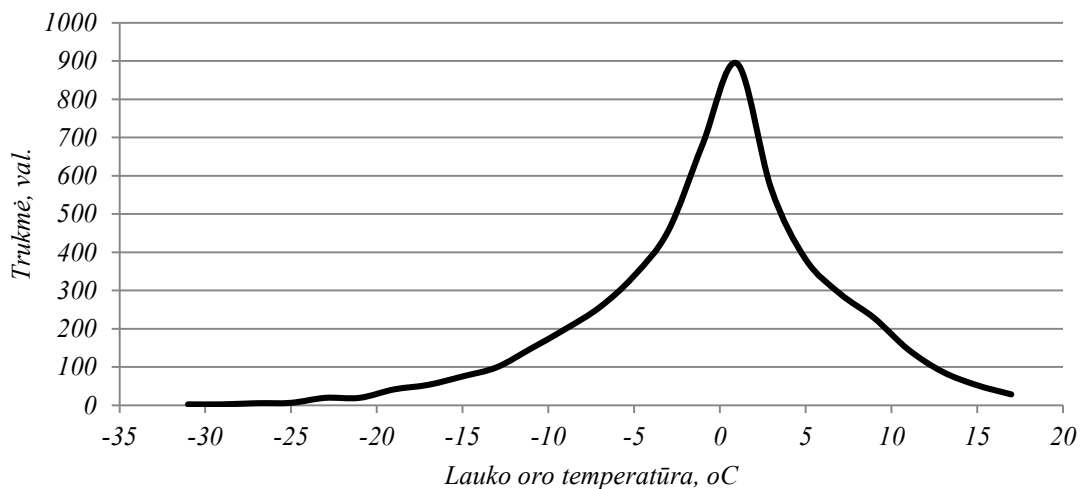
Projektuojant šiuos vėdinimo įrenginius su šilumos siurbliais buvo vadovautasi tokia idėja, kad šaltos klimatinės zonos šalys turi galingas ir geras šildymo sistemas, kurios privalo užtikrinti tinkamus mikroklimato parametrus. O pietinės šalys, kuriose vyrauja aukštos temperatūros, turi geras ir galingas vėsinimo sistemas. Šiaurinėms šalims vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu reikalingas oro vėsinimui ir didžiausiam šilumos kiekiui atgauti. Pietinėms šalims – sušildyti tiekiamą orą nukritus lauko temperatūroms bei pavėsinti atsiradus poreikiui ir taip sumažinti pagrindinių, galingų kondicionierių darbą.

Svarbi problema yra vėdinimo įrenginio šilumos atgavimo prietaisų ir šilumokaičių optimizavimas tarpusavyje. Kadangi įrenginiuose yra naudojami rotaciniai šilumokaičiai, šilumos siurbliai ir dar papildomi šilumos šaltiniai. Siekiant aukščiausio efektyvumo visus šilumokaičius reikia derinti tarpusavyje. Galimi keli variantai:

- Galingas šilumos siurblys veikiantis esant ir labai žemoms temperatūroms;

- Šilumos siurblys parinktas pagal ilgiausiai trunkančias projektines temperatūras (arba artimas joms) ir prie jo derinamas pagalbinis šildytuvas arba aušintuvas skirtas tiekiamą orą paruošti iki komfortinės temperatūros.

Siekiant optimaliau parinkti šildytuvų galias, gali būti naudojamas procesų integracijos metodas [25]. Labai svarbus veiksnys atliekant bet kurios mikroklimato sistemos projektavimą yra lauko oro parametrų pasirinkimas. Bet kurios mikroklimato sistemos paskirtis yra užtikrinti vidaus mikroklimato parametrus, kuriems labai didelę įtaką daro lauko oro parametrai, ypač vėdinimo sistemai. Pasirinkus per daug žemus lauko oro parametrus, galima be reikalo išdidinti ir išbranginti įrenginį, kuris savo pilna galia dirbs tik keliasdešimt valandų per metus.



13 pav. Temperatūrų trukmės grafikas

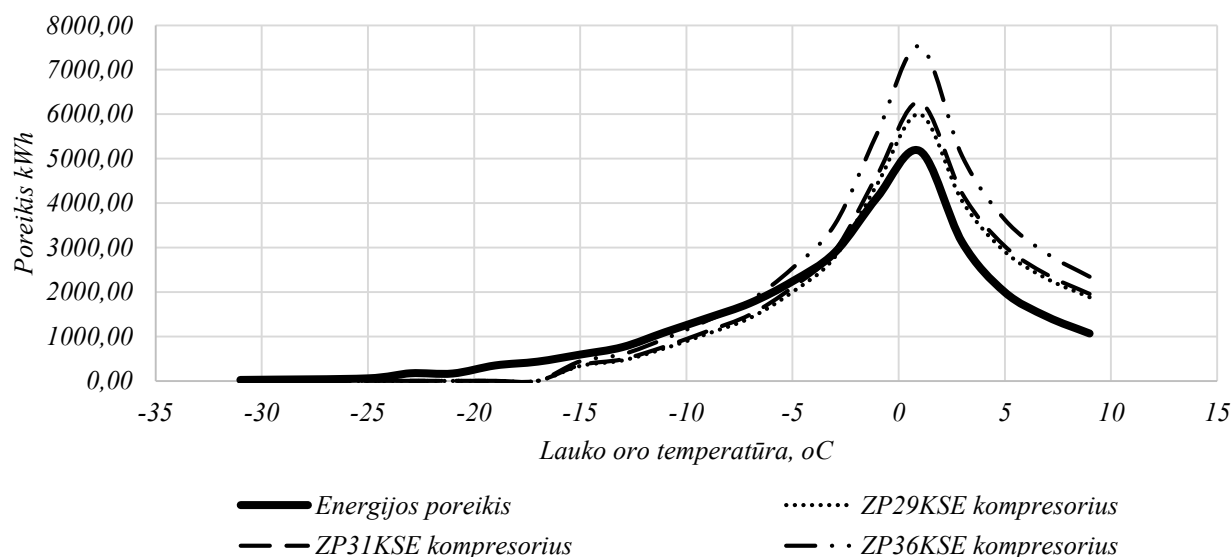
Pagal temperatūrų trukmės grafiką [43] matoma, kad ilgiausiai trunka temperatūros nuo minus 5 °C iki 5 °C (Lietuvoje).

Kad preliminarai parodyti, kaip gali kisti efektyvumas ir kiti parametrai priklausomai nuo pasirinktų lauko oro projektinių temperatūrų tuo pačiu ir šilumos siurblio galios buvo atliekamas paprastas modeliavimas pasitelkiant „Komfovent“ programinę įrangą kartu su „Excel“ programa. „Komfovent Verso“ įrenginių parinkimo programa buvo naudota susirasti oro parametrų vėdinimo įrenginyje. Kiti skaičiavimai buvo atliekami naudojantis „Excel“ programų paketu. Vadovaujantis jau anksčiau parašytu darbu ir naudojantis jau žinoma metodika [3], buvo atlikti skaičiavimai, kaip gali kisti efektyvumas ir naudingumas šildymo sezono bėgyje, keičiant projektavimo temperatūras.

Skaičiavimo metu daromos šios prielaidos:

- Priimama, kad tiekiamo oro temperatūra visada yra vienoda 25 °C;
- Patalpų vidaus temperatūra, visada yra 22 °C;
- Tiekiamo ir šalinamo oro tūriniai debitai yra pastovūs ir lygus $V_{oro}=1500 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Priimama, kad kompresorius visada dirba pilna savo galia, neturi galios reguliavimo, kadangi tikslas išsiaiškinti galios panaudojimo potencialą;

- Pasirenkami keturi projektiniai taškai, $[0; -5; -10; -15\text{ }^{\circ}\text{C}]$;
- Vėdinimo agregato duomenys imami iš „Komfovent Verso“ vėdinimo įrenginių parinkimo programos, kuri yra patikrinta ir sertifikuota „Eurovent“;
- Kadangi nepateikiamos santykinės drėgmės, todėl priimama, kad skaičiavimuose yra naudojamos idealiosios dujos.



14 pav. Energijos suvartojimas skirtingos galios kompresoriuose

Parinkti 3 skirtingų galių spiraliniai kompresoriai. Skaičiavimai buvo atliekami naudojantis gamintojų pateiktomis galių lentelėmis, prie skirtingų kondensacijos ir išgarinimo temperatūrų. Priimta, kad perkaitinimas ir atšaldymas yra pastovus ir atitinkamai yra $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Skaičiavimo patogumui priimu, kad nėra hidraulinių nuostolių šilumos siurblio vamzdyje. Baziniu atveju (14 pav.) yra pateikiami energijos poreikiai reikalingi sušildyti tiekiamą orą iki užsiduotos reikšmės, šiuo atveju tai yra $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vėlesnės kreivės pateikiamos jau su parinktais konkrečiais kompresoriais. Parinkti „Copeland“ ZP serijos kompresoriai: ZP29KSE, ZP31KSE, ZP36KSE. Atitinkamai su skirtingomis galiomis (3 lentelė).

3 lentelė. Kompresorių duomenys

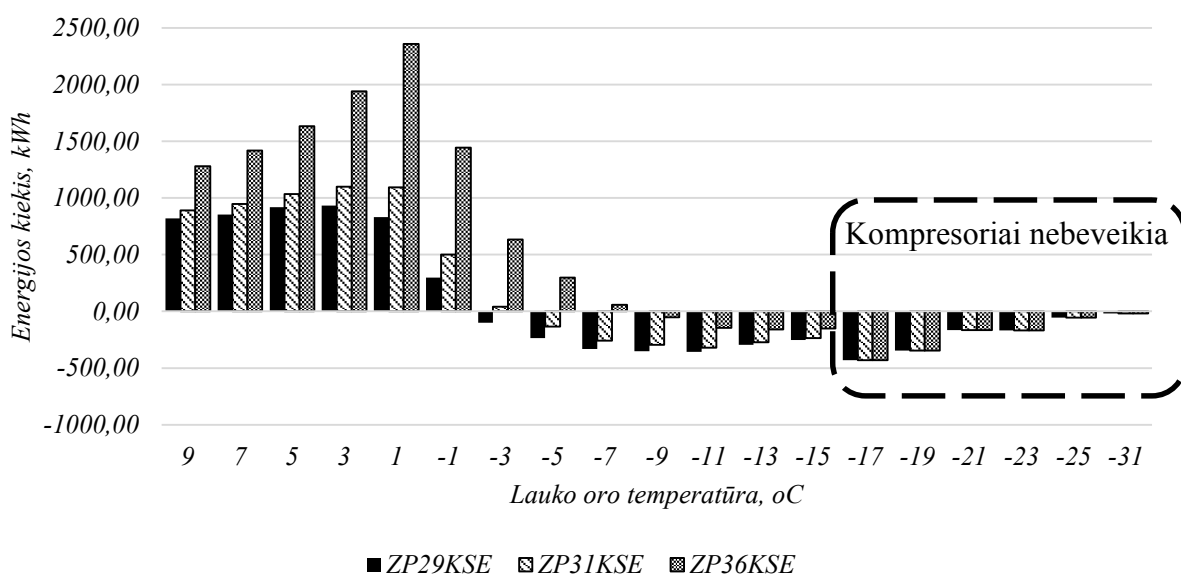
Eil. Nr.	Modelis	Šaldymo galia, kW	Elektrinė galia, kW	Šildymo galia, kW	Šaltnešio debitas, kg/s
1	ZP29KSE	7,17	1,89	8,96	0,0437
2	ZP31KSE	7,49	2,05	9,44	0,0456
3	ZP36KSE	9,11	2,34	11,35	0,0555

*-duomenys pateikiami prie $T_c=45^{\circ}\text{C}$, $T_e=5^{\circ}\text{C}$, $T_{sh}=7^{\circ}\text{C}$, $T_{sc}=5^{\circ}\text{C}$.

Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad nagrinėjamame „Komfovent Verso 10RHp“ įrenginyje yra parinkti ir naudojami ZP31KSE kompresoriai. Atlikus skaičiavimus gauta energijos kitimo

priklausomybė nuo išorės oro temperatūros (14 pav., 15 pav.). Nuo reikalingos energijos poreikio labiausiai nutolsta pats galingiausias ZP36KSE kompresorius, jis yra per galingas šiam įrenginiui. Visi parinkti kompresoriai jau nebesugebės užtikrinti reikiamų oro parametrų, esant neigiamoms temperatūroms. Žinoma, kuo kompresorius galingesnis, tuo ta ribinė temperatūra gali būti žemesnė.

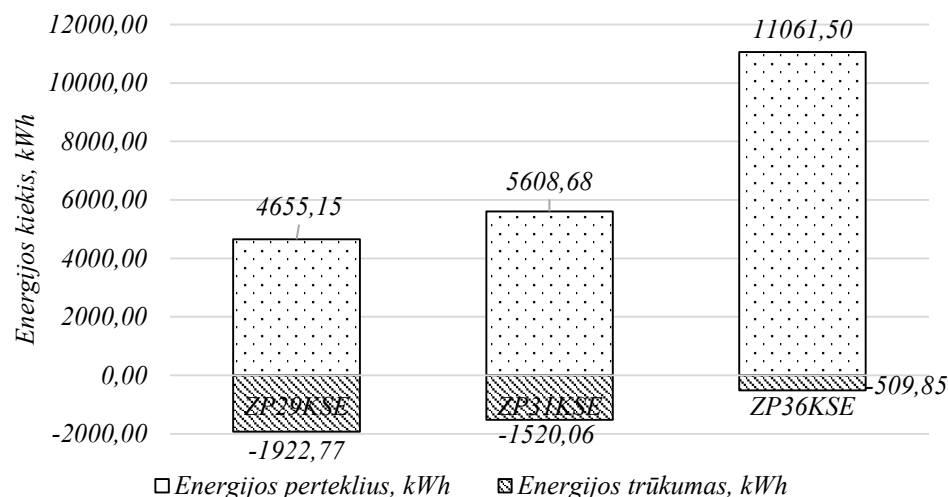
Pasirinkus energijos poreikius kaip bazinę kreivę ir nuo jos pradėjus skaičiavimus, gauname pagamintos energijos perteklių (teigiama reikšmė) arba reikalingos energijos trūkumą (neigiama reikšmė) (15 pav.). Taip žvelgiant į įrenginius, pasimato ribinės žemiausios temperatūros, kurioms esant šilumos siurblys gali užtikrinti projektines tiekiamo oro temperatūras. Silpniausias kompresorius ZP29KSE užtikrins projektinius tiekiamo oro parametrus iki minus 1 °C lauko oro temperatūros, ZP31KSE kompresorius užtikrins tiekiamo oro parametrus iki minus 3 °C, o galingiausias kompresorius ZP36KSE užtikrins tiekiamo oro parametrus iki minus 7 °C. Esant žemesnei nei minus 17 °C lauko oro temperatūrai, visų kompresorių pagaminamas energijos kiekis yra lygus. Taip yra todėl, kad esant šiai ir žemesnėms temperatūroms, kompresoriai pasiekia savo veikimo ribas, kadangi garinimo temperatūra nusileidžia žemiau kritinės temperatūros ir kompresoriai neveiks.



15 pav. Orui perduodamos energijos kiekis

Kuo didesnės galios kompresorius, tuo jis ilgiau gali užtikrinti tiekiamo oro parametrus prie žemesnių temperatūrų, bet yra didesnis energijos perteklius prie aukštesnių temperatūrų. Sugrupavus energijos perteklių ir trūkumą per visą laikotarpį, gauname energijos pasiskirstymo grafiką kiekvienam kompresoriui (16 pav.).

Galingiausias ZP36KSE kompresorius nesugeba užtikrinti energijos poreikio, trūkumas yra mažiausias - 510 kWh. Energijos perteklius yra didžiausias, net 11 MWh per metus.



16 pav. Energijos balansas

Tokį energijos kiekį reikės sutaupyti atliekant kompresoriaus galios moduliaciją. Esant „ON/OFF“ kompresoriams, bus dažnas kompresoriaus išsijunginėjimas, kas reiškia nepastovią tiekiamo oro temperatūrą ir diskomfortą. Norint to išvengti, reikėtų pasirinkti mažesnės galios kompresorius. Silpnesni kompresoriai sukuria mažesnę energijos perteklių, tačiau išauga energijos poreikiai. Ką tokiu atveju reikėtų rinktis, pasirenka pats projektuotojas atsižvelgdamas į konkretų įrenginį, jo valdymą ir galimą panaudojimo potencialą. Įrenginiui buvo pasirinktas ZP31KSE kompresorius, kadangi jis gali užtikrinti tiekiamo oro parametrus esant minus 3 °C lauko oro temperatūrai, padengs didesnę šilumos poreikio dalį. Kadangi bus naudojamas dažnio keitiklis kompresoriaus galios moduliacijai, sumažėja kompresoriaus išsijunginėjimo rizika.

Atliekant įrenginių projektavimą ir kuriant serijinės gamybos produktus, reikėtų vertinti ne tik energijos poreikius ir sezoninį poreikių padengimą, bet ir atlikti detalesnes analizes, kurios padėtų sukurti efektyvesnius ir naudingesnius produktus. Įtraukiant tokias analizes kaip gyvavimo ciklo, eksergijos, o jas abi galima apjungti į energijos analizę, kuri parodytų produkto naudingumą per visą jo gyvavimo laikotarpį, nuo produkto gimimo iki sunaikinimo ir perdirbimo.

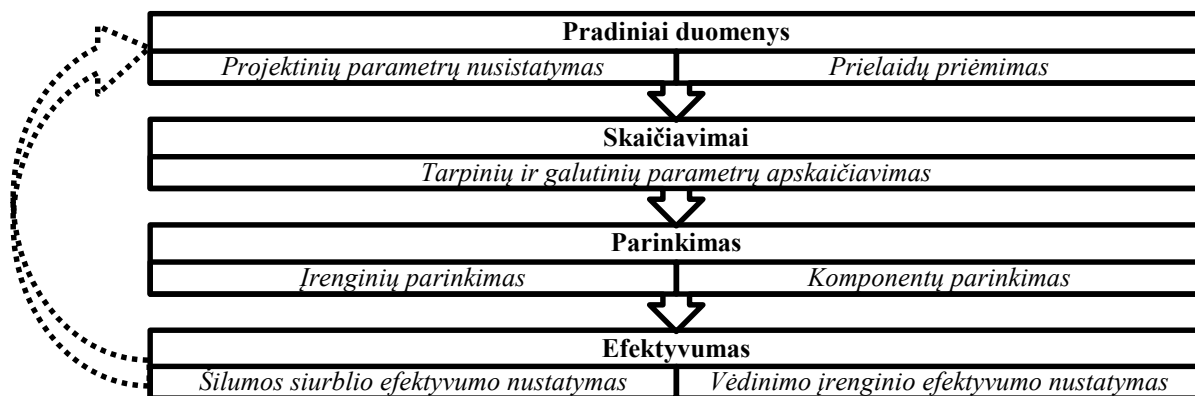
4.1.1. Rezultatų apibendrinimas

Nustatyta, kad :

- parinkus didesnės galios šilumos siurblių energijos poreikio padengimas yra mažesnis, negu padidėjęs energijos perteklius;
- Gaminant tokius įrenginius šilumos siurblių reikia derinti su kitais vėdinimo įrenginyje esančiais šilumokaičiais;
- Reikalingas šilumos siurblio ir vėdinimo įrenginio optimizavimas orientuojant į skirtingas klimatinės zonas.

4.2. Šilumos siurblio projektavimo principai

Darbe nagrinėjami įrenginiai nėra tik tyrimo objektai, bet buvo atliekamas jų projektavimas ir valdymo algoritmo sudarymas, todėl norėtusi aptarti ir tam tikrus projektavimo žingsnius, naudotas priemones projektavime ir priimtas prielaidas. Visą tai atliekant teko perversti nemažai įvairiausios literatūros, mokslinių straipsnių, patentų ir internetinių tinklapių, išsirenkant reikalingą ir teisingą informaciją. Projektavimo eigą (algoritmą) galima suskaidyti į sekančius žingsnius (17 pav.).



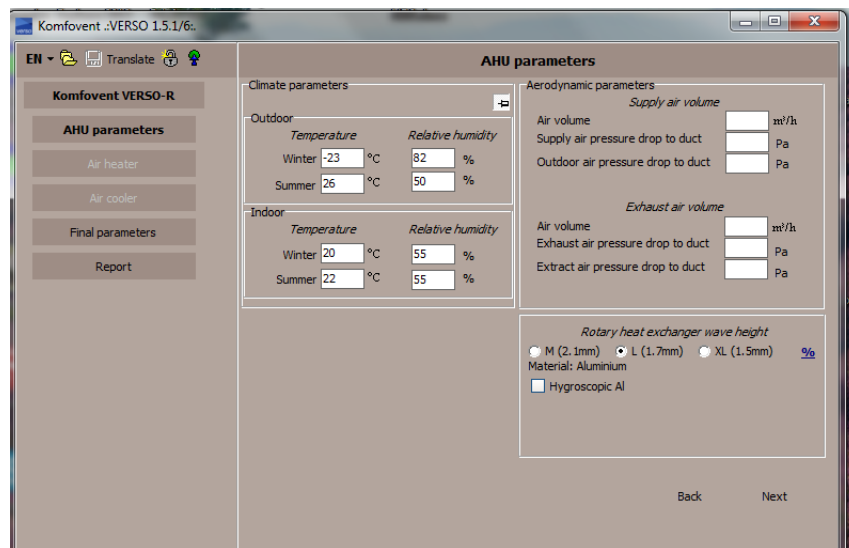
17 pav. Įrenginių projektavimo algoritmas

Pirmasis žingsnis yra nusistatyti projektinius parametrus (17 pav.). Dėl jau prieš tai minėtų per galimų kompresorių parinkimo priežasčių, pasirinktos tokios projektinės sąlygos:

4 lentelė. Projektiniai parametrai

<i>Parametras</i>	<i>Šildymas</i>	<i>Vėsinimas</i>
<i>Lauko oro temperatūra, °C</i>	-5	32
<i>Lauko oro santykinė drėgmė, %</i>	80	50
<i>Patalpų temperatūra, °C</i>	20	22
<i>Patalpų santykinė drėgmė, %</i>	55	50

Oro parametrai po rotacinio šilumokaičio randami jau minėta „Komfovent Verso“ parinkimo programa (18 pav.). Suvedami žinomi oro srautai ir slėgio perkryčiai, taip pat pasirenkamas reikalingo rotacinio šilumokaičio bangos aukštis (pagal efektyvumą). Programa, suvedus reikalingus duomenis, atlieka skaičiavimus ir paruošia jų išklotinę (19 pav.). Gaunami reikalingų taškų oro parametrai, pagal kuriuos jau galima pradėti parinkinėti šilumos siurbį.



18 pav. „Komfovent Verso“ programos duomenų įvedimo langas

VERS0-R-18-L-0-43-0-43-M5-04-X-181-C3
UAB Anasba, Oro g. 10, LT-68200 Vilnius, www.komfovent.com

komfovent
verso

Separate sections with base frame connected to each section

Panels thickness	[mm]	45
Unit weight		
Weight (netto)	[kg]	330
Pallets		
FVS+RO	[mm]	1150x1150 (221kg)
FVS	[mm]	750x1150 (108kg)
Control automatics		
R1X00X-AXXAXX-M01500M01500-XXXXX		
Type		C3
Rotary heat exchanger with frequency converter: RR-AL-800-L-O-S(900x900x290)-PN-A1-T		
Frequency converter: 0,25kW		
Designed for dry conditions		
Diameter:	[mm]	800
Wave height:	[mm]	1,70
Density	[kg/m ³]	1,2

		Heating		Cooling	
		Supply	Exhaust	Supply	Exhaust
Temp. efficiency	[%]	82,3	81,7	81,5	81,7
Humid. efficiency	[%]	40,8	39,9	39,7	39,9
Pressure drop	[Pa]	89	95	96	95
Velocity	[m/s]	1,64	1,76	1,79	1,76

19 pav. „Komfovent Verso“ programos rezultatų išsklotinė

Pagrindiniai šilumos siurblio komponentai pavaizduoti ir išvardinti 21, 22 paveiksluose. Šilumos siurblio komponentų parinkimui būtina žinoti oro parametrus po rotacinio šilumokaičio ir šaltnešio parametrus. Šilumos siurblio komponentų parinkimas vykdomas tokia eiga:

- Reikalingų šildymo ir šaldymo galių nusistatymas;
- Pirminis kompresorių parinkimas pagal reikalingas šildymo ir šaldymo galias;
- Kondenserio ir garintuvo parinkimai ir perskaičiavimai šildymo ir šaldymo režimams;
- Išsiplėtimo vožtuvo ir kitų hidraulinių komponentų parinkimas;
- Hidraulinių nuostolių skaičiavimas;
- Kompresorių galios perskaičiavimas įvertinant hidraulinius nuostolius vamzdynuose;
- Išsiplėtimo vožtuvo perskaičiavimas įvertinant hidraulinius nuostolius vamzdynuose;
- Galutinis šilumos siurblio efektyvumo skaičiavimas prie projektinių sąlygų.

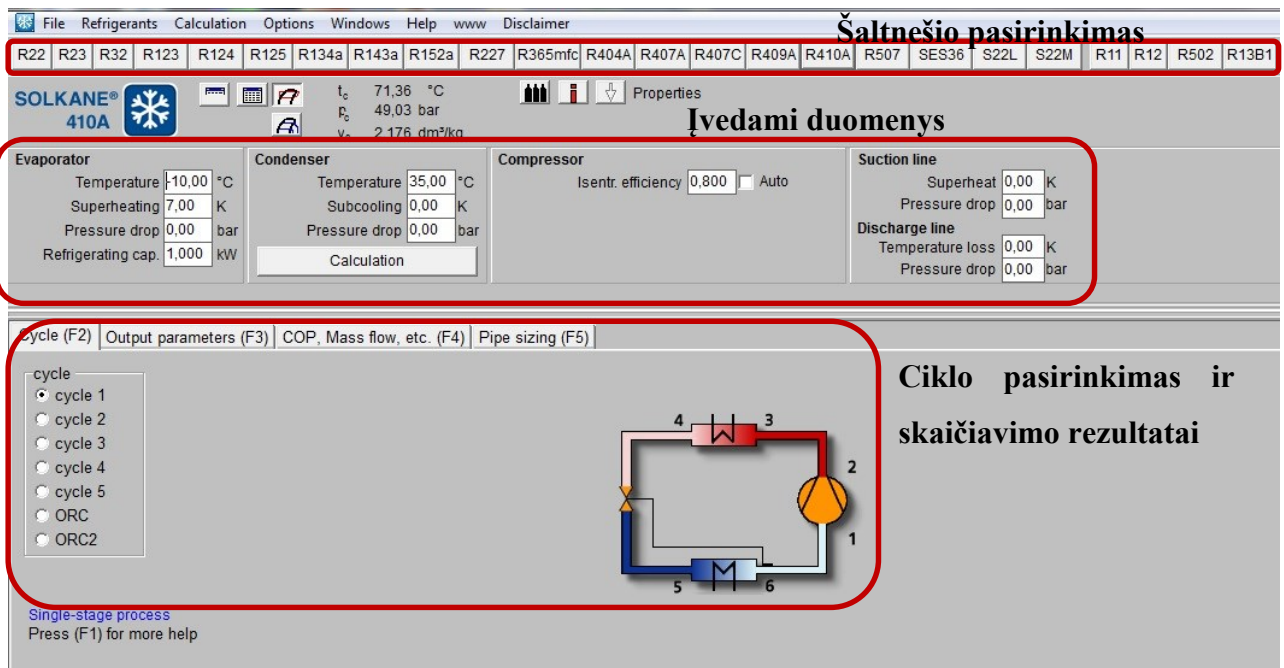
Šilumos siurblio skaičiavimams yra priimamos kondensavimosi ir garavimo temperatūros, pagal šias temperatūras yra parenkamas preliminarus reikalingas šilumos mainų paviršiaus plotas. Parinkimui yra naudojama šilumokaičių gamintojo parinkimo programa „*Amalva Wincoil*“, kurios pagalba yra parenkami garintuvai ir kondensatoriai. Vėliau yra keičiamos kondensavimosi ir garinimo temperatūros iki optimalių, kurios leidžia ergonomiškai išnaudoti šilumokaičių gabaritus ir pasiekiamas didžiausias šilumos siurblio efektyvumas.

Šaltnešio termodinaminėms savybėms apskaičiuoti naudojama „*Solkane 8*“ programa (20 pav.). Programa atlieka viso šaldymo ciklo skaičiavimą su šiuo metu naudojamais šaltnešiais ir šiais įvestais duomenimis:

- Kondenserio galia;
- Kondensavimosi temperatūra;
- Perkaitinimo temperatūra;
- Peršaldymo temperatūra;
- Slėgio nuostoliai kondenseryje;
- Garintuvo galia;
- Garinimo temperatūra;
- Slėgio nuostoliai garintuve;
- Kompresoriaus adiabatinis efektyvumas;
- Slėgio ir temperatūros nuostoliai vamzdynuose.

Suvedus minėtus duomenis programa paskaičiuoja:

- Ciklo efektyvumą (COP);
- Šaltnešio masės debitą;
- Kondenserio, garintuvo ir kompresoriaus galias;
- Hidraulinius nuostolius vamzdynuose.



20 pav. „Solkane“ skaičiavimo programos langas

Anksčiau buvo minėta, kad atliekant projektavimą ir nustatant šilumos siurblio efektyvumą būtina įvertinti slėgio ir temperatūros nuostolius šilumos siurblio sistemoje. Hidrauliniai nuostoliai susideda iš:

- Vietinių nuostolių per įvairius išsišakojamus, skersmens pasikeitimus, lenkimus ir komponentus ;
- Kelio hidrauliniai nuostoliai kurie atsiranda dėl trinties į vamzdžių sienelės.

Vamzdynų parinkimas atliekamas neviršijant greičių linijose [2]:

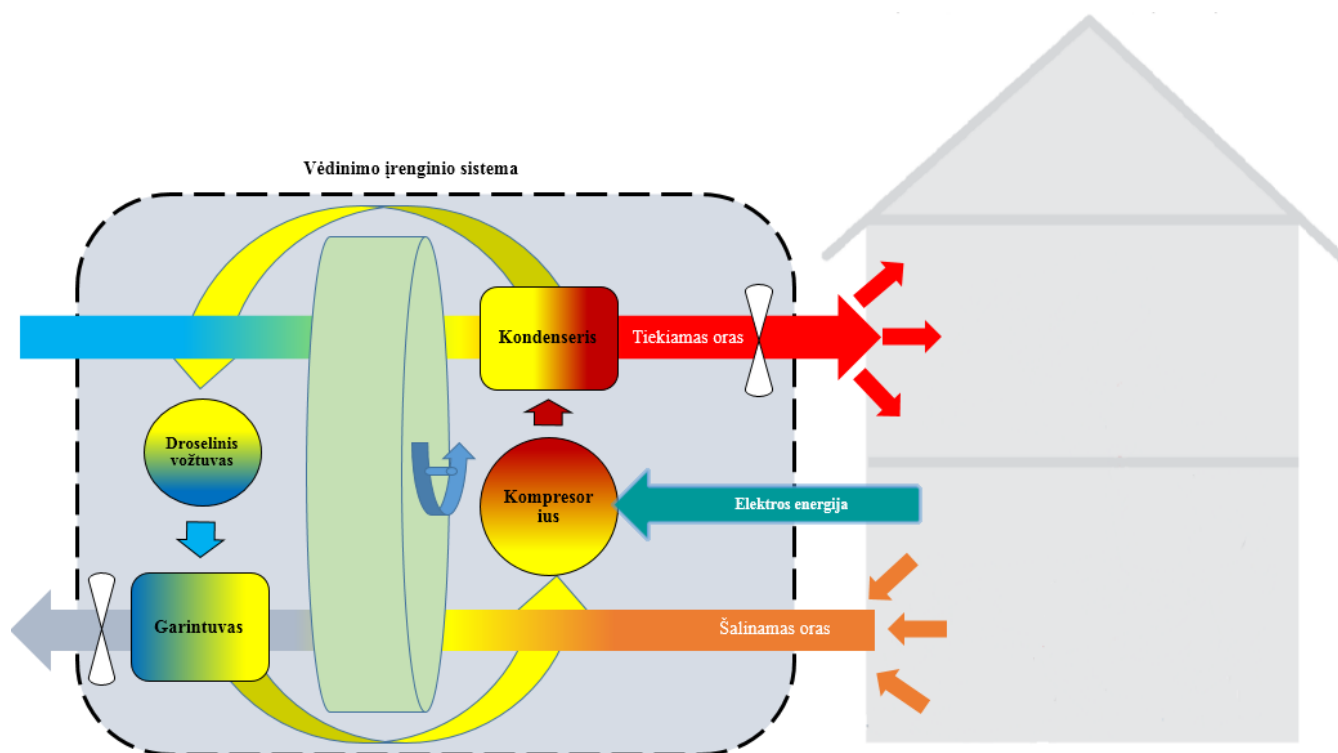
- Skysčio – kondensato linijoje iki 0,5 m/s;
- Skysčio linijoje iki 1,5 m/s;
- Padavimo linijoje (tarp garintuvo ir kompresoriaus) 4,5-20 m/s;
- Išmetimo linijoje (tarp kompresoriaus ir kondenserio) 10-18 m/s;
- Atitirpinimo linijoje 5-10 m/s.

Taip pat, vamzdžių skersmenų parinkimą galima atlikti vadovaujantis temperatūros perkryčiais vamzdynuose, kadangi šaltnešio slėgis ir temperatūra yra priklausomi. Hidraulinis skaičiavimas atliekamas tą pačią „Solkane 8“ programą.

5. TYRIMO OBJEKTAS

5.1. Vėdinimo įrenginio koncepcija

Didėjant reikalavimams energijos vartojimo efektyvumui, vis didesni reikalavimai taikomi pastato mikroklimato užtikrinimo sistemoms. Ne išimtis yra ir vėdinimo sistema, dėl kurios vėdinimo metu yra pašalinama didelė dalis šilumos. Siekiant pagerinti efektyvumą kuriami vėdinimo įrenginiai su rotaciniais šilumokaičiais ir šilumos siurbliais (21 pav.).

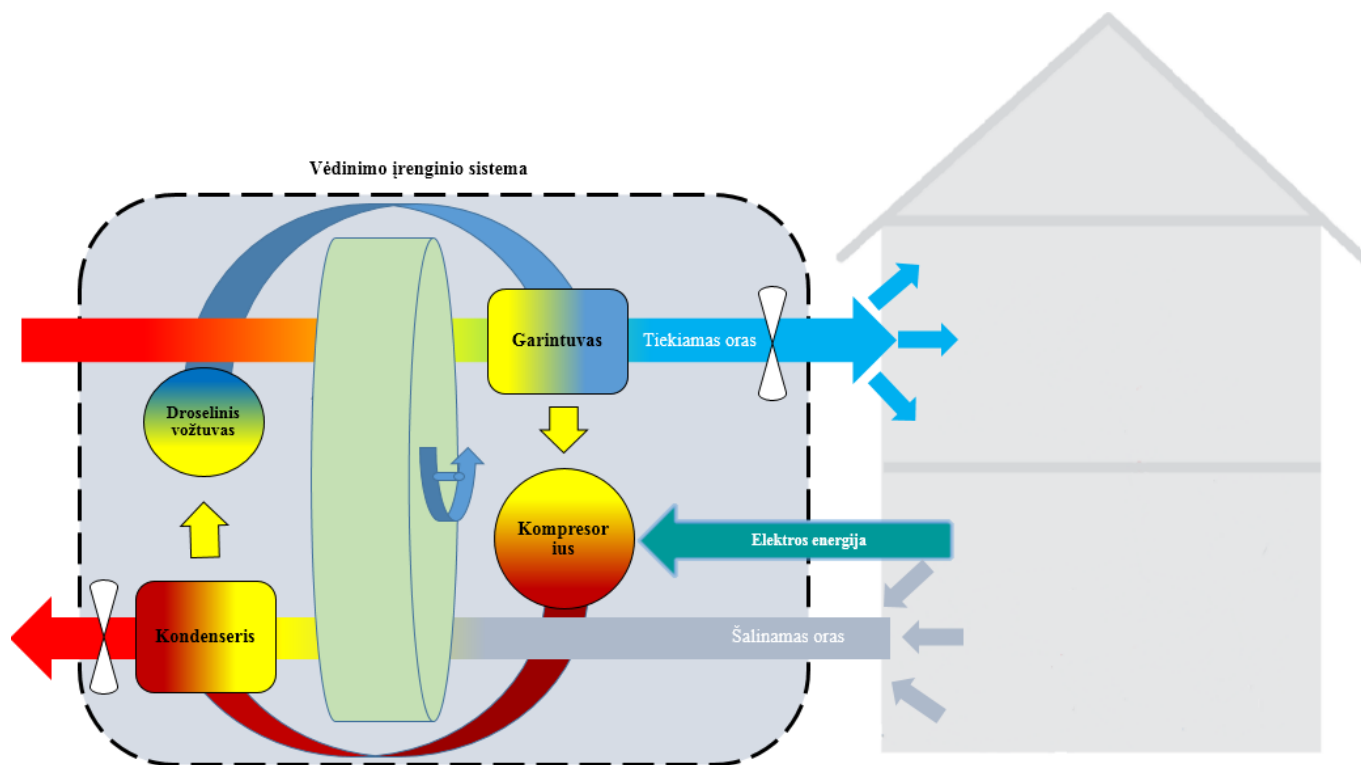


21 pav. Principinė VĮ su ŠS schema šildymo režime

Įrenginyje pagrindinis šilumos atgavimo įtaisas yra rotacinis šilumokaitis, kuris atgauna didžiausią dalį kartu su šalinamu oro pernešamos šilumos. Antrasis šilumogrąžos įtaisas yra oras – oras šilumos siurblys. Kuris atgauna likusią šilumą iš šalinamo oro ir suteikiant papildomą darbą, sukuria aukštesnio potencialo energiją, kuri kondenserio pagalba yra perduodama tiekiamam orui (21 pav.). Taip šilumos siurblys išnaudojamas kaip šildymo įrenginys tiekiamo oro parametrams užtikrinti ir reguliuoti (tam tikrame lauko oro temperatūrų intervale).

Konstruktinės šilumos siurblio savybės leidžia šį įrenginį naudoti kaip centrinį oro kondicionierių šiltuoju metų laiku (22 pav.). Šiuo atveju pirminis įrenginys yra šilumos siurblys, kuris vėsina tiekiamą orą. Jei temperatūrų skirtumas nėra didelis, rotacinis šilumokaitis nėra naudojamas kaip vėsos atgavimo prietaisas. Rotacinio šilumokaičio įjungimas esant aukštesnei lauko oro temperatūrai leidžia sumažinti vėsos poreikį šilumos siurblio atžvilgiu, todėl projektavimo metu nėra parenkamas per didelės galios šilumos siurblys.

Pačio šilumos siurblio darbas yra analogiškas šildymo metu aprašytam, vienintelis skirtumas yra tai, kad ketureigio vožtuvo dėka yra pakeičiama šaltnešio tekėjimo kryptis ir taip apsukamas šilumos siurblio termodinaminis darbo ratas.



22 pav. Principinė VĮ su ŠS schema vėsinimo režime

Šis įrenginys yra universalus mikroklimato parametrų palaikymo ir šilumos atgavimo įrenginys esant skirtingiems lauko klimato parametrams, kurio dėka yra efektyviau išnaudojama energija.

5.2. Vėdinimo įrenginių techninės charakteristikos

Vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais Lietuvoje gamybą pradeda UAB „Amalva“, kurios pagrindinė veikla yra vėdinimo įrenginių ir sistemų komponentų gamyba. Įmonė yra suinteresuota įrenginių efektyvumu ir efektyviu energijos vartojimu pastatuose, todėl pasirinko į rinką išleisti šiuos naujos koncepcijos vėdinimo įrenginius.

UAB „Amalva“ siūlomos šios vėdinimo įrenginių serijos:

- DOMEKT – vėdinimo įrenginiai skirti gyvenamųjų patalpų, kurių bendras plotas yra 40-250 m² (butų, individualių namų, renovuojamų patalpų), vėdinimui. Įrenginiuose naudojami rotaciniai arba dvigubi plokšteliniai šilumogrąžiai.
- KOMPACT – Standartizuotų gaminių serija. Šios gausios serijos įrenginių našumas siekia 400-7000 m³/h. Šilumos atgavimui naudojami rotaciniai arba plokšteliniai šilumogrąžiai.

- VERSO - seriją sudaro 8 dydžių vėdinimo įrenginiai su šilumos atgavimu ir oro tiekimo kameromis. Šių įrenginių našumas objektuose siekia nuo 1 000 iki 26 000 m³/h. Gali būti komplektuojami su rotaciniu šilumokaičiu (*Verso R*) arba su plokšteliu (*Verso P*);
- KLASIK - vėdinimo įrenginiai gaminami pagal individualų užsakymą įvairios paskirties patalpoms vėdinti. Šią seriją sudaro 11 dydžių įrenginiai, kurių našumas yra nuo 1 000 iki 60 000 m³/h. Klientui pageidaujant galimi ir iki 100 000 m³/h našumo įrenginiai.

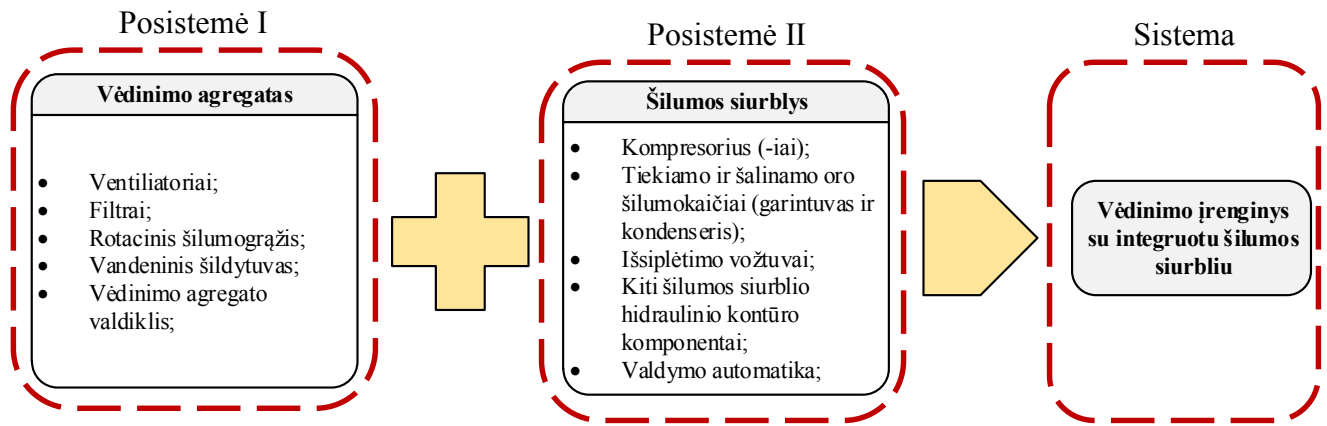
Tyrimui pasirinkta „Verso“ ir „Kompact“ vėdinimo įrenginių serijos gaminiai. Gausiausiai nagrinėjamų vėdinimo įrenginių „Verso“ gamos oro našumai pateikiami 5 lentelėje. Gamoje viso yra 8 įrenginiai su rotaciniais šilumokaičiais, kurių oro našumas svyruoja nuo 1000 iki 20000 m³/h. Taip pat „Kompact Recu 1200“ įrenginio parametrai.

5 lentelė. Vėdinimo įrenginių techninės charakteristikos

<i>Eil. Nr.</i>	<i>Įrenginys</i>	<i>Min oro kiekis, m³/h</i>	<i>Maks. Oro kiekis, m³/h</i>	<i>Vėsinimo galia, kW</i>	<i>Šildymo galia, kW</i>
1	Kompact Recu 1200	400	1200	5	5
2	Verso 10 RHP	1000	3000	7,5	7
3	Verso 20 RHP	2000	4000	9,5	8,5
4	Verso 30 RHP	3000	5000	12,5	12
5	Verso 40 RHP	4000	8000	20	19
6	Verso 50 RHP	6000	11000	30	29
7	Verso 60 RHP	7500	15000	42	39
8	Verso 70 RHP	9000	17000	47	40
9	Verso 80 RHP	14000	20000	54	50

Pateikiamos šildymo galios yra skaičiuojamos prie tiekiamo oro temperatūros 25 °C ir lauko oro temperatūros minus 5 °C. Vėsinimo metu tiekiamo oro temperatūra priimama 17 °C, o lauko oro temperatūra 32 °C.

Šių įrenginių išskirtinumas yra tai, kad kombinuojami vėdinimo įrenginiai su rotaciniais šilumokaičiais ir šilumos siurbliais. Šilumos siurblys paima/perduoda energiją orui ir perduoda kitam oro srautui. Vėdinimo įrenginio komponentai privalo atlikti savo funkcijas, filtrai – išvalyti orą, ventiliatoriai – užtikrinti oro srautą, rotacinis šilumokaitis - atgauti energiją ir t.t.. Tačiau kuo įrenginyje yra daugiau posistemų tuo jis labiau sudėtingėja, kadangi reikia jas visas sujungti į bendrą, viską apėmiančią sistemą. Darbe nagrinėjamu atveju vėdinimo įrenginys, kaip sistema, yra išskaidoma į dvi posistemas (23 pav.).

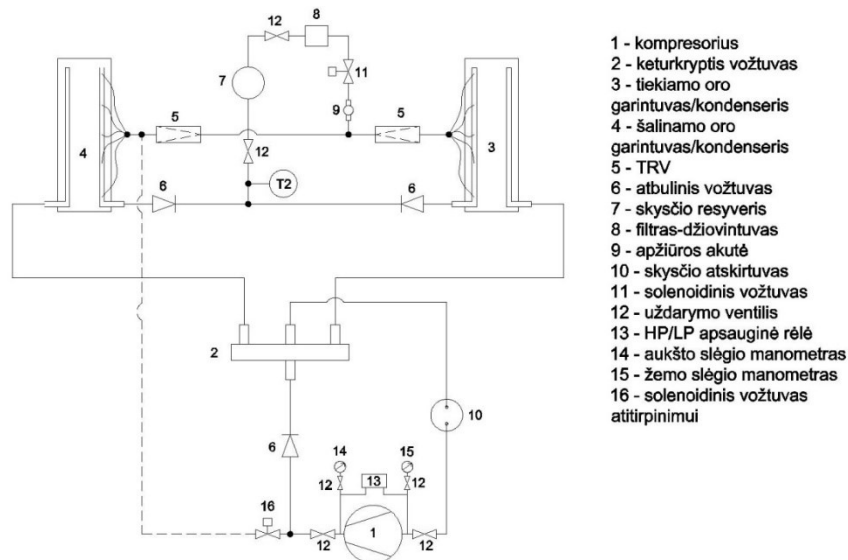


23 pav. VĮ išskaidymas į nagrinėjamas posistemės

Pagal pateikiama schemą (23 pav.) vėdinimo įrenginys išskaidomas į dvi posistemas, kurias sudaro vėdinimo agregatas ir šilumos siurblys. Kadangi darbo tikslas yra ne vėdinimo agregato tobulinimas, bet šilumos siurbių integravimas į juos, detalai nagrinėjama tik šilumos siurblio posistemė.

5.3. Šilumos siurblys

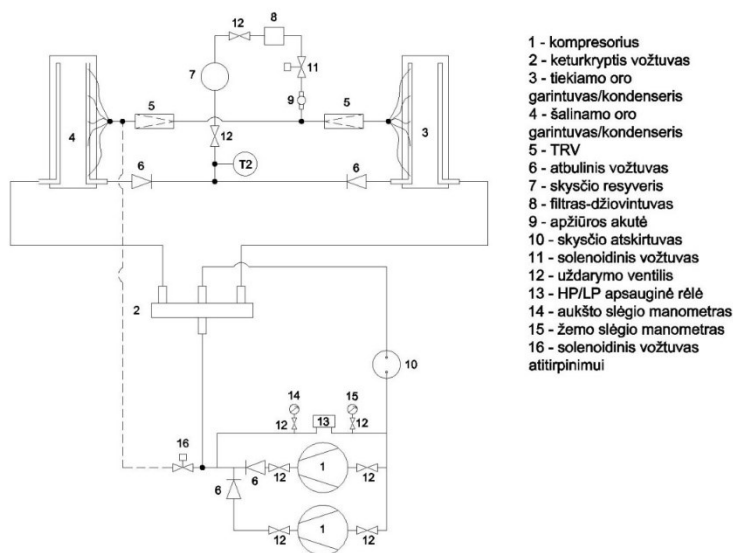
Vėdinimo įrenginio su integruotu šilumos siurbliu veikimo principinė schema buvo aptarta anksčiau. Principinėje schemoje (21 pav.) pateikiami keturi principiniai šilumos siurblio komponentai: kompresorius, kondenseris, garintuvas, išsiplėtimo vožtuvas. Suprojektuotuose ir tiriamuose įrenginiuose naudojamų šilumos siurbių hidraulinės schemos su naudojamais komponentais pateikiamos 24, 25, 26, paveiksluose.



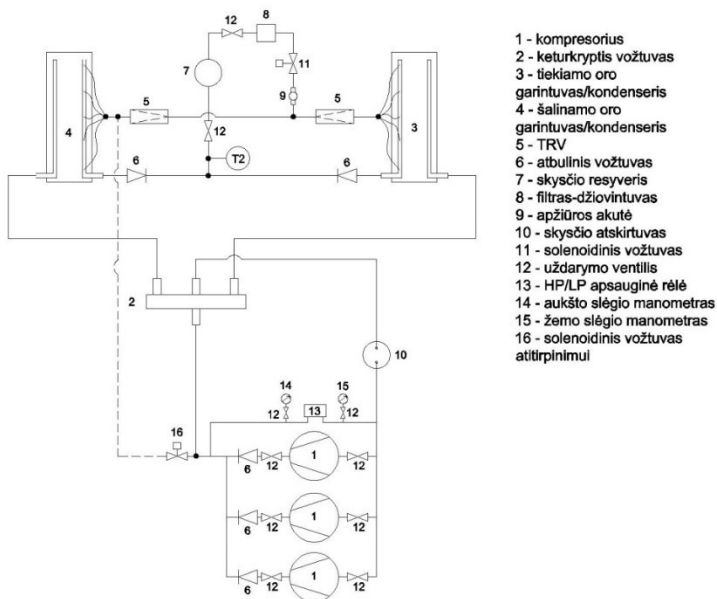
24 pav. ŠS hidraulinė schema su vienu kompresoriumi

Šilumos siurbliuose naudojami spiralinio tipo kompresoriai (1). Šilumos atgavimo ir vėsinimo režimų perjungimui, naudojamas keturkryptis vožtuvas (2), kuris perjungia aukšto ir žemo slėgio linijas. Skysčio droseliavimui naudojami du termoriaguliaciniai vožtuvai (TRV) (5), kurie reguliuoja

šaltnešio srautą į garintuvą pagal nustatyta perkaitinimo temperatūrą. Nagrinėjamuose įrenginiuose ši temperatūra yra lygi $T_{SH} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po kondenserio, skysčio ir garų fazės yra atskiriamos skysčio resiveryje (7), kadangi į TRV turi patekti tik skysčio pavidalo šaldymo agentas. Didesniuose įrenginiuose, naudojami 2 arba net 3 kompresoriai, kurie jungiami lygiagrečiai (25, 26 pav.). Juose naudojami analogiški komponentai, kaip ir vieno kompresoriaus schemeje.



25 pav. ŠS hidraulinė schema su dviem kompresoriais



26 pav. ŠS hidraulinė schema su trimis kompresoriais

Schemose, kuriose naudojami keli kompresoriai, sujungti į vieną kontūrą lygiagrečiai (25, 26 pav.) pakopiniam galios reguliavimui – didžiausia problema yra vienodas tepalo pasiskirstymas. Tolygiam tepalo pasiskirstymui, kai kurie kompresoriai turi tepalo lygio išlyginimo linijas, kurios leidžia suvienodinti tepalo lygį kiekvieno kompresoriaus karteryje.

6. TYRIMO METODIKA

6.1. Matavimo duomenų apdorojimas

Atliekant matavimus fiksuojami drėgno oro parametrai. Duomenų apdorojimui naudojama žemiau pateikta metodika [2]. Duomenų kaupikliai pateikia oro sausojo termometro temperatūrą (t_{db}), oro santykinę drėgmę (φ) ir rasos taško temperatūrą (t_r).

Žemiau pateikiamos formulės, reikalingos oro psichometriniams parametrams rasti. Ore esančių garų kondensacijos slėgis skaičiuojamas dviem atvejais:

$$\ln(p_{ws}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot \ln(T), \text{ kai } t < 0^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\ln(p_{ws}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln(T), \text{ kai } t > 0^\circ\text{C} \quad (2)$$

Kur:

$$C_1 = -5,6745359 \cdot 10^3;$$

$$C_8 = -5,8002206 \cdot 10^3;$$

$$C_2 = 6,3925247;$$

$$C_9 = 1,3914993;$$

$$C_3 = -9,6778430 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-2};$$

$$C_4 = 6,2215701 \cdot 10^{-7};$$

$$C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-5};$$

$$C_5 = 2,0747825 \cdot 10^{-9};$$

$$C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-8};$$

$$C_6 = -9,4840240 \cdot 10^{-13};$$

$$C_{13} = 6,5459673;$$

$$C_7 = 4,1635019;$$

Prisotintų vandens garų slėgis atmosferoje, apskaičiuojamas:

$$W_s = 0,62198 \cdot \frac{p_{ws}}{p - p_{ws}}, \text{ kg/kg} \quad (3)$$

Kur:

p_{ws} – Ore esančių garų kondensacijos slėgis, Pa;

p – absoliutinis atmosferinis slėgis, Pa;

Dalinis vandens garų slėgis ore, skaičiuojamas:

$$p_w = p_{ws} \cdot \frac{\varphi}{100}, \text{ Pa} \quad (4)$$

Oro drėgnumas skaičiuojamas:

$$W = 0,62198 \cdot \frac{p_w}{p - p_w}, \text{ kg/kg} \quad (5)$$

Drėgno oro entalpija apskaičiuojama:

$$h = 1,006 \cdot t_{db} + W \cdot (2501 + 1,805 \cdot t_{db}), \text{ kJ/kg} \quad (6)$$

Kur:

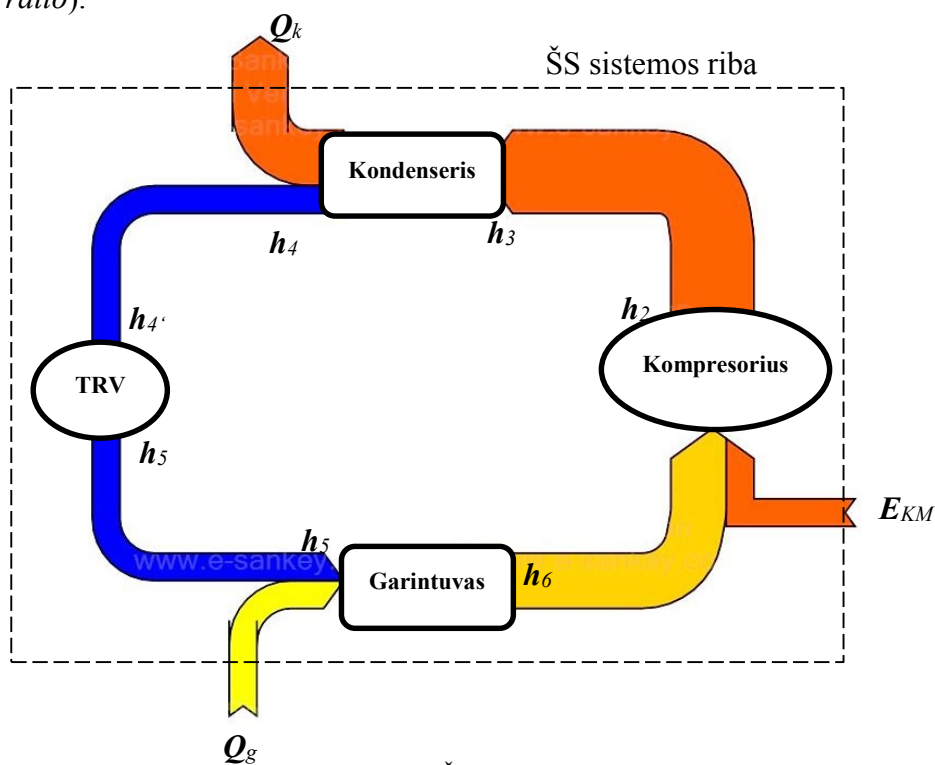
t_{db} – sauso termometro temperatūra, $^\circ\text{C}$;

6.2. Energinė analizė

Šilumos siurblys yra vienas efektyviausių įrenginių, kadangi iš žemo potencialo energijos, suteikiant darbą, galima gauti aukštesnio potencialo energiją. Šilumos siurbliui (27 pav.) reikia suteikti darbą (E_{KM}), šiuo atveju tai yra elektra, kurios pagalba yra varomas kompresorius. Prieš įeinant į kompresorių, per garintuvą pereina šilto oro srautas (Q_g), kuris išgarina ten esanti šaltnešį. Tuomet, suteikiant darbą (E_{KM}), yra sukeliama šaldymo agento temperatūra ir slėgis, šaltnešis įgauna aukščiausią energijos potencialą. Šaltnešiui tekant per kondenserių, šaltesnis oro srautas pasiima dalį energijos (Q_k) ir kondensuoja šaldymo agentą.

Nagrinėjant šilumos siurblių yra svarbūs du momentiniai efektyvumo rodikliai:

- Šilumos siurblio efektyvumo rodiklis šildymo metu COP (*angl. Coefficient of performance*) – energijos transformacijos koeficientas;
- Šilumos siurblio efektyvumo rodiklis vėsinimo metu EER (*angl. Energy efficiency ratio*).



27 pav. ŠS energijos srautai

COP rodiklis gali būti nustatomas teoriniais skaičiavimais, prie skaičiuotinių projektinių parametrų. Šilumos siurblio efektyvumo rodiklis šildymo režime (COP) yra šilumos siurblio suteiktos energijos ir šilumos siurbliui suteikto darbo santykis. Šis koeficientas gali būti išreikštas keliomis išraiškomis (9, 12 formulės):

$$COP = \frac{\text{Šilumos siurblio suteikta energija}}{\text{Suteiktas darbas}} = \frac{Q_k}{E_{KM}} = \frac{(h_{R4} - h_{R3}) \cdot m_i}{E_{KM}} \quad (7)$$

Kur:

COP – šilumos siurblio efektyvumo rodiklis;

Q_k – šilumos siurblio atiduotas energijos kiekis, kW ;

E_{KM} – kompresoriui suteiktas darbas, kW ;

h_{Ri} – freono entalpija charakteringame taške, kJ/kg ;

m_{Ri} – šaltnešio masinis debitas charakteringame taške, kg/s .

Šilumos siurblio efektyvumas vėsinimo metu (EER) yra šilumos siurblio gautos energijos srauto ir suteikto darbo santykis.

$$EER = \frac{\text{Gautas energijos kiekis}}{\text{Suteiktas darbas}} = \frac{Q_g}{E_{KM}} = \frac{(h_{R6} - h_{R5})}{E_{KM}} \quad (8)$$

Kur:

EER – šilumos siurblio efektyvumo rodiklis vėsinimo metu;

Q_g – šilumos siurbliui suteiktas oro energijos kiekis, kW .

Išskiriami du sezoniniai šilumos siurblio efektyvumo rodikliai ^[40]:

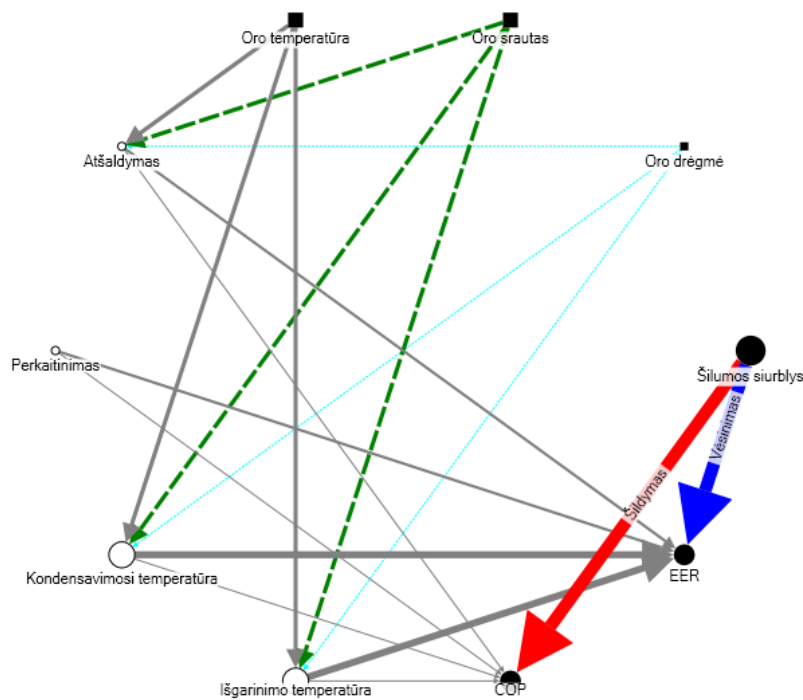
- Sezoninis energijos vartojimo aktyviają veikseną efektyvumo rodiklis - SEER (angl. *Seasonal Energy Efficiency Ratio*);
- Sezoninis veiksmingumo koeficientas - SCOP (angl. *Seasonal coefficient of performance*).

Taip pat išskiriamas dar vienas svarbus rodiklis, kai ESEER (angl. *European energy efficiency ratio*). Šis rodiklis skirtas apskaičiuoti vėsinimo įrenginių efektyvumą esant dalinėms apkrovoms (25, 50, 75, 100 %).

Šilumos siurblys nėra įrenginys, kuris dirba visą laiką pastoviu režimu. Pagal tiekiamo oro temperatūras gali būti 3 darbo režimai:

- Šilumos atgavimas;
- Vėsinimas;
- Pereinamasis, kuomet šilumos siurblys nedirbs.

Dirbant kiekvienu režimu, didelę įtaką šilumos siurblio efektyvumui ir darbui daro gausybė parametrų (28 pav.). Dauguma parametrų yra priklausomi nuo vartotojo poreikių. Jis gali pakeisti oro srautą, užduoti kitą tiekiamo oro temperatūrą, keisti patalpos temperatūrinį režimą. Visi šie ir kiti parametrai daro tiesioginę įtaką šilumos siurblio sistemai.



28 pav. Parametrų įtaka ŠS efektyvumui

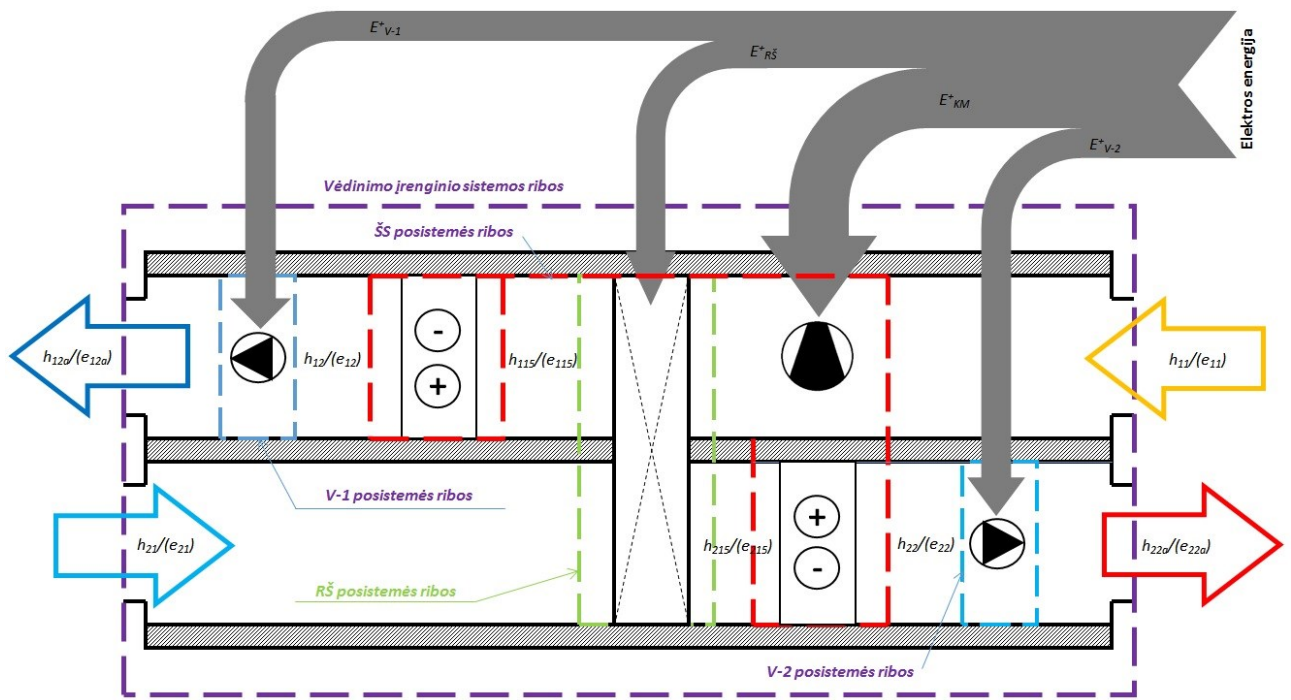
Siekiant nustatyti bendrą sezoninį šilumos siurblio efektyvumą, turėtų būti nustatyti tiek šildymo, tiek vėsinimo sezoniniai efektyvumai. Nors mūsų klimatui aktualiau yra šilumos atgavimas ir šildymas, tačiau didėjant vėsinimo poreikiams negalima nekreipti dėmesio į šį režimą. Taigi, sezoninis šilumos siurblio efektyvumas, įvertinus tiek šildymo tiek vėsinimo režimus bus:

$$SPF = \frac{\left(\frac{Q_k \text{ per šildymo sezoną, kWh}}{E_{KM} \text{ per šildymo sezoną, kWh}} + \frac{Q_g \text{ per šildymo sezoną, kWh}}{E_{KM} \text{ per šildymo sezoną, kWh}} \right)}{2} \quad (9)$$

Pateiktos formulės yra naudingos nagrinėjant šilumos siurblių šildymo ciklo atžvilgiu, t.y. turint šaltnešio termodinamines savybes charakteringuose taškuose. Nagrinėjant šilumos siurblių kaip sistemos posistemę, galima skaičiavimus atlikti ir kitu būdu. Darant prielaidą, kad šilumos siurblys yra atskira posistemė vėdinimo įrenginio sistemoje (23 pav.). Tokiu būdu gaunama, kad šaltnešis nekerta ŠS posistemės ribų ir galime neatlikti šių sudėtingų matavimų. Tuomet užtenka išmatuoti šilumos siurblio posistemės ribas kertančius narius. Kadangi nagrinėjamas objektas yra oras – oras šilumos siurblys, reikia žinoti oro parametrus kiekviename charakteringame taške (29 pav.). Nagrinėjamus vėdinimo įrenginius skaičiavimo patogumui išskaidau į 4 posistemės:

- Oras – oras šilumos siurblys (ŠS);
- Rotacinis šilumokaitis (RŠ);
- Tiekiamo oro ventiliatorius (V-2);
- Šalinamo oro ventiliatorius (V-1).

Visos minėtos posistemės sudaro vieną vėdinimo įrenginio (VĮ) sistemą. Srautų schemoje (29 pav.) pavaizduoti energinės (PTD) ir ekserginės (ATD) analizių nariai.



29 pav. „Komfovent Verso 10RHp“ srautų schema

Šilumos siurblio energijos transformacijos koeficientas (COP) yra atlikto naudingo darbo ir suteiktos elektros energijos santykis (9 formulė). Elektros energija kerta ŠS posistemės ribas ir yra matuojama. Atliktas naudingas darbas yra oro parametrų kitimas. ŠS transformacijos koeficiento lygtį galima perrašyti:

$$COP = \frac{h_{22} \cdot m_{22} - h_{215} \cdot m_{215}}{E_{KM}} \quad (10)$$

Kur:

h_i – oro entalpija charakteringame taške, kJ/kg ;

m_i – oro masinis debitas charakteringame taške, kg/s .

Toks vertinimo būdas yra tikslesnis, nei vertinant tik šaltnešio parametrus, kadangi įvertinami realūs atiduoti (paimti) energijos kiekiai. Kita svarbi vėdinimo įrenginio posistemė yra RŠ. Jos termodinaminis efektyvumas nustatomas:

$$\varepsilon_{RŠ} = \frac{h_{215} \cdot m_{215} - h_{21} \cdot m_{21}}{E_{RŠ} + (h_{11} \cdot m_{11} - h_{115} \cdot m_{115})} \quad (11)$$

Kur:

E_i – posistemei (i) suteikiamas elektros energijos kiekis, kW .

Visos VĮ sistemos termodinaminis efektyvumas yra sistemai suteiktos ir sistemai atiduotos energijos srautų santykis:

$$\varepsilon_{VĮ} = \frac{h_{22a} \cdot m_{22a} - h_{21} \cdot m_{21}}{E_{V-1} + E_{RŠ} + E_{KM} + E_{V-2} + (h_{11} \cdot m_{11} - h_{12a} \cdot m_{12a})} \quad (12)$$

Dažnai šilumogrąžos įrenginiai vertinami temperatūrinio efektyvumo koeficientu, kuris apskaičiuojamas:

$$\varepsilon_T = \frac{t_{22}-t_{21}}{(t_{11}-t_{21})} \cdot 100\%, \%$$
 (13)

Kur:

t_i – nagrinėjamo taško temperatūra, °C.

Visos minėtos formulės naudojamos apdorojant eksperimentinių tyrimų matavimų duomenis.

6.3. Ekserginė analizė

Norint efektyviau vartoti energiją pastatuose reikia diegti atsinaujinančius energijos išteklius bei efektyvias sistemas. Energinio požiūriu, efektyvi sistema yra laikoma ta, kuri efektyviai naudoja jai perduodama energiją ir iš jos pastatui suteikia naudą (pvz. aukšto efektyvumo dujiniai katilai, efektyvios vėdinimo sistemos). Tačiau norint parinkti tikrai naudingą sistemą (naudinga ≠ efektyvi) reikia šiek tiek gilesnės analizės. Tam tinka ekserginė analizė.

Ekserginė analizė parodo sistemos potencialą prie apsupties temperatūros. Esant vienodoms apsupties ir tiekiamo energinio srauto temperatūroms, potencialas bus lygus 0, tačiau esant aukštesnei energijos temperatūrai, energinis potencialas didės. Pagal tai, kiek to energinio potencialo turi sistema ir kiek jo yra atiduodama – gaunamas ekserginio naudingumo koeficientas. Kuo didesnis temperatūrinis skirtumas tarp energijos ir apsupties temperatūrų, tuo didesnis ekserginis potencialas, tačiau lyginant aukšto ir žemo potencialo energijas, perduodamas energijos kiekis, esant vienodai apsupties temperatūrai yra toks pat, todėl suprantama, kad naudingiau yra naudoti žemos eksergijos sistemas.

Vėdinimo įrenginiui su integruotu šilumos siurbliu atliekamas ekserginio naudingumo skaičiavimas pagal eksperimentinius duomenis. Ekserginio analizės metodo esmė yra nustatyti energijos naudingą panaudojimą, pagal energijos vertę. Ekserginis skaičiavimas atliekamas naudojantis ekserginio balanso lygtimi:

$$\sum E^{+-} = L$$
 (14)

Į dešinę pusę sukėlus visus (13) lygties narius kurie išeina per sistemos ribas, kairėje palikus visus energijos srautus, kurie suteikiami sistemai, gaunu tokią išraišką kurią naudosiu tolimesniuose skaičiavimuose:

$$\Sigma E^+ = \Sigma E^- + L$$
 (15)

Kur:

ΣE^+ - ekserginė energija suteikta sistemai, kW;

ΣE^- - ekserginė energija gauta iš sistemos, kW;

L - eksergijos nuostoliai kW.

Eksperimento metu buvo matuojami drėgno oro parametrai. Drėgno oro specifinę eksergiją galima išskaidyti į 3 dalis:

- Šiluminė eksergija (ex_{th});
- Cheminė eksergija (ex_{ch});
- Mechaninė eksergija (ex_{me}).

Taigi analizuojamo oro taško (i) specifinę eksergiją galima įvardinti kaip šiluminės, cheminės ir mechaninės eksergijų sumą:

$$ex_i = ex_{th-i} + ex_{ch-i} + ex_{me-i} \quad (16)$$

Kur:

ex_i – nagrinėjamo taško (i) specifinė eksergija, kJ/kg ;

ex_{th-i} – nagrinėjamo taško (i) specifinė šiluminė eksergija, kJ/kg ;

ex_{ch-i} – nagrinėjamo taško (i) specifinė cheminė eksergija, kJ/kg ;

ex_{me-i} – nagrinėjamo taško (i) specifinė mechaninė eksergija, kJ/kg .

Tuomet šiluminė eksergija apskaičiuojama:

$$ex_{th} = (c_{pa} + w \cdot c_{pv}) \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right), kW \quad (17)$$

Kur:

c_{pa} – savitoji sauso oro šiluma, $kJ/kg K$;

c_{pv} – savitoji vandens garų šiluma, $kJ/kg K$;

w – oro drėgnumas, kg/kg ;

T – oro temperatūra taške, K ;

T_0 – apsupties oro temperatūra, K ;

Cheminė eksergija apskaičiuojama:

$$ex_{ch} = R_a \cdot T_0 \cdot \left[1 + 1,608 \cdot w \cdot \ln \left(\frac{1+1,608 \cdot w_{0s}}{1+1,608 \cdot w} \right) + 1,608 \cdot w \cdot \ln \left(\frac{w_{0s}}{w} \right) \right], kW \quad (18)$$

R_a – idealiųjų dujų konstanta;

w_{0s} – apsupties oro drėgnumas, kuomet oras yra prisotintas drėgmės, kg/kg .

Mechaninė eksergija apskaičiuojama:

$$ex_{ch} = (1 + 1,608 \cdot w) \cdot R_a \cdot T_0 \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0} \right), kW \quad (19)$$

Kur:

P – oro slėgis analizuojamame taške, Pa ;

P_0 – atmosferinis oro slėgis, Pa .

Eksergijos reikšmė matuojamame taške (i) apskaičiuojama:

$$E_i = ex_i \cdot m_i \quad (20)$$

Kur:

E_i – taško eksergija, kW .

Kiekvienai sistemos posistemei (29 pav.) rašoma ekserginio balanso lygtis (13 formulė). Rotacinio šilumokaičio ekserginio balanso lygtis bus:

$$L_{R\dot{S}} = (E^+_{11-215} + E^+_{R\dot{S}}) - E^-_{115-21} \quad (21)$$

Tuomet rotacinio šilumokaičio naudingumas bus:

$$\eta_{R\dot{S}} = 1 - \frac{L_{R\dot{S}}}{E^+_{11-215} + E^+_{R\dot{S}}} \quad (22)$$

Pritaikius ekserginio balanso lygtį (13 formulė) šilumos siurblio posistemėj, gaunu:

$$L_{\dot{S}S} = (E^+_{115-12a} + E^+_{\dot{S}S}) - E^-_{22a-215} \quad (23)$$

Tuomet šilumos siurblio ekserginis naudingumas bus apskaičiuojamas:

$$\eta_{\dot{S}S} = 1 - \frac{L_{\dot{S}S}}{E^+_{115-12a} + E^+_{\dot{S}S}} \quad (24)$$

Viso vėdinimo įrenginio, kaip sistemos, ekserginio balanso ir termodinaminio naudingumo lygtys, bus:

$$L_{Vl} = (E^+_{11-12} + E^+_{V-1} + E^+_{V-2+} + E^+_{R\dot{S}} + E^+_{\dot{S}S}) - E^-_{22-21} \quad (25)$$

$$\eta_{Vl} = 1 - \frac{L_{Vl}}{E^+_{11-12a} + E^+_{V-1} + E^+_{V-2+} + E^+_{R\dot{S}} + E^+_{\dot{S}S}} \quad (26)$$

Atliekant ekserginę analizę drėgnam orui, negalima priimti atskaitos taško, kaip lauko oro taško, kadangi lauko ore yra potencialios eksergijos. Todėl, kaip vertinimo taškas yra priimamas tokios temperatūros ir slėgio oro taškas kaip ir aplinkos, tik yra priimama, kad oras yra prisotintas vandens garų.

7. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

7.1. Naudojama įranga

Matavimų metu atliekami šie matavimai: oro kiekių, oro temperatūrų ir drėgmių skirtinguose taškuose, šaltnešio darbinių taškų slėgio matavimai, šaltnešio perkaitinimo ir išgarinimo temperatūros, slėgių perkryčiai vėdinimo įrenginyje, variklių elektrinės galios matavimai.

Visiems matavimams buvo naudojama UAB „Amalva“ turima ir bandymams suteikta įranga (30 pav.):

1. Skaitmeninis šaltnešio matavimo kolektorius „Tiesto 570“ - 1vnt (1). Skirtas šilumos siurblio darbo rato parametrų nustatymui ir fiksavimui;
2. Oro parametrų jutikliai ir kaupikliai „EL-USB-2“ - 6vnt (2). Kurių temperatūrų matavimo ribos yra nuo minus 35 °C iki 80 °C. Santykinės drėgmės matavimo ribos nuo 0 % iki 100 %. Temperatūros paklaida $\pm 0,5$ °C, drėgmės matavimo paklaida ± 3 % ;
3. Daugiafunkcinis matuoklis „Kimo AMI 300“ – 1 vnt. (3). Skirtas oro slėgio perkryčiams matuoti ;
4. Multimetras (žnyplės) skirtos elektros srovės matavimui – 1 vnt (4);
5. Filmavimo kamera, šalinamo oro šilumokaicio stebėjimui ir apšalimo fiksavimui – 1vnt;
6. Vėdinimo įrenginių automatikoje esantys matavimo prietaisai.

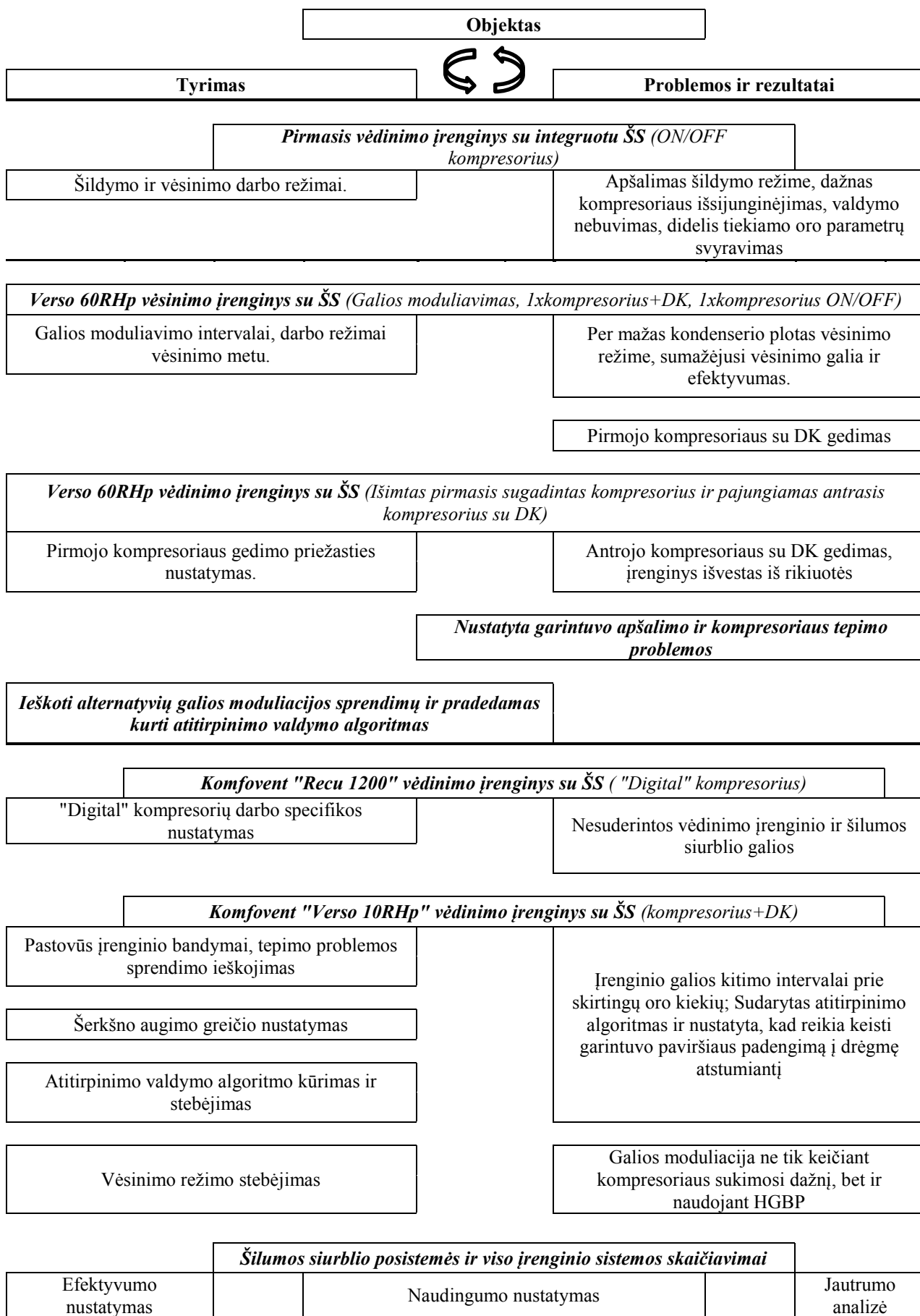
Pagal matavimų duomenis apskaičiuojamas orui atiduodamas arba iš oro paimamas šilumos srautas. Taip pat, matomas kompresorių moduliavimo rezultatas. Kiek galima sumažinti sistemos galią, jos neišjungiant ir vis dar atliekant jai priskirtą funkciją.

Visi vėdinimo įrenginiai buvo valdomi prisijungus prie jų per duomenų tinklą. Tai leido juos valdyti esant toje pačioje patalpoje ir per atstumą.



30 pav. Naudota matavimo įranga

Eksperimentinio darbo schema



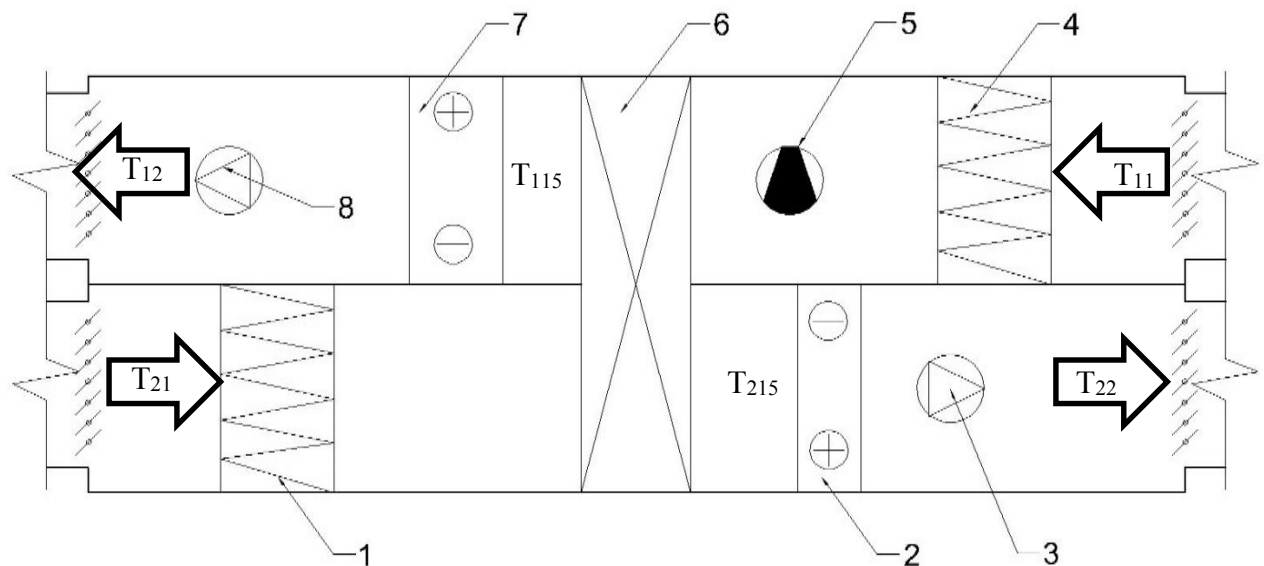
7.2. Bandomieji įrenginiai

Tyrimo objektai yra vėdinimo įrenginiai su integruotais oras - oras šilumos siurbliais. Visi įrenginiai yra UAB „Amalva“ gamybos ir yra bandomi jos turimoje laboratorijoje. Bandymams yra pasirinkti trys skirtingi vėdinimo įrenginiai su skirtingomis kompresorių galios reguliavimo technologijomis. Du vėdinimo įrenginiai yra „Komfovent Verso“ serijos gaminiai ir vienas „Komfovent Compact“ serijos gaminytis. Tiriamųjų vėdinimo įrenginių aprašymai:

- **„Komfovent Verso 10 RHP“** (31, 32 pav.) – vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu. Techninės charakteristikos pateikiamos 5 lentelėje. Įrenginyje sumontuotas oras – oras šilumos siurblys, su spiraliniu kompresoriumi. Šilumos siurblys gali dirbti šildymo ir vėsinimo režimais. Šildymo režime naudojamas karštų dujų atitirpinimo metodas (HGBP). Šilumos siurblio galia reguliuojama pagal tiekiamo oro temperatūrą, pasitelkiant dažnių keitiklį, kuris keičia kompresoriaus sukimosi dažnį. Pirminiams bandymams sukimosi dažnis keičiamas 30 – 60 Hz ribose. Įrenginys yra su rotaciniu šilumokaičiu, kuris atgauna pirminę energiją iš šalinamo oro. Likusi energijos dalis atgaunama su šilumos siurbliu;



31 pav. „Komfovent Verso 10 RHP“ RŠ sekcija su integruoto ŠS mazgu



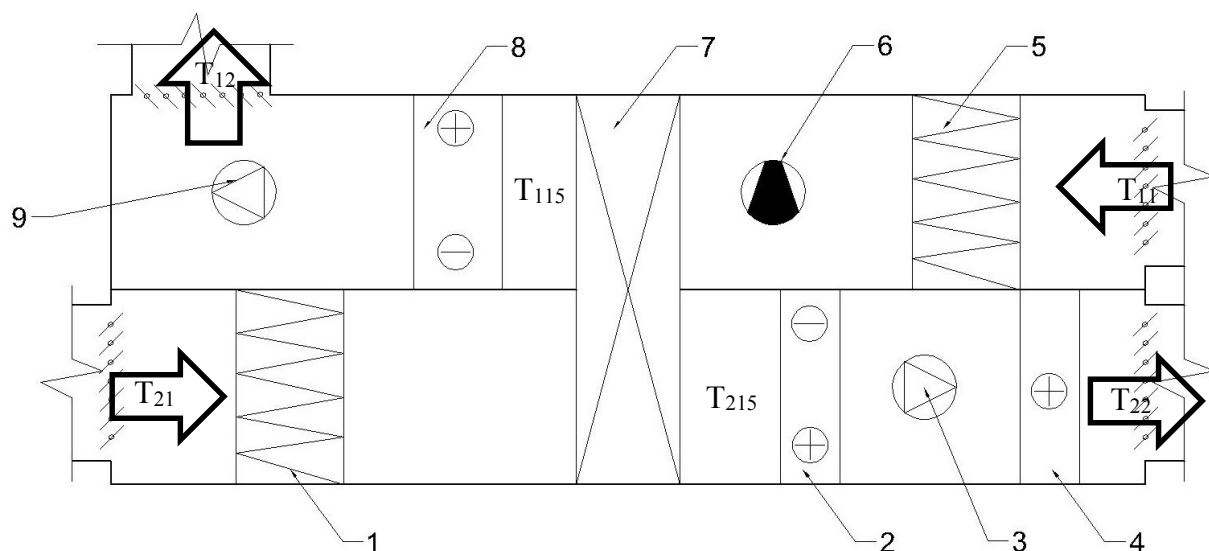
32 pav. „Komfovent Verso 10 RHP“ įrenginio schema

Kur: 1 – lauko oro filtras, 2 – garintuvas/kondenseris, 3 – tiekiamo oro ventiliatorius, 4 – ištraukiamo oro filtras, 5 – šilumos siurblio mazgo vieta (kompresoriaus), 6 – rotorius, 7 – kondenseris/garintuvas, 8 – ištraukiamo oro ventiliatorius. T – oro parametrų matavimo vietos: 21 – įtraukiamas lauko oras, 215 – po rotoriaus, 22 – tiekiamas oras, 11 – ištraukiamas oras, 115 – po rotoriaus, 12 – išmetamas oras.

- **„Komfovent Verso 60 RHP“** (33, 34 pav.) – vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu. Konstrukcija nesiskiria nuo prieš tai minėto „Komfovent Verso 10 RHP“. Išskyrus tai, kad šiame įrenginyje yra sumontuoti du spiraliniai kompresoriai ir atliekama mišri galios moduliacija. Vienas (pagrindinis) kompresorius valdomas su dažnių keitikliu (30 – 60 Hz ribose, 60 % įrenginio vardinės vėsinimo galios), o kitas paprastas „ON/OFF“ tipo (40 % įrenginio vardinės galios). Taigi, galimas kompresorių moduliavimas keičiant sukimosi dažnį ir įjungiant arba išjungiant kompresorius. Tai dar labiau padidina galios reguliavimo diapazoną;



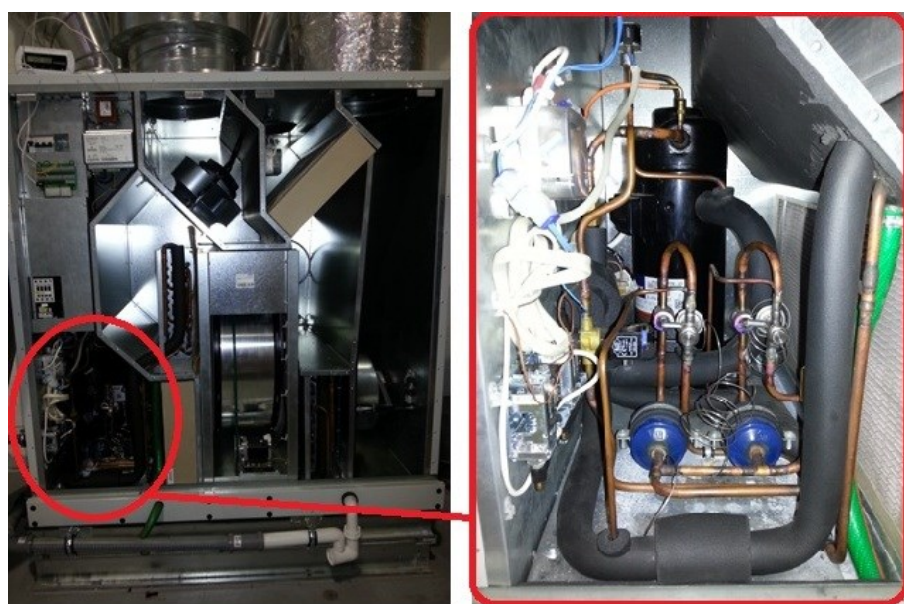
33 pav. „Komfovent Verso 60 RHP“ šilumos siurblio mazgas



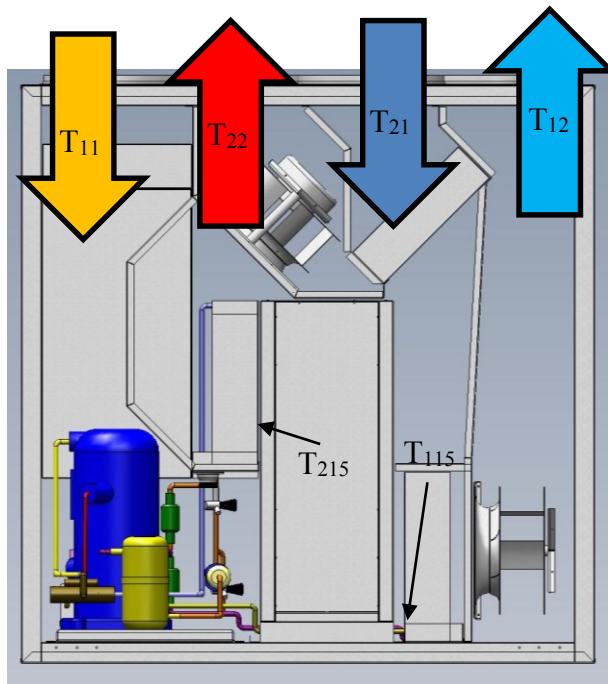
34 pav. „Komfovent Verso 60 RHP“ schema

Kur: 1 – lauko oro filtras, 2 – garintuvas/kondenseris, 3 – tiekiamo oro ventiliatorius, 4 – vandeninis šildytuvas, 5 - ištraukiamo oro filtras, 6 – šilumos siurblio mazgo vieta (kompresoriaus), 7 – rotorius, 8– kondenseris/garintuvas, 9 – ištraukiamo oro ventiliatorius.

- **„Komfovent Kompact 1200 VEHP“** (35, 36 pav.) – vėdinimo įrenginys, taip pat su rotaciniu šilumokaičiu ir integruotu oras – oras šilumos siurbliu. Šiuo atveju šilumos siurblio konstrukcija yra tokia pati, tik skiriasi kompresoriaus moduliavimo tipas. Šiame įrenginyje yra naudojamas spiralinis „Copeland Digital“ kompresorius. Šis kompresorius moduliaciją vykdo praleisdamas karštas dujas ir taip mažindamas šilumos siurblio galia ir elektros sąnaudas (24 psl.).



35 pav. „Komfovent Kompact Recu 1200“ įrenginio nuotrauka ir ŠS mazgas



36 pav. „Komfovent Kompact Recu 1200“ schema

„Komfovent Kompact 1200 VEHP“ įrenginyje buvo sumontuotas per didelės galios „Digital“ kompresorius. Jis dirbdavo tik minimaliu cikliškumu arba išsijunginėdavo, kas neleisdavo tiksliai užfiksuoti šilumos siurblio sistemoje vykstančių reiškinių. Dėl kompresoriaus skleidžiamų elektrinių trikdžių užstrigdavo viso įrenginio valdymo automatika. Šios priežastys neleido atlikti bandymų su įrenginiu.

8. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ EIGA IR REZULTATAI

Matavimai buvo atliekami nagrinėjant šilumos siurblio veikimą prie skirtingų oro parametrų. Matavimų tikslas yra nustatyti šilumos siurblio darbo režimus kintant lauko oro temperatūroms, taip pat kiek galima tiksliau apskaičiuoti šildymo ir vėsinimo efektyvumus, vadovaujantis eksperimentiniais duomenimis. Ištirti problemas, kurios nebuvo aiškios projektavimo metu, rasti jų priežastis ir problemų sprendimo būdus. Matavimai atliekami šilumos siurbliui dirbant 3 režimais:

- Šiltuoju metų laiku, kai šilumos siurblys veikia kaip oro kondicionierius;
- Šaltuoju metų laiku, kai šilumos siurblys atgauna šilumą iš šalinamo oro ir perduoda tiekiamam orui;
- Garintuvo apšalimo ir atitirpinimo režimas.

Detalesnis režimų aprašymas pateikiamas sekančiuose skyreliuose.

8.1. Kompresorių galios kitimo nustatymas

Tyrimui buvo pasirinktas „Komfovent Verso 60 RHP“ vėdinimo įrenginys. Pirmasis įrenginys su keičiamo sukimosi greičio kompresoriumi. Įrenginyje naudojami du, lygiagrečiai, į vieną kontūrą sujungti kompresoriai (6 lentelė) (25 pav.). Mažesnę (40 %) šaldymo galią turintis kompresorius veikia paprastu įsijungimo/išsijungimo režimu. Didesnis kompresorius yra su DK. Toks derinys parenkamas todėl, kad esant mažiems poreikiams užtektų vieno, silpnesnio kompresoriaus, šiuo atveju tai ZP54KSE kompresorius. Galingesnis ZP83KCE kompresorius su dažnio keitikliu negali sumažinti galios žemiau ZP54KSE deklaruojamos galios, kad nebūtų galios persidengimo. Tik pakilus energijos poreikiui sistemoje, silpnesnis kompresorius yra išjungiamas ir paleidžiamas galingesnis ZP83KCE kompresorius.

6 lentelė. „Komfovent Verso 60RHP“ kompresorių duomenys

Kompresorius	Elektrinė galia, kW	Šaldymo galia, kW	Šildymo galia, kW	Adiabatinis efektyvumas, %	COP
ZP54KSE	3,30	15,15	18,3	75	4,6
ZP83KCE	5,17	23,10	28	73	4,5

Bandymai pradėti esant vėsiems orams, lauko oro temperatūra nebuvo pakilusi aukščiau 24 °C (2012m. 08-09 mėnesiai), nebuvo galimybės išbandyti abiejų kompresorių dirbant tandemu, kadangi sistemos aukštas slėgis pakildavo iki P_{max} ir apsaugos atjungdavo šilumos siurbį. Tačiau kompresorius su dažnių keitikliu buvo išbandytas ir nustatytos jo darbo ribos. Bandymo metu įrenginys buvo testuojamas skirtinguose oro srauto ribose:

- 6000 m³/h (minimalus įrenginio oro kiekis);
- 8000 m³/h;
- 11000 m³/h (maksimalus įrenginio oro kiekis);

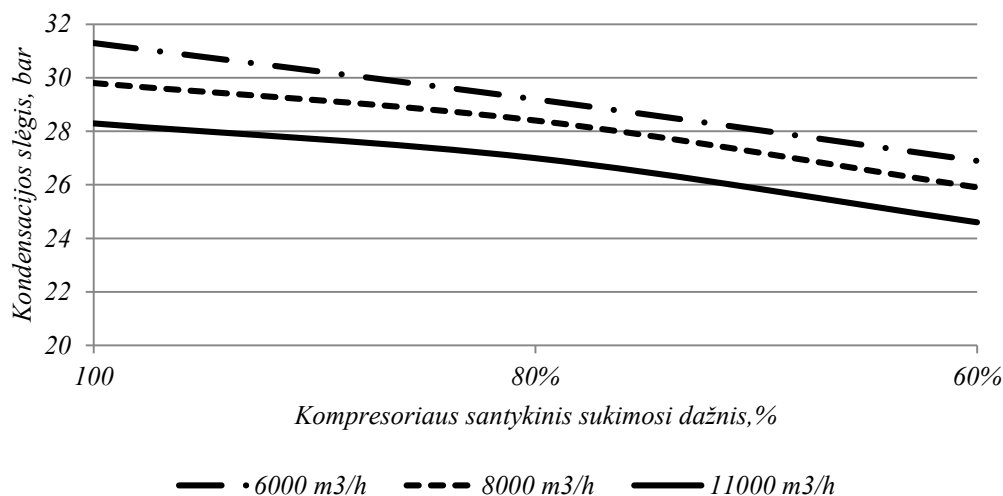
Prie skirtingo oro srauto buvo mažinamas kompresoriaus su dažnio keitikliu greitis:

- Įprastas darbo režimas 100% (60Hz);
- Mažinama iki 80% (40Hz);
- Mažinama iki 60% (30Hz).

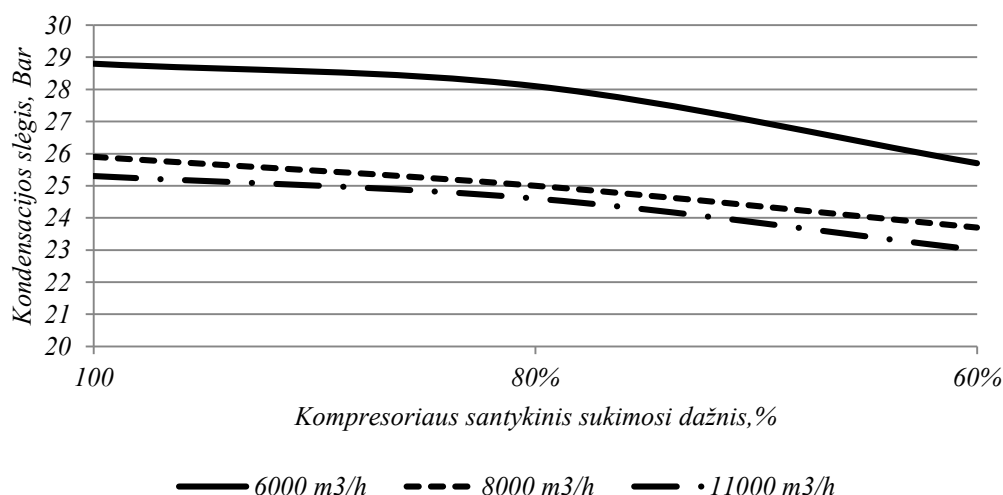
Kiekviename matavimo taške (34 pav.) buvo fiksuojami oro parametrai. Apskaičiuojami oro srautui atiduodami ir paimami energijos kiekiai. Oro srautai buvo fiksuojami pagal vėdinimo įrenginio parodymus.

Keičiant oro kiekius ir kompresoriaus sukimosi dažnį yra keičiama ne tik galia, bet ir kondensacijos ir garinimo slėgiai. Šildymo ir vėsinimo režimuose pastebėti panašūs dėsningumai. Didinant pratekančio oro srautą per kondenserių (šildymo ir vėsinimo metu kondenseriai pasikeičia

vietomis) mažėja kondensavimosi slėgis (37, 38 pav.), kadangi perimamas didesnis energijos kiekis. Mažinant sukimosi greitį, mažėja kondensacijos slėgiai, dėl sumažėjusio šaltnešio debito.



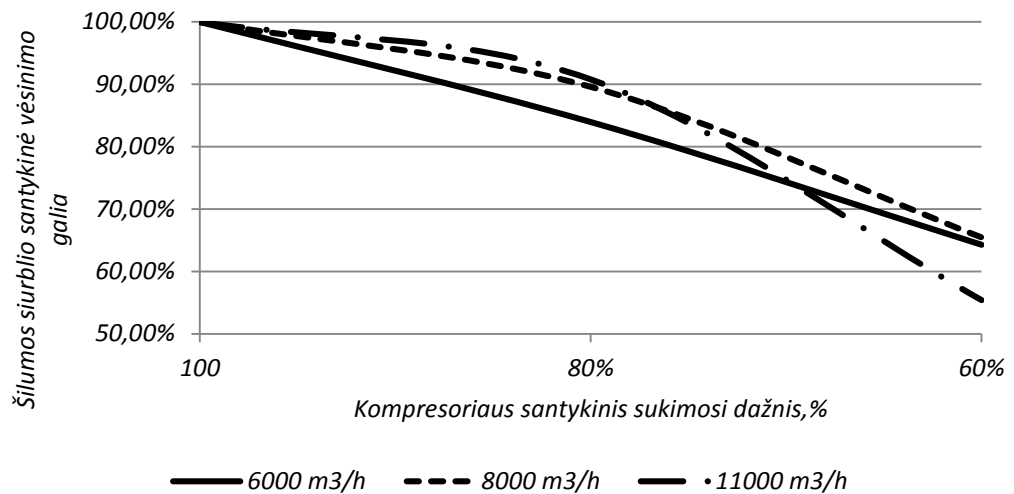
37 pav. Įrenginio kondensacijos slėgio priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio ir oro kiekio vėsinimo režime



38 pav. Įrenginio kondensacijos slėgio priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio ir oro kiekio šildymo režime

Šildymo režime (38 pav.) pastebimas didesnis kondensavimosi slėgio sumažėjimas, padidinus oro kiekį nuo 6000 m³/h iki 8000 m³/h. Slėgio sumažėjimo priežastis yra per mažas kondenserio šilumos mainų plotas. Kadangi šildymo režimas buvo įjungtas esant sąlyginai aukštomis lauko oro temperatūroms ~10 °C. Buvo pagaminamas didelis energijos kiekis, kuris šilumos mainų plotui buvo per didelis. Todėl padidinus oro kiekį pastebėtas staigus slėgio kritimas.

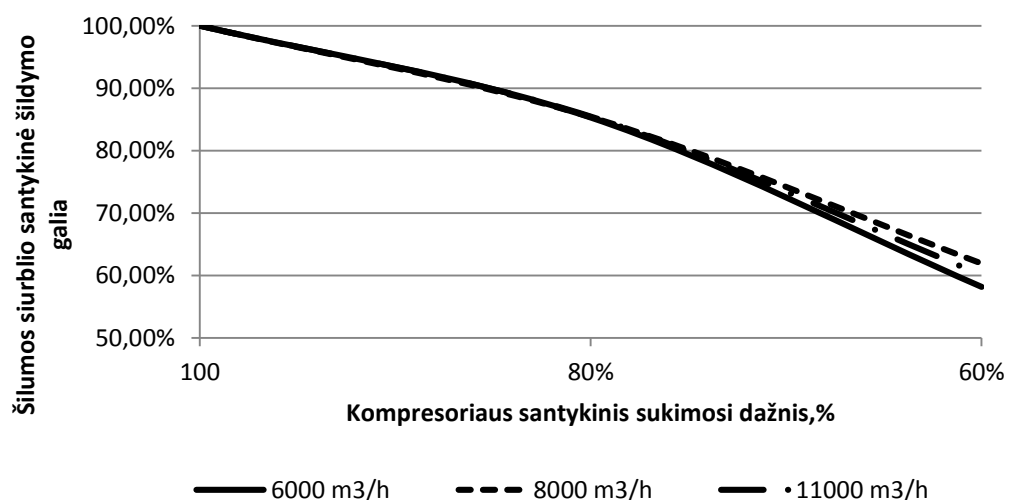
Įrenginiui veikiant šildymo režimu, beveik nesiskiria atiduodamas šilumos srautas tiekiamam į patalpą orui esant 8000 ir 11000 m³/h oro srautui. Galima daryti prielaidą, kad tai irgi yra dėl to, kad yra per maža kondenserio šildymo galia.



39 pav. Kompresoriaus galios kitimas keičiant sukimosi dažnį šildymo režime

Pastebėta, kad kompresoriaus sukimosi dažnis vienodai veikia šildymo ir šaldymo galias. Sumažinus kompresoriaus sukimosi dažnį iki 80 %, šilumos siurblio galia vidutiniškai sumažėja 86 %. O sumažinus sukimosi dažnį iki 60 %, šilumos siurblio galia vidutiniškai sumažėja apie 60 %. Galima daryti išvadą, kad mažinant kompresoriaus sukimosi dažnį atitinkamai mažėja ir šilumos siurblio galia. Toks kompresorių valdymas, leidžia pritaikyti šilumos siurblį prie kintančių darbo sąlygų nagrinėjamame įrenginyje.

Pagal rezultatus gauta, kad mažinant kompresoriaus sukimosi greitį mažėja ir kondensacijos slėgis. Matavimo metu išgarinimo temperatūros išlikdavo tokios pat (grafikiškai neatvaizduota), kisdavo 1-2 °C ribose. Galima teigti, kad mažinant sukimosi greitį, didinamas šilumos siurblio efektyvumas, kadangi žvelgiant į p-h diagramą (6 pav.) matoma, kad didėjant atstumui tarp garinimo ir kondensacijos linijų, didėja kompresoriaus naudojama elektros energija, tuo pačiu mažėja sistemos efektyvumas ir atvirkščiai mažėjant.



40 pav. Kompresoriaus galios kitimas keičiant sukimosi dažnį šaldymo režime

Praėjus pusės metų bandymams, įrenginio kompresorius, kuris buvo valdomas su dažnio keitikliu, neatlaikė. Buvo nustatyta, kad sudegė elektros variklio apvijos. Išardžius kompresorių rastos sudegusios elektros variklio apvijos ir sulaužytos kompresoriaus dalys. Gedimą galėjo sukelti nepakankamas kompresoriaus tepimas arba per mažas šaltnešio kiekis sistemoje, kas neužtikrino pakankamo kompresoriaus aušinimo.

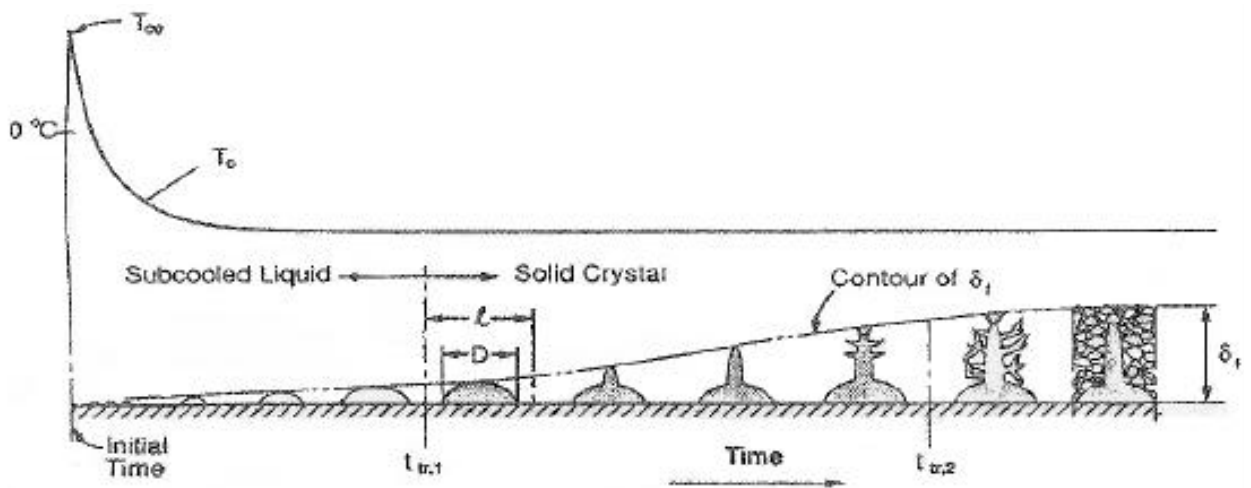
8.1.1. Rezultatų apibendrinimas

Bandymų metu nustatyta, kad:

- Didinant pratekančio oro srautą ir mažinant kompresoriaus sukimosi dažnį mažėja šilumos siurblio kondensacijos slėgis;
- Keičiant kompresoriaus sukimosi dažnį 30-60 Hz intervale, šilumos siurblio šildymo ir vėsinimo galios kinta 60-100 % ribose;
- Dažnio keitiklis arba kompresoriaus greičio kitimas trumpina kompresoriaus veikimo laiką.

8.2. Garintuvo apšalimas

Garintuvo apšalimas (42 pav.) pasireiškia, kai lauko oro temperatūra prieš garintuvą nusileidžia žemiau $5-7^{\circ}\text{C}$ priklausomai nuo oro santykinės drėgmės. Ant garintuvo plokštelių vyksta oro drėgmės kondensavimosi procesas. Kuomet garintuvo paviršiaus temperatūrą nukrenta žemiau oro rasos taško temperatūros, drėgmė kondensuojasi ir sėda ant garintuvo paviršiaus. Bėgant laikui (41 pav.) skystis šąla ir virsta šerkšnu. Apšalimo formavimasi (41 pav.), galima sustabdyti atliekant atitirpinimą, tik tai reikia atlikti laiku. Esant vientisam kristalui, atitirpinimas yra trumpas, tačiau praėjus ilgesniam laiko tarpui kristalai kietėja. Porėjant jiems reikia didesnio šilumos kiekio norint atitirpinti. Dėl susidariusio sniego ir ledo padidėja aerodinamis įrenginio pasipriešinimas. Padidėja ventiliatorių energijos sąnaudos, kompresoriaus vartojama energija, sumažėja tiekiamo oro temperatūra, todėl į patalpas yra patiekiamas šaltas oras. Apšalus garintuvui krenta garinimo slėgis, todėl jei sistemoje nėra įdiegta apsauginių priemonių, gali būti sugadintas kompresorius.



41 pav. Apšalimo formavimosi sluoksniai ant šaltos sienelės

Yra keli pagrindiniai atitirpinimo būdai:

- Perjungiant ketureigį vožtuvą iš šildymo režimo į vėsavimo režimą;
- Naudojant karštų dujų apėjimą *angl. Hot gas By-pass* (HGBP);
- Taip pat galimas atitirpinimas panaudojant elektrinį šildytuvą, tačiau tai daugiau taikoma pramoninio šaldymo įrangoje.



42 pav. Apšalęs garintuvas

Perjungiant režimus didelis minusas yra staigūs slėgio pasikeitimai ^[16], kadangi režimai yra perjungiami sistemai dirbant, o tai reiškia, kad akimirksniu yra pakeičiamos aukšto ir žemo slėgio linijos, kas gali sukelti agregato atskirų dalių pažeidimus. Taip pat sumažėja visos sistemos

efektyvumas, kadangi reikalingas laikas slėgių normalizavimuisi ^[16]. Galimas perjungimas stabdant kompresoriaus ir viso šilumos siurblio darbą, bet tai reiškia didesnį laiko tarpą atitirpinimo veikimui ir šilumos siurblio grįžimui į darbinę padėtį. Daug garsių gamintojų savo šilumos siurbliuose naudoja šį būdą, vykdant įrenginių projektavimą buvo pasirinktas atitirpinimas naudojant karštų dujų apėjimą – HGBP. Šilumos siurblyje yra sumontuotas solenoidinis vožtuvas, kurio pagalba yra vykdomas atitirpinimas karštų dujų metodu. Apšalus garintuvui, atidaromas solenoidinis vožtuvas (16) (24 pav.), per kurį tiesiai iš kompresoriaus paduodami karšti garai į garintuvą. Garintuve sukiyla slėgis, taip pat ir temperatūra, taip yra atitirpinamas susidaręs ledas. Atitirpinimas yra vykdomas nustatytą laiko tarpą ar kol pasiekiami užduoti parametrai. Tam buvo nuspręsta atlikti atskirus bandymus, kurių metu būtų galima nustatyti šerkšno susidarymo ir augimo priklausomybes, nuo oro temperatūros ir santykinės drėgmės. Nustatyti faktorius, kurie labiausiai įtakoja šiuos procesus ir pasiūlyti priemonės kaip sumažinti šią problemą bei būdus kaip kuo efektyviau įrenginys galėtų nustatyti apšalimo pavojų.

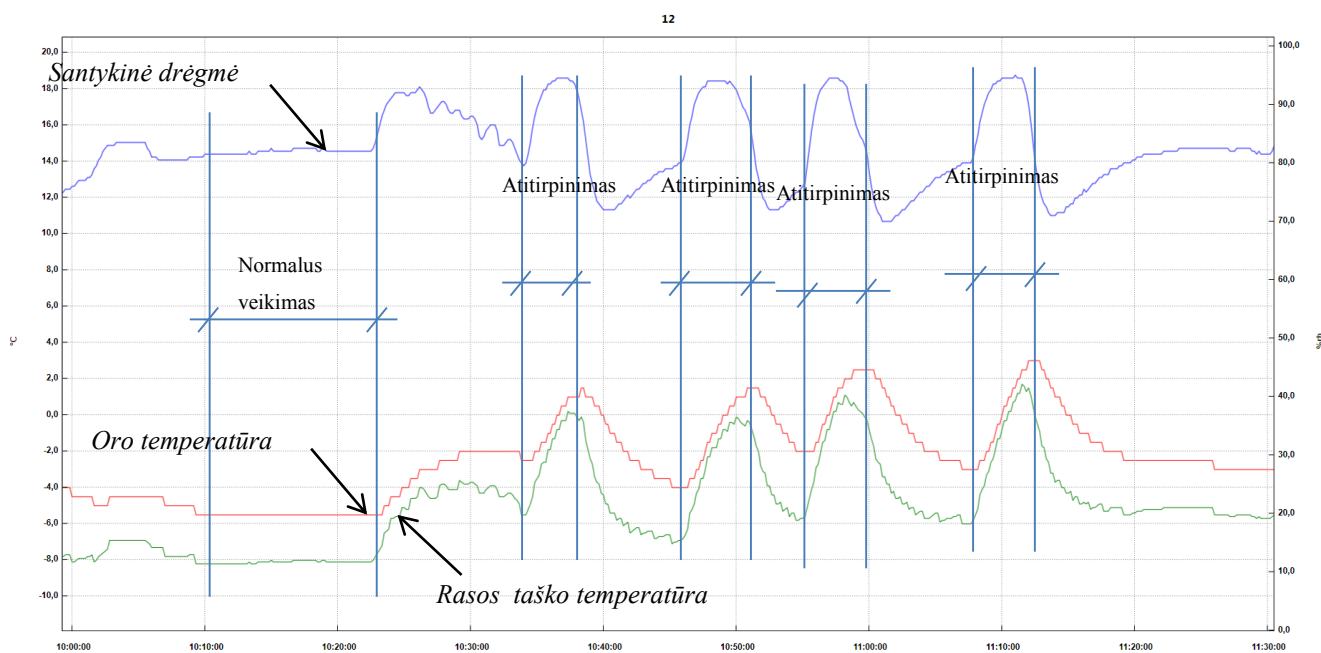


43 pav. Uždelsto apšalimo atitirpinimo anomalijos vedinimo įrenginyje

Eksperimento metu fiksuojami įrenginyje esančių temperatūros kaupiklių rodmenys. Pastovų oro kiekį įrenginyje palaiko įrenginio valdymo automatika. Matavimo tikslui į įrenginį buvo

įmontuota speciali „mini“ kamera (UAB „Amalva“ dėka), kurios pagalba buvo stebimas apšalimo procesas.

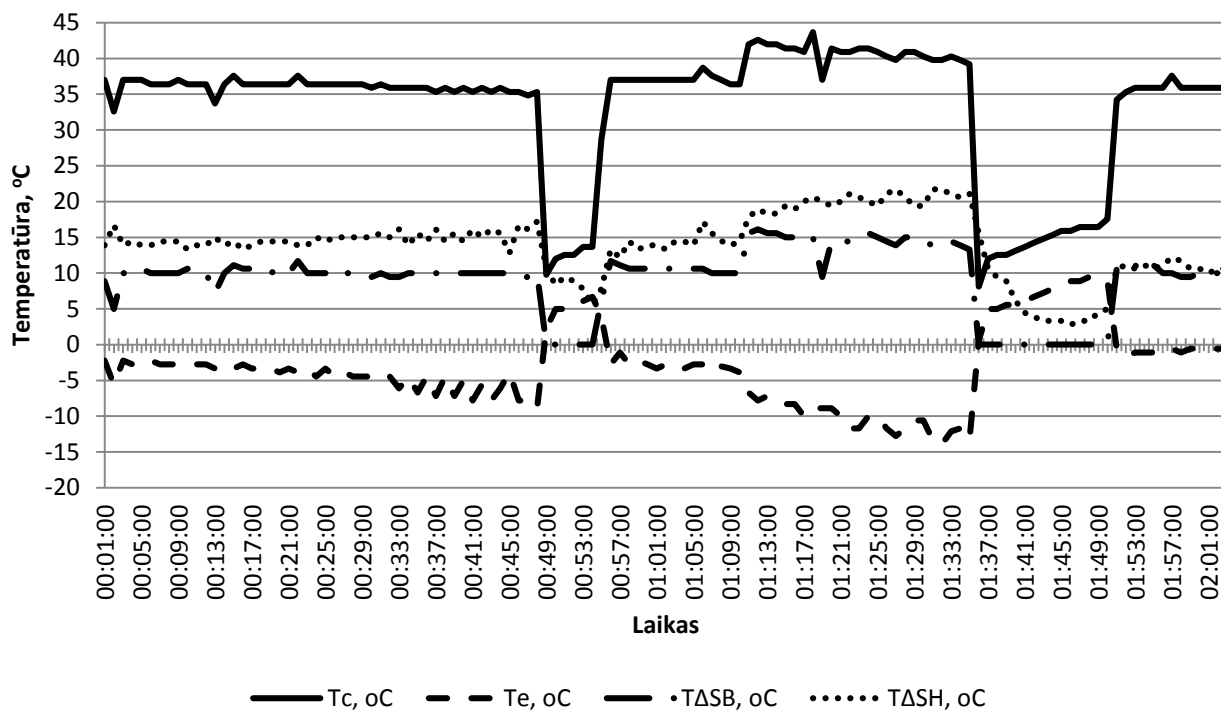
Matuojamų taškų oro parametrų analizę parodė, kad užšalimas yra didelė problema nagrinėjamuose įrenginiuose. Darbo pradžioje įrenginys veikė gerai, kol apšalo (44 pav.). Vėliau buvo vykdomas atitirpinimas, atitirpinimo vidutinė trukmė yra apie 7 minutes. Atitirpinimo metu šalinamo oro temperatūra pakildavo 5-7 °C (44 pav.). Tiekiamo oro temperatūrą per tą laiką nukrisdavo 5-7 °C, kadangi šilumos srautas buvo pervedamas iš tiekiamo oro srauto, šalinamo oro srautui. Tokie temperatūrų svyravimai daro didelę įtaką patalpų mikroklimato parametrų. Toks atitirpinimo valdymas buvo atliekamas pasitelkiant į pagalbą ventiliatorių apkrovos stebėjimą. Stebint ventiliatorių apkrovos kitimą, buvo užfiksuojamas apkrovos padidėjimas (apkrova padidėdavo 2 %) ir tuo metu įjungiamas atitirpinimas. Toks valdymo principas nepasiteisino, kadangi garintuvas pasidengdavo storu šerkšno, o kartais ledo sluoksniu, kas reikalaudavo ilgo atitirpinimo. Leidus apaugti garintuvui ledo ir sniego sluoksniu (42 pav.), atsiranda daugybė problemų atitirpinėjant. Į vėdinimo kamerą pradeda tekėti vanduo (43 pav.). Dėl šios problemos buvo kalta kondensato surinkimo vonelė, kurioje užšaldavo vanduo ir nenutekėdavo. Tolimesniems bandymams buvo sukurta naujos konstrukcijos šildoma vonelė.



44 pav. Taško 12 parametrų parodymai

Siekiant nustatyti kokie procesai vyksta pačiame šilumos siurblyje atitirpinimo metu, buvo atliekami kondensacijos, garinimo, atšaldymo ir perkaitinimo temperatūrų matavimai (45 pav.). Atsiranda kondensacijos temperatūrų (T_c) sumažėjimas ir priartėjimas prie garinimo temperatūrų (T_e). Tai vyksta todėl, kad dalis šaltnešio prieš kondensatorių nuteka į garintuvą, tuo tarpu kondenseryje esantis šaltnešis yra atšaldomas iki žemesnės temperatūros. Įjungus atitirpinimą šilumos siurblio

sistemoje nėra užtikrinamas reikiamas perkaitinimas (T_{SH}) ir atšaldymas (T_{SB}). Veikiant įprastu režimu sistemoje buvo palaikomas stabilus $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ perkaitinimas ir $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ šaltnešio atšaldymas. Įjungus atitirpinimą abu parametrai sumažėjo. Kondensatoriuje nebebuvo peršaldomas šaltnešis, o perkaitinimas nukrito iki $3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



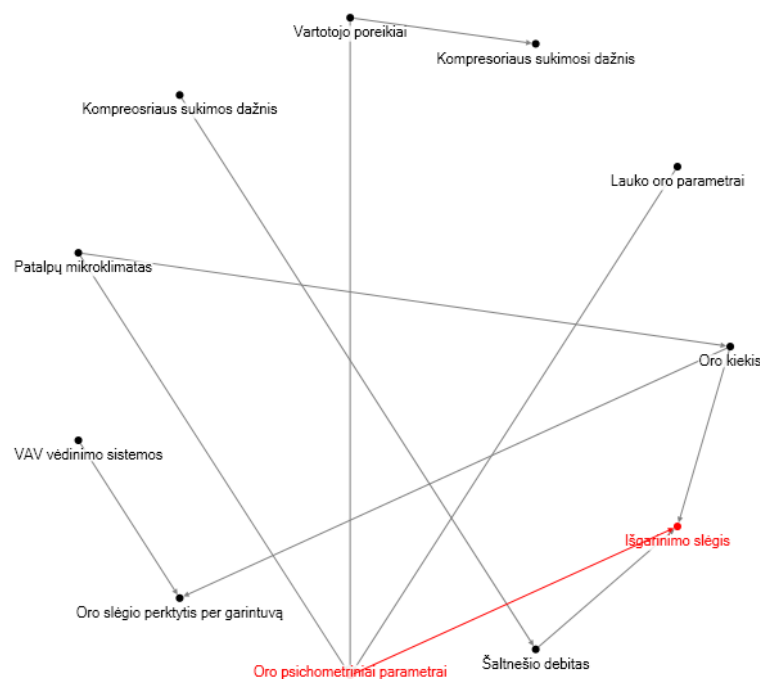
45 pav. Atitirpinimo įtaka ŠS darbui

Šiuo matavimu norėta parodyti principinį procesą, kas vyksta šilumos siurblyje atitirpinimo metu. Norint atlikti detalesnę režimo analizę, reikėtų panaudoti daugiau vamzdžių paviršiaus temperatūros daviklių ir jų pagalba fiksuoti įvairių taškų temperatūras.

Po bandymų, paaiškėjo, kad atitirpinimo valdymas su laikmačiu arba vadovaujantis ventiliatorių apkrovos padidėjimu, esamuose įrenginiuose nepasiteisins. Apšalimas nebus nustatytas laiku. Tai darys įtaką atitirpinimo trukmei, todėl sumažės tiekiamo oro temperatūra ir šilumos siurblio efektyvumas.

Rinkoje vyrauja atitirpinimo valdymas nustatant laiką ir įtraukiant tam tikrus pagalbinus parametrus, pvz. garintuvo temperatūrą, išgarinimo slėgį. Minėtas metodas yra senas, tačiau cituojant patyrusio gamintojo žodžius <...seni, neefektyvūs, bet mes žinome, kad jie veikia...>. Norint padidinti šilumos siurblio efektyvumą šiuo metu yra vis labiau tobulinami ir vystomi atitirpinimo valdymai pagal poreikį (*angl. Defrost on demand*). Dažniausiai tokie algoritmai neturi fiksuotų parametrų. Įrenginys dirba ir kaupia tam tikrus duomenis apie save, pvz., prie kokių temperatūrų kokios yra išgarinimo ir kondensavimo temperatūros arba slėgiai, kaupiami tam tikri slėgio perkryčiai kintant parametrui. Kaupdamas duomenis įrenginys pats save apsimoko. Turint tokius specifinius

įrenginius su savitais darbo režimais, sunku pritaikyti jau esamus atitirpinimo valdymo algoritmus. Įrenginyje yra daug parametrų kurie kinta ir veiksnių kurie įtakoja parametrų kitimą (46 pav.). Sudėtinga prisirišti prie kažkurio parametro kitimo. Jei bandytume prisirišti prie garinimo slėgio kritimo, susiduriame su problema, kad turime kintamo dažnio kompresorių. Keičiant sukimosi dažnį keičiasi garinimo ir kondensacijos slėgiai (58 psl.). Taip pat, pasikeičiant oro srautams keičiasi jau minėtieji slėgiai. Kitas galimas valdymo algoritmo variantas yra oro slėgio perkryčio matavimas per garintuvą. Sukalibravus įrenginį ir žinant slėgio perkryčius per šilumokaitį (garintuvą), galima nustatyti garintuvo apšalimą. Tačiau reikia panaudoti slėgio jutiklius, dėl kurių matavimo ribų ir tikslumo atsiranda kliūtis. Sakykime, turime slėgio perkrytį per švarų šilumokaitį 30 Pa. Daviklio matavimo diapazonas yra 0-100 Pa. Tačiau, jo paklaida yra $\pm 10\%$, kas šiuo atveju yra ± 3 Pa. Taigi, jei vertintume slėgio perkryčio kitimą per garintuvą, mes geriausiu atveju užfiksuotumėme tik apšalusį garintuvą. Kas netinkina, nes skaičiavimo algoritmo esmė yra užfiksuoti apšalimo pradžią. Tuomet, galima maksimaliai sutrumpinti atitirpinimo laiką ir sunaudoti mažiau energijos atitirpinimui (mažiau jos išvaistyti).

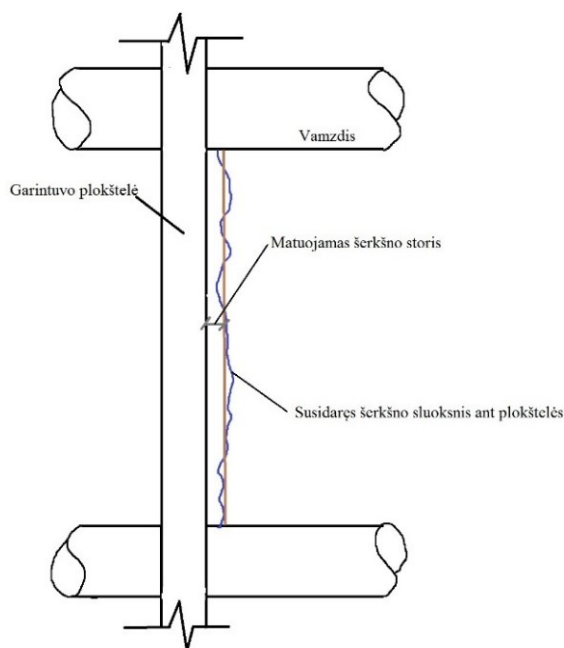


46 pav. Įvairių parametrų įtaką

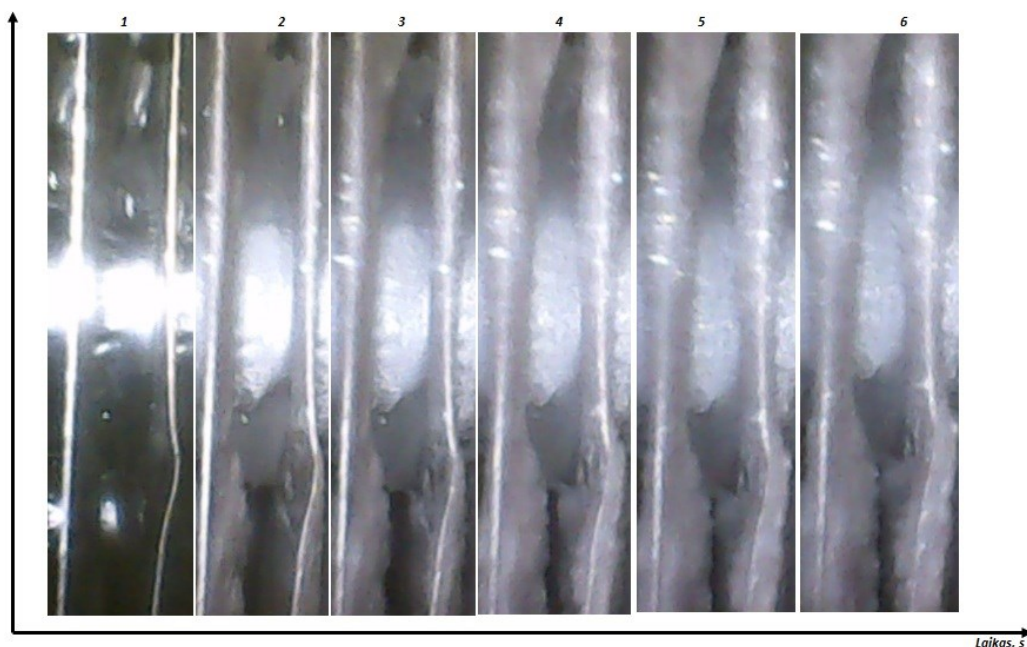
Literatūroje dažnai sutinkamas terminas „*defrost on demand*“, kas išvertus reiškia atitirpinimas esant poreikiui. Prie tokio atitirpinimo galima būtų įvardinti jau minėtus „protingus“ atitirpinimo valdymo metodus.

Iškilus minėtoms problemoms buvo nuspręsta atlikti eksperimentą, norint rasti ir išmatuoti problemiškesnių garintuvo vietų (47 pav.) šerkšno susidarymą, rasti jo augimo greitį ir įvertinus gautą informaciją sukurti atitirpinimo valdymo algoritmą. Filmavimo kamera buvo atsirenkami problemiškesni garintuvo taškai, kuriuose apšalimas prasideda ir augimo tempas yra pats

greičiausias. Pavojingiausi taškai yra garintuvo apačioje, kur nuo garintuvo paviršiaus susirenka didžiausias kondensato kiekis. Atrinkus matavimo vietas buvo pradėtas matavimas. Tai buvo daroma atliekant vaizdo medžiagos apdorojimą, kas 150 s. Matavimai buvo atliekami kelis kartus prie vienodų temperatūrinių ir drėgmės sąlygų, keičiant oro kiekius.



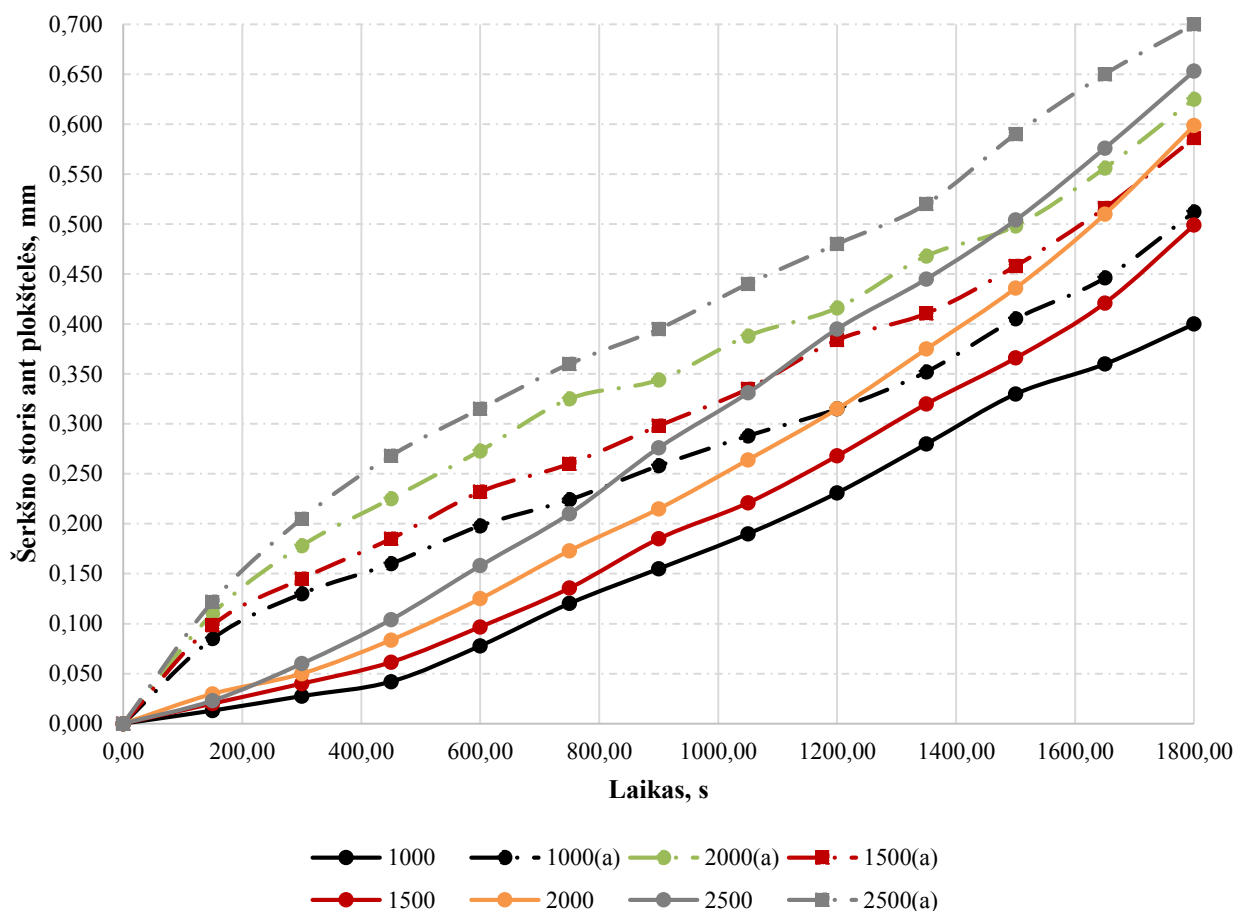
47 pav. Šerkšno susidarymo matavimo schema



48 pav. Apšalimo susidarymas bėgant laikui

Apšalimo formavimasis buvo tyrinėjamas dviem aspektais, koku tempu jis auga ir kokią įtaką apšalimo augimo tempui daro ant garintuvo likusi drėgmė po prieš tai vykusio atitirpinimo. Esant švarioms plokštelėms, augimo tempai yra lėtesni, ypač tai pasimato iki 800 s, kuomet keičiasi apšalimo formavimasis (49 pav.). Po atitirpinimo likusi drėgmė grįžus šilumos siurbliui į normalias

darbo sąlygas, pradeda šalti. Esantis šerkšnas paspartina tolimesni apšalimo sluoksnio formavimąsi, ko pasekoje per tą patį laiko tarpą atsiranda storesnis apšalimo sluoksnis.



49 pav. Apšalimo augimo tempai ant garintuvo paviršiaus. Esant švarioms plokštelėms ir su likusią drėgmę (a)

Skaičiavimuose buvo vertinamas oro kiekis. Siekiant matavimų rezultatus optimaliai pritaikyti įvairių dydžių įrenginiams, reikėtų vertinti oro greičius per šilumokaitį. Kadangi šis matavimas yra tik bandomojo pobūdžio ir atliekamas tik vienam dydžiui, tai oro srautai į greičius nėra perskaičiuojami. Didėjant oro srautui, didėja ir pernešami drėgmės kiekiai. Taip pat, didinant oro srautą ir paliekant tą pačią užduotą tiekiamo oro temperatūrą, didėja šilumos siurblio šaldymo galia.

Atlikus matavimus buvo išvestos apšalimo augimo lygtys, kurios buvo panaudotos algoritmo kūrimui. Lygtyse buvo vertinamos oro ir garintuvo paviršiaus temperatūros, drėgmės kiekis prieš garintuvą ir oro srautai. Visa informacija buvo suvedama į lygtis ir sukurtas bandomasis atitirpinimo valdymo algoritmas ir atliekami algoritmo bandymai.

Valdymo algoritmas buvo bandomas vasario – kovo mėnesiais, kuomet lauko oro temperatūra svyravo nuo minus 15 °C iki 2 °C. Atliekant bandymus dienos metus, algoritmas dirbdavo geriau nei iš jo buvo tikėtasi. Atitirpinimas prasidėdavo garintuvui pradedant apšalinėti, ribinė apšalimo reikšmė ties kurią įsijungdavo atitirpinimas buvo 0,40 mm ir atitirpinimas trukdavo nustatytą laiko tarpą (4 min.) arba kol būdavo pasiekiamos tam tikros temperatūros reikšmės. Per tokį laiko tarpą tiekiamo

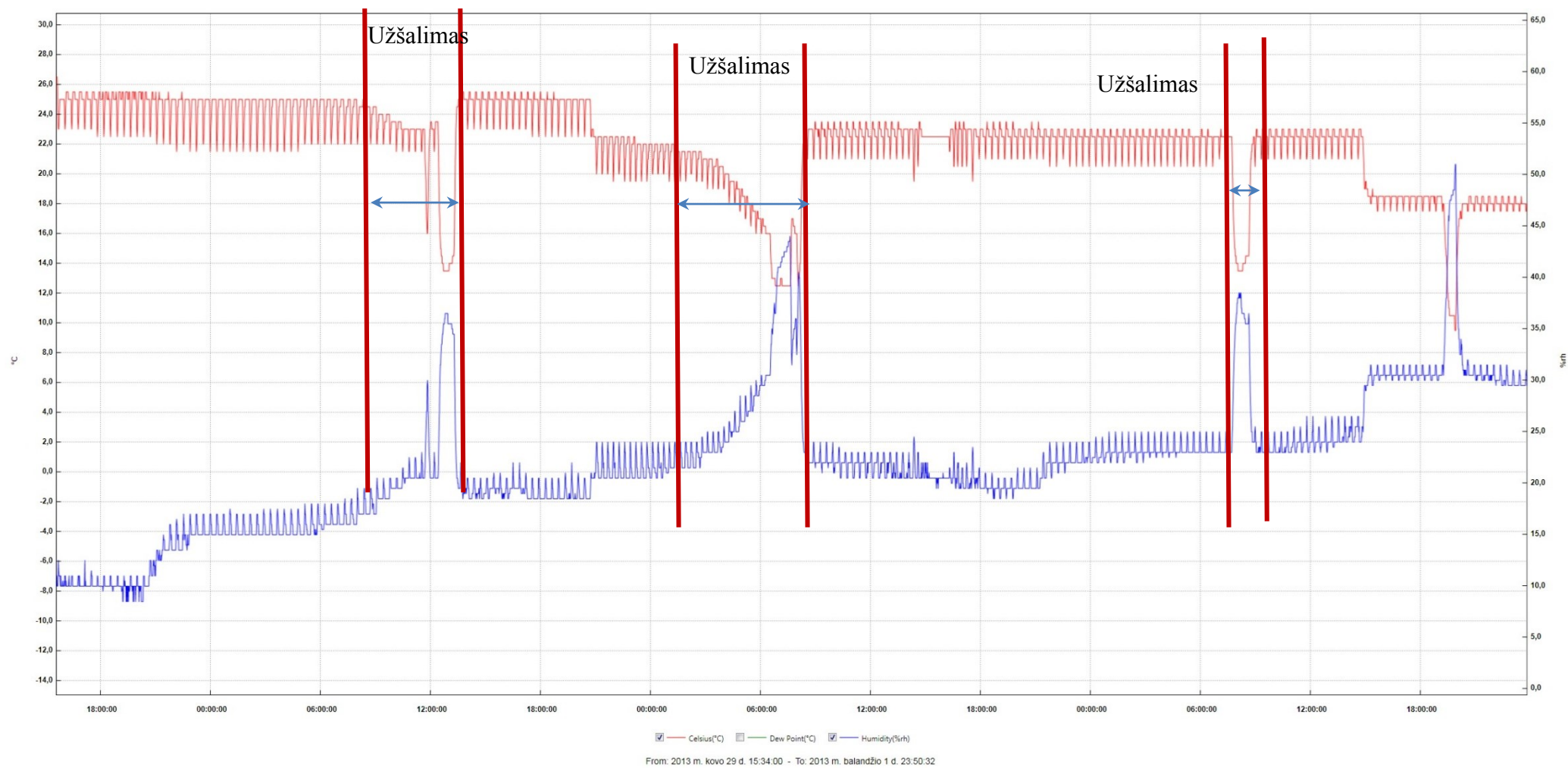
oro temperatūra nukrisdavo 2-4 °C. Visą stebėjimo laiką, neatsirado jokių problemų su apšalimu. Tiesa, kylant lauko temperatūroms, atitirpinimas būdavo per dažnas, tačiau jis dar nebuvo pilnai išdirbtas plačiame temperatūrų intervale. Siekiant optimizuoti atitirpinimo laiką, buvo atliekamas laiko diferencijavimas atsižvelgiant į oro kiekį ir oro parametrus. Tai atlikus, atitirpinimo laikas kisdavo nuo 60 s iki 320 s esant žemoms temperatūroms ir dideliems oro kiekiams, kuomet reikia itin didelės atitirpinimo energijos. Valdymo algoritmas buvo papildytas ir toliau tęsiami įrenginio bandymai. Bandymų metu išryškėjo valdymo bėdos. Dienos metu nekildavo jokių problemų su apšalimu lauko oro temperatūra kisdavo nuo minus 10 °C iki 2 °C, tačiau garintuvas neapšaldavo. Naktį sumažėjus patalpos temperatūrai nuo 18 °C iki 12-14 °C pradėdavo užšalinėti garintuvas (50 pav.). Matomas pa laipsnis tiekiamo oro temperatūros žemėjimas ir galutiniame rezultate visiškai užšalęs garintuvas (50 pav.), kuriam visiškai atitirpdinti reikėdavo 15-20min.

Kita problema stebint atitirpinimo procesą yra aliuminio folija, iš kurios yra pagamintas garintuvas. Atlikus atitirpinimą, ant aliuminio paviršiaus lieka drėgmės plėvelė. Nukritus garinimo temperatūrai žemiau 0 °C, o tai nutinka tik išjungus atitirpinimą, drėgmė sušąla ir pavirsta šerkšnu. Tik baigus atitirpinimą ant folijos jau susidaro šerkšnas. Šias priežastis galima pašalinti naudojant hidrofobinę aliuminio foliją. Ši folija sumažina šerkšno pasidengimo laiką iki 15 % [26]. Dar viena šerkšno mažinimo galimybė yra hidroskopinės folijos panaudojimas, tai leidžia efektyviau sulėtinti šerkšno augimą nei hidrofobinė folija, tačiau hidroskopinis padengimas labiau sumažina šilumos perdavimo koeficientą [6].

8.2.1. Rezultatų apibendrinimas

Bandymų metu gauti pagrindiniai rezultatai:

- Laiku nenustatytas garintuvo apšalimas pailgina atitirpinimo laiką, sumažina šilumos siurblio efektyvumą ir tiekiamo oro temperatūrą;
- Atitirpinimo metu nėra užtikrinami šaltnešio perkaitinimas ir atšaldymas;
- Nustatytos apšalimo augimo priklausomybės parodė, kad didinant oro kiekį spartėja apšalimo susidarymas;
- Apšalimo susidarymą pagreitina likusi drėgmė ant garintuvo paviršiaus;
- Sukurtas atitirpinimo nustatymo algoritmas neveikė nukritus patalpos oro temperatūrai.



50 pav. Atitirpinimo režimo veikimas su valdymo algoritmu

8.3. Efektyvumo nustatymas

8.3.1. Šilumos siurblio efektyvumas ir jo vertinimas

Vienas svarbiausių tyrimų objektų kalbant apie šilumos siurblius yra jo efektyvumas. Tai atsiremia į dideles investicijas perkant jį ir tikimasi, kad jo atsipirkimo laikas bus kuo trumpesnis.

Pirminė darbo idėja buvo sezoninio šilumos siurblio efektyvumo nustatymas. Tačiau, dėl vykdomų eksperimentų su įrenginiu, jo tobulinimo, dažnų komponentų keitimo to nepavyko nustatyti. Bet buvo nustatytas efektyvumas šildymo režime, esant lauko oro temperatūroms nuo minus 10 iki 5 °C prie skirtingų oro kiekių.

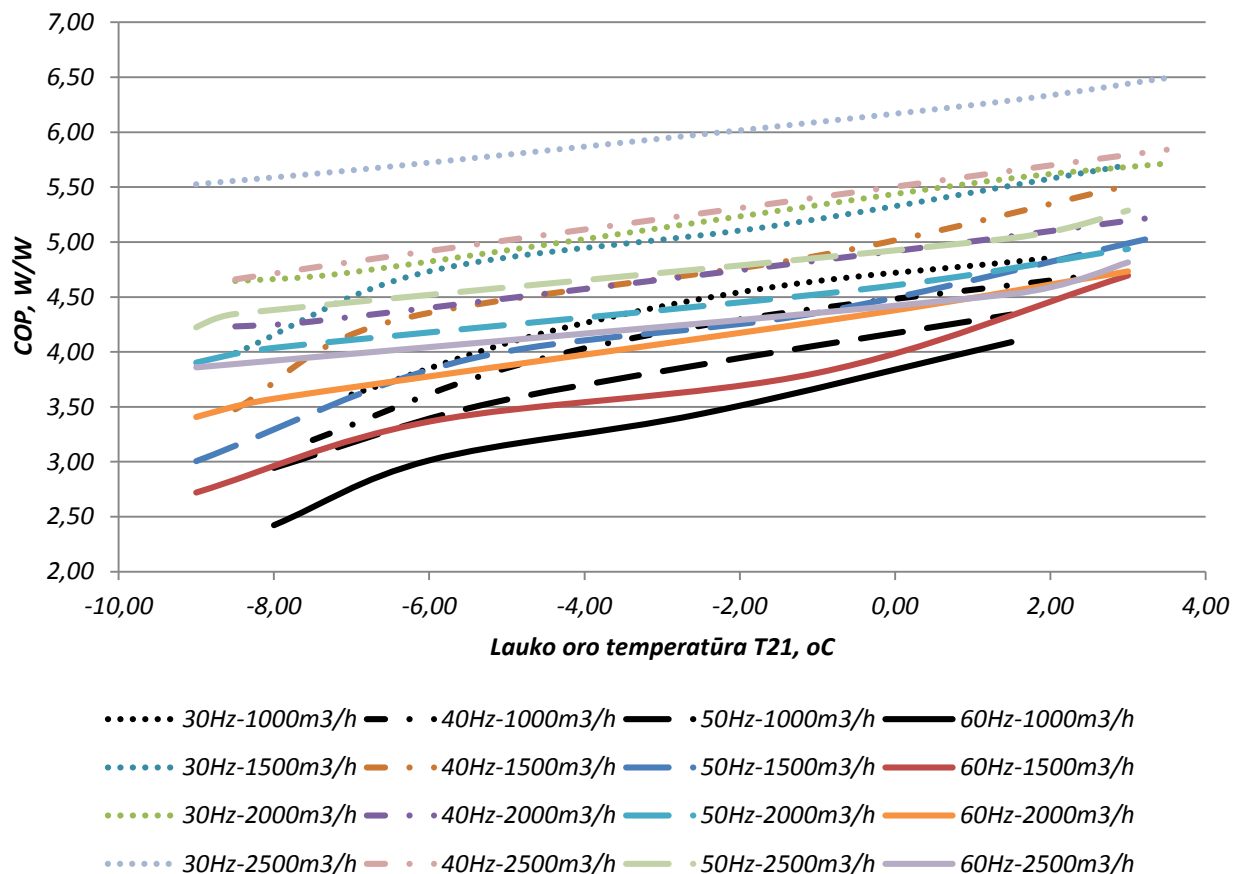
Šilumos siurblio naudingam darbui sukurti reikia ne tik elektros energijos reikalingos kompresoriaus darbui, bet ir tam tikro oro kiekio, kuris atsiranda besisukant ventiliatoriams. Todėl reikėtų įvertinti ir ventiliatoriams reikalingą elektros energiją, taip pat ventiliatorių atiduodama šilumą orui. Kitas svarbus komponentas veikiantis šilumos siurblio efektyvumą yra rotacinis šilumokaitis, kurio darbui atlikti yra sunaudojama elektros energija. Ventiliatoriams (kurių yra du) ir rotacinio šilumokaičio varikliui reikalinga elektros energija yra palyginti mažos su kompresoriaus suvartojama energija, bet jas vis tiek reikia įvertinti.

Matavimams buvo naudota aprašyta įranga (52 psl.). Dalis matavimo proceso ir tyrimo stendo matoma 51 paveiksle. Matavimų rezultatai buvo fiksuojami 30s žingsniu, suvidurkinami ir apdorojami.



51 pav. „Komfovent Verso 10RHP“ įrenginys matavimo metu

Matavimų metu nustatyta, kad kylant lauko oro temperatūrai, didėja šilumos siurblio integruoto į vėdinimo įrenginį efektyvumas. Didėjant oro kiekiui ir mažėjant kompresoriaus sukimosi greičiui didėja šilumos siurblio COP (52 pav). Didžiausias šilumos siurblio efektyvumas pasiekiamas esant 2500 m³/h oro srautui ir 30Hz kompresoriaus sukimosi dažniui. Esant tokioms sąlygoms šilumos siurblio efektyvumas yra nuo 5,5 iki 6,5. Mažiausias COP yra esant minimaliam oro kiekiui (1000 m³/h) ir didžiausiam kompresoriaus sukimosi dažniui - COP yra nuo 2,5 iki 4,1.



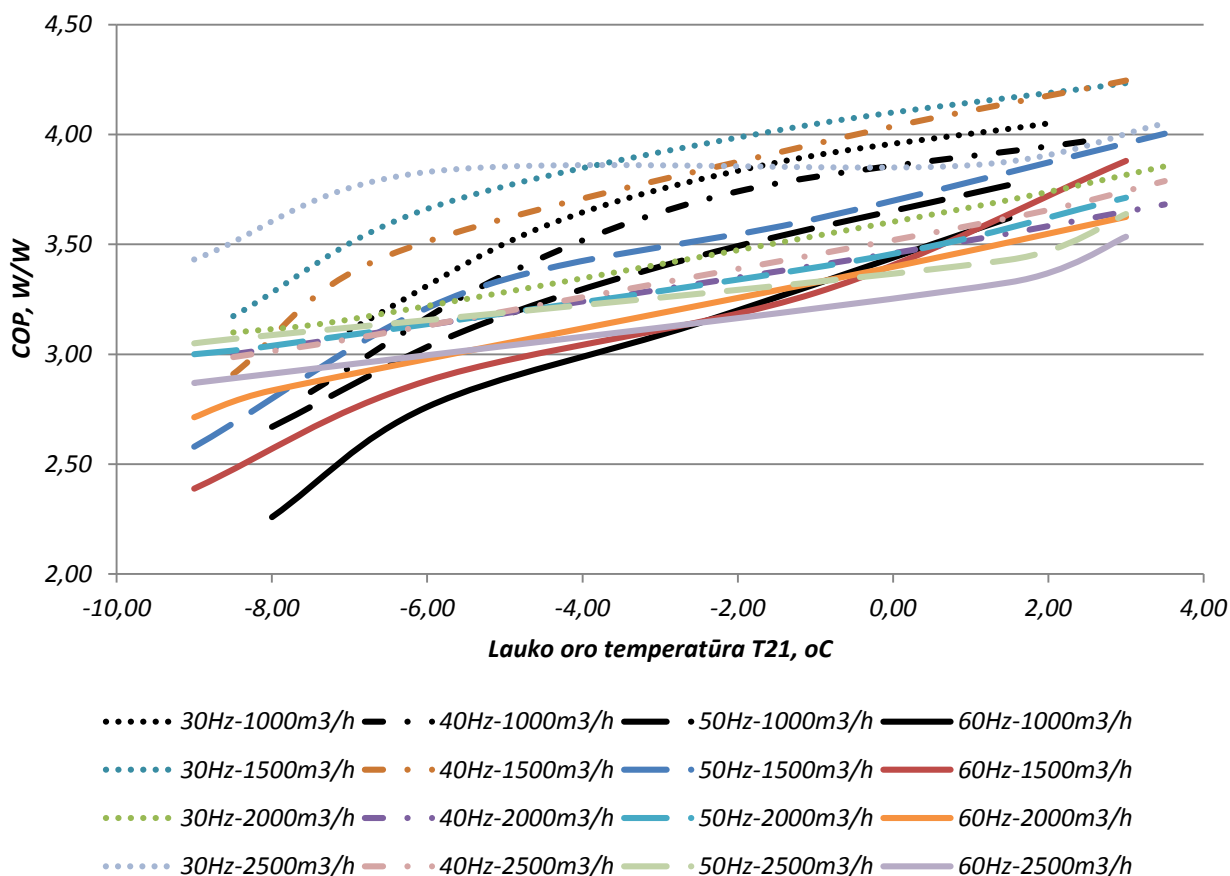
52 pav. ŠS COP kitimo priklausomybė nuo tiekiamo oro kiekio ir lauko oro temperatūros

Pateikti skaičiavimai yra be ventiliatorių sunaudojamos energijos. Tačiau ventiliatoriai sukuria oro srautus kurie perduoda energiją šilumos siurblio sistemai. Todėl jų suvartojama elektros energija turėtų būti įtraukta į šilumos siurblio efektyvumo skaičiavimus. Galimi du ventiliatorių vartojamos energijos įvertinimo būdai:

- Įvertinant visą ventiliatorių vartojamą elektros energiją (1 variantas);
- Įvertinant elektros energijos vartojimo padidėjimą, dėl šilumos siurblio sistemos komponentų sukkelto aerodinaminio pasipriešinimo (2 variantas).

Įvertinant visą ventiliatorių energijos kiekį (1 variantas) į šilumos siurblio efektyvumo skaičiavimą, gaunu, kad visais atvejais COP sumažėja. Labiausiai sumažėja šilumos siurblio

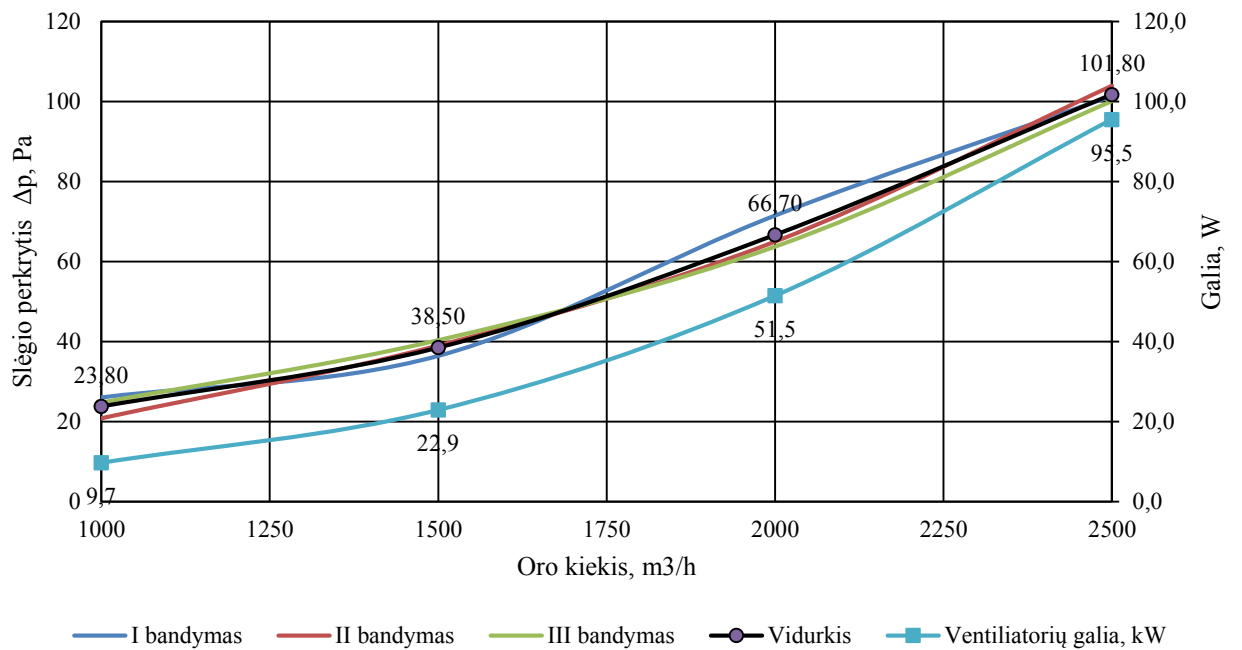
efektyvumas taškuose kur oro kiekis buvo pats didžiausias (2500 m³/h). Esant 2500 m³/h oro srautui ir 30 Hz kompresoriaus sukimosi dažniui, efektyvumas svyruoja nuo 3,45 iki 4,05 priklausomai nuo lauko oro temperatūros (53 pav.).



53 pav. ŠS COP kitimo priklausomybė nuo tiekiamo oro kiekio ir lauko oro temperatūros su ventiliatoriais

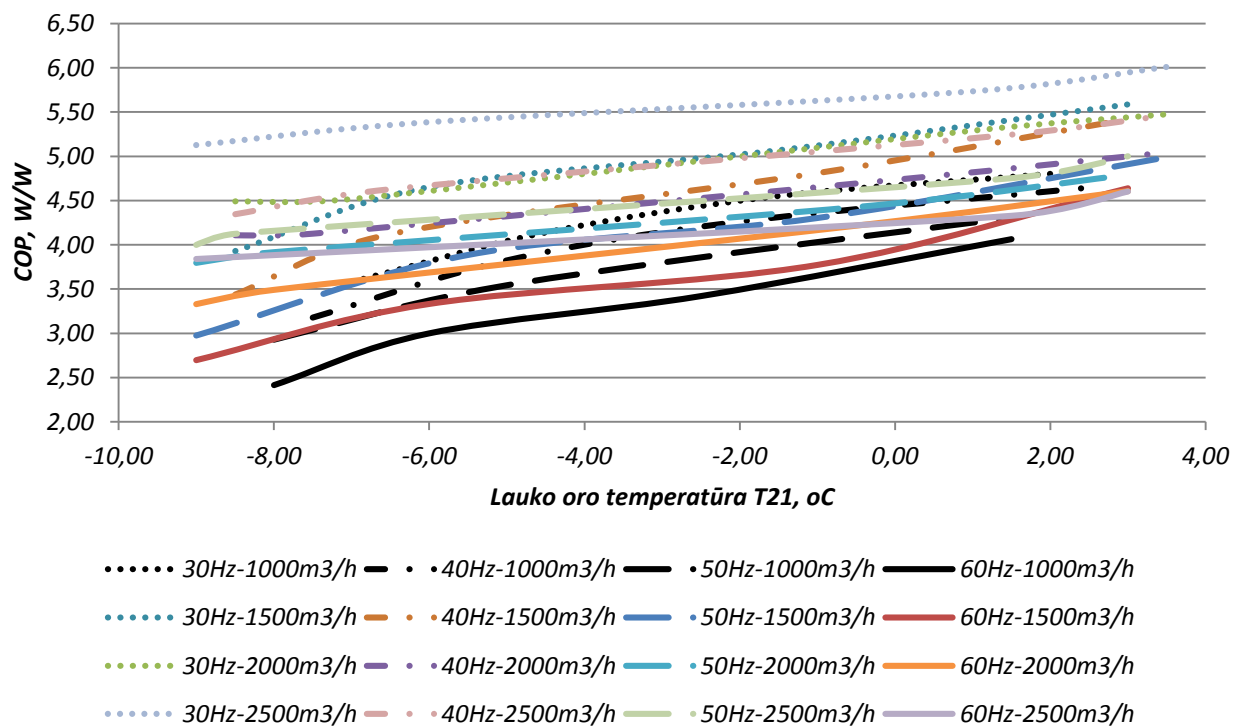
Mažiausias šilumos siurblio efektyvumas yra esant 1000 m³/h oro srautui ir 60 Hz kompresoriaus sukimosi dažniui. Efektyvumas yra nuo 2,25 iki 3,62 priklausomai nuo lauko oro temperatūros (53 pav.). Ventiliatorių vartojamos energijos įvertinimas labiausiai sumažino COP tų taškų, kuriuose efektyvumas buvo didžiausias.

Toks skaičiavimas yra ginčytinas, kadangi vėdinimo įrenginyje bet koku atveju yra naudojami tiekiamo ir šalinamo oro ventiliatoriai, be jų vėdinimo įrenginys neatliktų savo funkcijos. Mano nuomone, jeigu norima sistemą vertinti visai nešališkai ir teisingai, galima vertinti tik tą energijos dalį, kuri yra papildomai sunaudojama dėl padidėjusio pasipriešinimo vėdinimo įrenginyje. Visi šilumos siurblio komponentai yra montuojami oro srauto kanaluose, kas sudaro papildomą pasipriešinimą ir padidina ventiliatoriaus elektros energijos vartojimą. Reikėtų lyginti tokių pačių ventiliatorių sunaudojamą energiją paprastame įrenginyje ir įrenginyje su šilumos siurbliais ir tik energijos skirtumą priskirti COP skaičiavimuose (2 variantas).



54 pav. Oro slėgio perkrytis dėl ŠS sumontavimo

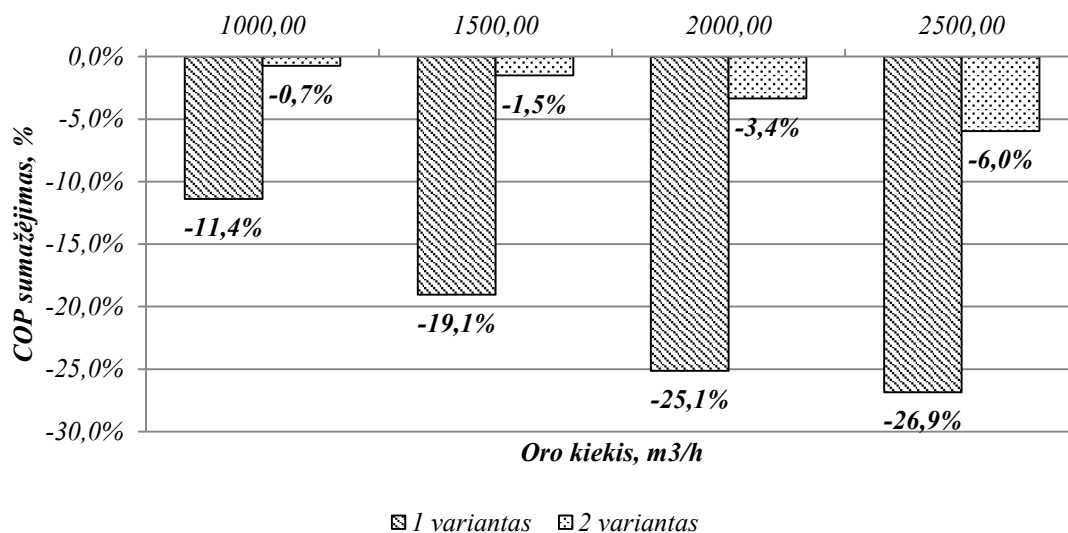
Įrenginio pasipriešinimas dėl šilumos siurblio komponentų yra nuo 24 iki 102 Pa (54 pav.). Dėl to ventiliatorių sunaudojama energija padidėja nuo 0,01 iki 0,096 kW (54 pav.). Bandymų metu šilumos siurblio elektrinė galia svyravo nuo 1,0 kW iki 2,5 kW. Įvertinus ventiliatorių galios prieaugį dėl sukkelto pasipriešinimo gaunu, kad dėl to sunaudojama galia padidėtų nuo 0,4 % iki 10 %. Įvertinus šiuos duomenis į šilumos siurblio efektyvumo skaičiavimus, gaunu šilumos siurblio efektyvumo kitimą (55 pav.).



55 pav. COP kitimas įvertinus ventiliatorių galios padidėjimą dėl pasipriešinimo

Dėl ventiliatorių energijos įvertinimo sumažėjo šilumos siurblio efektyvumas (55 pav.). Tačiau ventiliatorių įvertinimas labiausiai sumažino šilumos siurblio efektyvumą prie didžiausio oro kiekio (2500 m³/h) ir mažiausio kompresoriaus sukimosi dažnio (30Hz) (55 pav.). Esant šiems parametrams yra pats aukščiausias šilumos siurblio efektyvumas.

Didėjant oro kiekiui proporcingai mažėjo šilumos siurblio efektyvumas, kuris esant didžiausiam tiekiamo oro kiekiui (2500 m³/h) sumažėjo net 27 % įvertinus visą ventiliatorių vartojamą elektros energiją (56 pav.). Tuo tarpu, atsižvelgiant tik į energijos sąnaudas atsiradusias dėl papildomo pasipriešinimo, gaunamas tik iki 6 % COP sumažėjimas.

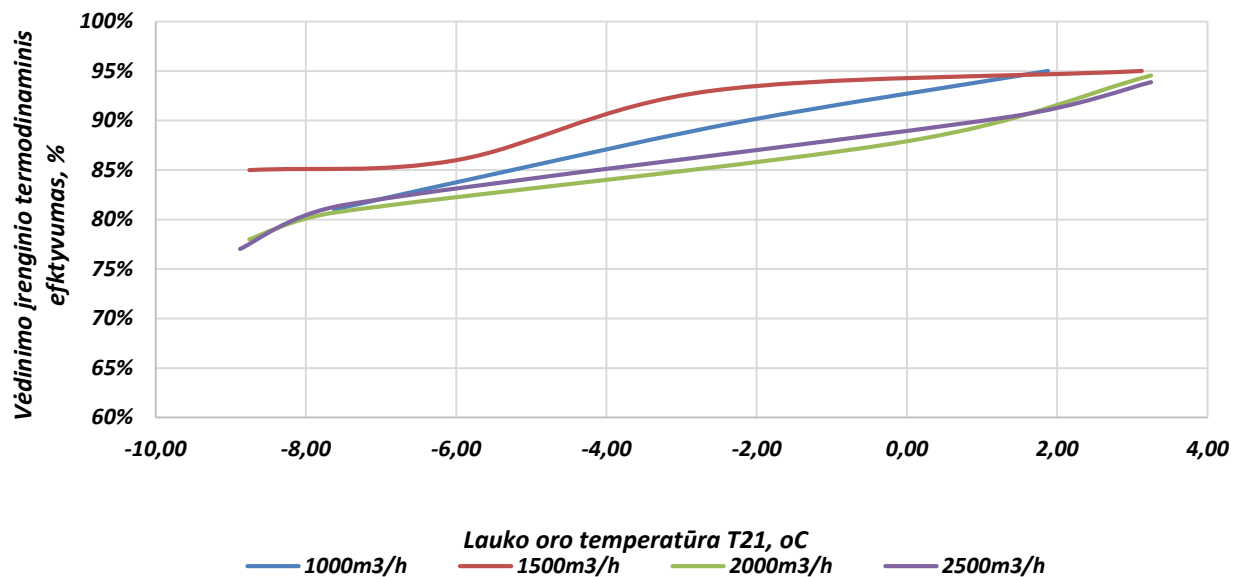


56 pav. Ventiliatorių įvertinimas efektyvumo skaičiavime

Apibendrintai galima teigti, kad visos ventiliatorių galios įvertinimas COP skaičiavimuose sumažina COP nuo 11,4 % iki 26,9 % didėjant oro kiekiui. O įvertinus galios prieaugį dėl sukkelto pasipriešinimo, gaunu, kad COP sumažėja nuo 0,7 % iki 6 % (56 pav.).

8.3.2. Vėdinimo įrenginio efektyvumas

Vertinant tokį įrenginį iš efektyvumo pusės yra sunku apsispręsti jo kaip sistemos vertinime, kaip jis turėtų būti traktuojamas. Jeigu traktuosime jį kaip šilumos siurblių ir vertinime naudosis COP išraišką, žinosime kiek energijos yra suteikiama sistemai iš vieno darbo mato. Tačiau, tokia vertinime nežinosime atgaunamo energijos kiekio, juk tokį įrenginį būtų galima labiau traktuoti kaip šilumogrąžos įrenginį. Mano nuomone, tokio įrenginio energinio efektyvumo vertinimas turėtų būti paremtas sistemai suteiktos (tai yra sistemai suteikta ir iš oro atgauta energija) ir iš sistemos ribų išėjusios energijos santykiu.

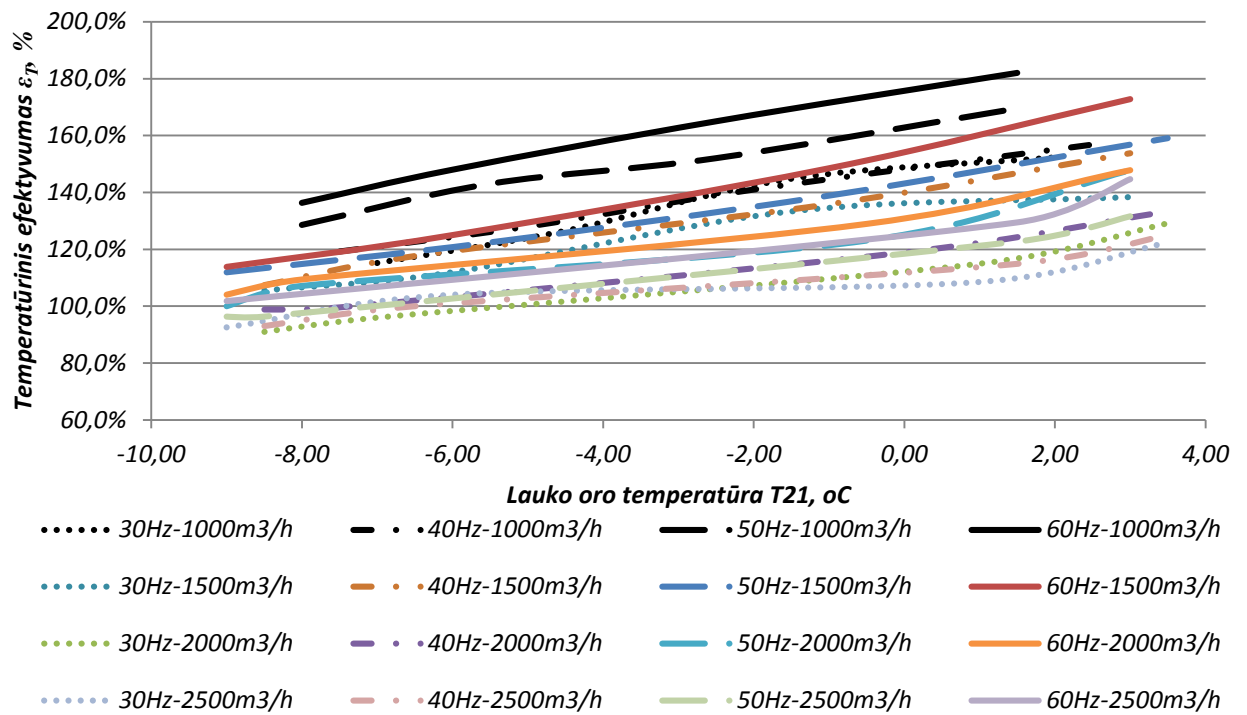


57 pav. VĮ termodinaminio efektyvumo kitimas

Atlikus viso vėdinimo įrenginio termodinaminę analizę (57 pav.) matoma, kad kylant lauko oro temperatūrai, kyla įrenginio termodinaminis efektyvumas. Didžiausias vėdinimo įrenginio termodinaminis efektyvumas yra 95 % esant 1500 m³/h oro kiekiui. Galima pastebėti tendencija, kad didėjant oro kiekiui įrenginio termodinaminis efektyvumas mažėja, tačiau nedideliu žingsniu.

Vertinant šilumogrąžos įrenginius yra svarbus temperatūrinis efektyvumas. Įrenginio temperatūrinis efektyvumas nustatomas naudojantis (13) formulę. Gaunamas temperatūrinio efektyvumo kitimo grafikas nuo lauko oro temperatūros, esant skirtingiems oro kiekiam ir kompresoriaus sukimosi dažniams (58 pav.).

Įrenginio temperatūrinis efektyvumas svyruoja nuo 90 % iki 182 %. Didžiausias temperatūrinis efektyvumas pasiekiamas esant 1000 m³/h (minimaliam) oro kiekiui ir 60 Hz kompresoriaus sukimosi dažniui (maksimalus). Kylant lauko oro temperatūrai didėja įrenginio temperatūrinio efektyvumo koeficientas. Mažinant kompresoriaus sukimosi dažnį ir paliekant tą patį oro kiekį, mažėja temperatūrinis efektyvumas. Nustatyta, kad temperatūrinis efektyvumas mažėja didinant pratekančio oro srautą (58 pav.).



58 pav. Įrenginio temperatūrinis efektyvumas

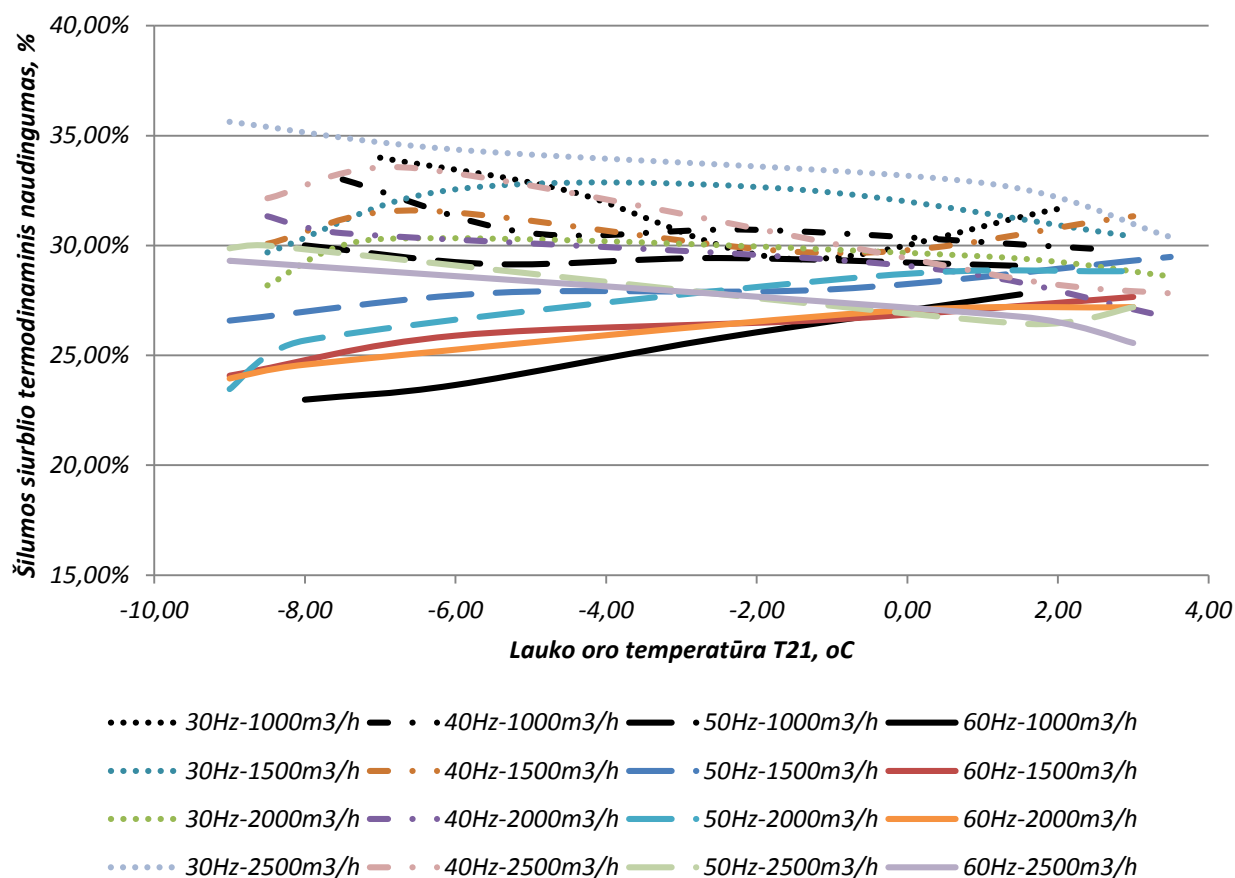
8.3.3. Rezultatų apibendrinimas

- Nustatytas šilumos siurblio COP kuris yra nuo 2,42 iki 6,49 priklausomai nuo oro kiekio, kompresoriaus sukimosi dažnio ir lauko oro temperatūros;
- Mažėjant oro kiekiui ir didėjant kompresoriaus sukimosi dažniui yra mažinamas šilumos siurblio efektyvumas;
- Kylant lauko oro temperatūrai, didėja šilumos siurblio efektyvumas;
- Visos ventiliatorių galios įvertinimas sumažina šilumos siurblio COP nuo 11,4 iki 26,9 %;
- Šilumos siurblio sukeltas aerodinaminis pasipriešinimas yra nuo 24 iki 102 Pa;
- Dėl šilumos siurblio sukulto pasipriešinimo padidėjusi ventiliatorių galia, įtraukta į efektyvumo skaičiavimus, šilumos siurblio COP sumažina nuo 11,4 % iki 26,9 %;
- Šilumos siurblio termodinaminis efektyvumas, nagrinėjamame temperatūrų intervale, yra nuo 77 % iki 95 % priklausomai nuo oro kiekio;
- Vėdinimo įrenginio temperatūrinis efektyvumas yra nuo 90 % iki 182 %;

8.4. Naudingumo nustatymas

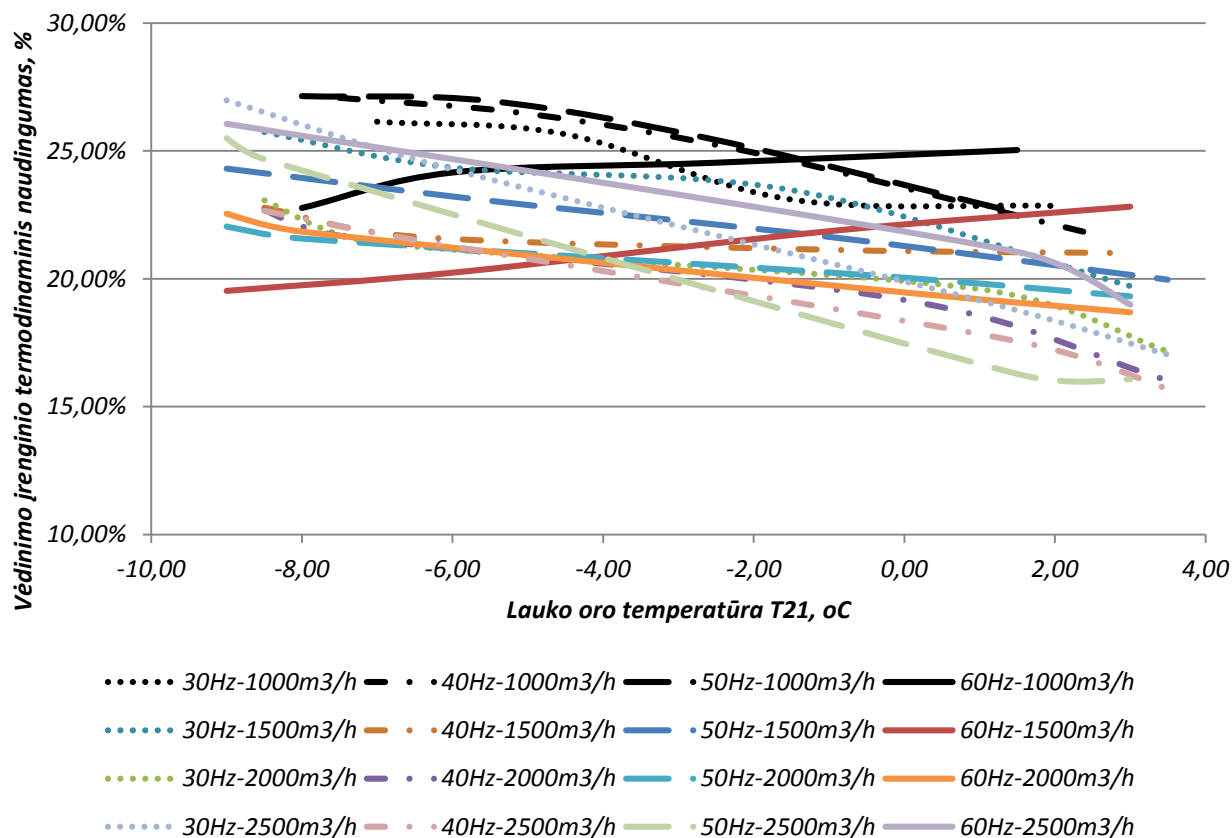
Galima sistemas vertinti kiekybinių kriterijumi, kas buvo atlikta prieš ir galima tą pačią sistemą ar jos posistemas vertinti kokybiškai. Kokybiškam vertinimui atliekama ekserginė analizė, kuri parodo ne energijos kiekius, kurie įėjo į sistemą ir iš jos išėjo, o kaip kokybiškai tie energijos srautai yra išnaudojami aplinkos atžvilgiu. Analizė atliekama jau prieš tai aprašytais žingsniais (49 psl.), vertinant, kad sistemos ribas kerta drėgnas oras.

Atskirai vertinama šilumos siurblio posistemė ir visa vėdinimo įrenginio sistema. Atlikus šilumos siurblio posistemės vertinimą (59 pav.), gauti rezultatai rodo, kad kylant oro kiekiui ir mažėjant kompresoriaus apsisukimų dažniui didėja ŠS posistemės ekserginis naudingumas. Tuo tarpu didėjant apsisukimų dažniui ir mažėjant oro kiekiui ekserginis naudingumas mažėja daugumoje atveju. Šios tendencijos pastebimos tiek energiniame tiek ekserginiame vertinime. Šilumos siurblio ekserginis naudingumas kinta nuo 23 % iki 36,6 %. Didžiausias šilumos siurblio naudingumas yra prie mažiausios lauko oro temperatūros (minus 9 °C), didžiausio oro kiekio (2500 m³/h) ir mažiausio kompresoriaus sukimosi dažnio (30 Hz).



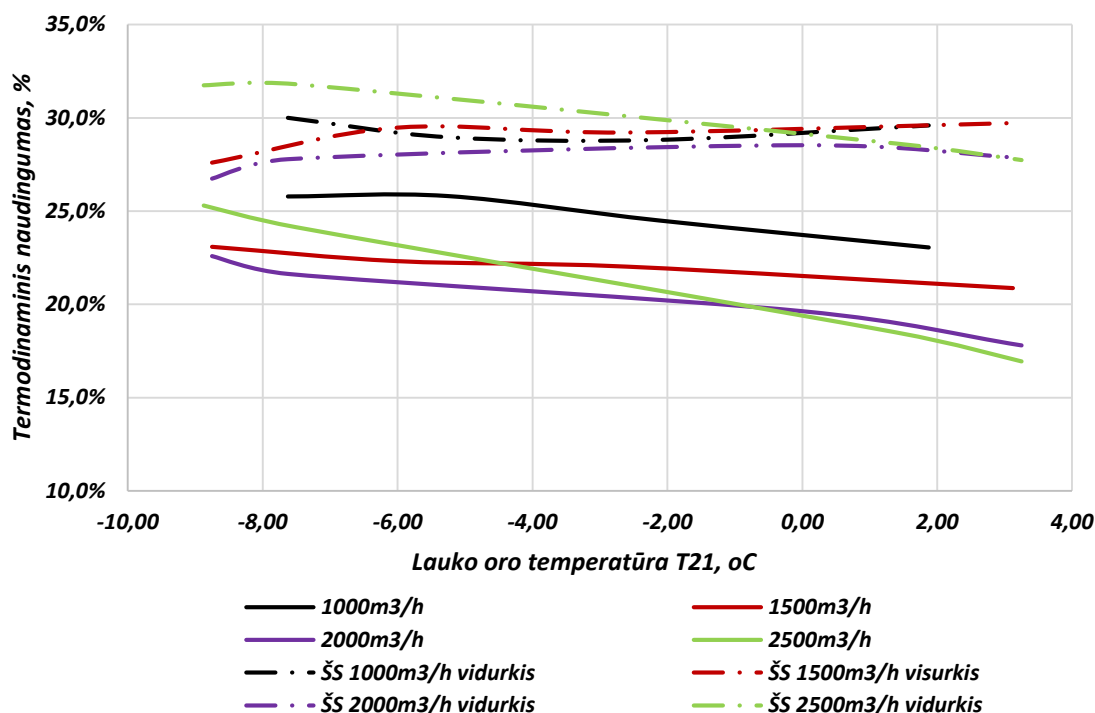
59 pav. ŠS termodinaminio naudingumo kitimas

Vertinant visą vėdinimo įrenginį, rezultatai parodė kiek kitokią ekserginio naudingumo kitimo tendenciją. Mažėjant kompresoriaus sukimosi dažniui ir oro kiekiui viso įrenginio ekserginis naudingumas kyla. Aukščiausias ekserginis efektyvumas pasiekiamas prie 1000 m³/h oro kiekio ir 50 Hz kompresoriaus sukimosi dažnio – 27,15 %. Atvirkščiai, negu tik šilumos siurblio ekserginis naudingumas.



60 pav. VĮ termodinaminio naudingumo kitimas

Apibendrinus gautus rezultatus buvo išvesti vidutiniai ekserginiai naudingumai ŠS ir vėdinimo įrenginiui (61 pav.). Pagal šiuos duomenis, matoma priešprieša tarp šilumos siurblio posistemės ir viso vėdinimo renginio sistemos. Pagal tai galima būtų daryti išvadą, kad vėdinimo įrenginio ir šilumos siurblio kombinacija ekserginio požiūriu nėra ideali. Todėl, kad vėdinimo įrenginys turi vieną ekserginio naudingumo kitimo tendenciją, o šilumos siurblys kitą. Taigi, norint turėti aukštesnį šilumos siurblio naudingumą, reikalingas minimalus darbas (šiuo atveju minimalus sukimosi dažnis), tačiau maksimalus oro kiekis t.y. maksimalus atgaunamos energijos potencialas. Tuo tarpu vėdinimo įrenginiui, reikia minimalaus oro kiekio, kadangi esant tokiam oro kiekiui rotacinis šilumokaitis atgauna sąlyginai didesnę dalį šilumos, o tai įtakoja vėdinimo įrenginio naudingumo kylimą.



61 pav. Ekserginio naudingumo palyginimas

Tačiau, net ir ekserginio naudingumo kylimo tendencijų nesutapymai parodo, kad šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje padidina vėdinimo įrenginio kokybinio energijos išnaudojimo potencialą. Jeigu įdėmiau pažvelgsime į rezultatus (61 pav.), pastebėsime, kad vėdinimo įrenginio ekserginis efektyvumas yra, o tai yra mažiau už ŠS ekserginį naudingumą. Tai parodo, kad šilumos siurblio posistemė, kelia visos vėdinimo įrenginio sistemos ekserginį naudingumą.

8.4.1. Rezultatų apibendrinimas

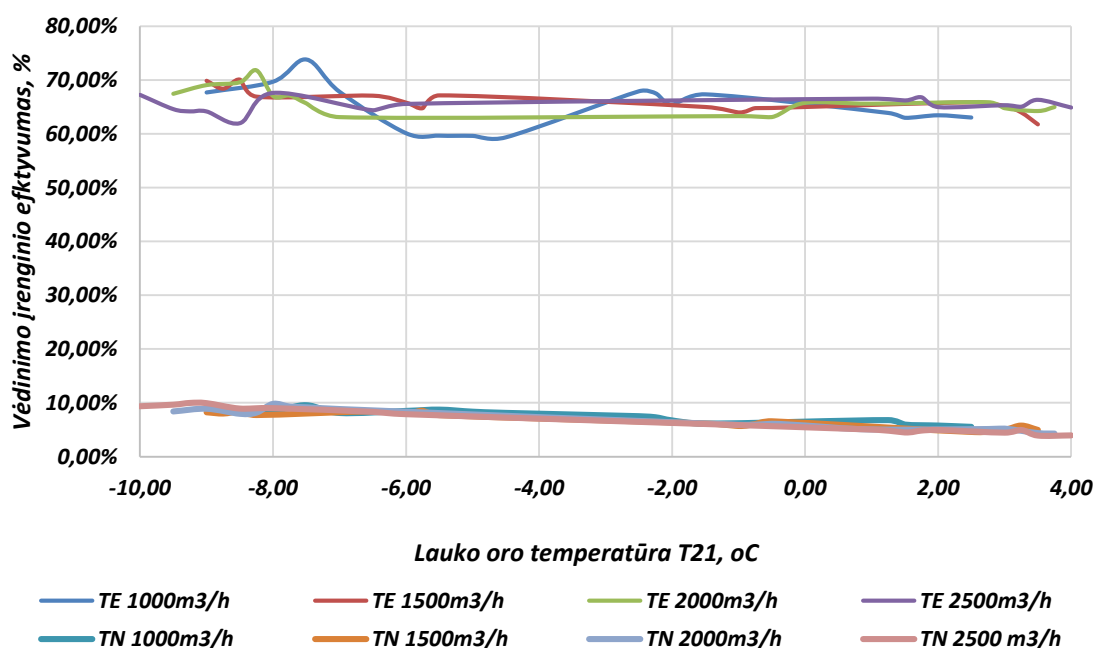
- Šilumos siurblio ekserginis naudingumas kinta nuo 23 % iki 36,6 %;
- Šilumos siurblio ekserginis naudingumas didėja – mažinant kompresoriaus sukimosi dažnį ir didinant pratekantį oro srautą;
- Vėdinimo įrenginio ekserginis naudingumas kinta nuo 15,7 % iki 27,2 %;
- Šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje didina įrenginio ekserginę naudingumą.

8.5. Jautrumo analizė

Dauguma pasakytų, kodėl reikia naudoti šilumos siurblių, kuris prie kai kurių parametrų negali užtikrinti reikiamos galios, prie aukštesnių temperatūrų gali išsijunginėti ir taip neigiamai veikti tiekiamo oro parametrus, jei galime naudoti elektrinius ar vandeninius šildytuvus. Tam tikslui, pagal eksperimentinius duomenis ir darant tam tikras prielaidas atlieku jautrumo analizę, pakeičiant šilumos siurblių elektriniu šildytuvu, priimant:

- Iš vėdinimo įrenginio skaičiavimų išmetamas šilumos siurblys ir nevertinamas jo atgaunamas šilumos kiekis;
- Elektrinis šildytuvas pašildo tiekiamą orą iki išmatuotų reikšmių;
- Lauko, vidaus temperatūros ir rotoriaus efektyvumas išlieka išmatuoti;
- Elektrinio šildytuvo sunaudojama energija yra 1,1 karto didesnė už jo atiduotą energiją.

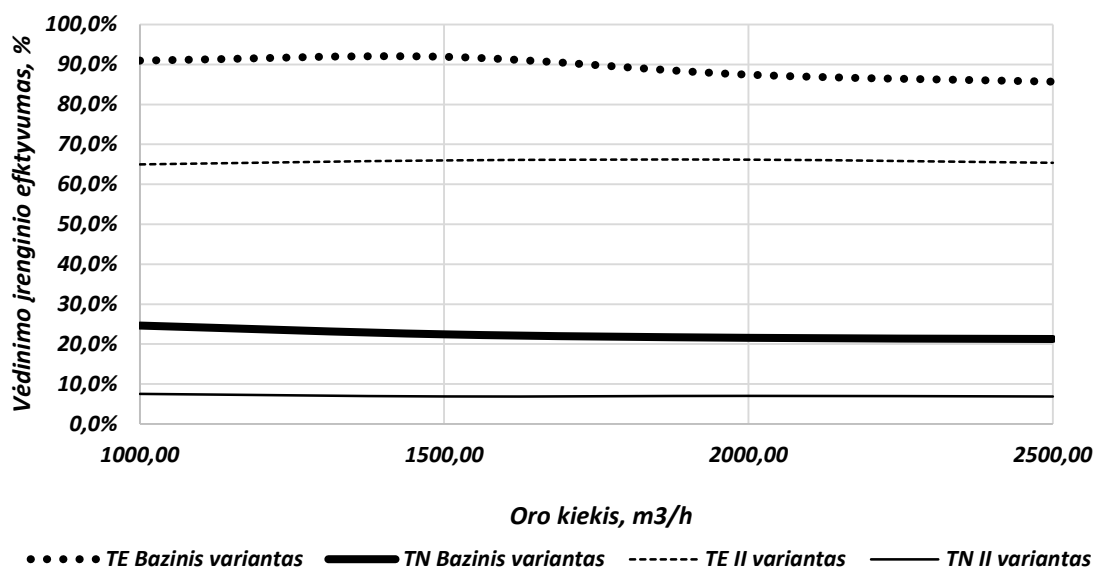
Duomenų apdorojimo lentelėse, pakeičiamos kai kurios grafos ir įstatomi elektrinio šildytuvo skaičiavimai. Atliekami termodinaminio efektyvumo (TE) ir termodinaminio naudingumo (TN) skaičiavimai.



62 pav. II varianto termodinaminio efektyvumo ir naudingumo rezultatai

Apdorojus rezultatus (62 pav.), galima daryti išvadas, jog TE ir TN beveik nekinta esant skirtingiems oro kiekiams. Pastebima tendencija, jog kylant lauko oro temperatūrai, mažėja TE ir TN reikšmės. Lyginant su baziniu variantu (vėdinimo įrenginys su integruotu šilumos siurbliu) TE kitimas yra priešingas, kadangi šilumos siurblys kylant lauko oro temperatūrai, didino viso įrenginio termodinaminį efektyvumą.

Siekiant palyginti abu nagrinėjamus variantus, TE ir TN reikšmės buvo suvidurkinamos oro kiekių intervaluose (63 pav.).



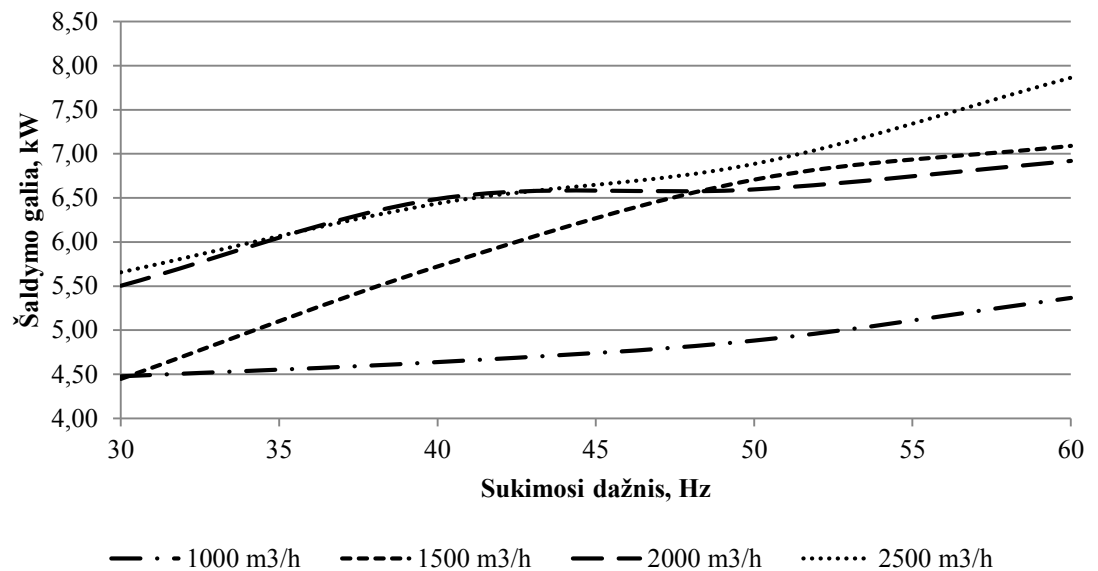
63 pav. Abiejų nagrinėjamų variantų palyginimas

Šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje yra termodinamiškai teisingas, efektyvesnis ir naudingesnis, nei elektrinio šildytuvo naudojimas. Šilumos siurblys ir elektrinis šildytuvas suteikia vienodą šilumos kiekį tiekiamam orui, taigi šių abiejų šilumos šaltinių palyginimas yra lygiavertis. Šildant šilumos siurbliu termodinaminis efektyvumas yra 20-30 % didesnis už įrenginio su elektriniu šildytuvu, o ekserginis naudingumas net iki 2,5 karto didesnis įrenginio su integruotu šilumos siurbliu. Taigi, šis įrenginys yra ne tik kiekybiškai (šilumos atgavimo požiūriu) efektyvesnis, bet ir kokybiškai naudingesnis.

8.6. Vėsinimo režimas

Šis įrenginys yra unikalus tuo, kad gali veikti dviem režimais – šildymo ir vėsinimo. Dėl trumpo bandymų laiko nebuvo surinkta pakankamai duomenų vėsinimo režimo analizei, tačiau pirminiai duomenys buvo gauti ir apdoroti. Oro temperatūrų matavimo taškai atitinka 7 – amę skyriuje pavaizduotus matavimo taškus „Komfovent Verso 10RHp“ įrenginio. Bandymo metu buvo stebimas galios kitimas keičiant kompresoriaus sukimosi dažnį ir įrenginio vėsinimo galimybes. Reikėtų atkreipti dėmesį, kad bandymų metu rotacinis šilumokaitis buvo išjungtas. Taigi, vėsinimo darbą atliko tik šilumos siurblys.

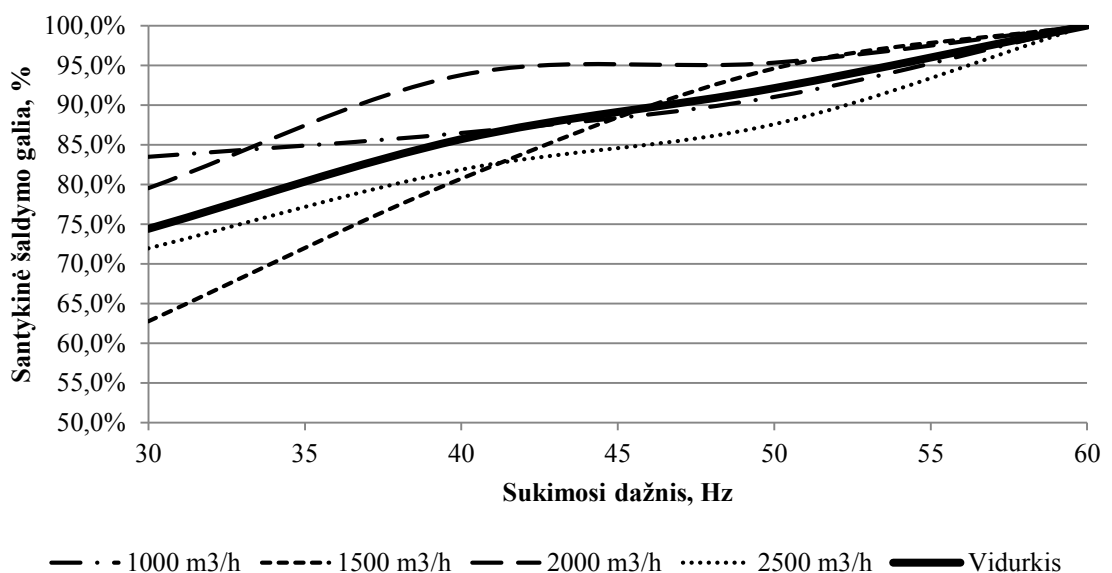
Didinant kompresoriaus sukimosi dažnį ir oro kiekį didėja šilumos siurblio atiduodama vėsinimo galia orui (64 pav.). Matoma, kad didinant oro kiekį didėja ir galios kitimo intervalas todėl, kad esant didesniam oro kiekiui darosi intensyvesni šilumos mainai tarp šaldymo agento ir fluído. Šiame matavime labiausiai išsiskyrė minimalus (1000 m³/h) oro kiekis. Anksčiau atlikti „Verso 60RHp“ tyrimai (58 psl.) tokių rezultatų neparodė. Tai galėjo nutikti dėl per mažo oro kiekio šiam įrenginiui – arba kitaip sakant per galingo šilumos siurblio esant minimaliam oro kiekiui ir palyginus žemai (vėsinimui) lauko oro temperatūrai.



64 pav. Vėsinimo galios priklausomybė nuo sukimosi dažnio ir oro kiekio

Žvelgiant į šiuos rezultatus vėl galima pabrėžti galios moduliacijos problemą vėdinimo įrenginiuose su šilumos siurbliais. Nors yra keičiamas kompresoriaus sukimosi dažnis, vėsinimo galios kitimo intervalas netenkina poreikių esant minimaliam oro kiekiui.

Siauriausias galios kitimo intervalas yra 1000 m³/h oro kiekio ribose, galios kitimas siekia tik 20 %. Tuo tarpu ryškiausias galios kitimas pastebėtas esant 1500 m³/h oro kiekiui, čia galia kinta 47 %.



65 pav. Santykinės vėsinimo galios priklausomybė nuo kompresoriaus sukimosi dažnio

Vidutinis kompresoriaus galios kitimas yra apie 25 %. Keičiant kompresoriaus sukimosi dažnį, vėsinimo režime mes galime atlikti galios moduliaciją 75-100 % ribose. Toks rezultatas netenkina prieš tai iškeltų uždavinių ir lūkesčių. Žvelgiant į prieš tai atliktus galios kitimo matavimus „Verso 60RHp“ įrenginyje, galios kitimas yra didesnis ~35 %.

Tačiau pateikti rezultatai yra termodinaminiai rodikliai, naudojant įrenginį, klientui yra svarbu tiekiamo oro parametrai ir suvartojama energija oro parametrų palaikymui. Tam tikslui buvo atlikti skirtingų taškų oro parametrų matavimai (66 pav.). Žvelgiant į šiuo duomenis galima pastebėti ir šaltnešio pusės darbo kitimus. Visų pirma galima pastebėti, jau anksčiau minėtą procesą, kad didinant oro kiekį per šalinamo oro šilumokaitį (kondensatorių vėsinimo metu) mažėja oro temperatūra už kondensatoriaus (T_{12}). Todėl galima daryti išvadą, kad taip pat mažėja kondensacijos slėgis šaltnešio darbo rate. Žvelgiant į tiekiamo oro temperatūrą (T_{22}) matome, kad didinant oro kiekį, ji aukštėja. Žinant, jog reikalinga elektros galia kompresoriaus darbui atlikti yra proporcinga atstumui tarp garinimo ir kondensavimosi linijų (6 pav.), galima daryti prielaidą, kad didinant oro kiekį ir mažinant kompresoriaus sukimosi dažnį – gauname didesnę šilumos siurblio efektyvumą, kas buvo patvirtinta matavimais ir skaičiavimais šildymo režime. Galima teigti, kad mažinant sukimosi dažnį ir didinant oro kiekį šildymo ir vėsinimo režimuose - didinam šilumos siurblio energijos transformacijos koeficientą.

Kita galios moduliavimo galimybė yra HGBP funkcija. Šildymo metu ji naudojama atitirpinimui ir siauram galios reguliavimui. Šios funkcijos panaudojimu vėsinimo režime, buvo siekta nustatyti kokia įtaka bus daroma šaltnešio ir oro parametrams. Bandymo metu buvo laikomas pastovus $1750 \text{ m}^3/\text{h}$ oro srautas ir nustatyta didžiausia galima kompresoriaus vėsinimo galia. Bandymo metu buvo atlikti 3 ciklai (66 pav., C) , kurių vieno ilgis buvo apie 8min. Tiek laiko trukdavo galios moduliavimo ciklas. Tiekiamo oro temperatūra pakildavo apie 3° atliekant HGBP. Tačiau atlikus 3 ciklus iš eilės pastebima tiekiamo oro temperatūros kylimo tendencija (66 pav.). Kas parodo, kad siekiant HGBP funkciją panaudoti, kaip galios reguliavimo įrankį, reikia keisti ciklų trukmę atsižvelgiant į vėsos poreikį. Tai atlikus, galima sėkmingai kelių laipsnių diapazone valdyti tiekiamo oro temperatūrą neišjungiant sistemos. Žinoma, tokio principo taikymas yra tam tikras energijos eikvojimas. Tačiau tai taikyti yra geriau, negu visai išjunginėti įrenginį.

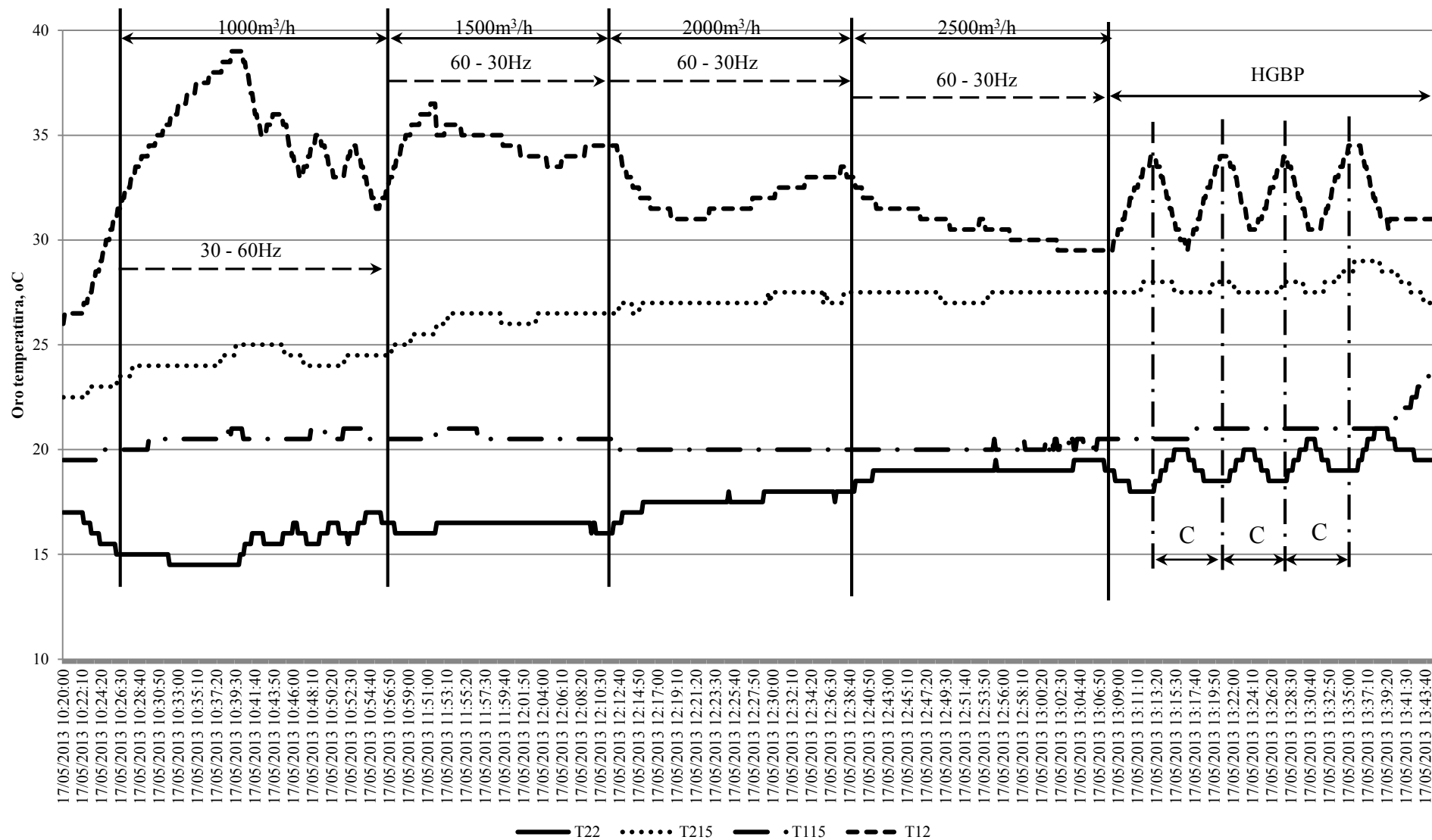
Tiekiamo oro temperatūros palaikymas yra tik viena problema su kuria susidurta bandant šiuos įrenginius vėsinimo režime. Kita problema yra per aukštas kondensacijos slėgis. Tai sukelia aukštos temperatūros oro srautas ištraukiamas iš patalpų (T_{115}). Oro srautas nesugeba atvėsinti kondenserio, tuomet kyla kondensavimosi slėgis ir mažėja efektyvumas. Pasiekus kritinį slėgį yra nutraukiamas įrenginio darbas. Šią priežastį sukelia rotacinis šilumokaitis, kuris atgauna šalinamo oro vėšą ir išmeta šiltesnį orą, kuris ir sukelia kondensacijos slėgio padidėjimą. Kad to nenutiktų galima sumažinti kompresoriaus sukimosi dažnį, kas sumažina kondensavimosi slėgį, arba jei to negana galimas reguliavimas su HGBP. Matyti (66 pav.), kad atliekant HGBP oro temperatūra po kondenserio (T_{12}) sumažėja iki 5°C , kas leidžia daryti išvadą, kad ir kondensacijos temperatūrą tokiu būdu galime sumažinti 5°C . Tačiau ir čia pastebima tendencija, kad atliekant šį veiksmą cikliškai, ciklas po ciklo

išmetamo oro temperatūra auga, analogiškai tiekiamo oro temperatūrai. Tačiau, kaip ir minėta, ši problema gali būti išspręsta atliekant ciklo korekcijas pagal užduotus parametrus.

Nereikėtų įsivaizduoti šios funkcijos panaudojimo kaip ilgalaikės priemonės. Ji galėtų būti naudojama tam tikrą laiką, kad išvengtų staigios įrenginio reakcijos į trumpalaikius pasikeitimus oro parametruose. Ilgalaikis tokios priemonės taikymas sistemoje yra neefektyvus.

8.6.1. Rezultatų apibendrinimas

- „Komfovent Verso 10RHp“ įrenginyje įmontuotas šilumos yra per galingas įrenginiui veikiant minimaliu oro kiekiu vėsinimo režime;
- Galimas kompresoriaus galios reguliavimas keičiant sukimosi dažnį 75-100 %;
- Galima panaudoti HGBP funkciją galios moduliavimui.



66 pav. „Verso 10RHp“ darbo specifika vėsavimo režime

IŠVADOS

Apžvelgus visą darbą būtų galima suformuluoti šiuos pagrindinius rezultatus ir pastebėjimus:

1. Atlikus literatūros apžvalgą pasigesta vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais tyrimų;
2. Reikia optimizuoti šilumos siurblių ir kitus vėdinimo įrenginyje esančius šilumokaičius tarpusavyje pagal klimatinės zonas. Parinktas galingesnis kompresorius padidina metinį energijos perteklių 2 kartus, nuo 5,6 MWh iki 11 MWh. Tuo tarpu energijos trūkumas sumažėja tik nuo 1,5 MWh iki 0,51 MWh. Turint tokį energijos perteklių, kompresorius išsijunginės dvigubai dažniau ir neleis užtikrinti pastovesnių tiekiamo oro sąlygų;
3. Ištyrus „Verso 60RHp“ įrenginį nustatyta, kad šilumos siurblio šildymo ir vėsinimo galias galingesniuose įrenginiuose galima reguliuoti 60-100% ribose, keičiant sukimosi dažnį 30-60 Hz ribose. Toks pat tyrimas atliktas su „Verso 10RHp“ įrenginiu, parodė, kad galia šiame įrenginyje kito 75-100% procentų ribose;
4. Mažinant sukimosi greitį, mažėja kondensacijos slėgis. Toks pat rezultatas gaunamas didinant pratekančio oro srautą per kondensatorių;
5. Naudojamų kompresorių galios reguliavimas keičiant sukimosi dažnį sukėlė problemų. Dėl šios priežasties buvo sugadinti du kompresoriai;
6. Didėjant pratekančio oro kiekiui per garintuvą (šalinamo oro šilumokaitį) šildymo metu – spartėja šerkšno susidarymo procesas. Taip pat šis procesas yra spartesnis esant pakartotinam užšalimui po prieš tai vykusio atitirpinimo;
7. Gauta, kad mažinant pratekančio oro srautą ir kompresoriaus sukimosi dažnį didėja šilumos siurblio energijos transformacijos koeficientas. Nustatytas šilumos siurblio efektyvumas, įvertinus ventiliatorių apkrovos padidėjimą, yra nuo 2,41 iki 6.
8. Bandymo metu gauta, kad vėdinimo įrenginio termodinaminis efektyvumas yra 75-95 % ribose priklausomai nuo lauko oro temperatūros ir oro kiekių;
9. Nustatytas VĮ temperatūrinis efektyvumas kinta nuo 90 % iki 182;
10. Atlikta ekserginė analizė parodė, kad VĮ ekserginis naudingumas yra nuo 15,7 iki 27,2 %, o ŠS naudingumas, tokiomis pačiomis sąlygomis, kinta nuo 23 iki 36,6 %, priklausomai nuo oro kiekio ir lauko oro temperatūros. Šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo įrenginyje padidina įrenginio ekserginį naudingumą;
11. Jautrumo analizė parodė neigiamą įtaką vėdinimo įrenginio efektyvumui ir naudingumui, pakeitus šilumos siurblių elektriniu šildytuvu. Vėdinimo įrenginio termodinaminis efektyvumas vidutiniškai sumažėjo apie 20 %, o ekserginis naudingumas sumažėjo 15 % (beveik du kartus) šilumos siurblio variantu;

12. Vėsinimo režimo bandymai atskleidė, kad integruoto šilumos siurblio pagalba galima ataušinti tiekiamą oro srautą 6-8 °C, priklausomai nuo oro kiekio;
13. Galios moduliacijai šildymo ir vėdinimo režimuose galima panaudoti HGBP funkciją. Sukūrus valdymo algoritmą galimas cikliškas tiekiamo oro temperatūros reguliavimas;

Dalyvaujant įrenginio kūrimo, gaminimo ir bandymo procese, galima susidaryti bendrą nuomonę apie šios sistemos veikimą, teigiamus ir neigiamus jos bruožus.

7 lentelė. Vėdinimo įrenginio apibendrinimas

<i>Teigiama</i>	<i>Neigiama</i>
• 4 skirtingos funkcijos viename įrenginyje – vėdinimas, aukšto efektyvumo šilumos atgavimas, šildymas ir oro kondicionavimas; • Ergonomika;	• Kol kas per maža galios moduliacija plačiame temperatūrų ir oro kiekių kitimo intervale; • Šerkšno susidarymo problemos, mažinančios šilumos siurblio efektyvumą;

Apibendrinant darbą galima teigti, kad šilumos siurblio panaudojimas vėdinimo agregate - perspektyvi mintis. Pasiekiamas aukštas termodinamis efektyvumas, kas reiškia gerą energijos atgavimą ir energijos vartojimo didinimą pastatuose. Dėka konstrukcijos, esant poreikiui, įrenginį galima naudoti kaip oro kondicionierių. Mano nuomone, šis įrenginys parodo puikų pavyzdį, kaip visiškai atskiri įrenginiai gali būti suliejami į vieną bendrą visumą - sistemą, siekiant bendro tikslo - energijos vartojimo efektyvumo.

Reikalingi patobulinimai ir tolimesnių tyrimų gairės

Atlikti bandymai parodė, kad reikalingi sekantys patobulinimai tolimesniam įrenginio, kaip produkto, vystymui:

1. Apšalimo formavimosi algoritmo tobulinimas atliekant matavimus platesniame temperatūrų ir drėgmės intervale;
2. Šalinamo oro šilumokaičio konstrukcijos pakeitimas mažinant ledo formavimosi tikimybę ant garintuvo;
3. Reikalingas šalinamo oro šilumokaičio plokštelių medžiagos pakeitimas į drėgmę atstumiančią – hidrofobinę dangą;
4. Šilumos siurblio hidraulinio kontūro tobulinimas padidinant tepalo grąžinimą į kompresorius arba kitų gamintojų alternatyvų ieškojimas;

Šis darbas yra kaip įžanga į vėdinimo įrenginių su integruotais šilumos siurbliais tyrinėjimą Lietuvoje. Atrinkta tam tikra metodika, kurios pagalba galima analizuoti tokius įrenginius. Tokių įrenginių tyrinėjimas yra platus ir įdomus. Iš atliktų darbų ir matomų problemų galima rekomenduoti tolimesnes tokių įrenginių tyrimų gaires:

1. Sezoninio šilumos siurblio ir vėdinimo įrenginio efektyvumo ir naudingumo nustatymas realiomis sąlygomis įvertinant atitirpinimo režimo įtaką;
2. Detalesnis apšalimo proceso nagrinėjimas ir tinkamiausio padengimo ieškojimas garintuvo plokštelėms;
3. Ekonominė analizė lyginant nagrinėjamus vėdinimo įrenginius su šilumos siurbliais su kitais panašios paskirties įrenginiais;
4. Kompresorių su BLDC varikliais nagrinėjimas;
5. Kompresoriaus skleidžiamos šilumos įtaką vėdinimo įrenginio darbui. Geriausios vietos, šilumos siurblio montavimui, nustatymas.

NAUDOTA LITERATŪRA

1. ALBERT, M. et al. Prediction of ice and frost formation in the fin tube evaporators for air/water heat pumps. In *9th International IEA Heat Pump Conference* [interaktyvus]. 2008. p. 12. [žiūrėta 2013-06-02]. Prieiga per internetą: <http://www.hslu.ch/t-albert2008_ieahpconference_prediction_frost_formation.pdf>.
2. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, I. *2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. 2009. .
3. BAREIKA, P. et al. Ventilation heat recovery using air source heat pump analyzis. In *INZINERIA SRODOWISKA - MLODYM OKIEM*. 2012. Vol. 1, p. 175–178. .
4. BIEKŠA, D. *Pastato inžinerinių sistemų procesų integravimo vertinimas taikant eksergijos kriterijų*. [s.l.]: Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2008. .
5. BUSATO, F. et al. Two years of recorded data for a multisource heat pump system: A performance analysis. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2013. Vol. 57, no. 1-2, p. 39–47. [žiūrėta 2013-06-02]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431113002494>>.
6. CAI, L. et al. Study on restraining frost growth at initial stage by hydrophobic coating and hygroscopic coating. In *Energy & Buildings* [interaktyvus]. 2011. Vol. 43, no. 5, p. 1159–1163. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.012>>.
7. CHENGQIN, R. et al. Principles of exergy analysis in HVAC and evaluation of evaporative cooling schemes. In *Building and Environment* [interaktyvus]. 2002. Vol. 37, no. 11, p. 1045–1055. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132301001044>>.
8. CUEVAS, C. - LEBRUN, J. Testing and modelling of a variable speed scroll compressor. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2009. Vol. 29, no. 2-3, p. 469–478. [žiūrėta 2013-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108001397>>.
9. DODOO, A. et al. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings. In *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2011. Vol. 43, no. 7, p. 1566–1572. [žiūrėta 2013-04-16]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811000636>>.
10. FEHRM, M. et al. Exhaust air heat recovery in buildings. In [interaktyvus]. 2002. Vol. 25, p. 439–449. Prieiga per internetą: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700701000354>>.
11. FRACASTORO, G.V. - SERRAINO, M. Energy analyses of buildings equipped with exhaust air heat pumps (EAHP). In *Energy and Buildings* [interaktyvus]. 2010. Vol. 42, no. 8, p. 1283–1289. [žiūrėta 2012-10-21]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778810000630>>.
12. FRIISVOLD, J.I. *Theoretical Comparative Case Study of two Geothermal Heat Pumps . One with Capacity Control and one with on / off Control* [interaktyvus]. [s.l.]: Aalborg University, 2011. Prieiga per internetą:

<http://projekter.aau.dk/projekter/files/53072316/20.06_rev_I_Thesis_for_the_degree_of_Master_of_Science._Johan_I._Friisvold.pdf>.

13. GASSER, L. et al. Exergy efficient heating systems with capacity controlled air/water heat pumps. In [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.hslu.ch/t-gasser2010_clima_heating_systems_with_capacity_controlled.pdf>.

14. GASSER, L. et al. [interaktyvus]. .2008. Prieiga per internetą: <www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file...pdf...pdf>.

15. GURSKIS, V. et al. *Efektivaus energijos vartojimo pastatuose vadovas* [interaktyvus]. Kaunas, 2008. ISBN 9789955751205.

16. HUANG, D. et al. Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump. In *Applied Energy* [interaktyvus]. 2009. Vol. 86, no. 9, p. 1697–1703. [žiūrėta 2012-10-21]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261908003012>>.

17. HUANG, H. et al. An experimental study on variable air volume operation of ducted air-conditioning with digital scroll compressor and conventional scroll compressor. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2008. Vol. 28, no. 7, p. 761–766. [žiūrėta 2013-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431107002177>>.

18. YAQUB, M. et al. Performance evaluation of hot-gas by-pass capacity control schemes for refrigeration and air-conditioning systems. In *Energy* [interaktyvus]. 2000. Vol. 25, no. 6, p. 543–561. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544200000049>>.

19. YUN, R. et al. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate / lisation de la formation de givre et des propriétés du Mode / coulement d'air au-dessus d'une plaque givre produit par l' e plane. In. 2002. Vol. 25, p. 362–371. .

20. JAKŠTAS, A. *Energijos transformavimo mašinos . Mokomoji knyga .* Vilnius: VGTU leidykla TECHNIKA, 2000. .

21. JUODIS, E. *Vėdinimas*. Vilnius: VGTU leidykla TECHNIKA, 2008. ISBN 978-9955-28-370-6.

22. LEE, H. et al. Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2004. Vol. 47, no. 22, p. 4881–4893. [žiūrėta 2012-12-04]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001793100400211X>>.

23. LEE, Y.B. - RO, S.T. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. In *Experimental Thermal and Fluid Science* [interaktyvus]. 2005. Vol. 29, no. 6, p. 685–696. [žiūrėta 2012-12-04]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177704001359>>.

24. LI, W. Simplified steady-state modeling for variable speed compressor. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2013. Vol. 50, no. 1, p. 318–326. [žiūrėta 2013-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431112005649>>.

25. MISEVIČIŪTĖ, V. *Procesų integravimo vėdinimo įrenginiuose galimybių vertinimas* [interaktyvus]. [s.l.]: Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2011. Prieiga per internetą: <http://vddb.laba.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2012~D_20120206_165431-00116/DS.005.0.01.ETD>.
26. MOALLEM, E. et al. Experimental measurements of the surface coating and water retention effects on frosting performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems. In *Experimental Thermal and Fluid Science* [interaktyvus]. 2012. Vol. 39, p. 176–188. [žiūrėta 2012-11-18]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177712000337>>.
27. NDIAYE, D. - BERNIER, M. Modelling the bleed port of a thermostatic expansion valve. In *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2009. Vol. 32, no. 5, p. 826–836. [žiūrėta 2013-06-02]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700708002363>>.
28. NGUYEN, A. et al. Experimental study of sensible heat recovery of heat pump during heating and ventilation. In *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2005. Vol. 28, no. 2, p. 242–252. [žiūrėta 2012-10-21]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700704001550>>.
29. ORME, M. Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures. In. 2001. Vol. 33. .
30. PARK, C. et al. Mass flow characteristics and empirical modeling of R22 and R410A flowing through electronic expansion valves. In *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2007. Vol. 30, no. 8, p. 1401–1407. [žiūrėta 2012-10-21]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700707000588>>.
31. REN, C.Q. et al. ANALYSIS OF EXERGY OF MOIST AIR AND ENERGY SAVING POTENTIAL IN HVAC BY EVAPORATIVE COOLING OR ENERGY RECOVERY. In. 2001. Vol. 2, no. 4, p. 113–117. .
32. SAKELLARI, D. - LUNDQVIST, P. Modelling and simulation results for a domestic exhaust-air heat pump heating system. In *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2005. Vol. 28, no. 7, p. 1048–1056. [žiūrėta 2013-06-02]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700705000629>>.
33. SALAZAR-PEREYRA, M. Energy and Exergy Analysis of Moist Air for Application in Power Plants. In *Energy and Power Engineering* [interaktyvus]. 2011. Vol. 03, no. 03, p. 376–381. [žiūrėta 2013-04-16]. Prieiga per internetą: <<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/epe.2011.33048>>.
34. SHAO, S. et al. Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data. In *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2004. Vol. 27, no. 8, p. 805–815. [žiūrėta 2013-04-20]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700704000477>>.
35. TSO, C.P. et al. An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2006. Vol. 26, no. 1, p. 111–120. [žiūrėta 2012-12-04]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431105001316>>.

36. TU, Q. et al. Experimental study on multi-split air conditioner with digital scroll compressor. In *Applied Thermal Engineering* [interaktyvus]. 2011. Vol. 31, no. 14-15, p. 2449–2457. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.010>>.
37. XIAO-XIA, X. et al. Exergy Analysis of Energy Consumption for Primary Return Air Conditioning System. In *Physics Procedia* [interaktyvus]. 2012. Vol. 24, p. 2131–2137. [žiūrėta 2013-04-16]. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212003562>>.
38. ZUBAIR, S.M. - KHAN, S.H. Second Law based thermodynamic analysis of hot-gas by-pass capacity control schemes for refrigeration and air-conditioning systems. In *Energy* [interaktyvus]. 1995. Vol. 20, no. 6, p. 483–493. Prieiga per internetą: <[http://www.ewp.rpi.edu/hartford/users/papers/engr/ernesto/huntek2/proj/Resources \(previous deliverables-Resources\)/Articles-Publications Cole Library/capacity controls.pdf](http://www.ewp.rpi.edu/hartford/users/papers/engr/ernesto/huntek2/proj/Resources%20(previous%20deliverables-Resources)/Articles-Publications%20Cole%20Library/capacity%20controls.pdf)>.
39. ŽĖKAS, V. *REALIAI VEIKIANČIO ŠILUMOS SIURBLIO SEZONINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS* [interaktyvus]. [s.l.]: Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009. Prieiga per internetą: <http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2009~D_20090611_181315-87002/DS.005.0.01.ETD>.

Reglamentuojantys dokumentai ir direktyvos

40. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA „2010/30/ES dėl su energija susijusių gaminių suvartojamos energijos ir kitų išteklių nurodymo ženklinant gaminį ir apie jį pateikiant standartinę informaciją“, 2010m;
41. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA „2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo“, 2010m;
42. LST EN 14511 “Oro kondicionieriai, skysčio aušinimo įrenginiai ir šilumos siurbLIAI su elektriniais kompresoriais patalpoms šildyti ir vėsinti”, 2008m.
43. Statybos normos „Statybinė klimatologija. RSN 156-94.“ *Valstybės žinios*, Nr. 24-394, 1994;

PRIEDAI