



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Termofikacinėje elektrinėje susidarančios atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais galimybių analizė

Baigiamasis magistro projektas

Gvidas Laugalis
Projekto autorius

doc. dr. Algimantas Balčius
Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Termofikacinėje elektrinėje susidarančios atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais galimybių analizė

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Gvidas Laugalis

Projekto autorius

doc. dr. Algimantas Balčius

Vadovas

prof. dr. Vytautas Dagilis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Gvidas Laugalis

Termofikacinėje elektrinėje susidarancios atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais galimybių analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Gvidas Laugalis

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui	Gvidui Laugaliui
Projekto tema	Termofikacinėje elektrinėje susidarančios atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais galimybių analizė (<i>lietuvių kalba</i>) Feasibility Analysis of Waste Heat Recovery in Cogeneration Plant Using Heat Pumps (<i>anglų kalba</i>)
Darbo tikslas ir uždaviniai	Darbo tikslas – įvertinti techniniu, ekonominiu ir aplinkosauginiu požiūriais termofikacinės elektrinės atliekinės šilumos atgavimo absorbciniais ir kompresoriniais šilumos siurbliais galimybes. Uždaviniai: <ol style="list-style-type: none">1. Atlikti atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais literatūros analizę ir išnagrinėti šilumos siurbliuose naudojamus darbo agentus;2. Pasiūlyti techninius sprendimus atliekinės šilumos atgavimui;3. Atlikti siūlomų sprendimų termodinaminę analizę;4. Atlikti siūlomų techninių sprendimų ekonominį ir aplinkosauginį vertinimą.
Reikalavimai ir sąlygos	Baigiamasis projektas turi atitikti KTU metodiniuose nurodymuose pateiktus reikalavimus.
Vadovas	doc. dr. Algimantas Balčius

2021-02-18

Laugalis, Gvidas. Termofikacinėje elektrinėje susidarančios atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais galimybių analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Algimantas Balčius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: atliekinė šiluma, atliekinės energijos atgavimas, absorbciniai šilumos siurbliai, kompresoriniai šilumos siurbliai, termofikacinė elektrinė, ličio bromidas, R1234ze.

Kaunas, 2021. 59 p.

Santrauka

Energijos vartojimo efektyvumo didinimas atgaunant atliekinę energiją yra energetiškai racionalus sprendimas. Kai turimas atliekinės šilumos kiekis yra nepakankamai aukšto potencialo jį atgauti šilumokaičiais, dažniausiai pasitelkiami šilumos siurbliai, kurie padeda efektyviai išnaudoti turimą atliekinę šilumą.

Šiame baigiamajame magistro projekte atliekama galimybių analizė pritaikyti šilumos siurblius termofikacinėje elektrinėje susidariusiai atliekinei šilumai atgauti. Nagrinėjant mokslinę literatūrą, vertinant techninius, ekonominius bei aplinkosauginius aspektus, darbe lyginamos absorbcinių ir kompresorinių šilumos siurblių taikymo galimybės. Atliekant investicijų į šilumos siurblius ekonominę analizę įvertinama skirtingų projektinių parametru įtaka investicijų atsiperkamumui. Darbe vertintos aštuonios skirtingos investicinės sąlygos: greičiausiai, per 1,49 metus, atsiperkantis variantas – kompresorinis šilumos siurblys dirbantis 8000 valandų per metus, projektui gavus 30 % paramą. Lėčiausiai, per 10,61 metus, atsiperka absorbcinis šilumos siurblys įsigytas be paramos ir dirbantis tik 3000 valandų per metus. Atlikti investicinio projekto išlaidų ir pajamų balanso skaičiavimai parodė, jog daugiausiai įtakos nagrinėjamų šilumos siurblių atsiperkamumui turi: investicijų dydis, gautos paramos dydis, gamtinių dujų ir elektros kainos.

Laugalis, Gvidas. Feasibility Analysis of Waste Heat Recovery in Cogeneration Plant Using Heat Pumps. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Algimantas Balčius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering.

Keywords: waste heat energy, waste heat recovery, absorption heat pump, compression heat pump, cogeneration plant, lithium bromide, R1234ze.

Kaunas, 2021. 59 p.

Summary

Increasing energy efficiency by recovering waste energy is an energy efficient solution. When the amount of waste heat available is insufficient or not hot enough to recover it through heat exchangers, heat pumps are being used to efficiently make use of available waste heat.

The aim of this Master Thesis is to investigate waste heat recovery possibilities in cogeneration plant, using heat pumps. Analyzing scientific literature, evaluating technical, economic and environmental aspects, possibilities of application of absorption and compressor heat pumps are analyzed and compared. The economic analysis of investments in heat pumps assessed the impact of different project parameters on investment payback time. This study evaluates eight different investment conditions: the fastest return of investment (in 1.49 years) achieved with compression heat pump operating 8000 hours per year, when project received 30% of invested amount as financial aid. The slowest return of investment (in 10.61 years) observed with absorption heat pump operating 3000 hours per year and acquired without any financial aid. Investment calculations of the expenditure and income balance showed that the profitability of the analyzed heat pumps is mainly influenced by: the amount of investment, the amount of financial aid, natural gas and electricity prices.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	9
Paveikslų sąrašas.....	10
Įvadas	11
1. Tiriama objekto charakteristikos ir atliekinės šilumos potencialas	12
1.1. Elektrinės atsinaujinančios energijos energetinis blokas	12
1.1.1. Turbinos pagalbinių įrenginių	12
1.2. Atliekinės šilumos potencialas.....	14
1.3. Atliekinės šilumos panaudojimas centralizuotam šildymui	17
2. Literatūros analizė	19
3. Atliekinės šilumos atgavimas absorbciniu šilumos siurbliu.....	23
3.1. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo principas	23
3.2. Darbinių šaldymo agentų palyginamoji analizė.....	24
3.3. Technologinis sprendimas atliekinės šilumos atgavimui absorbciniu šilumos siurbliu.....	27
3.4. AŠS šiluminės galios ir srautų balanso skaičiavimai	28
4. Atliekinės šilumos atgavimas kompresoriniu šilumos siurbliu.....	31
4.1. Kompresorinio šilumos siurblio veikimo principas	31
4.2. Darbinių šaldymo agentų palyginamoji analizė.....	32
4.3. Technologinis sprendimas atliekinės šilumos atgavimui kompresoriniu šilumos siurbliu	34
4.4. KŠS šiluminės galios ir srautų balanso skaičiavimai	35
5. Ekonominė analizė	38
5.1. Investicijos dydis.....	38
5.2. Finansinė parama	38
5.3. Banko paskolos dydis	39
5.4. Pagrindinės prielaidos ekonominei analizei	39
5.5. Šilumos siurblių eksploatavimo kaštai	40
5.5.1. Patiriamos išlaidos dėl absorbcinio šilumos siurblio įrengimo	40
5.5.2. Patiriamos išlaidos dėl kompresorinio šilumos siurblio įrengimo	40
5.6. Papildomos pajamos iš šilumos siurbliais atgautos atliekinės šilumos.....	40
5.6.1. Pajamos dėl absorbcinio šilumos siurblio įrengimo.....	40
5.6.2. Pajamos dėl kompresorinio šilumos siurblio įrengimo	41
5.7. Šilumos siurblių išlaidų ir pajamų balansas	42
5.8. Palyginamoji ekonominė AŠS ir KŠS analizė.....	44
5.9. Investicijų jautrumo analizė.....	45
6. Aplinkosauginė šilumos siurblių analizė	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas.....	50
Priedai	53
1 priedas. Autoriaus publikacijos.....	53
2 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS be paramos, 3000 darbo valandų.....	54
3 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS su parama, 3000 darbo valandų.....	55
4 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS su parama, 8000 darbo valandų.....	56

5	priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS be paramos, 3000 darbo valandų.....	57
6	priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS su parama, 3000 darbo valandų.....	58
7	priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS su parama, 8000 darbo valandų.....	59

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų AŠS naudojamų fluidų charakteristikų lyginamoji analizė [11].....	26
2 lentelė. AŠS darbinių agentų savybių palyginimas [11].....	27
3 lentelė. Skirtingų šaldymo agentų parametrai cikle –15/30 °C [19].....	33
4 lentelė. Pagrindinės R134a ir R1234yf šaldymo agentų savybės [20]	33
5 lentelė. Pagrindiniai AŠS ir KŠS projektų finansiniai rodikliai, tūkst. EUR.....	44
6 lentelė. Šilumos siurbliais pakeičiant dujinius katilus mažinami CO ₂ išmetimų kiekiai	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Turbinos pagalbinių įrenginių sistemas aušinančio skysčio uždara cirkuliacinė sistema	12
2 pav. Tepimo alyvos talpa, siurbliai, filtrai, šilumokaitis	13
3 pav. Turbinos aušinimo cirkuliacinės sistemos ventiliatoriai šalinantys atliekinę šilumą į aplinką	13
4 pav. Turbinos generatoriaus oro aušintuvas.....	14
5 pav. Aušalo temperatūra prieš aušintuves (17 min. laikotarpis)	15
6 pav. Aušalo temperatūra prieš aušintuves (24 h laikotarpis)	15
7 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2020 m. liepos 7 d. (lauko temperatūra 25 °C)	16
8 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2021 m. sausio 26 d. (lauko temperatūra 0 °C)	16
9 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2021 m. balandžio 27 d. (lauko temperatūra 11 °C)	16
10 pav. Grįžtančio vandens prieš kondensacinį dūmų ekonomizerį (KDE) poveikis bendram katilo ir KDE efektyvumui [4]	17
11 pav. Vienos šildymo sezono paros grįžtančio vandens temperatūros grafikas	18
12 pav. 2020 metų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros grafikas	18
13 pav. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo principas [10].	23
14 pav. Vandens – ličio bromido mišinio kristalizacijos temperatūros priklausomybė nuo tirpalo koncentracijos [14].	25
15 pav. Atliekinės energijos atgavimui termofikacinėje elektrinėje įrengto absorbcinio šilumos siurblio technologinė schema	28
16 pav. AŠS principinė technologinė schema su šilumos ir srautų balanso skaičiavimų rezultatais	30
17 pav. Vienos pakopos garinio kompresorinio šilumos siurblio ciklas ir p–h diagrama.....	31
18 pav. Termofikacinės elektrinės atliekinės šilumos energijos atgavimui įrengto kompresorinio šilumos siurblio technologinė schema	35
19 pav. R1234ze šilumos siurblio ciklo diagrama p–h koordinačių ašyse [21].	36
20 pav. KŠS principinė technologinė schema su šilumos ir srautų balanso skaičiavimų rezultatais	37
21 pav. AŠS išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai	43
22 pav. KŠS išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai	43
23 pav. Investicijos į AŠS FVGN priklausomybė nuo investicijų padidėjimo.....	46
24 pav. Investicijos į KŠS FVGN priklausomybė nuo investicijų padidėjimo.....	46

Įvadas

2012 m. priimtoje Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje 2012/27/ES [1], skirtoje energijos vartojimo efektyvumui skatinti, iškeltas tikslas iki 2020 metų 20 % nuo ankstesnių prognozių, o po to ir toliau, mažinti pirminės energijos suvartojimą. Šios direktyvos tikslai perkelti į 2016 m. priimtą Lietuvos Respublikos energijos vartojimo efektyvumo didinimo įstatymą [2], skatinantį efektyviai gaminti, tiekti ir vartoti energiją.

Kadangi Lietuvoje, kaip ir Europoje, plačiai išvysčius biokuro bei atliekų kogeneracines elektrines ir katilines, kuriose daugeliu atveju jau įrengti kondensaciniai dūmų ekonomizeriai (KDE), todėl intensyviai ieškoma naujų būdų, kaip dar labiau padidinti bendrą katilinių ir kogeneracinių elektrinių efektyvumą. Vienas tokių būdų – Danijos ir Švedijos centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) įmonėse plačiai taikomi absorbciniai šilumos siurbliai (AŠS). Šiais įrenginiais dažniausia siekiama dar labiau ataušinti iš katilo išeinančius ir kondensacinį dūmų ekonomizerį praėjusius dūmus, taip atgaunant dar daugiau degimo produktų slaptosios kondensacijos šilumos.

Absorbciniams šilumos siurbliams pasiteisinant CŠT įmonėse, jų taikymo sritys plečiasi. Geriausiai AŠS tinka ten, kur turimas didelis atliekinės šilumos kiekis, dažniausiai nepakankamai šiltas šilumokaityje panaudoti vanduo ir pastovus aukštesnio potencialo šilumos šaltinis: degimo produktai, karštas vanduo ar redukuotas iki žemų parametrų garas. Vienas iš tokios, atliekinės šilumos, šaltinių – termofikacinių elektrinių turbinose naudojama alyva – skirta guolių ir krumpliaračių tepimui bei turbinos reguliavimo vožtuvų reguliavimui. Šiai alyvai, dirbančiai uždaru ciklu, šylant dėl trinties ir kontakto su karštais paviršiais, gaunama šiluma, kuri turi būti nuolat šalinama. Tačiau vietoje šalinimo į aplinką, ji gali būti panaudojama kaip žemo potencialo šilumos šaltinis, taip sumažinant sudeginamo kuro kiekį ir degimo produktų išmetimus į aplinką.

Kompresoriniai šilumos siurbliai irgi plačiai taikomi atliekinės šilumos atgavime. Tačiau, neturint galimybes naudoti pačių pasigamintos elektros energijos, o elektros įsigijimo kainoms kylant, kompresoriniai šilumos siurbliai gali tapti sunkiai atsiperkančia investicija.

Baigiamojo darbo tikslas – įvertinti techniniu, ekonominiu ir aplinkosauginiu požiūriais termofikacinės elektrinės atliekinės šilumos atgavimo absorbciniais ir kompresoriniais šilumos siurbliais galimybes.

Tyrimo objektas – termofikacinėje elektrinėje esančios turbinos pagalbinių įrenginių sistemose susidarantis atliekinės šilumos kiekis, šalinamas į aplinką.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, techninis sprendimų vertinimas, lyginamoji atvejo analizė, termodinaminė analizė, ekonominė analizė, aplinkosauginis vertinimas.

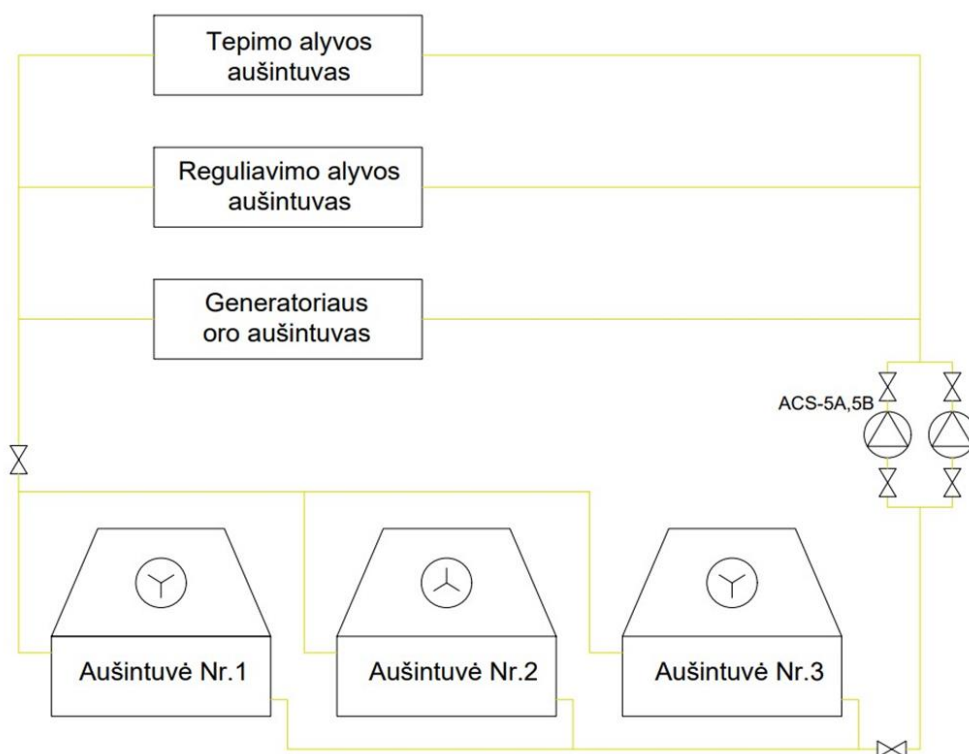
Baigiamojo darbo uždaviniai:

1. Atlikti atliekinės šilumos atgavimo šilumos siurbliais literatūros analizę ir išnagrinėti šilumos siurbliuose naudojamus darbo agentus;
2. Pasiūlyti techninius sprendimus atliekinės šilumos atgavimui;
3. Atlikti siūlomų sprendimų termodinaminę analizę;
4. Atlikti siūlomų techninių sprendimų ekonominį ir aplinkosauginį vertinimą.

1. Tiriama objekto charakteristikos ir atliekinės šilumos potencialas

1.1. Elektrinės atsinaujinančios energijos energetinis blokas

Vilniaus termofikacinėje elektrinėje Nr. 2 yra įrengtas biokuro garo katilas (75 t/h) su kondensaciniu dūmų ekonomizeriu (15,5 MW). Garo katilas kolektorine garo sistema sujungtas su vidutinio slėgio (39 bar) vienpakope, vieno reguliuojamo regeneracinio nuėmimo (2,7 bar) kondensacine turbina (16,7 MW). Turbina yra pagaminta MAN Turbo AG, jos tipas – MARC 4–C01. Turbinos velenas per movą sujungiamas su reduktoriumi, kuris optimaliai suderina turbinos sukimosi greitį (8120 aps./min) su generatoriui reikalingu sukimosi greičiu (3000 aps./min). Turbinai tinkamai veikti ir ją valdyti yra įrengtos atskiros tepimo ir reguliavimo alyvos sistemos bei generatoriaus oro aušinimo sistema. Visas jas apjungia bendra, uždara aušinimo skysčio sistema (žr. 1 pav.) [3].



1 pav. Turbinos pagalbinių įrenginių sistemas aušinančio skysčio uždara cirkuliacinė sistema

1.1.1. Turbinos pagalbiniai įrenginiai

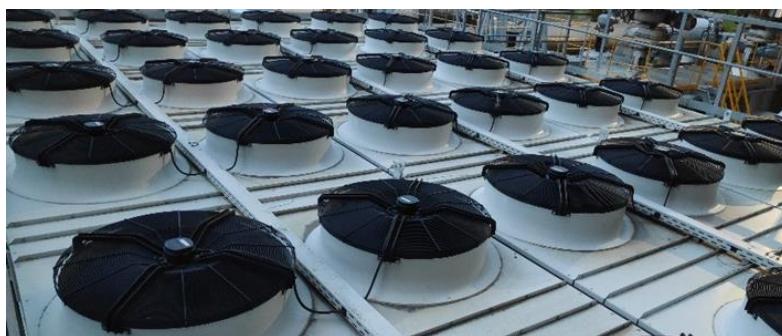
Turbinos, reduktoriaus ir generatoriaus tepimas alyva įprastiniu režimu vyksta dviem tepimo alyvos siurbliais, kurie turi užtikrinti 4 bar alyvos slėgį. Tepimo alyvos siurbliai alyvą siurbia iš talpos (5000 l) (žr. 2 pav.) ir per alyvos aušintuvus bei dvigubus alyvos filtrus tiekia į turbinos tepimo alyvos sistemą. Alyva vamzdynu iš talpos patenka į turbinos, reduktoriaus, generatoriaus guolius ir veleno pasukimo mechanizmą bei reduktoriaus krumpliaračius.



2 pav. Tepimo alyvos talpa, siurbliai, filtrai, šilumokaitis

Alyvos tiekimas turbinos reguliavimo sistemai normalaus darbo režimu vyksta dviem reguliavimo alyvos siurbliais, kuriais užtikrinamas 160 bar alyvos slėgis. Reguliavimo alyvos siurblys alyvą paima iš alyvos talpos (415 l) ir tiekia ją per dvigubą alyvos filtrą į reguliavimo alyvos paskirstymo sistemą. Reguliavimo alyvos vamzdynu alyva patenka į atkertamojo vožtuvo, reguliavimo vožtuvo ir tarpinio garo atėmimo sklendės bei aukšto slėgio šildytuvo garo sklendės hidraulinės pavaras. Taip pat šia alyva pastoviai papildomas hidraulinis akumuliatorius, kuris reikalingas kompensuoti slėgio svyravimams reguliavimo sistemoje.

Generatoriaus, tepimo alyvos, reguliavimo alyvos aušintuvams sumontuota uždara cirkuliacinė aušinimo sistema. Trijuose identiškuose sistemos aušintuvuose, aušinantis skystis (vandens ir glikolio mišinys, kuriame 38 % glikolio ir 62 % vandens) atvėsinamas iki pasirinktos temperatūros. Perteklinė šiluma šalinama ašiniais ventiliatoriais per šiuos, lauke įrengtus, aušintuvus (36 vnt., 0,29 kW/vnt. galios) (žr. 3 pav.).



3 pav. Turbinos aušinimo cirkuliacinės sistemos ventiliatoriai šalinantys atliekinę šilumą į aplinką

Dvejais aušinimo cirkuliaciniais siurbliais aušinantis skystis verčiamas cirkuliuoti per generatoriaus oro aušintuvą, reguliavimo alyvos aušintuvą, tepimo alyvos aušintuvą ir atiduodamas šilumą aplinkos orui atvėsinamas aušintuvuose. Aušinancio skysčio sistemai užpildyti įrengta atskira talpa su atskiru siurbliu. Aušinimo skystis, esant lauko temperatūrai žemesnei nei $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, gali būti šildomas termofikacinio vandens šildytuve.

Tepimo alyvos aušintuvas yra šilumokaitis. Jo paskirtis – atiduoti iš guolių ir reduktoriaus krumpliaračių alyvoje susikaupusią šilumą aušinimo vandeniui, taip neleidžiant kaisti tepimo alyvai.

Aušintuvą sudaro išorinis korpusas ir viduje esantys vamzdelių pluoštas. Alyva teka tarp vamzdelių, kur daug kartų keičiama jos tekėjimo kryptis, o vamzdelių vidumi teka aušinimo skystis.

Tepimo alyvos sistema turi elektrinį šildytuvą, kuris alyvos temperatūrai atvėsus žemiau nei 25 °C įjungiamas ją sušildyti. Turbinos darbo metu alyvos temperatūra, reguliavimo vožtuvu, palaikoma apie 45 °C.

Reguliavimo alyvos aušintuvas taipogi yra šilumokaitis. Jo paskirtis – saugoti reguliavimo alyvą ir įrenginius nuo perkaitimo. Aušintuvas tokio paties tipo, kaip tepimo alyvos sistemoje.

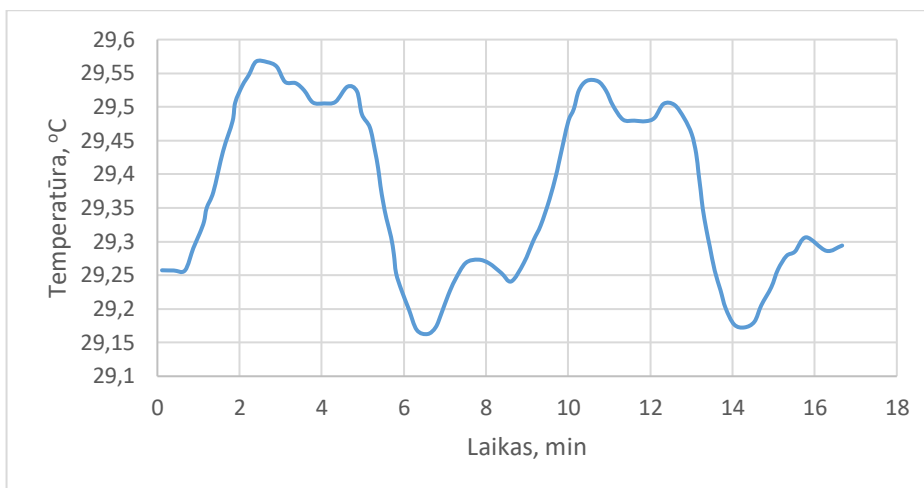
Generatoriaus aušintuvas yra dvigubas aušinimo skysčio šaldymo įrenginys (žr. 4 pav.). Į generatorių patenkantis oras vėsina generatorių, o sušilęs oras atiduoda šilumą aušinančiam skysčiui. Šalto oro temperatūrą reguliuojama cirkuliuojančiu aušinimo skysčiu.



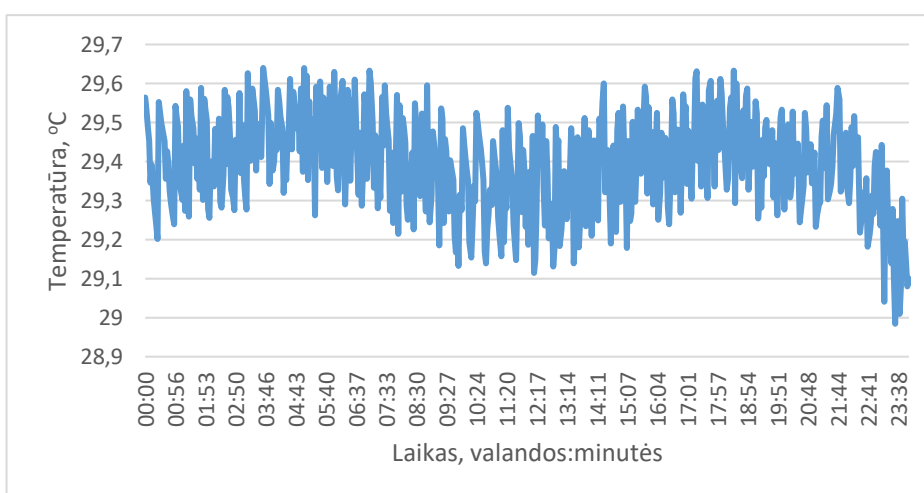
4 pav. Turbinos generatoriaus oro aušintuvas

1.2. Atliekinės šilumos potencialas

Kaip jau minėta anksčiau, uždara aušinimo sistema surenka šiluminę energiją iš trijų pagalbinių turbinos sistemų šilumokaičių (tepimo alyvos, reguliavimo alyvos ir generatoriaus oro aušinimo) ir šią perteklinę šilumą pašalina aušintuvėse, elektriniais ventiliatoriais. Turbinai dirbant nominaliu režimu atliekinės šilumos galia – 237 kW, kai aušinimo skysčio temperatūra prieš aušintuves – apie 30 °C, o už jų – svyruoja apie 25 °C. Aušalo temperatūros kaita trumpuoju laikotarpiu pavaizduota 5 paveikslėlyje, o temperatūriniai svyravimai 24 valandų laikotarpyje pavaizduoti 6 paveikslėlyje. Pateikti duomenys yra iš 2021 m. sausio 26 d., kai temperatūra lauke visą parą svyravo –1–0 °C diapazone, o turbina dirbo įprastu nominaliu galingumu.

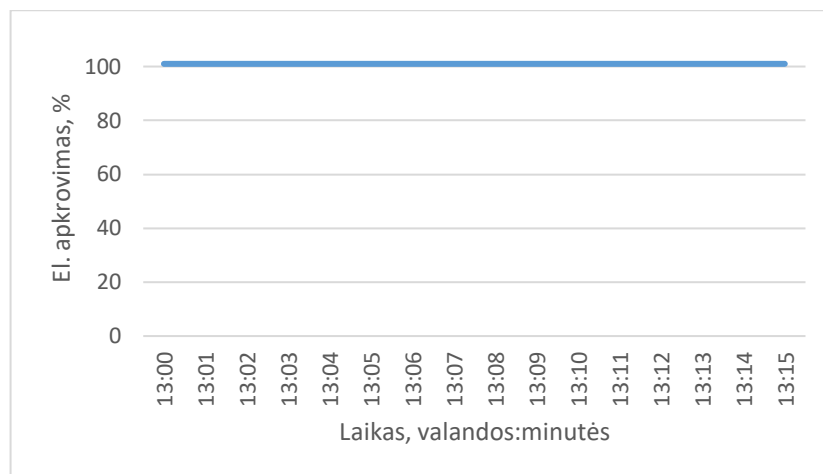


5 pav. Aušalo temperatūra prieš aušintuves (17 min. laikotarpis)

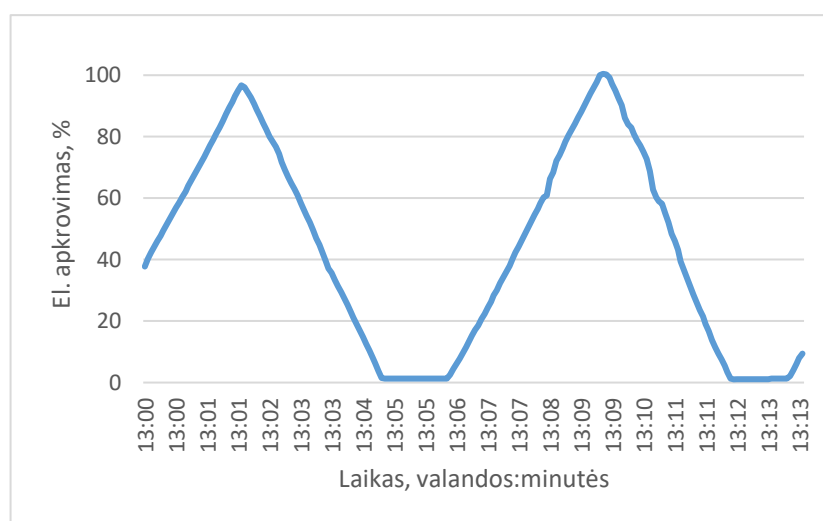


6 pav. Aušalo temperatūra prieš aušintuves (24 h laikotarpis)

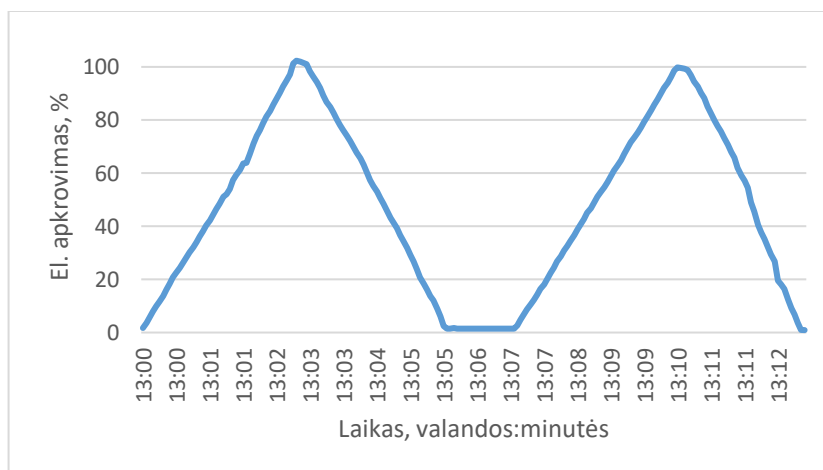
Aušintuvių ventiliatorių bendras maksimalus elektrinis galingumas – 10,44 kW, tačiau jie yra kintančios galios ir sinchroniškai apsikraudami bei nusikraudami palaiko reikiamą aušalo temperatūrą. Aušintuvių aušinimo ventiliatorių apkrova stipriai priklauso nuo lauko temperatūros, todėl aušintuvės nuolatos maksimaliai apsikrovusios būna tik lauko temperatūrai esant 25–30 °C (žr. 7 pav.), kitais atvejais apkrovimas svyruoja. Elektrinės ventiliatorių apkrovimai, lauko temperatūrai esant 0 ir 11 °C, pavaizduotos atitinkamai 8 ir 9 paveikslėliuose.



7 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2020 m. liepos 7 d. (lauko temperatūra 25 °C)



8 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2021 m. sausio 26 d. (lauko temperatūra 0 °C)



9 pav. Aušintuvių ventiliatorių elektrinis apkrovimas 2021 m. balandžio 27 d. (lauko temperatūra 11 °C)

Šildymo sezono metu, apie 4000 valandų per metus, ventiliatorių vidutinis apkrovimas apie 45 %, o ne šildymo, apie 4500 valandų per metus, – apie 55 %. Metinis nustatytas ventiliatorių elektrinis apkrovimas – 51,6 %.

Taigi vidutinis metinis bendras aušintuvių ventiliatorių galingumas:

$$Q_{m.v.el.vent} = Q_{el.vent} \times A = 10,44 \text{ kW} \times 0,516 = 5,39 \text{ kW}; \quad (1)$$

čia $Q_{el.vent}$ – bendras ventiliatorių maksimalus elektrinis galingumas, kW; A – vidutinis metinis ventiliatorių elektrinis apkrovimas, proc.

Tuomet per metus aušintuvių ventiliatorių veikimui sunaudojamas elektros energijos kiekis:

$$E_{m.el.vent} = Q_{m.v.el.vent} \times t = 5,39 \text{ kW} \times 8000 \text{ h} = 43,12 \text{ MWh}; \quad (2)$$

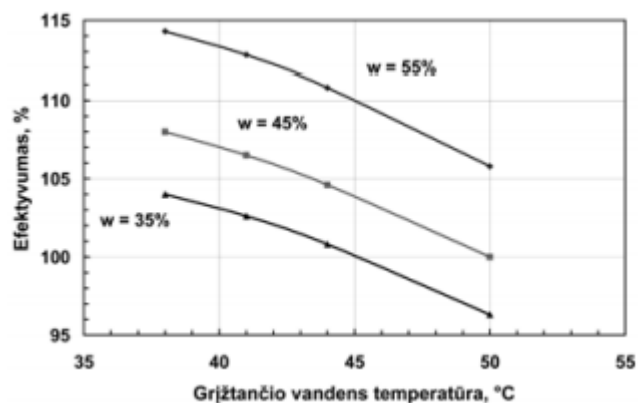
čia t – priimtas turbinos veikimo valandų kiekis per metus, t.

Taigi, susigražinus šalinamą atliekinę šilumą, ne tik būtų atgaunama 237 kW momentinė šiluminė galia, bet ir vidutiniškai būtų nebeeikvojama 5,39 kW momentinė elektrinė galia.

1.3. Atliekinės šilumos panaudojimas centralizuotam šildymui

Termofikacinėje elektrinėje atgavus atliekinę šilumą, ją galima panaudoti teritorijoje esančių pastatų šildymui, elektrinės technologinėms reikmėms arba pašildyti centralizuotais šilumos tinklais miesto gyventojams tiekiamą termofikacinį vandenį. Kadangi atliekinė šiluma yra laikoma atsinaujinančiu energijos šaltiniu, todėl panaudojant ją šildyti centralizuotai tiekiamą termofikacinį vandenį, būtų ne tik sumažinamas papildomų šilumos šaltinių poreikis, bet ir, visų pirma, sumažinamas neatsinaujinančio kuro naudojimas, kas nulemtų sumažėjusią atmosferos taršą degimo produktais ir sumažėjusį neatsinaujinančių gamtos išteklių eikvojimą.

Kadangi termofikacinėje elektrinėje yra įrengti kondensaciniai dūmų ekonomizeriai, todėl grįžtantis termofikacinis vanduo turėtų būti pirmiausiai pašildomas juose, nes šių įrenginių efektyvumas smarkiai išauga, žemėjant vandens temperatūrai prieš juos. Labiau ataušinant iš kuro deginimo katilų išeinančius drėgnus dūmus, atgaunama daugiau juose slypinčios slaptosios kondensavimosi šilumos (žr. 10 pav.).

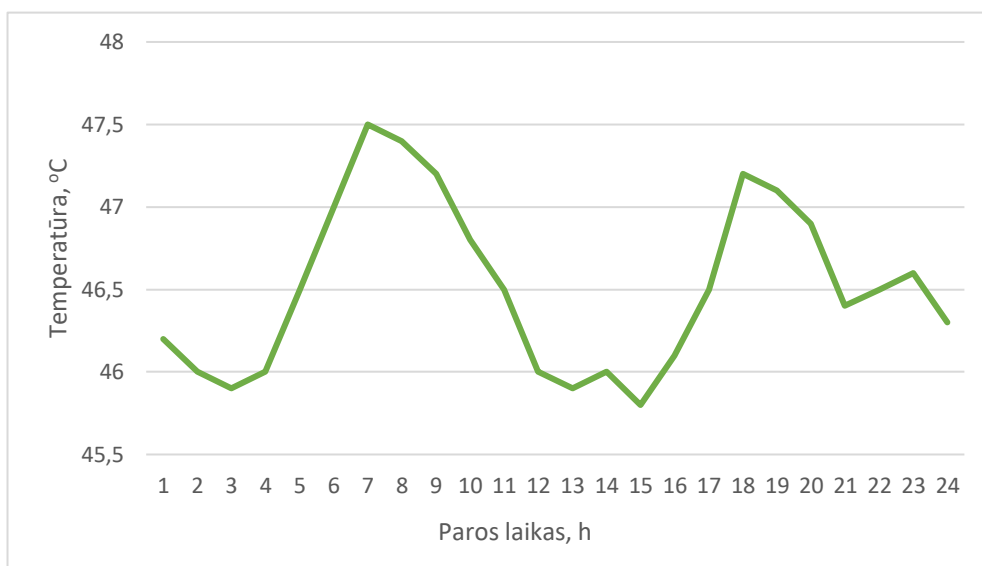


10 pav. Grįžtančio vandens prieš kondensacinį dūmų ekonomizerį (KDE) poveikis bendram katilo ir KDE efektyvumui [4]

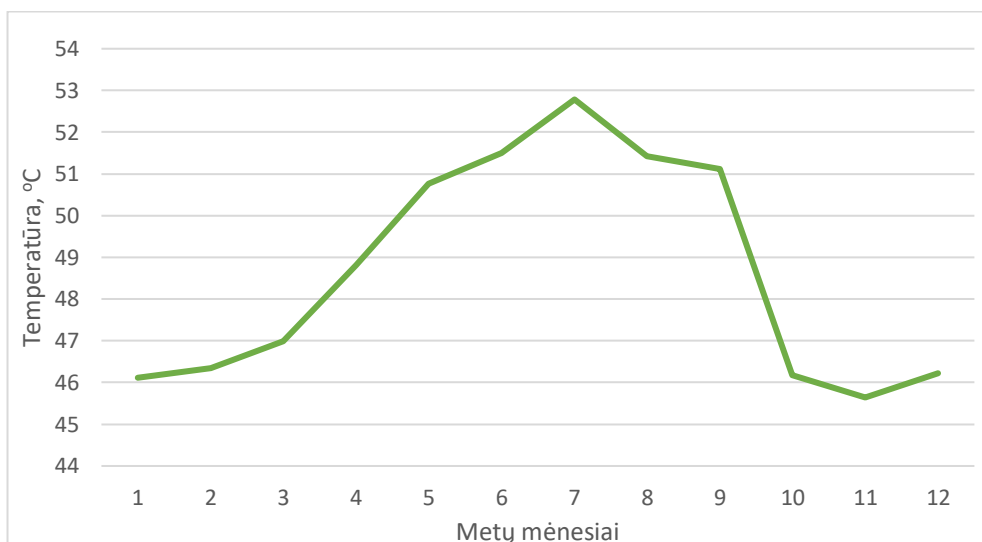
Taigi, į termofikacinę elektrinę grįžtantis centralizuotų šilumos tinklų vanduo, pratekėjęs kondensacinius ekonomizerius, gali būti pašildytas, iš atliekinės turbinos šilumos atgautu šilumos kiekiu.

Iš miesto tinklų į termofikacinę elektrinę grįžtančio termofikacinio vandens, už kondensacinių dūmų ekonomizerių, temperatūros analizė atvaizduota 11 ir 12 paveikslėliuose. 11 paveikslėlyje

pavaizduotas šildymo sezono paros grįžtančio vandens temperatūros grafikas. 12 paveikslėlyje pavaizduotas metinis 2020 metų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros grafikas.



11 pav. Vienos šildymo sezono paros grįžtančio vandens temperatūros grafikas



12 pav. 2020 metų grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros grafikas

Taigi, iš pateiktų grafikų galima matyti, kad grįžtančio ir KE-4 praėjusio termofikacinio vandens temperatūra svyruoja tiek sezoniškai, tiek paros metu. Per metus svyravimai gana žymūs, siekia 7 °C, ir svyruoja nuo apytiksliai 46 °C šildymo sezono metu, iki net 53 °C temperatūros vasaros viduryje. To paties vandens temperatūros svyravimas paros metu yra daug mažesnis, tačiau aiškiai pastebimas. 11 paveikslėlyje atvaizduojama viena lapkričio mėnesio para, kai lauko temperatūra yra apie 4 °C, tokiu atveju, termofikacinio vandens temperatūros svyravimas siekia 1,5 °C, nuo 46 °C nakties ir vidurdienio metu iki daugiau kaip 47 °C temperatūros, rytinio ir vakarinio, centralizuotos šilumos suvartojimo, pikų metu.

Apibendrinus grafikus, akivaizdu, jog grįžtančio termofikacinio vandens temperatūros nėra tinkamos atgauti atliekinę šilumą paprasčiausiu būdu – panaudojant šilumokaitį, nes šildomosios terpės temperatūra yra didesnė už šildančiosios. Todėl šios atliekinės šilumos atgavimui reikalingi sudėtingesni technologiniai sprendimai, kurie toliau bus nagrinėjami šiame darbe.

2. Literatūros analizė

Siekiant išsamiau susipažinti su absorbciniais šilumos siurbliais ir jų panaudojimu, buvo analizuojamas straipsnis – *Absorbcinės šildymo technologijos: apžvalga ir perspektyvos* („Absorption heating technologies: A review and perspective“ 2014. Wei Wu, Baolong Wang, Wenxing Shi, Xianting Li) [5]. Šiame darbe absorbciniai šilumos siurbliai pristatomi kaip turintys nepakeičiamų privalumų atliekinei energijai atgauti, emisijoms mažinti ir baigtinei energijai tausoti. Teigiama, kad dažniausiai absorbcijos cikluose naudojami fluidai: amoniakas (NH_3), ličio bromidas (LiBr) ir vanduo (H_2O) neprisideda prie globalinio atšilimo ir ozono sluoksnio irimo. Bendrai straipsnyje apžvelgiama dabartinė absorbcinių šildymo technologijų būseną ir jų vystymasis gyventojų namuose, pramonėje ir kaimiškose vietovėse.

Darbe pristatomi absorbcinio šildymo klasifikavimas ir skirtingi taikomi absorbcijos ciklai, pateikiamas pagrindinių absorbcinių technologijų sąrašas ir pavyzdžiai. Absorbcinio šilumos siurblio pavyzdyje nurodomas platus spektras varančiosios energijos pavyzdžių: deginamos gamtinės dujos ar biomasė, naudojama saulės, geoterminė, šilumos tinklų ar atliekinė šiluma. Tiekiant aukšto potencialo varančiąją energiją į absorbcinio šilumos siurblio generatorių, įrenginio garintuve iš žemos temperatūros šaltinio (dirvožemio, paviršinių vandenų ar atliekinės šilumos) galima gauti žemo potencialo šilumos energiją. Taip vidutinės temperatūros vanduo gali būti pašildomas didesniu nei sunaudojama šilumos kiekiu.

Taipogi darbe trumpai apžvelgiamos absorbcinės šilumos kaupimo, transportavimo, transformavimo sistemos ir keli šių sistemų įrenginių pavyzdžiai. Atskirai pristatomas absorbcinių šildymo sistemų pritaikymas gyvenamiesiems / komerciniams pastatams, pramonei, kaimiškosioms vietovėms.

Straipsnyje nurodomi skirtingi pramonėje dažnai pasitaikantys procesai: džiovinimas, išgarinimas, distiliavimas ir kiti. Šie procesai reikalauja didelių kiekių skirtingo potencialo šilumos, taipogi jų metu susidaro nemaži kiekiai atliekinės šilumos, kurie dažniausiai šalinami niekaip nepanaudoti. Darbe analizuojami ir apibendrinami skirtingi absorbcijos pritaikymo, minėtiems pramonės procesams, pavyzdžiai, aprašyti kituose, darbe cituojamuose moksliniuose straipsniuose. Šio straipsnio skyrelyje, nagrinėjančiame absorbcija atgaunamą atliekinę šilumą, pateikta keletas įdomių pavyzdžių. Vienas jų – absorbcinio šilumos siurblio panaudojimas atgauti šilumą iš atliekinių $120\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros dujų srauto ir šia šiluma nuo $43\text{ }^\circ\text{C}$ iki $54\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros pašildyti kitą vandens srautą. Nurodoma šio pavyzdžio ekonominė nauda – 1,2 milijono dolerių per metus. Kitas darbe aprašomas pavyzdys – celiuliozės ir popieriaus fabrikas su integruotu absorbciniu šilumos transformatoriumi. Šiame įrenginyje atliekinė gamyklos šiluma sunaudojama vandeniui pašildyti iki didesnės nei $65\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros. Įvertinta, jog šiuo įrenginiu gamykloje sutaupoma apie 25 % suvartojamų gamtinių dujų. Darbe pateikiama dar keletas panašių pavyzdžių, kuriais atgaunama atliekinė šiluma. Viena jų – absorbcinio šilumos transformatoriaus (AŠT) apskaičiuotas atsipirkimo laikas – dveji metai, kitame – patobulinus įprastą AŠT sistemą – gaunamas 14,1 % didesnis sistemos naudingo veikimo koeficientas (COP) ir pagaminama 3,59 % daugiau karšto vandens.

Bendrai, darbe pateikiamų pavyzdžių vidutinis atsipirkimo laikas, įdiegiant absorbcines šildymo technologijas, gaunamas apie 3 metus. Taipogi išreiškiama viltis, kad ateityje patobulinus kelis svarbiausius absorbcinių įrenginių aspektus (standartizavimas, saugumas, veikimas prie žemų aplinkos temperatūrų, varančiosios energijos potencialo žeminimas ir kt.), bus pasiektas dar didesnis šių įrenginių proveržis.

Norint plačiau išnagrinėti konkrečius pramonėje, o ypač energetikoje, taikomus efektyvumo didinimo pavyzdžius, kuriuose pasitelkiami absorbciniai šilumos siurbliai, atliekama straipsnio analizė: *Absorbcinio šilumos siurblio naudojimas turbinos modelio K-300-240-2 regeneravimo sistemoje, pagamintoje Kharkovo turbokompresorių gamykloje (KhTGP)* („Using an absorption heat pump in the regeneration system of turbine model K-300-240-2 manufactured by kharkov turbo generator plant (KhTGP)“ 2016. Skubienko S.V., Yanchenko I.V., Babushkin A.Yu) [6].

Šiame darbe aprašoma Rusijos federacijos situacija, kai pagrindiniai elektros energijos gamintojai šalyje yra kondensacinės ir atominės elektrinės. Dėl žemo kondensacinių elektrinių efektyvumo, ieškota būdų, kaip būtų galima padidinti jų šiluminį efektyvumą. Taigi šiame darbe analizuojami absorbciniai šilumos siurbliai (AŠS), kaip vienas iš efektyvių būdų padidinti bendrą elektrinių efektyvumą. Straipsnyje aprašoma, kaip remiantis kitų mokslininkų darbais ir atliktais skaitiniais tyrimais, absorbcinių šilumos siurblių panaudojimas nustatytas kaip labiausiai tinkantis. Todėl ištirta galimybė panaudoti absorbcinį šilumos siurblį 300 MW termofikacinėje elektrinėje.

Straipsnyje analizuojamas AŠS įdiegimo principas: iš turbinos regeneracinės zonos žemo potencialo garas tiekiamas į AŠS generatorių, kur atlieka varančiosios energijos darbą. Techninėms reikmėms skirtas vanduo pasitarnauja kaip žemo potencialo šilumos šaltinis, o abiejų šilumos šaltinių energija AŠS įrenginys konvertuojama žemo slėgio šildytuvuose, pašildyti garo kondensatą, kuris būtų tiekiamas į garo katilą. Toks elektrinės veikimas darbe planuojamas vasaros laikotarpiu. Šildymo sezono metu, iš turbinos regeneracinio laipsnio paimamas garas būtų panaudojamas šildytuvuose pašildyti termofikacinį vandenį.

Kaip teigiama straipsnyje, tokiu būdų įrengus AŠS, regeneraciniame garo paėmime galima būtų sutaupyti apie 10–12 kg/s garo srauto, o tai padidintų turbinos naudingumą ir jos elektrinę galią. Iš skaitinių modeliavimų ir skaičiavimų darbe paaiškėjo, kad turbinos absoliutus naudingumas su absorbciniu šilumos siurbliu (įvertinus sezoninę techninės paskirties vandens temperatūros kaitą ir elektrinės galios kaitą) žiemos sezono metu padidėjo 0,5–0,6 %, pavasarį ir rudenį 0,3–0,4 %, o vasarą – 0,1 %. Bendras visos elektrinės efektyvumas, beveik identiška turbinos efektyvumui, padidėjo visais metų laikais.

Siekiant susipažinti su absorbcinių šilumos siurblių taikymu didinant energetikos objektų efektyvumą šiauriniame Europos regione, atliekama mokslinio straipsnio analizė. Pasirinktas objektas Latvijoje ir mokslininkų darbas – *Atliekinės šilumos atgavimas didelės galios šilumos siurbliais Rygos miesto centralizuotam šilumos tiekimui* („Recovery of the waste heat by large capacity heat pumps for Riga city district heating system“ 2013. Aivars Cers, Daniels Turlajs, Namejs Zeltinsh) [7].

Darbe pristatoma Rygos miesto situacija, kai ieškota geriausių galimų technologijų centralizuotai šildyti ir vėsinti miestą. To meto (straipsnio paskelbimo data – 2013 m.) numatomi projektai atliekinės šilumos panaudojimui buvo efektyvumo didinimas su centralizuotais šilumos tinklais sujungtose kogeneracinėse elektrinėse, atliekinę šilumą atgaunant didelio masto absorbciniais šilumos siurbliais ir papildomos šiluminės ar vėsiosios energijos generavimas komunalinės paskirties įmonėse iš nuotekų. Straipsnyje teigiama, kad Rygos miesto Tvarios energijos veiksmų planas 2010–2020 metams numato, būtent AŠS technologijos panaudojimą Rygos šilumos tinkluose. Pirmasis toks projektas analizuojamas šiame straipsnyje, eksploatuojamas nuo 2010 metų ir naudojamas tolimesniems tyrimams dėl platesnio šių ir panašių technologijų diegimo Rygos mieste.

Moksliniame darbe analizuojamas Rygos šilumos tinklų termofikacinėje elektrinėje *Imanta* įrengtas absorbcinis šilumos siurblys. Jo veikimo principas: redukuotas iki žemo potencialo garas po garo katilo patenka į absorbcinio įrenginio generatorių, kuriame naudojamas kaip varančioji energija. Atliekinė šiluma – per aušykles cirkuliuojantis aušinantis skystis, pašildytas šiluma iš garo ir dujų turbinų generatorių, alyvos bei gamtinių dujų kompresoriaus. Pasinaudojant šilumokaičiu, šiluminė energija suteikiama grįžtančiam iš miesto atvėsusiam termofikaciniam vandeniui. Straipsnyje pateikiama šio įrenginio nominali šiluminė galia – 5 MW ir kaina – 700 tūkst. EUR. Taip pat teigiama, kad šio projekto atsipirkimo laikas – 3 metai, o be kita ko, šiuo absorbciniu įrenginiu per metus bus sutaupoma 842 000 m³ gamtinių dujų ir 1580 CO₂ išmetimų kvotų.

Kaip aprašoma straipsnyje – prieš AŠS įdiegimą *Imanta* termofikacinėje elektrinėje buvo apsvaistytos dvi skirtingos šilumos siurblių technologijos – kompresoriniai ir absorbciniai šilumos siurbliai. Išskyrus pagrindinį skirtumą – varančiąją energiją, atitinkamai elektra arba šiluma, buvo įvertintos galimos elektros sąnaudos ir galima šiluminė įrenginių galia. Kompresorinio šilumos siurblio (KŠS) atveju vertinta, jog 2,2-2,5 MW šiluminės galios įrenginys momentiška suvartotų apie 500-600 kW elektros energijos ($COP \approx 4,2 - 4,4$). Kai tuo tarpu AŠS su 3 MW garo šiluminės energijos, kondensatoriuje gali atiduoti net dvigubai daugiau (apie 5 MW) šilumos nei KŠS. Taip pat darbe paminima, kad bendru atveju kompresoriniai šilumos siurbliai reikalauja daugiau priežiūros dėl bendros procesų inercijos. Be analizuotų, tolygių abejoms technologijoms, kaštų priežiūrai, ir remontui išskirtas dar vienas AŠS privalumas – geras prisitaikymas prie laikinai išaugusių atliekinės šilumos temperatūrų, kurios net padidina AŠS generuojamą šilumos kiekį. To paties negalima pasakyti apie KŠS, nes jų darbo agentas gali būti nepritaikytas aukštomis temperatūroms, todėl tokia sistema taptų nedarbinga. Straipsnyje daroma išvada, jog AŠS turi daugiau privalumų, kurių pagrindiniai, nulėmę šios technologijos pasirinkimą: įrengimo kaštai, poveikis aplinkai ir dideli energijos kiekiai, gaminami vandens šildymo katiluose.

Norint atlikti analizę kito baigiamojo studijų darbo, kuris nagrinėja absorbcinių šilumos siurblių pritaikymą energetikoje, pasirinktas termino inžinerijos srities baigiamasis magistro pakopos projektas „*Absorbcinio šilumos siurblio pritaikymas efektyvesniam dūmų kondensacinio ekonomizaizerio darbui*“, kurio autorius yra: Vidmantas Morkūnas [8].

Šiame darbe išsamiai nagrinėjama absorbcinių šilumos siurblių technologija ir galimybė ją pritaikyti darbui su kondensaciniu dūmų ekonomizaizeriu, dar papildomai atgaunant atliekinės katilo dūmų šiluminės energijos. Autoriaus pasirinkta ličio bromido (LiBr) ir vandens absorbcinių šilumos siurblių technologija, o ją analizuojant išskirtas pagrindinis šių įrenginių trūkumas – kristalizacijos rizika. Darbe teigiama, jog ši rizika valdoma kontroliuojant druskos tirpalo temperatūrą ir LiBr druskų koncentraciją tirpale. Taip pat nurodoma su kristalizacijos rizika susijusi bendra AŠS gamintojų rekomendacija – šilumos siurblys turi veikti nusistovėjusiu režimu esant kuo stabilesniems parametrams.

Nagrinėjamame magistro projekte vertinama, jog AŠS panaudojimas kartu su kondensaciniu ekonomizaizeriu, bendrą teorinį katilo efektyvumą gali padidinti 6 ir 4 procentais, katile, atitinkamai, deginant biokurą arba gamtines dujas. Taip pat darbe analizuojami AŠS prijungimo prie bendros kogeneracinės elektrinės sistemos būdai, skaičiavimais pagrindžiamas efektyviausias pasirinkimas – papildomo, antrojo, laipsnio įrengimas kondensaciniam dūmų ekonomizaizeriui, AŠS prijungiant, būtent prie jo. Darbe apskaičiuota, jog taip rekonstravus biokuro katilo su kondensaciniu

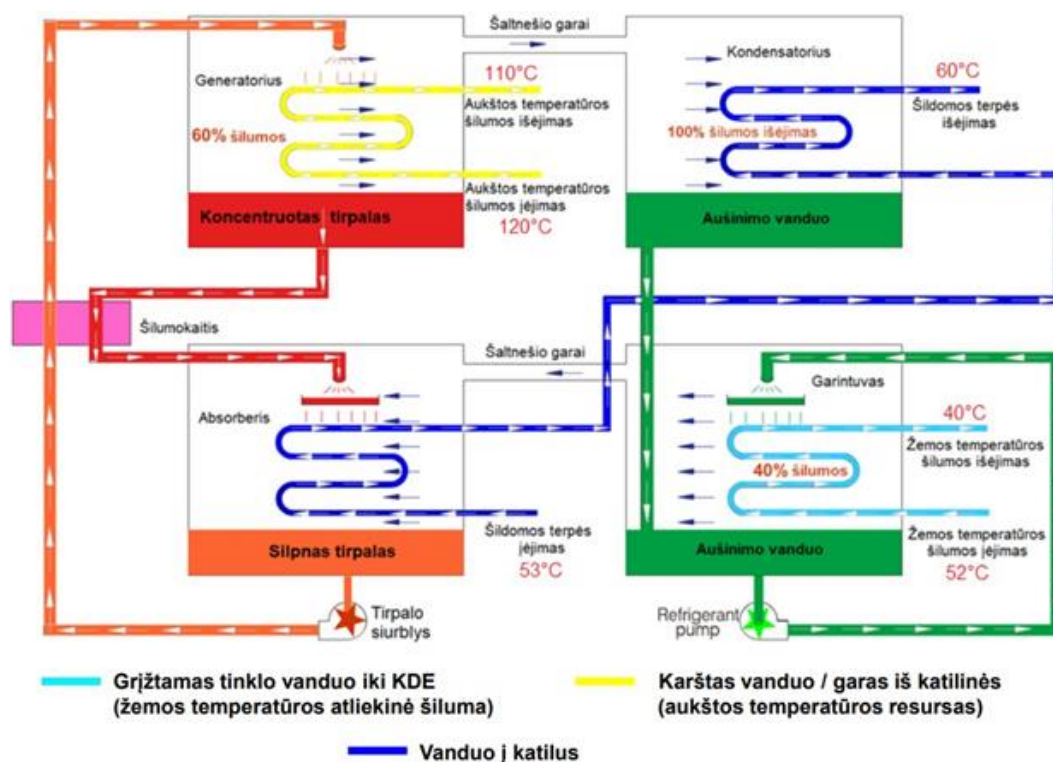
ekonomaizeriu sistemą, efektyviausiai ji veiktų esant aukštai iš miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemos grįžtančio termofikacinio vandens temperatūrai ir sąlyginai sausam biokurui.

Analizuojamame baigiamajame darbe atlikti ekonominiai skaičiavimai parodė, kad biokuro katilui papildomai prijungus absorbcinį įrenginį, su būtinais papildomais darbais, jis atsipirktų per 5,2 metus, vertinant darbą 8000 valandų per metus. Dujomis kūrenamo katilo atveju, tokia investicija atsipirktų tik per 13,5 metų, dėl kuro ne konkurencingumo dirbant tik šildymo sezono metu, t. y. 4400 valandų per metus. Abejais atvejais investicijos dydis į AŠS svyruoja apie 700 tūkst. EUR, kai gaunama šaldymo galia šiek tiek viršija 1 MW. Tiesa, darbo autorius nurodo, kad šie skaičiavimai gali būti gana netikslūs, nes itin sunku nuspėti ateities kuro kainas, o biokuro drėgnumas, kuris perkant jį biržoje gana nepastovus, taip pat turi didelę įtaką galutiniam projekto ekonominiam patrauklumui.

3. Atliekinės šilumos atgavimas absorbciniu šilumos siurbliu

3.1. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo principas

Absorbcinis šilumos siurblys – tai įrenginys, kuriame vyksta daug skirtingų ir sudėtingų procesų, kurių pagrindiniai: cheminiai, šilumos ir masės mainai. Absorbcinės sistemos naudoja slaptąją skysčio–garo fazinių virsmų šilumą ir išnaudoja padidėjusią skysčių mišinių virimo temperatūra. Taigi, absorbcinėse sistemose naudojami du darbiniai skysčiai: šaltnešis ir absorbentas. Todėl fazinių virsmų temperatūra gali būti įtakojama ne tik keičiant slėgį, bet ir keičiant šaltnešio koncentraciją mišinyje. Taip pakeitus garų suspaudimo ciklo mechaninį kompresorių šiuo „termochemiu kompresoriumi“, susidedančiu iš absorberio, generatoriaus, tirpalo siurblio ir išsiplėtimo vožtuvo, ciklui reikalingas darbo kiekis žymiai sumažėja. Kadangi savitasis skysčio tūris yra daug mažesnis nei dujų, todėl tirpalo siurblio darbas absorbcijos sistemoje yra daug lengvesnis, nei labiau įprasto kompresorinio šilumos siurblio [9]. Pagrindiniai ir privalomi AŠS komponentai yra garintuvas, generatorius, absorberis ir kondensatorius (žr. 13 pav.).



13 pav. Absorbcinio šilumos siurblio veikimo principas [10]

Garintuve sukondensuotas garas iš kondensatoriaus yra išgarinamas dėl žemo slėgio, taip pasiekama žema garavimo temperatūra (10–40 °C). Taip naudojant žemos temperatūros atliekinės šilumos šaltinį, jis pašildo aušinimo vandenį ir jį išgarina, tuo pačiu pats atvėsta, atiduodamas apie 40 % galutinės AŠS gaunamos šiluminės energijos.

Toliau, šie aušinimo vandens garai, dėl temperatūrų skirtumo, keliauja į absorberį, kur absorbuojami koncentruoto LiBr tirpalo, ir dėl paaukštėjusios virimo temperatūros tirpalas kondensuosis, o išsiskyrusi šiluma bus atiduodama šildomajai terpei.

AŠS generatoriuje atliekamas darbas, kai varančioji energija, dažniausiai žemų parametrų garas, šilumokaityje išgarina LiBr tirpalo lakesnįjį komponentą – vandenį (taip sunaudojama apie 60 % šiluminės energijos), kurio garai dėl temperatūrų skirtumo keliauja į kondensatorių.

Kondensatoriuje vandens garai sukondensuojami, o šiluminė energija, kuri išskiriama kondensacijos metu, kaip ir absorberijoje, perduodama šildomajai terpei. Kondensatoriuje ir absorberijoje bendrai atiduodama 100 % AŠS šilumos vidutinio potencialo, šildomam šilumos šaltiniui. Susikondensuotas vandens garas grįžta į garintuvą ir aprašytas ciklas kartojasi.

3.2. Darbinių šaldymo agentų palyginamoji analizė

Nors absorbciniai šilumos siurbliai nėra naujas išradimas, tačiau jų veikimas vis dar yra nuolatos tobulinamas ir šiomis dienomis. Viena pagrindinių sričių, kurioje ieškomas proveržis, yra šaldymo agentai. Daug skirtingų rūšių skysčių mišinių buvo svarstyta ir kai kurie variantai pasiteisino, tačiau jie dažniausiai pritaikomi tik specifiniams atvejams, kai šaldymo agentai taikoma neįprastoje srityje, arba, kai siekiama tam tikrų, pagerintų jų savybių, ir tenkina praradimai kitose, nes pramonėje ir rinkoje jau kurį laiką yra nusistovėję du pagrindiniai vandens / ličio bromido bei amoniako ir vandens mišiniai. Pagrindinė kitų fluidų neišplitimo priežastis – su įprastų, jau paminėtų, darbo agentų savybių deriniu itin sunku konkuruoti. Dažniausiai, siūlomos alternatyvos gali pašalinti, kažkurį vieną įprastų mišinių trūkumą, tačiau tuo pačiu atsiranda keletas papildomų, pačios alternatyvos ydų, kurios dažnai bendrame rezultate nulemia jų ne konkurencingumą.

Absorbcijos ciklo efektyvumas labai priklauso nuo darbinių skysčių termodinaminių savybių. Absorbento ir šaltnešio mišinys turi būti chemiškai stabilus, netoksiškas ir nesprogus. Toliau nurodomi absorbcijos ciklų darbinių skysčių pagrindiniai reikalavimai [11]:

- Grynojo šaltnešio ir mišinio virimo temperatūros skirtumas prie to paties slėgio turėtų būti kuo didesnis;
- Šaltnešis turėtų turėti aukštą specifinę šilumą ir būti stipriai koncentruotas, kad tarp generatoriaus ir absorberio būtų palaikomas mažas cirkuliacijos greitis;
- Skysčių termokinetinės savybės, turinčios įtakos šilumos ir masės perdavimui, pvz.: klampa, šilumos laidumas ir difuzijos koeficientas, turėtų būti palankios taikymui absorbciniuose įrenginiuose;
- Tiek šaltnešis, tiek absorbentas neturėtų būti ėsdinantys, kenksmingi aplinkai ir brangūs.

Du plačiausiai paplitę šaldymo agentai – mišiniai – daugiausia skiriasi savo pritaikymu pramonėje, nes LiBr ir H₂O mišinys daugiausia naudojamas absorbciniuose šilumos siurbliuose, o NH₃ ir H₂O – absorbcinėse šaldymo mašinose. Abiejuose įprastuose mišiniuose naudojami šaltnešiai, turintys didelę slaptąją šilumą. Tai naudinga AŠS ciklui, nes taip sumažinamas aušalo srautas. Tačiau nė vienas skystis neturi idealių garų slėgio charakteristikų. Amoniako slėgis yra itin aukštas, o vandens – itin žemas.

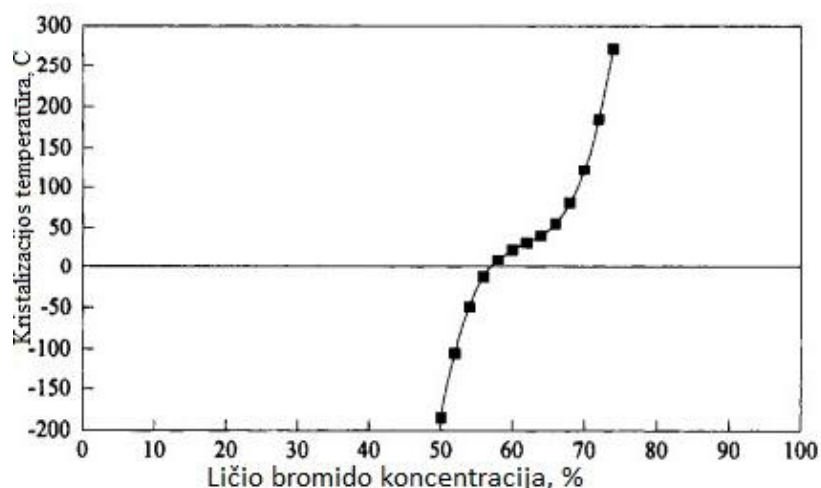
Ličio bromidas yra naudingas kaip absorbentas, nes jis yra gana klampus, todėl absorbciniame šilumos siurblyje išvengiama papildomo įrenginio - rektifikatoriaus. Kai vanduo amoniako mišinyje, naudingas tuo, jog išvengiama kristalizacijos pavojaus [12].

Ličio bromido / vandens mišinyje vanduo yra šaltnešis, o tai reiškia, kad įrenginyje susidaro vakuumas. Įprastai, įrenginiuose su šiuo darbo agentu, žemiausia galima žemo potencialo šaltinio pusės temperatūra yra maždaug 6 °C, esant įprastinei koncentruoto tirpalo koncentracijai, siekiančiai 55 % ličio bromido, o šildomos terpės temperatūra gali siekti 85 °C [13].

Nors vandens / ličio bromido tirpalas yra itin tinkamas naudoti šilumos siurbliuose, jis vis tiek turi tam tikrų trūkumų: koroziją, didelis klampumas, ribotas tirpumas ir jau minėta viršutinė šildomos

terpės temperatūros riba. Tačiau pagrindinė vandens ir ličio bromido poros problema yra ta, kad šis mišinys kristalizuojasi esant žemai temperatūrai [14].

14 paveikslėlyje pavaizduota vandens ir ličio bromido mišinio kristalizacijos kreivė. Ji atvaizduoja tirpalo kristalizacijos temperatūros priklausomybę nuo jo LiBr koncentracijos mišinyje. Iš šios kreivės galima matyti, kad esant įprastai absorbciniams šilumos siurbliams LiBr koncentracijai, apie 55 %, ličio bromidas pradeda kristalizuotis prie artimos 0 °C temperatūros.



14 pav. Vandens – ličio bromido mišinio kristalizacijos temperatūros priklausomybė nuo tirpalo koncentracijos [14]

Bendrai, ličio bromidas yra druska, baltos spalvos miltelių pavidalo, tirpi vandenyje, glikolyje ir alkoholyje [15].

Druskos tirpalų, tokių kaip vandens / LiBr, pobūdis yra tas, kad druskų komponentai (kristalizacija) iškrinta, kai LiBr koncentracija viršija tirpumo vandenyje ribą. Tirpumo riba priklauso nuo LiBr koncentracijos ir temperatūros bei šiek tiek nuo slėgio. Viršijus koncentracijos ribą iškritusios kietos nuosėdos linkusios prilipti prie vamzdinių komponentų, o jeigu netinkamos sąlygos išlieka, nuosėdos gali visiškai užkimšti cirkuliacinę sistemą ir sustabdyti įrenginio darbą [9]. Didžiausia rizika įvykti kristalizacijai absorbciniame šilumos siurblyje yra perkaitinant LiBr tirpalą generatoriuje, patiekus per aukštos temperatūros garą į AŠS. Taigi, norint kontroliuoti kristalizacijos procesą reikia kontroliuoti tirpalo koncentraciją. Kitas efektyvus būdas išvengti kristalizacijos yra papildomų druskų priemaišų pridėjimas į mišinį. $H_2O + LiBr + Li + LiNO_3 + LiCl$ mišinys rekomenduotinas, kaip mažinantis korozijos tikimybę ir kristalizacijos temperatūrą, nes šio mišinio kristalizacijos temperatūra yra maždaug 35 °C žemesnė nei $H_2O + LiBr$ [11].

Kristalizacija įprastai nepakenkia absorbcinėms mašinoms, tačiau prastovos ir papildomas darbas, susiję su įrenginio darbingumo atstatymu, yra paskata vengti tokių įvykių. Korozija yra gana nesunkiai kontroliuojama, tam pritaikomi pH matuokliai ir korozijos inhibitoriai. Tačiau tinkamai prižiūrint šio tipo įrenginius tikėtina jų eksploatacijos trukmė siekia 20 metų [12].

Kiti vandens ir ličio bromido poros trūkumai yra susiję su žemu slėgiu ir dideliu tirpalo klampumu. Pastaruosius trūkumus iš esmės atperka tinkama įrangos konstrukcija. LiBr ir H_2O mišinys turi aukšto saugumo, didelio stabilumo ir didelės slaptosios šilumos pranašumus bei platų įrenginio apkrovimo diapazoną. Dauguma vandens ir ličio bromido absorbcinių mašinų užtikrina apkrovos pokyčius, keisdamos absorbento tirpalo pakartotinės koncentracijos greitį [14].

Kitas itin populiarus mišinys $H_2O + NH_3$ buvo plačiai naudojamas nuo pat absorbcinių šaldymo sistemų atsiradimo. Šis mišinys yra itin stabilūs esant įvairioms darbinėms temperatūroms ir slėgiui. NH_3 yra geras šaltnešis dėl aukštos slaptosios garavimo šilumos bei žemos užšalimo temperatūros ($-77\text{ }^\circ\text{C}$) [11].

Tikriausiai pagrindinis amoniako ir vandens mišinio trūkumas yra tai, jog vanduo yra pakankamai lakus, todėl amoniako garuose įprastai pastebimas vandens garų kiekis. Todėl norint pagerinti šios absorbcinės sistemos efektyvumą, naudojamas įrenginys rektifikatorius, kuris atskiria vandens garus iš mišinio. Kitas neigiamas šio tirpalo aspektas – šis mišinys neskirtas taikymui aukštoje temperatūroje. Taip pat, siurblių eksploatavimo išlaidos yra ganėtinai didelės, nes reikalingi galingi siurbliai, kelių dešimčių atmosferų slėgiu įrenginyje palaikyti. Be to, distilijuojant garus, padidėja įrenginio sudėtingumas ir su tuo susijusios pastoviosios išlaidos, o norint laikyti suslėgtą amoniaką, reikia tinkamų prevencijos ir apsaugos priemonių, dėl mišinio lakumo, toksiškumo ir degumo [14].

Amoniakas yra toksiškas žmonėms, taip pat pavojingas žinduoliams, o ypač gyvybei, esančiai vandens telkiniuose, tačiau nekenksmingas aplinkai, nes nedaro neigiamos įtakos ozono sluoksniui ir neprideda prie šiltnamio efekto [13].

Be jau aptartų standartinių šaldymo agentų yra išskiriamos kelios kitos jų rūšys. Mišiniai su vandeniu yra daug žadantys, nes tai daugiausia vandens ir ličio bromido, su papildomomis priemaisomis, mišiniai arba tokie tirpalai, kuriuose ličio bromido druska pakeista kitomis druskomis. Kita šaltnešių rūšis – tirpalai turintys alkoholio priemaišų. Pagrindiniai šių skysčių, naudojančių alkoholį, pranašumai: didelis šiluminis stabilumas, pasiekama aukšta šildomosios terpės temperatūra ir tinkama slėgio temperatūros ir koncentracijų priklausomybė. Tačiau dauguma šio tipo tirpalų, kaip ir amoniakas, yra toksiški. Halogeniniai angliavandeniliai taip pat išskiriami kaip atskiras tirpalų tipas. Šio tipo skysčiai savyje turi R134a ar kitų hidrofluorintų angliavandenilių priemaišų [11]. 1 lentelėje pateikiamos skirtingų fluidų, naudojamų absorbciniuose šilumos siurbliuose, pagrindinės charakteristikos.

1 lentelė. Skirtingų AŠS naudojamų fluidų charakteristikų lyginamoji analizė [11]

Mišinys	Charakteristikos
$H_2O + LiBr + CH_3COOK$	Lengvai prieinamas ir nekenkiantis aplinkai, tinka žemesnėms, nei $LiBr + H_2O$ temperatūroms užtikrinti
$NaOH + KOH + H_2O$	Daug platesnis nei $LiBr + H_2O$ tirpalo pritaikomumas, galimas aukštesnis temperatūros pakėlimas įrenginyje, geresnis COP
$H_2O + LiBr + LiNO_3$	Alternatyva įprastam $LiBr + H_2O$ su didesniu COP ir mažesniu koroziškumu
$H_2O + LiBr + HO(CH_2)_3OH$	Didesnis COP su mažesniu šaltnešio debitu nei $LiBr + H_2O$, aušinamas oru, mažiau tikėtina kristalizacija
TFE + TEGDME (2,2,2-trifluoroethanol + tetraethylene glycol dimethyl ether)	Tinkama žemesnė šilumos šaltinio temperatūra, aukštesnis nei $NH_3 + H_2O$ naudingo veiksmo koeficientas
Acetone + $ZnBr_2$	Galimas vidutinės šilumos šaltinio temperatūros pakėlimas iki $50\text{ }^\circ\text{C}$
$H_2O + \text{monomethylamine}$	Panašios savybės kaip NH_3 , tačiau tenkina žemesnis garų slėgis

Apibendrinant, absorbciniuose šilumos siurbliuose dažniausiai sutinkami tirpalai–šaltnešiai yra LiBr ir H₂O bei H₂O ir NH₃. Amoniako ir vandens ciklas yra sudėtingesnis dėl papildomos skysčių garų atskyrimo technologijos, taipogi šio tipo AŠS tikėtinos didesnės pastoviosios sąnaudos elektrai, dėl galingesnių, didesnę slėgį turinčių užtikrinti, cirkuliacinių siurblių. Tačiau, ličio bromido ir vandens mišinys taip pat turi savo neigiamų aspektų, kurių ryškiausias – kristalizacijos pavojus. Apibendrintos šių mišinių savybės pateiktos 2 lentelėje.

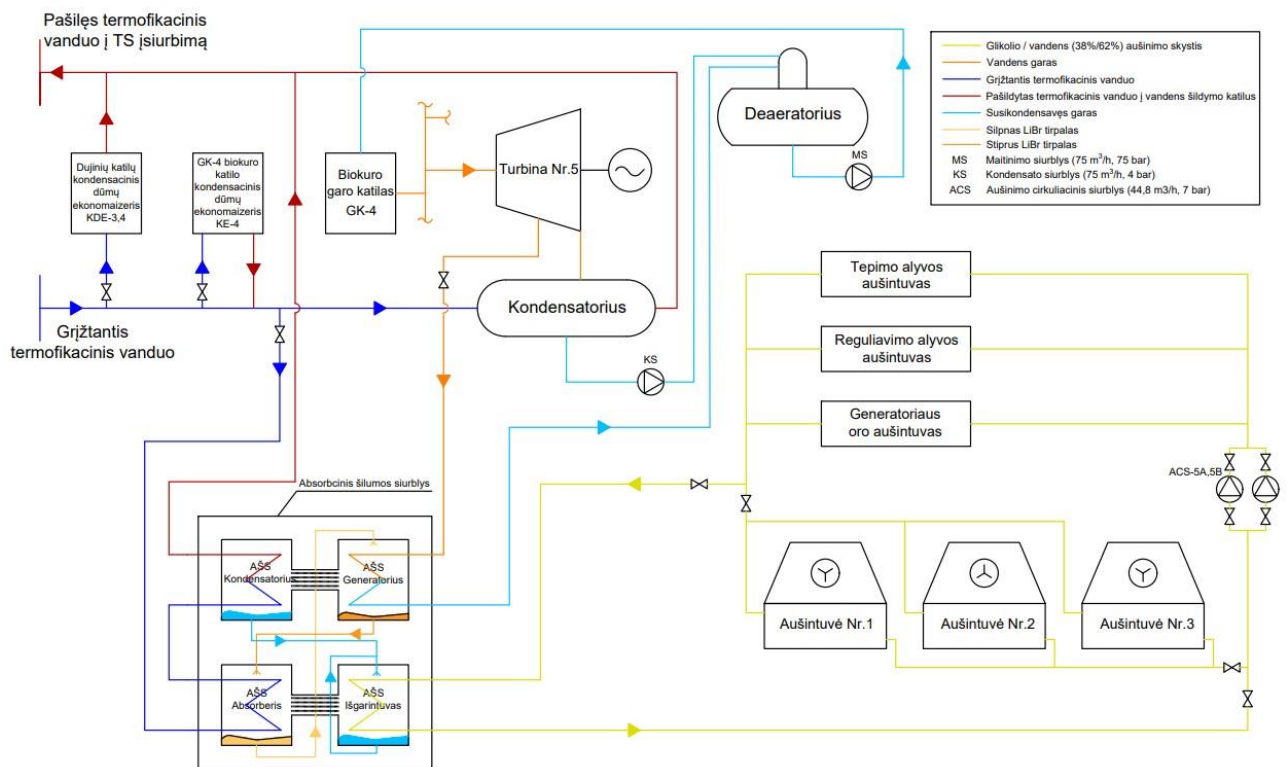
2 lentelė. AŠS darbinių agentų savybių palyginimas [11]

Savybės	Amoniakas / vanduo	Vanduo / ličio bromidas
Didelė slaptoji šiluma	Gerai	Puikiai
Šaltnešio garų slėgis	Per aukštas	Per žemas
Žema užšalimo temperatūra	Puikiai	Ribotas taikymas
Žemas klampumas	Gerai	Gerai
Absorbento garų slėgis	Prastai	Puikiai
Mišinio kietosios būsenos nebuvimas	Puikiai	Ribotas taikymas
Mišinio toksiškumas	Prastai	Gerai
Šaltnešio ir absorbento suderinamumas	Gerai	Gerai

3.3. Technologinis sprendimas atliekinės šilumos atgavimui absorbciniu šilumos siurbliu

Literatūros analizė parodė, jog absorbciniai šilumos siurbliai yra plačiai taikomi kogeneracinėse elektrinėse, žemų parametrų atliekinės energijos atgavimui. Kadangi analizuojamo atliekinės energijos atvejo parametrai atitinka įprastus absorbciniams šilumos siurbliams, taip pat turimas žemo potencialo (iki 2,7 bar) garo srautas, todėl tikėtina, kad AŠS įrengimas gali būti tiek ekonomiškai, tiek aplinkosauginiu požiūriu naudingas.

Termofikacinėje elektrinėje esančios sistemos esmė – iš turbinos tepimo, reguliavimo alyvų ir generatoriaus oro aušintuvo šiluma perduodama aušinimo skysčiui (vandens ir glikolio mišiniui), kuris cirkuliuodamas uždaroje sistemoje, trisdešimt šešiais nedideliais ventiliatoriais šilumą šalina į aplinką. Siūlomas absorbcinio šilumos siurblio sprendimas pavaizduotas 15 pav. Šio technologinio sprendimo esmė – vietoje aušinimo skysčiui perduodamos ir šalinamos į aplinką šilumos, ši atliekinė šiluminė energija galėtų būti panaudojama absorbciniame šilumos siurblyje, nes papildomai panaudojant nedidelį kiekį žemų parametrų garo, būtų pašildomas iš centralizuotų šilumos tinklų grįžtantis atvėsęs termofikacinis vanduo.



15 pav. Atliekinės energijos atgavimui termofikacinėje elektrinėje įrengto absorbcinio šilumos siurblio technologinė schema

Schemoje (žr. 15 pav.) pavaizduota, kaip grįžantis termofikacinis vanduo prateka kondensacinį dūmų ekonomizerį KE-4, ir pašildytas jame nukreipiamas į turbinos kondensatorių. Įrengus absorbcinį šilumos siurblių, patogiausia ir technologiškai efektyviausia vieta termofikaciniam vandeniui pašildyti būtų dalies termofikato, prieš kondensatorių, nukreipimas į AŠS, o jau pašildyto srauto grąžinimas už jo. Į AŠS nukreiptas srautas grąžinamas už turbinos kondensatoriaus, todėl, kad prie žemesnės vandens temperatūros vyksta geresnė kondensacija jame, o tai didina bendrą turbinos elektrinį efektyvumą. Apėjęs kondensatorių, AŠS pašildytas termofikacinio vandens srautas nukreipiamas į termofikacinės elektrinės tinklo siurblių įsiurbimą, kur siurbliais pakėlus vandens slėgį, srautas bus nukreiptas į miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemą, arba dar papildomai bus pašildytas dujiniuose vandens šildymo katiluose. Atliekinė aušalo šiluminė energija būtų perduodama darbiniam agentui AŠS garintuve, apeinant aušalo sistemos aušintuves. Varančioji energija, aukšto potencialo šiluma, absorbciniam įrenginiui būtų tiekama iš turbinos tarpinio garo nuėmimo zonos, ir šio įrenginio generatoriuje panaudojama išgarinti lakesnįjį ličio bromido ir vandens tirpalo komponentą, vandenį, kuris AŠS kondensatoriuje kondensuodamasis atiduotų šilumą termofikaciniam vandeniui. Susikondensavęs garas iš AŠS būtų grąžinamas į garo katilinės deaeratorius.

3.4. AŠS šiluminės galios ir srautų balanso skaičiavimai

Tam, kad apskaičiuoti termofikaciniam vandeniui suteikiamą šiluminę galią, reikia žinoti AŠS absorberio ir kondensatoriaus arba generatoriaus ir garintuvo sumines šilumines galias:

$$Q_{\text{š}} = Q_A + Q_K = Q_G + Q_I; \quad (3)$$

Iš pirmos lygties galima matyti, kad ši suminė šiluminė galia yra lygi suminei AŠS garintuvo ir generatoriaus šiluminei galiai, todėl užtenka apskaičiuoti kažkuriuos du dydžius.

Priimamas absorbcinio šilumos siurblio naudingumo koeficientas, deklaruojamas daugumos ličio bromido absorbcinių šilumos siurblių gamintojų – $COP_{\xi} = 1,7$, tuomet, žinant atliekinės šilumos užtikrinamą galią, kuri suteikiama įrenginio garintuvui, galima išskaičiuoti generatoriui reikiamą galią:

$$COP_{\xi} = \frac{Q_G + Q_I}{Q_G}; \quad (4)$$

Garintuvo šiluminė galia, atgauta iš atliekinės šilumos srauto, žinoma iš aušinančio skysčio sistemos parametrų:

$$Q_I = 237 \text{ kW}; \quad (5)$$

Generatoriuje reikalinga užtikrinti šiluminė galia randama:

$$Q_G = \frac{Q_I}{(COP_{\xi} - 1)} = \frac{237}{(1,7 - 1)} = 338,6 \text{ kW}; \quad (6)$$

Taigi, AŠS šiluminė galia:

$$Q_{\xi} = Q_G + Q_I = 338,6 + 237 = 575,6 \text{ kW}; \quad (7)$$

Toliau apskaičiuojama, kiek garo iš turbinos ekstrakcinio nuėmimo bus sunaudojama šiam AŠS veikti:

$$G_g = \frac{Q_G}{h_{141} - h_{90}} = \frac{338,6}{2734,67 - 376,96} = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,52 \frac{\text{t}}{\text{h}}; \quad (8)$$

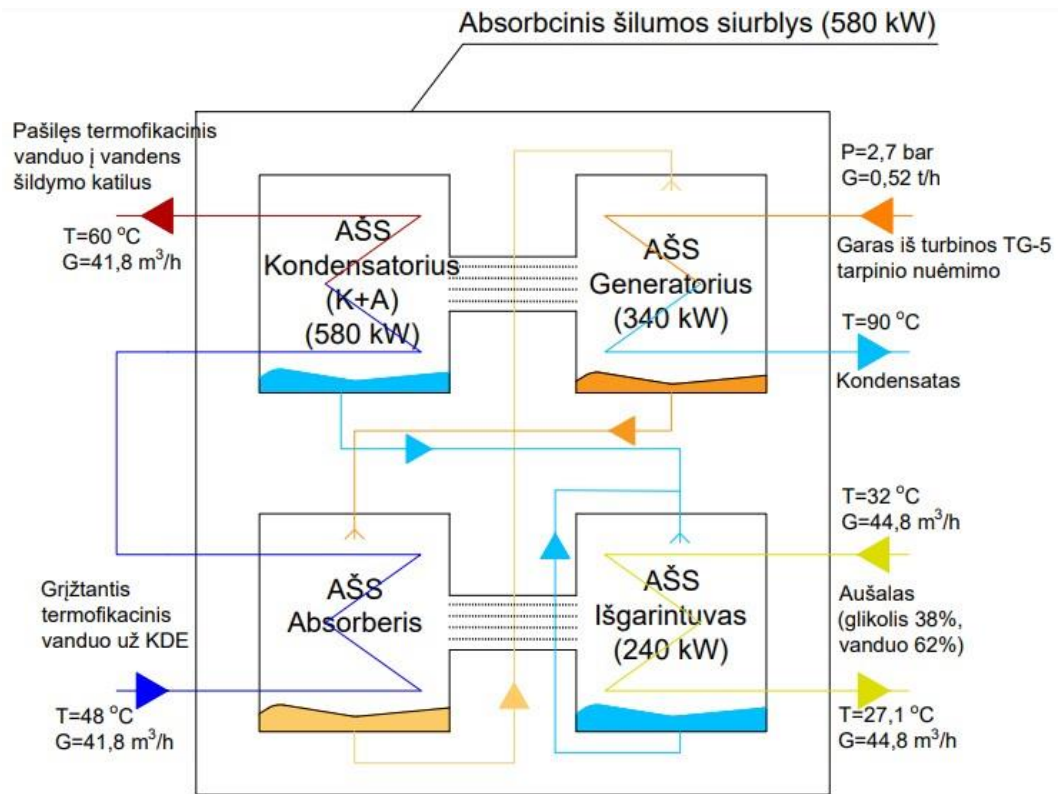
čia G_g – garo debitas iš turbinos ekstrakcinio laipsnio, kg/s; h_{141}, h_{90} – į AŠS generatorių įeinančio redukuoto (141 °C, 2,7 bar) garo ir išeinančio 90 °C kondensato entalpijos, kJ/kg [16].

Termofikacinio vandens debitas per AŠS apskaičiuojamas sekančiais:

$$G_{TV} = \frac{Q_{\xi}}{c_p \times \Delta t} = \frac{575,6}{4,19 \times 12} = 11,45 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 11,45 \times \frac{3600}{986} = 41,8 \text{ m}^3/\text{h}; \quad (9)$$

čia c_p – savitoji vandens šiluma, kJ/kg·K; Δt – termofikacinio vandens temperatūrų skirtumas tarp įėjimo į AŠS ir išėjimo.

16 pav. pavaizduota principinė technologinė AŠS schema su šilumos ir srautų balansų skaičiavimo rezultatais. Šioje schemoje pavaizduota supaprastinta AŠS konstrukcija, įeinantys, išeinantys ir vidiniai srautai bei jų tekėjimo kryptys.



16 pav. AŠS principinė technologinė schema su šilumos ir srautų balanso skaičiavimų rezultatais

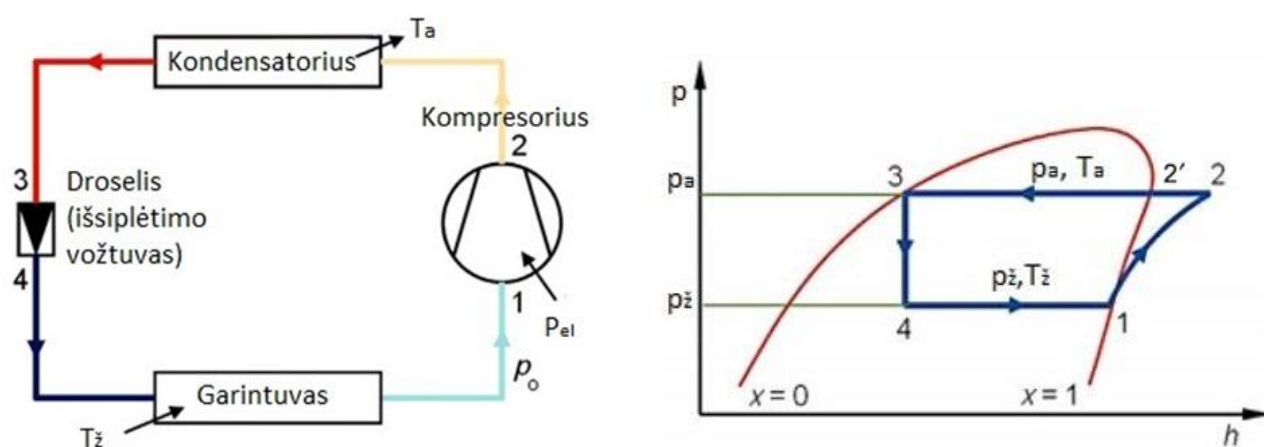
4. Atliekinės šilumos atgavimas kompresoriniu šilumos siurbliu

4.1. Kompresorinio šilumos siurblio veikimo principas

Šilumos siurblio veikimo principas yra paremtas atvirkštiniu Karno termodinaminiu ciklu, kuriame naudojant mechaninį darbą, galima šilumą paimti iš žemos temperatūros aplinkos ir ją perkelti į aukštesnės temperatūros aplinką. Žemos temperatūros šilumos šaltinis gali būti oras, vandens telkinys, gruntas ir kita. Aukštesnės temperatūros šaltiniu dažniausiai būna patalpos oras arba pastato ar centralizuoto šildymo sistemos vanduo [16].

Nors kompresoriniai šilumos siurbliai (KŠS) gali būti įvairių tipų, tačiau šiame darbe analizuojami tik gariniai kompresoriniai, elektra varomi, šilumos siurbliai, nes tai dažniausiai pramonėje sutinkamas kompresorinių šilumos siurblių tipas.

Vienos pakopos šilumos siurblio schema ir ciklas pavaizduoti 17 paveikslėlyje.



17 pav. Vienos pakopos garinio kompresorinio šilumos siurblio ciklas ir p–h diagrama

Paprasčiausias garinio kompresorinio šilumos siurblio ciklas (žr. 17 pav.) yra laikomas toks, kuriame vyksta adiabatinis suslėgimas be garų perkaitinimo ar skysčio peraušinimo.

Ciklo eiga:

1 – 2: vykstant adiabatiniam suslėgimui kompresoriuje, darbo agento slėgis ir temperatūra kyla nuo pradinių verčių garintuve p_z , T_z iki galinių verčių kondensatoriuje p_a , T_a ($T_2 > T_a$);

2–2': darbo agentas izobarinio proceso metu aušta (nuo T_2 iki T_2' , kai šis yra lygus T_a);

2'–3: darbo agento garai izoterminio-izobarinio proceso metu kondensuojasi kondensatoriuje;

3–4: kondensatas droseliuojamas, prie pastovios entalpijos krinta darbo agento temperatūra;

4–1: darbo agentas izotermiškai–izobariškai išgarinamas garintuve.

Šilumos siurblio ciklo geriausiai apibūdina jo tobulumo parametras – siurblio naudingo veikimo koeficientas (COP), kuris apskaičiuojamas:

$$COP = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}, \quad (10)$$

Realus šilumos siurblio ciklas nuo teorinio skiriasi:

- suslėgimo procesas kompresoriuje yra negrįžtamas;
- šilumos mainai garintuve ir kondensatoriuje yra su nuostoliais;
- darbo agentas ciklo metu patiria slėgio nuostolius;
- šilumos siurblio įrenginiai mainosi šiluma su aplinka, dėl ko nuolat prarandama dalis šilumos.

4.2. Darbinių šaldymo agentų palyginamoji analizė

Dėl XX a. viduryje plačiai pramonėje išplitusių šaldymo agentų neigiamo poveikio atmosferos ozono sluoksniui ir globaliniam atšilimui Monrealio ir Kioto protokoluose buvo susitarta pradėti mažinti ir nuosekliai pereiti prie atmosferai nekenksmingų šaldymo agentų. Remiantis šiais protokolais ir vėlesniais jų papildymais bei pakeitimais, šaldymo agentai gali būti klasifikuojami [17]:

- turintys stipriai naikinantį poveikį ozono sluoksniui ir žymiai sustiprinantys šiltnamio efektą (chlorfluorinti angliavandeniliai CFC);
- turintys sumažėjusį poveikį ozono sluoksniui ir vidutinio stiprumo šiltnamio efekto įtaką (hidrochlorfluorinti angliavandeniliai HCFC);
- nekenksmingi ozono sluoksniui, mažesnis šiltnamio efekto poveikis (hidrofluorinti angliavandeniliai HFC);
- nekenksmingi ozono sluoksniui, su labai mažu arba be šiltnamio efekto poveikio (anglies dioksidas CO₂ (R744), natūralūs hidro angliavandeniliai HC, ir amoniakas NH₃ (R717)).

Europos Parlamento ir Tarybos reglamente (ES) Nr. 517/2014 dėl fluorintų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, kuriuo panaikinamas reglamentas (EB) Nr. 842/2006 [18], įvedami draudimai pateikti rinkai didžiausią poveikį ozono sluoksniui ir šiltnamio efektui turinčius šaldymo agentus ir su jais susijusią įrangą. Jie įvedami palaipsniui nuo 2007 metų, svarbiausieji, aktualūs 2021 metais: 2020 metais komercinės paskirties hermetiškuose šaldytuvuose ir šaldikliuose uždrausti HFC šaldymo agentai, kurių visuotinio atšilimo potencialas (VAP) viršija 2500, lyginant su CO₂ dujomis, o jau 2022 sausio 1 dieną bus draudžiami ir tie, kurių VAP viršija 150.

Šilumos siurblių įranga stipriai priklauso nuo specifinių šaldymo agentų savybių. Pagrindinės jų – termofizinės, susijusios su šilumos pernešimu, suslegiamumu, molekuline mase ir virimo tašku ar tankiu, tačiau nemažiau svarbios ir tokios savybės kaip toksiškumas, degumas, kaina, cheminis stabilumas darbinėmis sąlygomis, gyvavimo laikas atmosferoje, poveikis ozono sluoksniui ir šiltnamio efektui.

Toksiškumas įprastai vertinamas kaip juntamas poveikis prie tam tikros darbo agento koncentracijos ore. Degumas – kaip galimybė oro ir darbo agento mišiniui užsiliepsnoti ore prie tam tikrų sąlygų. Skirtingi agentai vertinami ir lyginami pasitelkiant įvairius standartus ir atliekant testus. 3 lentelėje pateiktos apibendrintos skirtingų šaldymo agentų savybės, kai paprasčiausiame kompresorinio šilumos siurblio cikle išgarinimo temperatūra –15 °C, o kondensacijos temperatūra 30 °C.

3 lentelė. Skirtingų šaldymo agentų parametrai cikle –15/30 °C [19]

Šaldymo agentas	p_0 , bar	p_k , bar	$\frac{p_k}{p_0}$	q_{0v} , kJ/m ³	COP	t_2 , °C	Saugumo lygis
R12	1,82	7,44	4,08	1273,40	4,70	37,81	A1
R134a	1,64	7,70	4,70	1225,70	4,60	36,61	A1
R404A	3,61	14,28	3,96	2099,10	4,16	36,01	A1
R410A	4,80	18,89	3,94	3093,00	4,38	51,23	A1
R600a	0,89	4,05	4,55	663,80	4,71	32,66	A3
R717	2,36	11,67	4,94	2167,50	4,76	99,08	B2L
R744	22,90	72,10	3,15	7979,00	2,69	69,50	A1

3 lentelėje pateikti sutrumpinimai: p_0 – išgarinimo slėgis; p_k – kondensacijos slėgis; p_k / p_0 – suslėgimo santykis; q_{0v} – tūrinė šaldymo talpa; COP – naudingo veikimo koeficientas; t_2 – išleidimo temperatūra kompresoriaus išėjime; saugumo lygis: A1 – nedegus, mažai toksiškas; A3 – labai degus, mažai toksiškas; B2L – mažai degus, labai toksiškas [19].

Taigi, aplinkosauginiu požiūriu labiausiai tinkami šaldymo agentai yra tokie:

- turintys žemą arba nulinį poveikį ozono sluoksniui;
- turintys žemą šiltnamio efekto poveikį (taipogi, kuo žemesnį poveikį per visą gyvavimo ciklą);
- turintys sąlyginai trumpą gyvavimo atmosferoje laikotarpį;
- turintys tinkamus parametrus aukštam sistemos efektyvumui užtikrinti;
- nedegūs ir netoksiški.

Taigi, remiantis jau minėtu Europos Parlamento ir Tarybos reglamentu, pramonėje vyksta palaipsninė šaldymo agentų kaita į vis mažiau darančius įtakos atmosferai. Šiuo metu sparčiai pereinama prie ketvirtos kartos šaldymo agentų, kurie nekenksmingi ozono sluoksniui ir su labai mažu arba be šiltnamio efekto poveikio. Pramoninių garinių–kompresorinių šilumos siurblių rinkoje tai reiškia populiariausių R134a, R404A, R410A, R407C ir kt. keitimą į R717, R744, R1234yf, R1234ze ir kt. 4 lentelėje pateiktas plačiai taikomo aukštatemperatūrose šilumos siurblių sistemose R134a savybių palyginimas su potencialiais jo ketvirtos kartos pakaitalais R1234yf ir R1234ze(E).

4 lentelė. Pagrindinės R134a ir R1234yf šaldymo agentų savybės [20]

Nr.	Savybė	R134a	R1234yf	R1234ze(E)
1	Cheminė formulė	C ₂ H ₂ F ₄	CF ₃ CF=CH ₂	CHF=CHCF ₃
2	Saugumo lygis	A1	A2L	A2L
3	Kritinė temperatūra, K	374,21	367,85	382,51
4	Kritinis slėgis, MPa	4,06	3,38	3,64
5	Garų tankis prie 280 K, kg/m ³	18,66	22,25	15,00
6	Sotinimo slėgis prie 280 K, MPa	0,38	0,40	0,28
7	Slaptoji garavimo šiluma prie 280 K, kJ/kg	193,17	158,52	179,49
8	Tūrinė talpa prie 280 K, kJ/m ³	3604,55	3527,55	2693,07
9	Ozono sluoksnio ardymo potencialas	0	0	0

Nr.	Savybė	R134a	R1234yf	R1234ze(E)
10	Visuotinio atšilimo potencialas	1300	<1	<1

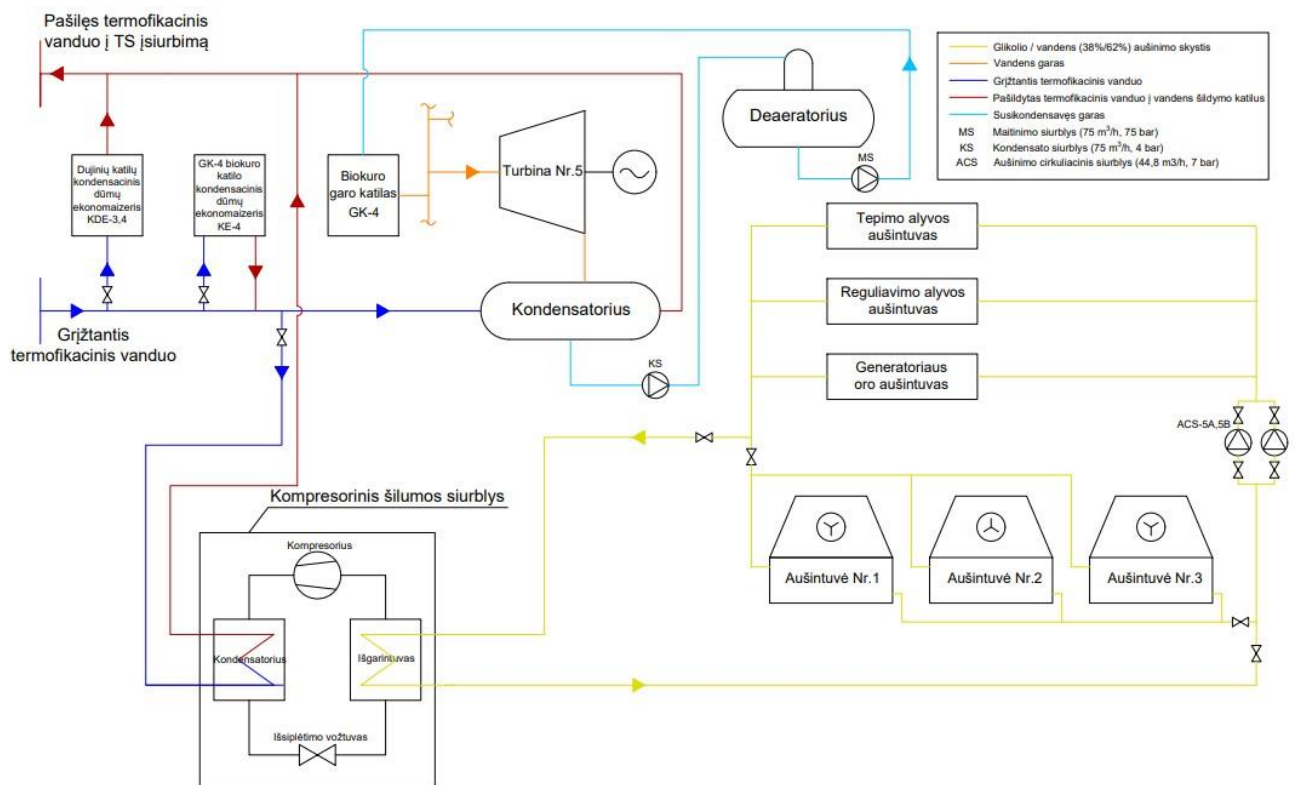
Iš šioje lentelėje pateiktų duomenų akivaizdu, kad R134a, R1234yf ir R1234ze(E) turi ganėtinai panašias savybes. Tiesa, R1234ze(E) tūrinė talpa ir sotinimo slėgis yra santykinai mažesni nei kitų dviejų analizuotų fluidų. Taip pat visi trys šaltnešiai yra mažai toksiški, tik R1234yf ir R1234ze(E) šiek tiek labiau degūs, tačiau jų visuotinio atšilimo potencialas yra artimas 0. Taipogi visų trijų nagrinėtų šaldymo agentų naudingo veiksmo koeficientas COP prie vienodų sąlygų yra labai artimas: vidutiniškai R134a didžiausias, R1234yf žemesnis tik apie 2 %, o R1234ze(E) žemesnis apie 5 %, lyginant su R134a. Taigi visi lyginami fluidai gali būti pritaikomi toje pačioje sistemoje, nes R134a pakeitimui į R1234yf užtenka tik minimalių sistemos pakeitimų, tačiau R1234ze(E) reikalauja šiek tiek didesnio kompresoriaus darbinio tūrio, norint pasiekti tą pačią šiluminę galią [20].

Vertinant natūralius darbo agentus, kaip alternatyvą dabartiniams trečios kartos agentams, CO₂ (R744) yra bene daugiausiai žadantis šaltnešis. Jis nedegus, netoksiškas, turi aukštą tūrinę talpą, t. y. galimybė gaminti kompaktiškas sistemas, puikias šilumos pernešimo savybes, platų prieinumą, santykinai nedidelę kainą ir pakartotinio naudojimo galimybę. Tiesa, pagrindiniai šio šaldymo agento minusai yra dideli energijos suvartojimai, dėl sistemoje reikiamo užtikrinti aukšto slėgio, ir talpumo sumažėjimai, esant aukštoms temperatūroms [17].

4.3. Technologinis sprendimas atliekinės šilumos atgavimui kompresoriniu šilumos siurbliu

Atliekinės šilumos atgavimui kompresoriniai šilumos siurbliai yra daug plačiau paplitę negu absorbciniai. Vienas pagrindinių šių siurblių privalumų – jiems reikalinga varančioji energija – kitaip nei gasas, elektra yra plačiai prieinama beveik bet kuriame gamybinės, komercinės ar gyvenamosios paskirties pastate.

Nagrinėjamo atliekinės šilumos atvejo parametrai patenka į platų kompresorinių šilumos siurblių darbinį parametru diapazoną. Taipogi iš šio tipo šiluminių siurblių darbo agentų analizės paaiškėjo, kad pramonėje taikomi aplinkosauginiu požiūriu itin mažai kenksmingi fluidai, tai lemia, jog KŠS aplinkosauginiu požiūriu gali būti konkurencinga alternatyva absorbciniams šilumos siurbliams. Todėl, kaip alternatyva atliekinės šilumos atgavimui absorbciniu šilumos siurbliu, šiame darbe siūlomas KŠS sprendimas, pavaizduotas 18 paveikslėlyje. Šio technologinio sprendimo esmė tokia pati kaip jau analizuoto absorbcinio šilumos siurblio sprendimo – atgauti atliekinę, termofikacinę elektrinės turbino pagalbinių įrenginių darbo metu susidariusią šilumą. Tačiau, šiuo atveju visiškai nereikalingas papildomas garo srautas, nes vietoje jo, šio tipo siurbliuose naudojama elektra, sukanti siurblio kompresorių ir slegianti šaldymo agento garus. Šildomoji terpė pasirinkta vienoda – centralizuotais šilumos tinklais grįžtantis atvėsęs termofikacinis vanduo.



18 pav. Termofikacinės elektrinės atliekinės šilumos energijos atgavimui įrengto kompresorinio šilumos siurblio technologinė schema

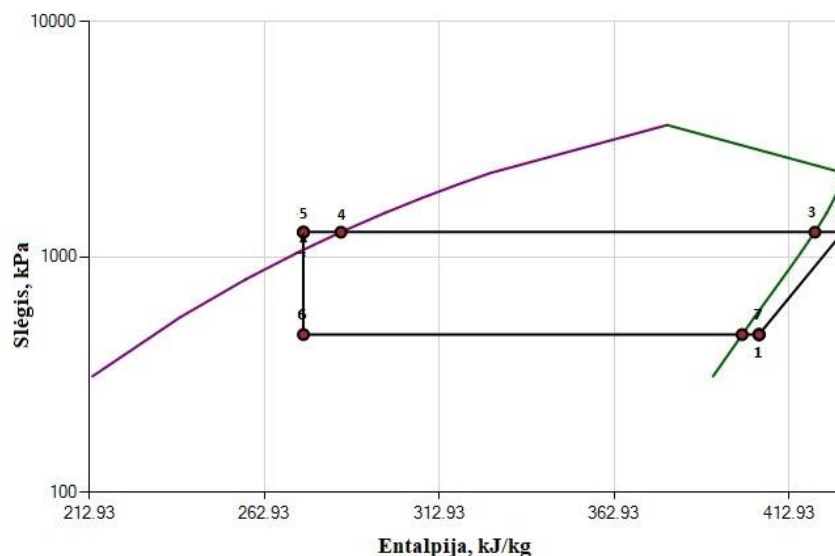
18 paveikslėlio schemoje pavaizduota, kaip grįžtantis termofikacinis vanduo prateka kondensacinį ekonomizaizerį KE-4 ir jame pašildytas nukreipiamas į turbinos kondensatorių. KŠS sprendimui reikalinga įrengti papildomą termofikacinio vandens atšaką, prieš turbinos kondensatorių, į šilumos siurblių, iš kur pašilęs termofikatas būtų grąžinamas į centralizuoto tinklo vamzdyną, jau už kondensatoriaus, prieš tinklo siurblius.

Atliekinė turbinos procesų aušalo šiluminė energija, apeinant aušalo sistemos aušintuves, būtų perduodama darbo agentui KŠS garintuve, kur išgarintų jo darbo agentą. Atvėsintas aušinimo skystis būtų grąžinamas prieš cirkuliacinius siurblius, kur toliau tekėtų uždaroje sistemoje per turbinos alyvų ir generatoriaus oro aušintuvo šilumokaičius ir vėl būtų nukreiptas į kompresorinį šilumos siurblių, atliekinės šilumos energijos atgavimui.

4.4. KŠS šiluminės galios ir srautų balanso skaičiavimai

Kompresorinio šilumos siurblio parametrus nustatyti buvo pasitelkta programinė įranga – *Genetron Properties V 1.4.1* [21]. Kompresorinio šilumos siurblio darbo agentas pasirinktas naujos kartos, itin mažą įtaką visuotiniam atšilimui darantis ir reikiamus parametrus galintis užtikrinti hidrofuooroolefinams (HFO) priklausantis R1234ze. Šis agentas pasirinktas vietoje labiausiai įprasto, aukštesnėms temperatūroms pritaikyto, R134a. Toks pasirinkimas atliktas dėl naujojo agento daromos mažesnės žalos atmosferai ir jo atitikimo naujausiems Europiniams reglamentams [18] bei dėl realaus šilumos siurblių gamintojų šio agento taikymo [22]. Kompresorinio šilumos siurblio su šaltnešiu R1234ze ciklo charakteristikos gautos su pradiniais duomenimis: izoentropinis kompresoriaus koeficientas – 0,8; tūrinis kompresoriaus suslėgimo koeficientas – 0,95; šaldymo galia, t. y.: šiluminė galia suteikiama KŠS garintuvui – 237 kW; išgarinimo temperatūra garintuve – 23 °C, kuri priimta 4 °C mažiau už aušalo ištekėjimo iš KŠS temperatūrą; perkaitinimas garintuve –

5 °C temperatūros pokytis; kondensacijos temperatūra – 60 °C; peraušinimas kondensatoriuje – 7 °C temperatūros pokytis. Atlikus KŠS parametru, su šiais pradiniais duomenimis, modeliavimą, gauta R1234ze šilumos siurblio ciklo diagrama, slėgio ir entalpijos ašyse, pavaizduota 19 paveikslėlyje.



19 pav. R1234ze šilumos siurblio ciklo diagrama p–h koordinacių ašyse [21]

Iš šios ciklo diagramos nustatomos entalpijos 1–4 taškuose ir 10 formule apskaičiuojamas teorinis šilumos siurblio naudingo veikimo koeficientas COP:

$$COP = \frac{h_2 - h_5}{h_2 - h_1} = \frac{428,32 - 274,07}{428,32 - 404,29} = 6,42; \quad (11)$$

Toliau, turint šilumos siurblio naudingo veikimo koeficientą ir šilumos kiekį, suteikiamą KŠS garintuvui, apskaičiuojama teorinė šilumos siurblio šildymo galia:

$$Q_{KŠS} = \frac{Q_I}{(1 - \frac{1}{COP})} = \frac{237 \text{ kW}}{(1 - \frac{1}{6,42})} = 280,73 \text{ kW}; \quad (12)$$

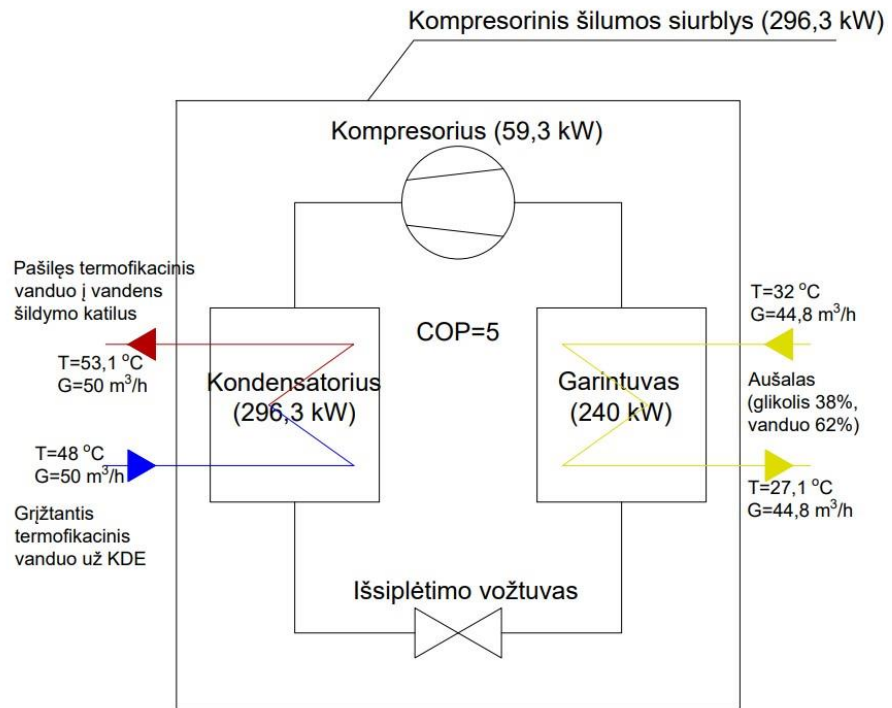
čia Q_I – KŠS garintuve atgaunama atliekinės šilumos galia, kW.

Teorinė elektrinė KŠS kompresoriaus galia:

$$Q_{el} = \frac{Q_{KŠS}}{COP} = \frac{280,73 \text{ kW}}{6,42} = 43,73 \text{ kW}; \quad (13)$$

Deja, bet teorinis šilumos siurblio naudingo veikimo koeficientas ir realus, praktiškai pasiekiamas, skiriasi, daugiausia dėl atskirų KŠS komponentų, šilumokaičių, darbo agentų ir kitų techninių netobulumų. Todėl tolimesniuose kompresorinio šilumos siurblio skaičiavimuose priimamas realesnis ir prie esamų sąlygų praktiškai pasiekiamas naudingo veikimo koeficientas COP = 5.

Praktinių, kompresorinio šilumos siurblio, galios ir įeinančių ir išeinančių srautų balanso skaičiavimų rezultatai pateikiami toliau (žr. 20 pav.).



20 pav. KŠS principinė technologinė schema su šilumos ir srautų balanso skaičiavimų rezultatais

5. Ekonominė analizė

Atliekinės šilumos atgavimas šilumos siurbliais turi duoti ne tik aplinkosauginę naudą ar būti energetiškai protingas sprendimas, bet investicijos į naujos įrangos įsigijimą ar modernizavimą turi duoti ir ekonominę naudą. Šiame skyriuje bus vertinamos investicijos į kompresorinį ir absorbcinį šilumos siurblius bei lyginami šių investicijų ekonominiai rodikliai ir atsipirkimo laikotarpiai.

5.1. Investicijos dydis

Siekiant nustatyti galimų investicijų dydį į apskaičiuoto galingumo absorbcinį ir kompresorinį šilumos siurblius, buvo surinkti įvairūs prieinami duomenys. Investicijų dydžiui į ličio bromido ir vandens AŠS nustatymui vertinti: komerciniai 2019–2020 metų šilumos siurblių gamintojų ir tiekėjų pasiūlymai, daugiausia iš AŠS integravimo į kondensacinius dūmų ekonomizerius, Danijos energetikos agentūros teikiami duomenys [13] ir duomenys apie jau įgyvendintą AŠS projektą [7]. Iš viso įvertinta 11 AŠS projektų ir gautas kainos vidurkis, atgaautos galios vienetai, – 655 tūkst. Eur/MW.

Šiame darbe siūlomo AŠS sprendimo atliekinei šilumai atgauti kaina turėtų būti bent 30 % mažesnė, nes nereikalinga papildoma įranga: dūmsiurbiai, kamino rekonstrukcija, II laipsnio kondensacinio dūmų ekonomizerio rekonstrukcija, papildomi pastatai ir kita. Tačiau dėl to, kad šis AŠS projektas sąlyginai mažos galios, ir ne visi AŠS gamintojai siūlo tokio galingumo įrangą, tikėtina AŠS 1 MW kainą priimu apskaičiuotą surinktų duomenų vidurkį.

Taigi, reikalinga investicija į siūlomą AŠS projektą – $655 \times 0,24 = 157,2$ tūkst. EUR/MW (0,24 MW iš TG-5 aušalo atgauta atliekinės šilumos galia).

Pagrindiniai kompresorinių šilumos siurblių kainų skirtumai atsiranda dėl skirtingų juose taikomų darbinių agentų, prie kurių turi būti pritaikyti šilumos siurblio komponentai. Investicijos dydžiui į KŠS nustatyti vertinti: komerciniai 2019 metų Lietuvoje veikiančių šilumos siurblių tiekėjų pasiūlymai (su R410A, R134a, R407C ir R1234ze šaltnešiais) ir Danijos energetikos agentūros teikiami duomenys [13]. Įvertinus duomenis iš 7 skirtingų šaltinių gautas KŠS kainos vidurkis (pagamintos galios vienetai) – 219 EUR/kW. Tačiau pridėjus įrenginio pastatymo ir paleidimo išlaidas ir įvertinus, jog pageidautinas ketvirtos kartos KŠS darbo agentas, kurio visuotinio atšilimo potencialas neviršija 150 (lyginant su CO₂) – priimama KŠS kaina (pagamintos galios vienetai) – 270 EUR/kW. Nagrinėjamu atveju, kai tikėtinas realus COP = 5 ir KŠS galia 296,3 kW, kompresorinio šilumos siurblio kaina būtų 80 tūkst. EUR. Ši suma ir priimama tolimesniuose KŠS ekonominiuose skaičiavimuose.

5.2. Finansinė parama

Siūlomiems atliekinės šilumos atgavimo projektams (KŠS ir AŠS) finansuoti galima prašyti dalinio finansavimo pagal klimato kaitos 2010 m. programą, patvirtintą Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2020 m. gegužės 11 d. įsakymu Nr. D1-270: „SAULĖS ENERGIJOS TECHNOLOGIJŲ, ŠILUMOS SIURBLIŲ IR ŠILUMOS SAUGYKLŲ PANAUDOJIMO CENTRALIZUOTAIS TINKLAIS TIEKIAMOS ŠILUMOS ENERGIJAI GAMINTI SKATINIMAS, PAKEIČIANT IŠKASTINIO KURO NAUDOJIMĄ“. Numatomas paramos intensyvumas – 30 % tinkamų finansuoti išlaidų, kai pagalba teikiama didelėms įmonėms, ir 40 % tinkamų finansuoti išlaidų, kai

pagalba teikiama vidutinėms įmonėms. Maksimalus subsidijos dydis vienam pareiškėjui yra 1 450 000 eurų [23].

Tikėtinas paramos dydis absorbcinio šilumos siurblio projektui, gavus pilną, 30 % dydžio intensyvumą: $157,2 \times 0,3 = 47,16$ tūkst. EUR.

Tikėtinas paramos dydis kompresorinio šilumos siurblio projektui, gavus pilną, 30 % dydžio intensyvumą: $80 \times 0,3 = 24$ tūkst. EUR.

5.3. Banko paskolos dydis

Tolimesniuose investicijų į šilumos siurblius atsiperkamumo skaičiavimuose vertinama, jog padengti dalį investuojamos sumos, atėmus paramos dydį, bus imama paskola. Paskolos dydis nustatomas remiantis galiojančiu 2015 metų Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos nutarimu „Dėl investicijų gražos normos nustatymo metodikos patvirtinimo“, kurio 10 punkte teigiama: „Skolinto ir nuosavo kapitalo struktūra yra laikoma optimalia, kai skolintas kapitalas sudaro 60 proc., nuosavas – 40 proc.“ [24]. Šitokia investicijų į šilumos siurblius struktūra, finansavimui gaunant banko paskola, priimama tolimesniuose investicijų atsipirkimo skaičiavimuose.

5.4. Pagrindinės prielaidos ekonominei analizei

Ekonominė analizė ir investicijos atsipirkimo skaičiavimai atliekami su tokiomis esminėmis prielaidomis:

- KŠS ir AŠS nusidėvėjimo laikotarpis – 16 metų (Danijos energetikos agentūros duomenimis tikėtinas šilumos siurblių nusidėvėjimo laikotarpis 15–25 metų [13]);
- Elektros energijos kaina biržoje – 0,05 EUR/kWh;
- Elektros kainos metinis augimas – 3 proc.;
- WACC (vidutinė svertinė kapitalo kaina) – 3,37 %; [24, 25];
- Finansinė diskonto norma – 5 proc.;
- Paskolos palūkanų norma – 3 %;
- Paskolos grąžinimo laikotarpis – 5 metai;
- ATL pirkimo kaina – 28,5 EUR/t;
- Dujų kaina – 27,97 EUR/MWh [26];
- Dujinių vandens šildymo katilų efektyvumas – 90 %;
- Absorbcinio šilumos siurblio elektros energijos suvartojimas – 0,25 MWh_s/kWh_{el} [27];
- Šilumos siurblių aptarnavimas ir remontas – kasmet 2 proc. nuo pradinės investicijos dydžio;
- Šilumos siurblio darbo laikas per metus – du variantai: 3000 h arba 8000 h.

5.5. Šilumos siurblių eksploataavimo kaštai

Siekiant atgauti atliekinę šilumą, įrengus šilumos siurblių, reikia įvertinti visas su juo susijusias kasmet patiriamas išlaidas. Šiuo atveju jas sudaro: elektros sąnaudos, aptarnavimas ir remontas, kasmet gražinama paskolos dalis ir paskolos palūkanos. Priimama, kad papildomo personalo šilumos siurblių eksploataavimui neprireiks, todėl darbo užmokesčio kaštai nevertinami. Taip pat nevertinamas šios investicijos įmonės pelno mokestis, kuris tikėtina išaugintų šio projekto išlaidas.

5.5.1. Patiriamos išlaidos dėl absorbcinio šilumos siurblio įrengimo

Vertinant, jog AŠS įsigytas be paramos ir dirbs 8000 valandų per metus, pirmais metais po įrenginio paleidimo patiriamos išlaidos apskaičiuojamos taip:

$$\begin{aligned} A\check{S}_{i\check{s}laidos} &= A\check{S}_{elektra1} + A\check{S}_{remontas} + A\check{S}_{paskola} + A\check{S}_{palūkanos} = \frac{0,24 \text{ MW} \times 8000 \text{ h}}{0,25 \frac{\text{MWh}_g}{\text{kWh}_{el}}} \times \\ &0,05 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}_{el}} + 157,2 \text{ tūkst. EUR} \times 0,02 + \frac{157,2 \text{ tūkst. EUR} \times 0,6}{5} + 157,2 \text{ tūkst. EUR} \times 0,6 \times 0,03 = \\ &384 \text{ EUR} + 3144 \text{ EUR} + 18\,864 \text{ EUR} + 2830 \text{ EUR} = 25\,222 \text{ EUR/metus}; \end{aligned} \quad (14)$$

čia $A\check{S}_{elektra1}$ – kintami elektros energijos sąnaudų padengimo kaštai; $A\check{S}_{remontas}$ – pastovieji kaštai absorbcinio šilumos siurblio aptarnavimui ir remontams; $A\check{S}_{paskola}$ – pastovieji kaštai paskolos gražinimui per 5 metus; $A\check{S}_{palūkanos}$ – kintami kaštai paskolos palūkanoms mokėti.

5.5.2. Patiriamos išlaidos dėl kompresorinio šilumos siurblio įrengimo

Kompresorinio šilumos siurblio atveju išlaidų skaičiavimo principas identiškas. Vertinant, jog KŠS įsigytas be paramos ir dirbs 8000 valandų per metus, pirmais metais po įrenginio paleidimo patiriamos išlaidos apskaičiuojamos taip:

$$\begin{aligned} K\check{S}_{i\check{s}laidos} &= K\check{S}_{elektra1} + K\check{S}_{remontas} + K\check{S}_{paskola} + K\check{S}_{palūkanos} = 59,26 \text{ kW} \times 8000 \text{ h} \times \\ &0,05 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}_{el}} + 80 \text{ tūkst. EUR} \times 0,02 + \frac{80 \text{ tūkst. EUR} \times 0,6}{5} + 80 \text{ tūkst. EUR} \times 0,6 \times 0,03 = \\ &23\,704 \text{ EUR} + 1600 \text{ EUR} + 9600 \text{ EUR} + 1440 \text{ EUR} = 36\,360 \text{ EUR/metus}; \end{aligned} \quad (15)$$

čia $K\check{S}_{elektra1}$ – kintami elektros energijos sąnaudų padengimo kaštai; $K\check{S}_{remontas}$ – pastovieji kaštai kompresorinio šilumos siurblio aptarnavimui ir remontams; $K\check{S}_{paskola}$ – pastovieji kaštai paskolos gražinimui per 5 metus; $K\check{S}_{palūkanos}$ – kintami kaštai paskolos palūkanoms mokėti.

5.6. Papildomos pajamos iš šilumos siurbliais atgautos atliekinės šilumos

Toliau įvertinamos kasmetinės papildomos pajamos, gautos įsirengus šilumos siurblių ir išnaudojus atliekinę šilumą. Papildomas pajamas sudaro: sutaupyta kuro kiekis, nedeginant gamtinių dujų ir šilumą gaminant iš atliekinės energijos, nepatirtos elektros sąnaudos, kaip kasmetinis sutaupymas nebeeikvojant elektros pagalbinių turbinų procesų aušalo aušintuvių ventiliatorių darbui, ir aplinkos taršos leidimų (ATL) sutaupymas ir pardavimas.

5.6.1. Pajamos dėl absorbcinio šilumos siurblio įrengimo

- Pajamos iš AŠS skaičiuojamos už atgautą šilumos kiekį per metus. Pirmų metų papildomos pajamos iš sutaupyto kuro šiluminės energijos eksploatuojant AŠS, kai jis dirba 8000 valandų per metus:

$$A\check{S}S_{kuras} = \frac{Q_{atliek} \times 8000 \text{ h} \times 27,97 \frac{EUR}{MWh}}{\eta_{duj.katil}} = \frac{0,24 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 27,97 \frac{EUR}{MWh}}{0,9} = 59\,669 \text{ EUR/metus}; \quad (16)$$

čia Q_{atliek} – atliekinė aušalo šiluma atgaunama AŠS garintuve, MW; $27,97 \frac{EUR}{MWh}$ – gamtinių dujų įsigijimo kaina (įskaičiuota dujų pirkimo kaina, perdavimas, akcizas); $\eta_{duj.katil}$ – dujinio vandens šildymo katilo efektyvumas.

- Pajamos įsirengus AŠS iš elektros energijos sutaupymo nebeekspluatuojant turbinos aušalo aušyklių (36 vnt. 0,29 kW galios ventiliatorių), nes elektros energija nebenaudojama sukurti elektrinius ventiliatorius ir šalinti atliekinę šilumą, o AŠS ši atliekinė šiluma naudingai panaudojama pašildyti termofikacinį vandenį:

- vidutinis metinis aušyklių apkrovimas – 51,6 %;
- ventiliatorių suminė galia – $36 \text{ vnt.} \times 0,29 \text{ kW} = 10,44 \text{ kW}$;
- aušyklių darbo laikas – 3000 h arba 8000 h;
- per metus sunaudojamas elektros kiekis aušinti turbinos TG-5 aušalą:

$$0,516 \times 10,44 \text{ kW} \times 8000 \text{ h} = 43\,096 \text{ kWh}_{el}; \quad (17)$$

Metiniai aušyklių eksploatavimo kaštai, sutaupomi įsirengus absorbcinį šilumos siurblių:

$$A\check{S}S_{elektra2} = 43\,096 \text{ kWh}_{el} \times 0,05 \frac{EUR}{kWh} = 2155 \text{ EUR/metus}; \quad (18)$$

- Pajamos iš sumažintų metinių CO₂ teršalų išmetimų ir dėl to sutaupytų apyvartinių taršos leidimų kiekio:

$$A\check{S}S_{ATL} = Q_{atliek} \times 8000 \text{ h} \times c_{CO_2} \times ATL = 0,24 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,22 \frac{t}{MWh} \times 28,5 \text{ EUR/t} = 12\,038 \text{ EUR/metus}; \quad (19)$$

čia ATL – apyvartinių taršos leidimų pirkimo kaina, EUR/t; c_{CO_2} – gamtinių dujų CO₂ emisijų faktorius, $\frac{t(CO_2)}{MWh}$ [2.18 lent. 28].

5.6.2. Pajamos dėl kompresorinio šilumos siurblio įrengimo

- Pajamos iš KŠS skaičiuojamos už pagamintą šilumos kiekį per metus. Pirmų metų papildomos pajamos iš sutaupyto kuro šiluminės energijos, eksploatuojant KŠS, kai jis dirba 8000 valandų per metus:

$$K\check{S}S_{kuras} = \frac{Q_{K\check{S}S} \times 8000 \text{ h} \times 27,97 \frac{EUR}{MWh}}{\eta_{duj.katil}} = \frac{0,2963 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 27,97 \frac{EUR}{MWh}}{0,9} = 73\,667 \text{ EUR/metus}; \quad (20)$$

čia $Q_{K\check{S}S}$ – kompresorinio šilumos siurblio suminė šiluminė galia, MW; $27,97 \frac{EUR}{MWh}$ – gamtinių dujų įsigijimo kaina (dujų pirkimo kaina, perdavimas, akcizas); $\eta_{duj.katil}$ – dujinio vandens šildymo katilo efektyvumas.

- Pajamos įsirengus KŠS, iš elektros energijos sutaupymo nebeekspluatuojant turbinos aušalo aušyklių (36 vnt. 0,29 kW galios ventiliatorių), nes elektros energija nebenaudojama sukurti

elektrinius ventiliatorius ir šalinti atliekinę šilumą, o KŠS ši atliekinė šiluma naudingai panaudojama pašildyti termofikacinį vandenį:

- per metus sunaudojamas elektros kiekis aušinti turbinos TG-5 aušalą:

$$0,516 \times 10,44 \text{ kW} \times 8000 \text{ h} = 43\,096 \text{ kWh}_{el}; \quad (21)$$

Metiniai aušyklių eksploataavimo kaštai, sutaupomi įsirengus kompresorinį šilumos siurblių:

$$KŠS_{elektra2} = 43\,096 \text{ kWh}_{el} \times 0,05 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} = 2155 \text{ EUR/metus}; \quad (22)$$

- Pajamos už sumažintus metinius CO₂ teršalų išmetimus ir dėl to sutaupyta apyvartinių taršos leidimų kiekį, šiuo atveju yra įskaičiuojamas ir KŠS elektros energijos suvartojimas bei elektros energijos gamybos metu į atmosferą išskiriamos anglies dioksido emisijos::

$$KŠS_{ATL} = (Q_{KŠS} \times 8000 \text{ h} \times c_{CO2.g.d} - Q_{kompres} \times 8000 \text{ h} \times c_{CO2.el}) * ATL = 0,2963 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,22 \frac{\text{t}}{\text{MWh}} - 0,05926 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,42 \frac{\text{t}}{\text{MWh}}) \times 28,5 \text{ EUR/t} = 9188 \text{ EUR/metus}; \quad (23)$$

čia ATL – apyvartinių taršos leidimų pirkimo kaina, EUR/t; $Q_{kompres}$ – kompresorinio šilumos siurblio kompresoriaus elektrinė galia, MW; $c_{CO2.g.d}$ – gamtinių dujų CO₂ emisijų faktorius, $\frac{\text{t}(\text{CO}_2)}{\text{MWh}}$; $c_{CO2.el}$ – elektros vartojimo CO₂ emisijų faktorius, $\frac{\text{t}(\text{CO}_2)}{\text{MWh}}$ [2.18 lent. 28].

5.7. Šilumos siurblių išlaidų ir pajamų balansas

- Pirmų metų po investicijos absorbcinio šilumos siurblio pajamų ir išlaidų suvestinė:

$$AŠS_{pelnas} = AŠS_{kuras} + AŠS_{elektra2} + AŠS_{ATL} - AŠS_{išlaidos} = 59\,669 \text{ EUR} + 2155 \text{ EUR} + 12\,038 \text{ EUR} - 25\,222 \text{ EUR} = 48\,640 \text{ EUR/metus}; \quad (24)$$

Galutinis išlaidų ir pajamų balansas, finansiniai rodikliai ir investicijos į AŠS atsipirkimo laiko rezultatai pavaizduoti 21 paveikslėlyje.

Atsipirkimo skaičiavimas																			
Darbo valandų per metus	8000																		
Parama 30 %	-																		
Šilumos siurblio tipas	AŠS																		
tūkst.eur																			
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Investicija	157,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.1	Parama	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.2	Nuosavos lėšos	62,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.3	Paskola (60 %)	94,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	38,82	39,44	40,06	40,68	41,30	60,79	60,85	60,92	60,98	61,05	61,12	61,19	61,26	61,34	61,42	61,50		
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	1,77	1,82	1,88	1,94	1,99	2,05	2,11	2,18	2,24	2,31	2,38	2,45	2,53	2,60	2,68	2,76	
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	
2.3	Kuras	0	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	
2.5	Amortizacija	0	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-2,83	-2,26	-1,70	-1,13	-0,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-18,86	-18,86	-18,86	-18,86	-18,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	48,64	49,26	49,88	50,50	51,13	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32	
3.2	Akumuliuotas grynyųjų pinigų srautas	0	48,64	97,90	147,78	198,29	249,41	320,03	390,71	461,45	532,26	603,13	674,07	745,09	816,18	887,34	958,59	1029,91	
4	Grynasis pelnas	0	60,51	60,56	60,62	60,67	60,73	60,79	60,85	60,92	60,98	61,05	61,12	61,19	61,26	61,34	61,42	61,50	
5	Pinigių srautas iš veiklos	0	70,33	70,39	70,44	70,50	70,56	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32	
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGDV ir FVGN skaičiavimui	-157,20	70,33	70,39	70,44	70,50	70,56	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32	
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto normą	580,32																	
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	44,70																	
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	3,19																	

21 pav. AŠS išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai

- Pirmų metų kompresorinio šilumos siurblio pajamų ir išlaidų suvestinė:

$$KŠS_{\text{pelnas}} = KŠS_{\text{kuras}} + KŠS_{\text{elektra}} + KŠS_{\text{ATL}} - KŠS_{\text{išlaidos}} = 73\ 667\ \text{EUR} + 2155\ \text{EUR} + 9188\ \text{EUR} - 36\ 360\ \text{EUR} = 48\ 650\ \text{EUR}/\text{metus}; \quad (25)$$

Galutinis kompresorinio šilumos siurblio išlaidų ir pajamų balansas, finansiniai rodikliai ir investicijos atsipirkimo laiko rezultatai pavaizduoti 21 paveikslėlyje.

Atsipirkimo skaičiavimas																			
Darbo valandų per metus	8000																		
Parama 30 %	-																		
Šilumos siurblio tipas	KŠS																		
tūkst. Eur.																			
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Investicija	80,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.1	Parama	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.2	Nuosavos lėšos	32,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.3	Paskola (60 %)	48,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	43,67	43,31	42,93	42,53	42,11	51,27	50,52	49,75	48,96	48,14	47,29	46,43	45,53	44,61	43,66	42,68	
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	-21,55	-22,20	-22,86	-23,55	-24,25	-24,98	-25,73	-26,50	-27,30	-28,12	-28,96	-29,83	-30,72	-31,65	-32,59	-33,57	
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	
2.3	Kuras	0	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	9,19	
2.5	Amortizacija	0	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,44	-1,15	-0,86	-0,58	-0,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-9,60	-9,60	-9,60	-9,60	-9,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	48,67	48,31	47,93	47,53	47,11	56,27	55,52	54,75	53,96	53,14	52,29	51,43	50,53	49,61	48,66	47,68	
3.2	Akumuliuotas grynyųjų pinigų srautas	0	48,67	96,97	144,90	192,43	239,55	295,82	351,34	406,09	460,05	513,19	565,48	616,91	667,44	717,05	765,71	813,39	
4	Grynasis pelnas	0	54,71	54,06	53,39	52,71	52,00	51,27	50,52	49,75	48,96	48,14	47,29	46,43	45,53	44,61	43,66	42,68	
5	Pinigių srautas iš veiklos	0	59,71	59,06	58,39	57,71	57,00	56,27	55,52	54,75	53,96	53,14	52,29	51,43	50,53	49,61	48,66	47,68	
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGDV ir FVGN skaičiavimui	-80,00	59,71	59,06	58,39	57,71	57,00	56,27	55,52	54,75	53,96	53,14	52,29	51,43	50,53	49,61	48,66	47,68	
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto normą	490,70																	
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	73,48																	
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	1,65																	

22 pav. KŠS išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai

2–7 prieduose pateikti AŠS ir KŠS išlaidų ir pajamų srautų balansų bei investicijų atsiperkamumo rodiklių skaičiavimų rezultatai su parama ir be paramos bei su skirtingais šilumos siurblių darbo valandų per metus kiekiais. Iš viso analizuoti 8 skirtingi variantai: AŠS, KŠS, su 30 % parama, be paramos, 3000 darbo valandų per metus ir 8000 darbo valandų per metus.

5.8. Palyginamoji ekonominė AŠS ir KŠS analizė

Atliekinės šilumos atgavimui vertinti kompresorinis ir absorbcinis šilumos siurbliai. Ekonominėje analizėje nagrinėti jų darbo režimai, priėmus įrenginio veikimą 3000 ir 8000 valandų per metus. Šie skirtingi režimai pasirinkti siekiant investicinius šilumos siurblių projektus įvertinti prie pesimistinių (3000 valandų) ir optimistinių (8000 valandų) sąlygų. 8000 valandų variantas vertintas, kaip ŠS darbas ištisus metus su vieno mėnesio pertrauka, skirta tiek pačio įrenginio apžiūrai ir remontui, tiek turbinos planiniams sustojimams, per kuriuos turbina ir jos pagalbinė įranga apžiūrima ir ruošiama darbui iki kito sustabdymo. Šilumos siurblio 3000 darbo valandų variantas atitinka didžiąją šildymo sezono dalį, kai net esant maksimaliai tikėtina konkurencijai tarp šilumos tiekėjų mieste, Vilniaus šilumos tinklų termofikacinės elektrinės Nr. 2 atsinaujinančio kuro energetinis blokas dirbtų nuolat generuodamas 240 kW atliekinės šilumos kiekį. 5 lentelėje pateikti ekonominių skaičiavimų rezultatai su šiais skirtingais darbo režimais. Pagrindiniai investicijų į šilumos siurblius finansiniai rodikliai vertinti išskyrus aštuonias skirtingas investicijos atsipirkimo alternatyvas: investuojama į AŠS arba KŠS, vertinamas ŠS metinis darbo laikas 3000 arba 8000 valandų, vertinama investicija su 30 % parama arba be paramos.

5 lentelė. Pagrindiniai AŠS ir KŠS projektų finansiniai rodikliai, tūkst. EUR

Eil. Nr.	Šilumos siurblio tipas	Absorbcinis šilumos siurblys				Kompresorinis šilumos siurblys			
		3000		8000		3000		8000	
1	Darbo valandų per metus	3000		8000		3000		8000	
2	Investicija, EUR	157,2	157,2	157,2	157,2	80	80	80	80
3	Parama, EUR	-	47,16	-	47,16	-	24	-	24
4	Paskola (60 %), EUR	94,32	66,024	94,32	66,024	48	33,6	48	33,6
5	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto normą	103,76	148,68	580,32	625,23	126,07	148,93	490,70	566,99
6	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	13,56	21,24	44,70	63,97	24,82	36,73	73,48	110,36
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	10,61	9,35	3,19	2,83	6,39	5,61	1,65	1,49

Kaip matyti iš lentelės (žr. 5 lent.), investicijos visais aštuoniais nagrinėtais atvejais yra atsiperkančios ir pelningos, nes atsipirkimo laikas yra greitesnis nei šilumos siurblių nusidėvėjimas, kai visiškai įrenginių nusidėvėjimas vertintas po 16 metų. Šis pasirinktas nusidėvėjimo laikotarpis yra ganėtinai konservatyvus, nes Danijos energetikos agentūros duomenimis [13] realus abiejų tipų šilumos siurblių pilnutinis nusidėvėjimas siekia 25 metus. Atsipirkimo skaičiavimuose prailginus investicijos nusidėvėjimo laikotarpį sumažėtų kasmetiniai amortizaciniai atskaitymai ir išaugtų diskontuota finansinė grynoji dabartinė vertė. Grynoji dabartinė vertė – tai metodas naudojamas investicinių projektų patrauklumui įvertinti. Šio metodo tikslas nustatyti dabartinę būsimų pajamų ir išlaidų vertę, naudojant diskontuotų pinigų srautų metodą [29]. 5 lentelėje galima matyti, jog šis rodiklis, vertinant šilumos siurblius prie tų pačių sąlygų, yra ganėtinai vienodas visais atvejais, tačiau pastebimas pagrindinis skirtumas, jog šilumos siurbliams dirbant 3000 valandų per metus, KŠS grynoji dabartinė vertė didesnė arba lygi AŠS vertei. Tačiau, 8000 valandų darbo režime, įvertinus FGDV rodiklį, absorbciniai šilumos siurbliai, per savo gyvavimo laikotarpį, sugeneruos didesnę pelną nei

kompresoriniai šilumos siurbliai. Turbūt pagrindinė to priežastis yra elektros energijos kaina, kurios tikėtinas kilimas yra itin nepalankus elektra varomiems kompresoriniams šilumos siurbliams.

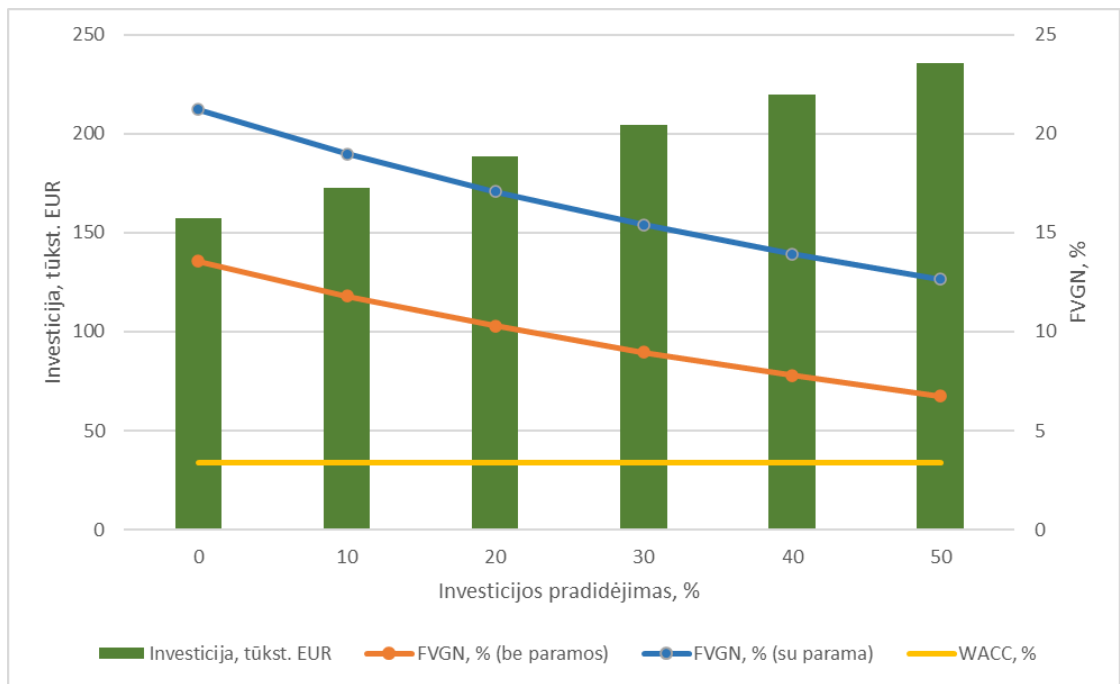
Lyginant AŠS ir KŠS, investicijų atsipirkimo laikas į kompresorinį šilumos siurblių yra maždaug du kartus, kai šiek tiek skiriasi kiekvienu konkrečiu atveju, greitesnis nei investicijos į absorbcinį šilumos siurblių, tačiau ir pradinė investicija į šį šilumos siurblių tipą skiriasi beveik du kartus. Apskritai, tik investicija į absorbcinį šilumos siurblių, kuris veiks apie 3000 valandų tiek su finansine parama, tiek be jos, gali būti vertinama kaip vidutiniška, visi kiti analizuoti variantai yra itin patrauklūs finansiniu požiūriu ir gali būti vertinami, kaip labai patrauklios investicijos.

Šioje ekonominėje analizėje priimta keletas prielaidų, kurios pateiktos 5.4 skyriuje. Viena prielaidų – daranti nemažą įtaką investicijų atsipirkamumui – investicijų į šilumos siurblius dydžiai. Investicija į AŠS 5.1 skyriuje priimta 157,2 tūkst. EUR, tačiau į šį dydį nėra įskaičiuoti šilumos siurblio prijungimo prie termofikacinės elektrinės komunikacijų kaštai, nes papildomai reikėtų įrengti termofikacinio vandens, garo ir turbinos pagalbinių įrenginių aušinimo skysčio atšakas, su joms reikalinga armatūra. Preliminariai, medžiagų ir darbų kaina neturėtų viršyti 10 % nuo priimtos investicijų sumos. Kompresorinio šilumos siurblio atveju situacija panaši, tik nereikalingas garo atšakos atvedimas iki ŠS. Tikėtinas investicijos išaugimas taipogi neturėtų viršyti 10 % pradinės investicijos.

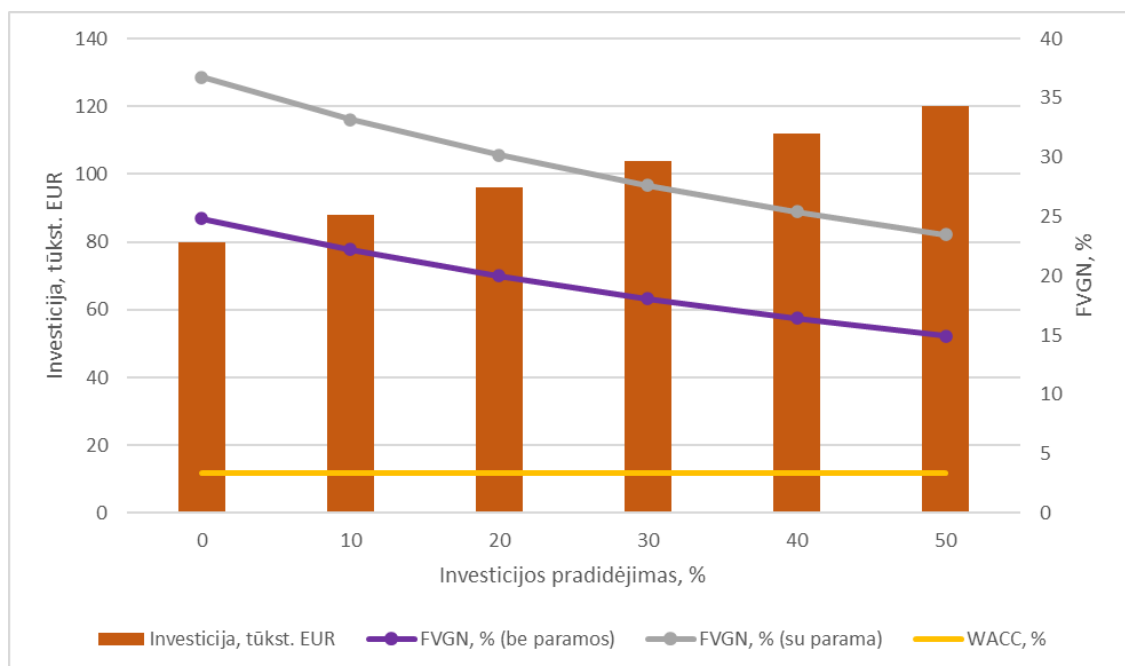
Kita priimta prielaida – paskolos dydis. Priklausomai nuo investuojančios į šilumos siurblių įrengimą įmonės finansinės politikos, šis dydis gali svyruoti, ir paskolos dydis dažnu atveju gali siekti 100 % investicijos dydžio. Tokiu atveju, galimai išaugtų paskolos grąžinimo laikotarpis, metinis sumokamų palūkanų dydis ir netgi paskolos palūkanų norma. Visų šių, išaugusių kaštų, tikėtina išdava – išaugantis investicijų atsipirkimo laikotarpis ir suprastėję kiti finansiniai rodikliai.

5.9. Investicijų jautrumo analizė

Investicinių šilumos siurblių projektų finansiniai rodikliai priklauso nuo investicijų dydžio, paramos dydžio, paskolos sąlygų, dujų ir elektros kainos, ATL įsigijimo kainos. Tačiau pagrindinis kintamasis, nuo kurio labiausiai priklauso investicijų atsipirkimas, tai investicijų dydis. Todėl investicijų jautrumo analizėje vertintas investicijų padidėjimas iki 50 procentų ir šio išaugimo įtaka finansinei vidinei grąžos normai. 23 ir 24 paveikslėliuose pavaizduoti AŠS ir KŠS grafikai, kuriuose pavaizduota, kaip išaugant investicijų dydžiui procentiškai keičiasi finansinis rodiklis – finansinė vidinė grąžos norma (FVGN). Investicijos į absorbcinį šilumos siurblių atveju, investicija su 3000 darbo valandų per metus, bet be paramos, taptų neatsiperkanti pradiniam investuotos sumos dydžiui išaugus daugiau kaip 60 %. O kompresorinio šilumos siurblio atveju, net itin žymus investicijos išaugimas, vertinant 3000 darbo valandų per metus, KŠS projekto nepaverstų neatsiperkančiu.



23 pav. Investicijos į AŠS FVGN priklausomybė nuo investicijų padidėjimo



24 pav. Investicijos į KŠS FVGN priklausomybė nuo investicijų padidėjimo

6. Aplinkosauginė šilumos siurblių analizė

Dėl šilumos gamybos iš atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip atliekinės energijos atgavimas, kasmet gaunamas CO₂ išmetimų sumažėjimas, lyginant su tuo pačiu kiekiu pagaminamos šilumos iš gamtinių dujų. Todėl vertinant šilumos siurblių metinį darbo laiką, atliekinės šilumos kiekį, AŠS atveju, arba pagamintos šilumos kiekį, KŠS atveju, bei gamtinių dujų ir elektros vartojimo emisijų faktorius, apskaičiuojama šilumos siurblių sprendimo įtaka anglies dioksido emisijų mažinimui termofikacinėje elektrinėje.

- Absorbcinio šilumos siurblio įrengimo atveju, termofikacinėje elektrinėje būtų sumažinama CO₂ dujų išmetimai į atmosferą:

$$CO_2 = Q_{atliek} \times t \times c_{CO_2.g.d} = 0,24 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,22 \frac{t(CO_2)}{MWh} = 422,4 \text{ t}(CO_2)/\text{metus}; \quad (26)$$

čia $c_{CO_2.g.d}$ – gamtinių dujų CO₂ emisijų faktorius, $\frac{t(CO_2)}{MWh}$ [2.18 lent. 28]; t – šilumos siurblio darbo laikas per metus, h.

- Vertinant kompresorinio šilumos siurblio aplinkosauginį efektą, šiuo atveju yra įskaičiuojamas ir jo elektros energijos suvartojimas bei elektros energijos gamybos metu į atmosferą išskiriamos CO₂ emisijos. KŠS atveju termofikacinėje elektrinėje būtų sumažinami anglies dioksido dujų išmetimai į atmosferą:

$$CO_2 = Q_{KŠS} \times t \times c_{CO_2.g.d} - Q_{kompres} \times t \times c_{CO_2.el} = 0,2963 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,22 \frac{t(CO_2)}{MWh} - 0,05926 \text{ MW} \times 8000 \text{ h} \times 0,42 \frac{t(CO_2)}{MWh} = 521,5 \text{ t} - 199,1 \text{ t} = 322,4 \text{ t}(CO_2)/\text{metus};$$

čia $Q_{kompres}$ – KŠS kompresoriaus elektrinė galia, MW; $c_{CO_2.el}$ – elektros vartojimo CO₂ emisijų faktorius, $\frac{t(CO_2)}{MWh}$ [2.18 lent. 28].

Šilumos siurbliams per metus dirbant 3000 ir 8000 valandų, mažinami CO₂ dujų išmetimai į atmosferą pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Šilumos siurbliais pakeičiant dujinius katilus mažinami CO₂ išmetimų kiekiai

Eil. Nr.	Šilumos siurblio tipas	Absorbcinis šilumos siurblys		Kompresorinis šilumos siurblys	
1	Darbo valandų per metus	3000	8000	3000	8000
2	Mažinami CO ₂ išmetimai, t(CO ₂)/metus	158,40	422,40	120,89	322,40

Šioje lentelėje (žr. 6 lent.) galima matyti, kad metinis įrenginių darbo laikas smarkiai įtakoja sumažintų anglies dioksido išmetimų kiekį. Didžiausią aplinkosauginę naudą, t. y.: 422,4 t/metus sumažėję CO₂ išmetimai, lyginant su tuo pačiu pagamintu šilumos kiekiu iš gamtinių dujų, jas deginant vandens šildymo katile, vertintais atvejais turi absorbcinis šilumos siurblys dirbantis 8000 valandų per metus. Tuo pačiu 8000 valandų režimu dirbantis kompresorinis šilumos siurblys užtikrina apie 24 % mažesnius CO₂ išmetimų sutaupymus.

Vilniaus termofikacinė elektrinė Nr. 2 dalyvauja prekybos apyvartiniais taršos leidimais (ATL) sistemoje, todėl ekonominiuose skaičiavimuose buvo vertinama, kad šilumos siurblių sprendimai atgauti atliekinę šilumą mažins sąnaudas ALT įsigijimams.

Išvados

1. Išanalizavus termofikacinės elektrinės turbinos pagalbinės sistemos aušinančio skysčio uždara ciklą, įvertinta, jog atliekinė 237 kW šiluminė galia, ventiliatoriais šalinama į atmosferą, energetiškai gali būti panaudojama efektyviau.
2. Atlikus literatūros analizę, nustatyta, jog šilumos siurbliai, ypač absorbciniai, plačiai taikomi atliekinės šiluminės energijos atgavimo srityje.
3. Absorbcinio ar kompresorinio šilumos siurblio įrengimas turbinos pagalbinių įrenginių aušinančio skysčio atliekinės šilumos atgavimui ir centralizuotai tiekiamo termofikacinio vandens pašildymui sumažintų pirminių energijos šaltinių naudojimą šiluminei energijai gaminti ir padėtų išvengti papildomos aplinkos taršos kuro degimo produktais.
4. Darbe pasirinktuose ličio bromido absorbciniuose bei R1234ze kompresoriniuose šilumos siurbliuose naudojamos darbinės medžiagos yra netoksiškos, turinčios geras termodinamines savybes bei itin mažai kenksmingos atmosferai.
5. Atlikta ekonominė palyginamoji šilumos siurblių analizė vertinanti aštuonias skirtingas investicines sąlygas. Greičiausiai, per 1,49 metus, atsiperkantis variantas – kompresorinis šilumos siurblys, dirbantis 8000 valandų per metus, projektui gavus 30 % paramą. Lėčiausiai, per 10,61 metus, atsiperka absorbcinis šilumos siurblys įsigytas be paramos ir dirbantis tik 3000 valandų per metus.
6. Atlikti investicijų išlaidų ir pajamų skaičiavimai parodė, jog daugiausiai įtakos investicinių projektų atsiperkamumui turi: investicijų dydis, gautos paramos dydis, gamtinių dujų ir elektros kainos.
7. Atlikus investicijų jautrumo analizę nustatyta, jog absorbcinio šilumos siurblio projektas, net blogiausiomis vertintomis sąlygomis, atsiperka investicijos dydžiui į jį išaugus iki 60 % nuo pradinio dydžio, o kompresorinio šilumos siurblio atveju, prie tų pačių sąlygų, net itin reikšmingas investicijos išaugimas šio projekto nepaverstų neatsiperkančiu.
8. Vertinant aplinkosauginį šilumos siurblių efektą – absorbcinis šilumos siurblys, dirbantis 8000 valandų per metus, turi didžiausią potencialą mažinti kasmetinius CO₂ išmetimus, nes tomis pačiomis sąlygomis vertintas kompresorinis šilumos siurblys, daugiausia naudoja elektros energiją, kuri Lietuvoje gaminama ir iš neatsinaujinančio kuro, todėl tokio kompresorinio šilumos siurblio potencialas mažinti CO₂ išmetimus yra 24 % mažesnis.
9. Darbe siūlomi techniniai absorbcinių ir kompresorinių šilumos siurblių integravimo sprendimai, kaip investiciniai atliekinės šilumos atgavimo projektai, yra naudingi ekonominiu ir aplinkosauginiu aspektais.

Literatūros sąrašas

1. EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. *Direktyva 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria iš dalies keičiamos direktyvos 2009/125/EB ir 2010/30/ES bei kuria panaikinamos direktyvos 2004/8/EB ir 2006/32/EB* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2021-05-02]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0027&from=LT>.
2. LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS. *Lietuvos Respublikos energijos efektyvumo didinimo įstatymas* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2021-05-02]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/946da260a67b11e69ad4c8713b612d0f>.
3. AB „Vilniaus šilumos tinklai“. *Paraiška: taršos integruotos prevencijos ir kontrolės leidimui Nr. VR-4.7-V-01-38/T-V.7-1/2014 pakeisti*. [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-05-02]. Prieiga per: <https://gamta.lt/files/E-2%20paraiska.docx>.
4. VARES, Villu. *Biokuro naudotojo žinynas*. Vilnius: Žara, 2007. ISBN: 9789986341802.
5. WU, Wei, WANG, Baolong, SHI, Wenxing, ir LI, Xianting. Absorption heating technologies: A review and perspective. *Applied Energy* [interaktyvus]. 2014, 130, 51–71 [žiūrėta 2021-03-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.027>.
6. SKUBIENKO, S. V., I. V. YANCHENKO ir A. Y. BABUSHKIN. Using an absorption heat pump in the regeneration system of turbine model K-300-240-2 manufactured by kharkov turbo generator plant (KhTGP). *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* [interaktyvus]. 2016, pp. 1-4 [žiūrėta 2021-03-26]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1109/icieam.2016.7911014>.
7. AIVARS, C., TURLAYS, D.P. ir ZELTINSH, N. Recovery of the waste heat by large capacity heat pumps for Riga city district heating system. *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies* [interaktyvus]. 2013, Iss. 2(13), PP. 38 – 43 [žiūrėta 2021-04-22]. Prieiga per: [http://modern.science.triacon.org/en/issues/2013/files/2013_2\(13\)_7.htm](http://modern.science.triacon.org/en/issues/2013/files/2013_2(13)_7.htm).
8. MORKŪNAS, V. *Absorbicinio šilumos siurblio pritaikymas efektyvesniam dūmų kondensacinio ekonomiškesnio darbui: magistro darbas* [interaktyvus]. Kauno technologijos universitetas. 2018 [žiūrėta 2021-02-25]. Prieiga per: eLABa – nacionalinė Lietuvos akademinė elektroninė biblioteka.
9. BAKHTIARI, B. *Process Integration of Absorption Heat Pumps*. [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2021-04-10]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/42377717_Process_Integration_of_Absorption_Heat_Pumps.
10. UAB „Gandras Energoefektas“ generalinio direktoriaus Dmitrij Podčernin pristatymas. *LŠTA seminaras* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2020-12-20]. Prieiga per: https://lsta.lt/files/events/2018-11-15%20LSTA%20seminaras/II%20dalis/01_Gandras_2018%2011%2015.pdf.
11. SUN, Jian ir kiti. A review of working fluids of absorption cycles. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. 2012, 16(4), 1899–1906 [žiūrėta 2021-04-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.011>.
12. KEITH E. Herold ir kiti. *Absorption Chillers and Heat Pumps*. 2-oji laida. CRC Press, 2016. ISBN 9781498714358.
13. Danish energy agency, Energinet. *Technology Data – Energy Plants for Electricity and District heating generation catalogue* [interaktyvus]. 2016 (atnaujinta 2020 gegužę) [žiūrėta 2021-04-27].

- Prieiga per: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>.
14. KUREM, E ir HORUZ, I. A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in absorption heat transformers. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2001, 28(3), 427–438 [žiūrėta 2021-04-27]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(01)00247-0).
 15. *LiBr cheminės savybės*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-01-20]. Prieiga per: <http://chemicaland21.com/industrialchem/inorganic/LITHIUM%20BROMIDE.htm>.
 16. GIMBUTIS, G. *Šiluminė technika*. Vilnius: Mokslas, 1993. ISBN 5420007517.
 17. SARBU, Ioan, ir SEBARCHIEVICI, Calin. *Ground-Source Heat Pumps*. Elsevier Science & Technology, 2015.
 18. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS REGLAMENTAS (ES) Nr. 517/2014. *Dėl fluorintų šiltnamio efektą sukeliančių dujų, kuriuo panaikinamas reglamentas (EB) Nr. 842/2006* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2021-05-01]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0517>.
 19. SARBU, Ioan. A review on substitution strategy of non-ecological refrigerants from vapour compression-based refrigeration, air-conditioning and heat pump systems. *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2014, 46, 123–141 [žiūrėta 2021-04-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.023>.
 20. Nawaz, Kashif ir kt. R1234yf and R1234ze(E) as low-GWP refrigerants for residential heat pump water heaters. *International Journal of Refrigeration* [interaktyvus]. 2017, 82(C), 348–365 [žiūrėta 2021-04-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.06.031>.
 21. Honeywell Buffalo Research Laboratory (BRL)-NY-USA. Genetron Properties V 1.4.1 [programinė įranga]. 2010 [žiūrėta 2021-05-05]. Prieiga per: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/genetron-properties-suite/>.
 22. Šilumos siurblių gamintojas Viessmann. *Produktų katalogas: Heat pumps up to 2000 kW: technology brochures* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per: https://www.viessmann.se/content/dam/vi-brands/SE/Broschyre/Varmepumpar/Luft-luft/Vitocal-Pro/Heat_pumps_up_to_2000%20kW.pdf/jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Heat_pumps_up_to_2000%20kW.pdf.
 23. APLINKOS PROJEKTŲ VALDYMO AGENTŪRA. *Lietuvos Respublikos aplinkos ministerijos klimato kaitos programos priemonė 2020 gegužės 11 d. Nr. D1-270: „Saulės energijos technologijų, šilumos siurblių ir šilumos saugyklų panaudojimo centralizuotais tinklais tiekiamos šilumos energijai gaminti skatinimas, pakeičiant iškastinio kuro naudojimą“* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-12-20]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/7d7053d0937d11ea9515f752ff221ec9>.
 24. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. *2015 m. rugsėjo 22 d. Nr. O3-510 nutarimas dėl investicijų grąžos normos nustatymo metodikos patvirtinimo* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2021-05-07]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/d0c044e0622d11e5b316b7e07d98304b?jfwid=>.
 25. VALSTYBINĖ ENERGETIKOS REGULIAVIMO TARYBA. *Duomenys vidutinei svertinei kapitalo kainai (wacc) skaičiuoti* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-12-20]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/duomenys-wacc-skaiciuoti-2019-2020-archyvas.aspx>.

26. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. *Nutarimas: „AB „Vilniaus šilumos tinklai“ duomenų suvestinė šilumos bazinei kainai (kainos dedamosioms) nustatyti* [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2020-12-18]. Prieiga per: [https://www.regula.lt/SiteAssets/posedziai/2017-04-06/4_vst_priedas .pdf](https://www.regula.lt/SiteAssets/posedziai/2017-04-06/4_vst_priedas.pdf).
27. Absorbinių šilumos siurblių gamintojas BROAD. *Produktų katalogas: Absorption heat pump, steam type BDS-50 (middle temp. water $\Delta t=15$ °C)*. [žiūrėta 2021-03-28]. Prieiga per: <http://en.broad.com/ProductShow-13.aspx>.
28. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRAS. *Įsakymas: dėl statybos techninio reglamento STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ patvirtinimo* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2021-05-03]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/15767120a80711e68987e8320e9a5185/sEHkqghNMX>.
29. Finansistas.net. Finansinių naujienų ir žinių portalas [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-04-11]. Prieiga per: <https://www.finansistas.net/grynoji-dabartine-verte.html>.

Priedai

1 priedas. Autoriaus publikacijos

LAUGALIS, Gvidas. Waste Heat Recovery in Cogeneration Plant: Absorption or Compression Heat Pump? *International Young Researchers Conference "Industrial Engineering 2021"*. Kaunas, 2021.

2 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS be paramos, 3000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																		
Darbo valandų per metus	3000																	
Parama 30 %	-																	
Šilumos siurblio tipas	AŠS																	
tūkst.eur																		
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Investicija	157,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	Parama	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Nuosavos lėšos	62,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	Paskola (60 %)	94,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	-7,11	-6,52	-5,94	-5,35	-4,76	14,69	14,71	14,74	14,76	14,79	14,81	14,84	14,87	14,90	14,93	14,96
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	0,66	0,68	0,70	0,73	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95	0,98	1,00	1,03
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14
2.3	Kuras	0	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51
2.5	Amortizacija	0	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-2,83	-2,26	-1,70	-1,13	-0,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-18,86	-18,86	-18,86	-18,86	-18,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	2,72	3,30	3,89	4,48	5,06	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
3.2	Akumuliuotas grynujų pinigų srautas	0	2,72	6,02	9,91	14,38	19,45	43,96	68,50	93,07	117,65	142,27	166,91	191,57	216,26	240,99	265,74	290,52
4	Grynasis pelnas	0	14,59	14,61	14,63	14,65	14,67	14,69	14,71	14,74	14,76	14,79	14,81	14,84	14,87	14,90	14,93	14,96
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	24,41	24,43	24,45	24,47	24,49	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGVDV ir FVGN skaičiavimui	-157,20	24,41	24,43	24,45	24,47	24,49	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto normą	103,76																
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	13,56																
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	10,61																

3 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS su parama, 3000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																		
Darbo valandų per metus	3000																	
Parama 30 %	+																	
Šilumos siurblio tipas	AŠS																	
tūkst.eur																		
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Investicija	157,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	Parama	47,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Nuosavos lėšos	44,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	Paskola (60 %)	66,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	-0,60	-0,18	0,23	0,65	1,07	14,69	14,71	14,74	14,76	14,79	14,81	14,84	14,87	14,90	14,93	14,96
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	0,66	0,68	0,70	0,73	0,75	0,77	0,79	0,82	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95	0,98	1,00	1,03
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14
2.3	Kuras	0	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38	22,38
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51
2.5	Amortizacija	0	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,98	-1,58	-1,19	-0,79	-0,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-13,20	-13,20	-13,20	-13,20	-13,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	9,22	9,64	10,06	10,47	10,89	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
3.2	Akumuliuotas grynųjų pinigų srautas	0	9,22	18,87	28,92	39,40	50,29	74,81	99,35	123,91	148,50	173,11	197,75	222,41	247,11	271,83	296,58	321,36
4	Grynasis pelnas	0	14,59	14,61	14,63	14,65	14,67	14,69	14,71	14,74	14,76	14,79	14,81	14,84	14,87	14,90	14,93	14,96
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	24,41	24,43	24,45	24,47	24,49	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGDV ir FVGN skaičiavimui	-110,04	24,41	24,43	24,45	24,47	24,49	24,52	24,54	24,56	24,59	24,61	24,64	24,67	24,69	24,72	24,75	24,78
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto norma	148,68																
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	21,24																
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	9,35																

4 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai AŠS su parama, 8000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																		
Darbo valandų per metus	8000																	
Parama 30 %	+																	
Šilumos siurblio tipas	AŠS																	
tūkst.eur																		
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Investicija	157,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	Parama	47,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Nuosavos lėšos	44,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	Paskola (60 %)	66,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	45,32	45,77	46,22	46,68	47,13	60,79	60,85	60,92	60,98	61,05	61,12	61,19	61,26	61,34	61,42	61,50
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	1,77	1,82	1,88	1,94	1,99	2,05	2,11	2,18	2,24	2,31	2,38	2,45	2,53	2,60	2,68	2,76
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14	-3,14
2.3	Kuras	0	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67	59,67
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04	12,04
2.5	Amortizacija	0	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83	-9,83
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,98	-1,58	-1,19	-0,79	-0,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-13,20	-13,20	-13,20	-13,20	-13,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	55,15	55,60	56,05	56,50	56,96	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32
3.2	Akumuliuotas grynųjų pinigų srautas	0	55,15	110,75	166,80	223,30	280,25	350,87	421,55	492,29	563,10	633,97	704,92	775,93	847,02	918,19	989,43	1060,75
4	Grynasis pelnas	0	60,51	60,56	60,62	60,67	60,73	60,79	60,85	60,92	60,98	61,05	61,12	61,19	61,26	61,34	61,42	61,50
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	70,33	70,39	70,44	70,50	70,56	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGVD ir FVGN skaičiavimui	-110,04	70,33	70,39	70,44	70,50	70,56	70,62	70,68	70,74	70,81	70,87	70,94	71,02	71,09	71,16	71,24	71,32
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto norma	625,23																
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	63,97																
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	2,83																

5 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS be paramos, 3000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																		
Darbo valandų per metus	3000																	
Parama 30 %	-																	
Šilumos siurblio tipas	KŠS																	
tūkst.eur																		
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Investicija	80,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	Parama	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Nuosavos lėšos	32,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	Paskola (60 %)	48,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	5,35	5,39	5,43	5,46	5,49	15,10	14,82	14,53	14,23	13,93	13,61	13,28	12,95	12,60	12,25	11,88
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	-8,08	-8,32	-8,57	-8,83	-9,10	-9,37	-9,65	-9,94	-10,24	-10,54	-10,86	-11,19	-11,52	-11,87	-12,22	-12,59
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60
2.3	Kuras	0	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45
2.5	Amortizacija	0	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,44	-1,15	-0,86	-0,58	-0,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-9,60	-9,60	-9,60	-9,60	-9,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	10,35	10,39	10,43	10,46	10,49	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
3.2	Akumuliuotas grynųjų pinigų srautas	0	10,35	20,74	31,18	41,64	52,13	72,23	92,05	111,58	130,82	149,74	168,35	186,64	204,59	222,19	239,44	256,32
4	Grynasis pelnas	0	16,39	16,15	15,90	15,64	15,38	15,10	14,82	14,53	14,23	13,93	13,61	13,28	12,95	12,60	12,25	11,88
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	21,39	21,15	20,90	20,64	20,38	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGVD ir FVGN skaičiavimui	-80,00	21,39	21,15	20,90	20,64	20,38	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto norma	126,07																
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	24,82																
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	6,39																

6 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS su parama, 3000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																		
Darbo valandų per metus	3000																	
Parama 30 %	+																	
Šilumos siurblio tipas	KŠS																	
tūkst.eur																		
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Investicija	80,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.1	Parama	24,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	Nuosavos lėšos	22,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	Paskola (60 %)	33,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	8,66	8,62	8,57	8,52	8,45	15,10	14,82	14,53	14,23	13,93	13,61	13,28	12,95	12,60	12,25	11,88
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	-8,08	-8,32	-8,57	-8,83	-9,10	-9,37	-9,65	-9,94	-10,24	-10,54	-10,86	-11,19	-11,52	-11,87	-12,22	-12,59
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60
2.3	Kuras	0	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63	27,63
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45
2.5	Amortizacija	0	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,01	-0,81	-0,60	-0,40	-0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	13,66	13,62	13,57	13,52	13,45	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
3.2	Akumuliuotas grynųjų pinigų srautas	0	13,66	27,28	40,85	54,37	67,82	87,93	107,75	127,28	146,51	165,44	184,05	202,34	220,28	237,89	255,13	272,01
4	Grynasis pelnas	0	16,39	16,15	15,90	15,64	15,38	15,10	14,82	14,53	14,23	13,93	13,61	13,28	12,95	12,60	12,25	11,88
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	21,39	21,15	20,90	20,64	20,38	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGVD ir FVGN skaičiavimui	-56,00	21,39	21,15	20,90	20,64	20,38	20,10	19,82	19,53	19,23	18,93	18,61	18,28	17,95	17,60	17,25	16,88
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto norma	148,93																
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	36,73																
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	5,61																

7 priedas. Išlaidų ir pajamų srautų balansas ir investicijos atsiperkamumo rodikliai KŠS su parama, 8000 darbo valandų

Atsipirkimo skaičiavimas																			
Darbo valandų per metus	8000																		
Parama 30 %	+																		
Šilumos siurblio tipas	KŠS																		
tūkst.eur																			
Eil.Nr	Metai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	Investicija	80,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.1	Parama	24,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.2	Nuosavos lėšos	22,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.3	Paskola (60 %)	33,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	Sąnaudų pokytis dėl investicijos	0	46,98	52,21	51,74	51,26	50,75	56,95	56,20	55,43	54,63	53,81	52,97	52,10	51,21	50,28	49,33	48,36	
2.1	Elektra (elektros kaina kasmet didėja 3 %)	0	-21,55	-22,20	-22,86	-23,55	-24,25	-24,98	-25,73	-26,50	-27,30	-28,12	-28,96	-29,83	-30,72	-31,65	-32,59	-33,57	
2.2	Aptarnavimas ir remontas	0	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	
2.3	Kuras	0	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	73,67	
2.4	ATL pirkimo išlaidos	0	9,19	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	14,86	
2.5	Amortizacija	0	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	
2.6	Palūkanos (3 %)	0	-1,01	-0,81	-0,60	-0,40	-0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.7	Paskolos grąžinimas (5 metai)	0	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3.1	Grynųjų pinigų srautas	0	51,98	57,21	56,74	56,26	55,75	61,95	61,20	60,43	59,63	58,81	57,97	57,10	56,21	55,28	54,33	53,36	
3.2	Akumuliuotas grynųjų pinigų srautas	0	51,98	109,18	165,93	222,19	277,94	339,89	401,09	461,51	521,15	579,96	637,93	695,03	751,23	806,52	860,85	914,21	
4	Grynasis pelnas	0	54,71	59,73	59,07	58,38	57,68	56,95	56,20	55,43	54,63	53,81	52,97	52,10	51,21	50,28	49,33	48,36	
5	Pinigų srautas iš veiklos	0	59,71	64,73	64,07	63,38	62,68	61,95	61,20	60,43	59,63	58,81	57,97	57,10	56,21	55,28	54,33	53,36	
6.1	Grynųjų pinigų srautas FGVD ir FVGN skaičiavimui	-56,00	59,71	64,73	64,07	63,38	62,68	61,95	61,20	60,43	59,63	58,81	57,97	57,10	56,21	55,28	54,33	53,36	
6.2	Finansinė grynoji dabartinė vertė (FGDV), taikant diskonto norma	566,99																	
6.3	Finansinė vidinė grąžos norma (FVGN), proc.	110,36																	
7	Paprastasis atsipirkimo laikas, metai	1,49																	