



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimas

Baigiamasis magistro projektas

Donatas Ratautas
Projekto autorius

Doc. dr. Inga Skiedraitė
Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimas

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (6211EX015)

Donatas Ratautas

Projekto autorius

Doc. dr. Inga Skiedraitė

Vadovė

Asist. dr. Ginas Čižauskas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Donatas Ratautas

Pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimas

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.

Donatas Ratautas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei) – Donatui Ratautui

1. Projekto tema –

Pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimas

(Lietuviškai)

Improvement of Efficiency of Industrial Water Cooling System

(Angliškai)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimo sprendimus ir įvertinti jų techninį bei ekonominį pagrįstumą.

Uždaviniai:

1. išanalizuoti pramonėje naudojamų siurblių energetinį efektyvumą, dažnio keitiklių taikymą ir atsipirkimo laiką;
2. sukurti esamos aušinimo sistemos modelį pagal esamus darbinius parametrus;
3. atlikti alternatyvaus modelio techninį tyrimą pakeitus esamus siurblius efektyvesniais bei pritaikius dažnio keitikius;
4. įvertinti siūlomų variantų energijos sąnaudas ir našumą;
5. atlikti pasiūlymų ekonominį vertinimą.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Užtikrinti bent 8 % elektros energijos sąnaudų sumažinimą išlaikant tą patį sistemos našumą.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Donatas Ratautas

2025-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vadovė

Inga Skiedraitė

2025-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų
programų vadovė

Regita Bendikienė

2025-09-29

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Ratautas, Donatas. Pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimas. Magistro baigiamasis projektas, vadovė doc. dr. Inga Skiedraitė; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Gamybos inžinerija (E10), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: aušinimas; efektyvumas; siurbliai; modeliavimas; modernizacija; energija.

Kaunas, 2026. 73 p.

Santrauka

Pramoninėse įmonėse vandens aušinimo sistemos sudaro energijai imlią infrastruktūros dalį, kurioje dėl didelių recirkuliuojamo vandens kiekių, nepastovių šilumos apkrovų ir pasenusios įrangos susidaro reikšmingos elektros energijos sąnaudos. Augant energijos kainoms ir griežtėjant aplinkosaugos reikalavimams tapo būtina įvertinti šių sistemų modernizavimo galimybes ir nustatyti efektyviausius energijos taupymo sprendinius. Tyrime buvo siekta ištirti pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimo galimybes, įvertinant techninius, valdymo ir ekonominius modernizacijos aspektus. Tyrimo problema buvo siejama su tuo, kad tradicinės fiksuoto greičio siurblių sistemos nereaguoja į realius gamybos apkrovų pokyčius, o tai lemia perteklinę energijos vartojimą ir hidraulinius nuostolius. Tyrimo planas buvo sudarytas iš kelių etapų. Pirmiausia įvertintas pramonėje naudojamų siurblių efektyvumas ir dažnio keitiklių taikymo galimybės. Tuomet sukurtas esamos aušinimo sistemos skaitinis modelis pagal realius darbo parametrus. Alternatyviame etape modelis buvo papildytas efektyvesniais siurbliais ir dažnio keitikliais, siekiant nustatyti modernizacijos poveikį hidraulikai ir energijos vartojimui. Galiausiai atliktas ekonominis vertinimas, kuriuo nustatytos numatomos energijos sąnaudų mažėjimo tendencijos ir investicijų atsiperkamumas. Tyrimo rezultatai parodė, kad naujų siurblių ir dažnio keitiklių derinys leidžia reikšmingai sumažinti elektros energijos sąnaudas visais darbo režimais: mažo debito režime, vidutinio debito ir didelio debito režime. Modeliavimo metu taip pat nustatyta, kad slėgio svyravimai sumažėjo, hidrauliniai procesai tapo stabilesni, o nauji siurbliai pradėjo dirbti virš 85 % efektyvumo srityje. Ekonominis vertinimas atskleidė, kad modernizacija gali sumažinti metines energijos sąnaudas, o investicijos atsiperka maždaug per 2,5 metų laikotarpį. Modernizuota sistema sumažina CO₂ emisijas, taip prisidedama prie įmonės ir nacionalinių aplinkosaugos tikslų. Be to, remiantis tyrimo rezultatais buvo pateiktos išvados ir rekomendacijos, skirtos sistemų modernizavimui ir efektyvinimui. Tyrimas parodė, kad integruotas hidraulinių ir valdymo sprendinių taikymas sudaro pagrindą ilgalaikiam energijos vartojimo efektyvumo gerinimui, mažesnėms eksploatacinėms sąnaudoms ir tvaresnei pramonės plėtrai.

Ratautas, Donatas. Improvement of Efficiency of Industrial Water Cooling System, Master's Final Degree Project, supervisor assoc. prof. dr. Inga Skiedraitė; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Production and Manufacturing Engineering (E10), Engineering Sciences (E).

Keywords: cooling, efficiency, pumps, modelling, modernization, energy.

Kaunas, 2026. 73 p.

Summary

In industrial facilities, water-cooling systems represent an energy intensive part of the infrastructure. Large volumes of recirculated water, fluctuating heat loads, and outdated equipment lead to high electricity consumption. With rising energy prices and stricter environmental requirements, assessing modernization options and identifying effective energy saving solutions has become essential. The study aimed to evaluate how the efficiency of an industrial water-cooling system could be improved by analysing technical upgrades, control strategies, and economic factors. The key problem was that traditional fixed-speed pump systems do not respond to real production load variations, causing excessive energy use and hydraulic losses. The research plan included several stages – analysing the efficiency of pumps used in industry and the applicability of variable-frequency drives, developing a numerical model of the existing cooling system using real operating data and enhancing the model with more efficient pumps and variable speed drives to determine the impact on hydraulics and energy use. An economic evaluation was then performed to estimate potential savings and payback time. The results showed that combining new pumps with variable speed drives significantly reduces electricity consumption across all operating modes: low-flow, medium-flow, and high-flow conditions. Modelling also revealed reduced pressure fluctuations, improved hydraulic stability, and pump efficiency consistently above 85% in the upgraded configuration. The economic analysis indicated that modernization could lower annual energy costs, with a payback period of roughly 2.5 years. Moreover, the modernized system would reduce CO₂ emissions, supporting both corporate and national environmental goals. Additionally, based on the research results, conclusions and recommendations were provided to guide the modernization and efficiency improvement of the systems. Overall, the study demonstrates that integrating hydraulic improvements with advanced control solutions provides a strong foundation for long-term energy efficiency, lower operating costs, and more sustainable industrial development.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Pramoninių aušinimo sistemų energijos vartojimo analizė.....	13
1.1. Elektros energijos vartojimo problema pramoninėse aušinimo sistemose.....	13
1.2. Energijos taupymo metodai ir technologiniai sprendimai siurblių sistemose.....	15
1.3. Pramoninių siurblių modernizavimo poreikio pagrindimas	17
1.4. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo reikšmė pramonei ir aplinkosaugai	20
1.5. Skyriaus apibendrinimas	22
2. Energijos taupymo metodų analizė ir taikymo galimybės.....	23
2.1. Nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos problemų formulavimas.....	23
2.1.1. Nagrinėjamos sistemos veikimo principas	23
2.1.2. SiurbLIAI ir darbo režimai.....	24
2.1.3. Teorinės įžvalgos apie pramonines aušinimo sistemas	24
2.1.4. Pagrindinių problemų analizė ir formuluotės	27
2.2. Technologinių aušinimo procesų taikymo galimybės pramoninėse sistemose	28
2.2.1. Siurblių ir variklių energijos valdymo metodai.....	28
2.2.2. Aušinimo sistemų optimizavimo metodai	28
2.2.3. Hibridinių ir alternatyvių aušinimo technologijų analizė.....	30
2.2.4. Metodų palyginimas ir taikymo galimybės nagrinėjamoje sistemoje	30
2.3. Modeliavimo metodų apžvalga	31
2.4. Pažangūs valdymo metodai energijos vartojimo mažinimui aušinimo sistemose.....	34
2.5. Lyginamoji taikomų metodų analizė pramonėje	37
2.5.1. Modernizuotų sistemų efektyvumo rezultatai	37
2.6. Pažangūs valdymo algoritmai ir energijos vartojimo optimizavimas	39
2.7. Skyriaus apibendrinimas	42
3. Pramoninės aušinimo sistemos modernizavimo tyrimas	43
3.1. Esamos pramoninės aušinimo sistemos darbo parametrų analizė.....	43
3.1.1. Sistemos eksploatacinė situacija.....	43
3.1.2. Įrangos techninė būklė ir siurblių darbo taškų įvertinimas	45
3.2. Sukurtos esamos aušinimo sistemos modelio pristatymas	48
3.2.1. Modelio paskirtis ir geometrijos sudarymas.....	48
3.2.2. Modeliavimo rezultatai trijuose darbo režimuose	49
3.2.3. Siurblių darbo taškų palyginimas su projekcinėmis ir realiomis kreivėmis	53
3.3. Alternatyvaus modelio tyrimas.....	54
3.3.1. Naujos įrangos parinkimo pagrindimas.....	54
3.3.2. Alternatyvaus modelio sąlygos ir giminingumo dėsnių taikymas.....	55
3.3.3. Modernizuotos sistemos analizė.....	56
3.4. Energijos sąnaudų palyginimas	59
3.4.1. Energetinių rezultatų palyginimas su moksliniais tyrimais.....	60
3.5. Skyriaus apibendrinimas	61
4. Ekonominis ir aplinkosauginis aušinimo sistemos vertinimas	62
4.1. Energijos sąnaudų skaičiavimas	62
4.2. Modernizacijos investicijos ir atsipirkimas	65

4.3. CO ₂ emisijų mažinimo analizė	66
4.4. Skyriaus apibendrinimas	67
Išvados	68
Rekomendacijos.....	69
Literatūros sąrašas	70
Priedai.....	74
1 priedas. Aušinimo sistemos eksploatacinė analizė	74
2 priedas. Droseliavimo bandymo metu ŠVS-1 siurblio nustatyti darbiniai parametrai	76
3 priedas. ASS-2 siurblio nustatyti darbiniai parametrai.....	77
4 priedas. Esamos sistemos vidutinio ir mažo debito režimo siurblių darbo kreivės.....	78
5 priedas. Naujo mažo siurblio darbo parametrų kreivės	79
6 priedas. Naujo didžiojo siurblio darbo parametrų kreivės.....	80
7 priedas. Perskaičiuoti mažojo siurblio su dažnio keitikliu darbiniai parametrai pagal siurblių giminingumo dėsnius.....	81
8 priedas. Modernizuotos sistemos mažo, vidutinio ir didelio debito režimo siurblių darbo kreivės.....	82

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Elektros energijos taupymo rezultatai taikant dažnio keitiklius [2, 6, 16, 17, 18]	13
2 lentelė. ES ir tarptautiniai energijos vartojimo mažinimo tikslai [3, 4, 5, 9, 21]	21
3 lentelė. Paduodamo vandens siurblių techniniai parametrai	24
4 lentelė. Siurblių darbo režimai pagal sistemos debitą	24
5 lentelė. Įrenginių priežiūros periodiškumas	25
6 lentelė. Naudojami cheminiai reagentai aušinimo sistemose	26
7 lentelė. Aušinimo vandens kokybės kontrolės parametrai	26
8 lentelė. Pramoninių aušinimo technologijų energinio efektyvumo rodikliai [31 – 34]	31
9 lentelė. Energijos taupymo metodų palyginimas vandens tiekimo sistemose [39, 41 – 43]	36
10 lentelė. Lyginamoji aušinimo sistemų analizė pagal šaltinius [45 – 47]	39
11 lentelė. Pažangių valdymo metodų energijos taupymo rezultatai	41
12 lentelė. Pagrindinių siurblių projektiniai darbo parametrai	45
13 lentelė. Modeliavime naudoti realūs duomenys ir siurbLIAI pagal darbo režimus	50
14 lentelė. Modeliuotų ir realių eksploatacinių duomenų palyginimas bei paklaidų vertinimas	52
15 lentelė. Projektinių ir gautų siurblių darbo taškų palyginimas	54
16 lentelė. Esamos ir modernizuotos sistemos palyginimas trijuose darbo režimuose	59
17 lentelė. Esamos ir modernizuotos sistemos galios palyginimas	59
18 lentelė. Esamos sistemos bendros metinės sąnaudos	63
19 lentelė. Modernizuotos sistemos bendros metinės sąnaudos	64
20 lentelė. Metinių sąnaudų ir energijos sutaupymo palyginimas	64
21 lentelė. Investicijų vertė	65

Paveikslų sąrašas

1 pav. Energijos sutaupymo rezultatų vizualizacija taikant dažnio keitiklius įvairiose pramonės srityse.....	14
2 pav. Tipinės pramoninės aušinimo sistemos komponentų energijos sąnaudų proporcijos.....	15
3 pav. Energijos taupymo metodų klasifikacija siurblių sistemose	16
4 pav. Droseliavimo ir kintamo greičio pavarų siurblių sistemų gyvavimo ciklo sąnaudų palyginimas [10]	18
5 pav. Pramoninių siurblių modernizacijos nauda	19
6 pav. Europos sąjungos tikslai iki 2030 m.	22
7 pav. Tipinės pramoninės aušinimo sistemos schema [32]	29
8 pav. Pagrindinės energijos taupymo kryptys pramoninėse aušinimo sistemose.....	31
9 pav. Atviro tipo (natūralios traukos) aušinimo bokšto veikimo principinė schema [37]	32
10 pav. Efektyvumo didinimo kryptys pramoninėse aušinimo sistemose	34
11 pav. Dažnio keitiklio įtaka siurblio energijos sąnaudoms.....	35
12 pav. Atskirų atvejų pramoninių aušinimo sistemų modernizacijos energijos taupymo palyginimas	38
13 pav. Modelinio nuspėjamojo valdymo veikimo principas	40
14 pav. ŠVS-1 siurblio slėgio ir vibracijų matavimas	44
15 pav. ŠVS-1 siurblio debito matavimas.....	44
16 pav. ŠVS (kairėje) ir ASS (dešinėje) siurblių techniniai parametrai	45
17 pav. Didžiojo siurblio (ŠVS-1) išmatuota darbo kreivė su projektiniu darbu tašku (2 priedas)..	46
18 pav. Mažojo siurblio (ASS-2) projekcinė ir išmatuota darbo kreivė (3 priedas).....	46
19 pav. Mažojo siurblio darbo rato sparnuotės korozija (raudonai) ir erozija (žaliai).....	47
20 pav. Sukurtos aušinimo sistemos modelis.....	48
21 pav. Tiriamos sistemos siurblinė.....	49
22 pav. Modelyje ir skaičiavimuose naudotas tinklėlis	49
23 pav. Mažo debito režimo skaičiavimai.....	51
24 pav. Vidutinio debito režimo skaičiavimai	51
25 pav. Didelio debito režimo skaičiavimai.....	52
26 pav. Didelio debito režimo dirbančių siurblių darbo kreivės	53
27 pav. Naujų didžiųjų siurblių parametrai.....	55
28 pav. Naujų mažųjų siurblių parametrai	55
29 pav. Modernizuoto mažo debito režimo skaičiavimai	57
30 pav. Modernizuoto vidutinio debito režimo skaičiavimai.....	57
31 pav. Modernizuoto didelio debito režimo skaičiavimai	58
32 pav. ŠVS-1 siurblio momentinis elektros energijos sunaudojimas (pažymėta raudonai).....	63
33 pav. Esamos ir modernizuotos sistemos metinės energijos ir kainos palyginimas	64

Ivadas

Pramoninėse įmonėse vandens aušinimo sistemos sudaro vieną iš energetiškai intensyviausių infrastruktūros dalių, užtikrinančių nepertraukiamą technologinių įrenginių veikimą ir gamybos procesų stabilumą. Dėl didelių recirkuliuojamo vandens kiekių, nuolat kintančių šilumos apkrovų ir dažnai pasenusios įrangos tokios sistemos gali suvartoti reikšmingą dalį visos įmonės elektros energijos. Sparčiai augančios elektros kainos, griežtėjantys Europos Sąjungos ir nacionaliniai energijos vartojimo efektyvumo bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų reikalavimai lemia, kad pramoninių aušinimo procesų modernizavimas tampa ne tik techniniu, bet ir strateginiu sprendimu, tiesiogiai susijusiu su įmonės konkurencingumu ir tvariu vystymusi.

Temos aktualumą sustiprina tai, kad daugelis pramonėje naudojamų vandens aušinimo sistemų buvo suprojektuotos prieš kelis dešimtmečius ir šiandien nebeatitinka šiuolaikinių efektyvumo, automatizacijos ir aplinkosaugos standartų. Tokiose sistemose dažnai eksploatuojami fiksuoto greičio siurbiai, nėra įdiegtas išmanus valdymas ir realaus laiko stebėseną, o gamybiniai procesai nėra pritaikyti dirbti prie kintančių apkrovų. Dėl to patiriami dideli elektros energijos nuostoliai, padidėja eksploataciniai kaštai, trumpėja įrangos tarnavimo trukmė ir apsunkinamas energijos vartojimo planavimas. Energijos vartojimo efektyvumo didinimas tokiose sistemose leidžia ne tik sumažinti elektros sąnaudas, bet ir reikšmingai prisidėti prie CO₂ emisijų mažinimo, įgyvendinant „žaliojo kurso“ ir darnaus vystymosi tikslus pramonės sektoriuje. Mokslinių tyrimų apžvalga rodo, kad daugiausia dėmesio skiriama atskirų siurblių ar siurblių grupių darbo optimizavimui, dažnio keitiklių taikymui ir valdymo algoritmų kūrimui. Tačiau mažiau nagrinėjami integruoti sprendimai, kai vienu metu vertinami visos aušinimo sistemos hidrauliniai parametrai, šilumos mainų procesai, valdymo funkcionalumas, ekonominis atsiperkamumas ir aplinkosauginis poveikis, pasitelkiant skaitinio modeliavimo bei skaitmeninio dvynio principus. Todėl aktualu tirti konkrečią pramoninę vandens aušinimo sistemą, taikant šiuolaikines modeliavimo ir duomenų apdorojimo priemones ir nustatant realų modernizacijos sprendinių efektyvumą.

Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, vis didesnę reikšmę įgyja išsamus pramoninių aušinimo sistemų veikimo vertinimas, leidžiantis suprasti tikrąsias energijos nuostolių priežastis ir nustatyti didžiausią modernizacijos potencialą turinčias sritis. Toks vertinimas turi apimti ne tik techninius įrangos parametrus, bet ir visos sistemos hidraulinių bei šilumos mainų procesų sąveiką, valdymo logiką, darbo režimų kintamumą, realių apkrovų dinamiką ir jų poveikį ilgalaikiam įrangos tarnavimo laikui. Analizuojant šiuos aspektus paaiškėja, kurios grandys lemia perteklines energijos sąnaudas, kur dažniausiai atsiranda hidrauliniai disbalansai, kokie valdymo sprendimai galėtų užtikrinti tvaresnį bei efektyvesnį įrenginių darbą ir kokias praktines ribas kelia esama infrastruktūra. Toks visapusiškas vertinimas taip pat leidžia numatyti galimus sistemos elgsenos scenarijus esant skirtingoms gamybinėms ir klimato sąlygoms bei įvertinti, kaip modernizacijos sprendiniai paveiktų tiek energijos vartojimą, tiek procesų stabilumą. Šios analizės rezultatai tampa pagrindu priimti pagrįstus technologinius sprendimus, įvertinti galimas energijos taupymo priemones bei nustatyti jų poveikį tiek sistemų eksploatavimui, tiek gamybos patikimumui. Darbas struktūruotas taip, kad nuosekliai atskleistų nagrinėjamą problemą ir jos sprendimo eigą. Pirmajame skyriuje analizuojami pramoninių aušinimo sistemų energijos vartojimo ypatumai ir modernizacijos poreikis. Antrajame skyriuje nagrinėjami energijos taupymo metodai, valdymo ir skaitmeniniai sprendimai. Trečiajame skyriuje atliekamas nagrinėjamos sistemos modeliavimo ir modernizacijos tyrimas, o ketvirtajame įvertinami ekonominiai bei aplinkosauginiai modernizacijos padariniai.

Tikslas: Ištirti pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumo didinimo sprendimus ir įvertinti jų techninį bei ekonominį pagrįstumą

Uždaviniai:

1. išanalizuoti pramonėje naudojamų siurblių energetinį efektyvumą, dažnio keitiklių taikymą ir atsipirkimo laiką;
2. sukurti esamos aušinimo sistemos modelį pagal esamus darbinius parametrus;
3. atlikti alternatyvaus modelio techninį tyrimą pakeitus esamus siurblius efektyvesniais bei pritaikius dažnio keitikius;
4. įvertinti siūlomų variantų energijos sąnaudas ir našumą;
5. atlikti pasiūlymų ekonominį vertinimą.

Hipotezė: šiuolaikinių automatinio valdymo sprendimų taikymas padidina pramoninės vandens aušinimo sistemos efektyvumą ir sumažina eksploatacinius kaštus.

1. Pramoninių aušinimo sistemų energijos vartojimo analizė

Šiame skyriuje pateikiama pramoninių aušinimo sistemų energijos vartojimo analizė, įvardijamos energijos taupymo galimybės, aptariami naujausi moksliniai tyrimai, suformuluojamos esminės nagrinėjamos problemos bei aprašomos tokios sistemos pagrindinės charakteristikos. Skyrius grindžiamas tiek bendru energetikos ir Europos Sąjungos politikos kontekstu, tiek praktiniais pramonės pavyzdžiais. Remiantis atrinktais moksliniais šaltiniais, parodoma, kodėl modernizacija yra aktuali energetiniu, ekonominiu ir aplinkosauginiu požiūriais. Papildomai išskiriamas tyrimo naujumo aspektas bei ištirtumo lygis tarptautiniu mastu, o skyrius užbaigiamas nagrinėjamos įmonės aušinimo sistemos aprašymu, kuris sudaro pagrindą tolimesnei analizei. Toks struktūrinis išdėstymas užtikrina, kad problema bus nagrinėjama nuosekliai – nuo bendrojo konteksto iki konkretaus tyrimo objekto

1.1. Elektros energijos vartojimo problema pramoninėse aušinimo sistemose

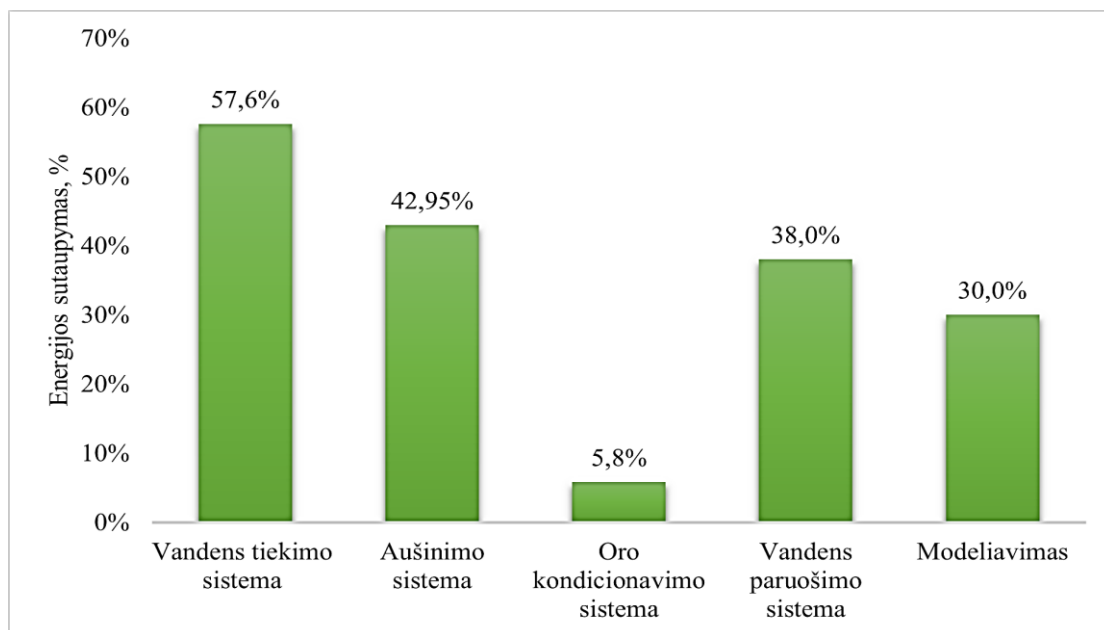
Šiuolaikinėje pramonėje energijos vartojimo efektyvumo klausimai tampa vienu iš pagrindinių darnaus vystymosi uždavinių. Pramonės sektorius yra vienas didžiausių elektros vartotojų, o įvairiuose procesuose naudojamos vandens siurblių sistemos sudaro reikšmingą energijos poreikio dalį [1]. Empiriniai tyrimai tai patvirtina: įmonės vandens tiekimo sistemoje pritaikius kintamo greičio pavaras siurbliams elektros suvartojimas sumažėjo net 57,6 %, o siurblio efektyvumas padidėjo iki 18,7 % [2]. Šie rezultatai rodo, kad technologinis modernizavimas leidžia pasiekti ženklų energijos taupymo realiomis eksploatacijos sąlygomis. Šie rezultatai rodo, jog aušinimo sistemų modernizavimas yra vienas efektyviausių būdų pasiekti apčiuopiamą energijos taupymo efektą pramonėje. Siekiant geriau palyginti įvairių tyrimų duomenis, 1 lentelėje pateikti reikšmingiausi rezultatai, susiję su energijos taupymu diegiant dažnio keitiklius skirtingose srityse.

1 lentelė. Elektros energijos taupymo rezultatai taikant dažnio keitiklius [2, 6, 16, 17, 18]

Sritis	Energijos sutaupymas	Papildomi tyrimo rezultatai
Vandens tiekimo sistemos	57,6 %	18,7 % siurblio efektyvumo padidėjimas
Aušinimo sistema	42,95 %	PUE rodiklis 1,228 (aukštas efektyvumas)
Oro kondicionavimo sistema	5,8 %	13 % sumažintas vandens sunaudojimas
Vandens paruošimo sistema	38 %	945 kWh per dieną sumažėjimas
Modeliavimas	~30 %	Pasiekta optimali variklio ir siurblio kombinacija

Kaip matyti, didžiausi energijos taupymo rodikliai užfiksuoti vandens tiekimo sistemose ir duomenų centruose, tačiau net ir mažesni pokyčiai, pavyzdžiui aušinimo bokštų modernizacija, duoda reikšmingą naudą, ypač vandens sąnaudų mažinimo aspektu. Papildomai pateikiama grafinė vizualizacija (1 pav.), rodanti, kaip skirtinguose tyrimuose kito energijos sutaupymo rodikliai.

Aktualumą dar labiau sustiprina Europos Sąjungos energetikos politika. „Žaliojo kurso“ dokumentuose akcentuojama būtinybė mažinti energijos vartojimą ir didinti efektyvumą, o energijos vartojimo efektyvumo direktyvoje (2023/1791) nustatyta, kad iki 2030 metų energijos vartojimas turi sumažėti bent 11,7 % palyginti su prognozuotu scenarijumi [3].



1 pav. Energijos sutaupymo rezultatų vizualizacija taikant dažnio keitiklius įvairiose pramonės srityse

Šį tikslą papildė kiti teisės aktai – Reglamentas EU 547/2012, nustatantis minimalius efektyvumo reikalavimus vandens siurbliams, bei Reglamentas EU 2019/1781, apimantis elektros variklius ir dažnio keitiklius. Tokie norminiai dokumentai užtikrina, kad rinkoje būtų diegiami tik aukštas efektyvumo rodiklius atitinkantys įrenginiai, o kartu suteikia pagrindą įmonėms planuoti savo modernizacijos projektus [4, 5]. Taigi, Europos Sąjungos reguliacinė bazė ne tik skatina, bet ir faktiškai įpareigoja įmones ieškoti energijos vartojimo mažinimo sprendimų.

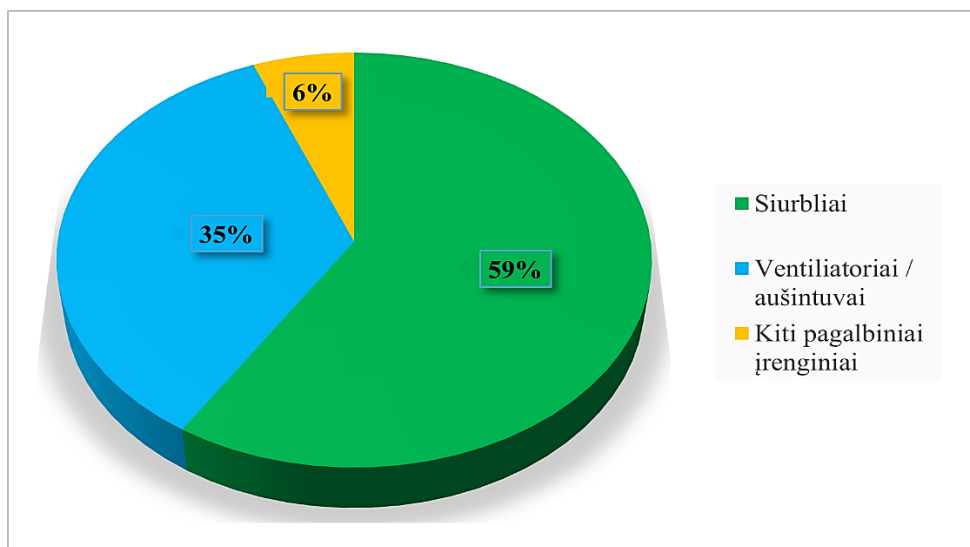
Ekonominė perspektyva yra ne mažiau svarbi. Augantis elektros energijos poreikis kelia jos kainą, kas daro didelę įtaką įmonių veiklos kaštams, todėl efektyvios technologijos tampa ne pasirinkimu, o būtinybe. Pramoninių aušinimo sistemų tyrimai rodo, kad diegiant dažnio keitiklius galima sutaupyti reikšmingą dalį elektros energijos, o sutaupymo mastas svyruoja priklausomai nuo technologijos taikymo srities. Pavyzdžiui, vienoje pramoninės aušinimo sistemos studijoje buvo užfiksuotas akivaizdus energijos sąnaudų sumažėjimas po kintamo greičio pavarų elektros varikliams diegimo, o duomenų centruose, kur aušinimo poreikis ypač didelis, elektros energijos sąnaudos sumažėjo daugiau nei 40 %. Tai rodo, kad modernios technologijos leidžia vienu metu spręsti ir energijos taupymo, ir patikimumo užtikrinimo klausimus [6, 7]. Toks ekonominis efektas rodo, kad investicijos į energijos efektyvumą yra ne tik aplinkosauginis, bet ir verslo tvarumą didinantis sprendimas.

Galiausiai, problemos aktualumas atsiskleidžia ir aplinkosauginiu požiūriu. Senų siurblių naudojimas lemia perteklinį energijos suvartojimą, kuris savo ruožtu didina netiesiogines CO₂ emisijas. Tarptautinės energetikos agentūros duomenimis, siurblių energetinio efektyvumo didinimas yra viena pigiausių ir efektyviausių priemonių, leidžiančių reikšmingai prisidėti prie klimato kaitos švelninimo priemonių įgyvendinimo [8]. Šią kryptį pabrėžia ir nacionaliniai dokumentai: Lietuvos Respublikos nacionaliniame energetikos ir klimato srities veiksmų plane (NEKSVP) 2021-2030 m. numatyta, kad pramonės sektoriuje turi būti įgyvendinami tikslai dėl bendro energijos suvartojimo mažinimo iki 2030 m. [9]. Tokie tikslai aiškiai parodo, kad energijos taupymo priemonės yra ne pasirinkimas, o būtinybė nacionaliniu ir tarptautiniu lygmeniu. Apibendrinant galima teigti, kad pramoninių aušinimo sistemų modernizacijos poreikį lemia trys pagrindiniai aspektai: reikšminga siurblių dalis bendrame energijos suvartojime ir jų modernizacijos potencialas, galimybė sumažinti gamybos kaštus bei

padidinti konkurencingumą, taip pat būtinybė mažinti CO₂ emisijas, prisidedant prie tarptautinių klimato kaitos švelninimo tikslų. Šių aspektų visuma sudaro prielaidas detaliam nagrinėti kokius technologinius sprendimus galėtų būti efektyviausiai pritaikyti nagrinėjamai sistemai.

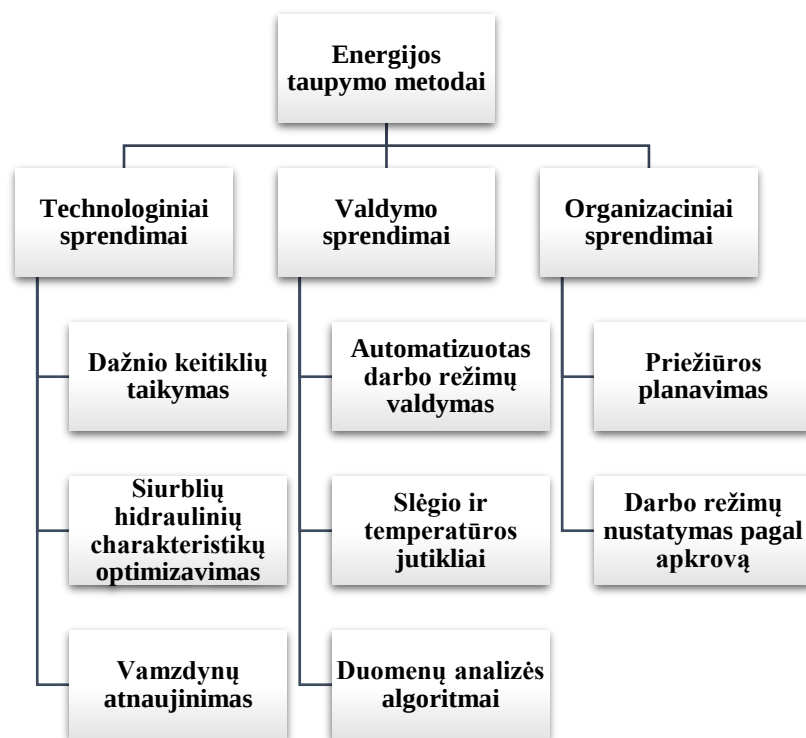
1.2. Energijos taupymo metodai ir technologiniai sprendimai siurblių sistemose

Vienas svarbiausių energijos taupymo metodų pramoninėse aušinimo sistemose yra dažnio keitiklių diegimas. Dažnio keitikliai leidžia reguliuoti siurblio darbo greitį pagal realų apkrovos poreikį, todėl sumažėja perteklinis energijos suvartojimas, kuris būdingas fiksuoto greičio siurbliams. Praktiniai tyrimai patvirtina šį efektą, nes nagrinėjamos įmonės pramoninėje aušinimo sistemoje įdiegus keitiklius buvo užfiksuotas reikšmingas energijos sąnaudų sumažėjimas, net iki 20 % [6]. Dar viename praktiniame pavyzdyje, atliktame duomenų centre, elektros energijos sąnaudos sumažėjo net iki 42,95 %, o minimalus energijos vartojimo efektyvumo (EVE) rodiklis pasiekė 1,228, kuris nurodo itin aukštą energijos vartojimo efektyvumą. Tai reiškia, kad didžioji dalis suvartojamos elektros energijos buvo skirta tiesiogiai informacinės technologijos įrangai maitinti, o pagalbinėms sistemoms, tokioms kaip aušinimas, elektros paskirstymas ar apšvietimas, teko nedidelė dalis. Tokie rodikliai atskleidžia, kad kintamo greičio pavarų technologijos gali būti vienas iš veiksmingiausių energijos taupymo sprendimų [7]. Remiantis praktiniais duomenimis, gautais iš vėliau šiame darbe nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos eksploatacijos, 2 paveikslėlyje pateikiamas būdingas energijos vartojimo pasiskirstymas tarp pagrindinių sistemos komponentų.



2 pav. Tipinės pramoninės aušinimo sistemos komponentų energijos sąnaudų proporcijos

Svarbus aspektas yra kintamo greičio pavarų palyginimas su kitais valdymo metodais. Iki šiol kai kuriose sistemos taikomas droseliavimas, kai srautas yra mažinamas vožtuvais arba sklendėmis, o siurblys dirba visu pajėgumu. Lyginamasis tyrimas cukraus gamybos įmonėje parodė, kad toks metodas yra ekonomiškai ir techniškai neefektyvus. Nors investicijos į dažnio keitiklius yra didesnės, jos atsiperka per maždaug vienerius metus, o droseliavimo metodas per 15 metų buvo net 146 % brangesnis bendrųjų gyvavimo ciklo sąnaudų atžvilgiu [10]. Šioje įmonėje atlikta analizė ir gauti rezultatai leidžia teigti, kad dažnio keitiklių taikymas yra ne tik technologiškai pranašesnis, bet ir ekonomiškai racionalesnis sprendimas. Siekiant aiškiau susisteminti įvairius energijos taupymo metodus, 3 pav. pateikiama jų klasifikacija pagal taikymo sritis – technologinius, valdymo ir organizacinius sprendimus. Tokia vizualizacija padeda išskirti, kad siurblių sistemose taikomos priemonės gali būti diegiamos tiek techniniame, tiek valdymo, tiek organizaciniame lygmenyje.



3 pav. Energijos taupymo metodų klasifikacija siurblių sistemose

Kaip matyti iš schemos (3 pav.), technologiniai sprendimai dažniausiai siejami su techninės įrangos atnaujinimu: dažnio keitiklių diegimu, siurblių hidraulinių charakteristikų optimizavimo bei vamzdynų modernizacija. Šie metodai reikalauja didesnių investicijų, tačiau užtikrina ilgalaikį energijos sąnaudų mažinimą. Valdymo sprendimai orientuoti į išmanią sistemos darbo organizavimą – automatizuotas darbo režimų valdymas, slėgio ir temperatūros jutiklių taikymas, pažangių duomenų analizės algoritmų integracija leidžia sistemą pritaikyti prie realių apkrovų. Tuo tarpu organizaciniai sprendimai pabrėžia tinkamą eksploataciją. Periodinės priežiūros planavimai ir darbo režimų nustatymas pagal apkrovas užtikrina ne tik energijos vartojimo efektyvumą, bet ir įrangos ilgaamžiškumą. Taigi, metodų grupavimas atskleidžia, kad energijos taupymo priemonės gali būti taikomos skirtinguose sistemos lygmenyse, o jų derinimas leidžia pasiekti didžiausią bendrą efektą.

Energijos taupymo potencialą didina ir tinkami vertinimo metodai, kurie leidžia tiksliai nustatyti sistemos efektyvumą įvairiomis sąlygomis. Tradiciniai rodikliai ne visada atspindi realią naudą, nes rezultatus stipriai veikia klimato sąlygos ir apkrovų svyravimai dėl kintančių darbo režimų. Siekiant išvengti šių trūkumų, siūloma taikyti naujus rodiklius kaip oro srauto našumo indikatorius (angl. *Airflow Performance Indicator, AirPI*), apibrėžiamą kaip santykį tarp elektros energijos poreikio ir minimalaus, termodinamiškai būtino oro srauto. Šis indikatorius leidžia normalizuoti energijos efektyvumo duomenis pagal klimatą ir apkrovos pokyčius, todėl sudaro sąlygas tiksliau įvertinti energijos taupymo priemonių poveikį bei palyginti rezultatus skirtingomis aplinkos sąlygomis [11].

Papildomą reikšmę turi ir modeliavimu grįsti vertinimo metodai. Atlikti tyrimai parodė, kad sudarius detalų siurblių sistemų modelį galima prognozuoti energijos sutaupymą dar prieš diegiant modernizacijos priemones. Viename iš tokių tyrimų buvo sudarytas pramoninės siurblių sistemos modelis, kuris parodė, jog tinkamai parinkus siurblio tipą ir variklio kombinaciją galima pasiekti apie 30 % energijos sutaupymą. Be to, buvo nustatyta, kad specializuoti varikliai, tokie kaip sinchroniniai reaktyvieji varikliai (SRV), tam tikromis sąlygomis gali veikti efektyviau nei įprasti indukciniai

varikliai, energijos vartojimo efektyvumo prasme net iki 7 %, ypač esant mažoms apkrovoms [12]. Aukšto efektyvumo SRV pagrįstos sistemos pasižymėjo geriausiais rezultatais, o tai išryškina tinkamo sistemos dydžio ir variklio pasirinkimo svarbą energijos taupymui. Tokia metodika gali būti taikoma tiek pramoniniuose, tiek buitiniuose procesuose, pavyzdžiui, šildymo, vandens tiekimo ar nuotekų valymo sistemose.

Naujausi tyrimai atskleidžia, jog energijos taupymui galima taikyti ir pažangius dirbtinio intelekto bei optimizavimo metodus. Viena iš tokių iniciatyvų – TESLA sistema, skirta energiją taupančiam ir termiškai saugiam aušinimo procesų valdymui. Šioje sistemoje algoritmai leidžia realiu laiku reguliuoti apkrovas ir pasiekti papildomą 5,24 – 15,3 % energijos sutaupymą nepažeidžiant saugumo ribų [12]. Kita kryptis yra realaus laiko siurblių darbo grafikų optimizavimas naudojant gilų pastiprinamąjį mokymą, kurio patobulinta versija – išplėstas artimosios politikos optimizavimo metodas (angl. *Exploration Enhanced Proximal Policy Optimization, E-PPO*). Jis leidžia sumažinti sąnaudas ir užtikrinti stabilų sistemos darbą net esant kintančioms sąlygoms, pavyzdžiui, siurblių energijos sąnaudos sumažintos iki 11 %, kartu išlaikant reikiamą rezervuarų vandens lygį. [13]. Tokie metodai rodo, kad ateityje energijos taupymas bus vis labiau grindžiamas ne tik techniniais sprendimais, bet ir pažangiais skaitmeniniais algoritmais, kurie padės infrastruktūros valdymą paversti labiau autonominiu, adaptyviu ir aplinką tausojančiu procesu.

Galiausiai, verta paminėti ir kitus sprendimus, kurie papildė siurblių bei valdymo technologijas. Pavyzdžiui, atliekamos šilumos integracija į regionines energijos sistemas leidžia pakartotinai panaudoti šilumos perteklių, taip sumažinant bendrą energijos poreikį ir metines veiklos sąnaudas. Tyrimai rodo, kad tokių sistemų šilumos mainų efektyvumas gali siekti net 99 %, o ekonominis efektas sudaryti apie 2,7 milijonų juanių metinę naudą. [14]. Taip pat alternatyvūs aušinimo metodai, tokie kaip garinamasis ar hibridinis aušinimas, turi didelį potencialą mažinti energijos poreikį karštuose ir sausuose klimatuose. Naujausi tyrimai parodė, kad hibridinės daugiaetapės sistemos gali siekti iki 95 % efektyvumą, o jų našumo koeficientas gali siekti net iki 35. Tai reiškia, kad tokios sistemos iš sunaudotos energijos sugeba išgauti keliasdešimt kartų didesnę vėsinimo rezultatą nei tradicinės kondicionavimo sistemos. Be to, jos gali sumažinti energijos sąnaudas iki 75 %, kartu mažinant aplinkos taršą dėl šaltnešių nenaudojimo [15]. Tokios technologijos rodo, kad energijos taupymo galimybės yra daug platesnės nei vien siurblių keitimas ar dažnio keitiklių diegimas, nes jos apima išmetamosios šilumos panaudojimą, išmanųjį aušinimą bei aplinkai draugiškus metodus.

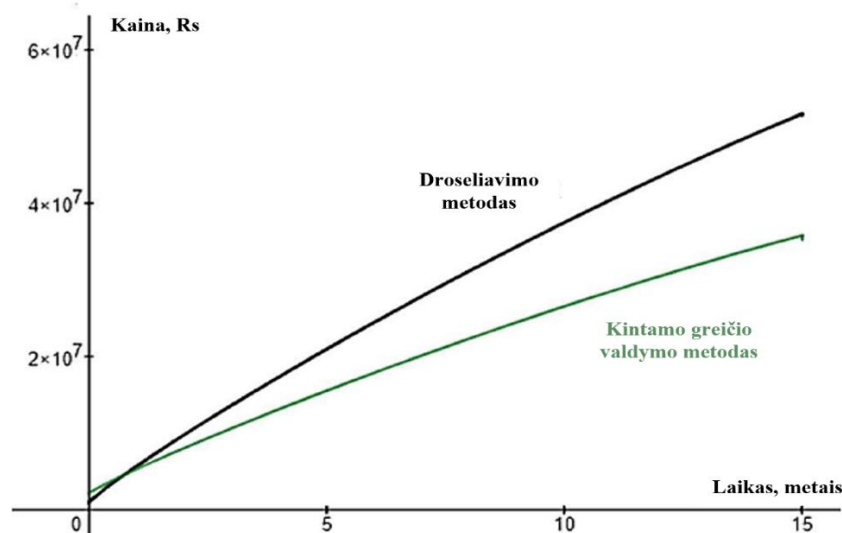
Apžvelgus energijos taupymo metodus, matyti, kad siurblių sistemose taikomi įvairūs sprendimai – nuo tradicinių dažnio keitiklių diegimų iki pažangių dirbtinio intelekto algoritmų. Jie leidžia sumažinti energijos sąnaudas bei užtikrinti sistemos patikimumą ir lankstumą. Įvairių metodų visuma sudaro pagrindą spręsti, kurie iš jų yra tinkamiausi konkrečiai pramoninei aušinimo sistemai.

1.3. Pramoninių siurblių modernizavimo poreikio pagrindimas

Pramoninių siurblių modernizacija yra būtina tiek dėl energijos vartojimo efektyvumo, tiek dėl ekonominio bei eksploatacinio pagrįstumo. Senų siurblių eksploatavimas dažnai siejamas su didesnėmis energijos sąnaudomis, ribotu prisitaikymu prie apkrovos svyravimų bei aukštesniais priežiūros kaštais. Technologinė pažanga rodo, kad šias problemas galima spręsti diegiant dažnio keitiklius, išmaniąsias valdymo sistemas bei parenkant tinkamesnius siurblių tipus.

Vienas svarbiausių argumentų modernizacijai yra neefektyvūs tradiciniai valdymo metodai. Daugeliu atvejų pramonėje siurblių išduodamas srautas buvo reguliuojamas sklendėmis, tačiau toks valdymas

yra itin neekonomiškas. Lyginamasis tyrimas cukraus gamybos pramonėje parodė, kad nors investicijos į dažnio keitiklius reikalauja didesnių pradinių kaštų, jos atsiperka maždaug per vienerius metus, o droseliavimo metodas, kaip jau buvo minėta 1.2 poskyryje, per 15 metų pasirodė net 146 % brangesnis bendrųjų gyvavimo ciklo sąnaudų atžvilgiu, palyginti su dažnio keitiklių naudojimu [10]. Siekiant iliustruoti šį skirtumą, pateikiama lyginamoji droseliavimo ir kintamo greičio pavarų siurblių sistemų gyvavimo ciklo sąnaudų analizė (4 pav.), atskleidžianti investicijų ir eksploatacinių kaštų skirtumus (Indijos rupijomis).



4 pav. Droseliavimo ir kintamo greičio pavarų siurblių sistemų gyvavimo ciklo sąnaudų palyginimas [10]

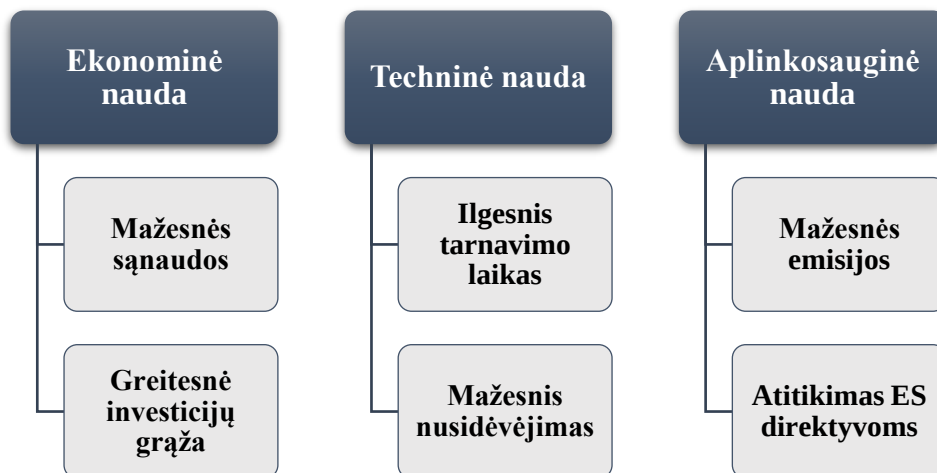
Kaip matyti grafike (4 pav.), nors pradinis dažnio keitiklių diegimo kaštas yra didesnis, ilgalaikėje perspektyvoje dėl mažesnių elektros energijos sąnaudų bendrosios išlaidos yra gerokai mažesnės nei droseliavimo atveju. Dažnio keitiklių technologijų papildomi kaštai pradeda atsipirkti jau po pirmųjų eksploatacijos metų, o po 15 metų bendrosios sąnaudos tampa daugiau nei 40 % mažesnės. Tai patvirtina, jog nors modernizacija reikalauja didesnių pradinių investicijų, jų ekonominis efektyvumas yra neabejotinas, o kartu užtikrinamas ir didesnis energijos vartojimo efektyvumas bei mažesnės emisijos. Be to, kintamo greičio pavaros leido sumažinti vieno siurblio elektros sąnaudas nuo 150 kW iki vos 70 kW, išlaikant darbą geriausio naudingumo regione. Papildomai, tyrimas su aušinimo bokštų ventiliatoriais įrodė, kad dažnio keitikliai yra efektyvesni net lyginant su dviejų greičių varikliais, nes sumažino ventiliatorių galią daugiau nei perpus (vidutiniškai nuo 39,9 kW iki 17,8 kW), o vandens sąnaudas apie 13 % [16]. Tokie rezultatai rodo, kad dažnio keitiklių technologijų taikymas ne tik ženkliai taupo energiją ir vandenį, bet ir mažina įrangos nusidėvėjimą bei priežiūros kaštus įvairiose pramonės šakose.

Kitas argumentas – senųjų sistemų neefektyvumas, kurį galima tiksliai įvertinti modeliavimu. Vienas iš nagrinėtų šaltinių parodė, kad tinkamai parinkus siurblio tipą bei pritaikius dažnio keitiklius galima pasiekti iki 30 % energijos sutaupymą [17]. Pakartotinai remiantis anksčiau jau minėtais duomenimis, vienas iš tyrimų atliktas vandens tiekimo sistemoje parodė, jog galima pasiekti 57,6 % energijos sutaupymą ir 18,7 % efektyvumo padidėjimą [2]. Šie rezultatai, gauti tiek pramonės, tiek žemės ūkio kontekste, rodo modernizacijos universalumą. Be to, jie įrodo, kad modernizacija leidžia pasiekti ne tik teorinį, bet ir realų efektyvumo augimą, mažinti eksploatacines sąnaudas bei poveikį aplinkai. Tai patvirtina modernizacijos praktinį veiksmingumą ir jos strateginę reikšmę ilgalaikiam tvarumui. Kiti

praktiniai pramonės atvejai taip pat sustiprina modernizacijos būtinybę. Vienaime tyrime, atliktame vandens valymo įmonėje, nustatyta, kad įdiegus dažnio keitiklius elektros sąnaudos per 24 valandų darbo ciklą sumažėjo apie 38 % (945 kWh per dieną [18]). Kituose tyrimuose, nagrinėjusiuose pramonines aušinimo sistemas, parodyta, kad modernių dažnio keitiklių diegimas leidžia sutaupyti apie 20 % elektros energijos per metus (apie 5,75 MWh) bei padidinti sistemos efektyvumą nuo ~34 % iki daugiau nei 42 % [6]. Tokie pavyzdžiai įrodo, kad technologijų diegimas generuoja ne tik finansinę ir eksploatacinę, bet ir aplinkosauginę naudą, mažindamas emisijas ir užtikrindamas atitiktį energijos vartojimo efektyvumo standartams.

Modernizacijos poreikį stiprina ir eksploataciniai privalumai. Naujesni siurbliai su dažnio keitikliais leidžia taikyti švelnaus paleidimo režimus, taip sumažinant pradinės srovės apkrovas, mažinti mechaninį nusidėvėjimą bei pailginti įrenginių naudojimo laiką. Kaip jau buvo minėta anksčiau, kintamo greičio pavarų diegimas leidžia sumažinti ne tik energijos sąnaudas, bet ir eksploatacinį nusidėvėjimą. Šiame kontekste tai tampa dar vienu praktiniu argumentu, kad modernizacija užtikrina ilgesnį įrangos eksploatavimo laiką ir mažesnes priežiūros sąnaudas. Be to, atlikti tyrimai parodė, jog dažnio keitikliai gali sumažinti elektros energijos sąnaudas iki 57 %, o siurblių efektyvumą padidinti beveik penktadaliu, taip pat sutrumpinti investicijų atsipirkimo laikotarpį iki kelerių metų [2, 16]. Energijos vartojimo mažinimas kartu reiškia ir mažesnę CO₂ emisiją, todėl tokia modernizacija yra svarbus žingsnis tvarios pramonės link.

Įmonių patirtis rodo, kad siurblių modernizacija leidžia ne tik sumažinti energijos sąnaudas ir CO₂ emisijas, bet ir pagerinti tvarumo rodiklius bei įmonės reputaciją rinkoje [19]. Tai tampa ne tik techniniu, bet ir strateginiu sprendimu, suteikiančiu papildomą vertę kaip priemonei, užtikrinančiai socialinę atsakomybę ir atitiktį aplinkosaugos politikoms. Tyrimai patvirtina, kad investicijos į naujus siurblius su dažnio keitiklių technologijomis dažnai atsiperka per 2 – 5 metus, nes ilgainiui sumažina elektros energijos sąnaudas ir eksploatacinius kaštus. Šiuolaikiniai išmaniųjų siurblių sprendimai integruoja dažnio keitiklius su automatizuotomis valdymo sistemomis, leidžiančiomis realiuoju laiku optimizuoti apkrovų paskirstymą, stebėti darbo režimus ir pranešti apie galimus gedimus [20]. Toks skaitmeninių technologijų taikymas užtikrina ne tik didesnę patikimumą ir ilgesnį įrangos naudojimo laiką, bet ir sudaro sąlygas prognozuojamai priežiūrai, mažinant neplanuotų prastovų riziką. Be to, modernizacija glaudžiai dera su Europos Sąjungos energetinio efektyvumo reikalavimais (pvz., *Ecodesign* reglamentu 547/212), todėl ji neapsiriboja vien tik dažnio keitiklių diegimu, bet tampa platesnių technologinių pokyčių ir įmonės tvarumo strategijos dalimi.



5 pav. Pramoninių siurblių modernizacijos nauda

Atlikti tyrimai ir praktinė įmonių patirtis rodo, kad siurblių modernizacija generuoja ne tik tiesioginę energijos sutaupymą, bet ir suteikia platesnę naudą. Ji apima ekonominius aspektus, techninius privalumus bei aplinkosauginius rezultatus. Kaip matyti iš 5 paveikslėlio, modernizacijos poveikis pasireiškia keliuose lygiuose. Ekonominė nauda susijusi su mažesnėmis eksploatacinėmis sąnaudomis ir trumpesniu atsipirkimo laikotarpiu. Techninė nauda atsiskleidžia per didesnę įrangos patikimumą bei ilgesnį tarnavimo laiką. Aplinkosauginė nauda užtikrina mažesnes emisijas, atitikimą tarptautiniams standartams bei įmonės tvarumo tikslų įgyvendinimą. Tai patvirtina, kad siurblių sistemų modernizacija yra ne tik technologiškai būtina, bet ir strategiškai naudinga įmonės konkurencingumui ir aplinkosauginei atsakomybei.

Apibendrinant galima teigti, kad pramoninių siurblių modernizacija yra pagrįsta trimis esminiais aspektais: energijos taupymo (iki 30 % pagal modeliavimą, 18~58 % pagal empirinius tyrimus), ekonomine nauda (greita investicijų grąža, mažesnės gyvavimo ciklo sąnaudos) ir eksploataciniais privalumais (patikimumo didinimas, mažesnės gyvavimo ciklo sąnaudos). Papildomai, pramonės pavyzdžiai bei gamintojų praktika rodo, kad modernizacija padeda įmonėms stiprinti tvarumo rodiklius bei prisitaikyti prie ateities technologinių reikalavimų. Tai įrodo, kad modernizacija yra neišvengiama priemonė užtikrinant pramonės konkurencingumą bei tvarų vystymąsi.

1.4. Energijos vartojimo efektyvumo didinimo reikšmė pramonei ir aplinkosaugai

Energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra vienas iš kertinių veiksnių, užtikrinančių darnią pramonės raidą ir prisidedančių prie globalių klimato kaitos mažinimo tikslų. Efektyvesnis energijos naudojimas leidžia suderinti ekonominius interesus su aplinkosaugos siekiais. Įmonės mažina savo sąnaudas, tuo pačiu metu mažindamos šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas ir stiprindamos savo atsakingo verslo įvaizdį. Tokiu būdu energijos taupymas tampa ne vien technine užduotimi, bet ir strateginiu sprendimu, padedančiu didinti įmonių konkurencingumą tarptautinėse rinkose [17].

Praktinė patirtis rodo, kad energijos vartojimo efektyvumo didinimas tiesiogiai koreliuoja su mažesniais gamybos kaštais ir didesniu įmonių atsparumu energijos kainų svyravimams. Pavyzdžiui, diegiant dažnio keitiklius aušinimo sistemose galima ne tik sumažinti elektros sąnaudas, bet ir pailginti įrangos tarnavimo laiką bei sumažinti priežiūros poreikį, kas suteikia papildomą ekonominę vertę [6]. Tokie sprendimai kartu lemia mažesnę aplinkos taršą, mažesnes CO₂ emisijas ir geresnius įmonių tvarumo rodiklius. Taigi, energijos vartojimo efektyvumo gerinimas tampa universaliu tikslu, apjungiančiu ekonominę naudą, socialinę atsakomybę ir aplinkosauginius įsipareigojimus.

Aplinkosauginiu požiūriu energijos vartojimo efektyvumo gerinimas yra esminis klimato kaitos švelninimo instrumentas. Efektyviai veikiančios pramoninės sistemos suvartoja mažiau energijos, o tai reiškia mažesnes netiesiogines CO₂ emisijas. Tyrimai rodo, kad taikant energiją taupančias technologijas aušinimo bokštuose sumažėja ne tik elektros sąnaudos, bet ir vandens suvartojimas, todėl aplinkosauginis efektas yra daugialypis [16]. Be to, dažnio keitikliai leidžia lanksčiau reguliuoti ventiliatorių darbą pagal realų poreikį, taip mažinant mechaninį nusidėvėjimą bei priežiūros kaštus. Tokie rezultatai patvirtina, kad technologinė modernizacija ne tik didina efektyvumą, bet ir prisideda prie darnaus išteklių naudojimo. Toliau galima diskutuoti apie rodiklius – energijos vartojimo efektyvumo rodiklių tobulinimas suteikia galimybių įvertinti šiuos procesus platesniame kontekste. Pavyzdžiui, pasiūlytas AirPI rodiklis leidžia objektyviai vertinti aušinimo bokštų efektyvumą atsižvelgiant į klimato sąlygas ir apkrovos svyravimus [11]. Tyrimai atskleidžia, kad drėgnojo tipo aušinimo bokštai pasižymi maždaug dvigubai didesniu efektyvumu nei sausieji, o hibridiniai užima

tarpinę poziciją. Tokiu būdu AirPI tampa naudingas ne tik gamintojų pateikiamų parametrų analizei, bet ir ilgalaikiam energijos valdymui, susiejant technologinius sprendimus su Jungtinių Tautų darnaus vystymosi darbotvarkės (angl. *Sustainable Development Goals, SDG*) tikslais. Šie tikslai apima 17 sričių, skirtų socialinės, ekonominės ir aplinkosauginės gerovės užtikrinimui iki 2030 metų. Energijos vartojimo efektyvumo didinimas tiesiogiai siejasi su SDG 7 tikslu – užtikrinti prieigą prie tvarios ir švarios energijos bei SDG 13 – imtis neatidėliotinų veiksmų kovai su klimato kaita [21]. Tai parodo, kad energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra ne tik techninis ar ekonominis klausimas, bet ir globalių aplinkosauginių tikslų įgyvendinimo priemonė.

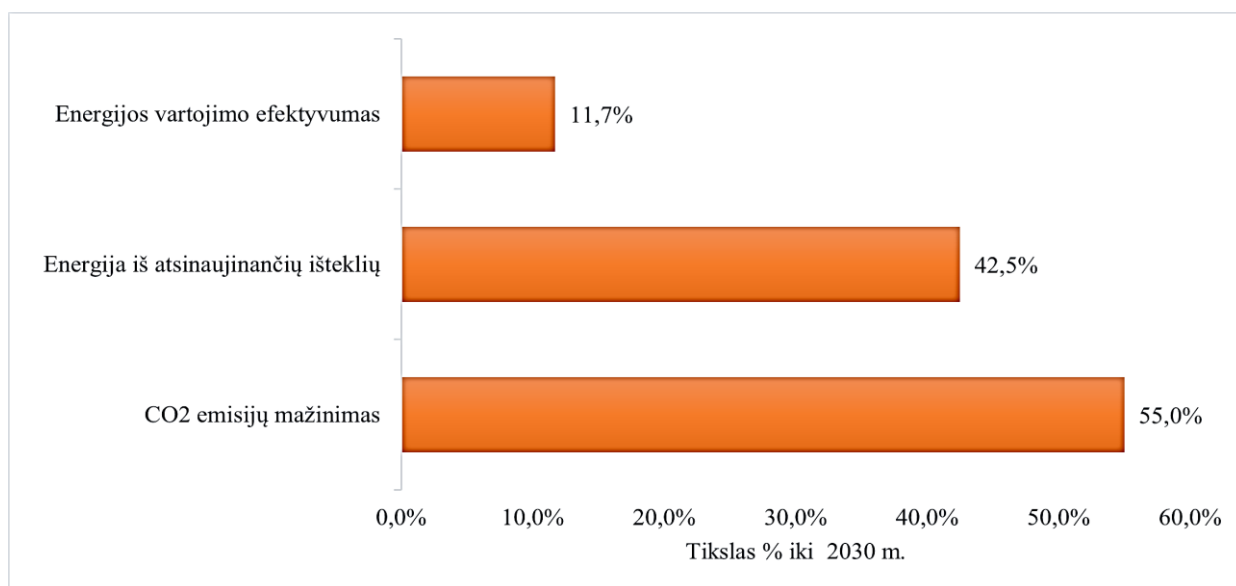
Politiniame lygmenyje energijos vartojimo efektyvumas yra pripažįstamas pagrindiniu Europos Sąjungos klimato politikos ramsčių. Europoje galiojantis „pirmiausia energijos vartojimo efektyvumas“ principas pabrėžia, kad energijos taupymas turi būti laikomas prioritetu prieš naujų energijos išteklių plėtrą. 55 % tikslas (angl. *Fit for 55*) priemonių paketas numato iki 2030 m. sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas bent 55 %, padidinti energijos vartojimo efektyvumą 11,7 % bei užtikrinti, kad atsinaujinančių išteklių dalis siektų 42,5 %. Be to, direktyvos nustato ir konkrečias pareigas – reguliarius energijos auditus didelėse įmonėse bei priežiūros mechanizmus, užtikrinančius efektyvumo priemonių įgyvendinimą [22 – 24]. Šie tikslai glaudžiai susiję su Europos žaliuoju kursu, kurio strateginis siekis yra klimatui neutrali ekonomika iki 2050 m [25]. Lentelėje (2 lentelė) apibendrinti pagrindiniai Europos Sąjungos bei tarptautiniai dokumentai, kurie nustato energijos vartojimo mažinimo tikslus ir susijusius terminus.

2 lentelė. ES ir tarptautiniai energijos vartojimo mažinimo tikslai [3, 4, 5, 9, 21]

Dokumentas	Tikslas	Terminai	Pastabos
Direktyva (EU) 2023/1791	Energijos vartojimo sumažinimas bent 11,7 %	Iki 2030 m.	Susieta su Žaliuoju kursu
Reglamentas (EU) 547/2012	Siurblių efektyvumo reikalavimai	Nuo 2012 m.	Taikoma vandens siurbliams
Reglamentas (EU) 2019/1781	Elektros variklių ir dažnio keitiklių efektyvumo normos	Nuo 2021 m.	Apima IE2 – IE4 klases
Lietuvos NEKSVP	Energijos vartojimo mažinimas pramonėje	2021 – 2030 m.	2030 m. turi būti pasiektas >11 % sumažėjimas
Jungtinių tautų SDG (7 ir 13 tikslai)	Švari energija, klimato kaitos mažinimas	Iki 2030 m.	Siejama su CO ₂ mažinimu

Akivaizdu, jog nacionaliniai ir tarptautiniai dokumentai suvienija tikslus – skatinti efektyvesnį energijos naudojimą pramonėje ir pasiekti tvarius klimato kaitos mažinimo rezultatus. Paveikslėlyje (6 pav.) pateiktos trumpos progreso juostos, vizualiai apibendrinančios iki 2030 m. Europos sąjungos numatytus tikslus. Energijos vartojimo efektyvumo gerinimas pramonei suteikia ne tik finansinę naudą, mažinant sąnaudas ir didinant konkurencingumą, bet ir padeda užtikrinti atsparumą energijos kainų svyravimams bei tiekimo grandinių nestabilumui. Šiuolaikinėje rinkoje energija tampa vienu iš pagrindinių veiksnių, lemiančių įmonių konkurencinę padėtį, todėl gebėjimas mažinti priklausomybę nuo išorinių energijos šaltinių yra strategiškai svarbus. Energijos taupymo priemonės taip pat prisideda prie veiklos stabilumo, nes mažesnis energijos poreikis leidžia lengviau prisitaikyti prie galimų reguliacinių pokyčių ar ekologinių reikalavimų. Be aplinkosauginės naudos, tokie sprendimai užtikrina racionalių gamtinių išteklių naudojimą, mažina įrangos nusidėvėjimą ir ilgainiui sumažina techninės priežiūros išlaidas. Visa tai sudaro prielaidas tvariam įmonių augimui,

kai ekonominė plėtra, aplinkosaugos tikslai ir socialinė atsakomybė yra integruojami į vieną darnią strategiją.



6 pav. Europos sąjungos tikslai iki 2030 m.

1.5. Skyriaus apibendrinimas

Pirmajame skyriuje buvo išsamiai aptarta pramoninių vandens aušinimo sistemų energijos vartojimo problematika bei šių sistemų modernizacijos poreikis. Išsiaiškinta, kad didžiausią elektros energijos sąnaudų dalį sudaro siurblių darbas, todėl jų energetinis efektyvumas yra lemiamas veiksnys siekiant sumažinti bendrąsias eksploatacines išlaidas. Aptarti energijos taupymo metodai ir technologiniai sprendimai rodo, kad dažnio keitiklių diegimas, siurblių konstrukcijos modernizavimas bei tinkamas sistemos darbo režimų parinkimas leidžia pasiekti reikšmingą energijos vartojimo mažinimą. Be to, technologinės pažangos taikymas sudaro sąlygas užtikrinti didesnę sistemos lankstumą ir patikimumą ilgalaikėje perspektyvoje. Skyriaus analizė taip pat atskleidė, kad energijos efektyvumo didinimas ne tik turi tiesioginę ekonominę naudą įmonėms, bet ir padeda įgyvendinti aplinkosauginius tikslus, mažinti CO₂ emisijas bei prisidėti prie darnaus vystymosi principų. Pabrėžta, jog pramoninės aušinimo sistemos modernizacija yra ne tik techninis, bet ir strateginis sprendimas, turintis įtakos įmonės konkurencingumui, gamybos sąnaudų optimizavimui bei atitinkamai Europos Sąjungos energetikos politikai ir reguliaciniams reikalavimams, todėl modernizacija tampa būtina priemonė, užtikrinančia įmonės ilgalaikį tvarumą ir prisitaikymą prie rinkos pokyčių. Apibendrinant galima teigti, kad šiuo metu nagrinėjamos aušinimo sistemos energijos vartojimo problemos yra aktualios tiek teoriniu, tiek praktiniu lygmeniu, o tai pagrindžia būtinybę atlikti detalesnę esamos sistemos tyrimą, sukurti jos modelį ir įvertinti alternatyvių modernizacijos sprendimų techninį bei ekonominį efektyvumą, kas leidžia užtikrinti ne tik energijos taupymą, bet ir platesnę naudą – eksploatacinių kaštų mažinimą, aplinkosauginių tikslų įgyvendinimą bei įmonės konkurencingumo stiprinimą tarptautinėje rinkoje.

2. Energijos taupymo metodų analizė ir taikymo galimybės

Antrajame skyriuje bus nagrinėjami energijos taupymo metodai ir jų taikymas pramoninėse aušinimo sistemose, siekiant nustatyti sprendimus, didinančius energetinį efektyvumą. Skyrius bus grindžiamas pirmojo skyriaus išvadomis ir naujausiais tyrimais, nagrinėjančiais efektyvesnių siurblių, dažnio keitiklių ir pažangių valdymo algoritmų taikymą. Taip pat bus analizuojama aušinimo sistemų veikimo schema ir energijos vartojimo ypatumai, leidžiantys identifikuoti pagrindines energijos nuostolių priežastis ir nustatyti modernizacijos kryptis. Skyrius bus užbaigiamas energijos taupymo ir pažangių valdymo sprendimų apibendrinimu, sudarančių teorinį pagrindą tolimesniems tyrimams trečiajame skyriuje.

2.1. Nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos problemų formulavimas

Šiame poskyryje pateikiama nagrinėjamos įmonės pramoninės aušinimo sistemos analizė, paremta faktiniais duomenimis ir literatūros šaltiniais, siekiant nustatyti pagrindines energinio neefektyvumo priežastis.

2.1.1. Nagrinėjamos sistemos veikimo principas

Tiriamoji pramoninė aušinimo sistema yra apytakinio tipo vandens cirkuliacijos sistema, skirta įvairių padalinių technologinių įrenginių, šilumokaičių ir produktų kondensacijos procesų aušinimui. Pagrindinis jos veikimo principas grindžiamas uždaru ciklu: iš šalto vandens rezervuaro siurbliui paima vandenį, kuris kolektoriais paskirstomas į kitų padalinių technologines linijas. Aušinimo proceso metu vanduo įkaista ir, veikiamas likutinio slėgio, grįžta į ventiliatorinius aušintuvus (bokštus), kuriuose ataušinamas bei savitaka patenka atgal į rezervuarą. Tokiu būdu užtikrinama pastovi šilumos apykaita tarp technologinių procesų ir aušinimo įrangos. Ši sistema veikia nuolat, o jos darbo režimas priklauso nuo apkrovimo intensyvumo, sezoniškumo ir gamybos sąlygų. Sistemos veikimo principas atitinka pramoninių skysčių aušinamų sistemų tipą, kuriame šilumos perdavimas vyksta vandens srautu tarp technologinių procesų ir aušintuvų. Kaip pažymi moksliniai šaltiniai, pramoninių aušinimo sistemų raida glaudžiai susijusi su energijos kainų augimu ir griežtėjančiais aplinkosaugos reikalavimais. Tradicinės oro ir vandens aušinimo technologijos tebėra plačiai naudojamos dėl patikimumo, tačiau jos išlieka energijai imlios. Naujos kartos sprendimai, tokie kaip termoelektrinis, magnetinis ir fazių kaitos aušinimas leidžia pasiekti aukštesnį energetinį efektyvumą ir sumažinti poveikį aplinkai [26].

Sistemoje įrengti aštuoni ventiliatoriniai aušintuvai, užtikrinantys efektyvų šilumos išsklaidymą net esant didelėms aplinkos temperatūroms. Aušinimo bokštų darbas grindžiamas garų ir oro šilumos mainų principu, todėl didžiausią poveikį jų efektyvumui turi oro temperatūra bei drėgmė. Tokio tipo sistemos plačiai taikomos gamybos, energetikos ir chemijos pramonėje, tačiau jų eksploatavimas dažnai siejamas su didelėmis energijos sąnaudomis bei sudėtinga prižiūra [26]. Šiuolaikinėje praktikoje tokių sistemų efektyvumui didinti vis dažniau taikomas energijos vartojimo optimizavimas, įdiegiant kintamo dažnio pavaras siurbliams ar ventiliatoriams, kas leidžia iki 50 % sumažinti elektros energijos sąnaudas [17]. Tokie pažangūs valdymo sprendimai leidžia sistemai dinamiškai prisitaikyti prie kintančių aplinkos sąlygų, optimizuoti ventiliatorių ir siurblių intensyvumą. Taip įmanoma užtikrinti ne tik maksimalų šilumos šalinimo efektyvumą, bet ir ženkliai sumažinti bendras energijos vartojimo sąnaudas ilgalaikėje eksploatacijoje.

2.1.2. Siurbliai ir darbo režimai

Sistema susideda iš kelių skirtingų siurblių grupių – vidutinio, aukšto, žemo slėgio bei karšto vandens siurblių. Šiame tyrime vertinami tik paduodamo vandens siurbliai, kurie tiekia vandenį į kitus padalinius. Pagrindinės siurblių grupės ir jų techniniai parametrai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Paduodamo vandens siurblių techniniai parametrai

Siurblių grupė	Kiekis, vnt.	Modelis	Našumas, m ³ /h	Slėgis, bar	Variklio galia, kW	Pastaba
Vidutinio slėgio (ŠVS)	7	D-3600-52	3600	5,2	630	Pagrindinė darbo grupė
Aukšto slėgio (ASS)	3	D-1260-64	1260	6,4	315	Naudojami esant mažam debitui arba papildomai apkrovai
Žemo slėgio (ŽSS)	3	D-1080-35	1080	3,5	130	Naudojami retai, tyrime nevertinami

Darbo režimai klasifikuojami pagal sistemos debito (srauto) lygius, kurie nustato, kiek siurblių veikia vienu metu ir koks slėgis palaikomas sistemoje. Kiekvienas režimas parinktas atsižvelgiant į gamybos apkrovą. Režimų apibendrinimas pateikiamas 4 lentelėje.

4 lentelė. Siurblių darbo režimai pagal sistemos debitą

Darbo režimas	Galimos debito ribos, tūkst. m ³ /h	Veikiantys siurbliai	Sistemos slėgis, bar
Mažo debito	1,5 – 3,0	2 aukšto slėgio siurbliai	3,6 ~ 4,8
Vidutinio debito	8 – 10,0	3 vidutinio slėgio siurbliai arba 2 vidutinio ir 2 aukšto	4,2 ~ 5,0
Aukšto debito	14,5 – 16,0	4 vidutinio slėgio + 1 aukšto slėgio siurblys	3,6 ~ 4,5

Siurbliai veikia tiesioginiu režimu, be dažnio keitiklių, todėl jų greitis nekinta priklausomai nuo apkrovos. Retais atvejais srautas reguliuojamas sklendėmis, tačiau tokia praktika vengiama dėl sklendžių nusidėvėjimo ir hidrosmūgių rizikos. Tyrimai rodo, kad fiksuoto greičio siurbliai dažnai yra viena pagrindinių priežasčių, lemiančių energijos švaistymą pramoninėse siurblių sistemose, kadangi reali apkrova dažnai nesutampa su projektine. Tokiais atvejais kintamo dažnio pavarų taikymas leidžia sistemą priderinti prie realaus debito, sumažinant energijos nuostolius nuo 5 % iki 50 % ir užtikrinti stabilesnį slėgio režimą [17].

2.1.3. Teorinės įžvalgos apie pramonines aušinimo sistemas

Literatūroje pabrėžiama, jog pramoninių aušinimo sistemų efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo siurblių valdymo strategijos, vamzdynų būklės ir priežiūros kokybės. Tyrimuose nustatyta, jog net ir modernūs vandens aušinimo ciklai tampa neefektyvūs, kai srautai nesuderinti su momentiniais technologiniais poreikiais, o sistemų valdymas nėra automatizuotas. Tokiais atvejais siurbliai dirba maksimaliu greičiu net ir esant sumažintam debito poreikiui, o tai ženkliai padidina energijos suvartojimą bei apkrovas mechaninėms dalims [26]. Pastaraisiais metais pramoniniuose aušinimo procesuose vis plačiau diegiamos pažangios valdymo technologijos, grindžiamos daiktų interneto ir dirbtinio intelekto principais. Jos leidžia realiuoju laiku prognozuoti energijos poreikius, optimizuoti

srautus bei užtikrinti siurblių darbo balansą pagal faktinius duomenis, taip mažinant perteklines sąnaudas ir įrangos nusidėvėjimą [26].

Tyrimai apie siurblių darbo efektyvumo modeliavimą duomenimis grįštais metodais pabrėžia, jog daugelyje pramoninių stočių sunaudojamos elektros energijos gali būti priskiriama perteklinėms sąnaudoms, atsirandančioms dėl neefektyvaus srauto pasiskirstymo, netikslaus siurblių parinkimo ar reguliavimo stokos. Pavyzdžiui, buvo nagrinėta vienos Kinijos įmonės siurblinė ir nustatytos modeliavimo efektyvumo paklaidos, kur vidutinė siekė 16,49 %, o maksimali – 20,4 %. Pritaikius duomenimis grįstą Gauso procesų regresiją (angl. *Gaussian Process Regression*) metodą, ši paklaida sumažinta iki 0,18 – 1,55 % [27]. Duomenimis grįsti algoritmai, taikomi siurblių sistemų modeliavimui, leidžia kurti tikslesnius energijos sąnaudų prognozavimo modelius bei nustatyti veiksnius, lemiančius realaus efektyvumo mažėjimą. Tokie metodai ypač aktualūs pramoninėms aušinimo sistemoms, kur tikslus debito ir energijos balansas tiesiogiai susijęs su įrangos tarnavimo trukme ir eksploatacinėmis išlaidomis. Kita reikšminga kryptis yra susijusi su siurblių priežiūra ir eksploatacija. Naujausi darbai pabrėžia, kad perėjimas nuo reaktyvios prie proaktyvios priežiūros strategijos yra vienas svarbiausių energinio efektyvumo didinimo veiksnių. Analizės rodo, kad neplanuoti sustojimai bei mechaninė degradacija tiesiogiai sukelia energinius nuostolius, nes siurbliai dažnai veikia sumažėjusio našumo režimu. Pramonėje neplanuoti sustojimai ir remontai gali sudaryti 35 – 50 % visų eksploatacijos išlaidų [28]. Proaktyvios priežiūros metodai, pasitelkiantys nuotolinę diagnostiką, vibracijų analizę bei dirbtinio intelekto prognozavimo modelius, leidžia iš anksto nustatyti galimus gedimus ir užkirsti kelią staigiems energijos nuostoliams.

Įrengimų priežiūra nagrinėjamoje įmonėje vykdoma pagal patvirtintą vidinę įrengimų remonto ir techninio aptarnavimo instrukciją, kurioje nustatyta planinių periodinių ir remonto po apžiūros metodų taikymo sistema. Tokia sistema užtikrina įrenginių patikimumą, energijos vartojimo stabilumą ir leidžia išvengti neplanuotų sustojimų. Kiekvienos paminėtos pamainos metu atliekama techninė apžiūra, tikrinami svarbiausi parametrai, o aptikti defektai registruojami specialiuose žurnaluose. Planiniai remontai vykdomi pagal išdirbtų valandų kiekį bei faktinę įrenginio būklę, todėl įmonėje užtikrinamas racionalus prevencinės ir korekcinės priežiūros derinimas. Remonto darbų eiga dokumentuojama ir kontroliuojama pagal metinius grafikus bei įrengimų remonto ir defektų registravimo žurnalus.

Toliau pateikiama 5 lentelėje apibendrinta įrenginių priežiūros periodiškumo struktūra, taikoma nagrinėjamoje įmonėje.

5 lentelė. Įrenginių priežiūros periodiškumas

Priežiūros rūšis	Atsakingas personalas	Dažnumas	Dokumentavimas	Pastabos
Techninė apžiūra	Eksploatuojantis personalas	Kas pamainą	Defektų žurnalas	Fiksuoja pastebėti gedimai
Einamasis remontas 1	Mechaninė tarnyba	Kas 3~6 mėn.	Remonto žurnalas	Smulkūs reguliavimo, aptarnavimo darbai
Einamasis remontas 2	Mechaninė tarnyba / rangovai	Kartą per metus	Remonto žurnalas	Guolių, sandariklių keitimas
Didysis remontas	Rangovai	Kas 3~5 metus	Priėmimo po remonto aktai, remonto žurnalas	Techninių, projektinių parametrų atkūrimas

Tokios struktūruotos priežiūros priemonės leidžia palaikyti stabilią įrengimų eksploataciją, išvengti avarinių situacijų ir optimizuoti energijos sąnaudas. Nors lentelėje pateiktas orientacinis priežiūros dažnumas, praktikoje jis labiau priklauso nuo įrenginio darbo valandų, apkrovų intensyvumo bei eksploatacijos sąlygų, o ne nuo fiksuoto kalendorinio laikotarpio. Todėl remonto planavimas dažnai grindžiamas faktiniu darbo laiku, registruojamu įrenginio apskaitos žurnaluose.

Svarbus aspektas pramoninių aušinimo sistemų veiksmingumui yra vamzdinių būklė ir su ja susiję hidrauliniai nuostoliai. Tyrimai rodo, kad didėjant vamzdinių ir jų fasoninių dalių amžiui, dėl korozijos ir apnašų kaupimosi didėja trinties koeficientas, kuris tiesiogiai lemia energijos sąnaudų didėjimą siurbliams. Ilgainiui šie pokyčiai sukelia reikšmingą hidraulinio našumo mažėjimą. Analizės parodė, kad senų vamzdžių absoliutus šiurkštumas gali padidėti net iki 30 kartų (nuo 0,9 mm iki 27,6 mm), o tai sąlygoja iki 25 % didesnes energijos sąnaudas siurblių veikimui. Tokie reiškiniai daro įtaką ne tik sistemų eksploataciniams kaštams, bet ir bendram pramonės sektoriaus energijos vartojimo balansui bei emisijų lygiui [29].

Nagrinėjamoje įmonėje aušinimo sistemos apytakiniuose cikluose taikomas nuolatinis cheminis vandens apdirbimas, siekiant išvengti apnašų, korozijos ir biologinių apaugimų. Šis procesas vykdomas pagal įmonės vidinį apytakinio vandens gamybos technologinį reglamentą, kuriame apibrėžti pagrindiniai apdorojimo kriterijai ir reagentų taikymo sąlygos. Cheminis apdirbimas vykdomas naudojant specialiai atrinktus reagentus – inhibitorius, biocidus ir dispergentus, kuriuos tiekia sertifikuotos įmonės, suderinusios vandens apdirbimo programą su laboratorinės kontrolės padaliniu. Tokios priemonės leidžia palaikyti reikiamą pH (7,2 – 9,2), riboti korozijos greitį (anglinio plieno $\leq 0,075$ mm/metus, vario lydinių $\leq 0,005$ mm/metus) bei kontroliuoti mikrobiologinį užterštumą ($\leq 10^4$ bakterijų/ml).

6 lentelė. Naudojami cheminiai reagentai aušinimo sistemose

Reagentų tipas	Paskirtis	Naudojimo dažnis
Fosfatų pagrindo inhibitoriai	Metallų korozijos slopinimas	Pagal apkrovų (debito) intensyvumą
Dispergentai	Kietųjų nuosėdų susidarymo prevencija	Nuolatinis cikliškas dozavimas
Biocidiniai priedai	Mikroorganizmų augimo slopinimas	Pagal mikrobiologinės analizės rezultatus

Cheminio apdirbimo efektyvumas nuolat tikrinamas laboratoriniais tyrimais. Įmonės laboratorinės kontrolės padalinys reguliariai atlieka vandens kokybės analizę, o rezultatai fiksuojami kokybės pažymose. Tai leidžia įvertinti reagentų veiksmingumą ir laiku koreguoti apdorojimo programą. Siekiant užtikrinti aušinimo sistemos stabilų darbą, įmonėje nuolat stebimi vandens kokybės parametrai – pH, kietumas, elektrinis laidumas, skendinčios dalelės bei mikrobiologinis užterštumas (7 lentelė).

7 lentelė. Aušinimo vandens kokybės kontrolės parametrai

Parametras	Leistina reikšmė	Matavimo dažnis	Kontrolės metodas
pH	7,2 – 9,2	Nepertraukiamas	pH-metras
Skendinčios dalelės	≤ 100 mg/l	1 kartą / 2 sav.	Svorio metodas
Bendras kietumas	$\leq 27,5$ mgekv/l	1 kartą / 2 sav.	Kompleksometrinis titravimas
Mikrobiologinis užterštumas	$\leq 10^4$ bakt./ml	1 kartą / 2 sav.	Biologiniai testai

Tokios integruotos priežiūros ir vandens kokybės kontrolės priemonės leidžia palaikyti pastovų šilumos mainų efektyvumą bei užtikrina įrangos ilgaamžiškumą.

Atsižvelgiant į minėtus tyrimus, galima teigti, kad pagrindinės pramoninių aušinimo sistemų problemos yra fiksuoto greičio variklių naudojimas, senėjantys siurbliai ir neautomatizuotas srauto valdymas – atitinka bendras pasaulines tendencijas. Įmonėje taikomos aušinimo sistemų valdymo, priežiūros ir cheminio apdirbimo priemonės atitinka šiuolaikinius efektyvumo bei tvarumo principus. Tokios priemonės užtikrina ne tik įrenginių patikimumą ir ilgesnį eksploatacijos laiką, bet ir didesnę energijos vartojimo efektyvumą bei mažesnę poveikį aplinkai. Pastebima, jog modernizavimo kryptys vis labiau siejamos su tvarumo principais, energijos sąnaudų mažinimu, CO₂ emisijų kontrolės stiprinimu bei sistemų gyvavimo ciklo pailginimu, pasitelkiant pažangias technologijas ir duomenų analizės metodus. Tokia integruota sistema yra esminė sąlyga siekiant gamybos stabilumo, išteklių taupymo ir technologinių procesų patikimumo.

2.1.4. Pagrindinių problemų analizė ir formuluotės

Atlikus esamos sistemos analizę bei remiantis moksliniais tyrimais, galima identifikuoti šias pagrindines problemas:

- didelės energijos sąnaudos ir žemas efektyvumas: dėl fiksuoto greičio variklių siurbliai veikia visu galingumu net tada, kai apkrova sumažėjusi. Tai lemia perteklinį elektros energijos suvartojimą;
- reguliavimo stoka ir hidrosmūgių rizika: dėl dažnio keitiklių nebuvo srauto reguliavimas vyksta mechaniškai – sklendėmis. Tokia praktika mažina sistemos efektyvumą ir padidina hidrosmūgių riziką staiga kintant darbiniais parametrams;
- vamzdynų senėjimas ir padidėję hidrauliniai nuostoliai: vamzdžių korozija ir apnašų kaupimasis sukelia papildomą trintį, mažina pralaidumą ir didina siurblių apkrovą;
- didelė priežiūros našta ir neplanuoti sustojimai: kadangi sistema neturi visiškai automatizuoto valdymo, būtina nuolatinė operatorių priežiūra. Gedimų atvejais siurbliai stabdomi, perjungiami rezerviniai, o tai didina eksploatacinius kaštus ir stabdo, kuriam laikui, gamybos procesus;
- lankstumo stoka ir ribotos modernizavimo galimybės: dėl pasenusios įrangos sistemos elastingumas apkrovos pokyčiams yra ribotas. Tai apsunkina galimybę efektyviai reguliuoti energijos vartojimą ar diegti pažangias valdymo priemones.

Identifikuotos problemos tarpusavyje glaudžiai susijusios ir formuoja uždarą neefektyvumo ciklą: neautomatizuotas srauto valdymas, padidėję hidrauliniai nuostoliai ir įrangos senėjimas lemia energijos nuostolius bei didesnes priežiūros sąnaudas. Šios problemos išryškina būtinybę diegti duomenimis grįstus valdymo sprendimus, pažangias priežiūros technologijas ir korozijos kontrolės priemones. Tokia kryptis atitinka pasaulinės pramonės tvarumo tendencijas, orientuotas į energijos vartojimo efektyvumo didinimą, emisijų mažinimą ir sistemų gyvavimo ciklo pailginimą. Apibendrinant galima teigti, kad nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos pagrindinės problemos yra susijusios su fiksuoto greičio siurblių naudojimu, neefektyviu valdymu bei padidėjusiais hidrauliniais nuostoliais. Sistemos efektyvumo mažėjimas pasireiškia didelėmis elektros energijos sąnaudomis, ribotu slėgio stabilumu ir dideliu priežiūros poreikiu. Tokios problemos atspindi iššūkius, būdingus daugeliui pramoninių aušinimo sistemų [17, 26]. Atsižvelgiant į identifikuotas problemas, tolimesniuose poskyriuose bus analizuojami energijos taupymo metodai, valdymo sprendimai ir

technologinės modernizacijos galimybės, kurių tikslas yra užtikrinti sistemos patikimumą, sumažinti energijos sąnaudas ir pagerinti aušinimo proceso efektyvumą.

2.2. Technologinių aušinimo procesų taikymo galimybės pramoninėse sistemose

Efektyvus aušinimo procesų valdymas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių pramoninių sistemų energijos vartojimo rodiklius. Šiuolaikinės aušinimo technologijos vystosi dviem kryptimis – siekiama didinti šilumos mainų efektyvumą bei mažinti elektros energijos ir vandens sąnaudas. Dėl to daugelyje pramonės sektorių diegiamos mišrios (hibridinės) technologijos, pažangūs siurblių valdymo algoritmai ir automatinės srauto reguliavimo sistemos [30]. Tokie sprendimai ne tik pagerina energijos vartojimo rodiklius, bet ir prisideda prie eksploatacinių sąnaudų bei CO₂ emisijų mažinimo.

2.2.1. Siurblių ir variklių energijos valdymo metodai

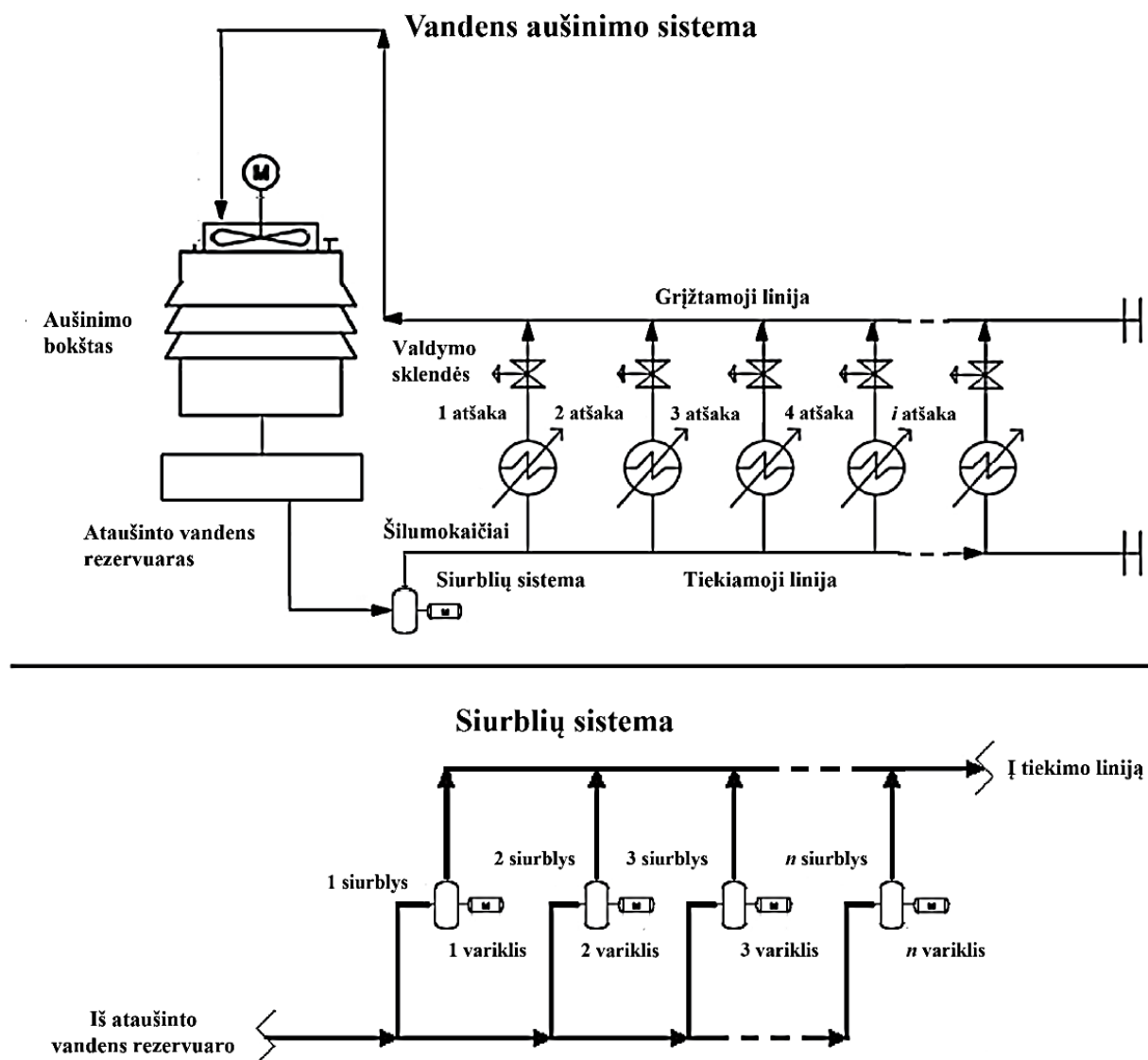
Pagrindinę dalį elektros energijos pramoninėse aušinimo sistemose suvartoja siurbLIAI ir ventiliatoriai. Todėl šiuo laikotarpiu didelis dėmesys skiriamas dažnio keitiklių ir optimizuoto valdymo algoritmų taikymui, leidžiančiam reguliuoti srautą pagal realų poreikį, o ne pagal nominalias sąlygas. Atvejo analizė, atlikta vandens paruošimo įmonėje, parodė, kad įdiegus dažnio keitiklį siurblių elektros varikliams, paros elektros energijos sąnaudos sumažėjo apie 38 %, lyginant su droselinio srauto valdymu [31]. Be to, pastebėta, kad energijos sunaudojimo mažėjimas yra proporcingas slėgio stabilizavimui, kuris pasiekiamas sumažinus sistemos hidraulinių smūgių riziką.

Tobulinant valdymo strategijas, literatūroje vis dažniau taikomi matematinio programavimo ir optimizavimo metodai. Tokie kaip mišriųjų sveikųjų netiesinių programų leidžia apjungti hidraulinius, elektromechaninius ir ekonominius parametrus, siekiant rasti optimalų siurblių skaičių bei jų darbo taškus [32]. Tokiu būdu užtikrinamas ne tik minimalus elektros energijos suvartojimas, bet ir mažesnės įrangos apkrovos bei techninės priežiūros sąnaudos. Tyrimai rodo, kad optimizavimo metodų taikymas gali sumažinti bendrus energijos ir bendruosius priežiūros kaštus nuo ~4,5 % iki ~8,7 %, priklausomai nuo sistemos konfigūracijos [32]. Automatinio valdymo algoritmai taip pat prisideda prie sistemos efektyvumo. Pavyzdžiui, vandeniui aušinamų centrinių sistemų valdymo algoritmų apžvalga atskleidė, kad tinkamai parinkus valdymo strategijas pagal apkrovą, oro temperatūrą ir vandens temperatūros parametrus, galima pasiekti nuo 10 % iki 25 % energijos sutaupymą, o kai kuriais atvejais net iki 30 % [30]. Šie rezultatai parodo, jog energijos valdymo optimizavimas turėtų būti taikomas kompleksiskai, derinant technologinius ir automatizacijos sprendimus.

2.2.2. Aušinimo sistemų optimizavimo metodai

Energijos vartojimo efektyvumui pramoninėse sistemose didelę įtaką turi šilumos mainų valdymas ir temperatūrinių režimų optimizavimas. Šiuolaikiniai algoritmai leidžia analizuoti aušinimo bokštų, šilumokaičių ir recirkuliacijos grandinių parametrus, taip užtikrinant, kad sistema veiktų artimiausiame optimalios temperatūros ir srauto taške. Apžvalginiai darbai rodo, kad dinaminis aušinimo bokštų darbo optimizavimas, pagrįstas realaus laiko duomenimis, gali sumažinti energijos sąnaudas 14 – 23 % priklausomai nuo klimato sąlygų ir apkrovos pobūdžio [30]. Be to, dirbtinio intelekto ir mašininio mokymosi modeliai tampa reikšminga pagalbine priemone siekiant automatizuoti aušinimo sistemų valdymą. Tokie modeliai prognozuoja šiluminės apkrovos svyravimus ir optimizuoja srautus bei temperatūrų santykius. Nors atskiri tyrimai rodo didelį potencialą, šie metodai dažniausiai reikalauja didesnio duomenų kiekio ir išankstinio sistemos

kalibravimo. Energijos taupymo efektas dažniausiai siekia 10 – 25 %, o tikslus atsipirkimo laikotarpis priklauso nuo konkrečios pramonės šakos bei įrangos tipo [30, 32]. Tipinės pramoninės aušinimo sistemos struktūra pateikta schemoje (7 pav.), kurioje vaizduojamas aušinimo bokšto, siurblių ir šilumokaičių darbo principas.



7 pav. Tipinės pramoninės aušinimo sistemos schema [32]

Svarbu pažymėti, kad optimizavimo metodai taikomi ne tik elektros energijos, bet ir šilumos bei vandens srautų balansavimui. Tinkamai subalansuoti šie srautai leidžia išlaikyti stabilų sistemos hidraulinį režimą, mažinant energijos nuostolius dėl perteklinės cirkuliacijos ar netolygaus apkrovų pasiskirstymo. Integruojant automatinius srauto reguliatorius ir duomenų stebėseną, galima užtikrinti pastovesnę slėgio bei temperatūros pasiskirstymą sistemoje, išvengiant šilumos mainų efektyvumo svyravimų. Tokie sprendimai padeda ne tik sumažinti siurblių energijos sąnaudas, bet ir užtikrinti tolygesnį šilumos perdavimą tarp aušinimo kontūrų bei šilumokaičių. Tai ypač aktualu kompleksinėse sistemose, kuriose vienu metu veikia keli aušinimo kontūrai ar kelių pakopų šilumokaičiai, pavyzdžiui, pramoniniuose aušinimo tinkluose ar centriniuose šaldymo įrenginiuose. Tokiose sistemose srautų balansavimas leidžia išvengti hidraulinių disbalansų, užtikrina efektyvų šilumos mainų darbą bei sumažina techninės priežiūros poreikį [30].

2.2.3. Hibridinių ir alternatyvių aušinimo technologijų analizė

Pastaraisiais metais pramonėje vis dažniau taikomi hibridiniai aušinimo sprendimai, sujungiantys drėgną ir sausą aušinimą tam, kad būtų pasiektas optimalus energijos ir vandens sąnaudų santykis. Tokie sprendimai leidžia eksploatuoti įrangą įvairiomis klimato sąlygomis ir taip sumažinti priklausomybę nuo vieno aušinimo principo. Hibridinės sistemos pasižymi tuo, kad jas galima lanksčiai pritaikyti prie sezoniškai kintančių temperatūros bei drėgmės parametrų, užtikrinant aukštą šilumos šalinimo efektyvumą net esant ribotam vandens kiekiui. Mokslininkų atlikti tyrimai rodo, kad šiluminėse elektrinėse, naudojant natūralios traukos hibridinio aušinimo sprendinius, galima pasiekti iki 90 % drėgno aušinimo šilumos šalinimo efektyvumo, sunaudojant vos apie 30 % vandens, kuris būtų reikalingas tradiciniam drėgnam aušinimui [34]. Tokiu būdu pasiekiamas reikšmingas vandens išteklių taupymas, kartu išlaikant aukštą energijos konversijos efektyvumą ir stabilų šiluminį balansą net karštuoju metų laiku. Tame pačiame tyrime pabrėžiama, kad hibridinės sistemos su lygiagrečiu arba serijiniu šilumos mainų išdėstymu leidžia suderinti oro srautų dinamiką ir sumažinti aušinimo bokštų našumo svyravimus, todėl jos ypač tinkamos naudoti sausringuose regionuose, kur vandens ištekliai yra riboti.

Hibridinių sistemų privalumas yra ir jų lankstumas, nes oro srauto bei šilumos mainų kontrolė gali būti visiškai automatizuota, o tai leidžia sistemai prisitaikyti prie realių eksploatacijos sąlygų. Tokiu būdu užtikrinamas sklandus perėjimas tarp sausojo ir drėgnojo režimo, mažinant šiluminio streso bei įrenginių nusidėvėjimo riziką. Tyrime atlikta apžvalga parodė, kad optimaliam šių sistemų veikimui būtina taikyti išsamią valdymo strategiją ir tikslų komponentų dydžių parinkimą, nes netinkamas šilumokaičių santykis gali sumažinti bendrą šilumos šalinimo efektyvumą [33]. Tokios technologijos ypač aktualios regionuose, kuriuose oro temperatūra per metus kinta dideliais diapazonais, o drėgmės lygis sezonais stipriai svyruoja.

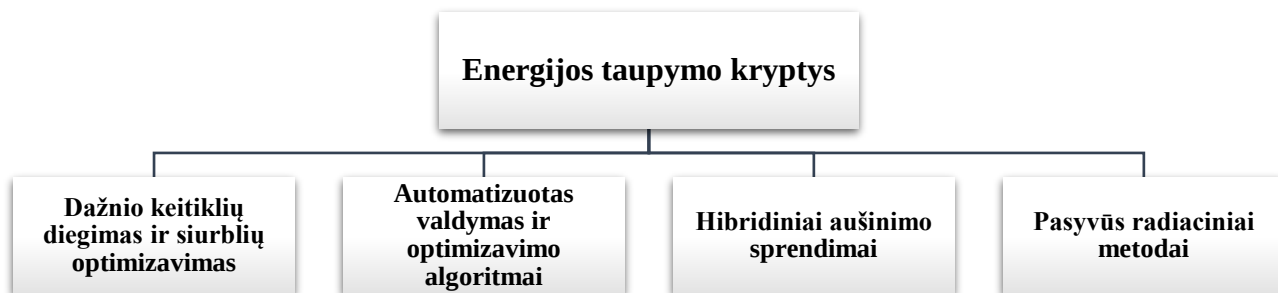
Papildomai nagrinėjami ir pasyvūs radiacinio aušinimo metodai, kurie gali būti taikomi kaip pagalbinės priemonės žiemos sezonu. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad šaltuoju metų laiku šios sistemos pasiekia 20 – 80 W/m² šilumos srautą, o energijos perdavimo efektyvumas gali siekti iki 8 W/W [35]. Eksperimentiniame šilumos srauto ir energijos suvartojimo tyrime buvo nustatyta, kad tokio tipo įrenginiai gali būti integruojami su tradicinėmis šaldymo sistemomis, sumažinant jų apkrovą ir elektros energijos poreikį. Nors radiacinio aušinimo taikymas pramoniniu mastu dar ribotas, šie metodai suteikia galimybę mažinti energijos suvartojimą naudojant natūralius šilumos mainus su aplinka ir gali tapti svarbia tvaraus aušinimo sistemos dalimi ateityje [35].

2.2.4. Metodų palyginimas ir taikymo galimybės nagrinėjamoje sistemoje

Apibendrinus nagrinėtų tyrimų rezultatus, galima išskirti kelias pagrindines energijos taupymo kryptis pramoninėse aušinimo sistemose:

- siurblių darbo optimizavimas ir dažnio keitiklių diegimas – tai leidžia sumažinti elektros energijos sąnaudas iki 25 – 30 %, išvengiant nereikalingo darbo pilnu pajėgumu ir pailginant įrangos tarnavimo laiką;
- automatizuotas valdymas ir optimizavimo algoritmai – tai suteikia galimybę palaikyti pastovų sistemos slėgį bei našumą, sumažinti žmogaus klaidų riziką ir pagerinti sistemos reakciją į apkrovos pokyčius;
- hibridiniai aušinimo sprendimai – užtikrina efektyvų šilumos šalinimą skirtingomis klimato sąlygomis, mažina vandens suvartojimą ir išplečia sistemos veikimo diapazoną;

- pasyvūs radiaciniai metodai – jie gali būti taikomi kaip papildoma priemonė žiemos režimuose, leidžianti išnaudoti natūralią spinduliuotės šilumą ir sumažinti elektros energijos poreikį.



8 pav. Pagrindinės energijos taupymo kryptys pramoninėse aušinimo sistemose

Siekiant aiškiau palyginti nagrinėtas energijos taupymo technologijas, 8 lentelėje pateikti pagrindiniai pramoninėse aušinimo sistemose taikomų metodų efektyvumo rodikliai ir jų taikymo privalumai.

8 lentelė. Pramoninių aušinimo technologijų energinio efektyvumo rodikliai [31 – 34]

Aušinimo technologija	Energijos taupymas, %	Pagrindiniai privalumai
Siurblių sistemos su dažnio keitikliais	30–35 %	Energijos sąnaudų mažinimas, lankstus valdymas
Optimizuotas siurblių tinklas	4,5–8,7 %	Efektyvus paskirstymas pagal apkrovą
Hibridinės aušinimo sistemos	20–40 %	Didelis naudingumo koeficientas, galimybė naudoti atsinaujinančius šaltinius
Hibridinis aušinimo bokštas	–	30–50 % mažesnis vandens sunaudojimas

Kaip matyti iš 8 lentelės duomenų, didžiausią energijos taupymo efektyvumą užtikrina kompleksiniai sprendimai, derinant dažnio keitiklius su automatizuotu valdymu ir srautų optimizavimu, o hibridinės sistemos leidžia papildomai sumažinti vandens sąnaudas. Remiantis šiais rezultatais, nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos atveju tikslingiausia taikyti dažnio keitiklius kartu su automatizuotu srauto ir slėgio valdymu. Sistema veikia kelių siurblių grupėmis, kurių apkrovos kinta priklausomai nuo gamybos intensyvumo, todėl dinaminis valdymas pagal realius proceso parametrus leistų išlaikyti reikiamą hidraulinį balansą be perteklinio energijos suvartojimo. Tokie sprendimai sudarytų sąlygas palaikyti pastovų našumą ir užtikrintų darbo režimų lankstumą priklausomai nuo eksploatacinių sąlygų.

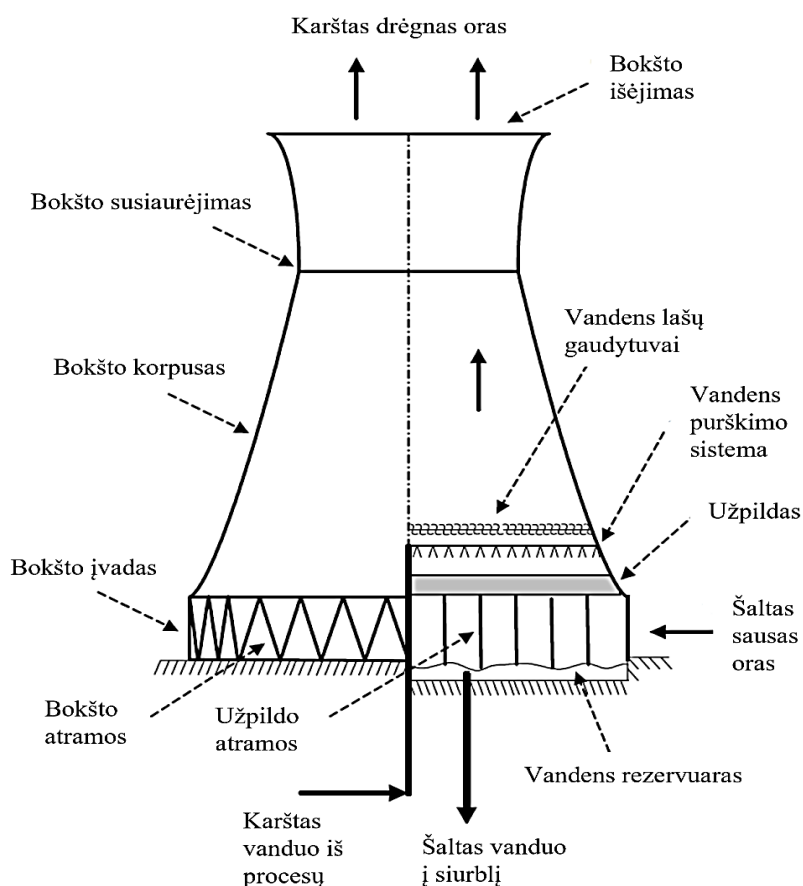
Apibendrinant galima teigti, kad pramoninių aušinimo sistemų energijos taupymo priemonės remiasi trimis pagrindiniais principais: efektyvesniu siurblių valdymu, sistemos darbo optimizavimu bei technologine modernizacija ir skaitmeniniu valdymu. Tyrimų rezultatai patvirtina, kad derinant dažnio keitiklius, automatizuotus algoritmus ir, tam tikrais atvejais, hibridinius sprendimus, galima pasiekti reikšmingą energijos vartojimo mažėjimą išlaikant reikiamą našumą ir patikimumą. Šios kryptys sudaro teorinį pagrindą tolimesnei analizės daliai, kurioje bus tiriamos konkrečios technologinės priemonės ir jų pritaikymo galimybės nagrinėjamoje aušinimo sistemoje.

2.3. Modeliavimo metodų apžvalga

Tikslaus aušinimo procesų darbo modeliavimas yra būtina prielaida siekiant įvertinti energijos vartojimo ir šilumos perdavimo efektyvumą. Šiuolaikiniai matematiniai bei skaitiniai modeliai leidžia

ne tik numatyti sistemos terminius srautus, bet ir optimizuoti jos eksploatacinius parametrus, sumažinant bandymų poreikį realiomis sąlygomis. Nagrinėjant aušinimo sistemas, dažniausiai taikomi integruoti srautų ir šilumos mainų modeliai, paremti skaičiuotina skysčių dinamikos (angl. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) ir energijos balanso metodais [36]. Šie metodai suteikia galimybę analizuoti procesų eigą tiek atskiruose įrenginiuose (pvz., aušinimo bokštuose), tiek sudėtingose uždaroje grandinėse, kuriose sąveikauja keli šilumos mainų elementai.

Pagal naujus tyrimus, integruota analizės metodika leidžia sujungti empirinius duomenis, šilumos mainų teoriją ir eksperimentinius matavimus, kad būtų galima išsamiai aprašyti tiek pastovius, tiek laikinus (dinaminius) procesus [36]. Tokia analizė buvo atlikta siekiant patvirtinti aušinimo sistemos matematinį modelį, apimantį srauto, temperatūros ir energijos perdavimo dėsnius. Eksperimentų metu gauti rezultatai buvo lyginami su modeliu, o nuokrypis tarp prognozuotų ir faktinių temperatūros bei šiluminės galios reikšmių siekė mažiau nei 3 %, kas rodo aukštą skaitinio modelio patikimumą. Integruotos analizės metodas apjungia tiek šiluminės energijos balansą, tiek masės tvermės lygtis, todėl leidžia tiksliai prognozuoti sistemos elgseną keičiantis apkrovai, oro temperatūrai ar srauto greičiui. Šis principas ypač svarbus pramoninėms aušinimo sistemoms, kuriose srauto režimai yra kintantys, o šilumos apkrova – nepastovi. Modelio tikslumas buvo patvirtintas eksperimentiniais bandymais, parodžiusiais, kad temperatūros skirtumas tarp modelio ir matavimų neviršijo prietaiso matavimo tikslumo ($\pm 0,5$ K) nuo teorinių skaičiavimų [36].



9 pav. Atviro tipo (natūralios traukos) aušinimo bokšto veikimo principinė schema [37]

Drėgno tipo aušinimo bokštai yra vieni efektyviausių šilumos šalinimo įrenginių, tačiau jų veikimą sunku tiksliai įvertinti be išsamaus srautų modelio. Skaitinio modeliavimo metodai leidžia analizuoti

oro ir vandens sąveiką, lašo sklaidos laukus, šilumos bei masės mainus tarp fazių. Naujausi tyrimai rodo, kad tinkamai sukalibruotas CFD modelis gali prognozuoti bokšto efektyvumą su $\pm 5\%$ paklaidą, lyginant su eksperimentiniais duomenimis [37]. Aušinimo bokšto veikimo principas paremtas šilumos mainais tarp karšto proceso vandens ir aplinkos oro, kai dalis vandens išgaruoja ir atvėsina likusį srautą. Kaip matyti iš schemos (9 pav.), į bokšto viršų kylantis karštas ir drėgnas oras išsklaido šilumą į aplinką, o atvėsintas vanduo, susikaupęs rezervuare, vėl panaudojamas sistemoje. Šilumos mainų efektyvumas priklauso nuo oro srauto greičio, drėgmės, lašelių skersmens ir užpildo struktūros, todėl šie parametrai yra pagrindiniai CFD analizėse naudojami kintamieji. Analizės metu nustatyta, kad šilumos mainų intensyvumą lemia trys pagrindiniai parametrai: oro srauto greitis, vandens lašelių skersmuo ir užpildo struktūra. Didesnis oro srauto greitis didina šilumos atidavimą, bet kartu sukelia didesnius energijos nuostolius dėl ventiliatorių apkrovos padidėjimo. Optimizavus oro srauto greitį ir vandens paskirstymą, galima pasiekti iki 12 – 18 % šilumos mainų efektyvumo padidėjimą [37]. CFD analizės rezultatai taip pat rodo, kad nevienodas vandens pasiskirstymas bokšto skerspjūvyje gali sumažinti bendrą efektyvumą iki 10 %, todėl būtina taikyti homogeninio lašų paskirstymo technologijas. Modeliuojant buvo įvertinta ir vandens išgarinimo įtaka, kuri gali sudaryti kelis procentus bendro masės srauto, ypač esant aukštai aplinkos temperatūrai. Tokios analizės leidžia pagrįsti rekomendacijas, kokie parametrai turėtų būti keičiami priklausomai nuo klimato sąlygų, siekiant minimizuoti energijos sąnaudas.

Naujausiuose tyrimuose buvo pasiūlyta uždaro ciklo fotovoltinių (saulės) modulių aušinimo sistema, kurioje vandens srautas cirkuliuoja 24 valandas per parą ir atlieka dvigubą funkciją: diena vėsina fotovoltinius modulius, o naktį išsklaido sukauptą šilumą [38]. Modelis, parengtas programinės įrangos *COMSOL Multiphysics* aplinkoje, buvo patikrintas eksperimentiniais duomenimis, o vidutinė paklaida tarp modeliavimo ir matavimų siekė tik 1,5 – 6 %. Rezultatai parodė, kad sistema su 150 litrų talpos vandens rezervuaru sumažino fotovoltinių modulių darbinę temperatūrą iki 10 °C, lyginant su įprastomis sistemomis, ir taip pailgino jų tarnavimo laiką apie 30 – 33 %. Be to, didesnis masės srautas (nuo 0,02 iki 0,04 kg/s) pagerino elektros generavimo efektyvumą iki 1,7 %, nors itin didelis srautas didino turbulenciją ir šilumos nuostolius [38]. Svarbu pažymėti, jog sistemos efektyvumas priklauso nuo trijų parametrų derinio – vandens rezervuaro talpos, vamzdžių kiekio bei srauto greičio. Optimalus variantas buvo pasiektas naudojant 150 litrų talpos baką, aštuonis varinius vamzdelius ir 0,03 kg/s srautą, kas leido išlaikyti stabilų šiluminį balansą ir minimalius energijos nuostolius. Tokie modeliai ypač vertingi pramonėje, kur galima integruoti fotovoltinius aušinimo ciklus į bendrą vandens tiekimo ar technologinę grandinę.

Apibendrinant galima teigti, jog integruoto modelio ir CFD analizės derinimas leidžia tiksliai įvertinti šilumos mainų intensyvumą bei optimizuoti pramoninių aušinimo sistemų darbą. Empirinių ir skaitinių metodų validacija eksperimentiniais duomenimis užtikrina aukštą modeliavimo patikimumą – paklaida dažniausiai neviršija 5 % [36 – 38]. Lyginant skirtingas metodikas, galima išskirti šias efektyvumo didinimo kryptis:

1. Integruotas sisteminis modeliavimas leidžia nustatyti pagrindinius šilumos nuostolių taškus ir identifikuoti efektyviausias kontrolės strategijas;
2. CFD analizė leidžia įvertinti oro ir vandens sąveikos procesus bei nustatyti optimalius geometrijos parametrus;
3. Uždaro ciklo fotovoltinis aušinimas yra pažangi kryptis, leidžianti sujungti energijos gamybą ir šilumos balansavimą bei taikyti tokias sistemas pramoninėse aušinimo grandinėse.



10 pav. Efektyvumo didinimo kryptys pramoninėse aušinimo sistemose

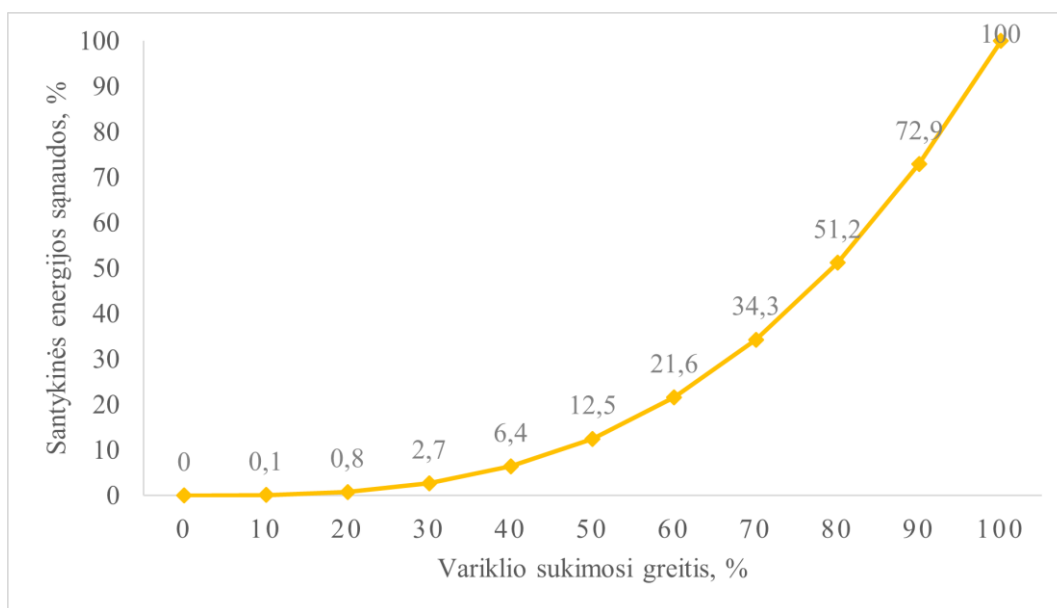
Kaip matyti iš 10 paveikslas, šios kryptys tarpusavyje glaudžiai susijusios – integruotas modeliavimo metodas leidžia nustatyti valdymo strategijas, CFD analizė užtikrina šilumos mainų procesų tikslumą, o fotovoltinių aušinimo ciklų taikymas padeda mažinti energijos sąnaudas. Nagrinėjamos aušinimo sistemos atveju integruotas modelis, papildytas CFD analizės elementais, leidžia detalai įvertinti siurblių darbo efektyvumą visoje sistemoje, o gauti rezultatai tiesiogiai panaudojami trečiame skyriuje atliekant sisteminį energijos vartojimo tyrimą ir modernizacijos scenarijų modeliavimą. Šių metodų suderinimas suteikia galimybę projektuoti energetiškai efektyvesnes ir tvaresnes aušinimo sistemas, kurios mažina tiek elektros energijos sąnaudas, tiek aplinkos poveikį.

2.4. Pažangūs valdymo metodai energijos vartojimo mažinimui aušinimo sistemose

Energijos vartojimo efektyvumo didinimas pramoninėse aušinimo sistemose glaudžiai siejasi su automatizuotų valdymo technologijų plėtra. Tradiciniai, fiksuoto greičio siurbliai ir mechaniniai reguliatoriai (pvz., droseliavimas sklendėmis) nebeatitinka šiuolaikinių energetinių ir eksploatacinių reikalavimų, todėl būtina pereiti prie adaptyvaus, duomenimis grindžiamo valdymo. Modernios priemonės, tokios kaip dažnio keitikliai, kintamo greičio siurblių modeliavimas, dirbtinio intelekto algoritmai bei skaitmeniniai dvyniai, leidžia ne tik sumažinti energijos sąnaudas, bet ir pailginti įrangos tarnavimo laiką. Pažangūs valdymo metodai ypač aktualūs pramoninėse aušinimo grandinėse, kuriose keli siurbliai ir šilumokaičiai veikia kintamomis apkrovomis. Tokiose sistemose energijos poreikis svyruoja priklausomai nuo gamybos intensyvumo, todėl būtinas valdymas, gebantis realiu laiku prisitaikyti prie srautų ir temperatūrinių pokyčių. Tyrimai rodo, kad taikant šiuolaikinius valdymo algoritmus, galima pasiekti iki keliasdešimties procentų energijos sutaupymą, priklausomai nuo sistemos tipo, našumo ir apkrovos dinamikos [39]. Kintamo dažnio pavaros yra viena plačiausiai naudojamų technologijų energijos vartojimo mažinimui pramoninėse siurblių ir ventiliatorių sistemose. Jie leidžia reguliuoti elektros variklio sukimosi greitį pagal faktinį srauto ar slėgio poreikį, todėl sistema dirba tik tiek, kiek reikia esamos apkrovos sąlygomis. Išcentrinė siurblių sistemose, dirbančiose 40 – 80 % sukų srityje, dažnio keitikliai leidžia sumažinti elektros sąnaudas maždaug 10 – 60 %, o investicijų atsipirkimo laikotarpis paprastai siekia nuo 6 iki 24 mėnesių, priklausomai nuo darbo valandų skaičiaus, energijos kainos ir eksploatuojamos įrangos tipo [39]. Energijos sąnaudų priklausomybė nuo siurblio variklio sukimosi greičio pateikta 11 paveiksle, remiantis šaltinyje atliktais tyrimais, pagrįstais siurblių giminingumo dėsniais (angl. *Affinity Laws*) principu [40].

Kaip matyti iš grafiko (11 pav.), energijos sąnaudos mažėja kubu mažėjant variklio greičiui, todėl net 20 % sumažinimas gali lemti iki 50 % energijos taupymo efektą. Ši priklausomybė grindžiama siurblių giminingumo dėsniais, pagal kuriuos srautas proporcingas greičiui, slėgis – greičio kvadratu, o galia – greičio kubui [39]. Be tiesioginio energijos taupymo, šie įrenginiai sumažina mechaninius smūgius bei elektros srovės šuolius ir užtikrina švelnesnį siurblio paleidimą bei stabdymą, todėl

tikėtina ilgesnė komponentų eksploatacija. Dažnio keitiklių naudojimas taip pat teigiamai veikia galios kokybę.



11 pav. Dažnio keitiklio įtaka siurblio energijos sąnaudoms

Aktyvaus įvado dažnio keitikliai padeda sumažinti harmonikų lygį iki $\leq 4\%$ ir pagerina galios koeficientą, o tai ypač aktualu sistemose, kuriose taikomi mokesčiai už reaktyviosios energijos suvartojimą [39]. Šių sprendimų diegimas reikalauja tikslios hidraulinės analizės, nes ne visais atvejais mažesnis siurblio greitis reiškia energijos sutaupymą, ypač jei sistemoje yra keli lygiagrečiai veikiantys įrenginiai. Todėl būtina kontrolė, valdanti siurblių seką ir užtikrinanti hidraulinį balansą visoje sistemoje.

Kintamo greičio siurbLIAI leidžia suderinti slėgio ir debito parametrus su realiu vartojimo poreikiu, todėl jų modeliavimas yra esminė optimizavimo dalis. Naudojant matematinį mišrių sveikųjų skaičių tiesinį programavimo modelį (angl. *Mixed-Integer Linear Programming, MILP*), galima tiksliai parinkti, kada ir kiek siurblių turi veikti tam, kad būtų minimizuotos energijos sąnaudos ir užtikrintas pastovus tiekimas [41]. Atvejų analizė parodė, jog taikant kintamo greičio siurblius ir optimizuojant jų darbo grafiką, eksploatacinės išlaidos sumažėja 3 – 19 %, palyginti su pastovaus greičio siurblių darbo režimu. Šis rezultatas priklauso nuo tinklo struktūros, vamzdynų pasipriešinimo ir galios kreivių aproksimacijų tikslumo [41]. Modeliavimas leidžia dinamiškai koreguoti siurblių darbo taškus pagal apkrovos kitimą, išvengiant bereikalingo įrenginių veikimo. Tokia metodika gali būti tiesiogiai taikoma ir nagrinėjamai pramoninei aušinimo sistemai, kurioje veikia kelių grupių siurbLIAI. Dinamiškas darbo grafikas leistų palaikyti stabilų slėgį mažo, vidutinio ir aukšto režimuose, sumažinant elektros sąnaudas ir apkrovos svyravimus.

Dirbtinio intelekto metodai suteikia galimybę automatizuotai optimizuoti siurblių darbo režimus realiuoju laiku, be iš anksto nustatytų modelių. Giluminio stiprinamojo mokymosi (angl. *Deep Reinforcement Learning, DRL*) algoritmai geba mokytis iš sistemos elgsenos duomenų ir savarankiškai rasti efektyviausius veikimo scenarijus [42]. Tokie valdikliai išsiskiria tuo, kad nereikalauja iš anksto žinomo hidraulinio modelio – jie optimizuoja sprendimus remdamiesi vien matuojamais parametrais. Atlikti eksperimentai parodė, kad DRL agentai gali pasiekti $\geq 0,98$ bazinio metodo efektyvumo lygį, tuo pačiu maždaug du kartus greičiau rasti optimalius veikimo taškus [42].

Tai leidžia realiu laiku priimti sprendimus dėl siurblių greičio keitimo, išvengiant per didelio energijos naudojimo ar slėgio šuolių. Šie algoritmai ypač naudingi sudėtingose aušinimo sistemose, kuriose apkrovos svyruoja dėl sezoniskumo ar kintančio gamybos intensyvumo. Naudojant DRL metodus, sistema tampa savireguliuojanti ir geba prisitaikyti prie netipinių sąlygų, o tai suteikia papildomą stabilumo ir efektyvumo rezervą.

Skaitmeniniai dvyniai yra realių sistemų virtualūs atitikmenys, leidžiantys analizuoti procesų būklę, prognozuoti sutrikimus ir modeliuoti optimalius veikimo režimus. Integruojant juos su neaiškos logikos valdymu, sistema geba priimti sprendimus esant neapibrėžtoms ar dinamiškoms sąlygoms. Aušinimo sistemos, paremtos skaitmeninių dvynių principu, pasižymi aukštu tikslumu. Tyrime nustatyta, kad modelio vidutinė procentinė paklaida neviršijo 5 %, o vidutinė absoliuti temperatūros paklaida siekė mažiau nei 3 °C. Praktinėje jėgainės analizėje, sumažinus trijų ventiliatorių darbą, buvo pasiektas apie 1,44 MWh paros elektros energijos sutaupymas vienam radiatoriiui [43]. Tokia sistema suteikia galimybę ne tik optimizuoti darbo režimus, bet ir prognozuoti įrangos nusidėvėjimą. Duomenys, gauti iš realaus įrenginio, nuolat sinchronizuojami su skaitmeniniu modeliu, o tai leidžia iš anksto planuoti techninę priežiūrą. Skaitmeninių dvynių metodai gali būti taikomi ir pramoninėse aušinimo sistemose, kuriose būtina nuolatinė eksploatacinių parametrų kontrolė.

Remiantis nagrinėtai šaltiniais pažangiausi rezultatai pasiekiami derinant kelias jau aptartas technologijas: dažnio keitiklius, dirbtinio intelekto algoritmus ir skaitmeninius dvynius. Tokia sistema sukuria uždarą valdymo ciklą, kuriame realaus laiko duomenys iš jutiklių (slėgio, temperatūros, debito) perduodami į analizės modulį, o algoritmai nustato optimalų siurblių darbo režimą. Skaitmeninis dvynys tuo pat metu vertina modelio prognozes ir pateikia korekcinius signalus, o kintamo dažnio pavaros įgyvendina šiuos valdymo sprendimus fizinėje sistemoje. Tokiu būdu užtikrinama greita reakcija į apkrovos pokyčius, hidraulinio balanso palaikymas ir maksimalus energijos vartojimo efektyvumas. Be to, sistema geba mokytis iš ankstesnių ciklų duomenų, kas sudaro pagrindą save optimizuojančiai veiksenai. Šių metodų derinimas sudaro prielaidas pramoninėms aušinimo sistemoms pereiti prie proaktyvaus, o ne reaktyvaus valdymo modelio. Siekiant apibendrinti pažangių valdymo metodų taikymo efektyvumą, 9 lentelėje pateikiami jų pagrindiniai principai, energijos taupymo rezultatai ir įgyvendinimo sudėtingumo lygiai. Kaip matyti, tradiciniai dažnio keitikliai užtikrina didelį energijos taupymo potencialą su minimaliu sudėtingumu, o pažangesni metodai, tokie kaip dirbtinio intelekto algoritmai ir skaitmeniniai dvyniai, leidžia dar tiksliau valdyti procesus realiuoju laiku, nors jų įgyvendinimas reikalauja didesnių skaičiavimo išteklių.

9 lentelė. Energijos taupymo metodų palyginimas vandens tiekimo sistemose [39, 41 – 43]

Metodas	Principas	Energijos taupymo rezultatai	Taikymo sudėtingumas
Dažnio keitikliai	Reguliuoja variklio greitį pagal apkrovą	Elektros sąnaudų sumažėjimas 10 – 60 %	Žemas
Matematinis siurblių darbo optimizavimas	Mišraus tipo sveikųjų skaičių programavimas, optimizuojant siurblių darbo grafiką	Eksploatacinių išlaidų sumažėjimas 3 – 19 %	Vidutinis
Dirbtinio intelekto valdymas	Mokymasis iš sistemos elgsenos duomenų realiuoju laiku	Optimizavimo tikslumas apie 98 %	Aukštas
Skaitmeninis dvynys (su neaiškos logikos modeliais)	Modeliuoja realų siurblio darbą ir prognozuoja parametrų pokyčius	Energijos sąnaudų prognozavimo paklaida ≤ 5 %	Aukštas

Analizė parodė, kad pažangūs valdymo metodai gali iš esmės pakeisti pramoninių aušinimo sistemų energetinį efektyvumą. Dažnio keitikliai leidžia iki 10 – 60 % sumažinti elektros sąnaudas, kintamo greičio siurbliai optimizuoja darbo laikus ir mažina išlaidas apie 3 – 19 %, o dirbtinio intelekto algoritmai suteikia realaus laiko prisitaikymo galimybes. Skaitmeniniai dvyniai užtikrina tikslų modeliavimą ir leidžia prognozuoti įrangos būklę, taip užkertant kelią energijos nuostoliams bei neplanuotiems sustojimams [39, 41 – 43]. Šių technologijų integravimas leidžia ne tik padidinti energijos vartojimo efektyvumą, bet ir sustiprinti sistemos patikimumą bei valdymo stabilumą. Sukurta bazė tolesniam modernizavimo planavimui ir empirinio įvertinimo etapui, kuris bus nagrinėjamas trečiajame skyriuje.

2.5. Lyginamoji taikomų metodų analizė pramonėje

Pramoninių aušinimo sistemų modernizavimas yra viena pagrindinių energijos vartojimo mažinimo priemonių gamybos įmonėse. Siekiant efektyviai valdyti energijos balansą, būtina ne tik diegti dažnio keitiklius ar automatizuotus valdiklius, bet ir vertinti jų faktinį poveikį energijos sąnaudoms bei ekonominiams rodikliams. Šiame poskyryje analizuojami keli praktiniai atvejai iš pramonės, apimantys tradicinių ir modernizuotų aušinimo sistemų palyginimą pagal energijos suvartojimą, atsipirkimo laiką ir eksploatacinius rezultatus. Analizuojami šaltiniai atspindi skirtingas pramonės šakas – nuo cukraus gamybos iki chemijos pramonės. Šių atvejų pagrindu atlikta kiekybė bei kokybinė lyginamoji analizė leidžia nustatyti, kokie metodai suteikia didžiausią energinį ir ekonominį efektą.

Tradicinės aušinimo sistemos, veikiančios pastoviu komponentų darbo režimu ir neturinčios galimybės prisitaikyti prie kintančių apkrovų, dažnai pasižymi dideliu elektros energijos suvartojimu. Esant pastoviam įrenginių darbiniam dažniui, energijos sąnaudos išlieka beveik nepakitusios net ir sumažėjus faktiniam aušinimo poreikiui, todėl sistemos veikia neefektyviai ir sunaudoja perteklinę energiją. Tyrime aprašyta, kad karšto ir drėgno klimato regionuose aušinimo sistemų energijos suvartojimas gali sudaryti daugiau nei 60 % visos elektros energijos sąnaudų piko apkrovos laikotarpiu [44]. Analizuojant įvairios paskirties pastatus, gyvenamuosius, pramoninius ir visuomeninius, buvo nustatyta, jog tokia tendencija yra ypač ryški vasaros mėnesiais, kai aušinimo poreikis išauga. Taip pat nustatyta, kad taikant statybinius energijos taupymo sprendimus, tokius kaip dvigubi langai, šviesios spalvos sienos ir stogai bei šilumos izoliacija, galima sumažinti aušinimo apkrovą daugiau nei 40 % [44]. Šie veiksniai tiesiogiai prisideda prie bendro sistemos energinio efektyvumo didinimo ir elektros energijos vartojimo mažinimo. Tokie rezultatai rodo, kad tradicinės aušinimo sistemos, neturinčios automatizuoto valdymo ar prisitaikančio darbo režimo, suvartoja reikšmingą dalį pastato energijos balanso. Todėl aušinimo įrangos modernizacija ir energijos taupymo sprendimų taikymas yra būtini norint sumažinti bendras elektros energijos sąnaudas.

2.5.1. Modernizuotų sistemų efektyvumo rezultatai

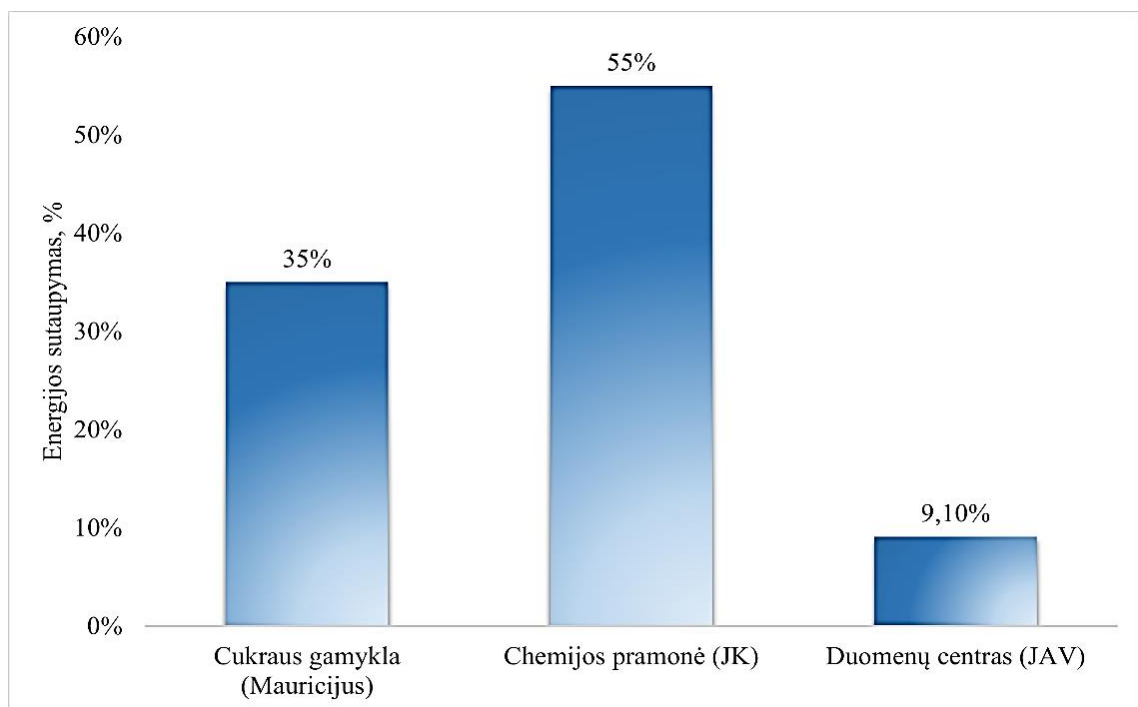
Remiantis literatūros šaltiniais, analizuojami modernizuotų pramoninių aušinimo sistemų taikymo rezultatai ir jų įtaka energijos vartojimo bei ekonominiam efektyvumui:

- *Grundfos iSOLUTIONS (Jungtinė karalystė)*. Chemijos pramonės įmonėje Jungtinėje Karalystėje atlikta aušinimo bokštų siurblinės modernizacija, įdiegus *Grundfos iSOLUTIONS* valdymo sistemą. Buvo pakeistas tradicinis valdymas į išmanųjį, pagrįsta modeliniu nuspėjamoju valdymu (MNV) ir SCADA duomenų ryšiu. Po modernizacijos elektros energijos sąnaudos sumažėjo nuo 78 kW iki 35 kW, t.y. apie 55 %, išlaikant tokį patį aušinimo

našumą [45]. Papildomai buvo užtikrintas pastovesnis slėgio profilis ir tolygesnė temperatūros dinamika. Šis atvejis rodo, kad kompleksinis valdymo sprendimas (dažnio keitikliai, automatinis valdymas ir duomenų analizė) suteikia reikšmingiausią energijos taupymo potencialą.

- *Cukraus pramonės tyrimas (Mauricijus)*. Tyrime, atliktame cukraus gamybos įmonėje, buvo lyginami du valdymo režimai: droselinis ir dažnio keitiklių (DK) reguliuojamas. Pagal pateiktus ekonominius duomenis, droselinio režimu metinės energijos išlaidos siekė 4,5 milijonų rupijų per metus, o dažnio keitikliu valdomų siurblių – 2,91 milijonų rupijų. Tai reiškia, kad kintamo dažnio pavarų valdymo schema leido sumažinti energijos išlaidas apie 35 %, o papildoma įrengimo investicija atsipirko per vienerius metus. Be to, viso gyvavimo ciklo analizė parodė, jog droselinis režimas per 15 metų buvo 146 % brangesnis už dažnio keitiklių sistemą [46]. Šis pavyzdys patvirtina, kad dažnio keitikliai yra patikimas būdas ilgalaikiam energijos sąnaudų mažinimui, o jų diegimas pramoniniu mastu yra ekonomiškai pagrįstas net ir vidutinės galios siurblinėse.
- *Duomenų centro analizės pavyzdys (JAV)*. Jungtinių Amerikos Valstijų duomenų centre atlikta investicinė analizė parodė, jog modernizavus aušinimo sistemą (įdiegus dažnio keitiklius, efektyvesnius oro vėsinimo įrenginius ir optimizavus oro srautų valdymą), energijos suvartojimas sumažėjo apie 9,1 % (apie 300 kW). Dėl šių priemonių metinės energijos sąnaudos sumažėjo maždaug apie 30 tūkst. JAV dolerių, o investicijos atsipirkimo laikotarpis siekė mažiau nei dvejus metus [47]. Šie duomenys patvirtina ekonominį modernizacijos pagrįstumą ir rodo, jog tokie projektai dažniausiai atsiperka per 2 – 3 metus, net ir be papildomų subsidijų ar paramos programų.

Pagrindinių modernizacijos atvejų energijos taupymo rezultatai pavaizduoti 12 paveiksle.



12 pav. Atskirų atvejų pramoninių aušinimo sistemų modernizacijos energijos taupymo palyginimas

Iš grafiko matyti, kad didžiausias energijos sutaupymas pasiektas chemijos pramonėje, kur taikytas kompleksinis siurblių ir valdymo sistemų modernizavimas, o mažiausias – JAV gamybos įmonės

atveju, kur modernizacija buvo orientuota į valdymo algoritmų koregavimą. Apibendrinti duomenys pateikiami lentelėje (10 lentelė), kurioje lyginami pagrindiniai pramoninių sistemų atvejai pagal energijos suvartojimą, modernizacijos tipą ir atsipirkimo laiką.

10 lentelė. Lyginamoji aušinimo sistemų analizė pagal šaltinius [45 – 47]

Sistema / sektorius	Valdymo tipas	Energijos sąnaudos (prieš > po)	Taupymas / efektas	Atsipirkimas
Cukraus gamykla (Mauricijus)	Droselinis > DK	4,5 mln. Rs/metams > 2,91 mln. Rs/metams	~ 35 % mažesnės bendros išlaidos	1 metai
Chemijos pramonė (Jungtinė Karalystė)	DK + MNV + SCADA	78 > 35 kW	55 % mažesnės elektros energijos sąnaudos	< 2 metai
Gamybos įmonė (JAV)	Kompleksinis modernizavimas	9,1 %	300 tūkst. dolerių	< 2 metai

Atlikta lyginamoji šaltinių analizė leidžia daryti šias apibendrintas, faktiškai pagrįstas išvadas:

1. Didžiausią energijos vartojimo mažinimo poveikį suteikia dažnio keitikliai – palyginti su droselinio valdymu, jų taikymas sumažino energijos sąnaudas apie 35 % (pagal faktinius metinių išlaidų duomenis);
2. Modernizuotos sistemos sumažina bendrą galios poreikį daugiau nei perpus – *Grundfos iSOLUTIONS* atveju faktinės galios sąnaudos sumažėjo nuo 78 iki 35 kW (~55 %), o procesas tapo stabilesnis dėl automatinio slėgio reguliavimo;
3. Ekonominis efektas pasiekiamas per trumpą laiką – tiek cukraus gamyklos, tiek JAV gamybos įmonės pavyzdžiai rodo, kad investicijų atsipirkimas svyruoja tarp 1 ir 2 metų;
4. Tradicinės sistemos pasižymi mažu lankstumu – nors pradiniu laikotarpiu jų įrengimo kaštai mažesni, ilgalaikės eksploatacinės išlaidos viršija dažnio keitiklių ar automatizuotų sistemų išlaidas daugiau nei dvigubai;
5. Energijos vartojimo mažinimas glaudžiai susijęs su automatizavimo lygiu – efektyviausios sistemos naudoja derinius – dažnio keitiklis, duomenų surinkimą (SCADA), valdymo algoritmus (MNV) ir priežiūros analizę.

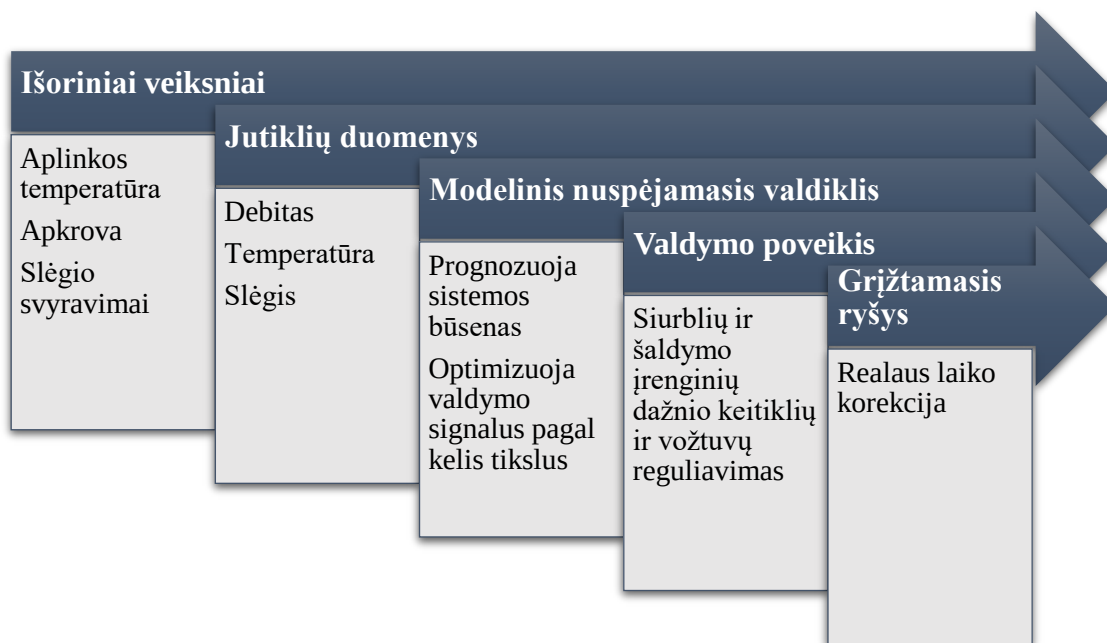
Lyginamoji analizė rodo, kad energijos vartojimo mažinimas pramoninėse aušinimo sistemose priklauso nuo taikomų valdymo technologijų derinio. Dažnio keitiklių diegimas leidžia vidutiniškai sumažinti energijos sąnaudas apie 35 %, o kompleksinės sistemos daugiau nei per pusę. Ekonominė analizė rodo, kad modernizacijos investicijos atsiperka greičiau nei per dvejus metus, o eksploatacinės išlaidos ilgalaikėje perspektyvoje sumažėja daugiau nei dvigubai. Šie rezultatai pagrindžia, kad nagrinėjamos modernizacijos priemonės yra tikslingos ir technologiškai pagrįstos pramoninėse aušinimo sistemose.

2.6. Pažangūs valdymo algoritmai ir energijos vartojimo optimizavimas

Energijos vartojimo optimizavimas pramoninėse aušinimo sistemose vis labiau siejamas su pažangiu valdymo algoritmų taikymu. Didėjant energijos kainoms ir griežtėjant Europos Sąjungos tvarumo reikalavimams, įmonės priverstos pereiti nuo statinių valdymo schemų prie intelektualių sprendimų, leidžiančių realiu laiku reaguoti į apkrovos, temperatūros ir slėgio pokyčius. Pagal energijos efektyvumo direktyvą (EU/2023/1791), valstybės narės iki 2030 m. privalo užtikrinti mažiausiai 11,7 % energijos vartojimo sumažinimą [23], ypač diegiant automatizavimo ir skaitmeninių valdymo sistemų priemones pramonėje. Taip pat tarptautinė energetikos agentūra [48] pabrėžia, kad dirbtinio

intelekto ir modelinio valdymo technologijos jau dabar laikomos pagrindine priemone siekiant pramonės dekarbonizacijos, nes leidžia reikšmingai sumažinti elektros energijos sąnaudas, priklausomai nuo proceso tipo ir valdymo struktūros.

Modelinis nuspėjamasis valdymas (MNV) remiasi matematiniu sistemos modeliu, leidžiančiu numatyti būsimas būsenas ir valdymo signalus pagal prognozuojamus išorinius pokyčius. Toliau schematiškai (13 pav.) pavaizduotas modelinio nuspėjamojo valdymo veikimo principas, parodantis duomenų srautą ir sprendimų priėmimo logiką pramoninėje aušinimo sistemoje.



13 pav. Modelinio nuspėjamojo valdymo veikimo principas

Skirtingai nuo klasikinių PID valdiklių, MNV optimizuoja veikimą pagal kelių tikslų funkciją – energijos sąnaudas, slėgio stabilumą ir temperatūros nuokrypį. Nagrinėjame šaltinyje atliktame tyrime [48] MNV algoritmas buvo pritaikytas 4 MW galios liginės centrinės aušinimo sistemai, sudarytai iš kelių šaldymo įrenginių, siurblių ir šilumokaičių. Valdiklis naudojo realaus laiko duomenis ir nuolat optimizavo sistemos veikimą. Rezultatai parodė, kad tokia metodika sumažino sistemos elektros energijos sąnaudas apie 25 %, išlaikant stabilų tiekimo vandens temperatūros režimą. Be energijos taupymo, pastebėtas didesnis sistemos patikimumas ir ilgesnis įrangos tarnavimo laikas, todėl MNV metodas laikomas tinkamu didelio masto aušinimo sistemoms, kur tradiciniai valdikliai dažnai sukelia energijos nuostolius bei svyravimus [49].

Neuroevoliuciniai (angl. *Neuro-evolution*) algoritmai yra nauja kryptis pramoninių energijos valdymo sistemų srityje. Jie jungia neuroninių tinklų gebėjimą mokytis iš duomenų su evoliucinių algoritmų paieškos strategijomis, leidžiančiomis vienu metu optimizuoti kelis tikslus – energijos sąnaudas, hidraulinį balansą ir sistemos patikimumą. Tyrimo autoriai [50] pasiūlė neuroevoliucinę siurblių darbo optimizacijos schemą, paremtą daugiataksle optimizacija panaudojant NSGA-II (angl. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm 2, NSGA-II*). Šis metodas realiu laiku parenka siurblių jungimo seką ir sukimosi greitį pagal slėgio, srauto bei rezervuarų lygio duomenis. Eksperimentiniai rezultatai parodė, jog šis metodas sumažina eksploatacines sąnaudas apie 2,7 % ir padidino tiekimo patikimumą maždaug 8 %, palyginti su šaltinyje minimu tvirtojo optimizavimo metodu [50].

Neuroevoliucijos metodai laikomi žingsniu link savivaldžių aušinimo sistemų, kurios geba automatiškai mokėtis iš eksploatacinių duomenų ir koreguoti veikimą siekdamos minimalių energijos sąnaudų.

Papildomos energijos taupymo galimybės pramoninėse aušinimo sistemose siejamos tiek su temperatūrinių parametrų optimizavimu, tiek su automatizuotų valdymo technologijų diegimu. Tyrimai rodo, kad padidinus cirkuliuojančio vandens temperatūros nustatymą nuo 10 °C iki 14 °C, bendras šaldymo įrenginio energijos suvartojimas gali sumažėti apie 5 %, išlaikant reikiamą patalpų mikroklimatą tropinio klimato sąlygomis [51]. Tokio tipo parametrinė analizė leidžia derinti temperatūros nustatymus su modeliniu nuspėjamoju valdymu ar dirbtinio intelekto algoritmais, kurie automatiškai koreguoja sistemų veikimą pagal apkrovų bei klimato pokyčius. Pagal naujausius energijos vartojimo efektyvumo vertinimus, daugiau nei 60 % naujų pramoninių aušinimo sistemų 2022 – 2023 metais buvo įrengtos su integruotais duomenų rinkimo ir automatizuoto valdymo moduliais [48]. Šios technologijos, skatinamos atnaujintos Europos Sąjungos energijos vartojimo efektyvumo direktyvos, tampa esmine priemone siekiant iki 2030 m. sumažinti vartojimą ir didinti sistemų efektyvumą.

Analizuoti šaltiniai rodo, kad pažangūs valdymo algoritmai suteikia apčiuopiamą naudą energijos vartojimo optimizavimui:

- modelinis nuspėjamasis valdymas leidžia sumažinti energijos sąnaudas iki 25 %, kartu užtikrinant temperatūros stabilumą ir įrangos patikimumą;
- neuroevoliuciniai metodai, pasižymintys gebėjimu mokytis realaus laiko sąlygomis, papildomai mažina eksploatacines išlaidas apie 2 – 3 % ir pagerina sistemos patikimumą iki 8 %;
- parametrinių nustatymų optimizavimas (pvz., šaldymo įrangos temperatūros valdymas) suteikia maždaug 5 % energijos taupymo potencialą be papildomų investicijų į įrangą.
- šių metodų derinimas atitinka Europos Sąjungos energijos efektyvumo politikos kryptis ir laikomas perspektyvia strategija pramoninių aušinimo sistemų modernizacijai.

Siekiant aiškiau parodyti pažangių algoritmų taikymo poveikį, lentelėje pateikiami pagrindiniai energijos vartojimo mažinimo rezultatai ir šių metodų pritaikomumas pramoninėse aušinimo sistemose (11 lentelė).

11 lentelė. Pažangių valdymo metodų energijos taupymo rezultatai

Metodas	Energijos sutaupymas	Patikimumas / nauda	Pritaikomumas pramonėje
Modelinis nuspėjamasis valdymas (MNV)	~ 25 % mažesnės elektros sąnaudos	Stabilus temperatūros režimas, ilgesnis įrangos tarnavimo laikas	Didelės galios aušinimo sistemos (ligoninės, chemijos gamyklos)
Neuroevoliuciniai algoritmai	2,7 % mažesnės sąnaudos, + 8 % tiekimo patikimumo	Savimokos gebėjimas, automatinė adaptacija	Vandens tiekimo ir aušinimo tinklai su kintančiais apkrovos režimais
Temperatūrinių parametrų optimizavimas	~ 5 % energijos sutaupymas be papildomų investicijų	Išlaikomas komforto mikroklimatas	Pastatų ir biurų šaldymo sistemos, ypač tropiniuose klimatuose

Pažymėtina, kad šių metodų taikymas visiškai atitinka Europos Sąjungos energijos efektyvumo direktyvos (EU/2023/1791) nuostatas, pagal kurias iki 2030 m. siekiama 11,7 % energijos vartojimo sumažinimo visoje Europos Sąjungoje. Ši direktyva nustato politinį pagrindą automatizacijos,

skaitmeninių ir dirbtinio intelekto sprendimų diegimui pramonėje, todėl šios technologijos laikomos esminėmis priemonėmis pramoninių sistemų modernizacijai. Apibendrinant galima teigti, kad MNV ir dirbtinio intelekto metodų integracija suteikia ne tik energijos taupymo naudą, bet ir leidžia kurti proaktyviai valdomas, savireguliacines aušinimo sistemas, prisitaikančias prie besikeičiančių procesų sąlygų. Tokie sprendimai tampa esmine technologine baze tolesniam magistrinio darbo empiriniam tyrimui ir modeliavimo etapui. Toliau, trečiajame skyriuje, bus praktiškai įvertintas dažnio keitiklių taikymo poveikis nagrinėjamos pramoninės aušinimo sistemos energijos vartojimo efektyvumui, remiantis sukurtu modeliu ir trimis darbo režimais.

2.7. Skyriaus apibendrinimas

Antrojo skyriaus analizė parodė, kad energijos vartojimo mažinimas pramoninėse aušinimo sistemose priklauso nuo automatizuoto valdymo, kintamo greičio siurblių ir skaitmeninių technologijų integracijos. Aprašyta esama aušinimo sistema išryškino pagrindinę problemą – dideles energijos sąnaudas dėl pastovaus siurblių greičio. Kituose poskyriuose nustatyta, jog dažnio keitikliai, automatizuoti valdikliai ir CFD modeliavimas leidžia ne tik sumažinti sąnaudas, bet ir tiksliai prognozuoti sistemos elgseną, optimizuojant darbo režimus. 2.4 poskyryje įrodyta, kad pažangūs valdymo metodai, tokie kaip dažnio keitikliai ir skaitmeniniai dvyniai, leidžia sumažinti energijos suvartojimą 10 – 60 %, priklausomai nuo sistemos apkrovos. Toliau, faktiniai atvejai įmonėse parodė, jog modernizacija užtikrina 35 – 55 % elektros sąnaudų mažėjimą, o investicijos atsiperka per 1 – 2 metus. Paskutiniame poskyryje aptarti pažangūs algoritmai – modelinis nuspėjamas valdymas ir neuroevoliuciniai metodai suteikiantys papildomą optimizavimo lygį, nes MNV metodas sumažino energijos sąnaudas iki 25 %, o neuroevoliuciniai algoritmai pagerino tiekimo patikimumą 8 %. Apibendrinant galima teigti, kad didžiausias energijos taupymo potencialas pasiekiamas derinant dažnio keitiklius, automatizuotą valdymą ir duomenimis grįstus algoritmus. Šių technologijų taikymas sudaro pagrindą tolesniam tiriamajam etapui, kuriame bus vertinamas modernizacijos poveikis nagrinėjamai aušinimo sistemai.

3. Pramoninės aušinimo sistemos modernizavimo tyrimas

Trečiajame skyriuje bus nagrinėjamos Lietuvos įmonės pramoninės aušinimo sistemos veikimo efektyvumo gerinimo galimybės, taikant kintamo dažnio pavaras ir aukštesnės energinės klasės siurblius. Šio tyrimo tikslas – įvertinti, kaip automatizuotas valdymas ir optimizuotas hidraulinis darbo režimas gali sumažinti elektros energijos sąnaudas neprarandant sistemos našumo. Planuojama analizuoti esamos sistemos veikimo parametrus, sukurti jos modelį ir atlikti simuliacijas *Solidworks Flow Simulation* aplinkoje. Taip pat bus tiriami modernizuotos sistemos variantai, siekiant nustatyti galimus energijos sąnaudų pokyčius po modernizacijos. Šie rezultatai sudarys pagrindą ekonominiam vertinimui.

3.1. Esamos pramoninės aušinimo sistemos darbo parametrų analizė

Šiame poskyryje analizuojama tiriamos pramoninės aušinimo sistemos esama darbo būklė ir energinio efektyvumo rodikliai. Sistema eksploatuojama uždaro tipo kontūre, kuriame cirkuliuojantis vanduo naudojamas įvairių technologinių įrenginių aušinimui. Remiantis ankstesniuose skyriuose pateikta struktūrine apžvalga, ši dalis koncentruojasi į hidraulinius ir energinius parametrus, lemiančius siurblių darbo efektyvumą. Analizuojant realius debitų, slėgio ir siurblių darbo duomenis nustatyta, kad sistema veikia patikimai, tačiau siurblių darbo taškai neatitinka pirminio projekcinio našumo, o jų efektyvumas mažėja dėl ilgamečio nusidėvėjimo. Šie aspektai yra svarbūs tolimesniam tyrimui, nes leidžia teisingai parinkti modeliavimo sąlygas ir įvertinti, kaip sistemos veikimas keistųsi pritaikius naujesnius technologinius sprendimus.

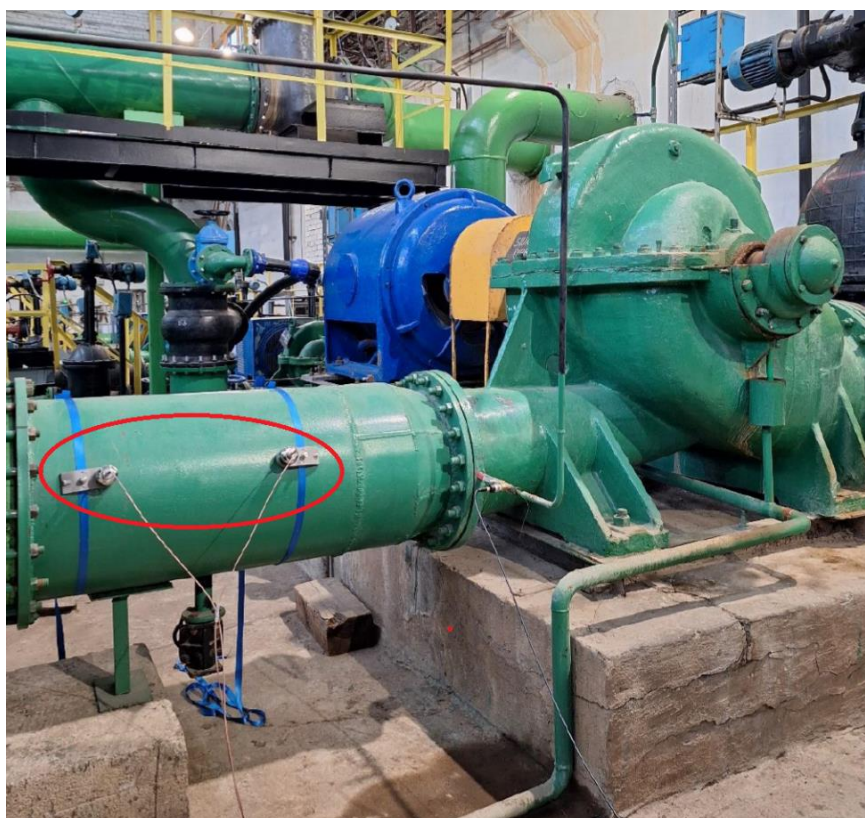
3.1.1. Sistemos eksploatacinė situacija

2024 m. buvo pasitelkti kitos išorinės įmonės techninės priežiūros specialistai atlikti detalią šios aušinimo sistemos eksploatacinę analizę (1 priedas). Analizė truko dvi savaites, o jos metu sistema buvo eksploatuojama esant pilnai apkrovai, t.y. didelio debito darbo režimu. Atlikus matavimus nustatyta, kad nė vienas iš siurblių nepasiekia projektinių darbo taškų, o jų bendras efektyvumas yra apie 70~80 % dėl ilgamečio nusidėvėjimo. Tyrimas buvo atliktas taikant kompleksinę metodiką, apimančią slėgio matavimus, vibracijų diagnostiką, elektros energijos sąnaudų registravimą ir realaus laiko debitų matavimus. Pirmiausia buvo išmatuoti siurblių įsiurbimo ir išleidimo slėgiai (14 pav.), o ultragarsiniu debitomačiu buvo užfiksuotos momentinės vandens debito reikšmės (15 pav.). Šie matavimai atlikti keliose matavimo pozicijose, su tuo metu dirbančiais 4 vnt. ŠVS tipo siurbliais, siekiant gauti reprezentatyvų sistemos veikimo vaizdą. Vibracijų matavimai, atlikti vadovaujantis DIN ISO 10816/20816 bei DIN ISO 13373-3 standartais, leido įvertinti siurblių ir jų variklių dinaminę būklę (14 pav.).

Apibendrinant galima teigti, kad atlikta slėgio, debito ir vibracijų matavimai leido tiksliai įvertinti esamos sistemos didelio debito darbo parametrus. Realaus laiko matavimai parodė, kad siurblių įsiurbimo slėgis svyravo apie 0,3 – 0,42 bar, išleidimo slėgis apie 4,4 – 5,0 bar, o momentiniai debitų matavimai parodė reikšmes nuo ~3400 iki 3600 m³/h atskiruose siurblių pozicijose, todėl pagal šiuos parametrus galima spręsti, kad siurbLIAI dirbo žemesniame nei projektniame efektyvumo taške. Vibracijų matavimai parodė, jog visi guoliai dirba optimaliame režime, tai reiškia, kad techninė priežiūra ir aptarnavimai atliekami tikslingai. Šie duomenys yra būtini pasirenkant modelio ribines sąlygas bei vertinant, kaip sistemos veikimas galėtų keistis taikant dažnio keitiklius ar diegiant modernesnius siurblius.



14 pav. ŠVS-1 siurblio slėgio ir vibracijų matavimas



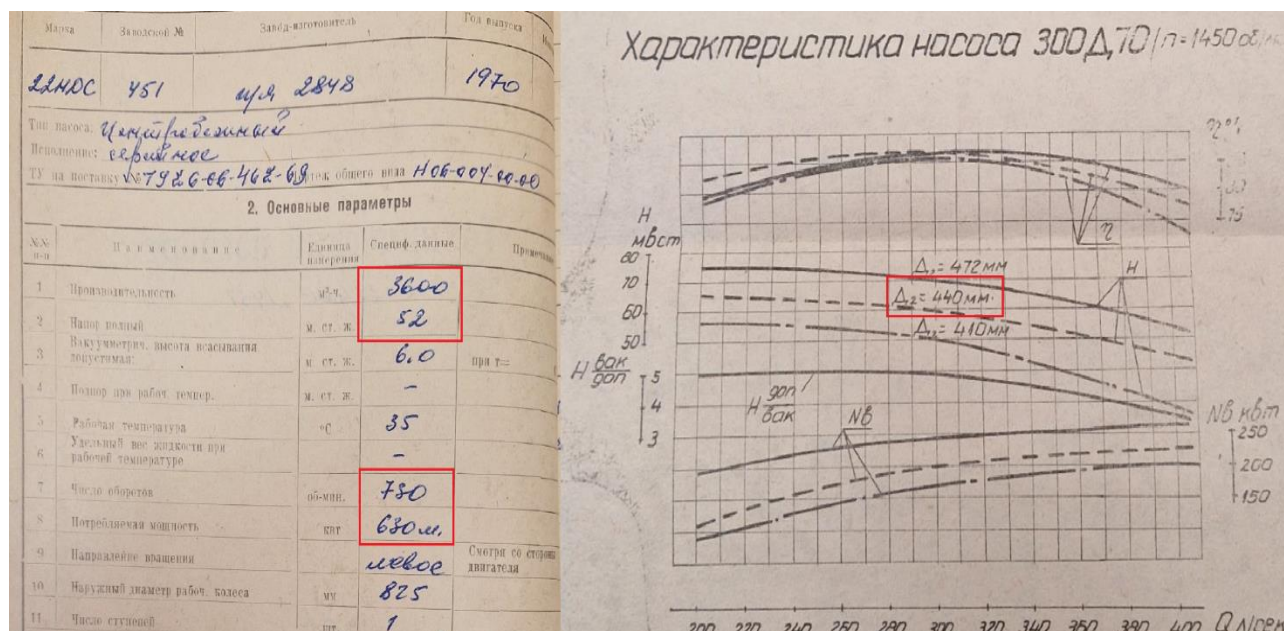
15 pav. ŠVS-1 siurblio debito matavimas

3.1.2. Įrangos techninė būklė ir siurblių darbo taškų įvertinimas

Siekiant įvertinti, kaip realūs siurblių darbo taškai skiriasi nuo projektinių charakteristikų, pirmiausia analizuojami įrangos techniniuose pasuose nurodyti projektiniai parametrai (16 pav.) ir lyginami su išorės specialistų pateikta ataskaitą. Šie duomenys sudaro pagrindą realių matavimų interpretacijai ir leidžia tiksliai įvertinti, kaip eksploatacijos metu kinta siurblių našumo ir slėgio charakteristikos. Sistemoje naudojami dviejų tipų pagrindiniai siurbliai: didesnės galios – šalto vandens siurbliai (ŠVS) ir mažesnės galios – aukšto slėgio siurbliai (ASS), kuris eksploatuojamas lygiagrečiai su didžiaisiais priklausomai nuo gamybos apkrovimų. Remiantis techniniais pasais, šių siurblių projektiniai parametrai pateikti lentelėje (12 lentelė).

12 lentelė. Pagrindinių siurblių projektiniai darbo parametrai

Siurblio pozicija	Nominalus debitas, m ³ /h	Nominalus slėgis, bar	Apsukos, aps./min	Galia, kW
ŠVS	3600	5,2	730	630
ASS	1260	6,4	1450	315

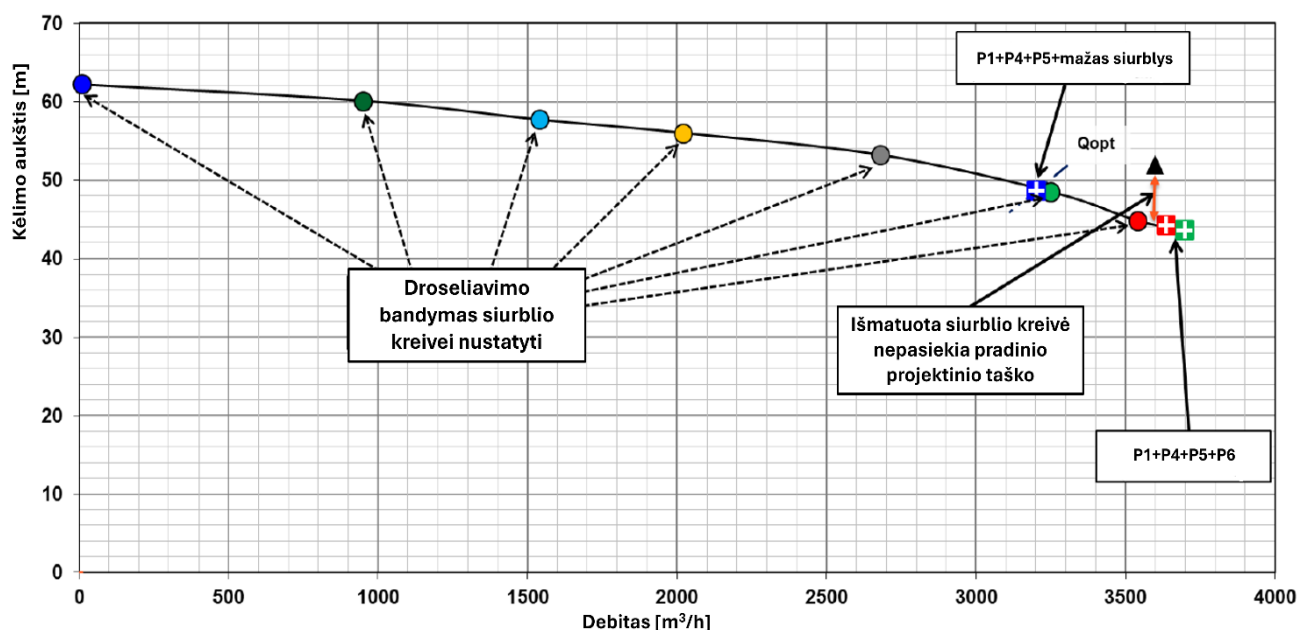


16 pav. ŠVS (kairėje) ir ASS (dešinėje) siurblių techniniai parametrai

Projektiniai duomenys rodo, kad abu siurblių tipai turi aiškiai apibrėžtus darbo taškus ir turėtų veikti efektyvumo maksimume. Išorės specialistų atlikti debito, slėgio ir galios matavimai leido sudaryti faktines siurblių darbo kreives ir jas palyginti (17 pav.). Išanalizuoti rezultatai parodė, kad:

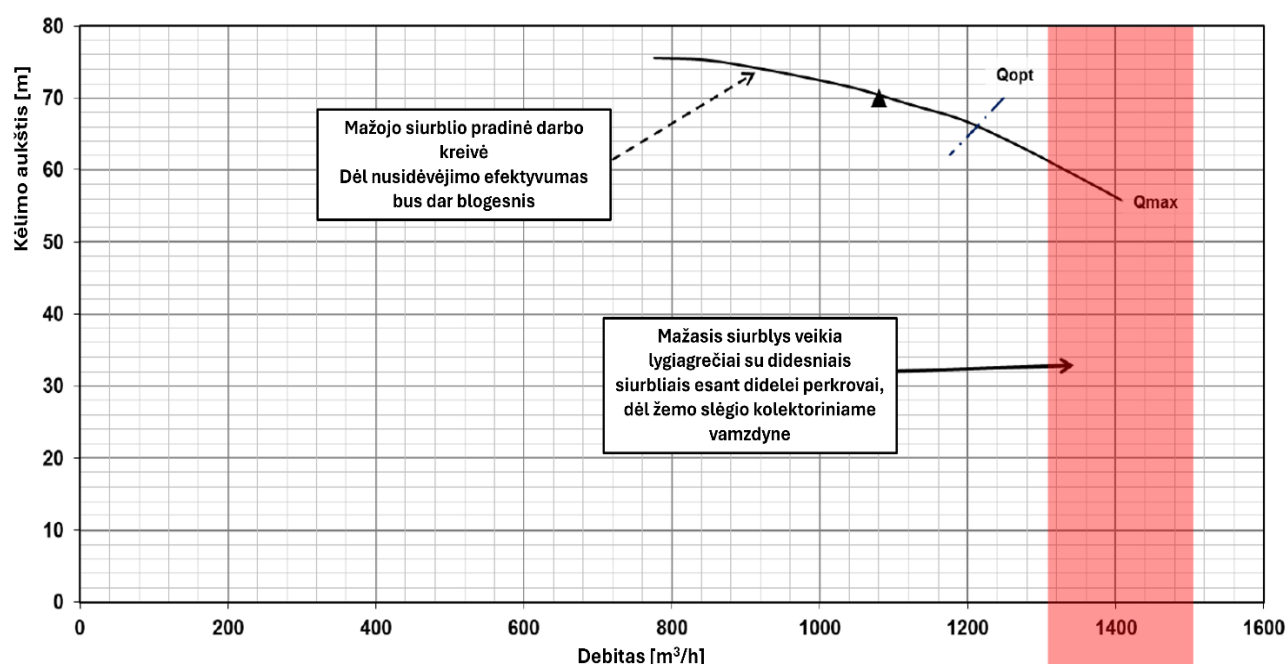
- nė vienas iš siurblių nepasiekia projekcinio našumo;
- visi siurbliai dirba žemiau projektinės darbo kreivės;
- efektyvumas projektinėje srityje neatkuriamas dėl galimo darbo rato nusidėvėjimo ir pasenusio įrenginio (siurbliai eksploatuojami nuo 1970 metų).

Kaip matyti iš ataskaitos grafiko ištraukos (17 pav.), matuoti taškai yra žemiau projektinės kreivės, debitas nepasiekia net 3600 m³/h našumo ir sudaro tik apie 45 metrus (4,5 bar) kėlimo slėgio. Efektyvumas realiomis sąlygomis siekia tik 70 ~ 80 %, nors projektinis efektyvumas turėtų būti didesnis. Detalesnis grafikas su visais siurblio parametrais pateikiamas 2 priede.



17 pav. Didžiojo siurblio (ŠVS-1) išmatuota darbo kreivė su projektiniu darbu tašku (2 priedas)

Techninės analizės ataskaitoje pateikta, kad mažasis siurblys realiomis eksploatacijos sąlygomis dirba ne projektinėje srityje, o yra persikrovęs (18 pav.). Nors šio siurblio konstrukcija pritaikyta didesniai slėgiui, jis eksploatuojamas lygiagrečiai su dideliais siurbliais, todėl yra priverstas atkurti jų slėgio aukštį. Lygiagrečiai sujungtų siurbių atveju visi siurbliai dirba taške, kuriame jų kuriamas slėgis yra vienodas [48]. Didieji siurbliai palaiko didesnę bendros sistemos slėgį, todėl mažasis siurblys yra „išstumiamas“ į daug didesnį debitą turinčią savo darbo kreivės dalį. Sistemoje sumažėjus hidraulinei varžai (pvz. slėgiui kolektoriuje), mažasis siurblys priverstas tiekti didesnį srautą, nei numatyta projektiniuose jo darbo parametruose. Tokiu būdu siurblys dirba dešinėje savo kreivės pusėje arti Q_{max} ribos, t.y. žemo slėgio ir didelio debito zonoje, kuri laikoma perkrovos režimu.



18 pav. Mažojo siurblio (ASS-2) projektinė ir išmatuota darbo kreivė (3 priedas)

Ataskaitoje nurodyta, kad tokiaime režime mažojo siurblio efektyvumas sumažėja iki 70 ~ 75 %, o dėl eksploatacijos metu atsirandančio nusidėvėjimo ši reikšmė gali būti dar mažesnė. Persikrovos režimas didina energijos sąnaudas, apkrovas siurblio hidraulinei daliai ir spartina techninės būklės blogėjimą.

Taip pat, įtakos turi ir vizualinės apžiūros metu nustatytas defektas, kad ASS tipo siurblio darbo ratas yra pastebimai nusidėvėjęs (19 pav.). Fiksuoti erozijos, briaunų nutrupėjimo ir korozijos požymiai, kurie susiformavimo dėl ilgalaikės eksploatacijos ir turbulentinio srauto poveikio. Šie pažeidimai keičia hidraulinės dalies geometriją, didina srauto turbulentiškumą, mažina slėgio aukštį bei debitą, todėl siurblys turi dirbti didesne galia, kad pasiektų reikiamus eksploatacinius parametrus. Tai patvirtina ir techninės analizės išvados, kuriose nurodoma, kad mažojo siurblio efektyvumas dėl nusidėvėjimo gali būti dar mažesnis nei nominaliai matuojami 70 ~ 75 % (3 priedas).



19 pav. Mažojo siurblio darbo rato sparnuotės korozija (raudonai) ir erozija (žaliai)

Nusidėvėjimas ir darbo taško pasislinkimas yra glaudžiai susiję reiškiniai. Dėl pakitusios geometrijos siurblys nebegali veikti projekcinėje efektyvumo srityje, o padidėjusios apkrovos spartina tolimesnį hidraulinių komponentų degradavimą. Tai yra pagrindinis argumentas, kodėl mažasis siurblys turi būti vertinamas kaip prioritetas planuojant sistemos modernizavimą ir alternatyvius darbo režimus. Šie rezultatai svarbūs tolimesniam modeliavimui, nes mažojo siurblio darbo taško pasislinkimas rodo, kad jo realus veikimas neatitinka pirminių projektinių nuostatų ir gali lemti reikšmingą bendrą sistemos energinio efektyvumo sumažėjimą.

Apibendrinant galima teigti, kad projektiniai siurblių darbo taškai nėra pasiekiami realiose eksploatacijos sąlygose, ŠVS tipo siurbliai dirba žemesniame efektyvumo diapazone, o jų matuoti taškai nutolę nuo projektinių kreivių. ASS tipo siurblys darbo metų persikrauna, kas lemia padidintą apkrovą, didesnę elektros suvartojimą ir spartesnį nusidėvėjimą, taip pat šis mažasis siurblys turi aiškius darbo rato nusidėvėjimo požymius, kas paaiškina ataskaitoje pateiktas grafiko kreives. Siurblių būklės analizė patvirtina būtinybę vykdyti skaitmeninį sistemos modeliavimą ir alternatyvios siurblių parinkties vertinimą tolesniuose skyriuose.

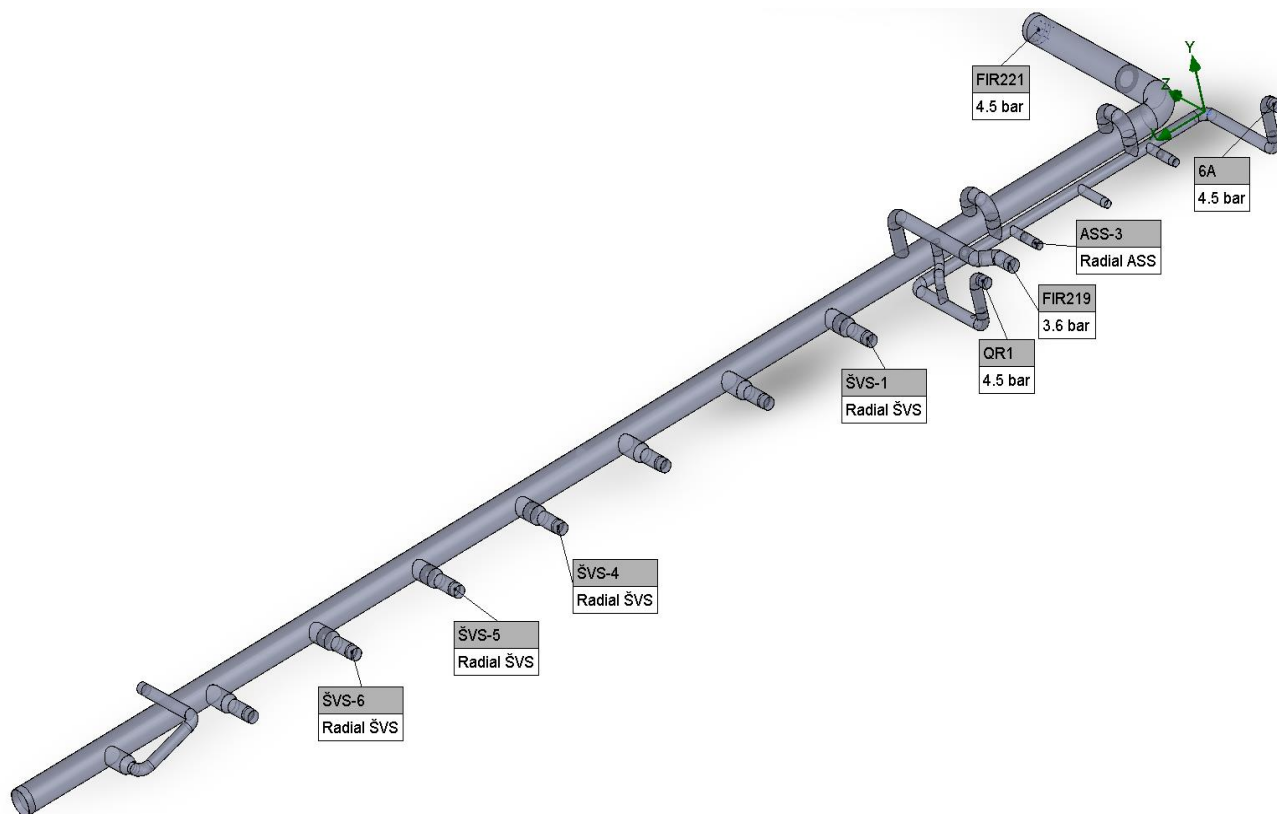
3.2. Sukurtos esamos aušinimo sistemos modelio pristatymas

Atsižvelgiant į ankstesniame poskyryje pateiktą aušinimo sistemos darbo parametrų analizę, šioje dalyje pristatomas skaitmeninis aušinimo sistemos modelis, sudarytas *SolidWorks Flow Simulation* aplinkoje. Modelis sukurtas siekiant tiksliai atkartoti realiai veikiančios sistemos darbą ir įvertinti hidrodinaminį veikimą trimis darbo režimais: mažo, vidutinio ir didelio debito.

3.2.1. Modelio paskirtis ir geometrijos sudarymas

Modelio paskirtis – įvertinti esamos siurblinės sistemos veikimą skirtingose apkrovos situacijose, nustatyti slėgio ir debito pasiskirstymo dėsningumus bei patikrinti, ar skaitmeniniu būdu gauti parametrai ir siurblių darbo taškai sutampa su realiai išmatuotomis reikšmėmis. Toks palyginimas leidžia įvertinti esamos įrangos būklę, identifikuoti hidraulinius nuokrypius ir nustatyti galimas modernizacijos kryptis. Sukurtas modelis taip pat naudojamas kaip pereinamoji grandis prie 3.3 poskyrio, kur bus taikomi alternatyvūs siurblių variantai ir dažnio keitikliai.

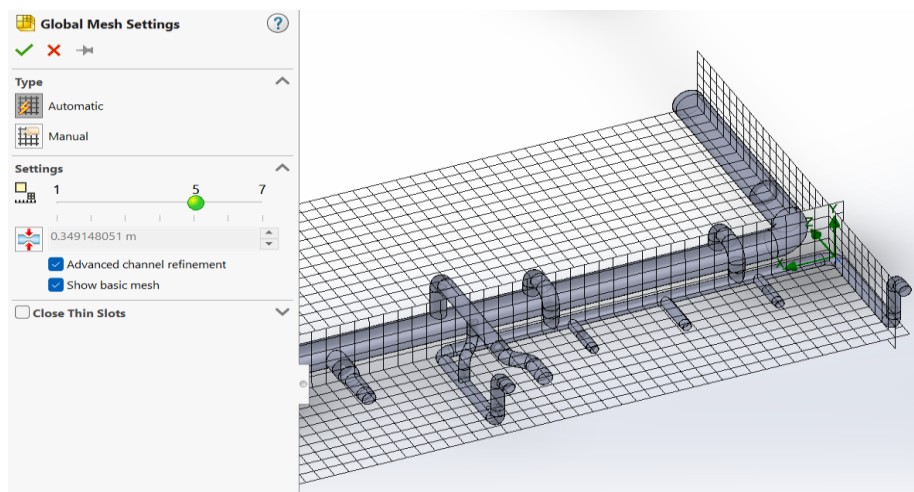
Modelio geometrija sudaryta pagal faktinės siurblinės pastato gabaritinius matmenis, vamzdynų diametrus, atstumus nuo, tarp sienų ir kitų kolektorių, įtraukiant siurblių (ŠVS ir ASS) išmetimo kolektorius, paduodamo vandens atšakas į kitus gamybos skyrius (pozicijos FIR219, FIR221, QR1 ir 6A). Flanšai, jungiamosios detalės, drenažai ir kiti nereikšmingi elementai, neturintys įtakos srauto struktūrai, iš modelio pašalinti siekiant sumažinti tinklo sudėtingumą ir skaičiavimų laiką. Paveikslėliuose matomas sukurto modelio vaizdas (20 pav.) ir realios aušinimo sistemos siurblinės nuotraukos (21 pav.). Skaičiavimams atlikti tinklo tankis parinktas taip, kad būtų pasiektas pakankamas tikslumas. Visuose skaičiavimuose naudotas 5 lygio tinklelis (22 pav.), tinkamas globaliam srauto vaizdui ir tiksliems darbiniais parametrams gauti.



20 pav. Sukurtos aušinimo sistemos modelis



21 pav. Tiriamos sistemos siurblinė



22 pav. Modelyje ir skaičiavimuose naudotas tinklėlis

3.2.2. Modeliavimo rezultatai trijuose darbo režimuose

Sistemos analizei buvo pasirinktos trys datos ir jų duomenys, kuriomis aušinimo sistema buvo apkrauta skirtingais darbo režimais. Skaičiavimams taikytos ribinės sąlygos: debitas, slėgis ir veikiantys siurbliai atitinkamuose režimuose surašyti lentelėje (13 lentelė). Visuose skaičiavimuose naudotos vandens savybės ($<25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pagal technologinį reglamentą), turbulentiškumo modelis ir vamzdinių šiuurkštumo koeficientas paliktas pagal programos numatytuosius parametrus.

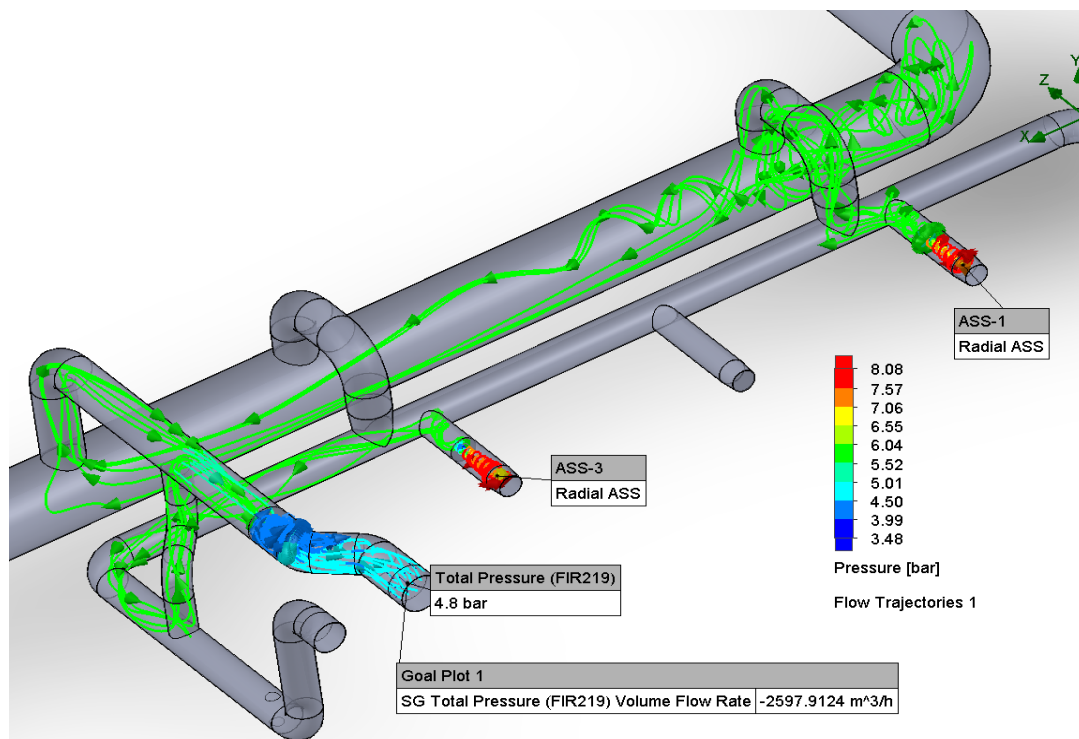
13 lentelė. Modeliavime naudoti realūs duomenys ir siurbliai pagal darbo režimus

Darbo režimas	Duomenų ėmimo data	Duomenų pozicijos	Debitas, m ³ /h	Slėgis, bar	Dirbantys siurbliai
Mažas	2025-08-18	QR1	0	4,8	2 vnt. aukšto slėgio siurbliai (ASS)
		6a	0	4,8	
		FIR219	2350	4,8	
		FIR221	0	5,0	
			Σ 2350		
Vidutinis	2025-08-23	QR1	2200	4,9	3 vnt. šalto vandens siurbliai (ŠVS)
		6a	2300	4,9	
		FIR219	2620	4,9	
		FIR221	930	5,0	
			Σ 8050		
Didelis	2024-06-24	QR1	2180	4,5	4 vnt. ŠVS ir 1 vnt. ASS
		6a	2300	4,5	
		FIR219	2400	3,6	
		FIR221	8270	4,5	
			Σ 15150		

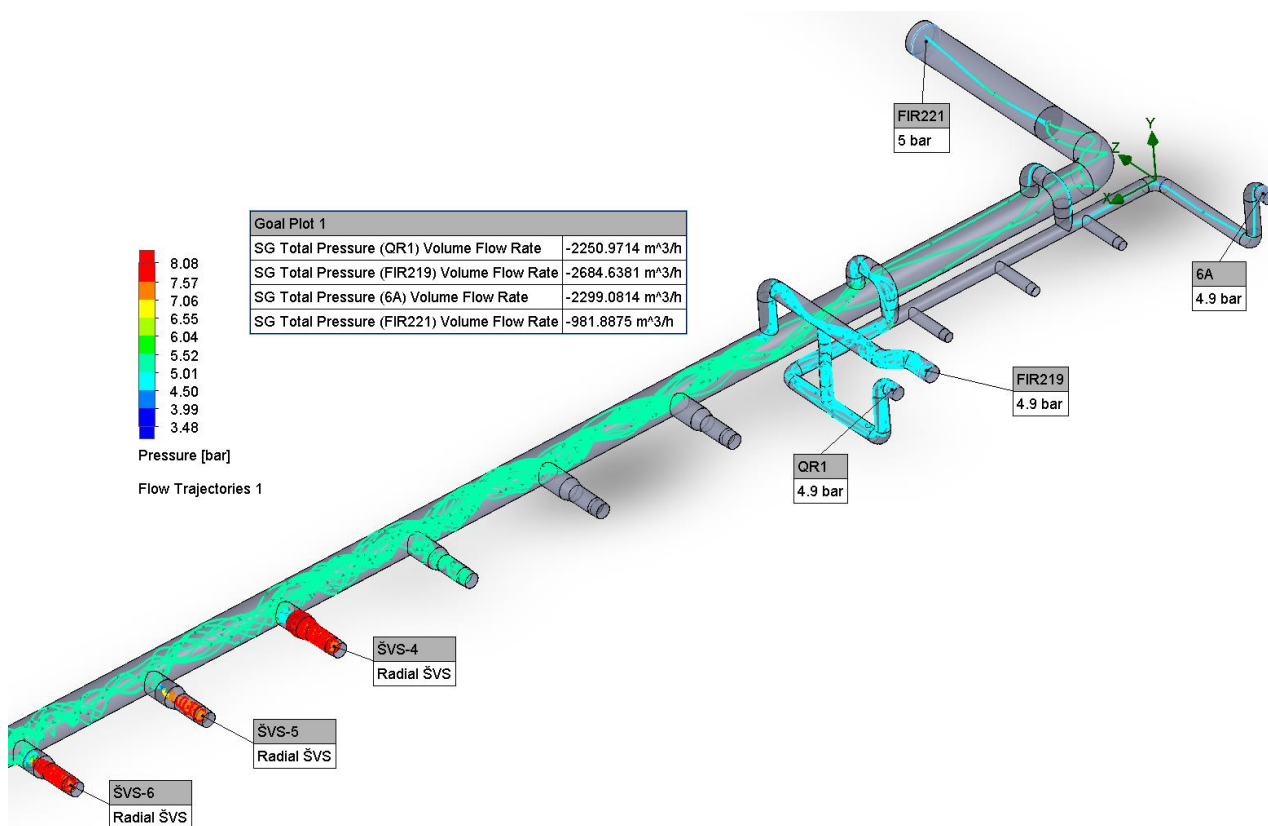
Modeliavimas buvo atliktas trimis apkrovos režimais, siekiant atkurti realias aušinimo sistemos darbo sąlygas ir patikrinti, ar skaičiavimuose gautos reikšmės sutampa su lentelėje pateiktais duomenimis. Visi modeliavimo rezultatai vertinti pagal du pagrindinius parametrus: bendrą sistemos debitą ir slėgio reikšmes atsakose į kitus gamybos padalinius. Šie rodikliai leidžia patikimai atlikti modelio patikrą ir įvertinti, ar sukurta skaitmeninė kopija tinkamai atspindi realios sistemos būklę.

Mažo debito režimas atitinka 2025-08-18 dienos eksploatacinius duomenis, kai vanduo buvo imamas tik per vieną poziciją, FIR219. Bendra srauto reikšmė sudarė apie 2350 m³/h, o slėgis vamzdyno išėjime siekė 4,8 bar. Modeliavimo metu gauti rezultatai (23 pav.) rodo apskaičiuotą apie 2598 m³/h debitą, o slėgio reikšmės išėjime liko nepakitusios, vis dėlto susidarė ~10,5 % debito paklaida. Šis skirtumas gali būti susijęs su tuo, kad šiame režime dirbo du ASS tipo siurbliai, kurių realiomis sąlygomis darbo ratai yra pažeisti erozijos (19 pav.), o modeliavimo metu naudota projektinė siurblio darbo kreivė (16 pav.). Įvertinus šiuos rodiklius galima teigti, kad šio režimo atkūrimas laikytinas pakankamai tikslu.

Vidutinio debito režimas atitinka 2025-08-23 dienos realią situaciją, kai gamyba apsikrovė ir dirbo trys ŠVS tipo siurbliai. Bendra debito suma tuomet siekė apie 8050 m³/h per visas pozicijas, o slėgis buvo stabilus apie 4,9 – 5,0 bar. Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad QR1, 6A, FIR219 ir FIR221 pozicijų debitai praktiškai sutapo su realių matavimų reikšmėmis, o bendras debitas po skaičiavimų sudarė apie 8217 m³/h (24 pav.). Slėgio reikšmės taip pat išliko tapačios. Šiuo atveju paklaida siekė apie 2,1 %, kas rodo, kad vidutinio darbo režimo atkūrimas buvo tikslus. Svarbu pažymėti, kad skaičiavimuose ŠVS tipo siurblių darbo kreivės buvo imtos ne projektinės, o išorinės įmonės specialistų nustatytos realios kreivės bei droseliavimo bandymų rezultatai (17 pav.), todėl buvo galima tiksliai įvertinti sistemos būseną.



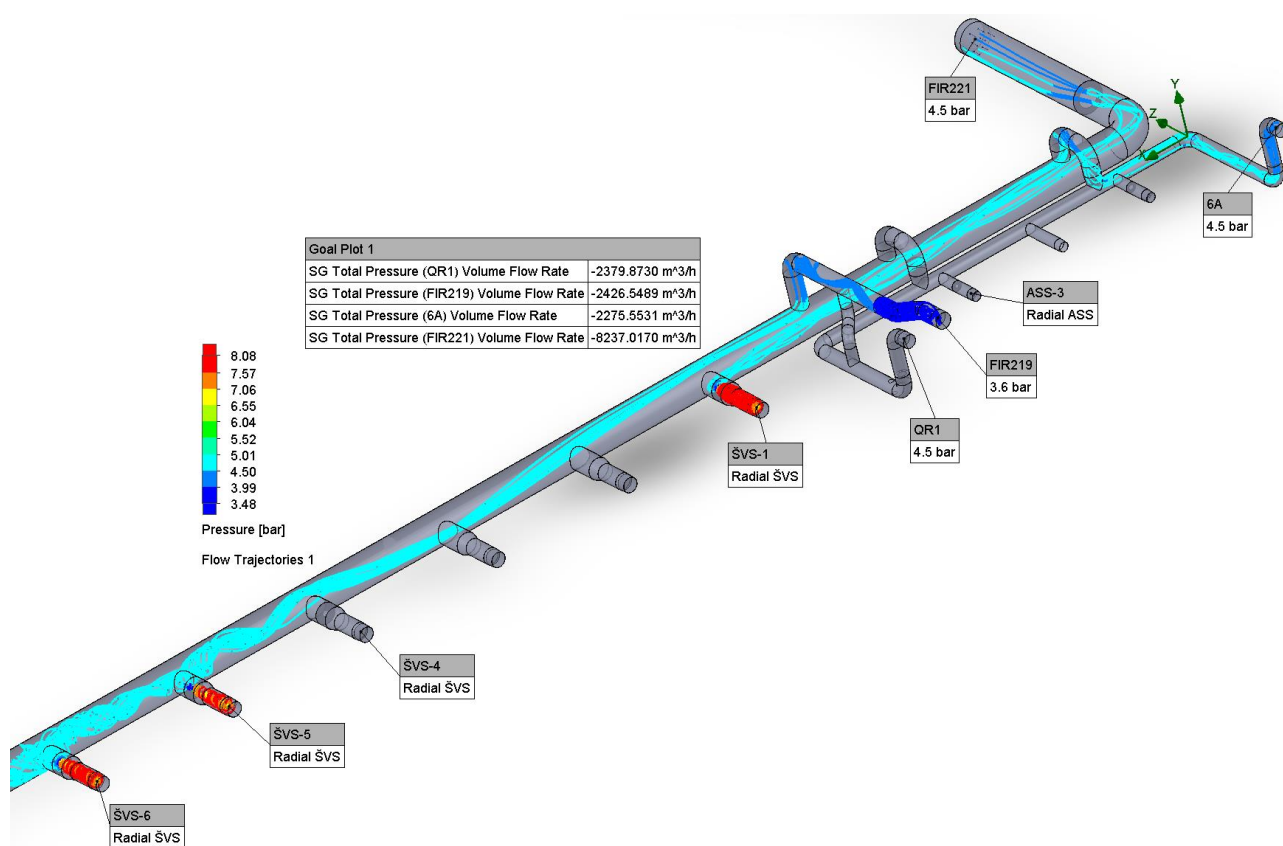
23 pav. Mažo debito režimo skaičiavimai



24 pav. Vidutinio debito režimo skaičiavimai

Didelio debito režimas atitinka 2024-06-24 dienos duomenis, kai sistema veikė maksimaliu apkrovimu su keturiais ŠVS tipo ir vienu ASS tipo siurbliu, o bendras debitas buvo 15150 m³/h. Remiantis lentelės duomenimis (13 lentelė), šiame režime pagrindiniuose matavimo taškuose slėgis

siekė apie 4,5 baro. Modeliavimo metu nustatyta, kad slėgiai ir debitai per visas pozicijas tiksliai sutapo su realiai matuotais duomenimis. Gauta 15320 m³/h debito reikšmė (25 pav.) rodo, jog modeliavimo paklaida sudarė tik apie 1,1 %, kas patvirtina skaičiavimų tikslumą. Pastebėtina, kad FIR219 pozicijoje modeliavimo metu gautas slėgis siekė 3,6 bar, tačiau tai atitinka realią eksploatacinę situaciją, kada ši atkarpa didžia dalimi priklauso nuo konkrečiu momentu veikiančių technologinių įrenginių ir šilumos mainų intensyvumo. Norint aiškiau paaikškinti vizualizaciją, svarbu paminėti, kad didelio debito režimo srovės linijos ŠVS-4 ir QR1 pozicijose nebuvo sugeneruotos (25 pav.) dėl modelio skaičiuojamosios apkrovos ir ribotų kompiuterio resursų. Nepaisant to, bendras modeliavimo išėjimo slėgis ir debitas tiksliai atitinka lentelėje pateiktas režimų reikšmes, todėl modelis vertintinas kaip tiksliai atkūręs realią situaciją.



25 pav. Didelio debito režimo skaičiavimai

14 lentelė. Modeliuotų ir realių eksploatacinių duomenų palyginimas bei paklaidų vertinimas

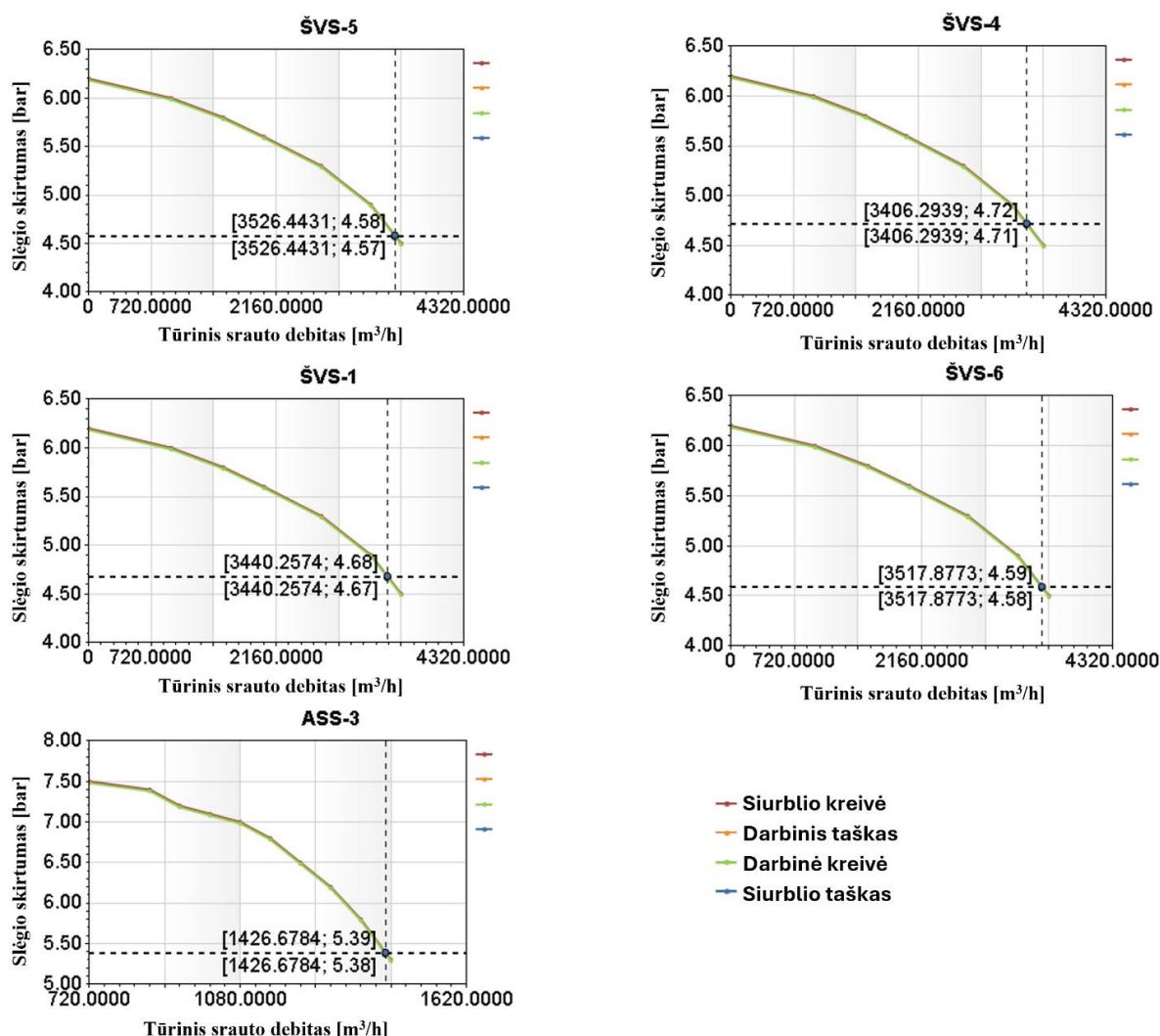
Darbo režimas	Realus bendras debitas, m ³ /h	Modeliuotas debitas, m ³ /h	Debito paklaida, %
Mažas	2350	2598	~ 10,5
Vidutinis	8050	8217	~ 2,1
Didelis	15150	15320	~ 1,1 %

Rezultatus apibendrinant, lentelėje pateikiamas modeliuotų ir realiai išmatuotų debito bei slėgio reikšmių palyginimas, įvertinant paklaidas kiekviename darbo režime. Atliekant trijų darbo režimų analizę nustatyta, kad modeliuoti slėgio ir debito parametrai gerai sutampa su realiais eksploataciniais duomenimis. Vidutinio ir didelio debito režimuose modeliavimo paklaida buvo nedidelė (2,1 % ir 1,1 %), o didesnė paklaida mažo debito režime (~10,5 %) siejama su ASS tipo siurblių nusidėvėjimu ir

projektinės kreivės neatitikimu realiai būklei. Bendras modeliavimo tikslumas leidžia laikyti sukurta modelį tinkamu tolesnei siurblių darbo taškų ir modernizacijos sprendinių analizei.

3.2.3. Siurblių darbo taškų palyginimas su projektinėmis ir realiomis kreivėmis

Siekiant dar tiksliau įvertinti esamos siurblinės hidraulinę būklę, modeliuoti siurblių darbo taškai buvo sugretinti su ŠVS ir ASS tipų siurblių projektinėmis charakteristikomis bei realiais darbo taškais, gautais išmatavus sistemos veikimą. Projektiniai parametrai apibrėžia nominalias debito ir slėgio reikšmes (16 pav.), o modeliavimo ir matuoti duomenys leidžia nustatyti, kaip nuo jų nukrypsta faktinis siurblių darbas. Analizė parodė, kad nei ŠVS, nei ASS tipo siurbliai sistemos eksploatacijos metu nepasiekia projektinių darbo taškų. Tai siejama su darbo ratų erozija, ilgalaikiu įrenginių eksploatacijoje, taip pat su tuo, kad realūs darbo režimai dažnai skiriasi nuo pirminės projektinės sistemos schemas. Pavyzdžiui, didelio debito režime ŠVS tipo siurbliai dirba sumažinto slėgio diapazone, o ASS tipo siurblys, dėl didesnės nominalios slėgio charakteristikos, yra priverstas veikti persikrovos sąlygomis. Šie nukrypimai sutampa su išorinės įmonės specialistų atliktos techninės analizės rezultatais bei matomi ir modeliavimo metu sugeneruotose siurblių darbo kreivėse (26 pav.). Toliau pateiktoje lentelėje pateikiami lyginamieji duomenys (15 lentelė), kuriuose nurodytos projektinės ir modeliavimo metu gautos debito bei slėgio reikšmės visiems trimis darbo režimams. Mažo ir vidutinio debito režimų išsamios siurblių kreivės pateiktos prieduose (4 priedas).



26 pav. Didelio debito režimo dirbančių siurblių darbo kreivės

15 lentelė. Projektinių ir gautų siurblių darbo taškų palyginimas

Darbo režimas	Siurblio tipas	Projektinis debitas, m ³ /h	Modeliuotas debitas, m ³ /h	Projektinis slėgis, bar	Modeliuotas slėgis, bar	Pastabos
Mažas	ASS	1260	1290~1310	6,4	6,1~6,2	Skaičiavimuose naudota projektinė kreivė
Vidutinis	ŠVS	3600	2620~2805	5,2	5,2~5,3	Slėgį palaiko, tačiau debitas sumažėjęs
Didelis	ASS	1260	1426	6,4	5,4	ASS dirba persikrovęs, ŠVS projektinių parametrų neišvysto
	ŠVS	3600	3405~3526	5,2	4,6~4,7	

Modeliuotų siurblių kreivės rodo, kad ŠVS tipo siurblių darbo taškai yra nutolę nuo optimalaus efektyvumo zonos, o ASS tipo siurbLIAI dirba ryškiai už projektinio debito ribų, kas sutampa su 3.1 skyriuje pateiktais techninės analizės rezultatais.

Atlikus modeliavimo ir realių matavimų palyginimą nustatyta, kad *SolidWorks Flow Simulation* pagrindu sudarytas modelis tiksliai atkuria pagrindinius aušinimo sistemos parametrus visuose trijuose darbo režimuose. Slėgio ir debito paklaidos išliko priimtinaame intervale, o didesni neatitikimai mažo debito režime siejami su nusidėvėjusiais ASS tipo siurbLIAIS ir jų projektinių kreivių neatitikimu realioms darbo sąlygoms. Įvertinus modeliavimo rezultatus, modelis laikomas tinkamu tolesnei analizei ir naudojimui 3.3 poskyryje nagrinėjant siurblių darbo taškus bei alternatyvios įrangos pritaikymo galimybes.

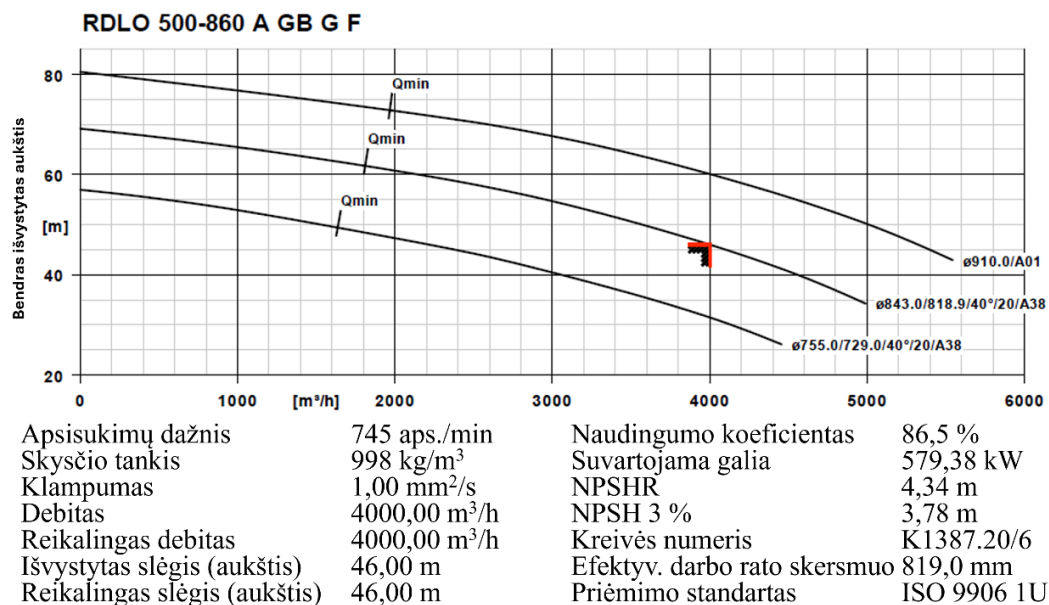
3.3. Alternatyvaus modelio tyrimas

Atlikus esamos aušinimo sistemos analizę ir modelio patikrinimą, nustatyta, kad sistemoje naudojami siurbLIAI neatitinka projektinių darbo taškų ir dalis jų dirba persikrovę, ypač mažojo siurblio atveju. Tai sudaro prielaidas sistemai modernizuoti keičiant siurblinėje naudojamos siurblius į efektyvesnius ir pritaikant dažnio keitiklio reguliavimą. Šiame poskyryje bus pateikiama informacija apie modernizuotos sistemos veikimą, taikant naujos kartos siurblius ir dažnio keitiklių reguliavimą mažiesiems siurbLIAIS, bei įvertinti jų poveikį bendram sistemos debitui ir slėgiui trijuose darbo režimuose. Tiriamas vienas optimalus modernizacijos variantas, parinktas pagal hidraulinius, eksploatacinius ir techninius kriterijus.

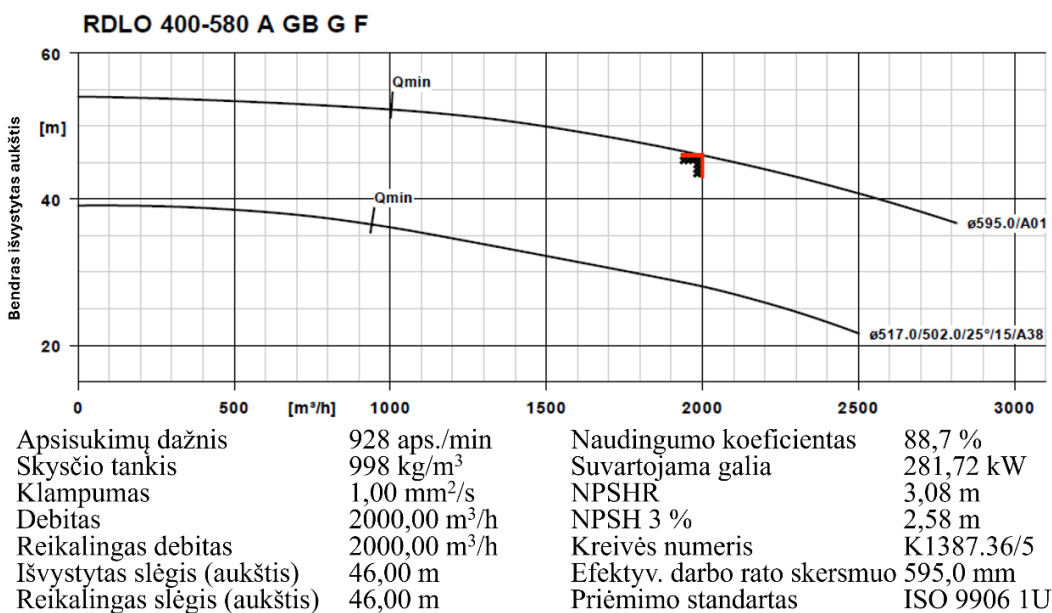
3.3.1. Naujos įrangos parinkimo pagrindimas

Modernizacijos scenarijuje pakeičiami pagrindiniai didieji du ŠVS ir du mažieji ASS tipo siurbLIAI. Nauji siurbLIAI parinkti remiantis projektinėmis debito – slėgio charakteristikomis, hidrauliniu efektyvumu ir realiai reikalingais eksploataciniais parametrais bei išorės įmonės specialistų rekomendacijomis. Didžiųjų siurblių projektiniai parametrai užtikrina reikiamą debitą bei slėgį, o jų efektyvumo ir darbo kreivės geriau atitinka sistemos darbo diapazoną nei senųjų siurblių (27 pav.). Mažieji siurbLIAI pakeičiami to pačio gamintojo naujos kartos modeliu su elektros varikliais pritaikytai dirbti su dažnine pavara (28 pav.), nes realių matavimų metu nustatyta, kad esamuose siurbliuose vizualiai matomi mechaniniai pažeidimai darbo rate ir dirba persikrovimo režimu, o jo efektyvumas bei darbiniai parametrai neatitinka projektinio. Dažnio keitikliai integruojami į mažojo siurblio elektros variklio maitinimo grandinę. Šis sprendimas leidžia tiksliai reguliuoti siurblio sukiamą slėgį ir debitą, sumažinti perteklines apkrovas bei priderinti mažojo siurblio darbo sritį prie visos sistemos su didžiais siurbLIAIS. Parinkti siurbLIAI pasižymi aukštesniu naudingumu

koeficientu, jų projektinės kreivės geriau atitinka aušinimo sistemos hidraulinius parametrus, todėl numatoma, kad modernizuota sistema leis stabiliau reguliuoti slėgį ir debitą įvairiuose gamybos režimuose. Naujų siurblių modeliai, pilnos darbo kreivės su pagrindiniais parametrais pateikiami prieduose (5 ir 6 priedai).



27 pav. Naujų didžiųjų siurblių parametrai



28 pav. Naujų mažųjų siurblių parametrai

3.3.2. Alternatyvaus modelio sąlygos ir giminingumo dėsnių taikymas

Modernizuotos sistemos modeliavimo ribinės sąlygos sudarytos taip pat, kaip ir esamos sistemos modelyje, remiantis trimis eksploataciniais darbo režimais: mažu, vidutiniu ir dideliu debitu. Visiems režimams taikyti realūs matuoti debitai ir išėjimo slėgiai, o naujų siurblių projektinės kreivės panaudotos kaip pagrindas modeliuojant alternatyvų darbo taškų pasiskirstymą. Mažojo siurblio veikimo modeliavimui naudotas dažnio keitiklio reguliavimas, kurio apsakų pokytis įvertintas pagal

siurblių giminingumo dėsnius. Šie dėsniai nusako debito, slėgio ir galios priklausomybę nuo siurblio sukimosi dažnio pagal šias (1, 2, 3) formules [40]:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; \quad (1)$$

čia Q_2 – siurblio debitas pasikeitus greičiui, m³/h; Q_1 – pradinis siurblio debitas, m³/h; n_2 – naujas greitis, aps./min; n_1 – pradinis siurblio greitis, aps./min.

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2)$$

čia H_2 – siurblio kėlimo aukštis pasikeitus greičiui, m; H_1 – pradinis siurblio kėlimo aukštis, m.

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (3)$$

čia P_2 – siurblio galia pasikeitus greičiui, kW; H_1 – pradinė galia, kW.

Kaip matosi iš šių formulių, siurblių giminingumo dėsniai nusako, kad didėjant siurblio apskoms debitas didėja tiesiškai, kėlimo aukštis – kvadratu, o reikalinga galia – kubu. Remiantis šiomis lygtimis buvo apskaičiuotas mažojo siurblio debitas, slėgis ir variklio apkrovos koeficientas alternatyviems sukimosi dažniams 95 %, 90 % ir 85 % (7 priedas). Tai leido tiksliai nustatyti optimalią mažojo siurblio darbo sritį ir priderinti ją prie modernizuotos sistemos hidraulinių poreikių.

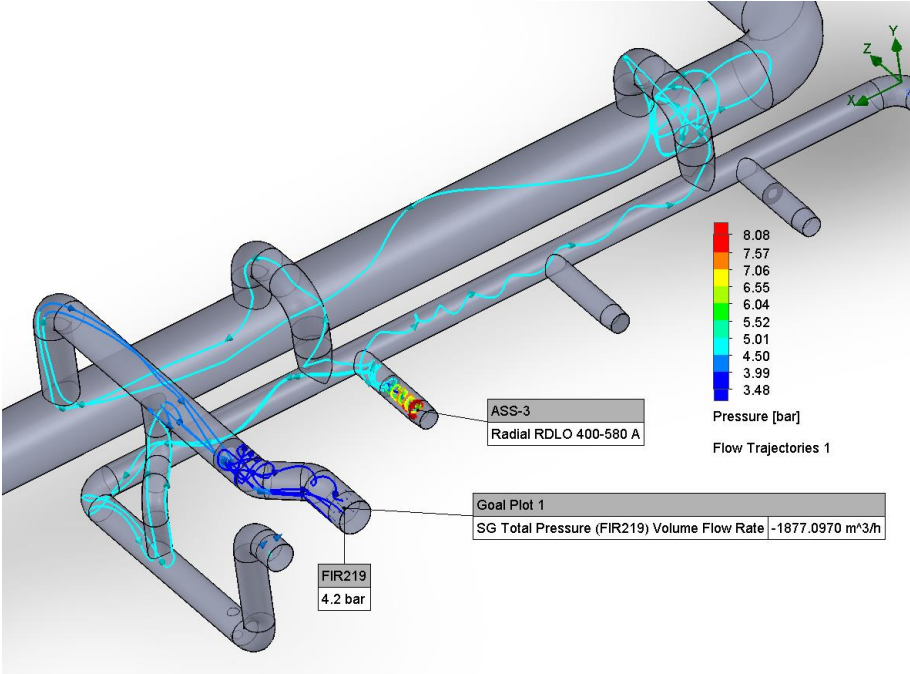
3.3.3. Modernizuotos sistemos analizė

Modernizuotos sistemos veikimas buvo nagrinėjamas tais pačiais trimis darbo režimais kaip ir esamos sistemos modeliavime. Kiekvienam režimui buvo įvertinti pagrindiniai hidrauliniai parametrai, siekiant nustatyti, ar modernizacija leidžia pasiekti reikiamą debitą ir slėgį, užtikrinant sistemiškai stabilesnį siurblių darbą. Naujų siurblių projektinės kreivės ir darbo taškai leido pritaikyti optimalius apkrovos scenarijus kiekvienam režimui.

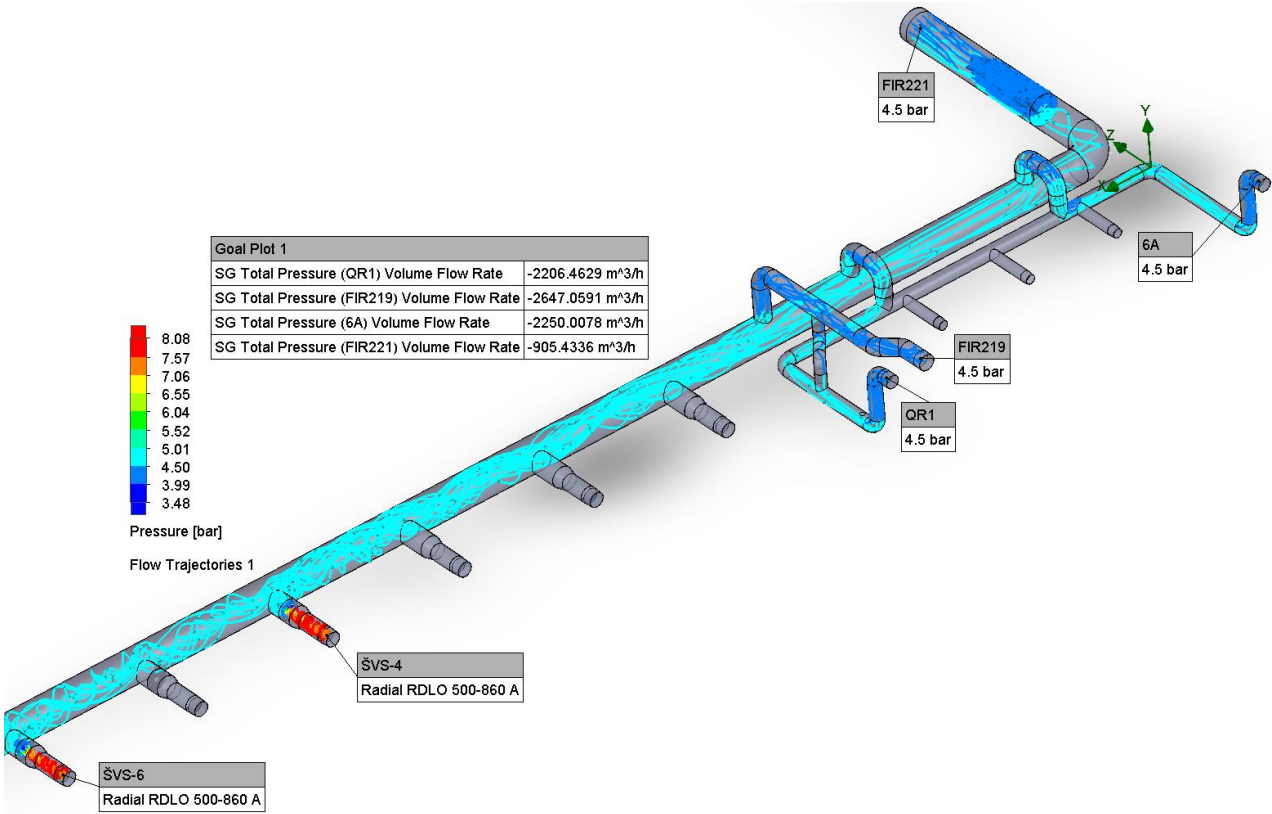
Mažo debito režime modernizuota sistema buvo vertinama siekiant užtikrinti ne mažesnę kaip 1500 m³/h debitą FIR219 pozicijai ir pakankamą slėgio lygį ($\geq 3,6$ bar). Esamoje sistemoje šiame režime veikdavo du senieji ASS tipo siurbliai, tačiau modernizuotoje sistemoje pakanka vieno naujo mažojo siurblio, dirbančio su fiksuotu apskų dažniu (29 pav.). Kadangi buvo paleistas tik vienas siurblys, todėl šiuo režimu suvartojama mažiausiai energijos, lyginant su esama sistema. Vertinant tik vardines galias, šis režimas leidžia sumažinti bendrą naudojamą siurblių galią maždaug 315 kW, nes vietoje dviejų senųjų ASS tipo siurblių veikia vienas naujas siurblys. Priklausomai nuo gamybos poreikių, galima reguliuoti siurblio darbą su dažnio keitikliu, taip dar labiau sumažinant energijos sąnaudas. Nors gautas debitas kiek mažesnis nei esamos sistemos, tai atitinka projektinius reikalavimus ir 4 lentelėje pateiktus minimalius rodiklius. Šiuos parametrus patvirtina ir naujo mažojo siurblio darbo kreivė (28 pav.), kurioje matyti, kad siurblys, esant poreikiui, gali dirbti prie ~2500 m³/h debitui esant ~4 bar slėgiui. Tai rodo, kad siurblys turi pakankamą darbo taško rezervą.

Vidutinio debito režime modernizuotos sistemos tikslas – pasiekti debitą, artimą realiems 2025-08-23 dienos matavimams (~8050 m³/h), užtikrinant stabilų slėgį visose atšakose. Šiame modernizuotame variante užtenka dviejų naujų didžiųjų siurblių, vietoje ankščiau dirbusių trijų (30 pav.). Modeliavimo metu visoms atšakoms nustatytas 4,5 bar slėgis, kuris yra pakankamas ir turi

technologinę atsargą ($\geq 4,2$ bar). Gautas bendras debitas skyrėsi tik apie $40 \text{ m}^3/\text{h}$ nuo realių matavimų, todėl modernizuotas režimas laikomas optimaliu variantu. Šio režimo metu, vietoje trijų ŠVS tipo siurblių, dirba tik du naujieji, todėl bendra įrenginių vardinė galia sumažėja apie 630 kW , kas itin palanku eksploatacijos metu. Tai patvirtina ir naujų didžiųjų siurblių darbo kreivės (27 pav.), rodančios, kad siurbliai veikia artimoje optimalaus efektyvumo srityje.

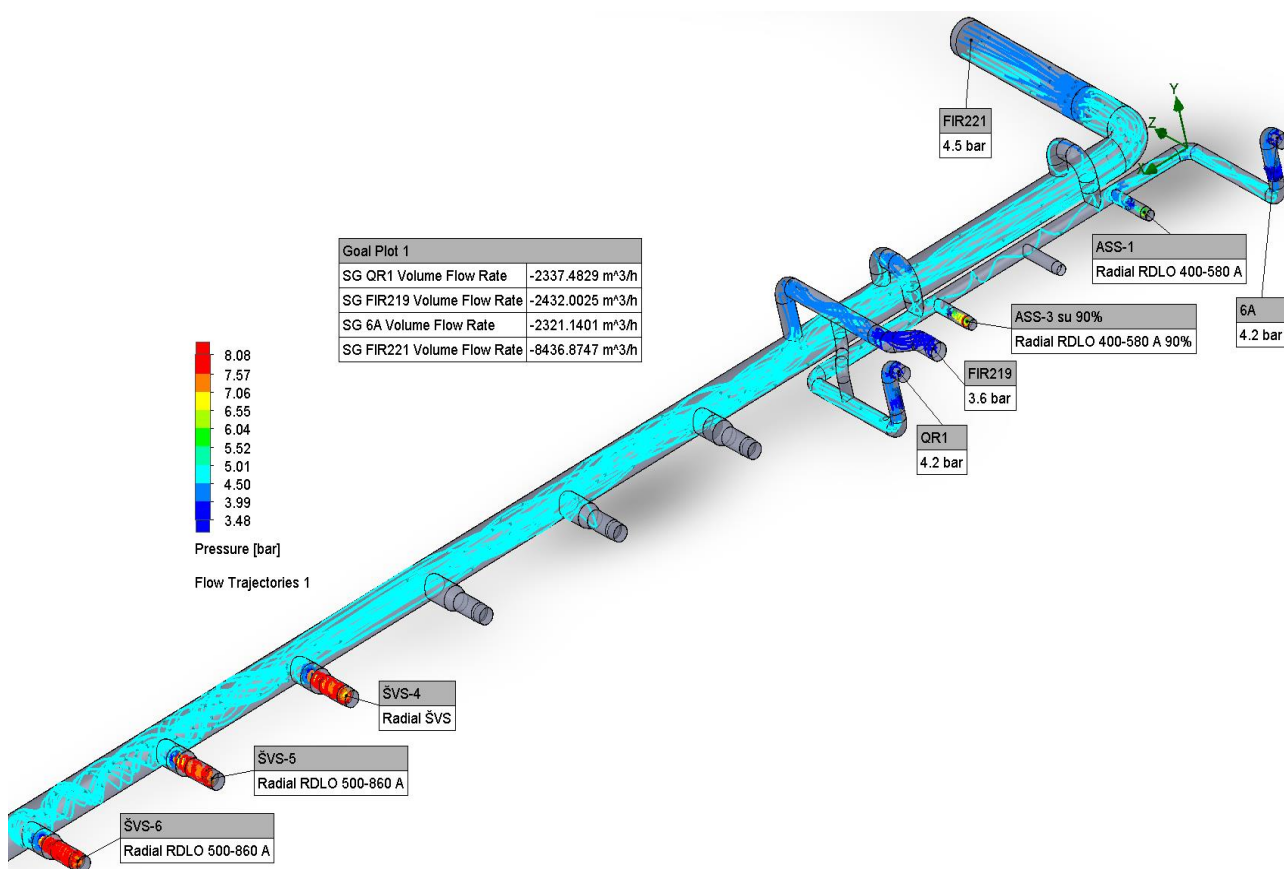


29 pav. Modernizuoto mažo debito režimo skaičiavimai



30 pav. Modernizuoto vidutinio debito režimo skaičiavimai

Didelio debito režime modernizuota sistema veikia maksimaliu apkrovimu. Vietoje dviejų senųjų ŠVS tipo siurblių naudojami du nauji didieji fiksuoto greičio siurbliai, o vietoje senojo ASS – du nauji siurbliai, iš kurių vienas dirba pilnu greičio, o kitas (ASS-3) valdomas dažnio keitikliu su 90 % apsučiomis. Remiantis siurblių giminingumo dėsniais perskaičiuota, kad mažasis siurblys prie 90 % apsučų išvysto 1125 m³/h debitą ir 4,2 bar slėgį (7 priedas, žalia eilutė). Gauti rezultatai parodė, kad tokia konfigūracija užtikrina sistemos slėgio stabilumą ir leidžia pasiekti didelį bendrą debitą be papildomo ŠVS tipo siurblio paleidimo. Kadangi nenaudojamas vienas didysis siurblys, o jo funkciją perima mažesnės galios siurblys su dažnio keitikliu, kurio elektrinės galios naudojimo koeficientas yra 0,729 (7 priedas). Sukurtas modelis patvirtino, kad ši konfigūracija yra stabili ir užtikrina reikiamą našumą visoms pagrindinėms sistemos atšakoms. Modeliavimo metu gautos siurblių darbo kreivės pateiktos prieduose (8 priedas).



31 pav. Modernizuoto didelio debito režimo skaičiavimai

Norint įvertinti modernizacijos naudą, atliktas tiesioginis esamos ir modernizuotos sistemos rezultatų palyginimas. Analizė atlikta pagal atskirų darbo režimų bendro debito, slėgio, naudotus siurblius ir jų vardinę galią parametrus ir surašyti lentelėje (16 lentelė). Pagrindiniai pastebėjimai:

- nauji siurbliai dirba žymiai arčiau optimalios efektyvumo srities, lyginant su esama sistema, kurioje darbą riboja įrenginių nusidėvėjimas;
- mažasis siurblys nebedirba persikrovos režimu. Slėgio ir debito reguliavimas dažnio keitikliu leidžia tiksliai priderinti jo darbo tašką prie sistemos poreikių.
- modernizuota sistema sumažina bendrą naudojamą siurblių vardinę galią visuose režimuose, todėl potencialiai mažėja energijos sąnaudos ir sistemos eksploatavimo kaštai;
- didesnis sistemos lankstumas leidžia lengviau priderinti siurblių derinius prie besikeičiančių technologinių apkrovų ir sezoniškumo;

- visuose debito režimuose bendro debito reikšmės praktiškai sutampa su realiais esamos sistemos duomenimis, todėl technologinis funkcionalumas išlieka visiškai išlaikytas.

16 lentelė. Esamos ir modernizuotos sistemos palyginimas trijuose darbo režimuose

Darbo režimas	Sistemos tipas	Dirbantys siurbliai	Bendras debitas, m ³ /h	Išėjimo slėgis, bar	Bendra vardinė siurbių galia, kW
Mažas	Esama	2 ASS	2350	4,8	630
	Modernizuota	Naujas ASS	~ 1880	4,2	315
Vidutinis	Esama	3 ŠVS	8050	4,9~5,0	1890
	Modernizuota	2 nauji ŠVS	~ 8010	4,5	1260
Didelis	Esama	4 ŠVS + 1 ASS	15150	3,6~4,5	2835
	Modernizuota	2 nauji ŠVS + 1 senas ŠVS + 2 nauji ASS (vienas su DK)	~ 15500	3,6~4,2	~2435

Modernizuotos sistemos analizė parodė, kad tiek didieji, tiek mažieji siurbliai dirba efektyvesniame darbo intervale, o slėgio ir debito parametrai visuose režimuose yra panašūs su esamais ir geriau atitinka eksploatacinius parametrus. Mažiesiems siurbliams pritaikyti dažnio keitikliai sudarė sąlygas tiksliai priderinti jo darbo tašką prie sistemos poreikių ir panaikinti perkrovas, būdingas esamai sistemai. Atsižvelgus į pasiektus rezultatus, modernizuota sistema laikoma techniškai pagrįstu sprendimu, kuris sudaro prielaidas energijos taupymui ir eksploatacinių sąnaudų mažinimui.

3.4. Energijos sąnaudų palyginimas

Toliau pateikiamas esamos ir modernizuotos pramoninės aušinimo sistemos energijos sąnaudų palyginimas, remiantis trijų darbo režimų debito – siurbių deriniais. Vertinant naudojamos siurbių vardinės galios (ŠVS – 630 kW, ASS – 315 kW), o siurbliams su dažnio keitikliais taikomas greičio ir galios ryšys pagal siurbių giminingumo dėsnius. Palyginimai matomi 17 lentelėje.

17 lentelė. Esamos ir modernizuotos sistemos galios palyginimas

Darbo režimas	Esama sistema, kW	Modernizuota sistema, kW	Pokytis, %
Mažo debito	630	315	50 % (315 kW)
Vidutinio debito	1890	1260	33,3 % (630 kW)
Didelio debito	2835	2435	14,1 % (400 kW)

Modernizavimas lėmė reikšmingą momentinių elektros galios sąnaudų sumažėjimą visuose trijuose sistemos darbo režimuose, o didžiausias sutaupymas užfiksuotas mažo ir vidutinio debito režimuose, kuriuose esama įranga anksčiau veikė neoptimaliai arba persikrovimo zonoje. Tyrimo rezultatai rodo, kad modernizuota aušinimo sistema pasižymi ženkliai mažesnėmis energijos sąnaudomis dėl kelių tarpusavyje susijusių techninių veiksnių. Mažo debito režime pakanka vieno naujos konstrukcijos siurblio, todėl bendra reikalinga galia sumažėja dvigubai. Vidutinio debito režime trys senos kartos siurbliai pakeičiami dviem naujais, veikiančiais artimesnėje optimalios našumo kreivės dalyje, taip mažinant energijos nuostolius ir užtikrinant stabilesnį hidraulinį režimą. Didelio debito režime dalinis siurblio darbo greičio sumažinimas iki 90 % suteikia galimybę palaikyti reikiamus slėgio ir debito parametrus, kartu sumažinant momentinę vardinę galią maždaug 400 kW. Be to, persikrovimo režimo eliminavimas ir pagerėjęs slėgio stabilumas dėl dažnio keitiklių naudojimo mažina energijos nuostolius viso darbo intervalo metu.

Apibendrinus, modernizuotos sistemos galios poreikis visuose analizuotuose režimuose sumažėjo nuo maždaug 14 % iki 50 %. Tai patvirtina, kad atlikta modernizacija turi reikšmingą energijos taupymo potencialą. Tai patvirtina, kad atlikta modernizacija turi reikšmingą energijos taupymo potencialą. Gauti rezultatai sudaro prielaidas detalesniam ekonominiam vertinimui, kuris pateikiamas 4 skyriuje, įvertinant metines elektros energijos sąnaudas, finansinę naudą ir modernizacijos poveikį CO₂ emisijų mažinimui.

3.4.1. Energetinių rezultatų palyginimas su moksliniais tyrimais

Pateikiama modernizuotos aušinimo sistemos energijos sutaupymo rezultatų analizė ir jų palyginimas su aktualiais mokslinių tyrimų duomenimis apie dažnio keitikliu, siurblių modernizaciją, darbo režimų optimizavimą ir modeliavimo tikslumą. Pagrindinis tikslas – įvertinti, ar šiame darbe gauti rezultatų dydžiai ir tendencijos atitinka tarptautinėje literatūroje nustatytus intervalus, taip pat įvertinti modeliavimo patikimumą lyginant su moksliniais šaltiniais.

Atliktos analizės metu nustatyta, kad senieji sistemoje eksploatuoti siurbliai dirbo esant 70 – 80 % efektyvumo intervale, o realūs jų darbo taškai pagal išorinės įmonės atliktą tyrimą nukrypo nuo projektinių kreivių. Šie rezultatai visiškai atitinka mokslinėje literatūroje aprašomus nusidėvėjusių siurblių efektyvumo pokyčius, kur dėl darbinių dalių erozijos, laipsniško nusidėvėjimo ir padidėjusių vidinių nuostolių efektyvumas sumažėja iki 60 – 75 %, o darbo taškai nukrypsta nuo gamyklinių charakteristikų [17, 27]. Modernizacijos metu parinkti nauji siurbliai pasižymi didesniu nei 85 % efektyvumu – nauji ASS tipo siurbliai gali pasiekti ~89 % efektyvumą, o ŠVS tipo iki ~87 %. Tokie efektyvumo rodikliai taip pat visiškai sutampa su tipinėmis naujų, modernių vandens siurblių charakteristikomis, pateikiamomis moksliniuose tyrimuose (dažniausiai 85 – 90 % intervale, priklausomai nuo darbo taško) [17, 18]. Literatūroje taip pat pabrėžiama, kad didžiausias efektyvumo padidėjimas pasiekiamas tuomet, kai nauja įranga pakeičia senus siurblius, veikusius perkrovos režimu, būtent toks atvejis nustatytas analizėje, kur senieji ASS siurbliai dirbdavo virš optimalaus našumo srities [17]. Apibendrinant galima teigti, kad visų trijų režimų rezultatai yra nuoseklūs ir visiškai sutampa su literatūriniais energijos taupymo intervalais.

Modernizuotos sistemos energijos sąnaudų analizė atskleidė ryškius skirtumus tarp esamos ir naujos konfigūracijos visose trijose apkrovos zonose. Moksliniuose tyrimuose nurodoma, kad dažnio keitikliu valdomi siurbliai tipinėse pramoninėse vandens tiekimo ar aušinimo sistemose leidžia sumažinti energijos suvartojimą 20 – 55 %, priklausomai nuo apkrovos lygio, sistemos hidraulinių nuostolių, siurblių parinkimo ir darbinių taškų [2, 18, 30, 49]. Mažo debito režime modernizuota sistema užtikrina apie 50 %, mažesnes energijos sąnaudas, nes vietoje dviejų senų ASS siurblių dirba tik vienas naujas siurblys, kur bendra režimo vardinė galia yra dvigubai mažesnė. Tai atitinka literatūroje pateiktus duomenis, kad dalinės apkrovos režimuose energijos taupymas yra didžiausias ir gali viršyti 50 % [2, 18]. Vidutinio debito režime nustatytas 630 kW energijos sumažėjimas, sudarantis 33,3 %. Tokios vertės visiškai sutampa su apžvalginiuose tyrimuose pateikiamomis vertėmis, kurios rodo, kad optimizavus siurblių skaičių bei darbą prie 50 – 70 % apkrovos galima pasiekti 25 – 40 % sutaupymą [30, 49]. Būtent šiame režime pasiektas efektyvesnis siurblių darbo taškų pasiskirstymas, todėl taupymas yra vienas iš reikšmingiausių. Didelio debito režime gautas 14,1 % ekonomija taip pat atitinka mokslinėje literatūroje aprašytas tendencijas. Daugelyje tyrimų nurodoma, kad esant didelėms apkrovos (< 80 % nominalaus debito) dažninių pavarų efektyvumas mažėja, nes siurbliai dirba artimais projektiniams parametrams [18, 30]. Šio tyrimo gautas rezultatas atspindi šią teoriją, nes vienas ASS tipo siurblys dirbo sumažintomis apsukomis, tačiau bendras

sistemos energijos poreikis vis dar išliko didelis, todėl taupymo potencialas natūraliai mažesnis nei kituose režimuose.

Tyrimo metu nustatytos modeliavimo paklaidos tarp realių eksploatacinių duomenų ir *SolidWorks Flow Simulation* rezultatų svyravo tarp 1,1 % ir 10,5 %. Mažo debito režime fiksuota didžiausia paklaida (10,5 %) yra tiesiogiai siejama su senų siurblių nusidėvėjimu, nes realiuose matavimuose naudoti ASS tipo siurbLIAI turėjo pažeistas sparnuotes darbo ratuose, o projekcinė darbo kreivė neatitiko faktinės hidraulinės būklės. Vidutinio ir didelio debito režimuose paklaidos buvo atitinkamai 2,1 % ir 1,1 %, o tai laikytina labai aukštu modeliavimo tikslumu. Mokslinėje literatūroje vandens tiekimo sistemų modeliavimo paklaidos paprastai siekia 2 – 8 %, o sudėtingose sistemose su nenusipėjamais hidrauliniiais nuostoliais gali viršyti ir 10 – 12 % [27, 43, 49]. Lyginant su šiais intervalais, gauti rezultatai rodo, kad modelis akivaizdžiai patenka į aukšto tikslumo kategoriją, kadangi dviem režimais paklaida yra geresnė nei daugelyje publikuotų tyrimų, o didžiausia paklaida paaiškinama įrangos nusidėvėjimu, o ne modeliavimo netikslumais.

Lyginant modernizacijos rezultatus su moksliniais šaltiniais nustatyta, kad tiek energijos taupymo rodikliai (14,1 – 50 %), tiek siurblių efektyvumo padidėjimas (nuo 70 – 75 % iki ~ 89 %) visiškai sutampa su tipinėse studijose pateikiamais intervalais. Modeliavimo paklaidų analizė rodo, kad sudarytas esamos sistemos modelis pasižymi aukštu tikslumu ir patenka į 2 – 12 % literatūroje nurodytas ribas, o du režimai buvo apskaičiuoti labai tiksliai (< 2,1 %). Tai patvirtina, jog atliktas tyrimas yra metodologiškai pagrįstas, modernizacijos sprendiniai paremti tiek realiais duomenimis, tiek literatūrinėmis tendencijomis, o gauti rezultatai laikytini patikimais tolimesniems ekonominiais ir aplinkosauginiams vertinimams.

3.5. Skyriaus apibendrinimas

Trečiajame skyriuje atlikta išsami esamos pramoninės aušinimo sistemos analizė, skaitmeninio modelio sudarymas ir modernizuotos sistemos veikimo vertinimas trimis darbo režimais. Analizė parodė, kad dabartinėje sistemoje naudojami ŠVS ir ASS tipo siurbLIAI nepasiekia projektinių darbo taškų, nes jų efektyvumas sumažėjęs iki 70 – 75 %, debitas ir slėgis nukrypę nuo projektinių verčių, o darbo ratai (ypač ASS siurblių) turi aiškių nusidėvėjimo požymių. Šie veiksniai riboja sistemos stabilumą ir didina energijos sąnaudas. Sukurtas modelis tiksliai atkartojė realias darbo sąlygas, o modeliavimo paklaidos siekė 1,1 – 10,5 %. Vidutinio ir didelio debito režimuose gautos vertės beveik pilnai sutapo su matavimais, o didesnė mažo debito paklaida susijusi su nusidėvėjusiu siurbliu ir neatitikusia jo projektine kreive. Tai patvirtino, kad modelis tinkamas modernizacijos scenarijams vertinti. Modernizacijos tyrimas parodė, kad pakeitus esamus siurblius naujesniais modeliais bei pritaikius dažnio keitiklio valdymą mažajam siurbliui, sistemos hidrauliniai parametrai tapo stabilesni, slėgio svyravimai sumažėjo, o siurbLIAI dirbo aukštesnio, virš 85 %, efektyvumo srityje. Lyginant vardinės galios reikšmes, modernizuota sistema sumažino energinį poreikį visuose režimuose, mažame debite – 50 %, vidutiniame – 33,3 %, o dideliame – 14,1 %. Šie sutaupymai atitinka mokslinėje literatūroje dažnio keitiklių ir siurblių modernizavimo tyrimuose nurodomas energijos taupymo ribas. Apibendrinant galima teigti, kad modernizacijos sprendiniai ženkliai pagerino sistemos efektyvumą ir hidraulinį stabilumą, o sukurto modelio tikslumas leidžia patikimai vertinti tolesnį ekonominį bei aplinkosauginį šių sprendinių poveikį.

4. Ekonominis ir aplinkosauginis aušinimo sistemos vertinimas

Skyriuje atliekamas modernizuotos pramoninės aušinimo sistemos ekonominis ir aplinkosauginis vertinimas, siekiant nustatyti, kokią finansinę ir energetinę naudą suteikia siurblių keitimas naujesniais modeliais bei dažnio keitiklių integravimas. Vertinimas atliekamas remiantis realiomis siurblių elektros suvartojimo reikšmėmis, išmatuotomis eksploatacijos metu, todėl skaičiavimai yra tikslesni nei remiantis vien vardinėmis variklių galiomis. Toliau bus pateikiama energijos sąnaudų skaičiavimo metodika, esamos ir modernizuotos sistemos metinių energijos sąnaudų įvertinimas, ekonominės naudos analizė, investicijų atsipirkimas ir CO₂ emisijų mažėjimo skaičiavimas.

4.1. Energijos sąnaudų skaičiavimas

Analizė orientuota į du pagrindinius režimus – vidutinį ir didelį debito režimą, kurie sudaro atitinkamai 3518 h (~ 40 %) ir 5240 h (~ 60 %) metinio darbo laiko, remiantis išorinės įmonės atliktais dviejų savaitių trukmės matavimais. Mažo debito režimo trukmė realiomis sąlygomis yra epizodinė, todėl į metinį energijos balansą neįtraukiama, jo energinė nauda pateikiama kaip vienetinė ekonominė vertė. Visos ekonominės analizės skaičiuotos taikant 0,10 Eur/kWh elektros energijos tarifą be PVM. Metinės energijos sąnaudos skaičiuojamos remiantis galia, veikimo trukme ir elektros energijos tarifu:

$$E = P \cdot t \quad (4)$$

čia E – energijos kiekis, kWh; P – momentinė elektros galia, kW; t – veikimo laikas per metus, h.

$$C = E \cdot k \quad (5)$$

čia C – metinė elektros energijos kaina, Eur; k – 0,10 Eur/kWh.

Sutaupymas apskaičiuojamas pagal:

$$\Delta C = C_e - C_m \quad (6)$$

čia ΔC – metinis sutaupymas, Eur; C_e – esamos sistemos metinės sąnaudos, Eur; C_m – modernizuotos sistemos metinės sąnaudos, Eur.

Esamos sistemos energijos sąnaudos apskaičiuotos naudojant realius ŠVS ir ASS siurblių elektros galingumų vidurkius, matuotus esant tipinėmis eksploatacijos sąlygomis. Toks metodas leidžia įvertinti faktinį energijos poreikį, neapsiribojant vien vardinėmis galiomis, kurios pramoniniuose įrenginiuose gali ženkliai skirtis nuo realių darbo taškų. Esamos sistemos vidutinio debito režimu dirba su trimis senais ŠVS siurbliais, kurių realus elektros suvartojimas svyruoja nuo 590 iki 600 kW (31 pav.), todėl skaičiavimams imamas vidurkis – 595 kW. Toliau skaičiuojama bendra galia P_{EV} , metinės energijos sąnaudos E_{EV} ir kaina vidutinio režimo C_{EV} :

$$P_{EV} = 3 \cdot 595 = 1785 \text{ kW}$$

$$E_{EV} = P_{EV} \cdot t = 1785 \cdot 3518 = 6279630 \text{ kWh}$$

$$C_{EV} = E_{EV} \cdot k = 6279630 \cdot 0,10 = 627963 \text{ Eur}$$

Didelio debito režime esamoje sistemoje dirba keturi ŠVS ir vienas ASS siurblys, kur realios vieno siurblio galios yra, atitinkamai, ~ 595 kW ir ~ 292 kW. Identiškai vidutiniam apskaičiuojami didelio debito režimo energetiniai rodikliai P_{ED} , E_{ED} , C_{ED} :

$$P_{ED} = 4 \cdot 595 + 292 = 2672 \text{ kW}$$

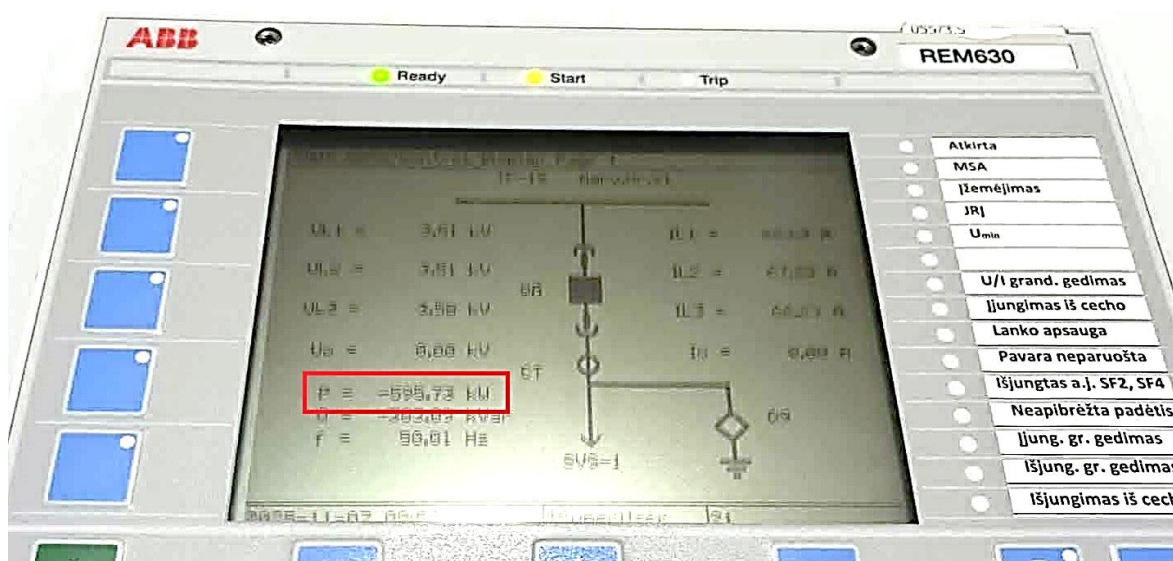
$$E_{ED} = P_{ED} \cdot t = 2672 \cdot 5240 = 14001280 \text{ kWh}$$

$$C_{ED} = E_{ED} \cdot k = 14001280 \cdot 0,10 = 1400128 \text{ Eur}$$

18 lentelė. Esamos sistemos bendros metinės sąnaudos

Režimas	Galia, kW	Energija, kWh	Kaina, Eur
Vidutinio debito	1785	6279630	627963
Didelio debito	2672	14001280	1400128
Iš viso:	-	20280910	2028091

Taigi esamos sistemos bendras energijos poreikis sudaro apie 20,28 GWh per metus (18 lentelė). Šis rodiklis atspindi ne tik technologinių procesų intensyvumą, bet ir senų siurblių neefektyvumą dėl nusidėvėjimo jų faktinis elektros suvartojimas yra didesnis nei būtų projektinėje būsenoje.



32 pav. ŠVS-1 siurblio momentinis elektros energijos sunaudojimas (pažymėta raudonai)

Modernizuotoje sistemoje įdiegti nauji du didieji ir du mažieji siurbliai bei dažnio keitiklių valdymas leidžia ženkliai sumažinti energijos vartojimą. Kiekvieno režimo naujų siurblių realios elektros galios apskaičiuotos remiantis darbo kreivėmis (5 ir 6 priedas) ir faktine hidrauline apkrova. Vidutinio debito režime sistema veikia su dviem naujais ŠVS tipo siurbliais, kurių tipinis suvartojimas pagal darbo kreivę siekia ~572 ir ~585 kW. Turint šiuos duomenis, galime apskaičiuoti ir šio režimo bendrą galią P_{MV} , energijos sąnaudas E_{MV} ir elektros kainą C_{MV} :

$$P_{MV} = 572 + 585 = 1157 \text{ kW}$$

$$E_{MV} = P_{MV} \cdot t = 1157 \cdot 3518 = 4070326 \text{ kWh}$$

$$C_{MV} = E_{MV} \cdot k = 4070326 \cdot 0,10 = 407032,6 \text{ Eur}$$

Didelio debito režime integruotas mišrus siurblių derinys, šioje apkrovoje dirba vienas senas ŠVS (~594 kW), 2 nauji ŠVS (600 ir 585 kW) ir du ASS (305 ir 205 kW) tipo siurbliai, kur vienas iš jų yra valdomas dažnio keitikliu su 90 % apsučiomis. Atliekami tokie patys rodiklių skaičiavimai, kaip ir vidutiniame režime - P_{MD} , E_{MD} ir C_{MD} :

$$P_{MD} = 594 + 600 + 585 + 305 + 205 = 2289 \text{ kW}$$

$$E_{MD} = P_{MD} \cdot t = 2289 \cdot 5240 = 11994360 \text{ kWh}$$

$$C_{MD} = E_{MD} \cdot k = 11994360 \cdot 0,10 = 1199436 \text{ Eur}$$

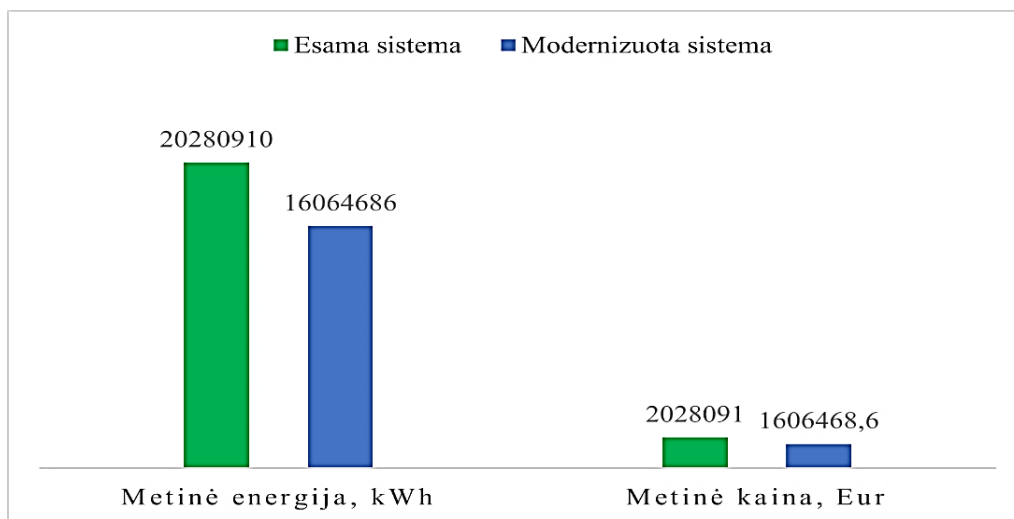
19 lentelė. Modernizuotos sistemos bendros metinės sąnaudos

Režimas	Galia, kW	Energija, kWh	Kaina, Eur
Vidutinio debito	1157	4070326	407032,6
Didelio debito	2289	11994360	1199436
Iš viso:	-	16064686	1606468,6

Bendra metinė modernizuotos sistemos energija sumažėja iki 16,06 GWh (19 lentelė). Turint šiuos skaičius galima palyginti koks iš tiesų yra elektros energijos sutaupymas per metus.

20 lentelė. Metinių sąnaudų ir energijos sutaupymo palyginimas

Sistema	Metinė energija, kWh	Energijos sutaupymas, %	Metinė kaina, Eur	Kainos sutaupymas, %
Esama sistema	20280910	-	2028091	-
Modernizuota sistema	16064686	-	1606468,6	-
Skirtumas	4216224	20,8	421622,4	20,8



33 pav. Esamos ir modernizuotos sistemos metinės energijos ir kainos palyginimas

Palyginus abiejų sistemų energijos vartojimą (20 lentelė, 33 pav.), nustatyta, kad modernizacija leidžia sutaupyti 4216224 kWh (~ 4,22 GWh) elektros energijos per metus. Tai yra reikšmingas rodiklis, ypač pramoninių aušinimo sistemų kontekste, kur energijos sąnaudos sudaro didžiąją dalį eksploatacijos kaštų. Finansine išraiška šis sutaupymas sudaro ~ 422 tūkst. eurų per metus, taikant 0,1 Eur/kWh tarifą. Sutaupymas sudaro 20,8 % visų energijos sąnaudų, o didžiausią dalį sudaro

sumažintos išlaidos didelio debito režime, būtent čia sistemoje dirba daugiausiai siurblių ir fiksuojama didžiausia apkrova elektros tinklui. Toks energijos vartojimo sumažėjimas yra ypač svarbus pramonės objektas, kuriuose elektros energija sudaro didžiąją operacinių sąnaudų dalį. Daugelyje ES vertinimų pramonės energijos efektyvumo projektų sutaupymo intervalai 10 – 25 % laikomi ekonomiškai pagrįstais ir techniškai efektyviais, o šiame tyrime pasiektas rezultatas yra artimas viršutinei šio intervalo ribai, todėl modernizacija laikytina techniškai ir ekonomiškai labai efektyvia. Gautas 20,8 % sutaupymas patvirtina, kad šie sprendiniai reikšmingai pagerina sistemos energinį efektyvumą ir sumažina eksploatacijos kaštus.

Kadangi mažo debito režimo trukmė yra epizodinė ir nebuvo vertinama metiniuose skaičiavimuose, šio režimo elektros energijos rodikliai bus apskaičiuoti kaip vienatinė ekonominė vertė. Mažo debito režime esamoje sistemoje dirba du seni ASS tipo siurbliai, kurių kiekvieno faktinis elektros suvartojimas yra apie 292 kW. Tuomet bendra esamos sistemos galia P_{EM} šiame režime:

$$P_{EM} = 292 \cdot 2 = 584 \text{ kW}$$

Modernizuotoje sistemoje panašius darbinius parametrus užtikrina vienas naujas ASS siurblys, kurio realus suvartojimas yra maždaug 275 kW (5 priedas). Momentinis galios skirtumas tarp esamos ir modernizuotos sistemos P_M yra:

$$P_M = 584 - 275 = 309 \text{ kW}$$

Tai reiškia, kad per vieną veikimo valandą mažo debito režime yra sutaupoma 309 kW elektros energijos. Taikant 0,1 Eur/kWh elektros tarifą, momentinė finansinė nauda C_{MD} sudaro:

$$C_{MD} = P_M \cdot k = 309 \cdot 0,10 = 30,9 \text{ Eur/val.}$$

4.2. Modernizacijos investicijos ir atsipirkimas

Investicijos į modernizaciją apima keturias pagrindines grupes – naujų didžiųjų ir mažųjų siurblių su dažnio keitikliais įsigijimą bei jų instaliaciją ir montavimo darbus (pamatų griovimas, naujų pamatų įrengimas, siurblių aprišimas). Pagal pateiktus pasiūlymus 2024 m. liepos mėnesio kainomis, visų šių komponentų bendra investicijų suma sudaro 1051600 eurų (21 lentelė).

21 lentelė. Investicijų vertė

Investicija	Vieneto kaina, tūkst. Eur	Reikalingas kiekis, vnt.	Bendra kaina, tūkst. Eur
Naujas ŠVS siurblys	200	2	400
Naujas ASS siurblys	135,8	2	271,6
Dažnio keitiklis (su montavimu)	150	2	300
Siurblių montavimas, aprišimas	80	Komplektas	80
Iš viso:	-	-	1051,6

Tokio dydžio investicijos pramonės sektoriuje laikomos vidutinėmis, ypač turint omenyje, kad keičiami strateginiai įrenginiai, kurie veikia praktiškai visą parą ištisus metus. Mokslinėje literatūroje nurodoma, kad siurblių sistemų modernizacijos projektai paprastai atsiperka per 1 – 5 metus, priklausomai nuo energijos kainų, siurblių darbo režimo ir pradinės įrangos nusidėvėjimo [20, 39]. Todėl tolesnė atsipirkimo analizė yra būtina vertinant investicijų pagrįstumą.

Atsipirkimo laikas T apskaičiuotas naudojant metinį finansinį sutaupymą ir investicijų vertę. Kaip nustatyta, modernizuota sistema leidžia sumažinti energijos sąnaudas 421622,4 eurai per metus, todėl:

$$T = \frac{1051600}{421622,4} = 2,49 \text{ metų}$$

Toks atsipirkimo laikas yra itin palankus pramoninei modernizacijai, kadangi daugelyje Europos Sąjungos vartojimo efektyvumo gairių projektai, taip pat ir aušinimo sistemą nagrinėjančioje įmonėje, laikomi ekonomiškai pagrįstais, jei atsiperka greičiau nei per 10 metų. Todėl šiame tyrime gautas rodiklis patenka į pakankamai aukštą ekonominio efektyvumo kategoriją. Be to, investicijos generuoja ne tik tiesioginę finansinę naudą, bet ir papildomą naudą eksploatacijos stabilumui, mažesnei gedimų tikimybei ir efektyvesniam sistemos darbo režimų valdymui.

4.3. CO₂ emisijų mažinimo analizė

Modernizacijos poveikis aplinkosaugai įvertintas pagal metinį elektros energijos sutaupymą ir taikant elektros energijos emisijų koeficientą. Vidutinę emisiją vienai elektros kilovatvalandei apskaičiuojama naudojant 2024 m. metinį elektros energijos emisijų koeficientą Lietuvoje – 0,139 kg CO₂/kWh [49]. Ši vertė atitinka vidutinius elektros gamybos rodiklius, būdingus Lietuvoje, kuriame elektros energija gaunama iš įvairių taršių ir atsinaujinančių šaltinių derinio. Šis koeficientas pritaikomas visam metiniam energijos sutaupymui ir leidžia nustatyti realų modernizacijos poveikį išmetamoms šiltnamio efektą sukeliančioms dujoms (ŠESD). Apskaičiuotas CO₂ kiekis, kurio išmetimo pavyksta išvengti dėl sumažėjusio elektros suvartojimo ΔCO_2 , yra:

$$\Delta\text{CO}_2 = 4216224 \text{ kWh} \cdot 0,139 = 586055,14 \text{ kg CO}_2 = \sim 586,1 \text{ tonų per metus}$$

Tokio masto sumažėjimas yra reikšmingas, ypač įvertinus, kad aušinimo sistemos siurbliai priklauso prie labiausiai elektrą vartojančių pramoninių įrenginių, o jų efektyvumo didinimas įprastai sudaro didžiausią energijos taupymo potencialą gamybos objektuose. Siekiant geriau iliustruoti šio modernizacijos rezultato dydį, toliau pateikiamas palyginimas su kitais sektoriais naudojant šaltinyje [49] pateiktus emisijų koeficientus. Tai užtikrina metodologinį nuoseklumą ir leidžia tiksliai įvertinti, kokį santykinį svorį turi 586,1 tonų CO₂ sumažinimas.

Palyginimas su:

1. Lengvuoju automobiliu.

Dokumente pateikiamas vidutinis vieno lengvojo automobilio metinis CO₂ išmetimas yra 2,25 t CO₂ metams [49]. Todėl modernizacijos metu sutaupyta emisijų kiekis prilygsta:

$$\frac{586,1}{2,25} \approx 260 \text{ automobilių per metus}$$

Tai reiškia, kad vien aušinimo sistemos optimizavimas leidžia išvengti tiek emisijų, kiek kasmet išmeta apie 260 lengvųjų automobilių.

2. Vidutiniu Europos Sąjungos gyventoju.

Kadangi dauguma modernizacijos metu sutaupytų emisijų sudaro CO₂, lyginimui naudojamas vidutinis Europos Sąjungos vidutinio gyventojų CO₂e rodiklis. 2022 metų Eurostat duomenimis gyventojų šiltnamio dujų pėdsakas sudarė 10,7 t CO₂e vienam gyventojui per metus [51].

$$\frac{586,1}{10,7} \approx 54,8$$

Tai reiškia, kad atlikta modernizacija prilygsta maždaug 55 vidutinių ES gyventojų metiniam ŠESD pėdsakui.

3. Namų ūkių elektros vartojimu (tik elektra).

Mokslinis darbas apie ES namų ūkių elektros vartojimą rodo, kad vidutinis prie tinklo prijungto Europos namų ūkio elektros vartojimo ŠESD pėdsakas sudaro apie 1,36 – 1,66 t CO₂e per metus [52]. Orientaciniam palyginimui bus naudojama ~1,7 t CO₂e vertė kaip pagrįsta vidutinė reikšmė.

$$\frac{586,1}{1,7} \approx 344,8$$

Modernizacijos metu sumažintas emisijų kiekis prilygsta maždaug 345 namų ūkių metinėms emisijoms, susijusioms vien su elektros vartojimu.

Atliktos modernizacijos metu pasiektas 5861 t CO₂ metinis emisijų sumažėjimas yra reikšmingas ir aiškiai matomas lyginant su kitų sektorių išmetimų mastu. Šis poveikis prilygsta maždaug 260 lengvųjų automobilių metinėms emisijoms, 55 vidutinių Europos Sąjungos gyventojų metiniam šiltnamio efektą sukeliančių dujų pėdsakui arba apie 345 namų ūkių metinėms emisijoms, susijusioms vien su elektros energijos vartojimu. Šie palyginimai parodo, kad modernizacija užtikrina apčiuopiamą ir reikšmingą indėlį mažinant CO₂ išmetimus, o jos rezultatai turi aiškiai išmatuojamą aplinkosauginį poveikį.

4.4. Skyriaus apibendrinimas

Modernizuotos aušinimo sistemos analizė parodė reikšmingą energijos vartojimo, eksploatacinių sąnaudų ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimų sumažėjimą. Remiantis realiais siurblių darbo duomenimis, nustatyta, kad modernizacija leidžia sumažinti elektros energijos suvartojimą apie 4,22 GWh per metus, o tai sudaro apie 20,8 % visų buvusių sistemos energijos sąnaudų. Šis sutaupymas pasiekiamas dėl efektyvesnių naujų siurblių, dažnio keitiklių integracijos ir optimizuoto darbo režimų valdymo. Finansine išraiška tai atitinka apie 422 tūkst. eurų metines sutaupytas išlaidas. Įvertinus ~ 1,052 milijono eurų investicijų vertę, apskaičiuota, kad modernizacijos projektas atsiperka per 2,49 metų, o tai laikoma itin palankiu rezultatu pramoninėse sistemose. Toks atsipirkimo laikas patenka į aukštą energijos efektyvumo projektų kategoriją ir gerokai lenkia ES gairėse nurodomą 10 metų ribą. Aplinkosauginiu aspektu modernizacija leidžia sumažinti išmetamų CO₂ kiekį 586,1 t per metus, taikant Lietuvos elektros emisijų koeficientą. Šis kiekis yra reikšmingas pramoninių įrenginių kontekste ir aiškiai matomas atliekant santykinius palyginimus, kurie atitinka maždaug 260 lengvųjų automobilių metines emisijas, 55 Europos Sąjungos gyventojų metinį ŠESD pėdsaką arba apie 345 namų ūkių elektros vartojimo emisijas. Šie palyginimai iliustruoja modernizacijos mastą ir patvirtina, kad projektas daro apčiuopiamą teigiamą poveikį aplinkai. Apibendrinant, aušinimo sistemos modernizacija yra ekonomiškai pagrįsta, techniškai efektyvi ir ekologiškai reikšminga. Ji sumažina energijos suvartojimą, mažina eksploatacijos kaštus, greitai atsiperka ir prisideda prie reikšmingo CO₂ emisijų mažinimo, todėl gali būti laikoma tvariu ir strategiškai vertingu sprendimu pramonės įmonėje.

Išvados

1. Įvertinus pramoninių siurblių energetinį efektyvumą nustatyta, kad pagrindiniai energijos nuostoliai kyla dėl fiksuoto greičio darbo ir hidraulinių neatitikimų. Literatūra ir faktiniai pavyzdžiai rodo, kad dažnio keitiklių taikymas leidžia sumažinti elektros sąnaudas 10 – 60 %, o investicijų atsipirkimas siekia 1 – 3 metus. Tai patvirtina, kad modernizacija turi reikšmingą energijos taupymo potencialą.
2. Sukurtas esamos sistemos modelis tiksliai atkartojo realius slėgio ir debito parametrus, o modeliavimo paklaidos siekė 1,1 – 10,5 %. Didžiausia paklaida užfiksuota dėl nusidėvėjusių siurblių ir jų neatitikimo projektinėms darbo kreivėms, kas patvirtina, kad hidrauliniai nuostoliai kyla iš įrangos techninės būklės ir neoptimalios charakteristikų atitikties. Šios išvalgos pagrindžia modelio tinkamumą tolimesniam modernizacijos vertinimui ir leidžia tiksliai identifikuoti esamos sistemos neefektyvumo priežastis.
3. Alternatyvaus modelio tyrimas parodė, kad nauji siurbliai ir dažnio keitikliai pagerina hidraulinius parametrus: jie tapo stabilesni, slėgio svyravimai sumažėjo, o nauji siurbliai pradėjo dirbti aukštesnio, virš 85 % efektyvumo srityje. Modernizuota sistema pasižymėjo didesniu valdymo tikslumu ir geresniu suderinamumu su technologinėmis apkrovomis, pašalinant perteklinio darbo režimus.
4. Energijos sąnaudų palyginimas parodė, kad modernizacija leidžia sumažinti energijos vartojimą daugiau nei numatyta reikalavimuose minimali 8 % riba. Palyginus su vardinėmis galiomis, modernizuota sistema sumažino energinį poreikį visuose režimuose. Mažame debite energijos poreikis sumažėjo 50 %, vidutiniame – 33,3 %, o dideliame – 14,1 %. Šie rodikliai atitinka literatūroje pateikiamas dažnio keitiklių ir siurblių modernizavimo tyrimų energijos taupymo ribas. Tai patvirtina modernizacijos sprendinių efektyvumą ir hidraulinį stabilumą.
5. Ekonominis vertinimas parodė, kad modernizacijos sprendiniai yra finansiškai pagrįsti. Modernizacija leidžia sutaupyti apie 4,22 GWh elektros energijos ir apie 422 tūkst. eurų per metus. Įvertinus ~1,052 milijonų eurų investicinę vertę, apskaičiuota, kad projektas atsiperka per 2,49 metų laikotarpį, kas laikoma itin palankiu rezultatu pramoninėms sistemoms. Be to, sumažėję energijos kaštai ir stabilesni darbo režimai didina sistemos patikimumą ir atitiktį Europos Sąjungos efektyvumo reikalavimams. Energijos vartojimo sumažėjimas taip pat leidžia kasmet išvengti apie 586,1 tonų CO₂ emisijų, todėl modernizacija reikšmingai prisideda prie įmonės aplinkosauginių tikslų įgyvendinimo ir tvarios veiklos plėtros.

Rekomendacijos

1. Diegti dažnio keitiklius visuose aušinimo sistemos siurbliuose, kurių darbas priklauso nuo kintančių technologinių apkrovų. Modeliavimas parodė, kad būtent kintamo greičio valdymas leidžia sumažinti energijos sąnaudas, todėl rekomenduojama taikyti dažnių keitiklių valdymą visoms siurblinėms grandims, kuriose pastebimi apkrovų svyravimai. Tai užtikrins sistemos dinaminį prisitaikymą ir tvarų energijos vartojimą.
2. Pakeisti nusidėvėjusius siurblius naujos kartos modeliais, kurių darbo kreivės tiksliai atitinka nagrinėjamos aušinimo sistemos hidraulinius parametrus. Modeliavimas įrodė, kad iki 10,5 % paklaida kyla būtent dėl nusidėvėjusių siurblių neatitikimo projektinėms kreivėms. Todėl būtina taikyti modernius aukšto efektyvumo siurblių modelius, dirbančius > 85 % efektyvumo srityje, kad būtų užtikrintas stabilus slėgio režimas ir mažesni hidrauliniai nuostoliai.
3. Įdiegti automatinio valdymo algoritmus ir realaus laiko stebėseną, skirtą slėgio ir debito optimizavimui. Modeliuoti rezultatai rodo, kad automatizuotas valdymas sumažina perteklines apkrovas ir pagerina hidraulinių parametrų stabilumą. Rekomenduojama integruoti pažangius modelinio nuspėjamojo valdymo arba duomenų analizės pagrindu veikiančius algoritmus siekiant tolesnio energijos sąnaudų mažinimo ir darbo režimų optimizavimo.
4. Reguliariai atlikti siurblių techninės būklės monitoringą ir hidraulinių kreivių tikrinimą. Valdymo paklaidos analizė parodė, kad siurblių nusidėvėjimas reikšmingai iškreipia hidraulines charakteristikas. Rekomenduojama kas 24 mėn. atlikti darbo kreivių peržiūrą, guolių būklės vertinimą, išsamią vibracijų diagnostiką ir darbo taško palyginimą su nominaliomis reikšmėmis, siekiant išvengti neplanuotų prastovų.
5. Įvertinti galimybę diegti didesnės galios siurblius (pvz., iki 1 MW), atlikus specializuotą sistemos apkrovų ir galios poreikio analizę. Tokiu vertinimu galima nustatyti, ar padidintos galios siurbliai suteiktų papildomą energinį ar ekonominį efektą, nepažeisdami sistemos hidraulinės pusiausvyros ir infrastruktūros ribų.
6. Atlikti integruotą visos aušinimo sistemos analizę ir diegti skaitmeninio dvynio sprendimus, apimančius aušinimo bokštų, šilumokaičių ir siurblių valdymą realiuoju laiku. Rekomenduojama kompleksiskai vertinti visą aušinimo grandinę pagal debitą, slėgį, sistemos vandens bei lauko temperatūrą, drėgnumą, nes tarpusavio sąveika lemia bendrą energijos vartojimo efektyvumą. Siekiant užtikrinti optimalų sistemos darbą, tikslinga kurti skaitmeninį dvynį, leidžiantį modeliuoti hidraulinius ir šilumos mainų procesus, prognozuoti apkrovų svyravimus ir identifikuoti neefektyvumo taškus.

Šios rekomendacijos pateikiamos įmonėms, kurios ketina diegti energiją taupančius sprendimus savo aušinimo procesuose. Jos naudingos pramonės įmonių techniniams specialistams, sprendimus priimančioms vadovams, taip pat projektuotojams ir konsultantams.

Literatūros sąrašas

1. AL-BAHADLY, Ibrahim. Energy Saving with Variable Speed Drives in Industry Applications. Proceedings of the 2007 WSEAS Int. Conference on Circuits, Systems, Signal and telecommunications [interaktyvus]. 2007, 53-58 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/242356388_Energy_Saving_with_Variable_Speed_Drives_in_Industry_Applications
2. SALMASI, Farzin; ABRAHAM, John ir SALMASI, Arian. Evaluation of Variable Speed Pumps in Pressurized Water Distribution Systems. Springer Science and Business Media LLC [interaktyvus]. Applied Water Science, 2022, 1-10 p., ISBN 2190-5487 [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8>
3. Energy Efficiency Directive [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
4. Commission Regulation (EU) No. 547/2012 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/547/oj/eng?.com>
5. Commission Regulation (EU) 2019/1781 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj/eng?.com>
6. LAVRIČ, Henrik; DROBNIČ, Klemen ir FIŠER, Rastko. Energy Efficiency Assessment of Variable Speed Pump Drive in Industrial Cooling System. 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) [interaktyvus]. IEEE, 2020, 261-266 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161666>
7. AI, Chuanxian, YANG, Jinpeng ir CHEN, Rui. Energy-Saving Practice of Variable Frequency Drive Technology in Data Center HVAC System. 2023 5th International Conference on Power and Energy Technology [interaktyvus]. IEEE, 2023, 1-8 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/icpet59380.2023.10367206>
8. Energy Efficiency 2022 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://iea.org/reports/energy-efficiency-2022>
9. Galutinis atnaujintas Lietuvos Respublikos nacionalinio energetikos ir klimato srities veiksmų planas 2021 – 2030 m. [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/LTU/2024/lithuania-updated-final-national-energy-and-climate-plan-necp-2021-2030_24bdf4c5cd33d7d2784e17548476dfb8.pdf?.com
10. SOOBRAYEN, Daren; JAHMEERBACUS, Iqbal; ir CAREMBEN, Paramasiven. Comparative Study of Throttling and Variable Speed Drive Operation of Parallel Pumps for Cooling Stations in Sugar Production. 2022 4th International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering [interaktyvus]. IEEE, 2022, 1-6 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/elecom54934.2022.9965256>
11. WENZEL, Paula M.; FENSTERLE, Eva; ir RADGEN, Peter. Catalyzing Cooling Tower Efficiency: A Novel Energy Performance Indicator and Functional Unit Including Climate and Cooling Demand Normalization [interaktyvus]. MDPI, 2023, 1-24 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su152115454>
12. GENG, Hanfei; SUN, Yi; LI, Yuanzhe; LENG, Jichao; ZHU, Xiangyu ir kt. TESLA: Thermally Safe, Load-Aware, and Energy-Efficient Cooling Control System for Data Centers [interaktyvus].

- ACM, 2024, 939-949 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1145/3673038.3673144>
13. HU, Shiyuan; GAO, Jinliang; ZHONG, Dan; WU, Rui ir LIU, Luming. Real-Time Scheduling of Pumps in Water Distribution Systems Based on Exploration-Enhanced Deep Reinforcement Learning [interaktyvus]. MDPI, 2023, 1-13 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/systems11020056>
 14. ZHANG, Haizhen; WANG, Mingxiao; ZHENG, Wenguang; LUO, Chengxin; LIN, Da ir kt. Optimization of Waste Heat Efficient Utilization Technology of Regional Integrated Energy System [interaktyvus]. IEEE, 2020, 1242-1247 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ispec50848.2020.9351102>
 15. HAILE, Misrak G.; GARAY-MARTINEZ, Roberto ir MACARULLA, Ana M. Review of Evaporative Cooling Systems for Buildings in Hot and Dry Climates [interaktyvus]. MDPI, 2024, 1-21 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/buildings14113504>
 16. AL-BASSAM, E. ir ALASSERI, R. Measurable Energy Savings of Installing Variable Frequency Drives for Cooling Towers' Fans, Compared to Dual Speed Motors [interaktyvus]. Elsevier BV, 2024, 261-266 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.081>
 17. LAVRIČ, Henrik; DROBNIČ, Klemen ir FIŠER, Rastko. Model-Based Assessment of Energy Efficiency in Industrial Pump Systems: A Case Study Approach. [interaktyvus]. MDPI, 2024, 1-30 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/app142210430>
 18. SALAMA, Mohamed A. E.; EL-NAGGAR, Nada M. ir ABU-ZAID, Salama. Energy Saving Analysis for Pump-Motor Set in Water Purification Plant using Variable Speed Drive [interaktyvus]. Scientific Reports, 2024, 1-15 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z>
 19. How Pump Upgrades Can Reduce Energy Costs and Boost Green Credentials [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://ipe-pumps.com/process-equipment/how-pump-upgrades-can-reduce-energy-costs-and-boost-green-credentials/>
 20. Energy-efficient Pumps [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://www.grundfos.com/us/learn/research-and-insights/energy-efficient-pumps?>
 21. Transforming Our World: the 2023 Agenda for Sustainable Development [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
 22. 'Fit For 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
 23. Directive (EU) 2023/1791 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>
 24. Directive (EU) 2023/2413 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
 25. The European Green Deal [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
 26. NEDELICU, Otilia. Industrial Cooling Systems a Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Future Directions [interaktyvus]. 2024, 1-8 p., ISSN 1843-6188 [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.2478/sbeef-2024-0024>

27. LEI, Xiaohui; YANG, Jingren; WANG, Chao; ZHONGZHENG, H. E. ir LIU, Qiaoyin. Research on Efficiency Simulation Model of Pumping Stations Based on Data-Driven Methods [interaktyvus]. Elsevier BV, 2024, 2773-2785 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.048>
28. WERBINSKA-WOJCIECHOWSKA, Sylwia ir ROGOWSKI, Rafal. Proactive Maintenance of Pump Systems Operating in the Mining Industry – A Systematic Review [interaktyvus]. MDPI, 2025, 1-61 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s25082365>
29. WICHOWSKI, Piotr; KALENIK, Marek; LAL, Agnieszka; MORAWSKI, Dariusz ir CHALECKI, Marek. Hydraulic and Technological Investigations of a Phenomenon Responsible for Increase of Major Head Losses in Exploited Cast-Iron Water Supply Pipes [interaktyvus]. MDPI, 2021, 1-19 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s25082365>
30. JIA, Lizhi; WEI, Shen ir LIU, Junjie. A Review of Optimization Approaches for Controlling Water-Cooled Central Cooling Systems [interaktyvus]. Elsevier BV, 2021, 1-14 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108100>
31. SALAMA, Mohamed A. E.; EL-NAGGAR, Nada M. ir ABU-ZAID, Salama. Energy Saving Analysis for Pump-Motor Set in Water Purification Plant using Variable Speed Drive [interaktyvus]. Scientific Reports, 2024, 1-15 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z>
32. PONTES, Ricardo F. F.; PINTO, José M. ir SILVA, Evelin K. G. Optimal Design and Operation of Cooling Water Pumping Systems [interaktyvus]. Elsevier BV, 2021, 1-16 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107581>
33. KOJOK, Farah; FARDOUN, Farouk; YOUNES, Rafic ir OUTBIB, Rachid. Hybrid Cooling Systems: A Review and an Optimized Selection Scheme [interaktyvus]. Elsevier BV, 2016, 57-80 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.092>
34. HUANG, Qian; ZHI, Yifan; ZHANG, Rongyong; WEI, Huimin ir XU, Lei. Comprehensive Comparison of Hybrid Cooling of Thermal Power Generation with Airside Serial and Parallel Heat Exchange [interaktyvus]. MDPI, 2022, 1-28 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en15176478>
35. TSOY, Alexandr; GRANOVSKIY, Alexandr; KORETSKIY, Dmitriy; TSOY-DAVIS, Diana; VESELSKIY, Nikita ir kt. Experimental Study of the Heat Flow and Energy Consumption during Liquid Cooling due to Radiative Heat Transfer in Winter [interaktyvus]. MDPI, 2023, 1-19 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en16134865>
36. CORTINOVIS, Giorgia F.; RIBEIRO, Marcelo T.; PAIVA, José L.; SONG, Tah W. ir PINTO, José M. Integrated Analysis of Cooling Water Systems: Modeling and Experimental Validation [interaktyvus]. Elsevier BV, 2009, 3124-3131 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.04.008>
37. AL-WAKED, Rafat ir BEHNIA, Masud. CFD Simulation of Wet Cooling Towers [interaktyvus]. Elsevier BV, 2005, 382-395 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.06.018>
38. DIRAWI, Hazim; WANG, Qiliang; HU, Mingke; SU, Yuehong ir RIFFAT, Saffa. A Hydronic Closed-Loop Photovoltaic Cooling System Designed for Hot and Arid Regions: Performance Evaluation and Degradation Rate/Lifetime Analysis [interaktyvus]. Elsevier BV, 2024, 1-13 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123999>

39. Variable Frequency Drives and Energy Savings [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: <https://vfd.com/wp-content/uploads/VFD-White-Paper.pdf>
40. Affinity Laws for Pumps: Principles, Formulas [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-12-05] Prieiga per: https://www.engineeringtoolbox.com/affinity-laws-d_408.html
41. MENKE, Ruben; ABRAHAM, Edo ir STOIANOV, Ivan. Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling [interaktyvus]. ASCE, 2016, 199-209 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479858.022>
42. HAJGATÓ, Gergely; PAÁL, György ir GYIRES-TÓTH, Bálint. Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization of Pumps in Water Distribution Systems [interaktyvus]. ASCE, 2020, 1-12 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001287](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001287)
43. ALVES DE ARAUJO JUNIOR, Carlos A.; MAURICIO VILLANUEVA, Juan M.; ALMEIDA, Rodrigo J. S. D. ir AZEVEDO DE MEDEIROS, Isaac E. Digital Twins of the Water Cooling System in a Power Plant Based on Fuzzy Logic [interaktyvus]. MDPI, 2021, 1-22 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s21206737>
44. HATAMIPOUR, M. S.; MAHIYAR, H. ir TAHERI, M. Evaluation of Existing Cooling Systems for Reducing Cooling Power Consumption [interaktyvus]. Elsevier BV, 2007, 105-112 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.007>
45. Cooling Towers Redefined for UK Chemical Manufacturer [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: <https://share.google/QhblZF5kwUFqWEXR2>
46. SOOBRAYEN, Daren; JAHMEERBACUS, Iqbal ir CAREMBEN, Paramasiven. Comparative Study of Throttling and Variable Speed Drive Operation of Parallel Pumps for Cooling Stations in Sugar Production [interaktyvus]. IEEE, 2022, 1-6 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/elecom54934.2022.9965256>
47. BREY, Tom; LEMBKE, Pamela; PRISCO, Joe; ABBOTT, Ken; EMERSON, Dominic ir kt. Case Study: The Roi of Cooling System Energy Efficiency Upgrades [interaktyvus]. The Green Grid, 2011, 1-42 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: https://www.energystar.gov/sites/default/files/asset/document/CaseStudy_TheROIofCoolingSystemEnergyEfficiencyUpgrades.pdf
48. Five Keys to Understanding Parallel Pump Optimization [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://www.pumps.org/2022/06/15/five-keys-to-understanding-parallel-pump-optimization/>
49. Real Time Electricity Production Emissions by Country [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://www.nowtricity.com/country/lithuania/>
50. Conversion Guidelines Greenhouse Gas Emissions [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://www.eeagrants.gov.pt/media/2776/conversion-guidelines.pdf>
51. EU greenhouse gas footprint [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-11-30] Prieiga per: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250219-1>
52. GORDIC, Dusan; NIKOLIC, Jelena; VUKASINOVIC, Vladimir; JOSIJEVIC, Mladen ir ALEKSIC, Aleksandar D. Offsetting Carbon Emissions from Household Electricity Consumption in Europe [interaktyvus]. Elsevier BV, 2023, 1-9 p. [žiūrėta 2025-12-01] Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>

Priedai

1 priedas. Aušinimo sistemos eksploatacinė analizė

Report of SES System Efficiency Service



For:

Measurement period: 18.06.2024 – 02.07.2024

By:

Date: 16.09.2024, rev. 0

Plant: River Water for

Plant

7x 630 kW Split Case Pump (Russian Type)

4x 315 kW Split Case Pump (Russian Type) (Not measured)

1 All results at a glance

Plant	Water Supply
Installed pumps	7x 630 kW Split Case Pump (Russian Type), 630 kW Motor, fix speed 4x 315 kW Split Case Pump (Russian Type) (Not measured), 315 kW Motor, fix speed
Goal of measurement	- Identification of the operating range and characteristics of pumps - Identification of the plant characteristic curve - Identification of the efficiency and mechanical condition of the pumps - Identification of possible energy saving potential
Measurement period	18.06.2024 – 02.07.2024
Notes	Assumption: The operating conditions are representative and represent the entire system operation. Deviations must be checked by the customer before implementation.
Current plant status	3 – 4 NDS-22 pumps were running at the same time; in some cases, a smaller pump was used in addition to 2 or 3 big pumps during the measurement - Two operating conditions identified: ➔ Power Plant is off: 3 big pumps and 1 small pump in parallel operation with a discharge pressure at around 5,0 to 5,1 bar and a flow of around 10.500 – 12.000 m³/h ➔ Power Plant is on: 4 big pumps in parallel operation with a discharge pressure at around 4,6 to 4,8 bar and a flow of around 14.500 – 15.500 m³/h (max. flow during measurement: 15.331 m³/h)
Condition of pumps	- Pumps operating in normal operation➔ efficiency ~70-80 % - Hydraulically, all pumps are operating below the design point -> Some wear is to be expected - Mechanically, there are some issues regarding the norm DIN ISO 13373-3, but there was nothing noticeable in the spectrums --> details in the following chapters P1: Non-Driven-End (NDE) + Motor NDE P4: NDE + Motor NDE P5: DE + Motor DE

Aggregates	Hydraulic condition	Operating area [Q/Q _{opt}]	Efficiency [η_{max}]	Vibration bearing pump	Vibration bearing motor
P1					
P4					
P5					
P6					

2 priedas. Droseliavimo bandymo metu ŠVS-1 siurblio nustatyti darbiniai parametrai

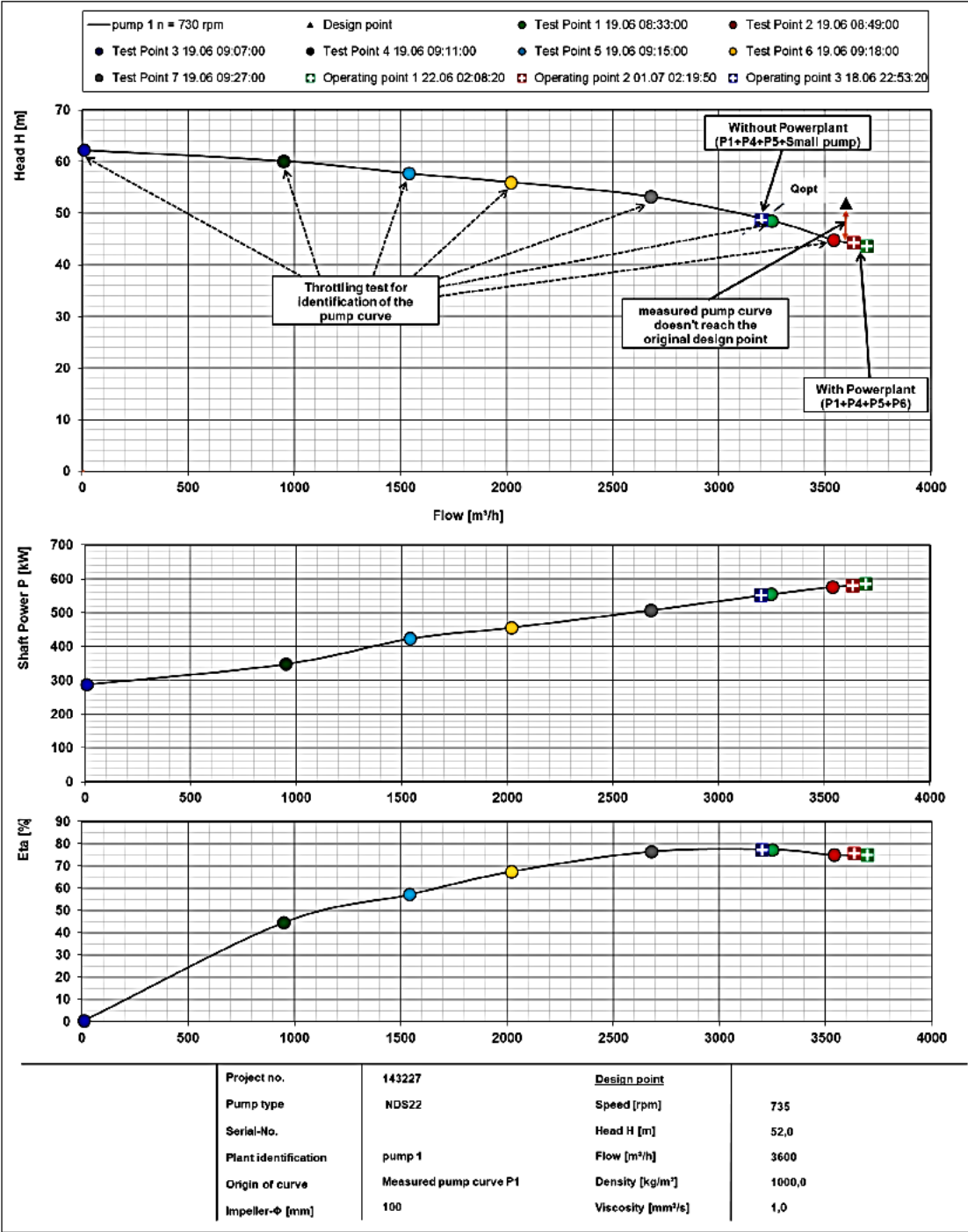


Figure 3: operating points for Pump 1

3 priedas. ASS-2 siurblio nustatyti darbiniai parametrai

4 Remarks

4.1 Operation of small pump

Notes operation	- During operation without Power Plant there are 3 big pumps (NDS-22) running together with one small pump (See pump curve below) - Due to higher head of the small pump, the pump is operated in heavy overload (is forced to deliver the same head as the bigger pumps) → Efficiency is therefore bad: 70 – 75 % → Probably even worse due to wear
-----------------	--

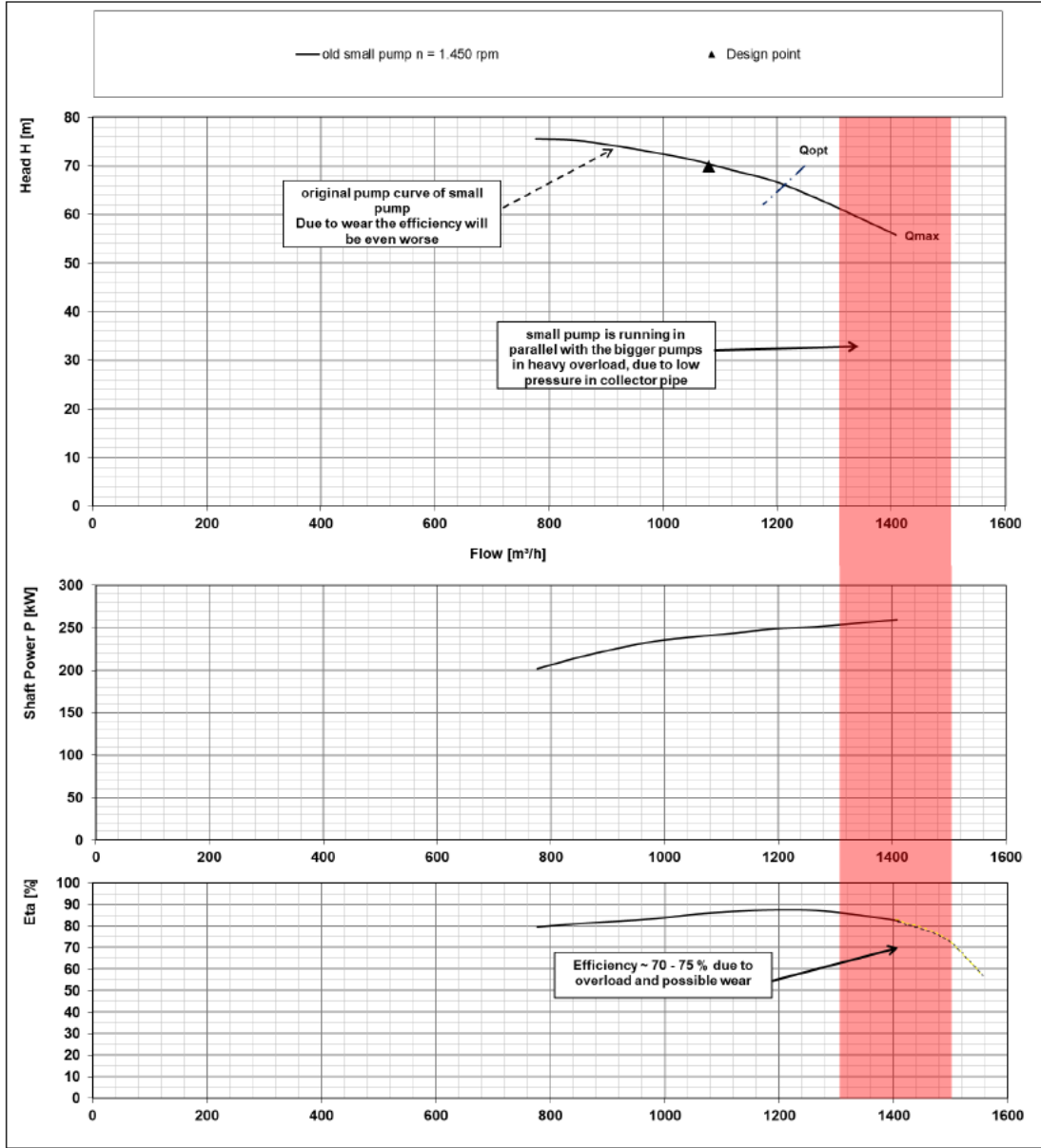
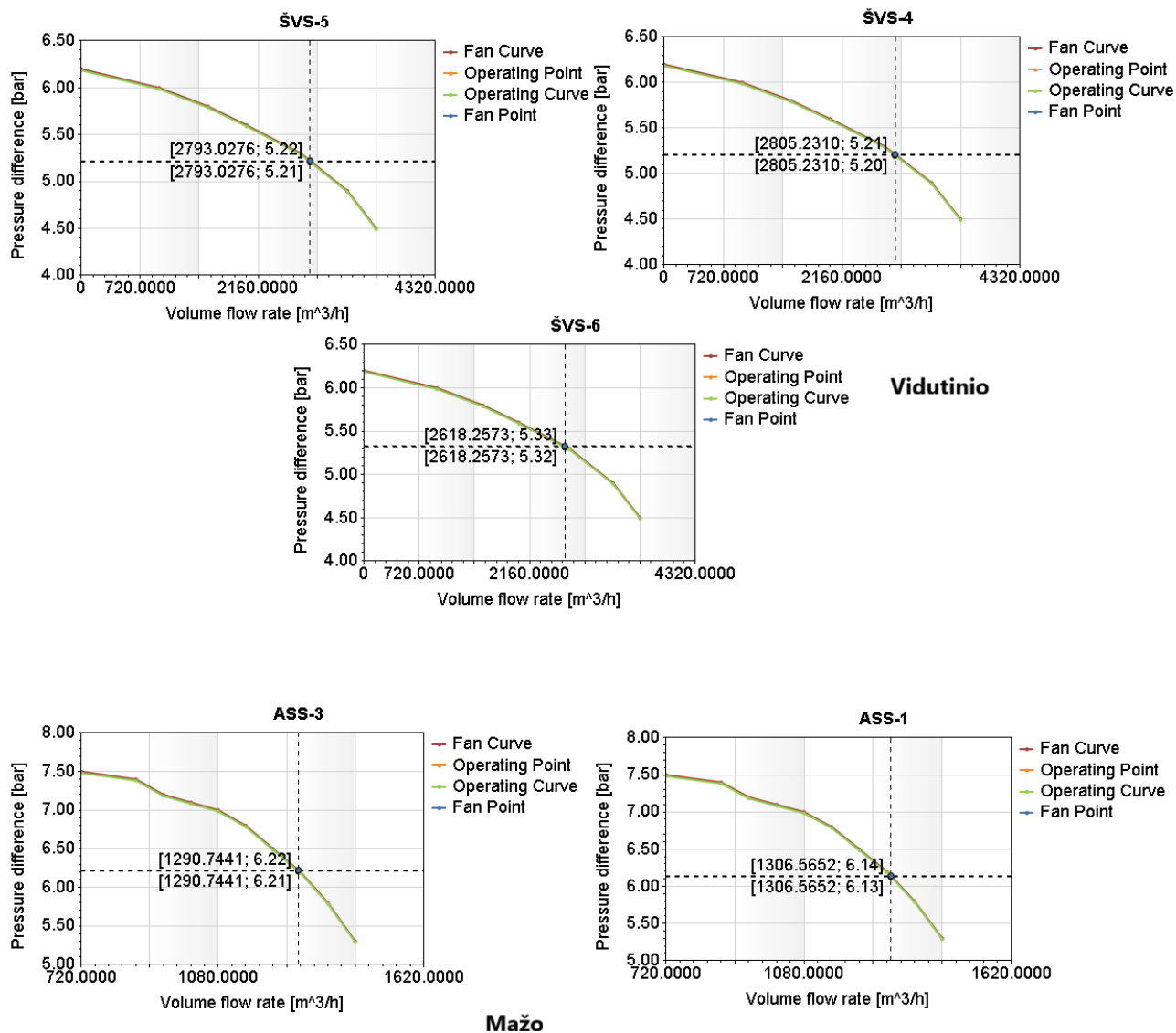


Figure 7 Pump Curve of Smaller pump (1080 m³/h @ 70 m) which operates sometimes in parallel with the big NDS-22 pumps

4 priedas. Esamos sistemos vidutinio ir mažo debito režimo siurblių darbo kreivės



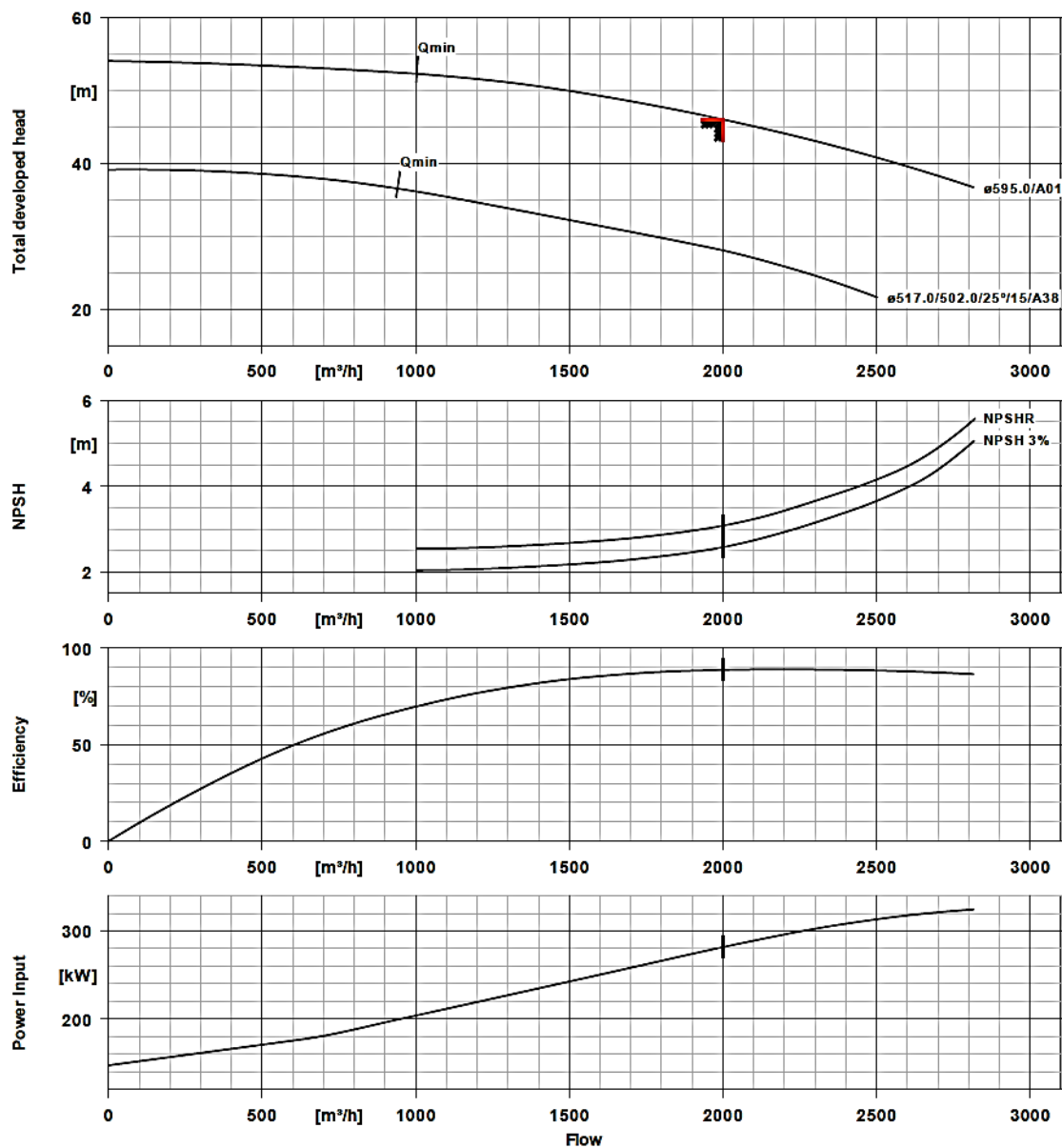
5 priedas. Naujo mažo siurblio darbo parametrų kreivės

Customer pos. no.:
Inquiry date: 2024-09-02
Inquiry no.: Small pumps variable speed
Quantity: 1,000

Number: 4005489662 - FI5
Line: 000100
Date: 2024-09-02
Page: 8 / 18

RDLO 400-580 A GB G F

Version no.: 2



Curve data

Speed of rotation	928 rpm	Efficiency	88.7 %
Fluid density	998 kg/m³	Power absorbed	281.72 kW
Viscosity	1.00 mm²/s	NPSHR	3.08 m
Flow rate	2000.00 m³/h	NPSH 3%	2.58 m
Requested flow rate	2000.00 m³/h	Curve number	K1387.36/5
Total developed head	46.00 m	Effective impeller diameter	595.0 mm
Requested developed head	46.00 m	Acceptance standard	tolerances to ISO 9906 1U

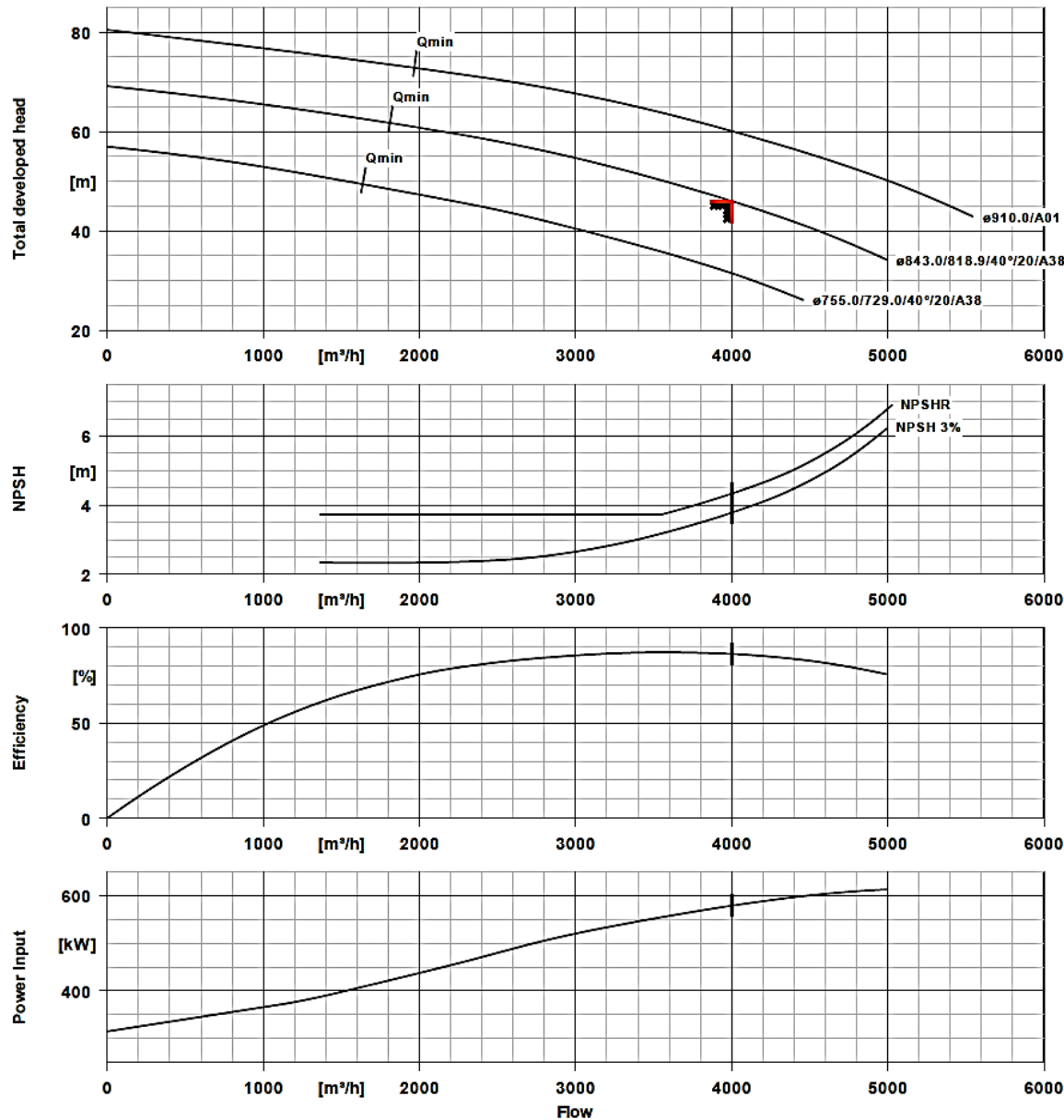
6 priedas. Naujo didžiojo siurblio darbo parametrų kreivės

Customer pos. no.:
Inquiry date: 2024-04-05
Inquiry no.: Vandens siurblys 630kW
Quantity: 2,000

Number: 4005346123 - FI5
Line: 000300
Date: 2024-04-05
Page: 10 / 22

RDLO 500-860 A GB G F

Version no.: 3



Curve data

Speed of rotation	745 rpm	Efficiency	86.5 %
Fluid density	998 kg/m³	Power absorbed	579.38 kW
Viscosity	1.00 mm²/s	NPSHR	4.34 m
Flow rate	4000.00 m³/h	NPSH 3%	3.78 m
Requested flow rate	4000.00 m³/h	Curve number	K1387.20/6
Total developed head	46.00 m	Effective impeller diameter	819.0 mm
Requested developed head	46.00 m	Acceptance standard	ISO 9906 1U

7 priedas. Perskaičiuoti mažojo siurblio su dažnio keitikliu darbiniai parametrai pagal siurblių giminingumo dėsnius.

Q m3/h	P bar	RPM	Greičio procentas	Galios koeficientas
0.0	5.9	928.0	100%	1.0
250.0	5.8	928.0	100%	1.0
500.0	5.7	928.0	100%	1.0
750.0	5.6	928.0	100%	1.0
1000.0	5.4	928.0	100%	1.0
1250.0	5.2	928.0	100%	1.0
1500.0	5.0	928.0	100%	1.0
1750.0	4.8	928.0	100%	1.0
2000.0	4.6	928.0	100%	1.0
2250.0	4.4	928.0	100%	1.0
2500.0	4.1	928.0	100%	1.0
2750.0	3.7	928.0	100%	1.0
0.0	5.325	881.6	95%	0.8574
237.5	5.234	881.6	95%	0.8574
475.0	5.144	881.6	95%	0.8574
712.5	5.054	881.6	95%	0.8574
950.0	4.874	881.6	95%	0.8574
1187.5	4.693	881.6	95%	0.8574
1425.0	4.512	881.6	95%	0.8574
1662.5	4.332	881.6	95%	0.8574
1900.0	4.151	881.6	95%	0.8574
2137.5	3.971	881.6	95%	0.8574
2375.0	3.7	881.6	95%	0.8574
2612.5	3.339	881.6	95%	0.8574
0.0	4.779	835.2	90%	0.729
225.0	4.698	835.2	90%	0.729
450.0	4.617	835.2	90%	0.729
675.0	4.536	835.2	90%	0.729
900.0	4.374	835.2	90%	0.729
1125.0	4.212	835.2	90%	0.729
1350.0	4.05	835.2	90%	0.729
1575.0	3.888	835.2	90%	0.729
1800.0	3.726	835.2	90%	0.729
2025.0	3.564	835.2	90%	0.729
2250.0	3.321	835.2	90%	0.729
2475.0	2.997	835.2	90%	0.729
0.0	4.263	788.8	85%	0.6141
212.5	4.19	788.8	85%	0.6141
425.0	4.118	788.8	85%	0.6141
637.5	4.046	788.8	85%	0.6141
850.0	3.902	788.8	85%	0.6141
1062.5	3.757	788.8	85%	0.6141
1275.0	3.612	788.8	85%	0.6141
1487.5	3.468	788.8	85%	0.6141
1700.0	3.323	788.8	85%	0.6141
1912.5	3.179	788.8	85%	0.6141
2125.0	2.962	788.8	85%	0.6141
2337.5	2.673	788.8	85%	0.6141

8 priedas. Modernizuotos sistemos mažo, vidutinio ir didelio debito režimo siurblių darbo kreivės

