



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Atliekinės šilumos atgavimas CO₂ šaldymo sistemose
Baigiamasis magistro projektas

Jevgenijus Laurinavičius
Projekto autorius

doc. dr. Algimantas Balčius
Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Atliekinės šilumos atgavimas CO₂ šaldymo sistemose

Baigiamasis magistro projektas

Termoinžinerija (6211EX023)

Jevgenijus Laurinavičius

Projekto autorius

doc. dr. Algimantas Balčius

Vadovas

doc. dr. Liutauras Vaitkus

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Jevgenijus Laurinavičius

Atliekinės šilumos atgavimas CO₂ šaldymo sistemose

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.

Jevgenijus Laurinavičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui – Jevgenijus Laurinavičius

1. Projekto tema

Atliekinės šilumos atgavimas CO₂ šaldymo sistemose

(Lietuvių kalba)

Waste Heat Recovery in CO₂ Refrigeration Systems

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: ištirti CO₂ šaldymo sistemų atliekinės šilumos panaudojimo procesus.

Uždaviniai:

- Literatūros šaltinių apžvalga.
- Teorinė atliekinės šilumos atgavimo procesų analizė.
- Atliekinės šilumos panaudojimo atvejų analizė.
- Skirtingų šaldymo sistemų efektyvumo palyginamoji analizė.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Darbas turi atitikti KTU ir fakulteto baigiamųjų magistro projektų rengimo ir apiforminimo reikalavimus.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma.

Projekto autorius	Jevgenijus Laurinavičius	2024-02-29
	(Vardas, Pavardė)	(Parašas) (Data)
Projekto vadovas	Algimantas Balčius	2024-02-19
	(Vardas, Pavardė)	(Parašas) (Data)
Krypties studijų programų vadovas	Algimantas Balčius	2024-02-19
	(Vardas, Pavardė)	(Parašas) (Data)

Laurinavičius Jevgenijus. Atliekinės šilumos atgavimas CO₂ šaldymo sistemose. Magistro baigiamasis projektas, vadovas doc. dr. Algimantas Balčius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: CO₂ šaldymo sistemų atliekinės šilumos atgavimas, šilumokaičiai, akumuliacinės talpos, CO₂ šaldymo sistemų duomenų analizė, CO₂ šaldymo sistemų atliekinės šilumos kiekių tyrimas.

Kaunas, 2024. 66 p.

Santrauka

Magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti atliekinės šilumos atgavimą šaldymo sistemose veikiančiuose su CO₂ šaltnešiu. Projekte pagrindinis dėmesys skiriamas šaldymo procesų energijos vartojimo efektyvumo analizei maisto prekių parduotuvėje. Šaldymas parduotuvės mastu sunaudoja didžiausią dalį elektros energijos iš visų joje įdiegtų sistemų. ES mastu šildymo energijos poreikiams yra sunaudojama apie 50% visų energetinių resursų. Šio darbo tikslas buvo parodyti dar nepilnai išnaudotus atliekinės šilumos kiekius esančius miesto apsuptyje šalia gyvenamųjų namų ir CŠT tinklų. Panaudojant unikalias CO₂ šaltnešio termodinamines savybes kuomet galima valdyti nepriklausomai slėgį ir temperatūrą virškritiniame cikle buvo matematinio modeliavimo būdu nustatyta, kad žiemos metu šaldymo sistemą galima išnaudoti daug efektyviau pervedant ją į šilumos siurblio režimą, kuriame nepaisant sumažėjusio šaldymo efektyvumo, šildymo efektyvumas gali viršyti COP = 5,7 ir atgauta atliekinė šiluma ženkliai prisideda prie parduotuvės šildymo sistemos. Atgautos atliekinės šilumos savikaina šiuo atveju yra mažesnė nei tiekama iš CŠT. Modeliavimo duomenys patvirtino realiai veikiančių maisto prekių parduotuvių stebėjimo duomenų analizę iš kurios tapo aišku, kad atliekinė šiluma šaltuoju metų laikotarpiu galima atgauti iki 236% daugiau nei sunaudota elektros energijos šalčio gamybai. Šios atgautos šilumos kiekio nepakanka visiems parduotuvės šilumos poreikiams padengti, trūkumas sudaro 132% šalčiausią metų mėnesį ir gali būti dar didesnis poreikis nukritus aplinkos temperatūrai. Analizės metu buvo rasta, kad 6-iose parduotuvėse instaliuotos šaldymo sistemos pilna galia, žiemos laikotarpiu vidutiniškai veikė tik 18% viso paros laiko, o metų bėgyje buvo užfiksuotas vidutiniškai tik 21% šaldymo sistemos apkrovimas. Analizės duomenys parodė, kad mažinant šaldymo sistemos prastovas žiemos metu galima patenkinti didžiąją dalį jos šildymo poreikio, o prijungus parduotuvę prie CŠT visiškai subalansuoti šį trūkumą, papildomai vasarą parduotuvė galėtų tiekti perteklinę atliekinę šilumą į CŠT miesto reikmėms.

Laurinavičius Jevgenijus. Waste Heat Recovery in CO₂ Refrigeration Systems. Master's Final Degree Project, supervisor doc. dr. Algimantas Balčius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: CO₂ cooling systems waste heat recovery, heat exchangers, thermal energy storage tanks, CO₂ cooling systems in supermarkets analysis, CO₂ cooling system waste heat quantity investigation.

Kaunas, 2024. 66 pages.

Summary

The aim of the Master's thesis is to investigate waste heat recovery in refrigeration systems operating with CO₂ refrigerant. The project focuses on the analysis of the energy efficiency of refrigeration processes in a grocery store. The refrigeration at the store level consumes the largest share of electricity of all the systems installed in the store. At EU level, heating energy needs account for about 50% of the total energy resources. The aim of this work was to show the still under-utilised waste heat located in the urban surroundings close to residential buildings and CHP networks. Using the unique thermodynamic properties of the CO₂ refrigerant, where pressure and temperature can be controlled independently in a supercritical cycle, it was found by mathematical modelling that the refrigeration system can be utilised much more efficiently in winter by switching to heat pump mode, where, despite the reduction in refrigeration efficiency, the heating efficiency can be in excess of COP = 5.7, and the recovered residual heat contributes significantly to the shop heating system. The cost of the recovered waste heat in this case is lower than that of the CHP supply. The simulation data was confirmed by analysis of real grocery store monitoring data, which showed that waste heat can be recovered during the cold season up to 236% more than the amount of electricity used to produce the cold. This heat recovery is insufficient to cover all the store's heat needs, with a shortfall of 132% in the coldest month of the year, and potentially even higher needs when ambient temperatures drop. The analysis found that the refrigeration systems installed in the 6 stores were operating at full capacity, on average only 18% of the time during the winter period, and only 21% of the refrigeration load was recorded on average during the year. The analysis showed that by reducing the downtime of the refrigeration system during the winter, most of its heating demand could be met, and by connecting the shop to the CHP to fully balance this shortfall, the shop could additionally supply excess waste heat to the CHP in the summer to serve the city needs.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Pasaulinės praktikos apžvalga.....	13
2. Šaldymo raida ir tendencijos	14
3. Apie atliekinės šilumos atgavimą	17
4. Transkritinės CO ₂ šaldymo sistemos modeliavimas.....	31
5. Realios atliekinės šilumos atgavimo sistemos analizė.....	38
6. Atliekinės šilumos ateities perspektyvos.....	55
Išvados	57
Literatūros sąrašas	60
Informacijos šaltinių sąrašas	62
Priedai.....	63

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pasirinktos šaldymo sistemos termodinaminių ciklų ir komponentų išsklotinė.. ..	32
2 lentelė. Atliekinės šilumos atgavimo efektyvumo skaičiavimai žiemos sezono metu.....	35
3 lentelė. Atliekinės šilumos atgavimo potencialo ekonominis vertinimas.. ..	36
4 lentelė. Rekomenduojamos šilumnešio temperatūros įvairiems šildymo poreikiams.. ..	46

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Žemo potencialo atliekinės šilumos kiekiai pagal sektorius Europoje.....	12
2 pav.	Šaldymo agentų kvotų mažinimo mechanizmas ES	14
3 pav.	Plokštelių šilumokaičių palyginimas su gaubtiniais	17
4 pav.	Temperatūros grafikai termofikatui tekant priešpriešiniu ir lygegrečiu srautu.....	18
5 pav.	Didelis temperatūrų skirtumas lemia mažą teta (kairėje) ir atvirkščiai	19
6 pav.	Plokštelinio šilumokaičio plokštelės sandara	19
7 pav.	Plokštelinio šilumokaičio plokštelių tipai	20
8 pav.	Plokštelinio šilumokaičio kanalų šilumos mainų profiliai	20
9 pav.	Slėgių nuostolių atvaizdavimas šilumokaičio kanaluose	22
10 pav.	Plokštelinio šilumokaičio šilumos mainų atvaizdavimas.....	22
11 pav.	Akumuliacinė talpa sujungta su išorėje sumontuotu šilumokaičiu vaizdas	24
12 pav.	Akumuliacinė talpa su viduje sumontuotu šilumokaičiu ir pajungimo schema.....	25
13 pav.	Dalinio šilumos atgavimo schema, schema su triegiu vožtuvu.....	26
14 pav.	Atliekinės šilumos atgavimo schema su dvejomis akumuliacinėmis talpomis.....	27
15 pav.	Bendra dalinio šilumos atgavimo schema	28
16 pav.	Slėgių – entalpijos diagrama CO ₂ šaldymo sistemai su 74% ir 100% AŠ atgavimu	29
17 pav.	Pilnas atliekinės šilumos atgavimo būdas su viena akumuliacine talpa.....	30
18 pav.	Principinės nagrinėjamos šaldymo sistemos su lygiagrečiu kompresoriumi schema	31
19 pav.	Slėgio – entalpijos diagrama tiriamos šaldymo sistemos.....	32
20 pav.	Slėgio – entalpijos diagrama atvaizduojanti optimalaus dujų aušyklės slėgio nustatymą ...	33
21 pav.	Sumodeliuotų šilumos atgavimo kiekių palyginimas prie skirtingų aušinimo slėgių	34
22 pav.	Modeliavimo rezultatų grafinis atvaizdavimas	36
23 pav.	Šilumokaičio įtekančių ir ištekančių srautų temperatūrų rekomendacijos.....	37
24 pav.	Parduotuvės šaldymo ciklo log p–h diagrama.....	39
25 pav.	Parduotuvės principinės šaldymo schemas resyverio pajungimo detalizacija.....	40
26 pav.	Parduotuvės principinės šaldymo schemas aukšto spaudimo linijos detalizacija.....	42
27 pav.	Kompresoriaus galių palyginimas prie skirtingų darbo režimų	44
28 pav.	Šilumos atgavimo sistemos veikimo logikos schema	45
29 pav.	ŽT linijos palyginamasis energijos sąnaudų kitimo grafikas dviejose parduotuvėse	48
30 pav.	6-ių parduotuvių energijos sąnaudų kitimo grafikas	49
31 pav.	6-ių parduotuvių šaldymo sistemos apkrovos grafikas	50
32 pav.	Grafinis atvaizdavimas apie oro temperatūros kitimą 2023 metų Spalį – Balandį	51
33 pav.	Parduotuvėje atgautos AŠ ir nupirktos šilumos kiekiai.....	52
34 pav.	AŠ ir nupirktos šilumos kiekiai perskaičiuoti pagal mėnesio dienų skaičių	53
35 pav.	Principinė schema atliekinės šilumos perdavimui į CŠT	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

AŠ – atliekinė šiluma;

AŠAS – atliekinės šilumos atgavimo sistema;

AT – akumuliacinė talpa;

ŠS – šilumos siurblys;

DSH – šilumokaitis perkaitintojas (angl. Desuperheater);

COP – efektyvumo koeficientas (angl. Coeficient Of Performance);

CŠT – centriniai šilumos tinklai;

5G – 5 kartos žematemperatūriniai šilumos tinklai;

TRV – termo reguliacinis vožtuvas;

AT – aukštos temperatūros;

VT – vidutinės temperatūros;

ŽT – žemos temperatūros;

VAP – visuotinio atšilimo potencialas;

R744 – CO₂ anglies dvideginis kaip šaltnešis;

Terminai:

Peršaldymas – medžiagos atšaldymas iki temperatūros, žemesnės už pusiausvirojo fazinio virsmo temperatūrą, nesukeliant fazinio virsmo.

Perkaitimas – šis parametras nurodo, kiek papildomai bus perkaitinami šaltnešio garai, kad visas skystas šaltnešys pavirstų garais ir skystas šaltnešis nepatektų į kompresorių.

Ekonomaizeris – šilumokaitis skysčio linijoje skirtas peršaldyti CO₂ dujas mažinantis šaltnešio temperatūrą.

Įvadas

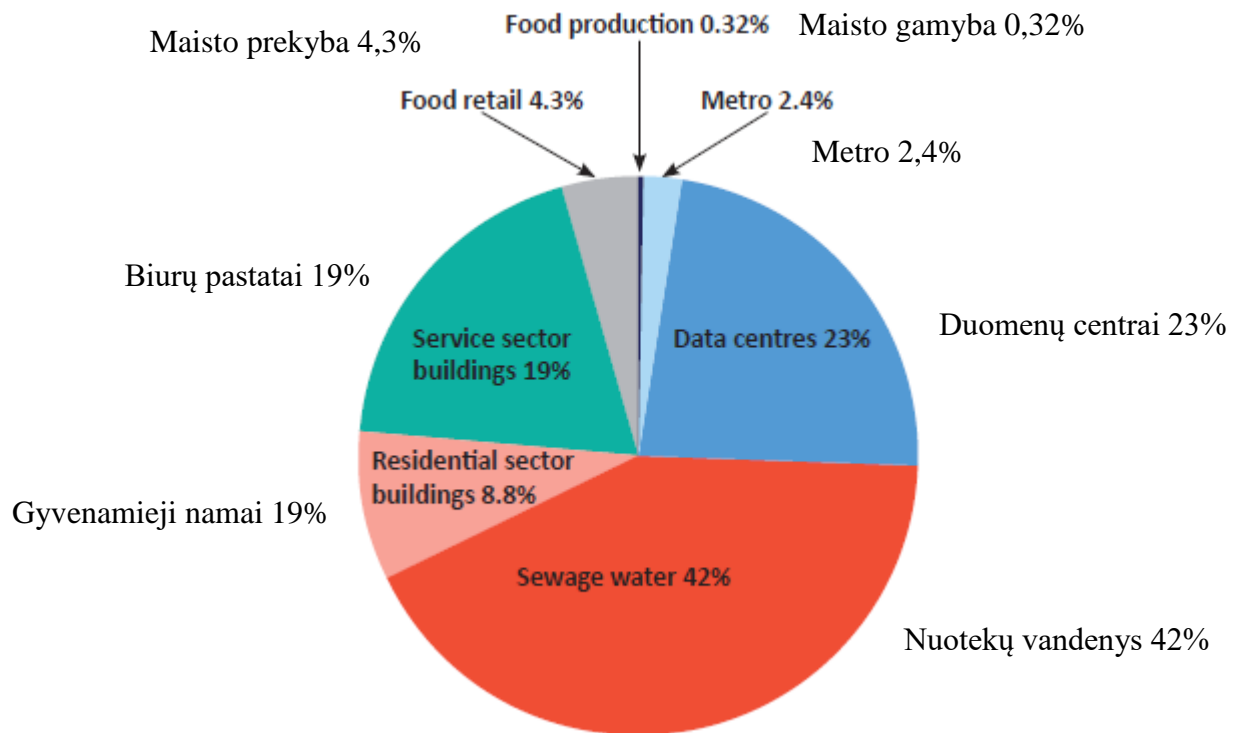
Energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra strateginė Europos Sąjungos energetinės nepriklausomybės strategija. Šaldymo technologijos bendru Europos mastu suvartoja ženklią elektros energijos dalį ir dar didesnius jos kiekius išmeta į atmosferą atliekinės šilumos pavidalu aušindami įrenginius. Šios, žemo potencialo, šilumos antrinis panaudojimas yra svarbi ES vystomos žiedinės ekonomikos dalis, kuri skatina tvariau naudoti energetinius resursus. Pasyvus atmosferos šildymas atliekine šiluma ir sintetinių šaltnešių panaudojimas, kurių VAP aukštas yra pagrindiniai faktoriai, kodėl ES siekia iki 2030 m sumažinti jų kiekį iki 21 %, lyginant su 2016 metais, o 2050 metais visiškai jų atsisakyti, pakeičiant juos išskirtinai natūraliais šaltnešiais R744, R714 ir R290.

Šiame darbe pagrindinis dėmesys skirtas R744 šaltnešiui, nes jis yra nedegus, mažiausiai kenksmingas žmonių sveikatai, todėl gali būti plačiai naudojamas tiek pramonėje, tiek prekybos sferoje be didesnių ribojimų kaip kiti natūralūs šaltnešiai. Vienas didžiausių CO₂ šaldymo agento privalumų yra didelis atliekinės šilumos atgavimo potencialas dėl aukštų temperatūrų suspaudimo linijoje po kompresoriaus. Šios temperatūros yra aukštesnės lyginant su sintetiniais freonais, todėl galima efektyviau kaupti šilumą ir pasiekti aukštesnes temperatūras.

Šildymas yra vienas didžiausių energijos vartotojų. Europoje šildymui tenka daugiau kaip 50 proc. metinio galutinio energijos suvartojimo, o didžioji dalis Europos šilumos vis dar gaminama naudojant iškastinį kurą, iš kurio beveik pusę sudaro gamtinės dujos. Tuo pat metu visos Europos miestų teritorijos turi galimybę naudotis gausiais atliekinės šilumos išteklių. ES yra apie 2 860 TWh per metus atliekinės šilumos, kurios didžiąją dalį būtų galima panaudoti pakartotinai. Vertinant iš perspektyvos, šis skaičius beveik atitinka bendrą ES energijos poreikį šilumos ir karšto vandens gamybai gyvenamuosiuose ir paslaugų sektoriaus pastatuose, kuris ES27 ir Jungtinėje Karalystėje sudaro apie 3180 TWh per metus. Gera žinia yra ta, kad pramonės sektorius turi didžiulį, dar neišnaudotą potencialą. ES sunkiosios pramonės objektų atliekinė šiluma sudaro daugiau kaip 267 TWh per metus. Vertinant iš perspektyvos, tai yra daugiau nei 2021 m. kartu pagaminamos šilumos kiekis Vokietijoje, Lenkijoje ir Švedijoje kartu sudėjus.

Atliekinė šiluma gali būti pakartotinai panaudota naudojant esamas ir gerai patikrintas technologijas, visų pirma, šilumos siurblius. Jie gali panaudoti šilumą iš šaldymo sistemų, esančių duomenų ar prekybos centruose ir konvertuojant ją į reikiamų parametrų termofikata, perduoti jį per CŠT miesto poreikių tenkinimui tiek šildymo, tiek karšto vandens ruošimo sistemoms. Pakartotinis atliekinės šilumos naudojimas padės sumažinti ne tik vartotojų išlaidas, bet ir efektyviau išnaudoti esamus energetinius Žemės resursus. Pakartotinai konvertuoti energiją yra daug pigiau nei ją pirkti ar gaminti iš naujo. Visuomenės lygmeniu, atliekinė šiluma gali pakeisti didelį kiekį elektros energijos, dujų ir kito iškastinio kuro, kurį kitu atveju reikėtų panaudoti šilumai gaminti. Atliekinę šilumą galime įsivaizduoti kaip kambarį, kurio grindys pilnos vieno euro monetų. Mūsų pasirinkimas yra eiti toliau ar pasistengti, pasilenkti ir surinkti pinigus. Dažniausiai, kai kalba pasisuka apie šaldymo sistemų atliekinę šilumą, tai nevyksta. Mes metaforiškai leidžiame pinigams lietus, kai nesistengiame ją pakartotinai panaudoti pastatuose ir pramonėje. Reikia nepamiršti, kad kiekvieną kartą, kai veikia variklis, jis išskiria šilumą. Kiekvienas, kuris yra jautęs šilumą už savo šaldytuvo, gali tai patvirtinti. Maisto produktų laikymas prekybos centrų šaldymo vitrinose ir šaldikliuose sukuria daug atliekinės šilumos. Panašus procesas vyksta ir vėsinant tūkstančius duomenų centrų, kurie atsiranda visame pasaulyje. Šis šilumos perteklius šiuo metu didžiąja dalimi yra išleidžiamas į orą, nesistengiant jo pakartotinai panaudoti.

Šiame darbe pažvelgsime atidžiau į šį paslėptą energijos šaltinį. Koncentruotas dėmesys į mažmeninę maisto prekybos parduotuvėse veikiančias šaldymo sistemas, kurios yra neatsiejama miestų dalis visame pasaulyje. Jie taip pat yra dideli energijos vartotojai. Vidutiniškai prekybos centrai sunaudoja apie 3–4 % per metus pagaminamos elektros energijos. Kaip pavaizduota 1 paveiksle. Europos Sąjungoje per metus mažmeninės maisto produktų prekybos tinklai gali pagaminti iš viso 44 TWh atliekinės šilumos. Nors šis kiekis yra gerokai mažesnis už pramonės objektų, jis prilygsta 2021 m. Čekijoje ir Belgijoje pagamintai šilumai. Be to, prekybos centrų atliekinę šilumą galima labai lengvai panaudoti ir pakartotinai panaudoti pačiuose prekybos centruose karštam vandeniui ruošti, o žiemą dar ir patalpoms šildyti.



1 pav. Žemo potencialo atliekinės šilumos kiekiai pagal sektorius Europoje [30].

Intensyvesnis atliekinės šilumos naudojimas sumažins bendrą energijos poreikį Europos mastu, padidins ekonomikos našumą ir palengvins perėjimą prie ekologiškos energijos vėžių. Tinkamai įdiegtos atliekinės šilumos sistemos paskatins maisto prekių parduotuves jungtis prie CŠT perduodant jiems pertekinę šilumą. Šiame darbe bus atliktas tyrimas ar parduotuvėje sumontuotos šaldymo sistemos galios pakanka jos šilumos poreikiams padengti žiemos metu patalpų šildymui. Pirmą bus išanalizuotas šaldymo sistemos matematinis modelis. Vėliau šis modelis bus palygintas su realiai veikiančia parduotuve. Bus įsigilinta į veikiančios parduotuvės šaldymo sistemos modelį, jos veikimo principą ir valdymo strategiją. Išanalizavus gautus duomenis, bus padarytos išvados kaip padidinti atliekinės šaldymo sistemos potencialą parduotuvės mastu. Šio baigiamojo darbo tikslas yra ištirti CO₂ šaldymo sistemų atliekinės šilumos panaudojimo procesus. Pagrindiniai uždaviniai yra atlikti literatūros šaltinių apžvalgą šia tema, sumodeliuoti atliekinės šilumos atgavimo procesą, atlikti rezultatų analizę. Vėliau atlikti atliekinės šilumos panaudojimo atvejų analizę realiai veikiančių parduotuvių ir atlikti skirtingų šaldymo sistemų efektyvumo palyginamąją analizę.

1. Pasaulinės praktikos apžvalga

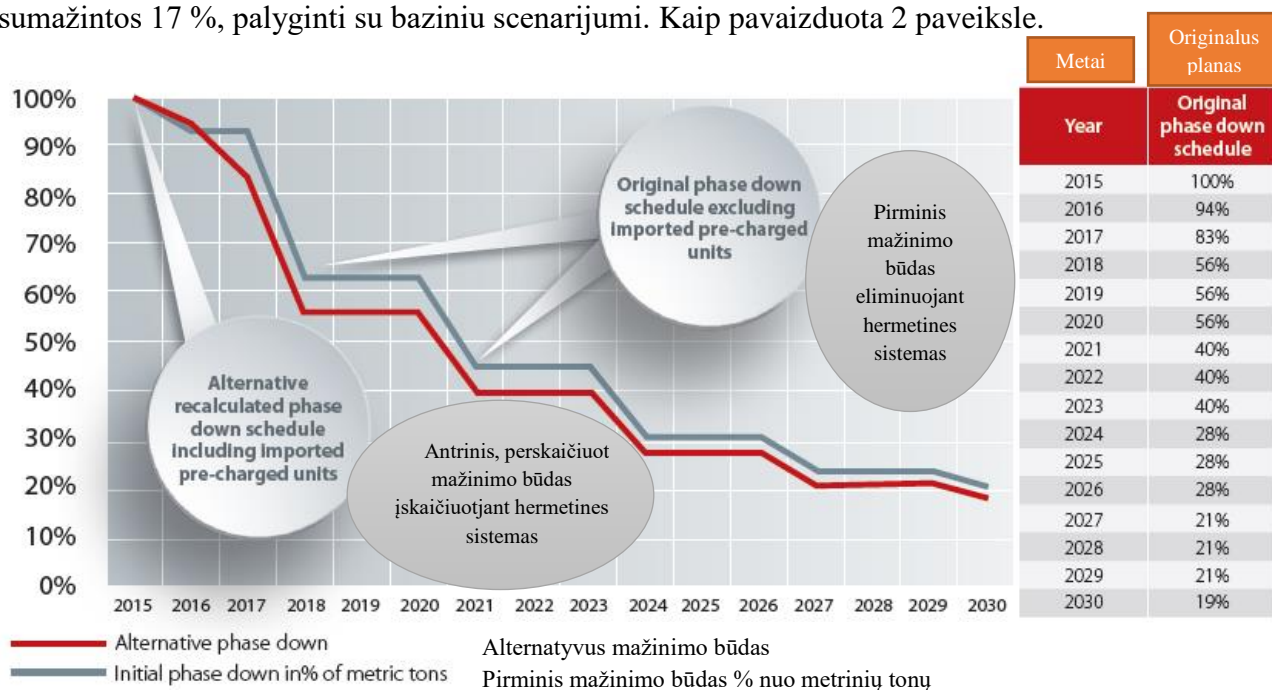
Dideli atliekinės šilumos kiekiai maisto prekių parduotuvėse skatina jos integravimą į patalpų šildymo sistemą. Straipsnyje [1] apžvelgiama Didžiosios Britanijos patirtis. Modeliavimui buvo panaudoti realūs šildymo poreikiai Škotijoje veikiančios parduotuvės. Šilumos atgavimui buvo panaudotas šilumokaitis spaudimo linijoje CO₂ busterinėje šaldymo sistemoje. Atliekinė šiluma buvo kaupiama akumuliacinėse talpose. Šilumos atgavimui buvo pasirinktas transkritinis šaldymo sistemos veikimo režimas, papildomai atliekinės šilumos išeią dirbtinai didinant piko poreikio metu panaudojant dujų aušyklės slėgio valdymą ventiliatoriais, taip didinant arba mažinant slėgį kondensatoriuje – dujų aušyklėje. Tyrimo rezultatai parodė, kad atliekinės šilumos panaudojimas sumažina energijos sąnaudas apie 17–18 % lyginant su tradicine gamtinių dujų šildymo sistema, bet padidina bendrą elektros sunaudojimą apie 2–3 %. Tyrimo metu buvo parodyta, kad šaldymo sistemos generuojamos atliekinės šilumos kiekis yra pakankamas visų parduotuvės patalpų šildymui kyla aplinkos temperatūra yra aukštesnė nei +15 °C. Žemiau šios temperatūros reikia naudoti CŠT tiekimą. Efektyvumo didinimas yra galimas reguliuojant akumuliacinių talpų dydį, parduotuvėje palaikomos temperatūros lygį ne darbo valandomis, tai leistų išlyginti šilumos panaudojimo kreivės pikus ir optimizuoti šaldymo sistemos veikimą. Taip pat šiuo metu yra naudojamas naujas sprendimas montuojant netikrą apkrovą lauke – garintuvą, kuris šaltu metų laiku esant aplinkos temperatūrai iki -7 °C veiks šilumos siurblio principu ir generuos karštus garus parduotuvės šildymui užtikrinti.

Antroje studijoje [2] apžvelgta CO₂ busterinės šaldymo sistemos tyrimą, kuri buvo prijungta prie nuotolinio stebėjimo sistemos. Surinkti realūs duomenys apie spaudimo linijoje sumontuoto šilumokaičio (DSH), skirto atliekinės šilumos atgavimui, įtaką šaldymo sistemos veikimui ir efektyvumui. Duomenys parodė, kad DSH padėjo sumažinti kondensavimosi linijos temperatūrą 10 K, padidinti vidutinių temperatūrų atšakos efektyvumą 8 % ir bendrą šaldymo sistemos efektyvumą (COP) 7 %. Duomenys buvo lyginami su sistema be DSH. Verta paminėti, kad atliekinė šiluma buvo naudojama vandens šildymui. Buvo ištirti keli vandens šildymo režimai 15/25/34 °C ir parodyta, kad didžiausias efektyvumas yra pasiekiamas pašildant vandenį 34 °C, tai aiškiai parodė, kad DSH įtaka šaldymo sistemos efektyvumui yra ženklesnė, kuo sunkesnis sąlygomis veikia šaldymo sistema.

Taip pat apžvelgiau tyrimą [3] apie atliekinės šilumos atgavimą nuo CO₂ šaldymo sistemos, veikiančios transkritiniu režimu ir sumontuotos maisto prekių parduotuvėje Švedijoje Malmo mieste. Tokio tipo objektuose yra didelis šaldymo poreikis ir atitinkamai atliekinės šilumos. Tyrimo metu buvo analizuojama šaldymo sistemos integracija su geoterminiu šilumos kaupikliu, kurio paskirtis yra dviguba: padidinti šilumos gamybą šaltuoju metu laiku ir atlikti papildomą kondensuoto šaltnešio peršaldymą vasaros metu. Sistemoje buvo integruota galimybė perteklinę šilumą parduoti miesto CŠT. Tyrime buvo atlikta jautrumo analizė šilumos poreikiui, gaminamos šilumos kainai ir termofikato temperatūroms CŠT. Rezultatai parodė, kad prekybos centras su instaliuota šilumos atgavimo sistema gali visiškai apsirūpinti šiluma ir papildomai tiekti perteklių į CŠT per metus papildomai gaudamas iki 16 % papildomų pajamų nuo visos per metus sunaudojamo šilumos kiekio. Tyrimo išvados taip pat parodė, kad norit kuo efektyviau išnaudoti atliekinę šilumą šildymo reikmėms, grįžtančio termofikato temperatūra turi būti kuo žemesnė.

2. Šaldymo raida ir tendencijos

Nuo tada, kai Jacobas Perkinsas užpatentavo garų suspaudimo ciklą praėjo beveik du šimtai metų. Garų suspaudimo cikle šaldymo sistemos šilumai iš šaltosios pusės pernešti į karštąją pusę naudojamas šaldymo agentas. Iš pradžių visi šaldymo agentai buvo lengvai gaunami, nes jų buvo gamtoje arba jie jau buvo naudojami pramoniniuose procesuose. XX a. trečiajame dešimtmetyje tapo akivaizdu, kad su daugeliu pirmųjų šaldymo agentų atsiranda saugumo problemos, įskaitant gaisrus ir apsinuodijimus nuotėkio metu. Taip buvo išrasti sintetiniai saugūs šaldymo agentai, vadinami chlorfluorangliavandeniliais (angl. CFC), ir pradėti naudoti pasauliniu mastu. Sintetinių šaldymo agentų kūrimas tęsėsi ir šeštajame dešimtmetyje, kai buvo pradėti naudoti iš dalies chloruoti šaldymo agentai (hidrochlorfluorangliavandeniliai arba angl. HCFC). XX a. septintojo dešimtmečio pradžioje paaiškėjo, kad CFC ir HCFC šaldymo agentai ardo ozono sluoksnį, todėl buvo sukurtas Monrealio protokolas – pasaulinis ozono sluoksnį ardančių medžiagų laipsniško mažinimo mechanizmas, kuris nuo to laiko laikomas pasauliniu laimėjimu mažinant pavojingų cheminių medžiagų kiekį. Pakaitinių šaldymo agentų, vadinamų hidrofluorangliavandeniliais (HFC), OAP lygus nuliui, tačiau jų globalinio atšilimo potencialas (angl. GWP – lietuviškai VAP) yra vidutinis arba didelis, nors vis dar mažesnis nei nebevertojamų CFC. 2015 m. sausio 1 d. buvo įgyvendintas F-dujų reglamentas. Šiuo reglamentu nustatytas laipsniškas HFC mažinimas nuo 2015 m. iki 2030 m., taikant kvotų sistemą ir sektorinius draudimus naudoti didelio VAP šaldymo agentus. Nustatytas kvotų paskirstymo mechanizmas, o pirmasis laipsniško mažinimo etapas įvykdytas 2016 ir 2017 m., kai kvotos buvo sumažintos 17 %, palyginti su baziniu scenarijumi. Kaip pavaizduota 2 paveiksle.



2 pav. Šaldymo agentų kvotų mažinimo mechanizmas ES [21].

Atsižvelgiant į reguliavimo spaudimą atsisakyti didelio VAP šaldymo agentų, siūloma daug alternatyvų, kuriomis būtų galima pakeisti HFC. Iki šiol daugiausia dėmesio buvo skiriama naujoms nesočiosioms fluorocheminėms medžiagoms, dar vadinamoms hidrofluorolefinais (HFO). Jie pasižymi labai mažu VAP lygiu, yra nedegūs arba tik silpnai degūs ir priklauso mažo tankio šaldymo agentų grupei. Daugumai dabartinių šaldymo agentų nėra paprastų mažo VAP sprendimų, nes degumas susijęs su VAP ir šaldymo agento pajėgumu. Kuo mažesnis VAP ir didesnis tankis, tuo didesnis degumas. Didėjant susirūpinimui dėl kenksmingo fluorintų šaldymo medžiagų poveikio

aplinkai, į rinką grįžta natūralios šaldymo medžiagos, ypač NH_3 ir CO_2 , naudojamos pramonėje, žemoje temperatūroje. Natūralūs šaldymo agentai – tai cheminiai produktai, susidarantys gamtoje vykstant biocheminiams procesams, t. y. šių medžiagų yra natūraliai biosferoje. Be to, jie nekenkia ozono sluoksniui ($\text{OAP} = 0$) ir turi labai mažą arba nulinį visuotinio atšilimo potencialą ($\text{VAP} \approx 0$). Be to, didelis šių šaldymo agentų efektyvumas reiškia, kad jie mažiau netiesiogiai prisideda prie visuotinio planetos atšilimo. Šie produktai kaip šaldymo agentai buvo naudojami dar XIX a., o dabar vėl pradedami naudoti dėl jų mažo neigiamo poveikio aplinkai. Šiuo metu šaldymo pramonėje naudojami šie pagrindiniai natūralūs šaldymo agentai: amoniakas (NH_3), anglies dioksidas (CO_2) ir angliavandeniliai (propanas ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$), izobutanas ($\text{CH}(\text{CH}_3)_2\text{-CH}_3$)).

2.1. Šaldymo agento R744 analizė

Anglies dioksidas (CO_2), dažniausiai žinomas kaip R744, yra gera alternatyva HFC pakeisti, nes jis nekenkia ozono sluoksniui ($\text{OAP} = 0$), o jo visuotinio atšilimo potencialas yra lygus vienetui ($\text{VAP} = 1$). CO_2 yra bekvapis, bespalvis skystis, sunkesnis už orą, kuris jau daugiau kaip šimtmetį naudojamas kaip šaldymo agentas. Nors CO_2 yra būtinas gyvybei Žemėje, jis taip pat yra šiltnamio efektą sukeliančios dujos (ŠESD), galinčios pakeisti aplinką, jei jo koncentracija atmosferoje labai padidėja. R744 vienintelis iš natūralių šaltnešių grupės priskiriamas saugumo klasei A1, t. y. jis yra nedegus ir mažai toksiškas. Tai didelis privalumas, palyginti su kitais natūraliais šaltnešiais, tokiais kaip R290, kuris priskiriamas yra A3 saugumo klasei ir yra labai degus. R714 yra priskiriamas B2L toksiškumo žmogui klasei ir yra potencialiai sprogį medžiaga. Įdėtas energijos sąnaudų kiekis, reikalingas anglies dioksidui regeneruoti, valyti, suskystinti ir transportuoti perskaičiuojant anglies dioksido ekvivalentu atitinka 1 kg CO_2 vienam kilogramui. Tuo tarpu amoniako gamyba anglies dioksido ekvivalentas yra 2 kg CO_2 kilogramui, o fluorangliavandenilių atveju paprastai sudaro apie 9 kg CO_2 kilogramui.

CO_2 buvo naudojamas kaip ankstyvasis šaldymo agentas prieš freonus, tačiau dėl sudėtingesnės technologijos jis greitai nustojo būti naudojamas. Jis pasižymi puikiomis termofizikinėmis savybėmis, nors kelia sunkumų dėl žemos kritinės temperatūros ($30,978\text{ }^\circ\text{C}$) ir didelio slėgio. Jo tūrinė talpa daug didesnė nei įprastinių šaldymo agentų. Naudojant šaldymo įrenginiams, kai aplinkos temperatūra žemesnė nei maždaug $25\text{ }^\circ\text{C}$, jis veikia subkritiniu ciklu, o esant aukštesnei temperatūrai – transkritiniu ciklu. Šios dujos pasižymi dideliu šiluminiu laidumu ir dideliu tankiu dujinėje fazėje, todėl gerai perduoda šilumą garintuvuose, kondensatoriuose ir dujų aušintuvuose. Dėl šių savybių galima pasirinkti mažesnius agregatus, lyginant su kitais natūraliais ir sintetiniais šaltnešiais. Be to, dėl mažo slėgio kritimo galima sumažinti vamzdžių skersmenį ir kitų komponentų dydžius, tačiau vamzdžio sienelių storis turi būti didesnis darbui su aukštais slėgiais.

Vienas pagrindinių anglies dioksido ir kitų šaldymo agentų skirtumų yra jo slėgio ir temperatūros charakteristika, nes slėgis sistemose yra maždaug dešimt kartų didesnis nei amoniako ar R404A. Dėl tokio aukšto slėgio reikia specialios įrangos, tačiau lyginant su kitais šaldymo agentais, jis turi ir daug privalumų. Visu pirma, dėl didelio slėgio susidaro didelis dujų tankis, todėl galima pasiekti daug didesnę šaldymo efektyvumą, naudojant pasirinktą kompresorių. Mažesni CO_2 suspaudimo santykiai įgalina turėti didesnę izoentropinį kompresoriaus efektyvumą. Aukšti slėgiai šilumokaičiuose pagerina šilumos perdavimą ir papildomai leidžia sumažinti jų dydį, išlaikant vienodas šilumos perdavimo charakteristikas. Aukštas šilumos perdavimo koeficientas šilumokaičiuose dėl didelių slėgių ir šaltnešio tankio, leidžia turėti arba mažesnius temperatūrų skirtumus tarp šaltnešio ir oro, o tai padidina šaldymo sistemos našumą arba leidžia naudoti mažesnius garintuvus ir kondensatorius.

Be to, esant tam slėgio kritimui po TRV labai nedaug sumažėja soties temperatūra, todėl garintuvuose ir įsiurbimo vamzdžiuose gali būti didesnis masės srautas, nesumažinant efektyvumo. Šis poveikis ypač pastebimas esant žemai temperatūrai (-30/-40 °C), todėl anglies dioksido sistemos tokiomis sąlygomis veikia efektyviau už NH₃ šaltnešį.

Kai slėgis viršija kritinį tašką (7,3773 MPa), anglies dioksidas negali kondensuotis. Tokiomis sąlygomis šiluma pašalinama aušinant labai tirštas dujas, todėl atsiranda temperatūros slydimo (angl. *glide*) efektas. Tai leidžia spaudimo linijoje esančiame šilumokaityje turėti vienos fazės didelio tankio dujas su atitinkamu temperatūros slydimu iki kol slėgis nenukris iki 74 bar. Tokie šilumokaičiai vadinami dujiniais (angl. *gascooler*) ir jų tinkamas panaudojimas yra svarbus šilumos siurbliuose vandens pašildymui ar tiesioginiam patalpų šildymui. Tai labai sėkmingai naudojama vandens šildymo šilumos siurbliuose. Šie transkritiniai šilumos siurbliai ypač efektyvūs, kai įeinantis vanduo yra žemos temperatūros, bet mažiau veiksmingi mažame temperatūros diapazone, pavyzdžiui, CŠT. Dėl neįprastų anglies dioksido skysčio savybių, įskaitant didelį tankį ir žemą kritinį tašką, jis ypač gerai tinka vėsinti labai tankias šilumos apkrovas, pavyzdžiui, duomenų centrus.

CO₂ yra gera alternatyva komerciniam ir pramoniniam šaldymui, tačiau reikia atsižvelgti į tam tikras saugumo priemones. Reikia nepamiršti, kad CO₂ kvapo neįmanoma užuosti, todėl, būdamas tankesnis už orą, jis gali išstumti deguonį iki sveikatai kenksmingų ribų. Kadangi jis neskleidžia jokio kvapo, gali būti, kad, esant nuotėkiui, technikas jo nepastebės. Dėl tokių savybių būtina skirti ypatingą dėmesį nuotėkio aptikimui, turėti signalizacijos sistemą, galinčią laiku aptikti ir įspėti apie CO₂ buvimą ir avarinio vėdinimo sistemą. Be to, nutekėjus dujoms, dėl didelio dujų slėgio įvyksta sproginimas, kai labai žemoje temperatūroje ir labai dideliu garso greičiu išsiveržia šaldymo skysčio pūslai su kieto pavidalo likučiais. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad CO₂ niekada neturėtų būti pildomas skystu pavidalu, kai sistemoje yra mažesnis slėgis nei trigubasis taškas (5,2 bar). Jei taip nutiktų, į sistemą patekęs skystis staiga pakeistų būseną, taptų sausuoju ledu ir liktų tokios būsenos sistemoje. Galiausiai, palyginti su angliavandeniliais, vienas iš CO₂ privalumų yra tas, kad jį galima naudoti įrenginiuose, kuriuose neribojama galia.

2.2. CO₂ šaldymo sistemos vystymą stabdantys veiksniai

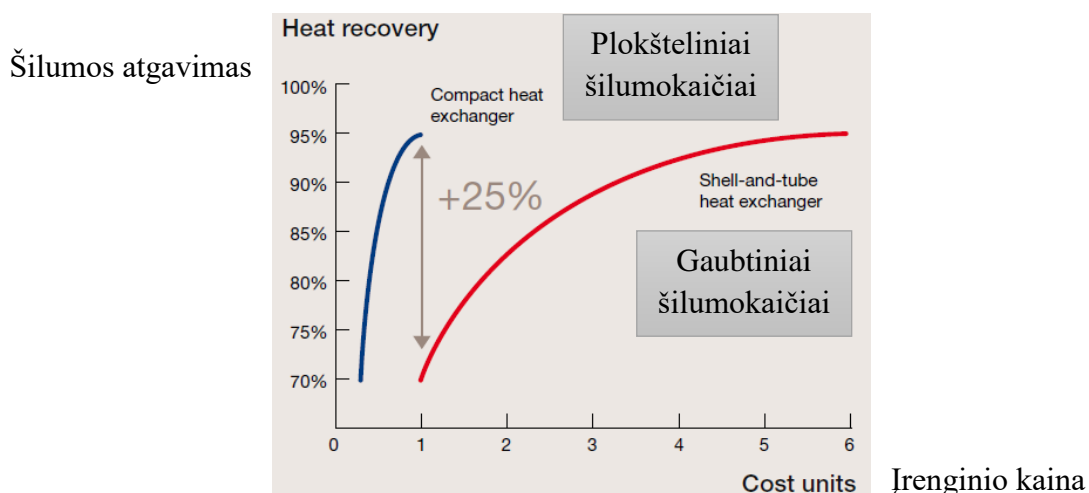
Dėl aukštų šaldymo sistemos slėgų padidėja šaltnešio nuotekų tikimybė. Šaldymo sistemos komponentai turi būti specialiai suprojektuoti. Reikia specialių kompresorių, dėl didesnių šaldymo galių ir slėgių. R744 sistema yra sudėtingesnė už įprastą – arba kaskadinė, arba transkritinė. Brangesni sistemos komponentai ir pats diegimas. Reikia vamzdyno, kuris atlaiko didelį slėgį. Turi būti naudojami specialūs vamzdžių jungimo elementai dėl didelių slėgių. Dėl sistemos sudėtingumo (lygegretaus veikimo kompresoriai, aukšto slėgio vožtuvai ir ežektoriai, papildomi šilumokaičiai žemų temperatūrų linijose), padidėja tikimybė, kad sistema prasčiau dirbs, ypač jeigu paleidimo ir derinimo darbai nebuvo atlikti labai gerai. R744 sistemos yra labai jautrios vandens užterštumui, todėl gali susidaryti neįprastų junginių kai kaskadiniame šilumokaityje atsiranda nesandarumas.

Taigi, reikalingus labai tikslus projektavimas, norint pasinaudoti šiais CO₂ privalumais. Šiuo metu šio šaltnešio panaudojimo galimybes stabdo pirminės investicijos suma, kuri dažnai yra 2–3 kartus didesnė lyginant su klasikine freonine šaldymo sistema, todėl didinant sistemos efektyvumą, galima pasiekti greitesnį atsipirkimo laiką ir užtikrinti tokio sprendimo rentabilumą.?

3. Apie atliekinės šilumos atgavimą

Šaldymo ir kitos pramoninės sistemos atlikdamos gaminant šaltį ar kitą naudingą darbą kartu pagamina didelius kiekius šilumos, kuria reikia pašalinti nuo sistemos, kad ji neperkaistu. Ši pagaminta šiluma vadinama atliekine, nes ji nėra panaudojama, bet nuvedama nuo šaldymo sistemos pavyzdžiui į orą. Ši atliekinė šiluma padėtų sutapyti daug pirminės energijos jos panaudojimo atveju, bet ji yra išmetama. Energijos ir išlaidų taupymo potencialas yra glaudžiai susiję procesai. Pagrindinė idėja atliekinės šilumos panaudojime yra stengtis išgauti kuo daugiau šilumos ir kuo daugiau jos pakartotinai panaudoti, o ne tiesiog išleisti į orą. Atliekinės šilumos atgavimo sistemos susideda iš dviejų pagrindinių komponentų. Šilumokaičio, kuriame vyksta šilumos mainai ir akumuliacinės talpos, kur yra saugoma mainų pagalba atgauta atliekinė šiluma. Investicijų į atliekinės šilumos atgavimą efektyvumas labai priklauso nuo šilumokaičio parametrų ir jų gyvavimo ciklo sąnaudų (pirkimo, priežiūros ir kt.). Šiuo metu populiariausi yra kompaktiniai plokšteliniai šilumokaičiai, kurie turi daug privalumų lyginant su vamzdiniais (žiūrėti 3 paveikslą):

- iki penkių kartų didesnis šilumos perdavimo efektyvumas;
- mažesnės pradinės investicijos ir techninės priežiūros išlaidos;
- daug mažesni;
- didelė srauto turbulencija;
- mažesnis paviršių užsiteršimas.



3 pav. Plokštelių šilumokaičių palyginimas su gaubtiniais [4].

Dėl šių priežasčių šiame tiriamajame darbe apsiribosiu plokštelių šilumokaičių tyrimu. Toliau apžvelgsiu akumuliacinių talpų parinkimo metodus ir atliekinės šilumos atgavimo schemas šaldymo sistemose veikiančiuose virškritiniame režime su CO₂ šaltnešiu.

3.1. Plokštelių šilumokaičių CO₂ šaltnešiams savybės

Šilumokaičių veikimas grindžiamas laidumo teorija, kai šiluma perduodama kieta medžiaga. Dėl temperatūrų skirtumo šiluma perduodama nuo šiltesnės terpės į šaltesnę. Tai gali būti skysčiai, dujos atskirtos kietomis šilumokaičio sienelėmis pagamintomis iš įvairių metalo lydinių. Plokšteliame šilumokaityje šiluma lengvai sklinda tarp karštos ir šaltos terpių atskyrimo medžiagos paviršiumi, todėl galima tiek pašildyti, tiek atvėsinti skysčius, tarp kurių yra temperatūros skirtumas. Šilumos perdavimo iš vienos terpės į kitą pagrįsta tuo, kad tarp terpių visuomet turi būti temperatūrų skirtumas. Šiltos pusės atiduotas šilumos kiekis yra lygus šaltos pusės gautam šilumos kiekiui, įvertinus

nuostolius pačiame šilumokaityje. Šiame tiriamajame darbe bus nagrinėjami tik netiesioginio veikimo šilumokaičiai, kuriuose terpės nesimaišo tarpusavyje, o šiluma yra perduodama per kietą šilumokaičio mainų paviršiaus sienelę. Nagrinėjant šilumokaičių veikimą, neatsižvelgta į aplinkos šilumos nuostolius dėl mažo jų dydžio.

3.1.1. Plokštelių šilumokaičių charakteristikos

Sprendžiant šilumos mainų užduotis yra būtina nustatyti būdingiausius šilumokaičių parametrus pagal kuriuos galima apskaičiuoti norimos galios šilumokaitį. Svarbiausi yra šeši parametrai:

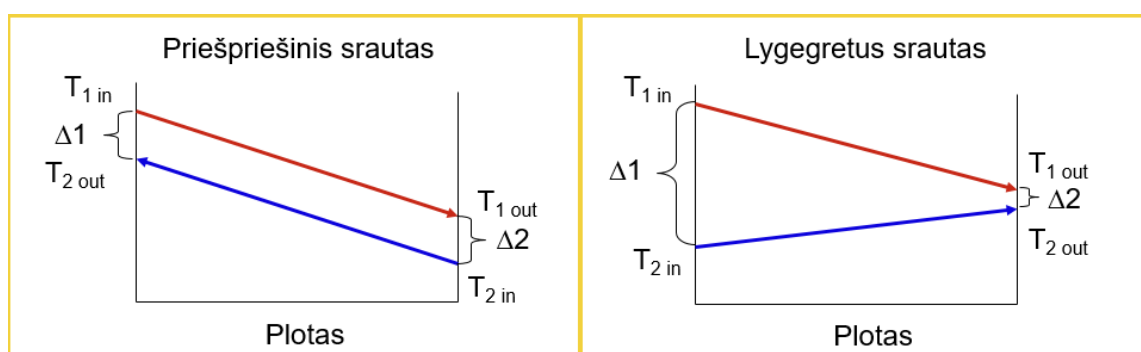
- šiluminė galia – bendras šilumos kiekis. Šiluminė apkrova (P) išreiškiama kW arba kcal/h.
- termofikato įėjimo ir išėjimo temperatūros (K);
- termofikato srautai (m³/s);
- vidiniai šilumokaičio termofikato slėgio nuostoliai (MPa);
- aukščiausia darbinė temperatūra (K);
- aukščiausias darbinis slėgis (MPa);

Žinant termofikato srautą per šilumokaitį ir temperatūrų skirtumą viename šilumokaičio kontūre galime apskaičiuoti šilumokaičio galią. Vieno kontūro šilumokaitis turi keturis pajungimus, todėl apibūdinamas keturiomis temperatūromis ir jų pokyčiu perėjus mainų paviršius. Vertinant šilumokaičio šiluminę galią nuostoliai į aplinką yra nepaisomi, nes jie sudaro tik nedidelę dalį. Šilumos mainų intensyvumas yra išreiškiamas per formulę[4]:

$$\Theta = \frac{\delta t}{LMTD} \quad (1)$$

čia Θ (teta parametras) – kanalo šiluminis ilgis apibūdinantis šilumokaičio šiluminį efektyvumą, tai be dimensinis dydis, apibūdinantis santykį tarp temperatūros skirtumo ir jos vidutinio logaritminio temperatūros skirtumo (LMTD), kuris apskaičiuojamas pagal formulę [4]:

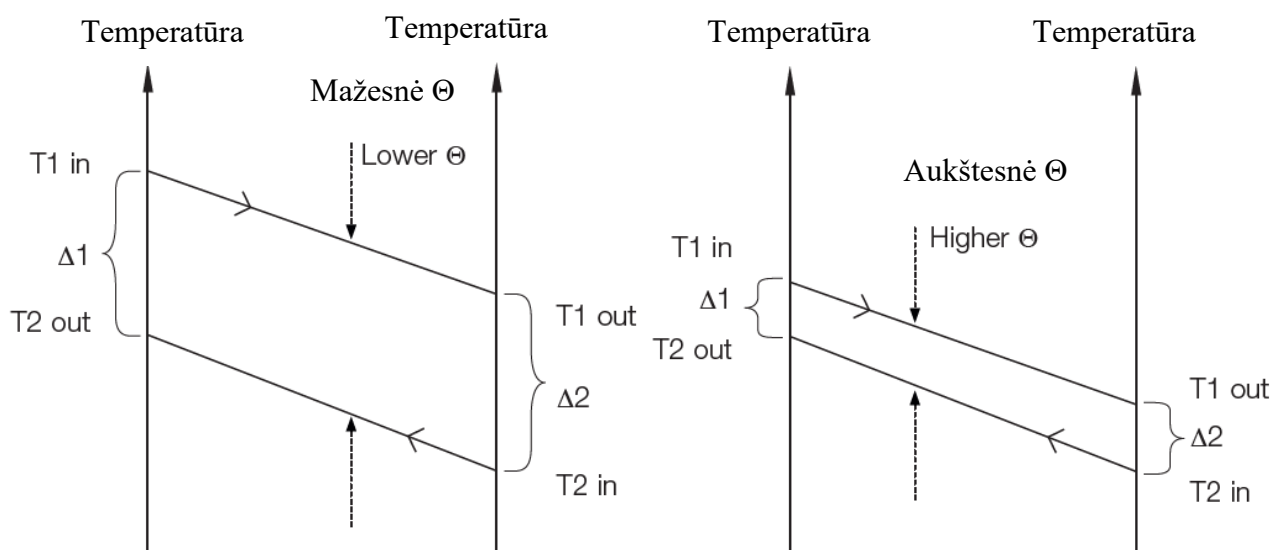
$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (2)$$



4 pav. Temperatūros grafikai termofikatui tekant priešpriešiniu ir lygegrečiu srautu [4].

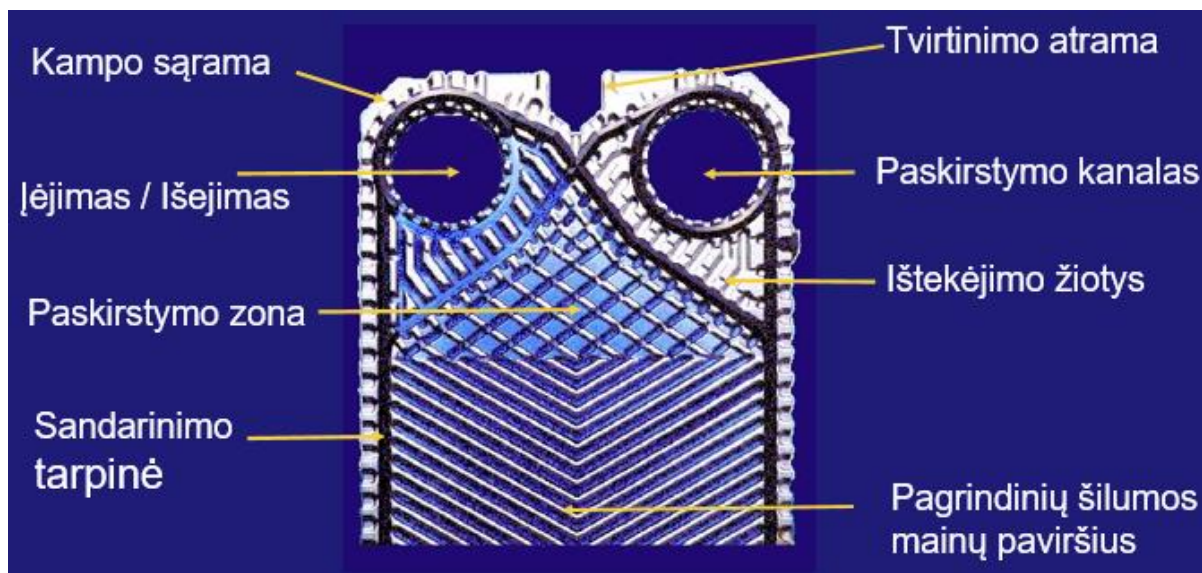
Šaldymo cikle efektyviausia termofikato srautus per šilumokaitį leisti priešpriešiniais srautais, nes taip bus pasiektos didesnės LMTD vertės su tuo pačiu šilumokaičio plotu ir laidumu. Kaip pavaizduota 4 paveiksle. Lygiagretus srautas naudojamas jautrioms terpėms, kad išvengtų kristalizacijos ar užšalimo. Toks būdas taip pat padeda sumažinti paviršiaus pasidengimo nuosėdomis reiškinius. Teta vertės didesnės už vienetą reiškia, kad šilumokaičio mainų paviršius yra didelis ir

termofikato tekėjimas per šilumokaitį yra ilgesnis, o taip pat mažas plokštelių presavimo gylis dėl to mažiau termofikato pateks tarp plokštelių atitinkamai bus mažesnis slėgio nuostolis kanale. Plokštelių šilumokaičių atveju teta vertės gali siekti iki 10, tuo tarpu gaubtiniai šilumokaičiai pasiekia theta vertę <1 , todėl tektų nuosekliai apjungti kelis gaubtinius šilumokaičius, kad pasiekti vienodas teta reikšmes.



5 pav. Iš diagramos kairėje matyti, kad didelis temperatūrų skirtumas lemia mažą teta, dešinioji diagrama parodo, kad mažas temperatūrų skirtumas duoda didelę teta [4].

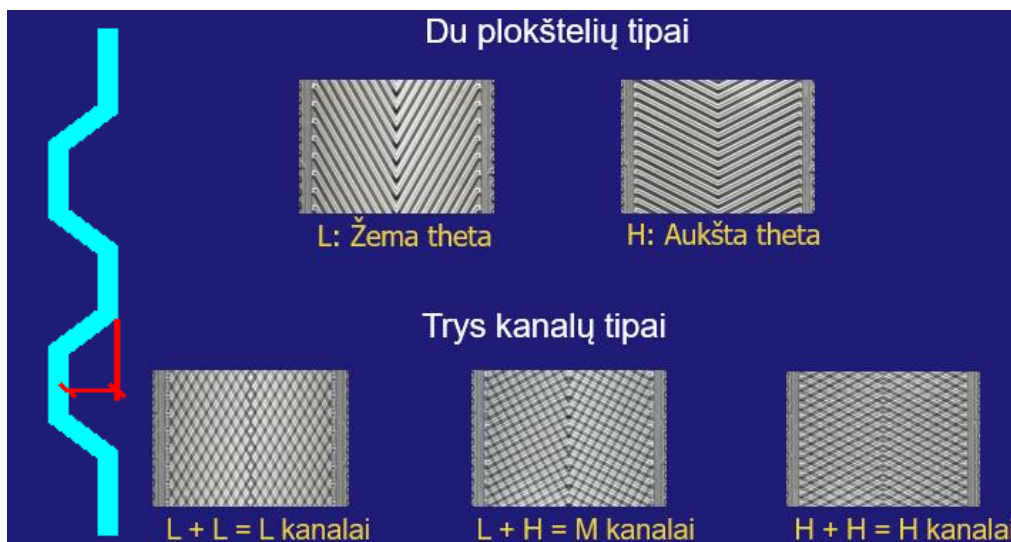
Dėl kompaktiškos konstrukcijos plokšteliniai šilumokaičiai yra daug mažesni nei gaubtiniai. Šilumokaičio šilumos perdavimo plokštelės gaminamos iš plonasienio metalo, tai leidžia optimaliai perduoti šilumą, nes šiluma lengviau praeina per labai ploną sienelę (6 paveikslas).



6 pav. Plokštelinio šilumokaičio plokštelės sandara [4].

Kintamas šiluminis ilgis (teta) priklauso nuo plokštelių tipo. Pagrindė plokšteliuose šilumokaičiuose yra montuojamos dviejų skirtingų tipų H ir L tipų plokštelės. Plokštelės su „H“ tipo kanalais turi didesnę slėgio sumažėjimą ir ilgą terminį kanalą, ko pasekoje ilgą šilumos perdavimo

trukmę. Būtent todėl H plokštelės perduoda šilumą efektyviau. Kai šilumokaityje naudojamos „L“ formos plokštelės atsiranda papildomi slėgio nuostoliai kanaluose ir atitinkamai sumažėja šilumos perdavimo koeficientas. Kuo mažesnis štampuotos plokštelės gylis, tuo mažesnis šiluminio kanalo ilgis. Plokštelių gyliai svyruoja nuo 1,5mm žemo temperatūrinio potencialo skysčiams iki 5mm soties būsenos garams. Šaldymo sričiai, priklausomai nuo termofikato temperatūrų naudojami iki 2,5mm gylio plokštelės. Turint dviejų tipų „H“ ir „L“ plokšteles ir jas kombinuojant galima sudaryti trijų skirtingų tipų kanalus kaip pavaizduota 7 paveiksle. Priklausomai nuo šilumokaičio paskirties, užduotyje reikalaujamų termofikato slėgio nuostolių, temperatūrų skirtumo ir numatytų srautų, kombinuojant skirtingo rašto plokšteles yra parenkamas tinkamas modelis.



7 pav. Plokštelinio šilumokaičio plokštelių tipai [4].

Didelė termofikato srauto turbulencija sudaro geras sąlygas intensyvesnei konvekcijai t.y. efektyvesniam šilumos perdavimui tarp skirtingų terpių (8 paveikslas). Tai reiškia didesnę šilumos perdavimo koeficientą šilumos perdavimo paviršiaus ploto vienetui, kas leidžia gauti ne tik ypač kompaktišką, bet ir efektyviau veikiančią šilumokaitį. Didelė terpės srauto turbulencija sukuria savaiminio valymo efektą. Be to, lyginant su įprastu vamzdeliniu šilumokaičiu, plokštelinio šilumokaičio šilumos mainų paviršiai daug mažiau užsiteršia nuosėdomis, o tai reiškia, kad plokštelinis šilumokaitis tarp valymo ciklų gali veikti daug ilgiau.



8 pav. Plokštelinio šilumokaičio kanalų šilumos mainų profiliai [4].

3.1.2. Plokštelių šilumokaičių skaičiavimas

Šilumokaičio galia gali būti skaičiuojamas pasinaudojant šiluminės galios, ilgio ir LMTD vertėmis per formulę[7]:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t \left(m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t} ; \Delta t = \frac{Q}{m \cdot c_p} \right) \text{ ir } Q = k \cdot A \cdot LMTD \quad (3)$$

čia Q = šiluminė galia, kW;

m = masės srautas, kg/s;

c_p = savitoji šiluminė talpa, kJ/(kg x °C);

Δt = temperatūrų skirtumas, °C;

k = šilumos laidumo koeficientas, W/(m² x °C);

A = šilumos mainų paviršius, m²;

LMTD = Vidutinis logaritminis temperatūros skirtumas, kur: $\Delta T1 = T1 - T4$ ir $\Delta T2 = T2 - T3$;

– $T1$ = Temperatūra įėjime, šiltoji pusė;

– $T2$ = Temperatūra išėjime, šiltoji pusė;

– $T3$ = Temperatūra įėjime, šaltoji pusė;

– $T4$ = Temperatūra išėjime, šaltoji pusė;

Tuomet iš šilumos balanso lygties išreiškiame teta parametą[7]:

$$\Theta = \frac{\Delta t}{LMTD} = \frac{k \cdot A}{m \cdot c_p} \quad (4)$$

Plokštelinio šilumokaičio dydis tiesiogiai priklauso nuo slėgio nuostolių (ΔP), kuriuos galima išreikšti per formulę [7]:

$$\Delta P = \frac{w\rho}{2} \cdot \left(\frac{4f \cdot L}{D_h} + n \right) \quad (5)$$

čia ΔP = slėgio kritimas tarp įėjimo ir išėjimo kanalų, Pa;

w = tekėjimo greitis, m/s ;

ρ = termofikato tankis, kg/m³;

f = trinties faktorius, kuris yra Reynoldso funkcijos skaičius;

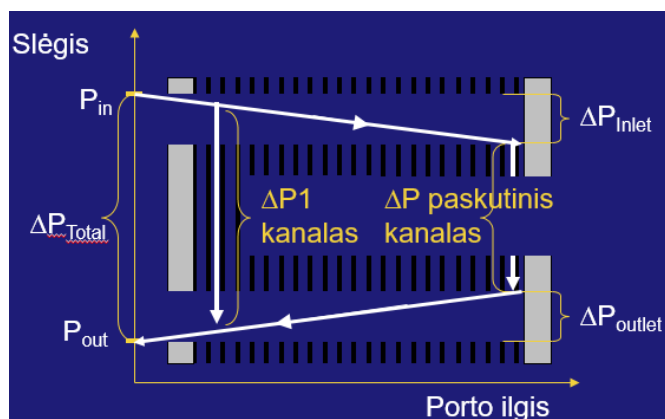
D_h = hidraulinis diametras, kuris lygus dvigubam plokštelių gyliui, m;

L = plokštelių ilgis, m;

n = slėgio nuostoliai šilumokaičio įėjime ir išėjime, Pa.

Klumpumas yra susijęs su termofikato tankiu, kuo jis mažesnis, tuo lengviau skystis teka kanalais. Šilumokaičio šilumos laidumo koeficiento dydį apibrėžia įvairūs papildomi faktoriai tokie kaip šilumokaičio metalo lydinio tipas, mineralinių nuosėdų kiekis kanalo paviršiuose ir pačio termofikato savybės. Plokštelių šilumokaičių gamintojų yra rekomenduojama vanduo – vanduo terpei naudoti modelius, kuriuose slėgio nuostoliai yra 20 – 70 kPa ribose. Slėgio nuostolis yra kaina už aukštus šilumos mainus. Aukštas slėgių skirtumas sukuria turbulencinius srautus, sumažina laminarinio tekėjimo plėvelę ties šilumos mainų paviršiais ir taip padidina šilumos perdavimo koeficientą, bet visa tai turi kompensuoti didesnės išlaidos siurbliui ir atitinkamai padidėjusios elektros sąnaudos. Taip pat yra slėgio nuostoliai pačiame šilumokaityje tarp kanalų ir pajungimuose. Gerai parinktame šilumokaityje šie nuostoliai neturi viršyti 30%. Priešingu atveju jeigu $\Delta P_{inlet} + \Delta P_{outlet} > 30\%$ kanale

termofikatas pasiskirsto blogai. Pirmame kanale jis keliauja per greitai, o paskutiniame per lėtai, todėl plokštelinis šilumokaitis veikia neišnaudodamas pilno šilumos mainų paviršių potencialo. Kaip pavaizduota 9 paveiksle. Pagrindinė taisyklė yra tokia: kuo mažesnės leistinos darbinės temperatūros ir slėgio reikšmės, tuo mažesnė šilumokaičio kaina.



9 pav. Slėgių nuostolių atvaizdavimas šilumokaičio kanaluose [4].

Šilumokaičio šilumos laidumas susideda iš trijų dedamųjų ir apskaičiuojamas pagal formulę [7]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda} + R_f = \frac{1}{k_c} + R_f \quad (6)$$

čia k = projektuojamas šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \times ^\circ C)$;

α_1 = šilumos perdavimo iš šiltosios pusės į paviršių koeficientas, $W/(m^2 \times ^\circ C)$;

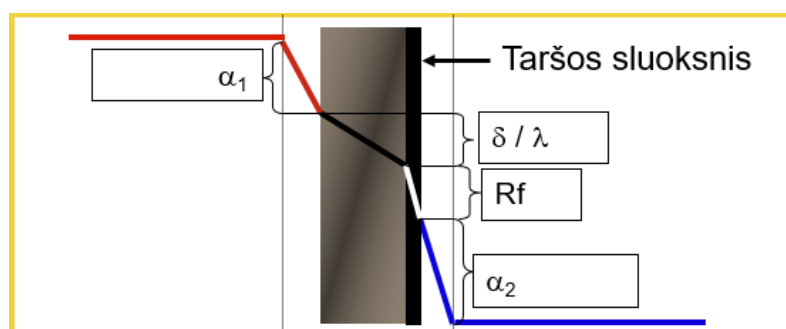
α_2 = šilumos perdavimo iš šaltosios pusės į paviršių koeficientas, $W/(m^2 \times ^\circ C)$;

δ = šilumokaičio sienelės storis per kurią vyksta šilumos mainai, m;

λ = šilumokaičio sienelės medžiagos šilumos laidumo koeficientas, $W/(m \times ^\circ C)$;

R_f = taršos koeficientas, $(m^2 \times ^\circ C)/W$;

k_c = švaraus paviršiaus šilumos perdavimo koeficientas (kai $R_f = 0$), $W/(m^2 \times ^\circ C)$.



10 pav. Plokštelinio šilumokaičio šilumos mainų atvaizdavimas [4].

Taršai šilumokaičiuose įvertinti yra naudojamas galios rezervas (M) t.y. įvertinant papildomą šilumos mainų paviršiaus plotą ir taršos koeficientas (R_f). Šilumokaičio rezervas (M) apskaičiuojamas pagal formulę [7]:

$$M = k_c \cdot R_f \quad (7)$$

Kiekvienas lygties parametras daro įtaką pasirenkant šilumokaitį. Išimtis yra medžiagos pasirinkimas, kuri paprastai neturi įtakos jo efektyvumui, o tik įtakoja įrenginio stiprumo ir korozijos charakteristikas. Kaip pavaizduota 10 paveiksle. Apibendrintai galime suformuoti pagrindinius plokštelių šilumokaičių privalumus. Pirmiausia tai mažas temperatūrų skirtumas tarp įtekančių ir ištekančių kanalų ir plonas plokštelių storis nuo 0,3 iki 0,6 mm. Šilumos atidavimo koeficientai (α_1 ir α_2) kaip ir taršos koeficientas (R_f) teisingai parinktaime šilumokaityje būna labai maži dėl termofikato srauto didelio turbulentiškumo, tai leidžia pasiekti aukštą šilumos perdavimo koeficientą (k), kuris gali siekti iki 8000 W/(m²K). Palyginimui gaubtinių šilumokaičių šilumos perdavimo koeficientas neviršija 2500 W/(m²K). Dėl srautų turbulentiškumo skaičiuojant plokštelinį šilumokaitį taršos koeficientas R_f taip pat yra žymiai mažesnis lyginant su vamzdeliniu šilumokaičiu. Du svarbūs parametrai, kurie minimizuoja šilumokaičio kainą yra slėgio ir temperatūros (LMTD) nuostoliai. Kuo šie parametrai didesni, tuo mažesnis šilumokaičio dydis. Parenkant plokštelines šilumokaičius su aukštomis teta vertėmis (mažas plokštelių gylis) reikia atsargiai vertinti galios rezervą M , nes parinkus per didelį – sumažės srautas per kanalus, atitinkamai sumažės slėgio nuostoliai ir turbulencija, suprastės šilumos laidumas (k) ir bus neefektyviai išnaudojamas šilumos mainų plotas. Rekomenduojama atsarga aukštomis teta verčių šilumokaičiams yra iki 15 % ribose.

3.2. Akumuliacinių talpų savybės atliekinės šilumos kaupime

Atliekinės šilumos atgavimo procese akumuliacinės talpos yra svarbus sistemos elementas. Jos yra įkomponuojamos į sistemą, kad subalansuoti vartojimą ir tiekimą, išlyginti pikinių apkrovų kreives. Be šilumos akumuliacijos būtų beveik neįmanoma užtikrinti stabilias temperatūras neperkaitinant šilumokaičių [21]. Pagal poreikį šiose talpose galima montuoti elektrinius pašildymo tenus, kurie papildomai šildytų vandenį piko valandomis. Šaltas vanduo tiekiamas į akumuliacinės talpos apačią, iš viršutinės dalies yra paimamas karštas vanduo. Šildymo sistemoms akumuliacinės talpos gali būti naudojamos mažesniai slėgiui iki 2,5 bar, o karšto vandens tiekimui iki 6/10 bar. Abiem atvejais maksimali kaupiamo vandens temperatūra neturi viršyti +95 °C. AT yra gaminamos iš plieno, todėl vidus turi būti apsaugotas nuo korozijos pagal tiekiamo vandens charakteristikas. Tyrimo projekto metu buvo apžvelgtas tyrimas [8] apimantis įvairių akumuliacinių talpų pajungimo būdus atsižvelgiant į sanitarines higienos normas pagal EN1717:2000 standartą, kuris nurodo, kad šaltnešis gedimo atveju neturi papulti į šildomą vandenį. Buvo ištyrinėtos trys sistemos: su AT viduje sumontuotu vamzdeliniu šilumokaičiu, kuriame cirkuliuoja tarpinis termofikatas (V1), su išnešamu šilumokaičiu, kuriame cirkuliuoja tarpinis šilumnešis (V2) ir su šilumokaičiu dviguba sienele, kurioje yra oras tarp šaltnešio ir šildomo AT vandens (V3). Visi šie atvejai buvo lyginami su bazine sistema, kai AT viduje sumontuotas vamzdelinis šilumokaitis, kuriame cirkuliuoja perkaitintas šaltnešis. Šis kaupimo būdas neatitinka EN1717 normų, bet tai buvo referencinis taškas, kadangi šis šilumos atgavimo būdas be tarpinio šilumnešio yra pats efektyviausias ir gali sumažinti šilumos perdavimo nuostolius iki 30%. Šiame tyrime atlikta techninė – ekonominė analizė parodė, kad Europos klimato sąlygomis sprendimas V3 yra visuomet naudingiausias, nes nuostoliai tik 3,6 % mažesni lyginant su bazine sistema. Tuo tarpu V1 sprendimas yra labiausiai neefektyvus ir sumažina efektyvumą 27 %.

3.2.1. Akumuliacinės talpos su išorėje sumontuotais šilumokaičiais

Kaupiant AŠ dideliuose pramoniniuose objektuose atliekinės šilumos atgavimo šilumokaitis montuojamas už akumuliacinės talpos. Tai leidžia naudoti didelio 108 mm diametro vamzdžius nuo kompresoriaus spaudimo linijos iki šilumokaičio. Taip pat tokius šilumokaičius galima montuoti kompresorinėje, šalia kompresoriaus, kur garai yra karščiausi ir vėliau tiesti vamzdžius su vandeniu

iki vandens apskaitos punkto. Toks komponavimas taip pat leidžia lengviau atskirti skirtingas sanitarines zonas, nemontuojant didelių vandens talpyklų šalia galingų elektros energiją naudojančių įrenginių. Aišku tokioms sistemoms yra reikalingas papildomas siurblys cirkuliacijai palaikyti tarp šilumokaičio ir AT. Apsaugai nuo CO₂ šaltnešio kondensacijos šilumos atgavimo šilumokaityje yra naudojami trieigiai vožtuvai, kurie esant nedideliam šaldymo mašinos apkrovimui, pavyzdžiui naktį, reguliuoja pamaišymą grįžtančio srauto su įtekančiu, taip užtikrinant, kad į šilumokaitį patektų šiltesnis vanduo ir būtų maksimaliai pašildomas iki nustatyto t.y. valdymo logika yra geriau vandenį pašildyti iki aukštesnės temperatūros, bet mažesnę kiekį, nei daug vandens, bet žemos temperatūros. Toks būdas padeda pilnai nesukondensuoti šaltnešio šilumos atgavimo šilumokaityje palaikant stabilią +55 °C kondensacijos temperatūrą. Taip pat montuojant šilumokaitį už AT yra lengva atgauti didesnę kiekį AŠ nuosekliai įkomponuojant papildomą šilumokaitį. Kaip pavaizduota 11 paveiksle. Jo pagalba galima papildomai paruošti vandenį galutiniam pašildymui ir mažiau šilumos išmesti į atmosferą.

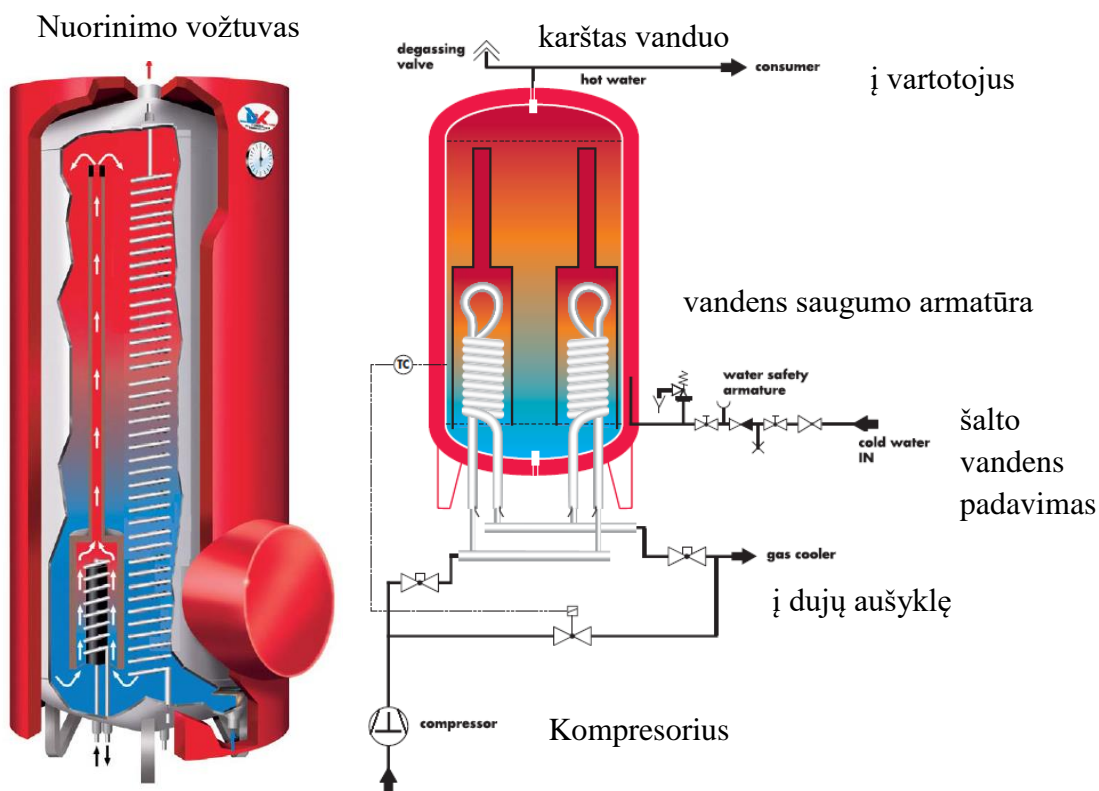


11 pav. Akumuliacinė talpa sujungta su išorėje sumontuotu šilumokaičiu vaizdas [6].

3.2.2. Akumuliacinės talpos su viduje sumontuotais šilumokaičiais

Šios talpos yra naudojamos AŠ atgavimui nuo nedidelių šaldymo sistemų. Šios AT yra brangesnės, nes šilumokaičiai dažnai yra projektuojami pagal individualius projekto poreikius. Taip pat tokios talpos turi tarnybinį langą, kuris skirtas prieigai prie šilumokaičio periodiniam jo valymui arba keitimui gedimo atveju. Ribojantys faktorius yra vamzdelinio šilumokaičio diametras, kuris apsprendžia šaldymo kompresoriaus galią. Didelis šilumokaičio vamzdžio diametras gali netilpti AT, o skaidant į kelis kontūrus sumažėja talpos naudingas tūris. Taip pat yra apribojimų kaip toli AT gali būti nutolusi nuo šaldymo sistemos kompresoriaus. Ilgas kelias stipriai sumažina šaltnešio garų temperatūrą, todėl rekomenduojama neviršyti 10m nuotolio [6]. Pats šilumokaitis AT turėtų būti gaminamas iš gofruoto vamzdžio, tai leidžia padidinti šilumos mainų plotą ir papildomai apsaugo nuo kalkių susidarymo ant šilumokaičio. Esant įvairioms apkrovoms šilumokaičio vamzdeliai, tai plečiasi, tai traukiasi ir kietos apnašos nukrenta nuo vamzdelių paviršiaus. Pajungiant vandentiekio vamzdžius prie AT yra rekomenduojama naudoti žalvarinius sandarinimo žiedus, nes jie yra ilgaamžiški ir su laiku netrupa ir nepraranda savo savybių lyginant su tefloniniais ar guminiiais

analogais. Šilumokaičių, kurie yra skirti karšto vandens ruošimo sistemoms, vamzdžius yra rekomenduojama gaminti su dviguba sienele, nes tai apsaugo nuo vandens patekimo į šaldymo sistemą gedimo atveju, o taip pat apsaugo žmonių sveikatą gedimo atveju. Kitas svarbus faktorius yra AT vandens susisluoksniavimo mažinimas. Šilumokaičiai talpoje yra montuojami apatinėje dalyje. Natūralios konvekcijos būdu ant šilumokaičio sienelių susidaro laminarinis šilumos mainų srautas, nes vandens temperatūrinė difuzija yra nedidelė. Priklausomai nuo AT palaikomos vandens temperatūros, jeigu viduje nėra pamaišymo sistemos, temperatūrų susisluoksniavimas gali siekti per visą tūrį 40 K [6]. Kuo intensyviau naudojamas AT vanduo, tuo temperatūrų skirtumas bus didesnis. Vidinis vandens pamaišymas gali sumažinti šį efektą, bet bus naudojama papildoma elektrinė galia. Efektyvesnis būdas yra išnaudoti natūralios konvekcijos principus. Danijos įmonė DK užpatentavo kamino efekto principą, kuris sukuria turbulentiškus šilumos mainus AT. Šilumos atgavimo sistemos šilumokaitis yra patalpintas AT apačioje, nedideliame termoizoliuotame cilindre į kurį iš apačios patenka šaltas vanduo. Dėka daug mažesnio tūrio vanduo jame įkaista daug greičiau ir pro cilindro viršuje sumontuota vamzdį yra nukreipiamas tiesiogiai į AT viršų, kur kaupiasi šilčiausias vanduo. Tokiu būdu yra sukuriamas tam tikras termodinaminis cirkuliacinis ratas AT viduje, kuris žymiai sumažina temperatūrų susisluoksniavimą. Efekto padidinimui šilumokaičio viduje yra sumontuotas papildomas „išstūmimo“ cilindras, kurio užduotis dar labiau sumažinti vandens tūrį pagrindiniame termoizoliuotame cilindre. Kaip pavaizduota 12 paveiksle.

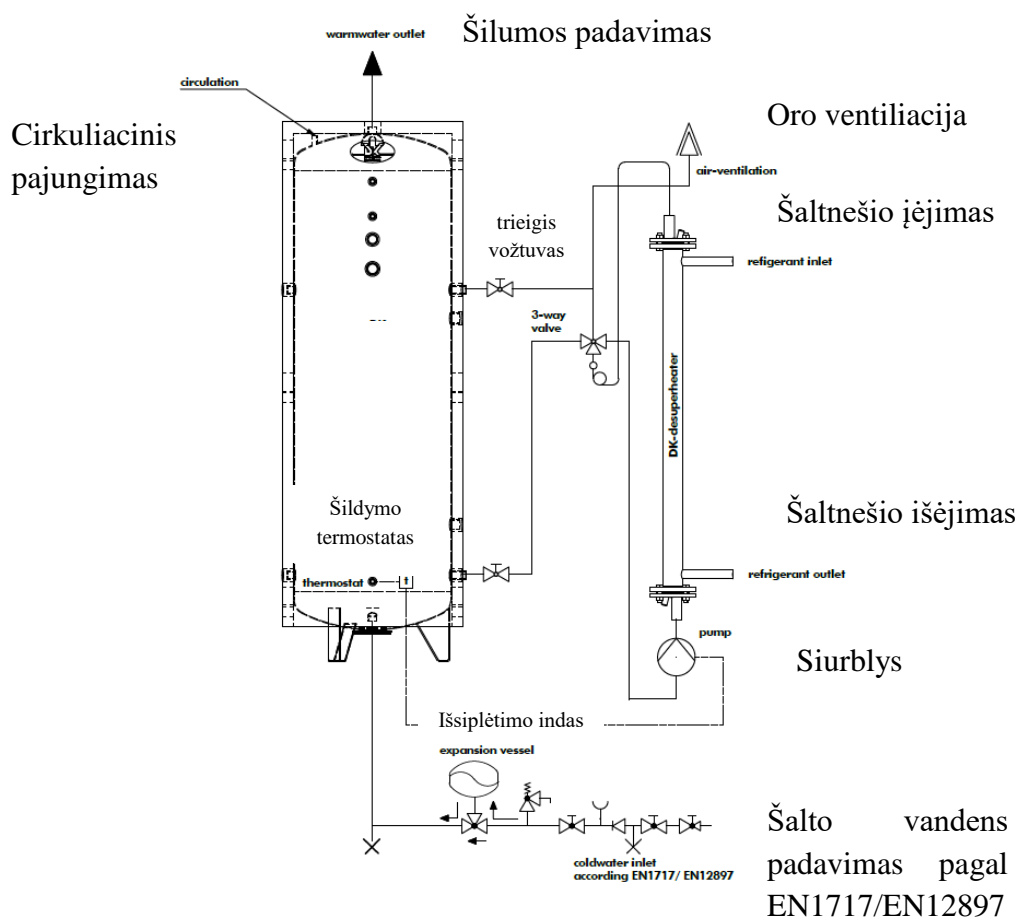


12 pav. Akumuliacinė talpa su viduje sumontuotu šilumokaičiu ir pajungimo schema [6].

3.2.3. Šilumos atgavimo sistemos su viena akumuliacine talpa

Viena akumuliacinė talpa su vienu šilumokaičiu atliekinės šilumos kaupimui naudoja tik vieną cirkuliacinį siurblių, todėl valdymo, įrengimo kaštai yra maži. Šis sprendimas yra naudojamas mažos ir vidutinės galios šaldymo sistemose, taip pat tinka ir dideliems pramoniniams objektams su nedideliu šilumos poreikiu. CO₂ šaldymo sistemose šilumos atgavimo šilumokaitis gali būti

įkomponuotas akumuliacinės talpos viduje. Vienoje talpoje gali būti instaliuoti keli šilumokaičiai nuo įvairių, hidrauliškai nepriklausomų šaldymo sistemų. Toks šilumos perdavimo būdas yra pats efektyviausias, nes jis nereikalauja siurblių vandens cirkuliacijai per šilumokaitį ir užtikrina natūralią konvekciją šilto vandens akumuliacinėje talpoje. Pigesnis būdas yra montuoti šilumos atgavimo šilumokaitį išorėje, toks komponavimo būdas šiek tiek sumažina šilumos atgavimo efektyvumą, pagrindė dėl šilumos atgavimo esant nepilnam šaldymo mašinos apkrovimui, kai spaudimo linijoje esančių garų temperatūros nepakanka pašildyti vandeniui iki norimos temperatūros, nes garai perėję per šilumos mainų paviršių greitai atvėsta, o jų masinio debeto nepakanka visam mainų plotui pašildyti, kadangi šilumokaitis buvo parinktas šaldymo sistemos darbui pilna apkrova. Ši faktorių dalinai kompensuoja triegis vožtuvas, kuris dalį į šilumokaitį paduodamo vandens pamaišo su išeinančiu iš šilumokaičiu vandeniu, taip palaikydamas mažesnę paduodamo vandens temperatūros skirtumą. Kaip pavaizduota 13 paveiksle. Tokiu būdu pašildomo vandens kiekis sumažėja, bet jis vis tiek yra pašildomas iki nustatytos temperatūros. Tokiose sistemose taip pat galima naudoti šilumos siurblius, kurie iš sukauptos atliekinės šilumos akumuliacinėje talpoje konvertuos ją į reikiamų parametrų termofikatą su aukštu efektyvumu.

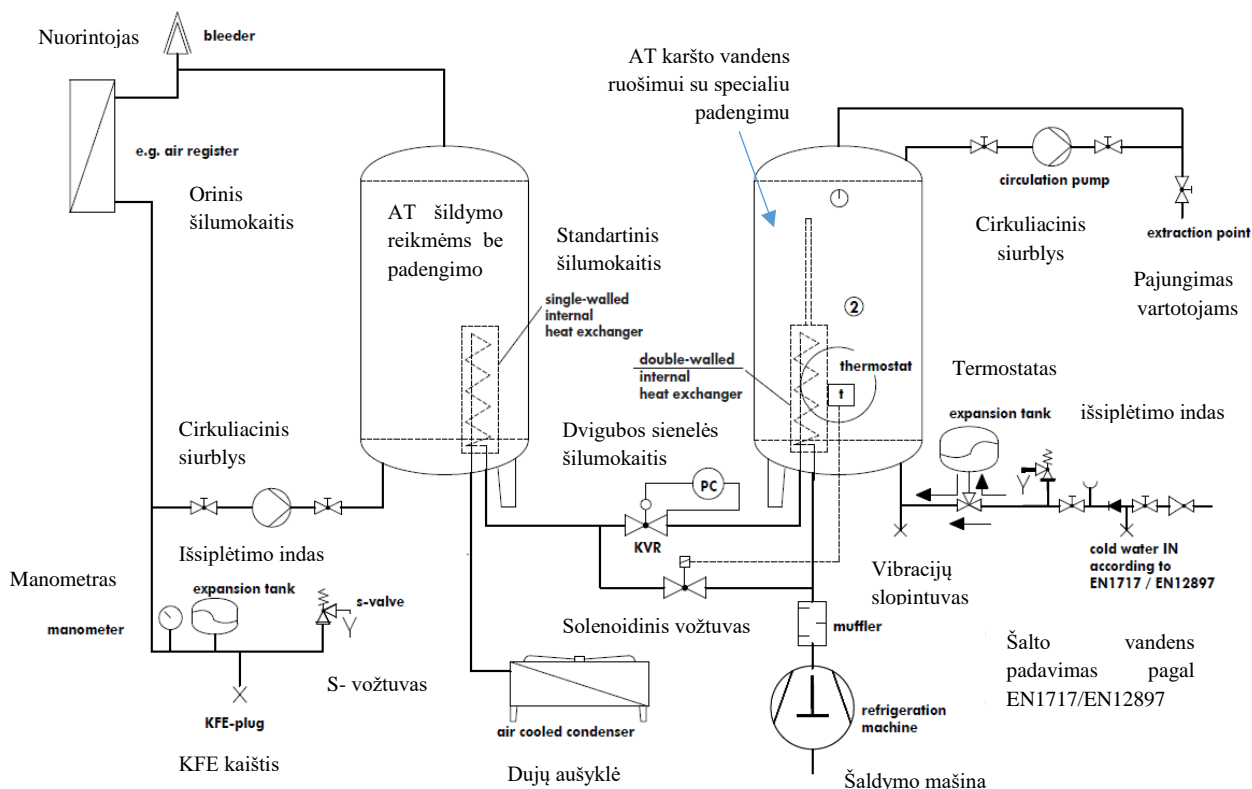


13 pav. Dalinio šilumos atgavimo schema, schema su triegiu vožtuvu [6].

3.2.4. Šilumos atgavimo sistemos su dviem akumuliacinėm talpoms

Atliekinės šilumos atgavimas panaudojant dvi akumuliacines talpas yra efektyvus būdas padengti pastato šildymo ir karšto vandens ruošimo poreikį (14 paveikslas). Nuosekliai sujungtos dvi akumuliacinės talpos su juose sumontuotais šilumokaičiais užtikrina skirtingas temperatūras. Pirmoje talpoje, į kuria patenka pirminis garų srautas iš kompresoriaus spaudimo linijos, yra palaikoma aukščiausia akumuliuoto vandens temperatūra skirta karšto vandens ruošimo sistemai. Iš jos

išeinantys karšti CO₂ garai yra reguliuojami slėgio vožtuvu be kurio negalima būtų valdyti karšto vandens temperatūros esant daliniam šaldymo sistemos apkrovimui. Antra akumuliacinė talpa kaupia atliekinę šilumą, kuri yra naudojama šildymo sistemai. Esant situacijai, kai karštas vanduo pilnai paruoštas, vožtuvas užsidaro ir atsidaro solenoidas apėjimo linijoje. Nors šildymo sistemos akumuliacinėje talpoje yra kaupiamas vienos temperatūros vanduo, bet jį pamaišant su šaltu vandeniu galima jį tiekti skirtingo tipo šildymo sistemoms: grindiniam šildymui 45/25 °C, radiatoriams ir oriniams šildytuvams 60/30 °C.



14 pav. Atliekinės šilumos atgavimo schema su dvejomis akumuliacinėmis talpomis [6].

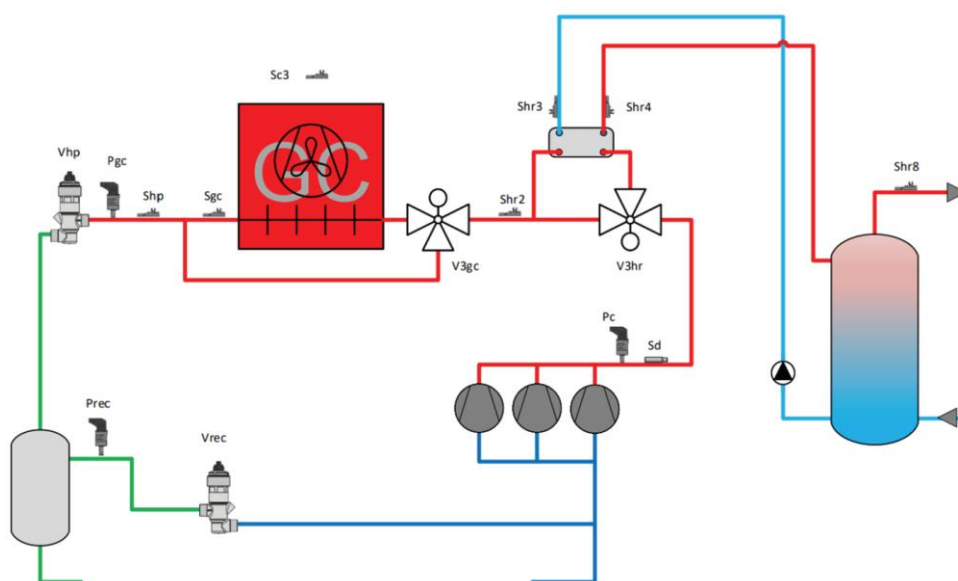
3.3. Atliekinės šilumos atgavimo koncepcijos CO₂ virškritinėse šaldymo sistemose

Šildymas ir šaldymas yra dvi tos pačios monetos pusės, tačiau daugelį metų šaldymo ir šildymo sistemos prekybos centruose nebuvo integruojamos tarpusavyje. Pramonės atstovai dėjo daug pastangų panaudoti atliekinę šilumą nuo klasikinių šaldymo sistemų, tačiau nauda buvo ribota ir neatitiko investicijos kaštų. Šiuo metu naudojant transkritinį CO₂ šaldymo ciklą, pagaliau galima visiškai išnaudoti priešingybių potencialą. Kad būtų galima atgauti šilumą transkritinėje sistemoje, vienas arba du dažniausiai plokšteliniai šilumokaičiai integruojami į šaldymo sistemą prieš dujų aušintuvą (angl. *Gascooler*). Trijų krypčių vožtuvas kompresorių išskiriamą atliekinę šilumą nukreipia pirma į šilumokaitį, kur vyksta šilumos mainai tarp šaltnešio esančio garo fazėje ir termofikato, dažniausiai vandens, kuris pagal objekto poreikį naudojamas šildymo ir karšto vandens ruošimo sistemoms kaip pagalbiniė arba pagrindinė sistema. Šilumos perteklius, jei jo yra, išleidžiamas per dujų aušintuvą į orą. Šiame darbe apsisistiu ties maisto prekių parduotuvėse montuojamomis šaldymo sistemomis, nes jų paplitimas miesto ribose yra labai didelis lyginant su pramoniniais šaldymo objektais, kurie dažnai yra už miesto ribų. Pavyzdžiui logistiniai sandėliai yra statomi miestų pakraščiuose, pieno ar mėsos perdirbimo gamyklos arčiau žaliavos tiekėjų t.y. šalia nedidelių kaimo vietovių. Šilumos atgavimo potencialas priklauso nuo klimato sąlygų, todėl CO₂

šaldymo sistemos su šilumos atgavimu dažniausiai buvo taikomas šaltesnio klimato šalyse. Transkritinės šaldymo sistemos su šilumos atgavimu ir paraleliniu kompresoriumi yra labiausiai išvystyta šaldymo technologija prekybos centruose, kurios pilnas perspektyvas dar pilnai neišsemtos. Ateityje prekybos centrai, naudodami perteklinę virškritiniame režime generuojamą CO₂ šilumą, ne tik padengs savo šilumos poreikius, bet galės tiekti šilumą į centralizuotus šilumos tinklus. Akivaizdūs privalumai yra mažesnė oro tarša miestuose ir efektyvesnis energijos panaudojimas nešvaistant žemo potencialo šilumos į aplinką, todėl prekybos centrų šilumos generavimas tampa labai patrauklus visoms suinteresuotosioms šalims. Klasikinėse šaldymo sistemose yra naudojami kondensaciniai šilumokaičiai, kuriuose slėgis ir temperatūra yra susieti, tačiau transkritinėse CO₂ šaldymo sistemose slėgį ir temperatūrą reikia valdyti atskirai, kad suvaldyti aukštus slėgius kondensavimosi linijoje ir tekėjimą skysčio linijoje. Tai suteikia papildomų galimybių, susijusių su šilumos atgavimu. Įprastai veikiant be šilumos atgavimo, aukštas kondensacijos slėgis palaikomas tokia lygyje, kad būtų pasiektas optimalus sistemos COP. Sistemoje su šilumos atgavimu yra montuojami papildomi slėgio davikliai ir trieigiai vožtuvai, kurie padeda palaikyti aukštą kondensacijos slėgį žiemos metu, kai aplinkos temperatūra yra žema, kad atgauti didesnę atliekinės šilumos kiekį, kai jo labiausiai reikia. Jeigu šilumos poreikio nėra, AT yra pripildytos arba šiluma nėra perduodama į CŠT – slėgis pradedamas valdyti pagal optimalaus COP algoritmą, apeinant šilumos atgavimo sistemą.

3.3.1. Dalinis atliekinės šilumos atgavimas

Šis šilumos atgavimo būdas yra patrauklus, nes reikalauja minimalių investicijų. Šilumokaičių plotas yra mažas, o vandens kiekis, perduodamas šildymui, gali būti valdomas pagal objekto realų poreikį nepanaudotą perteklinę šilumą nukreipiant atgal į dujų aušyklę (kaip pavaizduota 15 paveiksle). Dalinio atliekinės šilumos atgavimo metodu galima lengvai pašildyti vandenį aukščiau R744a šaltnešio kondensacijos temperatūros žiemos metu dėka transkritinio ciklo galimybių. Valdymo sistemai palaikant aukštą aušinimosi slėgį galima pašildyti vandenį iki +95 °C virš šios ribos suveikia apsaugos, kurios neleidžia, kad sukaupta šiluma akumuliacinėje talpoje užvirtų. Reikia nepamiršti, kad kuo aukštesnės temperatūros vandenį ruošia šaldymo sistema, tuo daugiau yra suvartojama elektros energijos.



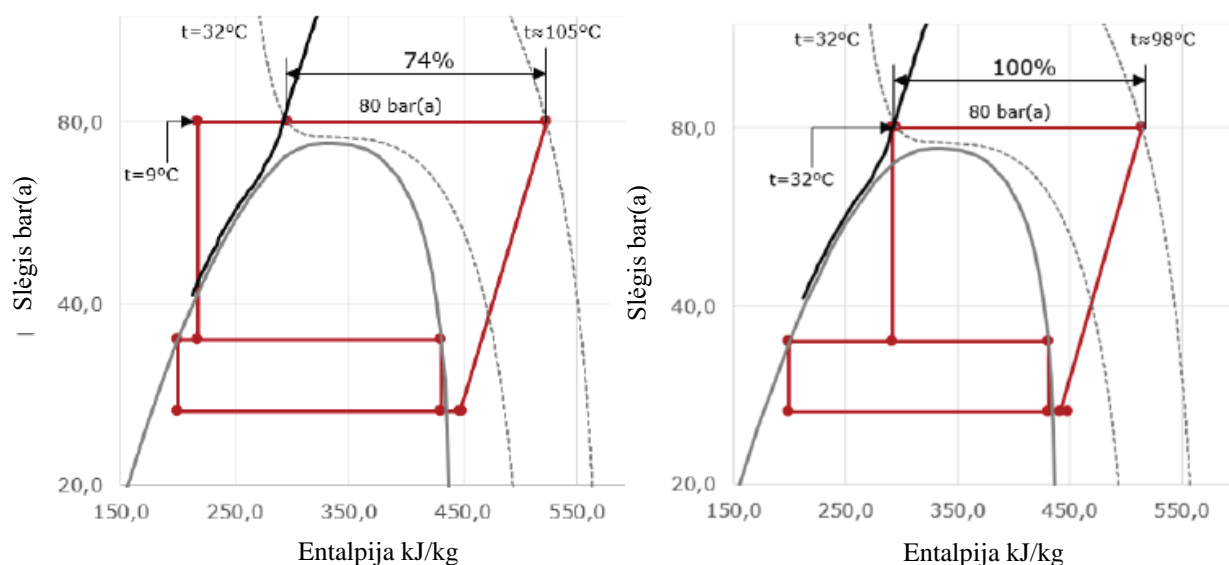
15 pav. Bendra dalinio šilumos atgavimo schema [5].

Shr2: CO₂ temperatūra po šilumos atgavimo šilumokaičio.
 Shr3: Temperatūros daviklis į šilumokaitį paduodamo šalto vandens
 Shr4: Temperatūros daviklis iš šilumokaičio ištekancio šilto vandens
 Shr8: Temperatūros daviklis šilto vandens akumuliacinėje talpoje arba už jos
 Sd: Kompresoriaus CO₂ spaudimo linijos temperatūros daviklis
 Sc3: Lauko temperatūros daviklis
 Sgc: CO₂ temperatūros daviklis po dujų aušintuvės
 Shp: CO₂ temperatūros daviklis po dujų aušintuvės po apėjimo linijos
 Pc: CO₂ spaudimo linijos slėgio daviklis
 Pgc: Oro aušintuvės slėgio daviklis
 Prec: Slėgio daviklis CO₂ rezervyre
 V3hr: Šilumos atgavimo trieigis vožtuvas
 V3gc: Dujų aušintuvės apėjimo linijos trieigis vožtuvas
 Vhp: Aukšto slėgio išsiplėtimo vožtuvas
 Vrec: Apėjimo linijos išsiplėtimo vožtuvas

3.3.2. Pilnas atliekinės šilumos atgavimas

Teoriškai 100 % šaldymo sistemos atliekinės šilumos atgavimas yra įmanomas. Šis kiekis užtikrina pakankamą šilumos kiekį patalpų šildymui ir karšto vandens tiekimui daugelyje klimato zonų, kas leidžia sumažinti tradicinių šildymo sistemų galią. Tačiau pilnutinės šilumos energijos regeneravimas vis dar nėra labai efektyvus, nes smarkiai padidėja šilumokaičio plotas ir sumažėja šaldymo sistemos efektyvumas, todėl 100 % atgaunamos šilumos sąnaudos turi būti vertinamos atsižvelgiant į alternatyvius šilumos šaltinius ir į faktines šiluminės apkrovos sąlygas objekte, o taip pat klimatą ir alternatyvių šilumos šaltinių kainas.

Efektyviam šilumos atgavimui galima naudoti vandeniu aušinamus šilumokaičius, kurie būtų prijungti prieš dujų aušintuvą. Mažinant dujų aušyklės ventiliatorių sūkius daugiau šilumos būtų atgauta šilumos atgavimo šilumokaičiuose. Pilno atliekinės šilumos atgavimo metu slėgį šaldymo

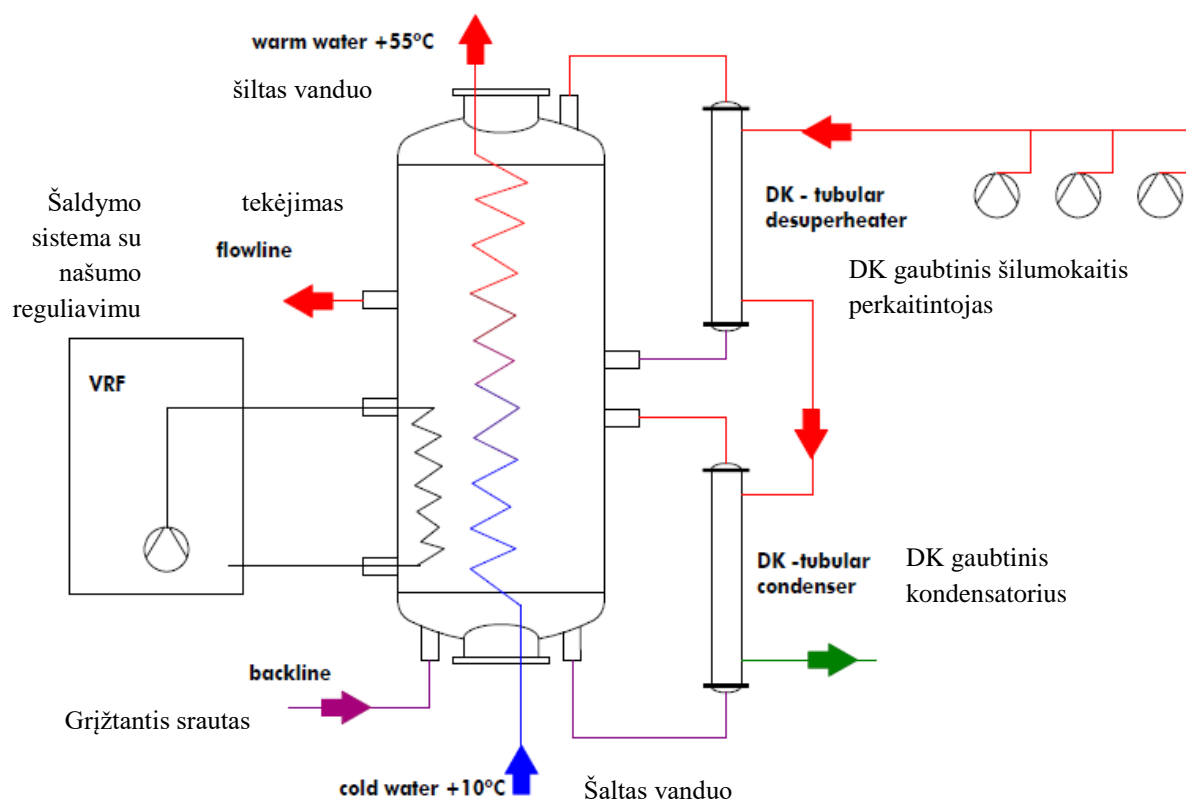


16 pav. Slėgių – entalpijos diagrama CO₂ šaldymo sistemai su 74% ir 100% AŞ atgavimu [5].

sistemoje reiktu palaikyti ties 80 bar(a) ir palaikyti aušinimų dujų temperatūrą po dujų aušintuvės ties +32 °C t.y. virškritiniame cikle. Tuomet beveik visą perkaitinto garo šilumą galima atgauti tarpiniame

šilumokaityje apeinant dujų aušintuvą, bet tai padidins apkrovą kompresoriams, nes reikės kompensuoti aukštus slėgius kondensavimo linijoje (kaip pavaizduota 16 paveiksle).

Panaudojant vieną galingą šilumokaitį galima sukaupti daug žemo potencialo AŠ, kurios temperatūra bus 5 – 6 K žemiau CO₂ kritinio taško t.y. iki +25 °C. Optimaliau yra naudoti pakopomis sujungtus kelis šilumokaičius (kaip pavaizduota 17 paveiksle), nes taip galima gauti tiek karštesnį, tiek šaltesnį vandenį – termofikatą. Tuomet pirmasis šilumokaitis esantis arčiausiai kompresoriaus spaudimo linijos atgaus virškritinę šaltnešio fazės šilumą ir galės pašildyti vandenį karšto vandens ruošimo sistemai iki +60 °C. Antrasis, nuosekliai sumontuotas šilumokaitis, kuriame bus jau ataušusios šaltnešio dujos gali būti naudojamas šildymo sistemai. Tai galėtų būti grindinis šildymas su termofikato parametrais +35/25 °C arba termofikatą galima konvertuoti šilumos siurblio pagalba oriniam šildymui +45/35 °C. Antro šilumokaičio atgaunama atliekinė šiluma Lietuvos klimato sąlygomis yra aktuali tik šaltuoju metu laiku. Vasaros metu šis šilumokaitis būtų atjungtas elektroninės valdymo sistemos dėl šildymo poreikio nebuvimo. Tuomet didesnė šiluminė apkrova tektų paskutiniam šilumokaičiui, kuris peraušintų CO₂ šaltnešį po dujų aušyklės. Šį didelį kiekį šilumos galima panaudoti šalto vandens pašildymui karšto vandens ruošimo sistemai, tokiu būdu ruošiant karštą vandenį šaltą tiekiamą vandenį galima būtų šildyti nuo aukštesnės temperatūros. Taip pat didelius šilto kiekius vandens kiekius galima naudoti žiemos metu sniego tirpdinimui aplink parduotuvę. Didžiausiai iššūkiai yra vasaros metu kuomet karšto vandens suvartojimas krenta, o atliekinės šilumos kiekis padidėja. Dėl šios priežasties pilnutinės atliekinės šilumos kaupimo sistemos nėra paplitusios ir šiame darbe nebus nagrinėjamos, o pagrindinis dėmesys bus skiriamas daliniam šilumos atgavimui. Verta paminėti, kad pilno šilumos atgavimo sistemose yra patogu nuo akumuliacinėje talpoje sukauptos šilumos įdarbinti šilumos siurblių, kuris panaudotų žemo potencialo atliekinę šilumą ir konvertuotų ją į norimų parametru termofikatą. Tokio ŠS efektyvumas būtų labai aukštas virš 3,9 prie parametru W10/W55 [25].



17 pav. Pilnas atliekinės šilumos atgavimo būdas su viena akumuliacine talpa [6].

4. Transkritinės CO₂ šaldymo sistemos modeliavimas

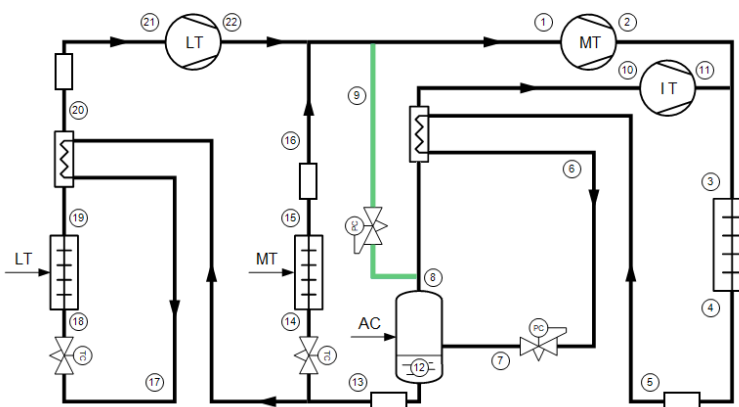
Tipinėje maisto prekių parduotuvėje yra apie 40 m šaldymo priesienių su stiklinėmis durimis, 12 m šaldymo prekystalių ir 10 m šaldiklių. Šiuo metu aukščiausios energetinės A klasės priesieniams reikia apie 490 W/m šaldymo galios. Šaldymo vitrinos sunaudoja šiek tiek mažiau apie 300 W/m. Neigiamos temperatūros šaldikliai naudoja daugiausiai galios apie 700 W/m. Visos galios teigiamos temperatūros šaldymo baldams yra pateiktos prie virimo temperatūros -8 °C (Eurovent SC2 standartas), o neigiamos temperatūros baldams prie -31 °C (Eurovent SC4 standartas). Dujų aušintuvės atvėsinimo temperatūra +35°C. Įvertinus papildomus šaldymo baldus, kurie gali būti sumontuoti priklausomai nuo parduotuvės formato ir tai, kad žemos temperatūros linija atiduoda šilumą vidutinių temperatūrų linijai, priimu tyrimo metu naudoti apie 30kW šaldymo galios vidutinių temperatūrų šaldymo sistemoje ir 10kW žemų temperatūrų sistemoje.

4.1. Šaldymo sistemos modeliavimas

Pirmo modeliavimo metu šaldymo sistemos konfigūracija yra pasirenkama transkritinio režimo su skysčio linijos papildomu šaldymu ir lygiagrečiu kompresoriumi šaltnešio talpos aušinimui iki 37.7 bar(a) palaikant apie 3°C temperatūrą. Žemos temperatūros šaldymo kontūro linija veikia subkritiniame režime, o jos spaudimo garus tiesiogiai aušina vidutinės pakopos šaldymo kompresoriai. Tokia konfigūracija leidžia visą, nors ir nedidelę žemos temperatūros šaldymo ciklo atliekinę šilumą perduoti vidutinių temperatūrų šaldymo sistemai. Tiek žemoms temperatūroms, tiek aukštoms buvo parinkta po tris kompresorius sujungtus lygiagrečiai, nes toks kiekis leidžia prisitaikyti prie netolygaus šaldymo poreikio dienos bėgyje ir tuo pat metu taupyti elektros energiją. Spaudimo linijos slėgis buvo parinktas 89.24 bar(a). Jis buvo apskaičiuotas pagal sekancią formulę:

$$P_{OPT} = (2,778 - 0,0157 \cdot t_{0_MT}) \cdot t_{GC_OUT} + 0,381 \cdot t_{0_MT} - 9,34 \quad (8)$$

Virimo ir dujų aušyklės temperatūros yra įvedamos Celsijaus laipsniais. Bendrai kraštutiniai galimi spaudimo linijos slėgiai veikiant transkritiniame režime yra 90 bar(a) ir 75 bar(a). Aukštutinę vertę apsprendžia šaldymo sistemos komponentų darbo ribos, o apatinę CO₂ kritinė temperatūra 31 °C apie 74 bar(a). Pasirinktas elementų komponavimas leido pasiekti bendrą šaldymo sistemos efektyvumą COP 1.9. 18 paveiksle pateikta principinė šaldymo sistemos schema, komponentų paaiškinimai nurodyti 1 lentelėje, iš kurios galime matyti, kad pilno apkrovimo metu CO₂ dujų temperatūra spaudimo linijoje pasiekia 118 °C. Tokią temperatūrą pasiekti su sintetiniais šaltnešiais yra neįmanoma dirbant optimaliame režime.

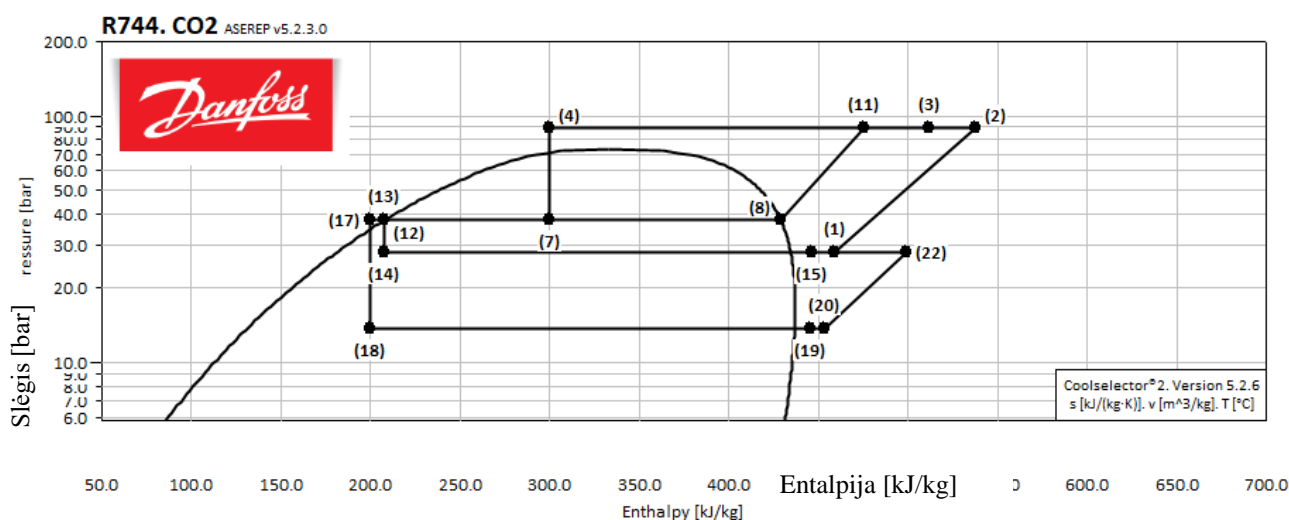


18 pav. Principinės nagrinėjamos šaldymo sistemos su lygiagrečiu kompresoriumi schema [27].

1 lentelė. Pasirinktos šaldymo sistemos termodinaminių ciklų ir komponentų išsklotinė:

Taškas	Aprašymas	Taškas	Aprašymas
1	VT kompresoriaus siurbimas	12	Resyverio sotus skystis
2	VT kompresoriaus spaudimas	13	Bendra skysčio linija
3	Dujų aušintuvės įėjimas	14	Po VT išsiplėtimo vožtuvo
4	Dujų aušintuvės išėjimas	15	VT garintuvo išėjimas
5	Dujų aušintuvės išėjimas papildomas vėsinimas	16	VT siurbimo linija
6	Po AT vidinio peršaldymo šilumokaičio	17	ŽT skysčio linija
7	Aukšto slėgio vožtuvo išėjimas	18	Po ŽT išsiplėtimo vožtuvo
8	Resyverio sotus garai	19	ŽT garintuvo išėjimas
9	Po apėjimo linijos vožtuvo	20	Po ŽT vidinio peršaldymo šilumokaičio
10	AT kompresoriaus siurbimas	21	ŽT kompresoriaus siurbimas
11	AT kompresoriaus spaudimas	22	ŽT kompresoriaus spaudimas

Reikia nepamiršti, kad paralelinis kompresorius duoda naudą tik prie aukštų aplinkos temperatūrų vasarą kai oro temperatūra yra virš $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir aukščiau, tuomet tokia sistemos komponuotė leidžia padidinti efektyvumą iki 15% dėl aukštesnės siurbimo temperatūros ($+3\text{ }^{\circ}\text{C}$) lyginant su VT kompresorių linija ($-8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Likusiu paros metu, kai aplinkos oro temperatūra yra žemesnė ir dujų aušintuvė gali veikti kaip kondensatorius, paralelinis kompresorius neįsijungia, nes garai iš resyverio keliauja per apėjimo liniją 9 į VT kompresoriaus siurbimo liniją (kaip parodyta 19 paveikslė). Jeigu žiemos metu šaldymo sistema palaikoma subkritiniame režime paralelinis garų spaudimas visai nevyksta.

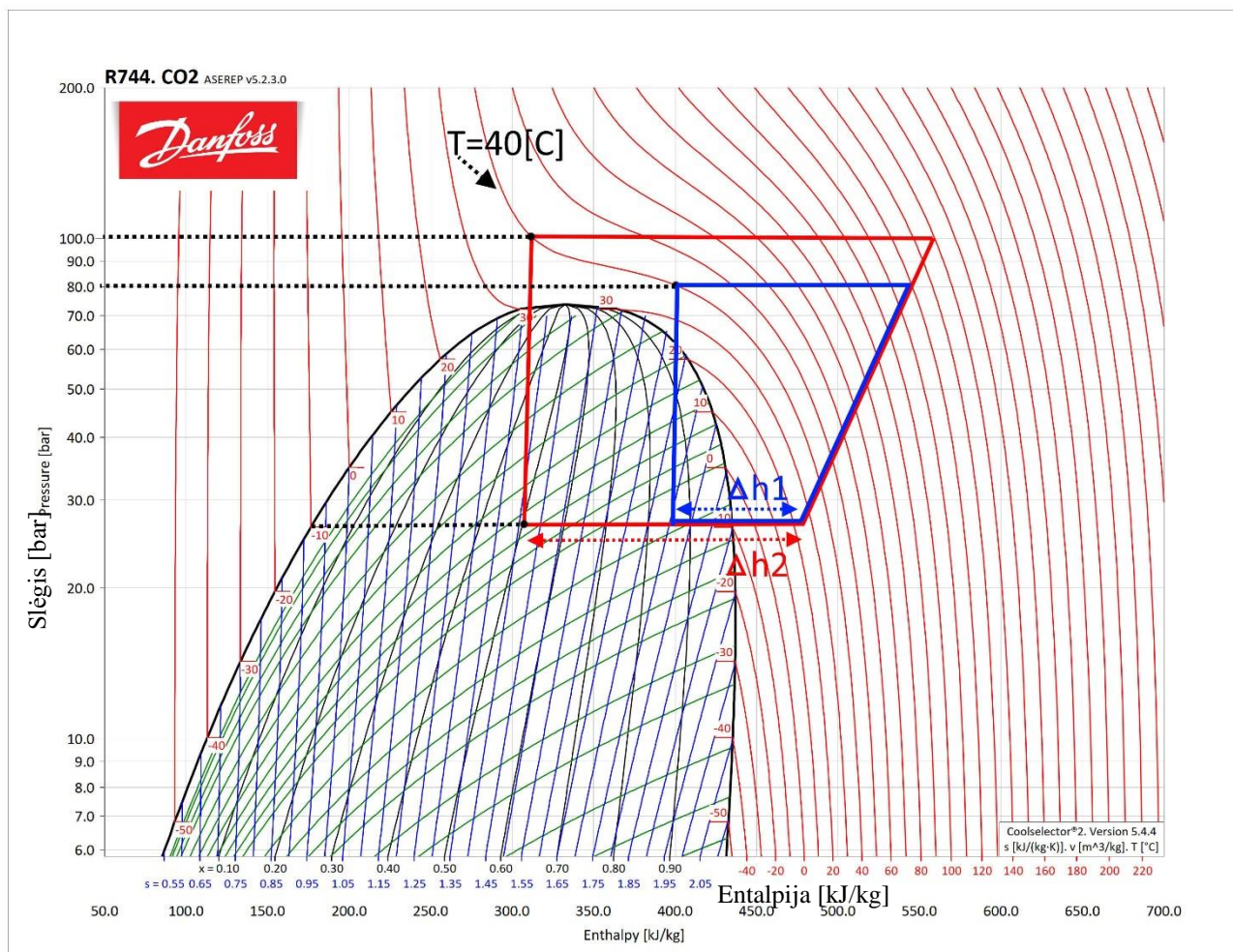


19 pav. Slėgio – entalpijos diagrama tiriamos šaldymo sistemos [27].

4.1.1. Šaldymo ir šildymo efektyvumo skaičiavimai

Įprastai veikiant, šaldymo sistema veikia efektyviausiai pagal optimalaus COP slėgio kreivę, tai reiškia, kad nesvarbu, kiek atliekinės šilumos išgausime iš sistemos, ji sunaudos minimalią energiją nustatytam šaldymo poreikiui palaikyti. Transkritiniame režime, kai nėra slėgio ir temperatūros priklausomybės yra labai svarbu dujų aušyklę palaikyti optimaliame slėgyje, kad pasiekti aukščiausią šaldymo sistemos COP vertę. Šis slėgis nebūtinai yra mažiausias ir artimas kritiniam taškui, nes CO_2

dujų izotermos kitimas virškritiniame režime nėra tiesinės ir labai didėja judant p-h diagrama į kairę. Šis kitimas pavaizduotas detaliau 20 paveiksle iš kurio galime vaizdžiai matyti, kad palaikant aušinimą dujų aušyklėje ties 40 °C ir kompresoriaus spaudimo slėgi 100 bar(a) turėsime daug daugiau naudingos šaldymo galios Δh_2 sunaudojant tiek tiek daugiau kompresoriaus darbo lyginant su žemesniu spaudimo linijos slėgiu 80 bar(a), kuomet naudingas šaldymo galingumas Δh_1 krenta kone dvigubai.



20 pav. Slėgio – entalpijos diagrama atvaizduojanti optimalaus dujų aušyklės slėgio nustatymą.

Kadangi šaldymo sistemos išskiriama šiluminė galia kinta priklausomai nuo garų aušinimo slėgio, įdomu pažvelgti, kaip tuo metu kinta šaldymo sistemos efektyvumas – COP. Tuo tikslu sistemos šildymo COP apskaičiuojamas dalijant šilumos atgavimo pajėgumą iš papildomai sunaudoto energijos kiekio, kurį sunaudojo kompresoriai. Taip darome todėl, nes tada galima palyginti šildymo COP su alternatyviais šildymo šaltiniais. Šildymo COP kinta priklausomai nuo aplinkos temperatūros. Esant aukštai aplinkos temperatūrai, šildymui naudojamas kompresoriaus darbas yra didesnis, todėl šildymui naudojamas kompresoriaus papildomas darbas yra mažesnis. Esant žemesnei aplinkos temperatūrai, aušinimosi slėgis sumažės, todėl tai turės įtakos šildymo COP. Ši analizė buvo atlikta, kai aplinkos oro temperatūra buvo iki +5 °C t.y. simuliuojamos žiemos sezono sąlygos. Esant normaliam darbui, temperatūra iš dujų aušintuvo (S_{GC}) buvo palaikoma +9 °C, o slėgis (P_{GC}) dujų aušintuve buvo keičiamas nuo 45 bar(a) iki 90 bar(a). Pirmame skaičiavime naudojau virškritinę dujų šilumą palaikant +32 °C dujų temperatūra išėjime iš šilumos atgavimo šilumokaičio (S_{HR}). Tokiu būdu buvo modeliuojamas atvejis, kai šilumokaityje vyksta vienfaziai srautai be kondensacijos

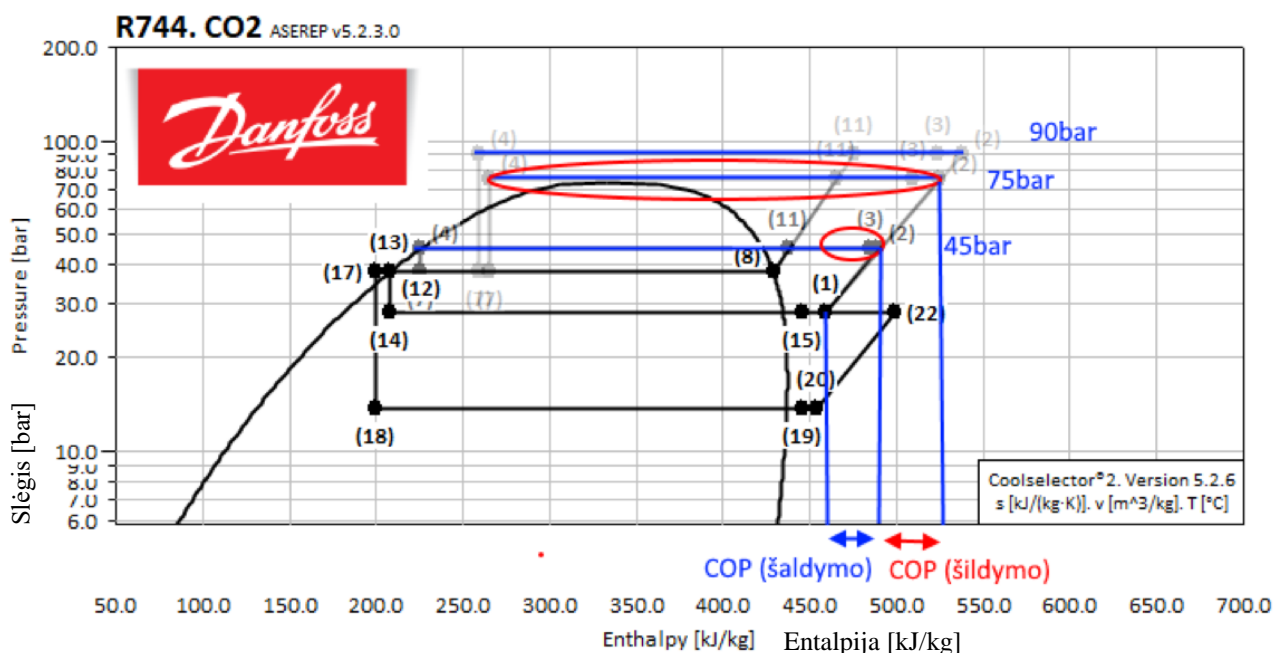
procesų. Parinkimo programa apskaičiuavo kompresorių elektrines (Q_{EL}) galias prie skirtingų parametrų, o žinodamas šaldymo galias ($Q_{\text{ŠALD}} = 40 \text{ kW}$) lengvai apskaičiavau šaldymo sistemos efektyvumą ($COP_{\text{ŠALD}}$).

$$COP_C = \frac{Q_C}{Q_{EL}} \quad (9)$$

Iš kompiuterinės programos taip pat išrinkau duomenys tolimesniems skaičiavimams, tai w_{GC} dujų aušintuvės kompresorių sukuriamas srautas, dujų entalpija prie $+32 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros (h_{32}) ir maksimali iš kompresoriaus spaudimo linijos išeinančių dujų entalpija (h_{MAX}) ir temperatūra (T_{MAX}). Pasinaudojant šiais duomenimis pagal 10 formulę buvo apskaičiuotas atliekinės šilumos kiekis ($Q_{\text{ŠILD}}$) ir analogiškai pagal 9 formulę apskaičiuotas šildymo efektyvumas ($COP_{\text{ŠILD}}$).

$$Q_H = \frac{w_{GC} \cdot (h_{MAX} - h_{32})}{3600} \quad (10)$$

Modeliavimo duomenys atvaizduoti 21 paveiksle. Iš duomenų galime aiškiai matyti, kad AŠ kiekiai prie žemiausio 45 bar(a) slėgio yra labai mažas lyginant su 90 bar(a) slėgiu, bet šaldymo sistemos efektyvumas taip pat mažėja didinant aušinimosi slėgį.



21 pav. Modeliavimo metu atliktų šilumos atgavimo kiekių palyginimas prie skirtingų garų aušinimo slėgių.

Skaičiavimų rezultatai pateikti 2 lentelėje. Iš jų aiškiai matome, kad žiemos metu, optimaliomis sąlygomis veikianti šaldymo sistema, kuomet šaldymo efektyvumas yra didžiausias, generuoja nepakankamos temperatūros šaltnešio CO_2 garus spaudimo linijoje ($50 - 69^\circ\text{C}$ ribose), kurių nepakanka karšto vandens ruošimui pagal higienos normas (55°C). Didinant slėgį spaudimo linijoje iki 70 bar(a) šaldymo efektyvumas sumažėja beveik 2,5 karto, o maksimali AŠ padidėja virš 3 kartų. Aušinimui perėjus į transkritinį režimą, kai slėgis 80 bar(a) AŠ kiekis padidėja virš 15 kartų, o šaldymo efektyvumas sumažėja tik mažiau nei 3,5 karto. Tai parodo, kad šaldymo sistemai veikiant transkritiniu režimu šaltnešis generuoja daug šilumos, nes sistemai veikiant transkritiniu režimu šaltnešyje yra daugiau paslėptos šilumos (angl. *latent heat*). Dirbtinai didinant šaldymo kompresorių darbą ir keliant slėgį aušinimo dalyje maksimaliai iš šios galios šaldymo sistemos galime atgauti virš 64 kW šiluminės energijos prie šildymo efektyvumo $5,7$. Didžiausias efektyvumas yra pasiekiamas

prie 80 bar(a) aušinimo slėgio pilnai apeinant dujų aušyklę. Tai reiškia, kad prie ypač didelių spaudimo linijos slėgių šaldymo kompresorių našumas stipriai mažėja ir atgaunamos AŠ kiekiai neatsveria praradimų šaldymo cikle. Natūraliai iškyla klausimas koks darbo režimas yra efektyvesnis turėti daugiau šilumos ar dirbti prie efektyvesnių šaldymo parametrų. Tam buvo atlikti tolimesni ekonominiai skaičiavimai.

2 lentelė. Atliekinės šilumos atgavimo efektyvumo skaičiavimai žiemos sezono metu.

Band. Nr.	S _{GC} °C	S _{HR} °C	P _{GC} bar(a)	COP _C -	w _{GC} kg/h	h ₃₂ kJ/kg	h _{MAX} kJ/kg	T _{MAX} C	Q _{EL} kW	Q _H kW	COP _H -
1	9	32	45	5.63	643.3	464	490	50	7.1	4.6	-
2	9	32	50	4.78	640.2	455	496	60	8.4	7.3	5.8
3	9	32	55	4.20	637.5	446	500	69	9.5	9.6	3.9
4	9	32	60	3.77	635	432	509	78	10.6	13.6	3.9
5	9	32	65	3.45	632.9	425	513	85	11.6	15.5	3.4
6	9	32	70	3.19	630.9	407	518	92	12.6	19.5	3.6
7	9	32	75	2.98	629.1	358	523	100	13.4	28.8	4.6
8	9	32	80	2.80	627.4	296	528	106	14.3	40.4	5.6
9	31.4	32	80	2.20	969.6	294	528	106	18.2	63.0	5.7
10	32	32	80	2.16	1001	296	529	107	18.5	64.8	5.7
11	32	32	85	2.10	947.2	289	534	113	19.1	64.5	5.4
12	32	32	90	2.03	917.2	284	538	119	19.7	64.7	5.1

4.1.2. Ekonominiai skaičiavimai

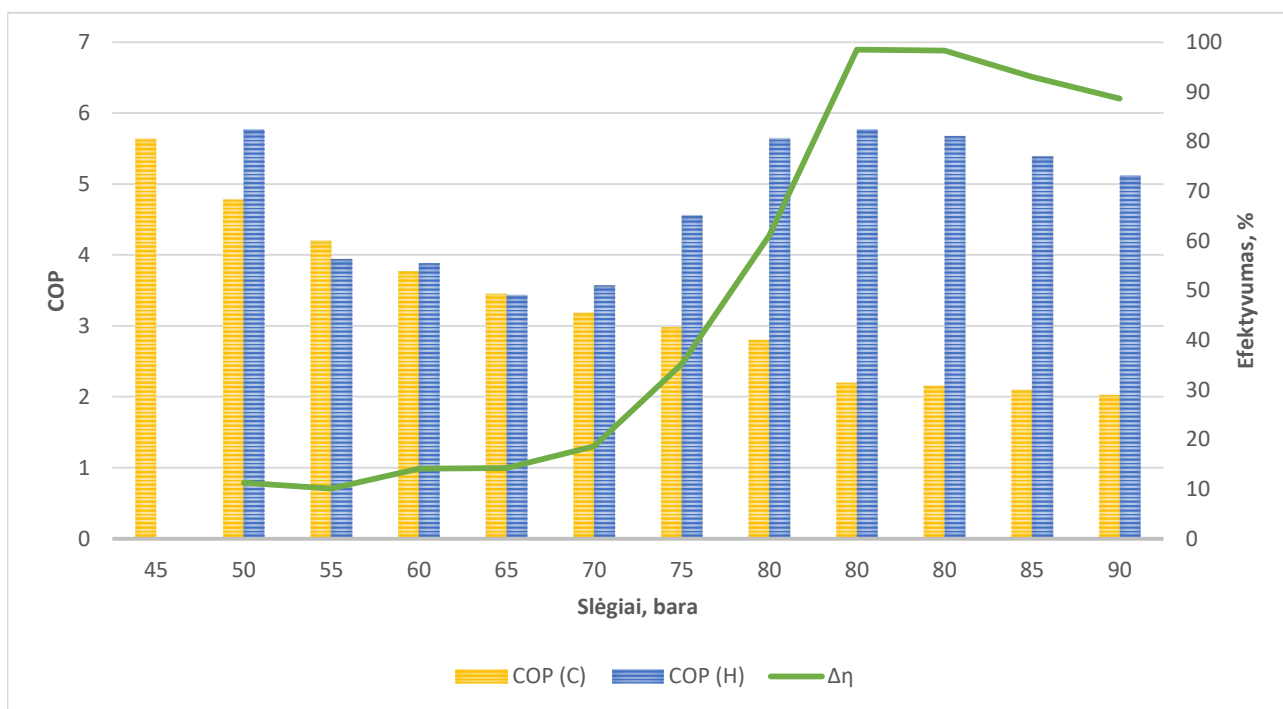
Ekonominės dalies skaičiavimams kaip etalonas buvo parinktas efektyviausias šaldymo ciklas su aukščiausiu COP prie 45 bar(a) aušinimo slėgio. Skaičiavimo metu buvo siekiama palyginti koks darbo režimas turės didžiausią grąžą įvertinus papildomas elektros išlaidas kompresorių darbui santykyje su atgauta atliekine šiluma. Pirmu punktu buvo apskaičiuota kiek kiekvienu atveju buvo išnaudota papildomos elektros energijos (Q_{EL-PAP}) šilumai atgauti pagal formulę:

$$Q_{EL-PAP} = \frac{Q_H}{COP_H} \quad (11)$$

Įvertinus elektros kainą 0,2 €/kWh buvo apskaičiuota kiek papildomai reikės sumokėti už atgautą šilumą ir vėliau apskaičiuota vienos šiluminės kWh savikaina. Norint rasti efektyvumo balansą tarp atgaunamos atliekinės šilumos kiekio ir savikainos buvo parinktas maksimalus atgaunamos šilumos kiekis (64,8 kW) ir procentaliai palygintas ant kiek šis dydis yra didesnis lyginant su kitais AŠ kiekiais (E_{KIEK}). Toliau buvo palyginta savikaina atliekinės šilumos paimant mažiausia vertę (0,035€/kWh) ir palyginant ant kiek ši vertė yra pigesnė lyginant su kitais rezultatais (K_{KIEK}). Vėliau buvo apskaičiuotas šių dviejų verčių santykis ir gautas bendras efektyvumas.

Skaičiavimų rezultatai pateikti 3 lentelėje ir atvaizduoti vizualiai 22 paveiksle. Duomenys parodė, kad efektyviausia yra atliekinę šilumą nuiminėti žiemos metu aušinamoms dujoms išeinant iš aušintuvės +32 °C temperatūros ir palaikant 80 bar(a) aušinimo slėgį. Šiuos duomenys galima paaiškinti tuo, kad esant šioms parametrms veikia paralelinis kompresorius. Jo efektyvumas yra gana aukštas, nes veikia su mažu slėgio perkryčiu ir papildomai generuoja aušinamų dujų srautą AŠ

atgauti, todėl viršijus 75 bar(a) aušinimosi slėgį sistemoje smarkiai padidėja atgaunamos šilumos kiekis ir atitinkamai šildymo efektyvumas.



22 pav. Modeliavimo rezultatų grafinis atvaizdavimas.

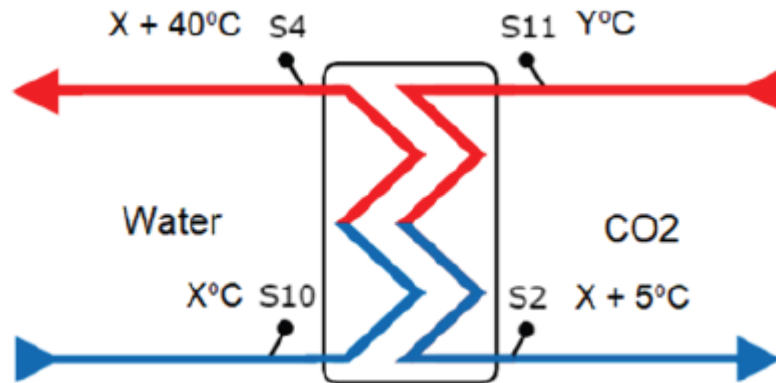
Iš skaičiavimo duomenų taip pat galima pastebėti, kad AŠ savikaina yra kelis kartus mažesnė nei 2022/2023 m. tiekiamą šilumą Vilniaus miesto gyventojams per CŠT [29]. Šiuos duomenys tiesiogiai lyginti nėra pilnai korektiška, nes savikainoje nėra vertinama AŠ atgavimo sistemos savikaina, o tik jos teorinis kiekis sumontavus šilumokaičius ir akumuliacijos sistema ir kitas svarbus dalykas atgaunama šiluma yra žemo potencialo apie +32 °C. Duomenys 3 lentelėje labiau parodo absoliučius šilumos kiekius.

3 lentelė. Atliekinės šilumos atgavimo potencialo ekonominis vertinimas.

Band. Nr.	Q _{SILD} kW	COP _H -	COP _C -	Q _{EL-PAP} kWh	KAINA Eur/h	SAVIKAINA Eur/kWh	E _{KIEK} %	K _{KIEK} %	η %
1	4.6	-	5.63	-	-	-	-	-	-
2	7.3	5.8	4.78	1.263	0.25	0.035	11%	100%	11%
3	9.6	3.9	4.20	2.423	0.48	0.051	15%	146%	10%
4	13.6	3.9	3.77	3.498	0.70	0.052	21%	149%	14%
5	15.5	3.4	3.45	4.499	0.90	0.058	24%	168%	14%
6	19.5	3.6	3.19	5.443	1.09	0.056	30%	162%	19%
7	28.8	4.6	2.98	6.32	1.26	0.044	45%	127%	35%
8	40.4	5.6	2.80	7.164	1.43	0.035	62%	102%	61%
9	63.0	5.7	2.20	11.06	2.21	0.035	97%	101%	96%
10	64.8	5.7	2.16	11.413	2.28	0.035	100%	102%	98%
11	64.5	5.4	2.10	11.946	2.39	0.037	99%	107%	93%
12	64.7	5.1	2.03	12.633	2.53	0.039	100%	113%	89%

4.2. Šilumokaičio parinkimas maksimaliai AŠ gražai

CO₂ šilumokaičio dydis yra labai svarbus, kad šilumos atgavimo procesas būtų efektyvus. Jei šilumokaitis yra per mažas, šaldymo sistemos didžiausios apkrovos metu jis neatgaus visos turimos energijos. „Danfoss“ rekomenduoja skaičiuojant naudoti maksimalų CO₂ masės srautą, slėgį ir temperatūrą virškritiniu režimu. Šilumokaičio vandens išleidimo temperatūra (X °C) turėtų būti bent 40 °C aukštesnė už įleidimo temperatūrą, bet ne aukštesnė kaip 85 °C. Siekiant didžiausio efektyvumo, temperatūros skirtumas tarp vandens įleidimo ir CO₂ išleidimo turėtų būti ne didesnis kaip 5 °C (kaip parodyta 23 paveikslė).



23 pav. Šilumokaičio įtekančių ir ištekančių srautų temperatūrų rekomendacijos [5].

Planuoju apskaičiuoti galimus AŠ atgavimo kiekius keliais variantais pašildant vandenį nuo +10 °C iki +55 °C. Pirmas būdas naudojant vieną šilumokaitį, antrasis naudojant du šilumokaičius. Prieš tai atliktuose skaičiavimuose išsiaiškinau, kad efektyviausia naudoti šaldymo mašinos parametrus pateiktus 2 lentelėje 10 bandymo. Iš šios lentelės duomenų matau, kad šaldymo sistema generuoja spaudimo linijoje 107 °C temperatūros garus. Žinodamas entalpijas ir masės srautą dujų aušyklėje pagal 9 formulę turiu apskaičiuotą atgautos šilumos kiekį ($Q_{\text{ŠILD}}$) 64,8 kW. Toliau naudodamas standartinę formulę su η šilumokaičio efektyvumas bus vertinamas 85% [6] apskaičiuoju pašildomo vandens kiekį:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{Q_{\text{ŠILD}} \cdot 3600 \cdot \eta}{c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T \cdot \rho} = \frac{64,8 \text{ kW} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{val}} \cdot 85\%}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 40\text{K} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1.052 \text{ m}^3 \quad (12)$$

Panaudojant du šilumokaičius sujungtus nuosekliai galima efektyviau pašildyti karštą vandenį, kuomet pirmasis šilumokaitis (HR1) naudos karščiausią garų frakciją ir atvės iki +60 °C jis sugebės pašildyti vandenį iki tokios pat temperatūros panaudojant priešpriešinius srautus t.y. karščiausias garų srautas šildys šalčiausią įtekančią vandens srautą ir išeinantis karštas vanduo pašils iki išeinančio garų srauto temperatūros. Antrasis šilumokaitis (HR2) naudojantis jau atvėsusius garus galės juos panaudoti šalto vandens pašildymui. Pasinaudojęs 9 formule sužinau, kad atgautos šilumos kiekis bus 19,5 kW ir atitinkamai pagal 11 formulę pašildyto vandens kiekis nuo +27 °C iki +55 °C bus 509 l/val. Likusios šilumos kiekio t.y. 45,3 kW pakaks, kad pašildyti 1946 l/val. vandens nuo pradinių +10 °C iki +27 °C. Iš rezultatu pastebėjau, kad vandens srautai išsibalansuoja. Reikia kompleksiskai žiūrėti į karšto vandens paruošimą apjungiant su žema temperatūrine grindinio šildymo sistema dirbančia 45/20 °C temperatūriniame režime.

5. Realios atliekinės šilumos atgavimo sistemos analizė

Teorinių skaičiavimų pagrindimui apžvelgsiu veikiančių maisto prekių parduotuvių šaldymo sistemas ir juose sumontuotas AŠ atgavimo sistemas. Prekybos tinklas IKI maloniai pateikė mokslinei analizei 2023 metų duomenys. Parduotuvių adresai ir pavadinimai bus nuasmeninti konfidencialumo tikslais. Pateiktų duomenų analizei visu pirma apžvelgsiu pateikta šaldymo sistemos principinę schemą. Tai leis korektiškai lyginti duomenys, nes nuo veikimo schemos ir įdiegtų komponentų skiriasi AŠ kiekiai ir efektyvumas. Atskiru punktu išnagrinėsiu AŠ atgavimo sistemos integraciją šaldymo sistemoje ir valdymo logiką. Perteklinė šiluma gali būti lengvai prarasta, kai sistema veikia nesuderintai. Valdymo sistema su jutikliais, komponentų pajungimo ir temperatūrų išskaidymo strategija turi didelę įtaką tiek šaldymo sistemos, tiek šildymo sistemos stabilumui ir reikiamų parametrų užtikrinimui.

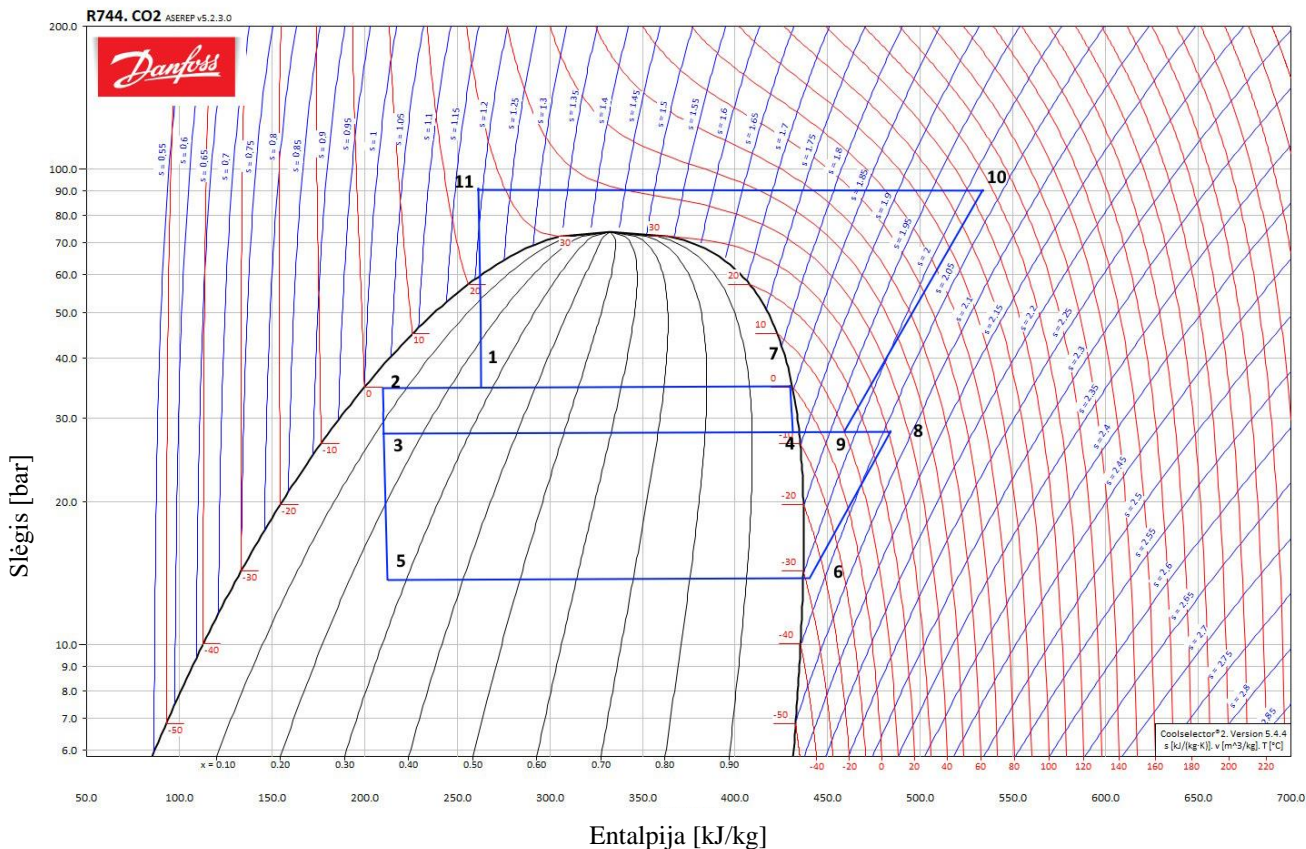
5.1. Parduotuves principines schemos analizė

Tipinė parduotuvės šaldymo schema pateikta darbo 2 priede. Priklausomai nuo parduotuvės dydžio skiriasi tik atskirų komponentų tokių kaip kompresorių, dujų aušyklės galios ir kiekiai. Schemoje taip pat pažymėti papildomi – nevisuose parduotuvėse sumontuoti komponentai, tokie kaip atskira šaldymo sistema resyverio aušinimui (schemoje pažymėta kaip „resilience unit“) ir AŠ atgavimo sistema. Šie komponentai montuojami priklausomai nuo parduotuvės formato dydžio. Šaldymo sistema resyverio aušinimui skirta palaikyti stabiliai resyverio temperatūrai esant ilgesniam elektros atjungimui. Ši atskira šaldymo sistema veikia nuo nepertraukiamo maitinimo šaltinio su akumuliatoriumi ir palaiko optimalų slėgį resiveryje, kad besiplečiantys CO₂ šaltnešis per saugiklius nepabėgtų į orą, kol pagrindinė šaldymo sistema yra sustabdyta. Aušinimo ciklą patogų pradėti nagrinėti nuo skysto CO₂ resyverio (B-612) iš kurio vamzdinių tinklas paskirsto skystą šaltnešį vartotojams į garintuvus. Elektroniniai išsiplėtimo vožtuvai reguliuoja šaltnešio srautą į šiuos garintuvus. Garintuvai yra išskirstyti į dvi grupes žemo (TK Verdampfer) ir vidutinio (NK Verdampfer) siurbimo slėgio. Iš žemos temperatūros garintuvų įsiurbiamos dujos grįžta į kompresorinę ir yra suspaudžiamos sub-kritinio režimo kompresoriais (E-311/321) iki vidutinės temperatūros garintuvų slėgio. Iš vidutinės temperatūros garintuvų įsiurbiamos dujos sujungiamos su žemos temperatūros kompresorių spaudimo dujomis ir pliupsnio dujomis (angl. *Flash gas*), išeinančiomis iš resyverio per pliupsnio dujų apėjimo vožtuvą (V-630). Šis dujų mišinys patenka į virškritinius kompresorius (E-111/121/131) kur yra suspaudžiamas iki aukšto slėgio ir iš ten siunčiamas į dujų aušintuvą (E-611). Jame šaltnešis atvėsinamas iki beveik aplinkos temperatūros. Vėliau ataušintos CO₂ dujos patenka aukšto slėgio valdymo vožtuvą (V-622), kur jis vėl išplečiamas iki subkritinio slėgio ir patenka į resyverį, kuriame jis atskiriamas į skystį, ir dujas, o po to ciklas vėl prasideda iš naujo.

5.1.1. Parduotuvės šaldymo ciklo analizė

Šį ciklą vizualizuoja 24 paveiksle pateikta log p-h diagrama. 1 taške šaltnešis per aukšto slėgio valdymo vožtuvą patenka į resyverį būdamas skysčio ir garo mišinio, kuriame palaikomas tarpinis slėgis apie 33 bar. Priklausomai nuo dujų aušyklėje palaikomo slėgio ir šaltnešio temperatūros mišinio struktūra būna apie 0,3 t.y. 70 % yra skystoje formoje, o likusi dalis pagal masę yra dujinė. Mišinys išsiskaido į skystą ir dujinę frakciją pagal tankį resiveryje. Žemiausiame resyverio taške esantis šaltnešis yra paimamas į garintuvus, tai atvaizduoja 2 taškas diagramoje. Šaltnešis šioje būsenoje yra sotus skystis apie 33 bar ir -1 °C. 3 taške temperatūros reguliavimo vožtuvas droseliuoja šaltnešį vidutinių temperatūrų garintuvuose. Vožtuve įvyksta nedidelis išsiplėtimas ir skystas

šaltnešis patenka į garintuvą kaip prisotintas skystis būdamas -8 °C temperatūros ir 27 bar slėgio. 4 taške pilnai išviręs šaltnešis su nedideliu perkaitinimu ir tuo pačiu slėgiu. 5 taške prisotintas skystas šaltnešis iš resyverio per žemos temperatūros išsiplėtimo vožtuvus patenka į žemos temperatūros garintuvus prie -31 °C temperatūros ir 13 bar slėgio. 6 taške pilnai išviręs šaltnešis su nedideliu perkaitimu ir prie to pačio slėgio palieka garintuvą ir patenka į žemų temperatūrų kompresorių siurbimo linija. 7 taškas aprašo procesus vykstančius pliūpsnio vožtuve (angl. *flash gas by pass valve*). Per jį keliauja prisotintas garas iš skysčio ir garo atskirtuvo prie 33 bar slėgio. Pliūpsnio vožtuvas valdo slėgį atskirtuve ir perkaitinimą vidutinių temperatūrų siurbimo linijoje.



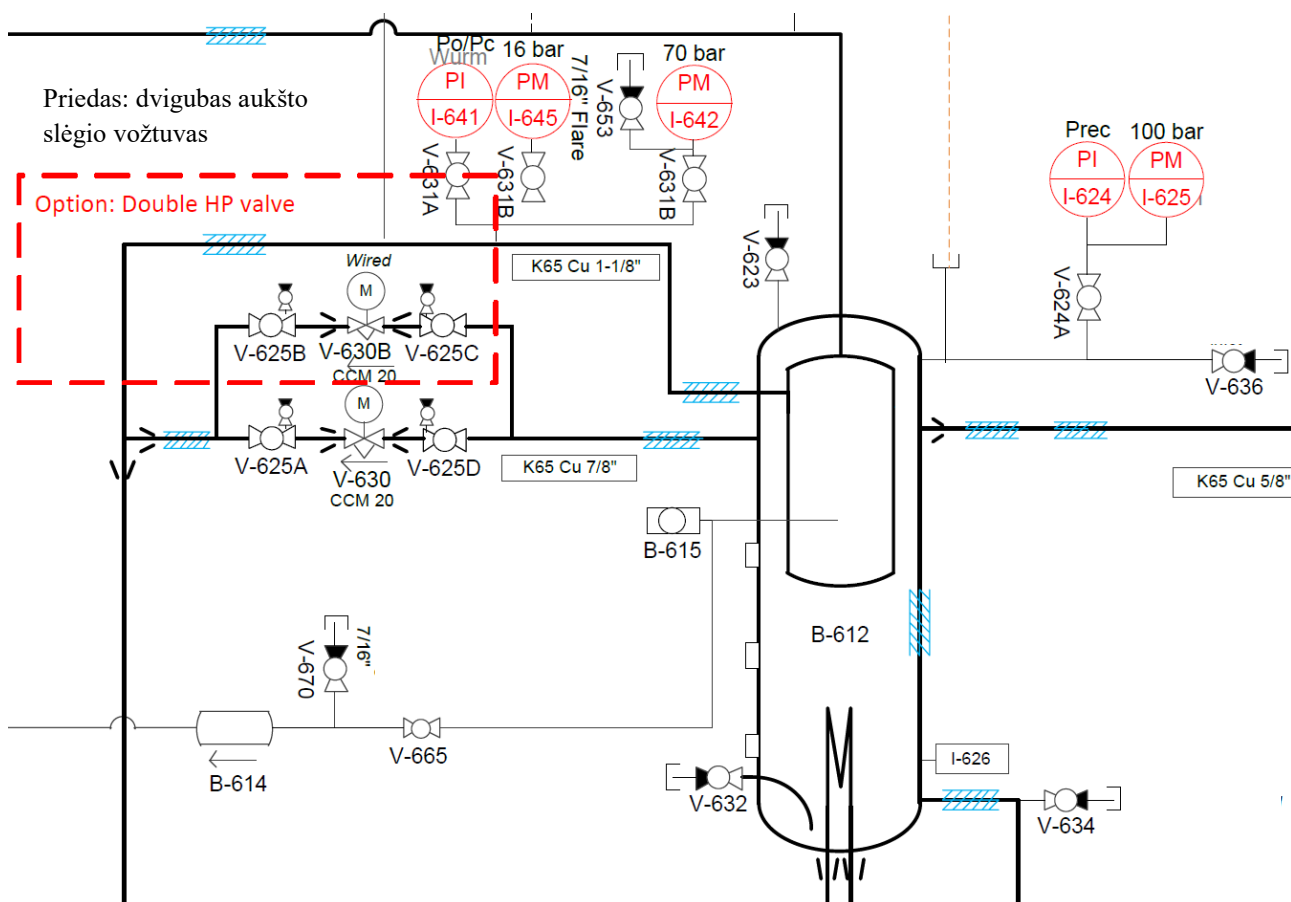
24 pav. Parduotuvės šaldymo ciklo log p–h diagrama.

8 taškas aprašo žemų temperatūrų kompresoriaus spaudimo liniją, kurioje šaltnešis R744 yra suspaustas šiek tiek virš vidutinių temperatūrų siurbimo linijos slėgio 27 bar su dideliu perkaitinimu. 9 taške vyksta siurbimas vidutinių temperatūrų kompresoriuose kur sueina trys srautai: iš pliūpsnio vožtuvo, iš žemų temperatūrų kompresorių spaudimo linijos ir iš vidutinių temperatūrų garintuvų. 10 taškas aprašo šaldymo agento būklę po vidutinių temperatūrų kompresoriaus suslėgimo darbo. Dabar šaltnešio temperatūra ir slėgis sistemoje yra didžiausi. Priklausomai nuo aplinkos sąlygų, ši temperatūra gali siekti nuo 100 °C iki 150 °C ir 90 – 130 bar. Tai kartu yra taškas apibrėžiantis šaltnešį patenkanti į dujų aušyklę. Temperatūros šiame taške gali smarkiai varijuoti priklausomai nuo momentinio apkrovimo šaldymo sistemoje arba nuo aplinkos temperatūros su kuriuo yra aušinamas šaltnešis. Esant žiemos sąlygomis dujų aušyklė gali veikti subkritiniu režimu kaip kondensatorius prie mažesnių slėgių ir temperatūrų aušinimosi linijoje, taip sumažinant energijos suvartojimą šalčio gamybai. Aukšto slėgio vožtuvas kartu su dujų aušyklės ventiliatorių valdymu kontroliuoja šį procesą. Apie tai plačiau rašysiu sekančiame po skyriuje aprašančiame AŠ atgavimo strategiją. Sekantis 11 diagramos taškas aprašo iš dujų aušyklės išeinančio šaltnešio būseną, kai šaltnešyje esanti šiluma buvo perduota aplinkos orui. Subkritiniame režime R744 yra skystos būsenos kaip ir klasikinėse freoninėse sistemose, o transkritiniame režime R744 yra neapibrėžtos būsenos nei

skystos, nei dujinės būsenos, todėl po dujų aušyklės yra įtaisytas aukšto slėgio vožtuvas, kuris valdo slėgį aušinimo linijoje. Jo paskirtis palaikyti slėgių skirtumą tarp resyverio (1 taško) ir dujų aušyklės.

5.1.2. Principinės schemos detalizacija

Bendrai susipažinę su maisto prekių parduotuvėse instaliuojama šaldymo sistema dabar galime nuodugniau panagrinėti kaip yra užtikrinamas stabilus visos sistemos veikimas, kokie papildomi elementai ir pajungimo būdai leidžia patogiai aptarnauti ir prižiūrėti sistemą. Tuo tikslu detaliau apžvelkime kaikuriuos pagrindinius sistemos mazgus ir valdymo armatūrą. Šaltnešio resyveris (B-612) yra schemos centre į jį subėga visi pagrindiniai šaldymo sistemoje veikiantys procesai, todėl patogų pradėti detaliau nagrinėti schemą nuo šio elemento. Nagrinėjamu atveju resyveris yra specialios konstrukcijos, kai jo viduje, viršutinėje dalyje, yra įmontuotas skysčio atskirtuvas. Jo paskirtis apsaugoti vidutinių temperatūrų kompresorių veikimą nuo užpildymo drėgnu šaltnešiu.

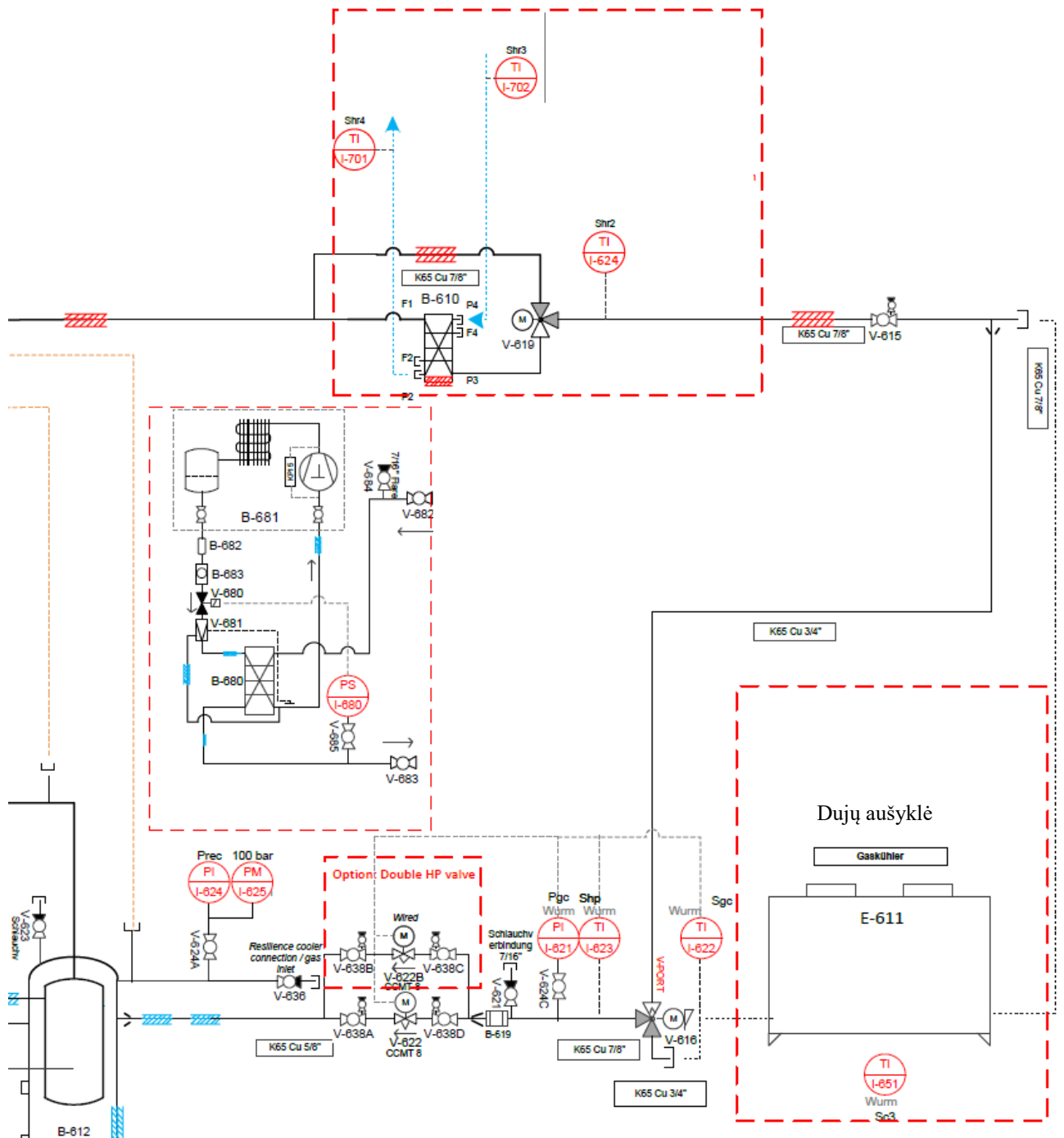


25 pav. Parduotuvės principinės šaldymo schemos resyverio pajungimo detalizacija.

Parduotuvės šaldymo baldai veikia su minimaliu perkaitinimu, todėl iš garintuvų išeinantys šaltnešio garai turi smulkių lašelių, kurie patekę į kompresoriaus cilindrą plėtimosi metu gali jį sugadinti. Skysčio atskirtuvas padeda stabilizuoti sistemos veikimą, o novatoriškumas šio sprendimo yra jo patalpinimas į resyverį (kaip parodyta 25 paveikslė). Toks sprendimas yra brangesnis lyginant su tiesiog resyverio sumontavimu atskiroje vietoje prieš kompresorių siurbimo liniją, bet suteikia kelis esminius privalumus. Siurbiami garai nėra taip stipriai perkaitinami, tai yra svarbu ne tik kompresorių darbui, bet ir tepimo sistemai, nes perkaitusi alyva praranda savo tepimo savybės. Resyverio viršutinėje dalyje matome įmontuota akutę su drėgmės indikacija (B-615), kuri parodo, kai šaltnešyje yra per didelė drėgmės koncentracija, kuri gadina visų komponentų darbą. Ji montuojama viršutinėje

dalyje dar ir tam, kad matyti ar šaltnešio kiekis nėra per didelis sistemoje. Tai ypač aktualu atliekant remonto darbus sistemoje, kai visas šaltnešis yra surenkamas resiveryje. Jeigu surinkus šaltnešį akutėje yra matomas jo lygis, tuomet yra nesaugu uždaryti jį resiveryje, nes yra didelė tikimybė jo išbėgimui per slėgio apsaugos vožtuvus į atmosferą.

Resyverio apsauginis vožtuvas (V-626) darbo metu yra nustatytas ties 60 bar, o aptarnavimo metu galima perjungti į aukštesnį 100 bar slėgį (I-625). Visi resyverio atvamzdžiai yra su uždaromaisiais ventiliais, tai palengvina sistemos aptarnavimą. Schemoje taip pat matome įdomų sprendimą su pliūpsnio vožtuvu (V-630). Jis yra standartinėje komplektacijoje ir lengvam pakeitimui turi taip pat uždaromuosius ventilius, nes tikėtina, kad šiam vožtuvui prireiks techninio aptarnavimo sistemos gyvavimo ciklo eigoje. Papildomai viršuje matome galimą priedą, kuris komponuojamas didesnio formato parduotuvėms turinčiomis didesnę galią, tai papildoma atšaka su antru pliūpsnio vožtuvu (V-630B). Jis yra skirtas pajungimui prie paralelinio kompresoriaus. Tokiu atveju esant žemoms aplinkos temperatūroms, kai resiveryje yra sąlyginai šaltas šaltnešis su maža dalimi garų frakcijos veikia pagrindinis pliūpsnio vožtuvas (V-630) ir garai yra įsiurbiami į vidutinių temperatūrų kompresorių įsiurbimo liniją, bet pakilus aplinkos temperatūrai ir atitinkamai garų kiekiui resiveryje automatika perjungia pliūpsnio vožtuvą į (V-630B) per kuri šaltnešio garai iš resyverio yra siurbiami paraleliniu kompresoriumi prie aukštesnio slėgio lyginant su vidutinių temperatūrų kompresoriumi, todėl sistema veikia efektyviau ir sunaudoja mažiau energijos. Taip pat resyverio apačioje matome sumontuotą šilumokaitį, kuris yra skirtas žemos temperatūros šaltnešio, išeinančio iš garintuvo, perkaitinimui. Tai užtikrina, kad žemos temperatūros kompresorius pasiekia sausas perkaitęs šaltnešis ir antras privalumas yra, kad šis perkaitinimas vyksta resiveryje, kur palaikoma sąlyginai aukšta -1°C temperatūra, o išeinantys garai po perkaitinimo garintuve yra -26°C , ir papildomai šaldo resyverio apačioje esantį šaltnešį. 26 paveiksle matome aukšto spaudimo linijos detalizaciją, kurioje iškart po tepalo atskirtuvo yra sumontuotas šilumokaitis (B-610) AŠ atgavimui. Jis yra pajungtas nuosekliai prieš dujų aušyklę (E-611). Tiek šilumokaitis, tiek dujų aušyklė turi apėjimo linijas valdomas trieigių vožtuvų (V-619/613). Jie padeda geriau valdyti AŠ kaupimą. Apeinant dujų aušyklę daugiau AŠ yra perduodama šildymo sistemai. Jeigu nėra poreikio šildymui arba sistema veikia dalinio apkrovimo sąlygomis kai šaltnešio garų nepakanka vandens pašildymui galima apeiti AŠ atgavimo šilumokaitį. Vamzdyno diametras taip pat skiriasi. Po AŠ atgavimo šilumokaičio einantis vamzdis ties uždaromuoju ventiliu V-615 išsišakoja į dvi atšakas. Pirmoji einanti į dujų aušyklę yra to paties skersmens $7/8$ colio, o dujų aušyklės apėjimo linija turi mažesnę skersmenį $3/4$ colio. Taip yra todėl, kad veikiant AŠ šilumokaičiui iš jo išeinantys šaltnešio garai jau yra gerokai atvėsę, didesnio tankio ir lėčiau juda, tai leidžia naudoti mažesnio skersmens vamzdinę. Tuo tarpu vamzdynas einantis į dujų aušyklę turi praleisti pakankamą dujų srautą, kad ataušinti šaltnešį, kai AŠ atgavimo sistema neveikia ir šaltnešis keliauja per apėjimo liniją ir visa šiluminė apkrova tenka dujų aušyklai. Dujų aušyklės valdymui yra sumontuoti temperatūros (I-623) ir slėgio (I-621) davikliai. Energijos optimizavimui taip pat yra matuojamas aplinkos oras davikliu I-651, tai leidžia sistemai matyti lauko oro temperatūrą ir atitinkamai prisitaikyti prie jos palaikant skirtingą slėgį aušyklėje. Po dujų aušyklės schemoje yra pavaizduotas aukšto slėgio vožtuvas (V-622) reguliuojantis slėgį resiveryje. Prieš šį vožtuvą yra papildomai įmontuotas pajungimo išvadas techniniam aptarnavimui ir filtras (B-619) apsaugantis vožtuvą nuo dregmės ir nešvarumų sistemoje. Papildomai kai kuriuose parduotuvėse yra montuojama po du aukšto slėgio vožtuvus tam, kad padidinti sistemos atsparumą gedimams, tuomet esant pagrindinio vožtuvo (V-622) gedimui suveikia rezervinis (V-622B) ir sistema gali veikti toliau. Priešingu atveju sistema išeina iš rikiuotės.



26 pav. Parduotuvės principinės šaldymo schemos aukšto slėgio linijos detalizacija.

Kiekvienas kompresorius tiek žemų, tiek vidutinių temperatūrų turi individualius ventilius remonto atvejui. Kiekvienas kompresorius turi aukšto slėgio apsaugą. 130 bar (I-121) vidutinių temperatūrų kompresoriuose ir 46 bar (I-321) žemų temperatūrų kompresoriuose. Kompresorių valdiklio sistema taip pat matuoja įsiurbiamų ir išmetamų šaltnešio dujų temperatūras davikliais (I-643/614). Taip pat kompresoriai turi šiluminę temperatūros apsaugą, karterio alyvos pašildymą ir tepalo papildymo sistemą. Ji susideda iš tepalo atskirtuvo (B-609), sumontuoto vidutinių temperatūrų kompresorių spaudimo linijoje. Pro atskirtuvą praėję šaltnešio garai išvalomi nuo tepalo ir grąžinami į skysčio atskirtuvą iš kurio per filtrą (B-614) alyva paduodama į kompresorius. Kiekviena alyvos padavimo linija atsišakoja iš bendro kolektoriaus su individualiais uždaromaisiais ventiliais (V-134/324).

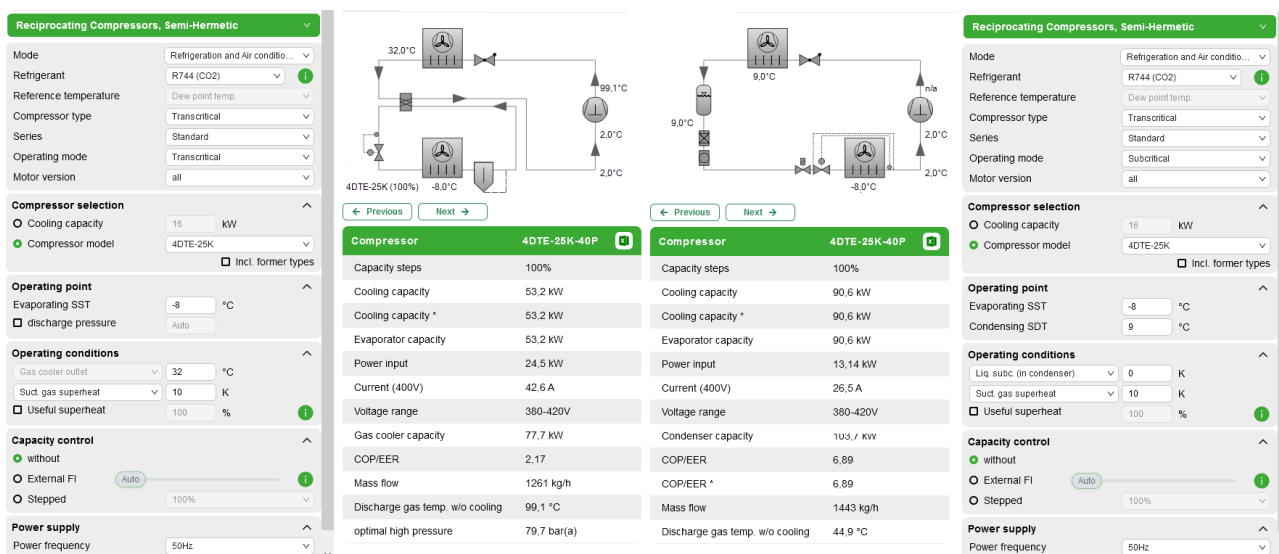
5.2. Šilumos atgavimo sistemos pajungimo analizė

Norint teisingai interpretuoti realius duomenys gautus iš šilumos atgavimo monitoringo sistemos reikia tiksliai išanalizuoti ir suprasti visų šiame procese dalyvaujančių komponentų veikimo logiką ir nustatymus. Šilumos atgavimo sistema susideda iš atskirai funkcionuojančių įtaisų, kurių kiekvienas atlieka tam tikrą užduotį, todėl šią analizę pradėsiu nuo atskirų mazgų veikimo aptarimo ir vėliau judėsiu link kompleksiško jų veikimo ir tarpusavio sąveikos. Pradžioje verta prisiminti, kad įprastose sistemose su kondensaciniais šaldymo agentais slėgis ir temperatūra yra susieti, tačiau mano nagrinėjamos transkritinėse CO₂ šaldymo sistemose slėgis ir temperatūra gali būti valdomi atskirai. Tai suteikia naujų galimybių, susijusių su atliekinės šilumos atgavimu. Įprastomis šaldymo sistemos veikimo sąlygomis be šilumos atgavimo aukštas slėgis sistemoje yra palaikomas pagal optimalaus COP kreivę (formulė 8). Slėgį dujų aušyklėje valdo aukšto slėgio vožtuvas (V-622) pagal gautus duomenys iš slėgio (PI I-621) ir temperatūros (TI I-623) daviklių sumontuotų dujų aušyklės išėjime. Veikiant šilumos atgavimo režime yra būtina žinoti temperatūras išeinančio šaltnešio tiek iš AŠ atgavimo šilumokaičio (TI I-624) tiek iš dujų aušyklės (TI I-622). Šių temperatūrų žinojimas leidžia išvengti hidro smūgio dujų aušyklėje dalinio šilumos atgavimo metu ir kontroliuoti trieigius vožtuvus reguliuojančius šildomo vandens temperatūras. Taip pat tai leidžia išmatavus per aukštas temperatūras išeinančias iš AŠ atgavimo šilumokaičio per trieigį vožtuvą (V-616) nukreipti į dujų aušyklę, kad būtų pasiekti norimi parametrai. Visa tai valdo valdiklis kontroliuojantis aukšto slėgio vožtuvą (V-622). Šiuos du temperatūros daviklius montuoja kuo arčiau šilumokaičių, kad kuo tiksliau išmatuoti išeinančio šaltnešio temperatūras. Šaltuoju laikotarpiu, kai aplinkos temperatūros leidžia, dujų aušyklės temperatūra yra palaikoma subkritiniame režime ties 48 bar 9 °C, kad pasiekti optimalias COP reikšmes. Skaičiavimai atlikti 4 skyriuje parodė, kad ties šiais parametrais AŠ atgavimo potencialas yra mažas ir todėl yra būtina didinti slėgį aušinimo sistemoje, norint atgauti didesnę dalį AŠ.

5.2.1. Kaip yra valdoma atliekinės šilumos sistema parduotuvėje

Siekiant subalansuoti skirtingus naudojimo režimus skirtingas šaldymo sistemos apkrovas ir šilumos poreikius šildymo pusėje AŠ sistema projektuojama kaip buferinis įkrovos mazgas. Taip galima užtikrinti labai stabilų ir tolygų AŠ kaupimą apsaugant CO₂ šilumokaitį nuo staigių terminių apkrovų ir taip prailginant sistemos eksploatavimo trukmę. Termofikato srauto temperatūra, ištekanti iš AŠ sistemos, yra valdoma valdiklio, kuris atitinkamai gauna komandas iš pastato šildymo ir karšto vandens ruošimo sistemų. Duomenų apsikeitimas vyksta Modbus arba Scada protokolu. AŠAS taip pat siunčia kontrolinį signalą šaldymo mašinai indikuodama kiek dar šilumos ji gali sukaupti. Nuo sukaupto vandens virimo yra suprogramuota apsaugos sistema, kuri esant AŠ pertekliui įjungia dujų aušyklę ir pašalina šilumą į atmosferą. Šio proceso valdymą koreguoja temperatūros davikliai sumontuoti akumuliacinėje talpoje ir šilumokaičio paduodamo, ir grįžtamo vandens įvaduose. Kai jie išmatuoja, kad temperatūros viršyja 95°C šilumos atgavimo procesas sustoja. AŠAS pradeda veikimą tik kai išmatuota šaltnešio temperatūra, patenkančio į šilumokaitį, yra aukštesnė už įtekančio pašildymui vandens temperatūrą išmatuota daviklio. Apibendrintai į visą AŠAS galima žiūrėti per šilumos siurblio veikimo prizmę, mat šilumos atgavimas parduotuvės šaldymo sistemoje yra labai lankstus procesas, kuris apima ne tik optimalias sistemos veikimo sąlygas šaldymo metu su minimaliu AŠ atgavimu, bet atsiradus poreikiui geba perduoti visa instaliuota elektrinę šaldymo sistemos galią į šilumos gamybą. Tai prilygsta šilumos siurblio darbui tik šilumos šaltinis šiuo atveju yra ne gruntas ar vanduo, bet parduotuvės prekybiniai šaldymo baldai, kuriuose esantys produktai reikalauja šilumos nuvedimo ir stabilaus temperatūrinio režimo palaikymo. Vienintelė problema yra ta, kad šaldymo

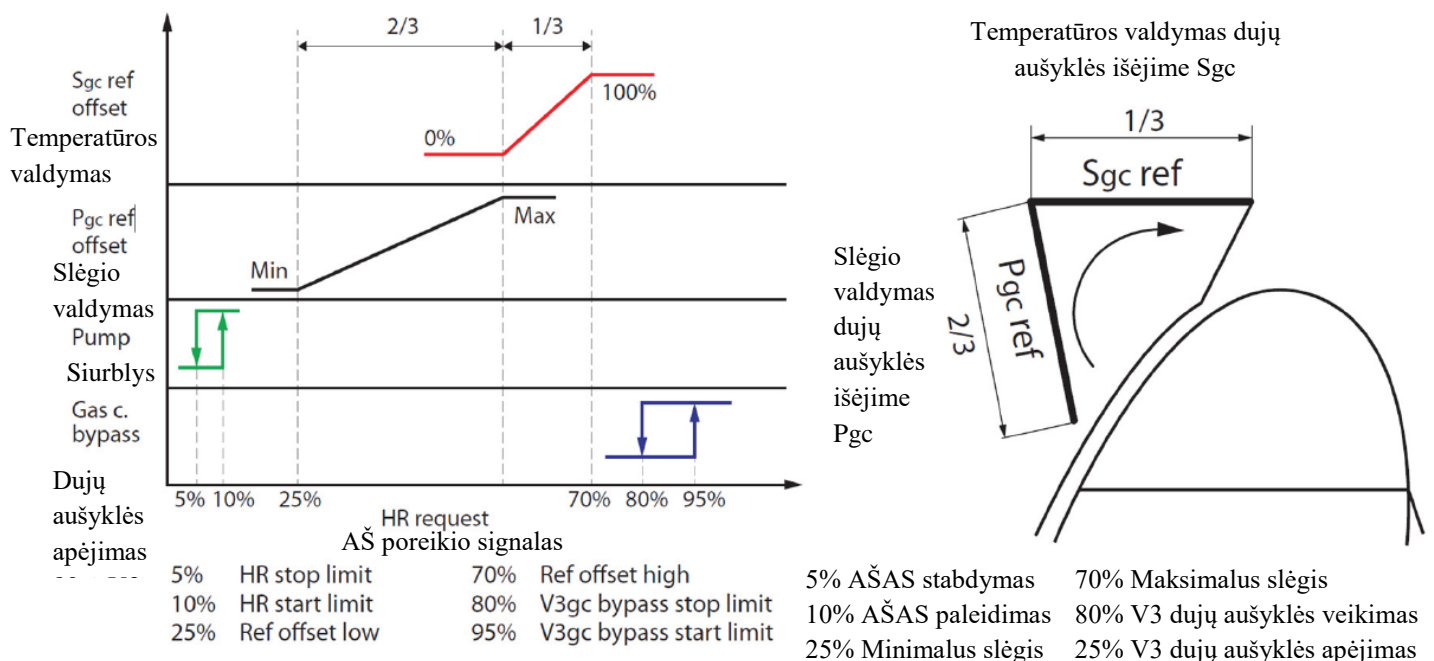
sistemai yra reikalinga nuolatinė šilumos apkrova šaldymo balduose, kad generuoti atliekinę šilumą, nes per didelis maisto produktų peršaldymas priveda prie jų užšalimo ir netinkamos kondicijos. Todėl parduotuvės prekybinėje salėje nepriklausomai nuo metų sezoniškumo yra stengiamasi palaikyti kuo vienodesnę temperatūrą. Vasarą, kai lauko temperatūra ženkliai pakyla virš 25 °C ir žiemos metu, kai temperatūros krenta žemiau +5 °C – parduotuvės prekybos salėje ŠVOK sistemos yra sureguliuotos palaikyti temperatūras nuo +18 °C iki +21 °C ribose. Tokiu būdu šiluminė apkrova tenkanti prekybiniam šaldymo baldams, dėl sumažėjusio temperatūrų skirtumo baldo viduje ir prekybinėje salėje per stiklinį ir kitus paviršius mažėja. Atitinkamai sumažėjus šaldymo apkrovai sumažėja ir generuojamos šilumos kiekiai. Parduotuvės projektavimo stadijoje šaldymo sistema apskaičiuojama generuoti užduotą šaldymo galingumą prie aukštų aplinkos temperatūrų, įprastai +32 °C. Tai daroma tam, kad parduotuvėje esantys maisto produktai būtų saugomi prie reikiamų ir apskaičiuotų temperatūrų net karščiausiomis vasaros dienomis. Prie aukštų aplinkos temperatūrų apskaičiuota šaldymo sistemos galia yra maksimali ir atitinka parduotuvėje instaliuotų šaldymo baldų gamintojų nurodytus parametrus. Nukritus aplinkos temperatūrai iki žiemos temperatūros sąlygų instaliuotos šaldymo galios smarkiai padidėja, kadangi šaldymo sistema veikia pagal optimalias aušinimo slėgio sąlygas (9 formulė) ir žiemos metu slėgis dujų aušyklėje gali būti palaikomas ties 48 bar. Tokiomis žiemos sąlygomis pavyzdžiui, kai parduotuvės šaldymo sistemoje yra instaliuota 43 kW kompresorių šaldymo galia vidutinių temperatūrų linijoje, matome, kad žiemos metu ji gali maksimaliai generuoti 70% daugiau šaldymo galios. Skaičiavimų duomenys pavaizduoti 27 paveiksle. Kairėje pusėje kompresoriaus galia veikiant vasaros metu transkritiniame režime ir dešinėje to paties kompresoriaus galia žiemos metu, kai aplinkos oro sąlygos leidžia veikti subkritiniame režime. Iš šių duomenų aiškiai matome, kad AŠ atgavimas subkritiniame režime yra



27 pav. Kompresoriaus galių palyginimas prie skirtingų darbo režimų [26].

neefektyvus, nes nebus išnaudojama visa instaliuota kompresorių galia. Daug naudingiau šaldymo sistema įvesti į šilumos siurblio režimą. Tai yra atliekama keliais etapais pasitelkus visos šaldymo sistemos pagrindinį valdiklį, kuris gaudamas signalą iš AŠAS valdiklio atitinkamai valdo šaldymo kompresorių veikimą. AŠ valdiklis siunčia analoginį 0 – 10 V signalą pagrindiniam valdikliui atitinkanti nuo 0 iki 100 % šildymo poreikio signalą. Šis signalas pagrindiniame valdiklyje apdorojamas sekančiai seka (grafinis atvaizdavimas pateiktas 28 paveiksle):

- 1) Atsiradus šilumos poreikio signalui visu pirma yra pusėje pakeliamas dujų aušyklės slėgis iki minimalios reikšmės (Pgc HR min) prie kurios gali vykti AŠ atgavimas šilumokaityje.
- 2) Atėjęs analoginis signalas konvertuojamas į procentinę vertę. Kuo vertė didesnė tuo didesnis šilumos poreikis iš vartotojo yra siunčiamas šaldymo sistemai.
 - a) kai signalo vertė viršija AŠAS paleidimo vertę [10 %] (28 paveiksle pažymėta „HR start limit“) yra įjungiamas cirkuliacinis ON/OFF tipo siurblys ir trieigis vožtuvas (V-619) ties šilumokaičiu yra įjungiamas šilumos atgavimui. Signalui pasiekus [5%] vertę prie kurios sustoja AŠ atgavimas („HR stop limit“) pirma yra uždaromas trieigis vožtuvas, leidžiantis šaltnešiui apeiti šilumos atgavimo šilumokaitį, o vėliau po 180 s uždelsimo, leidžiančio grįžti vandeniui iš šilumokaičio į akumuliacinę talpą, yra sustabdomas ir cirkuliacinis siurblys. Procesas pavaizduotas 28 paveiksle žaliomis rodyklėmis.
 - b) Priklausomai nuo atėjusio signalo vertės dydžio, pirmame etape yra reguliuojamas dujų aušyklėje palaikomas slėgis aukšto slėgio vožtuvo (V-622) pagalba, kuris yra matuojamas slėgio jutikliu (I-622), nuo minimalios („Pgc HR min“), kai signalas viršija 25% iki maksimalios („Pgc HR max“) vertės, kai signalas viršija 55%. Procesas pavaizduotas 28 paveiksle juoda kreive.
 - c) Jeigu atiduodamo šilumos kiekio nepakanka įsijungia antro etapo reguliavimo sistema, kai ateinantis signalas viršija 55 %. Šiame etape vyksta išeinančių iš dujų aušyklės CO₂ dujų temperatūros valdymas po to kai dujų aušyklės slėgis pasiekia maksimalę vertę („Pgc HR max“). Tuomet yra reguliuojama išeinančių iš dujų aušyklės CO₂ dujų temperatūra nuo minimalios („Sgc min“) iki maksimalios („Sgc max“) temperatūros vertės, ties signalo verte 70 %. Temperatūros valdymas atliekamas reguliuojant dujų aušyklės ventiliatorių sūkius. Prie aukštesnių sūkių gaunama minimali temperatūros vertė, o minimalių ventiliatorių sūkių maksimali ir tuo pat metu maksimalus šilumos atgavimo kiekis (ženkliai sumažėjusio šaldymo efektyvumo sąskaita). Procesas pavaizduotas 28 paveiksle raudona kreive.



28 pav. Šilumos atgavimo sistemos veikimo logikos schema [5].

- d) Trečiame etape, kai signalas šilumos atgavimui viršija 95 %, kuomet reikalingas maksimalus šilumos kiekis ir dujų aušyklės ventiliatoriai pilnai sustoja – į darbą įsijungia dujų aušyklės trieigis vožtuvas (V-616). Valdiklis palaikydamas efektyvų šaldymo sistemos darbą moduliaciniu būdu, reguliuodamas trieigio vožtuvo dujų aušyklėje atidarymo ir užsidarymo dažnumą, įgalina CO₂ dujų patekimą tiesiai į resyverį apeinant dujų aušyklę. Tokiu būdu gaunamas beveik pilnas AŠ atgavimas sistemoje. Trieigio vožtuvo valdymas atliekamas pagal temperatūros daviklio (I-623) išmatuotas vertes. Dujų aušyklės apėjimas galimas tik kai ventiliatoriai pilnai nustoja suktis. Signalui sumažėjus iki 80 % dujų aušyklės apėjimas yra stabdomas. Procesas pavaizduotas 28 paveiksle mėlynomis rodyklėmis.

5.2.2. Būtinės techninės sąlygos efektyviai šilumogražai

Atskirai paminėsiu sąlygas, kurios yra įgyvendintos parduotuvėje, kad AŠ atgavimas būtų efektyvus ir rentabilus. Šios sąlygos yra svarbios dėl tos priežasties, nes atliekinė šiluma yra žemo terminio potencialo ir norint ją efektyviai naudoti reikia atitinkamai pritaikyti parduotuvės šildymo sistemą. Visu pirma šildomas vanduo – termofikatas į šilumos atgavimo šilumokaitį turi būti tiekiamas arba per trieigį vožtuvą su pamaišymo funkcija, arba siurblys turi būti valdomas dažnio keitikliu, kad būtų užtikrintas paduodamo srauto reguliavimas. Šie sprendimai leidžia tiksliau pašildyti vandenį iki reikiamų parametrų, kadangi esant besikeičiančioms apkrovom šaldymo pusėje atgaunamos šilumos kiekiai smarkiai svyruoja ir kad užtikrinti stabilią pašildomo vandens temperatūrą reikia valdyti arba paduodamą vandens srautą, siurblio sūkių pagalba arba įmaišyti į šilumokaitį dalį jau pašildyto, bet ne iki nustatytos temperatūros, vandens srauto, kuris išteko iš šilumokaičio, per trieigį pamaišymo vožtuvą. Pastarasis sprendimas yra iš dalies pranašesnis, nes užtikrina nuolatinį vandens srautą per šilumokaitį, kuris buvo apskaičiuotas projekto metu, užtikrinant projektines vandens turbulencijos sąlygas. Tai ne tik leidžia maksimaliai efektyviai nuimti šilumą per šilumokaitį, bet ir stabdo kalkių nuosėdų formavimąsi ant šilumą perduodančių paviršių. Tuo tarpu srauto mažinimo strategija perveda šilumokaitį į projekto metu neapskaičiuotas veikimo sąlygas, nors šiuo atveju yra sutaupoma elektros energijos dėl sūkių sumažėjimo. Antras svarbus punktas yra parduotuvėje sumontuotų šildymo vartotojų suderinimas su žemos temperatūros atliekine šiluma. Kad būtų užtikrintas kuo didesnis šilumos atgavimo efektyvumas, grįžtančio iš šildymo sistemos vandens temperatūra turi būti kuo žemesnė. Kuo didesnis skirtumas tarp paduodamo ir grįžtamo į šildymo sistemą vandens, tuo daugiau galios yra atiduodama šildymui. Tik užtikrinant maksimaliai žemas grįžtančias iš šildymo sistemos temperatūras yra pilnai išnaudojama atgauta atliekinė šiluma. Taip pat renkantis parduotuvės šildymo sistemą yra verta rinktis žema temperatūrinį šildymo būdą tokį kaip grindinis šildymas, nes jam pakanka paduoti sąlyginai šiltą vandenį, tuo tarpu renkantis radiatorinį – konvekcinį šildymo būdą, šildymo sistemai tiekiamas vanduo turi būti daug karštesnis, todėl tokių parametrų vanduo bus pašildytas AŠAS mažesniame kiekyje su blogesniais COP parametrais tiek šildymo, tiek šaldymo sistemose. Žemiau pateikiama lentelė su temperatūriniais parametrais kurie yra naudojami parduotuvės šildymo sistemoje.

4 lentelė. Rekomenduojamos šilumnešio temperatūros įvairiems šildymo poreikiams.

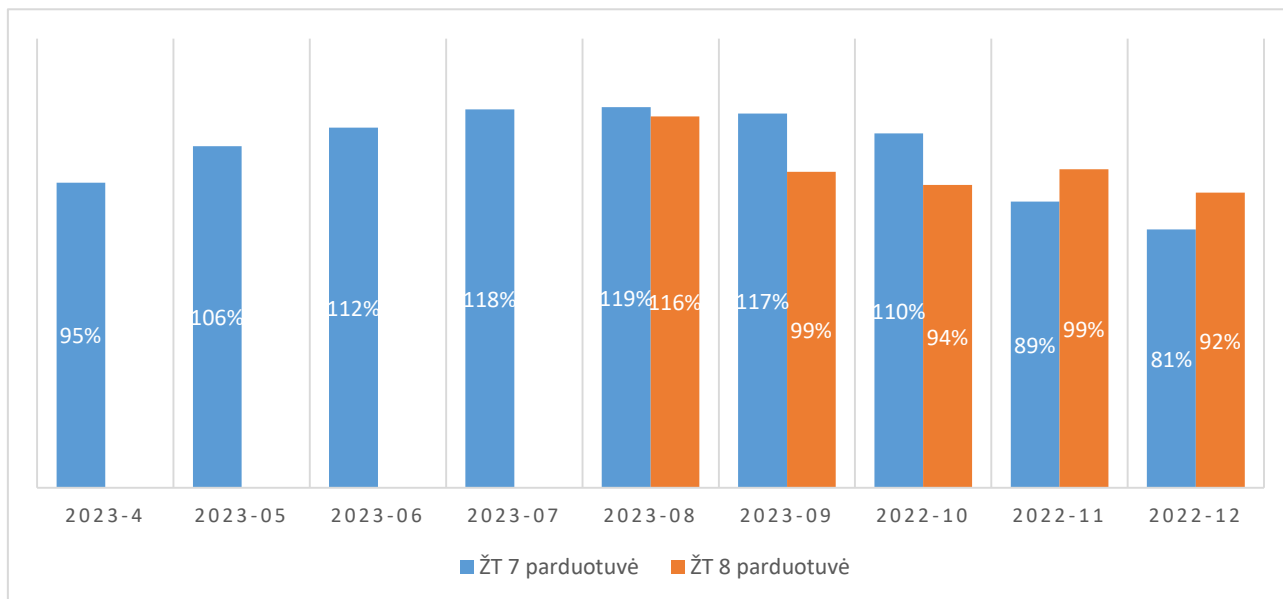
Šildymo būdas	Tiekiamo srauto temperatūra	Grįžtamo srauto temperatūra
Grindinis šildymas	45 °C	25 °C
Radiatorinis šildymas	60 °C	30 °C
Ventiliacijos poreikiams	60 °C	30 °C
Karšto vandens ruošimas	65 °C	25 °C

Sumažinus grįžtamojo vandens temperatūrą, tuo pačiu padidinus perduodamos šilumos kiekius ir efektyvumą visos šildymo sistemos reikalauja atitinkamai padidinti šilumą perduodančių paviršių plotą. Tai sąlyginai padidina investicinius kaštus į įrangą, bet energijos padidėjimas visos eksploatacijos laikotarpiu atsveria šiuos kaštus.

5.3. Monitoringo duomenų analizė

Analizei buvo panaudota 12-os maisto prekių parduotuvių archyvavimo duomenų apskaita. Visose parduotuvėse instaliuota vienodo principo, bet skirtingų galių CO₂ transkritinė busterinė šaldymo sistema su atliekinės šilumos atgavimo sistema. Instaliuotų parduotuvėje šaldymo baldų šalčio poreikis metų bėgyje keičiasi ir didžiausia įtaką tam turi pirkėjų srautai, aplinkos oro temperatūra ir šiluminė apkrova tenkanti stikliniams baldų paviršiams nuo prekybos salės temperatūros, kuri savo ruožtu yra palaikoma nuo +19 °C šaltuoju periodu iki +22 °C šiltuoju periodu. Šaldymo baldų gamintojas deklaruoja šaldymo galių vertes esant +25 °C temperatūrai ir 60% santikinei drėgmei prekybos salėje pagal ISO 23953 standartą. Šaldymo galios poreikis priklauso nuo patalpos temperatūros. Pavyzdžiui palaikant vidutinių temperatūrų šaldymo balduose 0 °C temperatūrą skirtumas tarp deklaruotų rodmenų ir palaikomų parduotuvėje vasaros metu 3 K, o žiemos metu 6 K, tai atitinkamai sudaro apie 12 % ir 24 % paklaidą vertinant gamintojo deklaruojamą šaldymo galios poreikį. Žemų temperatūrų balduose palaikant -24 °C prekybinės salės temperatūrų fluktuacija žiemos – vasaros laikotarpiu atitinkamai keičia šaldymo galios poreikį 6 % ir 12 %. Šaldymo galios kitimas nuo žmonių srauto, taip pat yra ženklus, bet šio faktoriaus įvertinti negalime. Šia tema nėra atlikta daug realių tyrimų, o kaip pagrindas buvo išnagrinėtas darbas [15] atliktas Danijoje tipinėje mažo formato maisto prekių parduotuvėje, kuris parodė, kad vidutiniškai paros bėgyje yra panaudojama tik apie 32 % instaliuotos šaldymo galios vasaros metu. Žiemos metu šis rodiklis būtų dar mažesnis. Didžiausi šaldymo poreikiai yra parduotuvės darbo laiku ir gali siekti apie 50% instaliuotos galios. Pilna šaldymo galia naudojama labai trumpą laiko tarpą, kuomet yra karščiausios vasaros dienos. Taip pat projektuojant šaldymo įrangą yra įvedami galios saugumo faktoriai 10 – 15 % ribose, kas taip pat prisideda prie neišnaudojamo galios rezervo. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad žemos temperatūros apkrovos kinta nedaug nuo 8 iki 12% bendros instaliuotos galios, o didžiausi galios svyravimai yra vidutinių temperatūrų šaldymo sistemoje 12 – 35 %. Apibendrinant galime suprasti, kad parduotuvėse instaliuotos šaldymo sistemos turi daug neišnaudotos galios, kuri gali būti panaudota patalpų šildymo reikmėms. Tarp tyrimui pateiktų parduotuvės duomenų trūksta informacijos, kad galima būtų apskaičiuoti parduotuvių metines COP vertes, apkrovos grafikus, nes nėra žinomi nei kompresoriaus moto valandų skaičius ir jų pririšimo prie aplinkos temperatūrų, todėl taikyti populiariausias COP apskaičiavimo metodikas [12] nėra galimybių. Analizei pateiktų parduotuvių duomenys yra pateikti priede nr. 3. Parduotuvių adresų ir miestų viešinti nėra leista, todėl jos tiesiog sunumeruotos. Struktūrizuojant turimus parduotuvių duomenys buvo atlikta parduotuvės monitoringo duomenų patikra. Pirmuoju punktu buvo patikrinti pateikti COP skaičiavimai. Kadangi parduotuvė nerenka visų reikiamų techninių parametrų tiksliam COP apskaičiavimui – jų skaičiavimo metodikoje buvo padaryta prielaida, kad prekybinių šaldymo baldų šaldymo poreikis yra pastovus dydis, o metų bėgyje kinta tik šaldymo centralės elektros suvartojimas, priklausomai nuo aplinkos oro sąlygų. Turėdami elektros skaitiklių duomenys jų apskaičiuotas COP priklausomai nuo parduotuvės formato kito nuo 2,9 iki 3,9. Šie duomenys gana ženkliai skiriasi nuo kitų atliktų tyrimo duomenų [13]. Taip yra didžiaja dalimi dėl tos priežasties, kad skaičiuojant šaldymo sistemos efektyvumą buvo vertinamos elektros sąnaudos ne tik šalčio gamybai, bet ir prekybinių šaldymo baldų suvartojama elektra. Kas nėra korektiška, mat literatūroje visur yra lyginamas šalčio gamybos

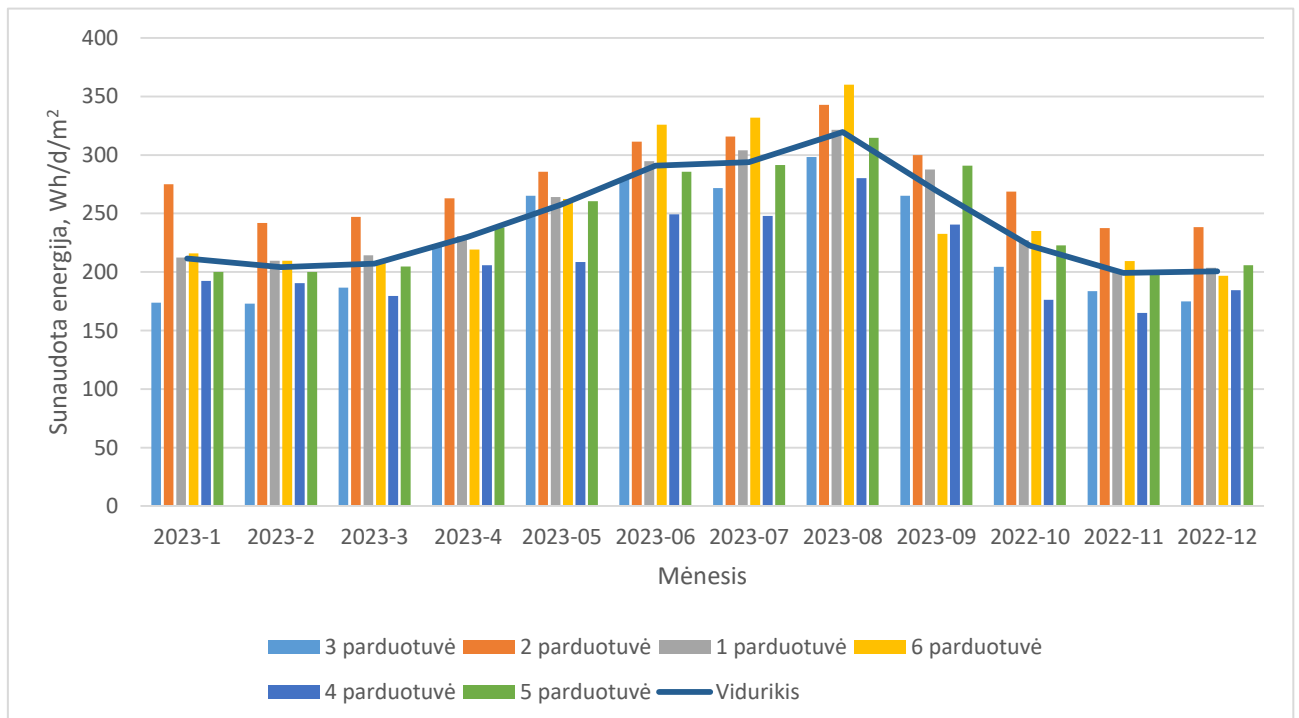
efektyvumas, o šiuose duomenyse buvo įterpti dar ir šalčio vartotojai. Eliminavus šias elektros išlaidas iš efektyvumo skaičiavimų buvo gautos COP reikšmės nuo 5,5 iki 7,1 kas labiau atspindi modeliavimo duomenys [13]. Dėl šios priežasties parduotuvės kur buvo pateiktos tik bendros elektros sąnaudos šalčio gamybai ir suvartojimui buvo pašalintos iš analizės. Sąraše taip pat buvo dvi naujausios parduotuvės įrengtos 2023 metais. Juose jau buvo stebima daugiau parduotuvės parametrų. Šaldymo gamyba žemoms temperatūroms buvo apskaitoma atskiru elektros skaitliuku, ne bendrai. Tai leido suprasti, kad šalčio poreikis žemos temperatūros šaldymo baldams yra beveik pastovus ir kinta nežymiai. Skaičiuojant šias reikšmes buvo rastas visų mėnesių sunaudotos energijos vidurkis ir kiekvienas mėnesis buvo sulyginamas su vidutine reikšme procentine išraiška. Gauti duomenys pavaizduoti paveiksle 29.



29 pav. Šaldymo sistemos žemų temperatūrų linijos palyginamasis energijos sąnaudų kitimo grafikas dviejose parduotuvėse.

Kaip bebūtų gaila, bet šios dvi parduotuvės taip pat buvo pašalintos, nes trūko aktualiausių parodymų žiemos metu, kai šilumos atgavimo poreikis yra didžiausias. Bendrai apžvelgiant šių šešių parduotuvių duomenys buvo pastebėtos kelios tendencijos. Pirma, tai kad šaldymo galių vidutinėms temperatūroms ir žemoms temperatūroms santykis svyruoja nuo 4 iki 4,7 ir yra vidutiniškai 4,1. Tai reiškia, kad apie 25 % visos šaldymo sistemos atliekinės šilumos yra nuo žemų temperatūrų vartotojų, kurios yra beveik nekintančios ir pastovios visų metų bėgyje. Antra išvada yra ta, kad šaldymo centralės per metus sunaudojamas elektros kiekis tenkantis vienam parduotuvės prekybinės salės kvadratiniam metrui svyruoja nuo 101 iki 77 kWh/m² per metus kas sudaro vidutiniškai 88 kWh/m² per metus arba 10 Wh/m². Apskaičiavus šiuose parduotuvėse instaliuotą vidutinę šaldymo galią tenkančia vienam parduotuvės kvadratiniam metrui gauname 67 W/m². Švedijos energijos agentūros atlikto projekto metu [14] buvo nustatyta, kad teoriškai yra įmanoma atgauti iki 1,3 daugiau šilumos nei yra instaliuotos šaldymo galios, bet praktiškai išmatuoti duomenys iš realiai veikiančių parduotuvių su CO₂ šaldymo sistema parodė, kad atgaunamos atliekinės šilumos kiekiai svyruoja tarp 30 % ir 70 % nuo instaliuotos šaldymo galios. Taigi mūsų analizuojamų parduotuvių atveju, jeigu atgaunamos atliekinės šilumos kiekis būtų 30% gauname 20 W/m², o jeigu 70% gautume 46 W/m². 30 W/m² atitinka A energetinės klasės gyvenamojo pastato šilumos poreikį. Prekybiniai statiniai paprastai sunaudoja daugiau energijos, nes juose yra dideli žmonių srautai ir šildymo poreikis gali svyruoti iki 130W/m² esant aplinkos temperatūrai -15 °C [16]. Tai indikuoja, kad atliekinės šilumos

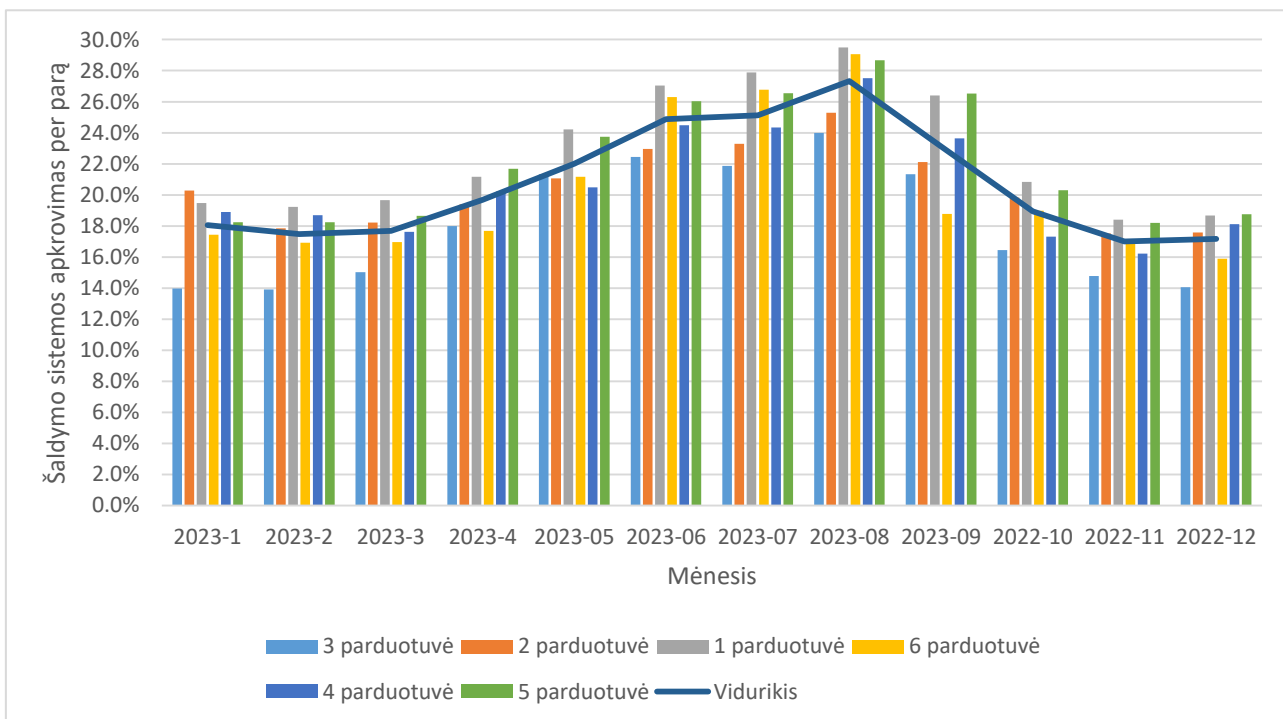
atgavimo sistema negali būti vienintelis šilumą tiekiantis šaltinis parduotuvėje. Ši informacija bus patikrinta sekančiame poskyryje, kuriame bus nagrinėjami konkretūs atgaunamos AŠ kiekiai. Apibendrinant nagrinėjamų parduotuvių šaldymo sistemos duomenys buvo sudaryta 30 paveiksle pateiktas grafikas. Jį sudarant buvo panaudoti kiekvienos parduotuvės mėnesiniai elektros sąnaudų duomenys, kuriuos sunaudojo tik šaldymo sistema be prekybinių šaldymo baldų, nes mums yra aktualu kaip efektyviai veikia šalčio gamyba. Kaip vidurkinimo matas buvo paimtas parduotuvės prekybinės salės plotas. Taip pat buvo eliminuotas netolygumas mėnesio dienų skaičiaus dalinant mėnesines sąnaudas iš mėnesio dienų skaičiaus. Palyginimo paprastumui buvo įvestas visų šešių parduotuvių vidurkis, kuris parodė, kad elektros sąnaudos parduotuvės plotui kinta 0,200 – 0,32 kWh/d/m² ribose. Iš gautų skaičiavimų vaizdžiai galime matyti, kad elektros sąnaudos koreliuoja su metų laikotarpiais ir turi sezoniškumo įtaką. Kitas pastebėjimas yra tas, kad parduotuvė su galingiausia instaliuota šaldymo sistema nebūtinai sunaudoja daugiausiai. Grafike parduotuvės sunumeruotos nuo didžiausios link mažiausios instaliuotos galios ir galime matyti, kad 1 parduotuvės elektros sąnaudos ne visais mėnesiais yra didžiausios. Rugsjūčio mėnesį daugiausiai elektros energijos vienam parduotuvės prekybiniam plotui sunaudojo mažiausią iš visų parduotuvė su silpniausia instaliuota šaldymo sistema. Norint išsiaiškinti tokios situacijos priežastis buvo perskaičiuotas grafikas parodantis kiek valandų per parą veikė šaldymo sistema pilna galia. Tam vėlgi buvo mėnesio dienų netolygumo faktorius ir sunaudotos elektros energijos per mėnesį kiekis padalintas iš instaliuotos šaldymo sistemos galios. Taip buvo gauta kiek valandų per parą tam tikra mėnesį veikė šaldymo sistema pilna galia. Savaime suprantama, kad šaldymo sistema susideda iš kelių kompresorių ir jie galimai net neveikė visi kartu, o tik atskiri jos vienetai, bet kadangi mes neturime duomenų apie atskirų kompresorių atidirbtas moto valandas šių duomenų mums pilnai pakaks tolimesnei analizei.



30 pav. 6-ių parduotuvių šaldymo sistemos energijos sąnaudų tenkančių parduotuvės prekybiniam plotui per dieną kitimo grafikas.

Gavus valandų skaičių kiek valandų šaldymo sistema veikė pilna galia šis rodiklis buvo padalintas iš visos paros valandų skaičiaus ir taip buvo gauta procentinė veikimo išraiška. Šiam skaičiavimui

nebuvo įvedama prekybos ploto vidurkinimo faktorius, nes mums aktualu buvo sužinoti šaldymo sistemos apkrovimą visų metų bėgyje. Gauti rezultatai pavaizduoti 31 paveiksle žemiau. Iš jų galime matyti, kad visuose parduotuvėse šaldymo sistema visa galia karščiausią metų mėnesį veikia mažiau nei 30 % paros laiko. Visų šešių parduotuvių metinis veikimo visa galia vidurkis yra 21 %. Didžiausią instaliuotą šaldymo sistemos galią turinti parduotuvė turi geresnį instaliuotos galios išnaudojimo efektą beveik visų metų bėgyje ir svyruoja nuo 21 % iki 29 %, tai parodo, kad daug šalčio vartotojų turinti parduotuvė turi stabilų šalčio poreikį. Tuo tarpu mažiausią šaldymo sistemą turinti parduotuvė per parą mažiausiai veikia 16 % efektyvumu, o karštomis dienomis šaldymo centralė gali veikti tokiu pačiu intensyvumu kaip ir didelės sistemos 29 %. Grafike galime matyti, kad 9 mėnesius mažosios parduotuvės mažai atsilieka nuo didžiausios pagal centralės veikimo intensyvumą, tai dar kartą signalizuoja, kad mažos šaldymo sistemos yra mažiau inertiškos ir greičiau reaguoja į šiluminės apkrovas parduotuvėje, todėl taikyti vieną modelį AŠ atgavimui mažesnėse ir didesnėse formato parduotuvėse gali būti nekorektiška. Iš pateikto grafiko taip pat galime stebėti, kad yra mėnesių, kai parduotuvės šaldymo sistema pilna galia per parą veikia 15 % t.y. visi šaldymo kompresoriai veikia tik 3,6 val/parą. Apkrovimo grafike taip pat matome sezoniškumo įtaką t.y. karštuoju metu periodu šaldymo sistema visuose parduotuvėse veikia daugiau, nei žiemos metu. Iš šių duomenų galime aiškiai matyti, kad visuose parduotuvėse instaliuotos šaldymo sistemos nėra išnaudojamos pilna galia. Galima manyti, kad šaldymo sistema yra labiau sukonfigūruota veikti optimaliame režime ir gaminti šaltį su aukščiausiu efektyvumu (COP). Šiuo atveju brangi šaldymo technika didžiąją paros dalį neveikia ir neišnaudoja pilno savo pajėgumo, kuris galėtų kurti papildomą pridėtinę vertę, taupyti energijos išteklius neperkant papildomos šiluminės energijos iš CŠT ar kitų energijos šaltinių. Įprasta projektuojant šaldymo sistemą vertinti, kad kompresoriai veiks apie 18 valandų per parą [20], toks režimas užtikrina optimalų šaldymo įrangos moto resursą. Kaip parodė atliktas modeliavimas 5 skyriuje padidinus šaldymo sistemos apkrovimą galima su aukštu efektyvumu atgauti atliekinę šilumą ir panaudoti ją parduotuvės reikmėms.

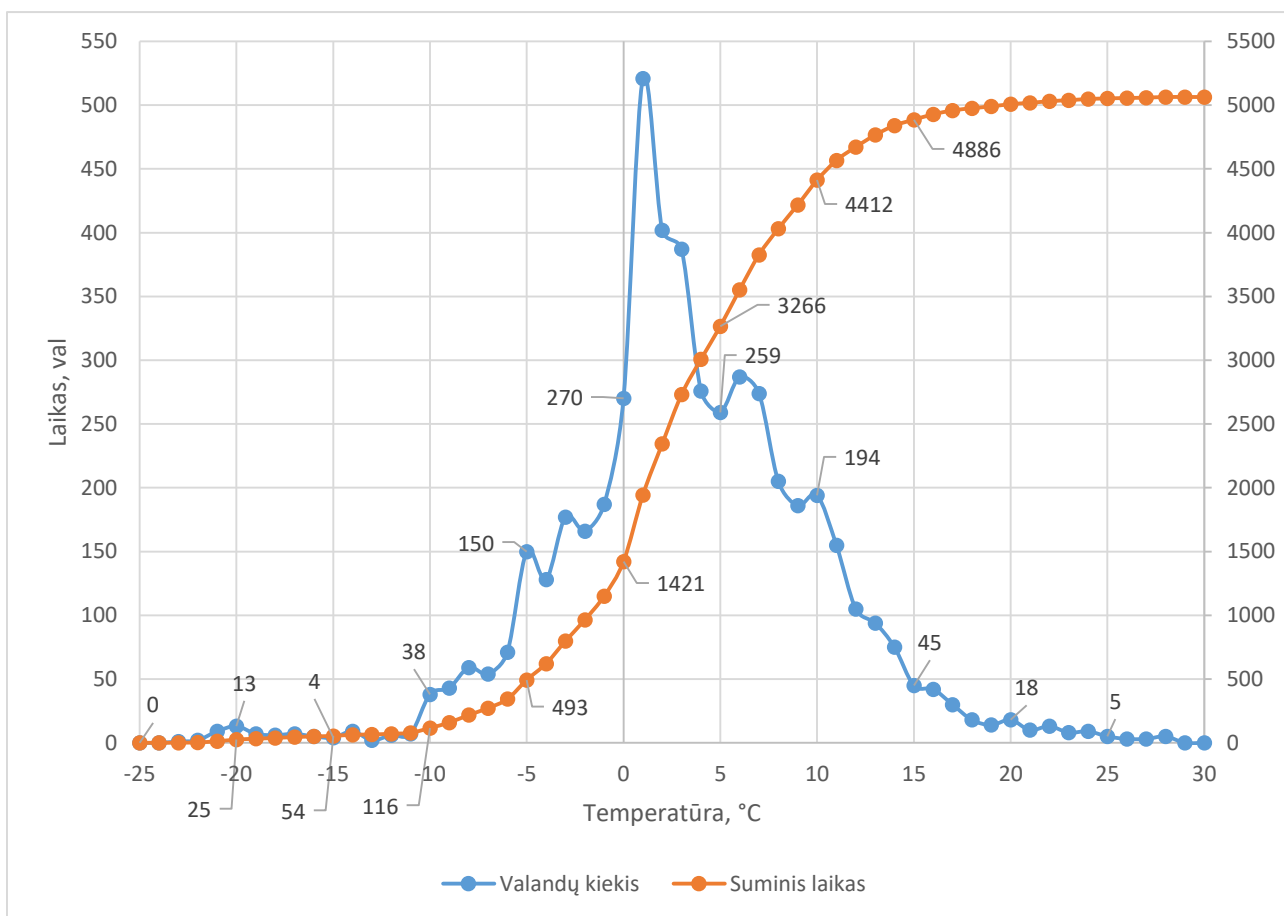


31 pav. 6-ių parduotuvių šaldymo sistemos apkrovos kitimo grafikas.

Verta paminėti, kad pirmoji, galingiausią šaldymo sistemą turinti parduotuvė, vienintelė iš viso parduotuvių sąrašo turi paralelinį kompresorių. Tokia šaldymo sistema su paraleliniu kompresoriumi efektyviai veikia esant karštomis dienoms, kai oro temperatūra yra aukštesnė nei 25 °C t.y. kai šaldymo sistema veikia transkritiniu režimu [18,19]. Lietuvos klimato sąlygomis tokios aukštos temperatūros yra visgi retas reiškinys, ką patvirtina 32 paveiksle pavaizduota vidutinė mėnesio temperatūra, todėl aukštesnis efektyvumas pasireiškia tik trumpuoju vasaros periodu, tuo tarpu likusiu laiku standartinė transkritinė šaldymo sistema prilygsta efektyvume. Pagal instaliuota šaldymo sistemos elektros galią galime matyti, kad jos elektros įvadas yra vienos galios kaip ir antros pagal dydį parduotuvės, nors šaldymo galia vidutinių temperatūrų diapazone yra 11 % didesnė, o šaldymo galia žemų temperatūrų srityje net 20 %. Šios galios kaip ir minėjau anksčiau yra suskaičiuotos karštomis dienoms, kai oro temperatūra siekia +32 °C iš ko galime aiškiai matyti, paralelinio kompresoriaus dėka su ta pačia elektros galia galima pasigaminti ženkliai daugiau šalčio ir užmaitinti daugiau vartotojų parduotuvėje. Šaldymo ir elektrinių galių santykis pirmoje parduotuvėje su paraleliniu kompresoriumi siekia 160 %, o antroje parduotuvėje be paralelinio spaudimo linijos 141 % prie pikinių aplinkos oro temperatūrų. Parduotuvių tinklas įvertinęs turimus duomenis atsisako tokios šaldymo sistemos, nes ji nepateisina investicinių kaštų.

5.3.1. Pasirinktos parduotuvės detali analizė

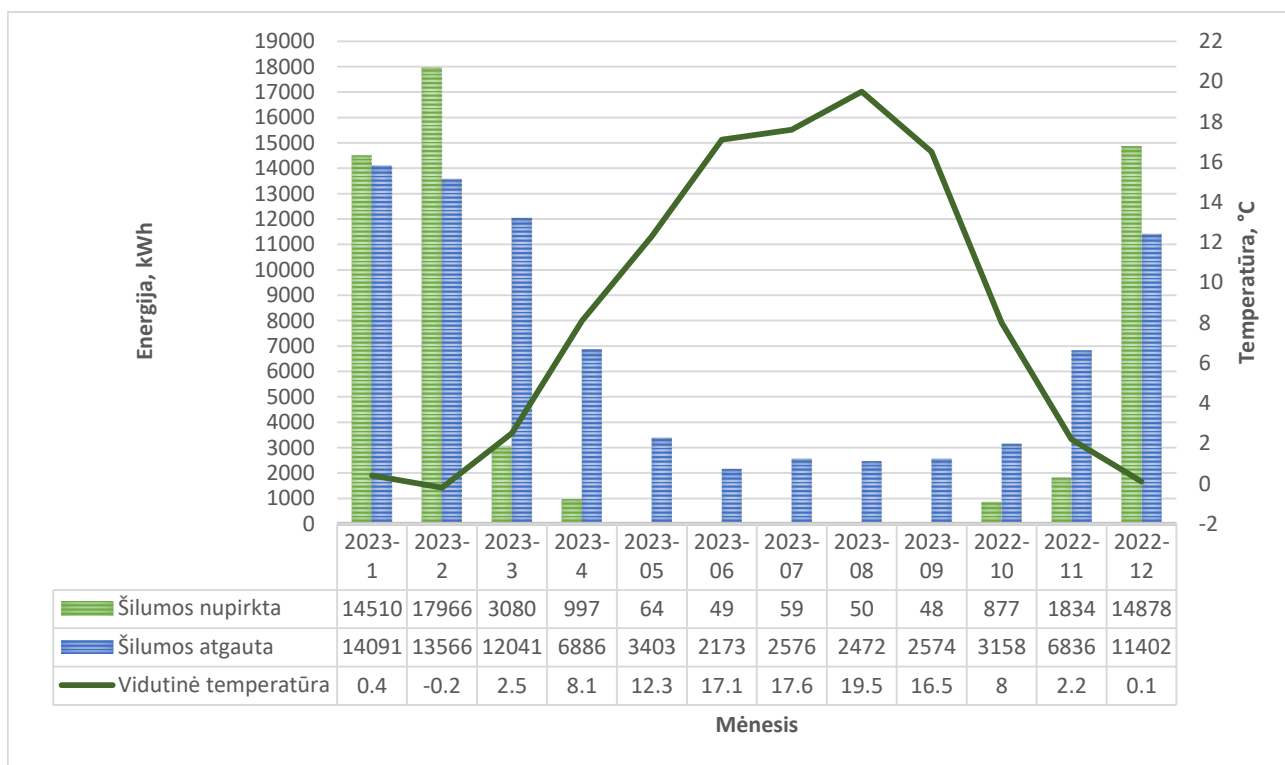
Analizei buvo susikoncentruota ties viena išpardaviminių tipo (angl. *discounter*) parduotuve, tai parodo joje instaliuotos šaldymo galios ir prekybinio ploto santykis 66 W/m². Šiai parduotuvei buvo



32 pav. Duomenys apie oro temperatūros kitimą 2023 metų Spalį/Gruodį – Sausį/Balandį.

pateikti papildomi duomenys iš šilumos apskaitos prietaisų apie atgautos atliekinės ir suvartotos šilumos kiekius. Ši parduotuvė buvo pastatyta tuo laikotarpiu kai gamtinių dujų kainos ES buvo smarkiai pakeltos, todėl vietoje tradicinės dujų katilinės ši parduotuvė buvo prijungta prie miesto centrinių šilumos tinklų. Šildymo sezonas šiame mieste prasidėjo Spalio pradžioje ir pasibaigė Balandžio paskutinėmis dienomis, kai 3 paras iš eilės vidutinė paros oro temperatūra buvo aukštesnė už 10 °C. Šiam tyrimui buvo pateikti kas valandiniai aplinkos oro temperatūros matavimai iš monitoringo sistemos, kurių pagalba buvo suskaičiuotos 4412 val. kuomet oro temperatūra buvo žemiau 10 °C. Taip pat iš šių duomenų buvo padarytas aplinkos oro temperatūrvalandžių grafikas pavaizduotas 33 paveiksle žemiau. Iš šių duomenų aiškiai matome, kad tik 116 valandų oro temperatūra laikėsi žemiau -10 °C, žemiau kurios šaldymo sistemos generuojamos atliekinės šilumos kiekių nepakanka parduotuvės šildymo sistemai. 2023 metų žiema buvo gana švelni, tai parodo, kad tik 25 valandas laikėsi žemesnė nei -20 °C oro temperatūra. Daugiausiai laiko – 521 val. oro temperatūra laikėsi ties 1 °C ir po 402 ir 387 val. ties 2 °C, ir 3 °C atitinkamai. Sumoje net 48% viso šildymo sezono laikotarpio oro temperatūra buvo 0 – 5 °C ribose. Tyrimo taip pat buvo panaudoti duomenys metrologiniai vidutinės mėnesio oro temperatūros duomenys [28].

Turint temperatūrinius duomenys bus aiškiau analizuoti atgaunamos atliekinės šilumos kiekius. Pirmu punktu peržvelkime atgautos atliekinės šilumos ir nupirktos iš CŠT šilumos kiekius vidutinės temperatūros fone. Taigi šalčiausią 2023 metų mėnesį – Vasarį buvo užfiksuoti didžiausi energijos suvartojimai. Atgautos AŠ kiekiai yra daugiau nei dvigubai mažesni nei nupirktos iš CŠT kiekiai. Tai

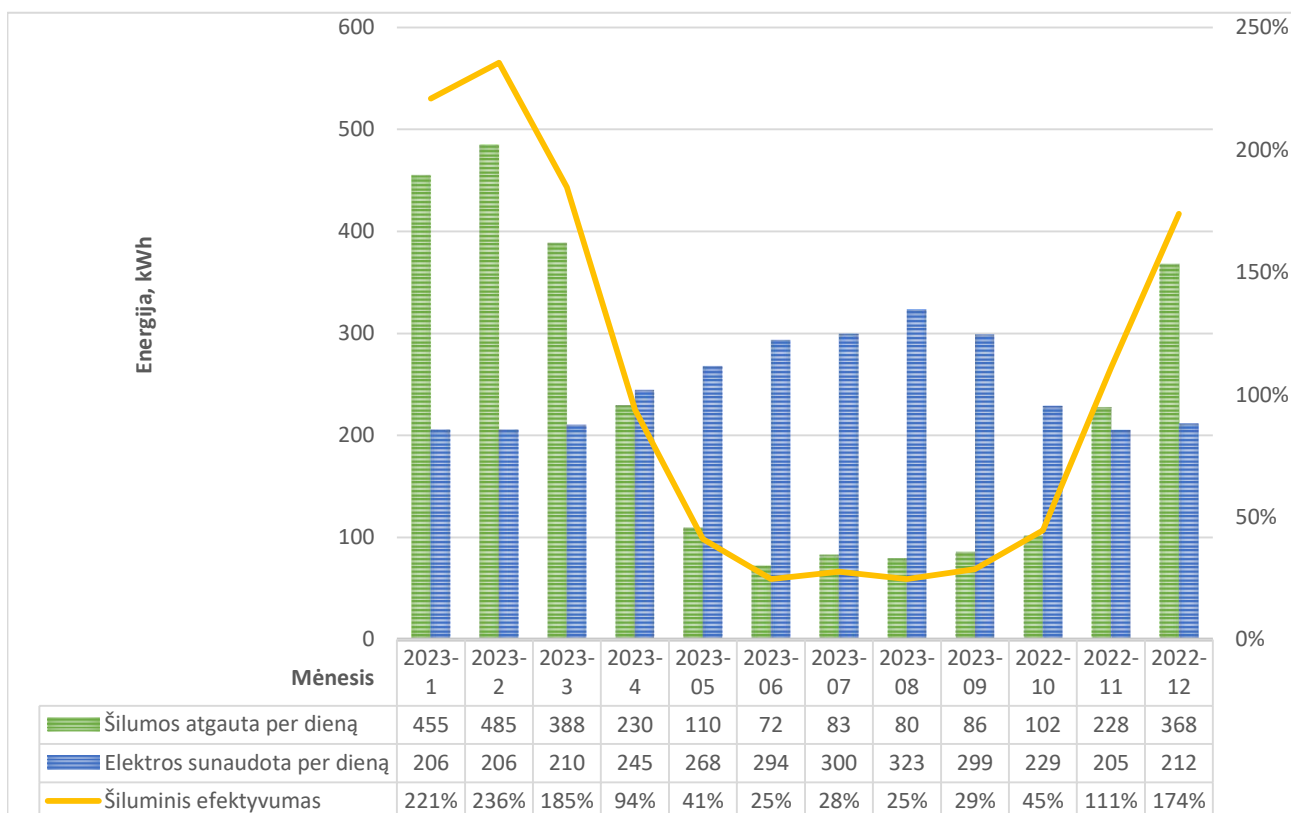


33 pav. Parduotuvėje atgautos atliekinės šilumos nuo šaldymo sistemos ir nupirktos iš CŠT šilumos kiekiai vidutinės mėnesinės temperatūros fone.

aiškiai rodo, kad AŠ pagalba nuo šaldymo sistemos nepavyks pilnai patenkinti parduotuvės šilumos poreikio. Taip pat galime aiškiai stebėti, kad viso šildymo sezono metu atgaunamos AŠ kiekiai yra smarkiai didesni lyginant su kitais metų mėnesiais, kai nėra šildymo poreikio parduotuvėje. Bendrai

per visus metus buvo atgauta 81178 kWh atliekinės šilumos iš kurių 84% buvo atgauta šildymo sezono metu. Bendrai metų bėgyje AŠ buvo atgauta 126% daugiau nei nupirktą šiluminės energijos iš miesto CŠT. Tai parodo, kad atliekinė šiluma nuo šaldymo sistemos ženkliai prisideda prie parduotuvės šildymo sistemos darbo ir padeda taupyti energijos kaštus. Taip pat galime stebėti tendenciją, kad šiltuoju metų periodu AŠ yra atgaunama gana pastovaus dydžio. Šį kiekį galime prilyginti karšto vandens ruošimo sistemai. Atkreipkime dėmesį, kad net vasaros metu AŠ kiekio nepakanka karšto vandens temperatūrai užtikrinti ir yra perkama šiluma per CŠT. Tai galima paaiškinti, kad didžiausi karšto vandens kiekiai yra pikiniai [17] ir susidaro didele dalimi parduotuvės atidarymo metu ir prieš užsidarymą. Detalus šių duomenų grafikas yra pateiktas 34 paveiksle.

Detaliau nagrinėjant turimus duomenys buvo bandoma išsiaiškinti ryšį tarp šaldymo sistemos sunaudojamos elektros energijos ir atgautos AŠ kiekį. Šiai analizei atlikti buvo eliminuoti galimi iškreipimai dėl kiekvieno mėnesio skirtingos trukmės, todėl tiek atgautas atliekinės šilumos kiekis, tiek per mėnesį sunaudotas elektros kiekis nuo instaliuotos šaldymo sistemos buvo padalintas iš to mėnesio dienų skaičiaus, taip gaunant kWh/d. palyginamąjį rodiklį. Vėliau padalinus atgautos šilumos kiekį iš sunaudotos elektros energijos buvo gautas AŠ efektyvumo rodiklis, kuris aiškiai parodo pikines šaldymo sistemos ribas atgaunant AŠ. Padarius šiuos perskaičiavimus pavyko pastebėti, kad nors Vasaris buvo trumpiausias metų mėnesis su 28 dienomis, bet šio laikotarpio vidutiniai AŠ kiekiai per dieną buvo didžiausi, nors iš 33 paveiksle esančio grafiko galėtume spręsti,



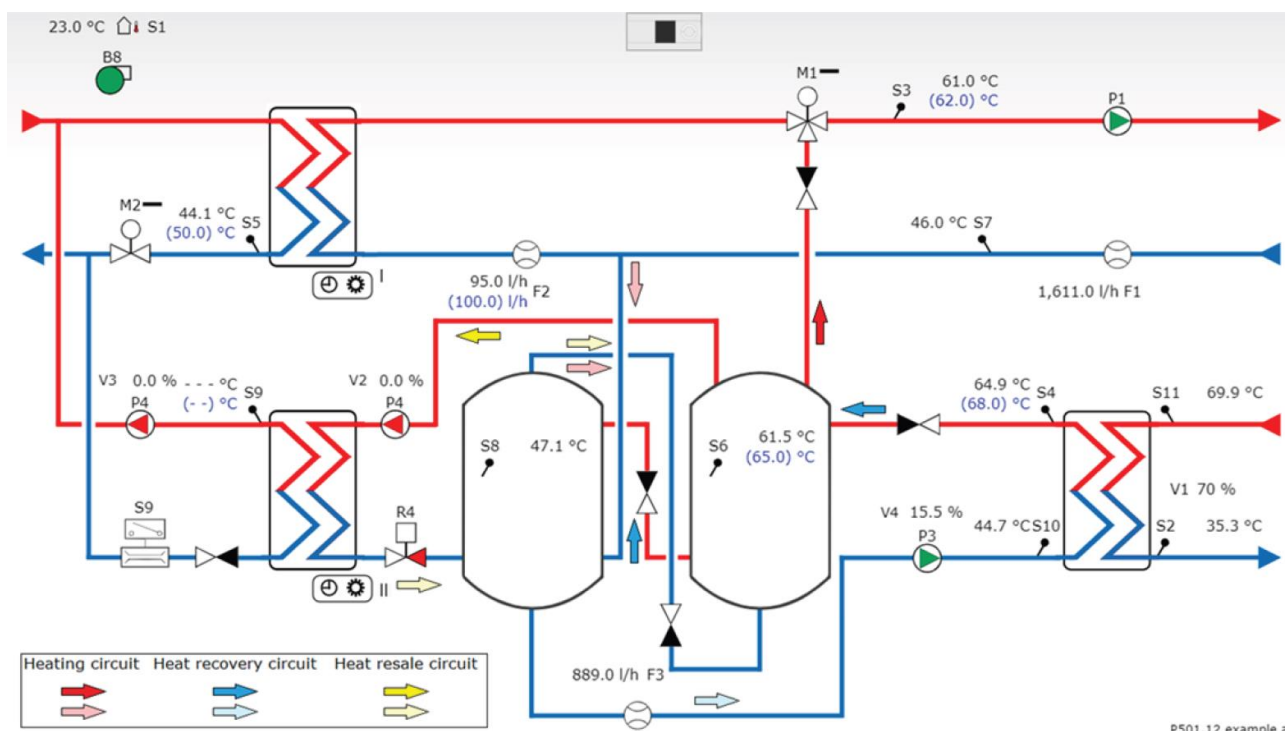
34 pav. Parduotuvėje atgautos atliekinės šilumos nuo šaldymo sistemos ir nupirktos iš CŠT šilumos kiekiai perskaičiuoti pagal mėnesio dienų skaičių ir jų santykio efektyvumo rodiklis.

kad atgautos AŠ kiekis šį mėnesį sumažėjo. Kaip ir buvo tikėtasi didžiausias efektyvumas, perskaičiavus į sunaudotas šaldymo sistemos elektros sąnaudas, buvo užfiksuotas būtent šalčiausią mėnesį Vasarį ir sudarė 236 %. Tai yra geras rodiklis žiūrint į tai, kad Sausio mėnesį per dieną

vidutiniškai buvo sunaudojamas toks pats kiekis elektros energijos, bet atgaunamos AŠ kiekis buvo jau mažesnis ir atitinkamai efektyvumas. Tai galima paaiškinti tuo, kad šilumos poreikis priklauso ne tik nuo aplinkos oro temperatūros, bet ir nuo pirkėjų srautų parduotuvėje. Kadangi visa ši struktūra yra dinaminė sistema padidėjus žmonių srautui parduotuvėje dažniau varstomomos šaldymo baldų durys, atsiranda didesnė šaldymo apkrova sistemoje ir atitinkamai galima atgauti didesnį kiekį atliekinės šilumos. Taip pat įtakos turi ir aplinkos oro temperatūra. Sausio mėnesį jai pakilus ribinis atliekinės šilumos kiekis sumažėja, kadangi daugiau energijos reikia skirti šaldymo palaikymui. Su kiekvienu mėnesiu kuomet kyla vidutinė mėnesio temperatūra galime stebėti elektros sąnaudų didėjimą. Kovo mėnesį elektros buvo suvartota daugiau ir atgauta AŠ mažiau, nei šalčiausią Vasarį. Tai dar kartą parodo, kad AŠ atgavimo sistema puikiai prisitaiko prie parduotuvėje esančių šilumos poreikių ir svarbiausia, kad atgaunant atliekinę šilumą ir spaudžiant šaldymo kompresorius maksimaliom apsuokom, jų sunaudojamas elektros energijos kiekis šilumai generuoti yra mažiau įtakojamas nei aplinkos oro temperatūros padidėjimas. Karščiausiais mėnesiais elektros energijos sąnaudos yra beveik 50% didesnės negu dirbant šalčiausią metų mėnesį ir papildomai generuojant AŠ. Visi šie duomenys aiškiai parodo, kad nereikia bijoti šaldymo sistemą naudoti pilnu pajėgumu t.y. virš optimalių šaldymo sistemos veikimo parametrų. Daug naudingiau yra išnaudoti visą instaliuota šaldymo sistemos galią ir kaupti papildomai sugeneruotą šilumą. Visa tai puikiai atvaizduoja 34 paveiksle esantis grafikas.

6. Atliekinės šilumos atėties perspektyvos

Nors šiuo metu veikiančiuose šaldymo sistemos pilnas šilumos atgavimas yra sunkiai išpildomas, nes paprastai objektuose kur yra sumontuotos tokios sistemos nėra tokio didelio karšto vandens ar kitokios šiluminės energijos panaudojimo poreikio ištisus metus, nors tokiu būdų šilumai pilnai nuvesti per vandeniu aušinamus šilumokaičius galima būtų pašildyti daug vandens t.y. objekto teritorijoje turėtų būti didelis šilumos poreikis ištisus metus kas yra labai reta. Pilnas atliekinės šilumos panaudojimas taps aktualus perėjus prie 5G CŠT, kuriuose bus galima kaupti ir perduoti žemo potencialo šilumą [9]. 5G tinklo koncepcijoje yra numatyt tiek šilumos tiekimas tiek vėsumos, todėl pilnas atliekinės šilumos atgavimas taps labiau racionalus ir lengviau įgyvendinamas techniškai. Atliekinės šilumos atgavimas nuo šaldymo sistemos nėra linijinis procesas. Kaip ir visuose sistemose yra pikinės apkrovos dienos metu prie to dar prisideda metų sezoniškumo įtaka. Kaip ant tai karšto vandens poreikis prekybos įmonėse yra tik parduotuvių darbo valandomis, šilumos šildymui poreikis yra didžiausias žiemą, kai šaldymo sistemai tenkanti apkrova savaime sumažėja ir atitinkamai atliekinės šilumos kiekiai taip pat. Dėl šios priežasties atgautos atliekinės šilumos kiekis gali kaip ir išsekti, taip ir persipildyti dėl neįprastai sumažėjusio poreikio pavyzdžiui šventinės dienos, kai parduotuvės kelias dienas yra uždarytos, bet šaldymo sistema veikia ir prieš šventinis laikotarpis kai pirkėjai perka daugiau prekių nei įprastai ir šaldymo sistemos sugeneruoja daug daugiau atliekinės šilumos, nei jos telpa akumuliacinėse talpose. Tokiu atveju ją yra racionalu perduoti į CŠT sistemą, juo labiau maisto prekių parduotuvės yra miesto apsuptyje kur šis tinklas yra gerai išvystytas. Principinė AŠ perdavimo schema į CŠT yra pavaizduota 35 paveikslėlyje. Viršutinis kairėje esantis



35 pav. Principinė schema atliekinės šilumos perdavimui į CŠT [5].

šilumokaitis tiekia šilumą iš CŠT esant jos trūkimui parduotuvėje. Apatinis šilumokaitis kairėje perduoda perteklinę šilumą atgal į CŠT. Dešinėje esantis šilumokaitis atgauna AŠ nuo šaldymo sistemos. Šilumos tiekimas pastato reikmėms yra atliekamas per dešinėje viršuje esančius atvamzdžius. Trieigis vožtuvas M1 pamaišo grįžtanti iš pastato šilumos tiekimo grandinės vandenį su AT sukauptu karštu vandeniu pagal jutiklius S6/S8 sumontuotus AT. Esant jos trūkimui (S8/S6

davikliams užfiksavus nepakankamą temperatūrą) valdymo sistema naudos CŠT tiekiamą šilumą atidarant M2 vožtuvą. Jeigu AŠ sistemoje yra sukaupta per daug šilumos jos perdavimas į CŠT vykdomas atvirkščiu būdu pirma uždariant M2 vožtuvą, nes vienu metu negalima imti ir perduoti šilumą, o vėliau įdarbinant siurbį P4. Reguluojant vandens srautą per šilumokaitį valdymo sistema palaiko užduotų parametrų termofikato pašildymą perduodant šilumą į CŠT.

Prekybos centrai tampa vis didesne traukos zona miesto poreikiams. Daug skirtingų parduotuvėje vykstančių procesų, kurie tarpusavyje yra labai glaudžiai susiję, yra integruojami į bendrą parduotuvės valdymo sistemą pagal išmanios parduotuvės (angl. *Smart store*) [22] koncepciją. Ateityje galimai parduotuvės pakeis šiuolaikines automobilių degalines. Elektromobilių vystymosi tendencija, jų krovimo laikas keičia žmonių poreikius, verčia juos optimaliau panaudoti savo laiką. Saulės elektrinių spartus vystymasis skatina optimaliai panaudoti elektros energiją. Dideli energijos kiekiai Saulėtomis dienomis ir debesuotomis ar naktimis skatina integruoti pastato valdymo sistemas apjungiant visus procesus į vieną sklandų organizmą. Elektros akumuliatorių panaudojimas energijai kaupti ne piko valandomis yra gana brangus, bet neišvengiamas dalykas ateityje. Kadangi šaldymo sistemos suvartoja iki 40 – 60 % visos sunaudojamos elektros energijos daugumoje maisto prekių parduotuvių, tai sudaro apie 3 – 4 % visos industrializuotos šalies mastu sunaudojamos elektros energijos [10] efektyvios šaldymo gamybos technologijos yra neišvengiama ateities tendencija. Elektros tinklų balansavimas staigaus piko metu laikinai ir išmaniai atjungiant pramoninius vartotojus turinčius galingas šaldymo sistemas, nepaliečiant nustatyto darbo režimo režijų yra ES 2030 prioritetinga tvaraus vystymosi kryptis[23]. Skatinama žiedinė ekonomika verčia pereiti prie žemos temperatūros šilumos tinklų. Šiuo atveju į CŠT šaldymo sistemų tiekiamą šilumą yra labai harmoningai įkomponuojama. Įvertinus faktą, kad šiuo metu per 40% pagamintos šilumos yra naudojama šildymo ir komforto sistemoms [11] nemaža jos dalis yra prarandama dėl nuostolių. Perėjus prie žema temperatūrinių tinklų šie nuostoliai žymiai sumažėtų [9]. Būtų sunaudojama mažiau iškastinio kuro, mažiau šildoma atmosfera ir efektyviau panaudojami neatsinaujinami mūsų planetos resursai. Šiuo metu Lietuvoje galima tapti nepriklausomu elektros energijos tiekėju ir pardavinėti elektros energiją į bendrą tinklą. Danijoje jau šiandien yra nepriklausomi šilumos tiekėjai, kurie parduoda atliekinę šaldymo sistemų generuojamą šilumą į CŠT. Tokia pati ateitis laukia ir Lietuvos. Iš Saulės elektriniu dienos metu generuojama elektra galėtų būti balansuojama AŠAS sumontuotu parduotuvėse pagalba, tuomet dienos metu atpigusi elektra harmoningai būtų paversta šilumine energija ir perduota į CŠT. ES planuose yra numatyta, kad CŠT sistemos generuos nuo dabartinių 12% iki 50% viso šilumos poreikio Europoje [24]. Perėjus prie 5 kartos šilumos tinklų toks šilumos tiekimas taptų dar populiariesnis ir rentabilis. Kad pasiruošti šiai 4 pramonės revoliucijai yra būtina atlikti kompleksinę tyrimą, išanalizuoti technines galimybes ir sklandžiai integruoti šaldymo sistemas į šilumos tinklą. Šiuo metu yra daug 5G CŠT koncepcijų, todėl yra svarbu pasirinkti optimalią Lietuvos sąlygoms ir realiai tinkanti sprendimą.

Išvados

Atlikus šį baigiamąjį darbą buvo gautos sekančios išvados:

1. Atlikta mokslinės literatūros apžvalga parodė, kad atliekinės šilumos atgavimas ir akumuliacija nuo parduotuvėse sumontuotų CO₂ šaldymo sistemų yra racionalus ir plačiai naudojamas sprendimas padedantys taupyti energijos išteklius. Anglijoje atlikti bandymai rodo iki 18 % sumažėjusias gamtinių dujų energijos sąnaudas parduotuvių šildymui su sąlyginai nedidelėmis elektros energijos padidėjimais iki 3 %. Atliekinės šilumos pagalba galima atgauti daug energijos pašildant vandenį iki vidutinės temperatūros 34 °C, bet galimas vandens pašildymas ir karšto vandens ruošimo reikmėms, bet su mažesniu efektyvumu. Tai parodo, kad AŠAS gerai suderinama su žematemperatūrinio šildymo sistemomis ir jas reikėtų diegti kartu, kad pasiekti maksimalią naudą. Švedijos Malmo parduotuvės pavidzys rodo, kad AŠAS gerai dera kombinacijoje su miesto CŠT. Parduotuvė šaltuoju metų laikotarpiu trūkstantį energiją, kurios nesugeba patenkinti AŠAS pasipildo iš CŠT tinklų, o vasarą, kuomet AŠ kiekiai yra žymiai didesni nei poreikiai, perduoda į CŠT tinklus ir taip per metus gauna iki 16 % papildomų pajamų nuo visos per metus sunaudojamo šilumos kiekio. Tokiu būdu maisto prekių parduotuvės esančios šalia gyvenamųjų namų gali tapti gaminančiais šilumos rinkos dalyviais, todėl AŠAS yra viena iš galimybių skatinančių žiedinės ekonomikos principus. Jos teikiama nauda yra akivaizdi, investicijas riboja tik įrengimo kaštai. ES griežtinant aplinkosauginius įstatymus šis šilumos kaupimo būdas virs neatsiejama kiekvienos šaldymo sistemos dalimi, o perėjus prie žema temperatūrinių šilumos tinklų ir liberalizavus CŠT, leidžiant šilumą tiekti nedideliems NŠT, kardinaliai pakeis šilumos rinką.
2. Atlikti skaičiavimai parodė, kad šaldymo sistemai veikiant žiemos metu, kai oro temperatūra yra žemiau +5°C yra daug naudingiau gamintis ne tik šaldymą, bet ir šilumą. Nors šaldymo sistema šaltuoju metu dirba su dideliu efektyvumu, kuris gali viršyti COP 5, bet yra žymiai tikslingiau išnaudoti pilną instaliuotos įrangos galią, papildomai apkrovus šaldymo kompresorius ir išnaudoti virškritinio CO₂ dujų režimo privalumus, kai prie 80 bar(a) slėgio galima atgauti didesnius šilumos kiekius nei šaldymo. Tokių rezultatų negalima gauti su jokiais sintetiniais šaltnešiais. Tokiu būdu kaupiamos šilumos savikaina yra žemesnė nei CŠT tiekiamą kainą 2022-2023 šildymo sezono metu. Tyrime atlikti skaičiavimai parodė, kad viršijus 80 bar(a) slėgį aušinimo linijoje šaldymo sistema smarkiai praranda našumą ir AŠ kaupimui šis veikimo režimas nėra rekomenduojamas, nebent objekte yra reikalingas papildomas šilumos kiekis. Skaičiavimu metu taip pat buvo nustatyta, kad dujų aušintuvės išeinančių CO₂ dujų temperatūra yra optimaliausia +32 °C, nes žeminant išeinančių dujų temperatūrą mažėja srautas spaudimo linijoje, nes labiau atvėsintas šaltnešis yra tankesnis ir jo sunaudojimas, kad pasiekti tas pačias nustatytas temperatūras sistemoje yra atitinkamai mažesnis, todėl AŠ atgavimo prieaugio nebuvo rasta. Jeigu objekte yra poreikis tik karšto vandens ruošimui yra geriau naudoti vieną AŠ šilumokaitį, kelių nuosekliai sujungtų šilumokaičių privalumas būtų tik papildomai naudojant AŠ pastato šildymo reikmėms.
3. Atliekant AŠ panaudojimo analizę su realiai veikiančių parduotuvių duomenys buvo nustatyta, kad parduotuvėse sumontuota šaldymo sistema paros metu pilnu pajėgumu veikia tik nedidelį laiko tarpą tik nuo 14 % iki daugiausiai 29% viso paros laiko, o bendrai visų parduotuvėse instaliuotų šaldymo sistemų veikimo laikas siekia tik 21% per metus. Parduotuvėse su galingesne šaldymo sistema šis laikas yra didesnis. Tai parodo, kad

instaliuota galia nėra pilnai išnaudojama ir didžiąją laiko dalį stovi negeneruodama papildomos naudos jos savininkui. Šaldymo sistemos išnaudojimo faktorius gali būti didinamas du kartus iki 60% kas atitinka kompresoriaus veikimui 14,4 valandų per parą ir šiuo atveju dar liks rezervinio laiko pikinėms, netikėtoms apkrovoms, nes gamintojų rekomenduojamas kompresoriaus veikimo laikas gerai suprojektuotoje šaldymo sistemoje gali siekti iki 18 valandų per parą. Ryšium su tuo atgaunamos AŠ kiekiai įprastiniu veikimo režimu nėra maksimalūs ir gali būti padidinti pervedant šaldymo sistemą į šilumos siurblio režimą. Šis režimas gali būti valdomas keliais etapais: didinant slėgį spaudimo linijoje, reguliuojant aušinamų šaltnešio dujų temperatūrą išeinančią iš dujų aušyklės. Šilumos siurblio režime šaldymo efektyvumas smarkiai sumažėja, bet instaliuotos galios rezervas leidžia tai padaryti ir to pasekoje šaldymo sistema gali generuoti daug AŠ su aukštu šildymo efektyvumu $COP = 5,7$ (3 lentelė). Iš analizuotų duomenų taip pat galima padaryti išvadą, kad žemos temperatūros šaldymo linija generuoja nuolatinį AŠ kiekį visų metų laikotarpiu su nedideliu svyravimu nuo 8 iki 12 % bendros instaliuotos galios, todėl žemos temperatūros šaldymo sistemos galia yra geras rodiklis parodantis minimalius AŠ kiekius, kuriuos gali generuoti šaldymo sistema. Analizuoti parduotuvės duomenys parodė, kad šaldymo sistemos generuojami AŠ kiekiai pilnai nepadengia jos šilumos poreikio šaltuoju metų periodu. AŠ kiekis metų periodu analizuojamoje parduotuvėje siekia 61 % nuo visos sunaudotos šilumos energijos, tuo tarpu šildymo sezono metu nuo šaldymo mašinos pavyksta atgauti daug daugiau AŠ nuo 43 % šalčiausią metų mėnesį Vasarį iki 89 % šilčiausią žiemos mėnesį Balandį. AŠ kiekį galima padidinti papildomai optimizuojant šildymo sistemą, pritaikant ją žemos temperatūros termofikatai su žema grįžtančia iš šildymo įrenginiu temperatūra. Pilnai aprūpinti parduotuvę AŠ be papildomos šildymo sistemos yra sudėtinga dėl pikinių šildymo apkrovų, kai parduotuvėje lankosi didžiausi žmonių srautai, nes šaldymo sistema yra inertiška ir negali greitai generuoti didelių šilumos kiekių. Šias pikines apkrovas galėtų sušvelninti didesnės akumuliacinės talpos arba lauke sumontuotos netikros šaldymo apkrovos (garintuvai) imančios šilumą iš aplinkos oro. Pagal 2023 metų turimus duomenys oro temperatūra buvo nukritusi žemiau $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ tik 116 valandų, tai parodo, kad nėra didelio tikslo investuoti į galingą parduotuvės šildymo sistemą, bet geriau ją integruoti į miesto CŠT ir pasiimti iš ten trūkstamą dalį šilumos. Tam pakanka įsirengti tik vieną papildomą šilumokaitį arba du jeigu perteklinė AŠ nuo šaldymo mašinos bus perduodama atgal į CŠT. Analizuotos parduotuvės duomenys parodė, kad visais žiemos mėnesiais AŠ kiekiai buvo didesni nuo 174 % iki 236 % negu sunaudota elektros energijos. Norint pilnai AŠ patenkinti parduotuvės šilumos poreikius reiktų padidinti AŠ kiekį 132 % šalčiausią Vasario mėnesį, o jeigu temperatūra šalčiausią mėnesį būtų dar žemesnė, padidinti reiktų dar daugiau.

4. Pagal parduotuvių tinklo atsiustus duomenys taip pat galime padaryti nedideles išvadas apie AŠ atgavimą nuo šaldymo sistemų su paraleliniu kompresoriumi. Šios sistemos lyginant su standartine transkritine busterine šaldymo komponuotė turi aukštesnį efektyvumą prie aukštos aplinkos oro temperatūros, tai parodo instaliuotos šaldymo galios ir elektrinių galių santykis, kuris pirmoje parduotuvėje su paraleliniu kompresoriumi siekia 160 %, o antroje parduotuvėje be paralelinio spaudimo linijos 141 % prie pikinių aplinkos oro temperatūrų prie tos pačios instaliuotos elektrinės galios 64 kW, bet atsižvelgiant į tai, kad Lietuvoje vidutinės mėnesio temperatūros retai pakyla virš $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – taupymo efektas pasireiškia labai trumpą laiko tarpą, nes iki $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos oro temperatūros šaldymo sistema gali veikti subkritiniame režime, kuriame paralelinio kompresoriaus nauda yra minimali.

Tolimesniems tyrimams yra tikslinga apžvelgti prekybos parduotuvių šaldymo sistemos apkrovos grafikus dienos metu, išsiaiškinti pikines apkrovas, kas vyksta nakties metu su šaldymo sistemos apkrova, koks AŠ potencialas parduotuvės ne darbo valandomis. Kaip šiuos galios svyravimus galima subalansuoti akumuliacinės talpos pagalba. Palyginti transkritinės šaldymo sistemos darbą su ir be AŠ atgavimo sistemos, kad galima būtų tiksliau įvertinti papildomus investicinius kaštus.

Literatūros sąrašas

1. Georgios Maourisa, Emilio Jose Sarabia Escrivab, Salvador Achaa, Nilay Shaha, Christos N. Markidesa. CO₂ refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach. *Applied Energy* 264 (2020) 114722 [žiūrėta 2023-04-22]. 17 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114722>
2. Jesús Catalán-Gil, Daniel Sánchez, Ramón Cabello, Rodrigo Lopis, Laura Nebot-Andrés, Daniel Calleja-Anta. Experimental evaluation of the desuperheater influence in a CO₂ booster refrigeration facility. *Applied Thermal Engineering* 168 (2020) 114785 [žiūrėta 2023-04-22]. 11 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114785>
3. Fabio Giunta, Samer Sawalha. Techno-economic analysis of heat recovery from supermarket's CO₂ refrigeration systems to district heating networks. *Applied Thermal Engineering* 193 (2021) 117000 [žiūrėta 2023-04-24]. 18 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117000>
4. Alpha laval mokomoji knyga. The theory behind heat transfer: Plate heat exchangers. [žiūrėta 2023-04-12]. 12 puslapių. Prieiga: https://edit-prd.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/alfa_laval_heating_and_cooling_hub_the_theory_behind_heat_transfer.pdf
5. Danfoss mokomoji knyga. Heat recovery units: application guide. [žiūrėta 2023-04-29]. 58 puslapiai. Prieiga: https://assets.danfoss.com/documents/202327/AB417146452873en-010101.pdf?_gl=1*8lm0bl*_ga*NjU5NDQ2MTIwLjE2ODIzNjI2MTE.*_ga_MCLMM64Y4F*MTY4Mjc3NjYyMC4zLjAuMTY4Mjc3NjYyMy4wLjAuMA
6. DK mokomoji knyga. Heat recovery units: application guide. [žiūrėta 2023-04-29]. 58 puslapiai. Prieiga: https://assets.danfoss.com/documents/202327/AB417146452873en-010101.pdf?_gl=1*8lm0bl*_ga*NjU5NDQ2MTIwLjE2ODIzNjI2MTE.*_ga_MCLMM64Y4F*MTY4Mjc3NjYyMC4zLjAuMTY4Mjc3NjYyMy4wLjAuMA
7. G. Gimbutis, K. Kajutis, V. Krukoniš, A. Pranckūnas, P. Švenčianas. Šiluminė technika. Leidykla Mokslas 1993m. ISBN 5-420-00751-7.
8. X. Masip, A. Cazorla-Marín, Carla Montagud-Montalvá, J. Marchante, F. Barceló, J.M. Corberán. Energy and techno-economic assessment of the effect of the coupling between an air source heat pump and the storage tank for sanitary hot water production. *Applied Thermal Engineering* 159 (2019) 113853 [žiūrėta 2023-05-01]. 8 puslapiai. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113853>
9. Anna Volkova, Ieva Pakere, Lina Murauskaite, Pei Huang, Kertu Lepiksaar, Xinxing Zhang. 5th generation district heating and cooling (5GDHC) implementation potential in urban areas with existing district heating systems. *Energy reports* 8 (2022) 10037–10047. [žiūrėta 2023-05-01]. 11 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.162>
10. Paride Gullo, Armin Hafner, Krzysztof Banasiak. Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives. *International Journal of Refrigeration* (2018) 269–310. [žiūrėta 2023-05-01]. 42 puslapiai. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.07.001>
11. Simone Buffaa, Marco Cozzinia, Matteo D'Antonia, Marco Baratierib, Roberto Fedrizzia. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (2019) 504–522. [žiūrėta 2023-05-01]. 19 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>

12. Karampour, M., Sawalha, S. Energy Efficiency Evaluation of Integrated CO₂ Trans-critical System in Supermarkets: A Field Measurements and Modelling Analysis. *International journal of refrigeration* 82 (2017): 470-486. [žiūrēta 2024-03-01]. 28 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.06.002>
13. Mazyar Karampour, Samer Sawalha. State-of-the-art integrated CO₂ refrigeration system for supermarkets: A comparative analysis. *International Journal of Refrigeration* 86 (2018) 239–257. [žiūrēta 2024-03-03]. 18 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.006>
14. Mazyar Karampour, Samer Sawalha. Supermarket refrigeration and heat recovery using CO₂ as refrigerant. A comprehensive evaluation based on field measurements and modelling (2014). [žiūrēta 2024-03-13]. 46 puslapių. Prieiga: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:849667/FULLTEXT01.pdf>
15. Bacher, Peder; Madsen, Henrik; Aalborg Nielsen, Henrik. Load forecasting for supermarket refrigeration (2013). [žiūrēta 2024-03-17]. 26 puslapių. Prieiga: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123397603/tr13_08_2ed_Bacher_P.pdf
16. Sotirios THANASOULAS, Claudia PEREA DIAZ, Samer SAWALHA. Field measurement analysis of integrated refrigeration system in a new supermarket (2020). [žiūrēta 2024-03-17]. 8 puslapių. Prieiga: DOI: 10.18462/iir.gl.2020.1103
17. Marco AZZOLIN, Livio CALABRESE, Simone DUGARIA, Silvia MINETTO, Davide DEL COL. Monitoring Of a Commercial Refrigeration CO₂ System And Comparison With Simulations. 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue (2018). [žiūrēta 2024-04-17]. 10 puslapių. Prieiga: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2032>
18. Daniel Sacasas, Javier Vega, Cristian Cuevas. An annual energetic evaluation of booster and parallel refrigeration systems with R744 in food retail supermarkets. A Chilean perspective. *International Journal of Refrigeration* 133 (2022) 326–336. [žiūrēta 2024-04-19]. 11 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.10.010>
19. Georgios Mitsopoulos, Evangelos Syngounasa, Dimitrios Tsimpoukis, Evangelos Bellosa, Christos Tzivanidis, Stavros Anagnostatos. Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO₂ refrigerant. *Energy Conversion and Management: X* 1 (2019) 100006. [žiūrēta 2024-04-11]. 17 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100006>
20. Lisa Buth Rasmussen, Peder Bacher, Henrik Madsen, Henrik Aalborg Nielsen, Christian Heerup, Torben Green. Load forecasting of supermarket refrigeration. *Applied Energy* 163 (2016) 32–40. [žiūrēta 2024-04-15]. 9 puslapių. Prieiga: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.046>
21. Georgios Maouris, Emilio Jose Sarabia Escriva, Salvador Achaa, Nilay Shaha, Christos N. Markides. CO₂ refrigeration system heat recovery and thermal storage modelling for space heating provision in supermarkets: An integrated approach. *Applied Energy* 264 (2020) 114722. [žiūrēta 2024-02-15]. 17 puslapių. Prieiga: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114722>

Informacijos šaltinių sąrašas

22. Danfoss smart store koncepcija. [žiūrėta 2023-11-21]. Prieiga per: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dcs/managing-operational-efficiency-in-food-retail-5-global-trends-and-how-to-respond/>
23. Danfoss tvaraus vystimosi energetikoje vizija. [žiūrėta 2023-11-09]. Prieiga per: <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/insights-for-tomorrow/energy-efficiency/#references>
24. Europos šilumos ataskaita. 2017 metų. [žiūrėta 2023-11-09]. Prieiga per: https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/03/Brochure_Heating-and-Cooling_web.pdf
25. Efektyviausių rinkoje šilumos siurblių reitingas. [žiūrėta 2023-11-18]. Prieiga per: <https://www.topten.eu/private/product/view/HovalAGUltraSourceTcomfort17ww>
26. Bitzer parinkimo programa [žiūrėta 2024-01-12]. Prieiga per: <https://www.bitzer.de/websoftware/Calculate.aspx?cid=1682963515135&mod=CO2>
27. Danfoss parinkimo programa. [žiūrėta 2024-01-11]. Prieiga per: <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/coolselector-eula/#tab-overview>
28. Oro temperatūrų Lietuvoje archyvas. [žiūrėta 2024-02-07]. Prieiga per: <http://www.meteo.lt/lt/oro-temperatura>
29. Šildymo sezono kainos šilumos tiekimo Vilniuje. [žiūrėta 2024-03-29]. Prieiga per: <https://madeinvilnius.lt/naujienos/miestas/necilinis-sildymo-sezonas-vilnieciai-sutaupe-30-mln-euru/>
30. ReUseHeat Handbook for increased recovery of urban excess heat. [žiūrėta 2023-10-29]. Prieiga per: <https://www.reuseheat.eu/reuseheat-handbook/>

Priedai

1 priedas. Danfoss parinkimo programos išrašas.

Pateikiami tiriamos šaldymo sistemos su paraleliniu kompresoriumi duomenys iš programos Coolselector 2, Danfoss, versija 5.2.6.



www.danfoss.com

Coolselector®2

Version 5.2.6 | 99

Coolselector@Danfoss.com

COP		
	COP [W/W]	1.9
Capacities		
	LT evaporator capacity [kW]	10
	MT evaporator capacity [kW]	30
	AC capacity [kW]	0
	Gas cooler capacity [kW]	60.44
	Additional superheat after LT evaporator [kW]	0
Compressor power		
	LT compressor [kW]	1.898
	MT compressor [kW]	13.49
	IT compressor [kW]	5.685
Compressor heat loss		
	LT compressor [kW]	0.057
	MT compressor [kW]	0.405
	IT compressor [kW]	0.171
Energy balance		
	Input [kW]	61.08
	Output [kW]	61.08
	Difference [kW]	0
Mass flows		
	LT evaporator mass flow [kg/h]	146.3
	MT evaporator mass flow [kg/h]	452.3
	MT compressor mass flow [kg/h]	598.7
	IT compressor mass flow [kg/h]	429.2
	High pressure valve mass flow [kg/h]	1028
	Gas cooler mass flow [kg/h]	1028
Suction volume flows		
	LT compressor [m ³ /h]	4.524
	MT compressor [m ³ /h]	9.209
	IT compressor [m ³ /h]	3.994

Point	Description	Temperature [°C]	Pressure (a) [bar]	Density [kg/m ³]	Enthalpy [kJ/kg]	Entropy [kJ/(kg·K)]
1	MT compressor suction	9.9	28.03	65	459	1.978
2	MT compressor discharge	118.5	89.37	146.9	537.7	2.035
3	Gas cooler in	99.3	89.37	163.4	511.6	1.967
4	Gas cooler out	35	89.37	657.5	299.9	1.319
5	Gas cooler out, additional cooling	35	89.37	657.5	299.9	1.319
6	After internal HX	35	89.37	657.5	299.9	1.319
7	High pressure valve out	3	37.7	220.9	299.9	1.361
8	Receiver saturated gas	3	37.7	107.5	429	1.828
9	After gas bypass valve	-8	28.03	77.39	429	1.867
10	IT compressor suction	3	37.7	107.5	429	1.828
11	IT compressor discharge	75.9	89.37	194.3	475.2	1.866
12	Receiver saturated liquid	3	37.7	909.1	207.4	1.026
13	Common liquid line	3	37.7	909.1	207.4	1.026
14	After MT expansion valve	-8	28.03	436.4	207.4	1.032
15	MT evaporator out	0	28.03	70.24	446.2	1.932
16	MT suction line	0	28.03	70.24	446.2	1.932
17	LT liquid line	-0.2	37.7	928.5	199.5	0.9982
18	After LT expansion valve	-31	13.8	143.9	199.5	1.023
19	LT evaporator out	-23	13.8	33.91	445.5	2.039
20	LT after internal HX	-15.5	13.8	32.34	453.4	2.07
21	LT compressor suction	-15.5	13.8	32.34	453.4	2.07
22	LT compressor discharge	44.8	28.03	53.11	498.7	2.11

3 priedas. Nagrinėjamų parduotuvių duomenys.

Nr.	Vieta	Sausis kWh	Vasaris kWh	Kovas kWh	Balandis kWh	Gegužė kWh	Birželis kWh	Liepa kWh	Rugpjūtis kWh	Rugsėjis kWh	Spalis kWh	Lapkritis kWh	Gruodis kWh	Viso kWh	Projektinė galia			Instaliuota galia			Parduotuvės plotas m ²	Teorinis metinis COP	Pastabos
															VT kW	ŽT kW	VT kW	ŽT kW	VT kW	ŽT kW			
1	Centralė	9274	8267	9362	9756	11529	12456	13275	14044	12162	9920	8483	8893	127421	74.77	18.27	82	20.1	64	1409	3.8	Paralelinis kompresorius	
	Vartotojai	7571	6877	7596	7500	7891	7642	7718	7385	7144	7268	6911	7253	88756									
2	Centralė	16845	15144	16958	17256	19420	20098	20993	21429	19306	17188	15394	16146	216177	62.43	13.3	73.8	16.8	64	1133	3.4		
	Vartotojai	9655	7673	8680	8939	10033	10584	11094	12042	10192	9438	8073	8371	114774									
3	Centralė	6670	6013	6669	6528	6748	6651	6925	6854	6768	6943	6613	6789	80171									
	Vartotojai	16325	13686	15349	15467	16781	17235	18019	18896	16960	16381	14686	15160	194945									
4	Centralė	5824	5237	6257	7258	8889	9050	9107	9995	8597	6852	5954	5858	88878	57.48	14.06	63.5	15.5	56	1081	3.9		
	Vartotojai	6023	5351	5951	5952	6302	6108	6088	6483	6067	6216	5922	6085	72548									
5	Centralė	11847	10588	12208	13210	15191	15158	15195	16478	14664	13068	11876	11943	161426									
	Vartotojai	7173	6408	6689	7421	7775	8991	9235	10442	8677	6571	5956	6870	92208	54.11	13.62	58	15	51	1202	3.8		
6	Centralė	5369	4847	5389	5338	5637	5488	5670	5644	5493	5589	5514	5314	65292									
	Vartotojai	12542	11255	12078	12759	13412	14479	14905	16086	14170	12160	11470	12184	157500									
7	Centralė	6378	5760	6521	7340	8300	8807	9285	10028	8973	7096	6159	6560	91207	51.1	11.9	53.4	13.5	47	1028	3.3		
	Vartotojai	5317	4660	5172	5219	5886	5945	6207	6506	6333	6439	6127	6816	74967									
8	Centralė	4919	4464	4859	4744	4981	4840	4957	5018	3319	4140	3970	4125	54336	41.8	10.97	45.2	12	41	794	3.6		
	Vartotojai	10236	9124	10031	9963	11439	12601	13127	13882	8861	9928	8959	8969	127120									
9	Centralė	4129	8065	10183	11463	11921	13606	11483	7956	6663	6616	92085	56.93	18.01	57.2	19.92	56	1582	3.3				
	Vartotojai	1398	2536	2838	3144	3162	3110	2945	2379	2147	26652												
10	Centralė	4628	8063	8417	7821	8826	8506	8279	8502	8148	8453	79643											
	Vartotojai	10155	18664	21438	22277	23891	25274	22872	19403	17190	17216	198380											
11	Centralė	8996	7832	7601	8142	7441	40012	47	15.7	47.1	17.37	47	1247	3.4									
	Vartotojai	1576	1341	1285	1352	1252	6806																
12	Centralė	6709	6845	7238	6980	7188	7179	6974	7132	6952	7258	70455											
	Vartotojai	6709	6845	7238	6980	7188	7179	6974	7132	6952	7258	70455											
11	Centralė	11024	9903	10992	11231	12362	12416	12803	13023	12003	11484	10900	11148	139289	49	10.3	49	13	44	968	3.7		
	Vartotojai	15800	14355	13872	13632	13885	13968	13619	14545	13724	14323	14942	16236	172901	47.9	9.22	50.7	10.14	43	947	2.9		
12	Centralė	5480	14805	14841	14933	14755	15232	15498	15420	14302	14003	15171	14499	168939	57.5	12.33	61.6	13.6	53	1109	3.6		
	Vartotojai	12203	10978	11941	12362	1480	13575	14538	14959	10365	11250	10276	10450	134377	41	10.14	43.2	12.3	40	810	3.3		