



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pramoninio šaldymo proceso modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Zlatkus

Projekto autorius

prof. dr. Vytautas Galvanauskas

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pramoninio šaldymo proceso modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Lukas Zlatkus

Projekto autorius

prof. dr. Vytautas Galvanauskas

Vadovas

doc. dr. Virginijus Baranauskas

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lukas Zlatkus

Pramoninio šaldymo proceso modeliavimas ir tyrimas

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) intelektualinės 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.

Lukas Zlatkus

Patvirtinta elektroniniu būdu

Zlatkus, Lukas. Pramoninio šaldymo proceso modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: *spiralinis šaldiklis, matematinis modelis, temperatūros prognozavimas.*

Kaunas, 2023. 49 p.

Santrauka

Maisto produktų pramoninio šaldymo procesuose yra siekiama užšaldyti maistą iki nustatytos temperatūros (nuostato vertės). Pramonėje yra šaldomi produktai dideliais kiekiais, tam dažnai naudojami spiraliniai konvejeriniai šaldikliai. Inžinerinė problema valdant didelio masto šaldymo procesą yra parinkti tokius valdančiųjų poveikių signalus prie kurių šaldomas objektas konvejerio išeigoje įgautų nustatytą temperatūrą, o taip pat ir veiktų energetiškai efektyviu režimu.

Darbe išanalizuotos tiriamojo objekto (spiralinio šaldiklio) ir šaldomo produkto - maistinių ledų, šiluminės ir geometrinės charakteristikos. Šaldymo proceso temperatūriniai dinamiškai identifikuoti buvo atlikti matavimai spiraliniame konvejeriniame šaldiklyje.

Atlikus duomenų analizę darbe realizuotas matematinis modelis prognozuojantis šaldomo produkto temperatūrą jam judant pramoninio spiralinio šaldiklio konvejeriu. Identifikuotas ir parinktas šilumos perdavimo koeficientas. Sukurtas programinis optimizavimo metodas skirtas poveikio signalams (šaldymo receptams) parinkti siekiant užšaldyti įvairius maisto produktus šaldomus spiraliniame šaldiklyje.

Zlatkus, Lukas. Modeling and investigation of an industrial freezing process. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics engineering (engineering science).

Keywords: *spiral freezer, mathematical model, temperature estimation.*

Kaunas, 2023. 49 p.

Summary

In industrial processes for freezing food products, the aim is to freeze the food to a predetermined temperature (setpoint value). In industry, large quantities of product are frozen in spiral conveyor freezers. An engineering problem in controlling the freezing process of such a large-scale system is selecting control signals that would ensure that the frozen object reaches the setpoint temperature at the end of the conveyor, while also operating in an energy-efficient mode.

The paper describes thermal and geometrical characteristics of the spiral freezer and the frozen food product - ice cream. Temperature dynamics of the freezing process were identified through measurements taken in the spiral conveyor freezer.

A mathematical model was developed in the study to estimate the temperature of the frozen product as it moves through the industrial spiral freezer. The heat transfer coefficient was identified and selected. A software optimization method was developed to select control signals (freezing recipes) aimed at freezing various food products in the spiral freezer.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Šaldymo procesas maisto pramonėje.....	12
1.2. Vandens garavimas šaldymo procese	14
1.3. Šaldymo proceso technologijos pramonėje	14
1.3.1. Oro pūtimo šaldikliai	15
1.3.2. Lėkštiniai šaldikliai	16
1.3.3. Pluoštinės lovelės šaldikliai.....	17
1.3.4. Kriogeniniai šaldikliai	17
1.4. Procesų modeliavimas maisto pramonėje ir jų taikymo sritys	18
1.5. Matematinio modeliavimo tipai maisto pramonėje	21
2. Metodinė dalis	23
2.1. Tiriamojo produkto geometrinės ir šiluminės charakteristikos	23
2.2. Tiriamojo objekto elektrinės, geometrinės ir šiluminės charakteristikos.....	24
2.3. Šilumos perdavimo koeficiento identifikavimas maistiniam ledui pramoniniame šaldiklyje..	25
2.4. Matematinis modelis šaldomo produkto temperatūros prognozavimui pramoniniame šaldiklyje	27
2.5. Matematinio modelio validavimas	32
2.6. Šaldymo režimai	34
2.6.1. Optimizavimo procedūra šaldymo režimams parinkti	38
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47
Priedai.....	50
1 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – optimizacijos failas.....	50
2 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – šaldymo proceso funkcijos failas.....	51
3 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – šaldymo proceso funkcijos failas (2).....	52
4 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – pagrindinis failas.....	53
5 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – pagrindinis failas (2).....	54
6 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – parametrų atvaizdavimas keturmatėje erdvėje	55

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Maistinių ledų geometrines ir šilumines charakteristikas apibrėžiantys kintamieji.....	23
2 lentelė. Spiralinio šaldiklio elektrinės, geometrines ir šilumines charakteristikas apibrėžiantys kintamieji.....	24
3 lentelė. GRG metodo parinktųjų parametrų vertės ir rezultatai	31
4 lentelė. Eksperimento sąlygos.....	32
5 lentelė. Rezultatų suvestinė.....	33
6 lentelė. Šaldomų maisto produktų charakteristikos	44
7 lentelė. Optimizuotų parametrų vertės ir rezultatai.....	45

Paveikslų sąrašas

1 pav. Šaldymo diagrama - temperatūros priklausomybė nuo laiko [2]	12
2 pav. Supakuoto ir nesupakuoto mėsos gaminio užšaldymo kreivės oro srautiniame šaldiklyje [25]	12
3 pav. Vėjo srautu šaldomo produkto atvaizdavimas [11]	13
4 pav. Šaldymo sistemos ir technologijos [2]	14
5 pav. Pūtimo šaldiklis	15
6 pav. Spiralinio diržo šaldiklis (oro srautas judėjimo kryptis - vertikali).....	15
7 pav. Spiralinio diržo šaldiklis (oro srautas judėjimo kryptis – horizontali).....	15
8 pav. Lėkštinis šaldiklis	16
9 pav. Principinė schema	16
10 pav. Pluoštinės lovelės šaldiklis	17
11 pav. Principinė kriogeninio šaldiklio schema	17
12 pav. Jautienos užšalimo prognozavimo ir eksperimentinių duomenų kreivės (laiko skalė mažėjanti)	18
13 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo schema maistinių ledų šaldymo sistemoje.....	19
14 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo sistemos veikimo iliustracija	21
15 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo sistemos veikimo iliustracija	21
16 pav. Modelių tipai [11].....	22
17 pav. Šaldomi ledai.....	23
18 pav. Pramoninio spiralinio šaldiklio su dviem būgnais atvaizdas	24
19 pav. Konvekcinis šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo oro santykinio greičio paviršiaus atžvilgiu	25
20 pav. Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo produktą aptakančio vėjo greičio (tūrio vienetui)	26
21 pav. Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo orapūčių vėjo greičio	27
22 pav. Šaldiklio modelio realizacijos programinės įrangos „Matlab / Simulink“ aplinkoje struktūrinė schema.	28
23 pav. Šaldomo produkto temperatūros ir išgaravusio vandens kiekio prognozės spiraliniame konvejeriniame šaldiklyje modelis „Simulink“ aplinkoje.....	28
24 pav. LOG200 TC temperatūros jutiklis.....	29
25 pav. Matavimo stendas ant konvejerio.....	29
26 pav. Matavimo stendas.....	29
27 pav. Gradientinio metodo paieškos laukas („įstrigęs“ lokaliame ekstremume).....	30
28 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje (eksperimento sąlygomis)	31
29 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje (2-ojo eksperimento sąlygomis).....	33
30 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($T_o = -28.01^{\circ}\text{C}$)	34
31 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{konv} = 9,8, \text{ m/min}$).	35
32 pav. Maistinio ledo vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{orap} = 41,5\%$).	36

33 pav. Maistinio ledo vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{konv}=4,25$ (m/min), $v_{orap} = 80$ (%), $T_o = -33$ °C).....	36
34 pav. Modeliu prognozuojama išgaravusio vandens kiekio laiko trajektorija.....	37
35 pav. „Nelder-Mead Simplex“ metodo veikimo principo atvaizdas dvimatėje optimizuojamų kintamųjų srityje [23]	39
36 pav. Optimizavimo programos grafinė sąsaja (vienas optimizuojamas parametras).....	40
37 pav. Optimizavimo programos poveikio signalo parinkimo eiga	40
38 pav. „Nelder-Mead Simplex“ metodo veikimo principo atvaizdas trimatėje optimizuojamų kintamųjų srityje [24]	41
39 pav. Optimizavimo programos grafinė sąsaja (trys optimizuojami parametrai).....	41
40 pav. Optimizavimo programos veikimo eigos dinamika	42
41 pav. Šaldančio oro temperatūros kitimas optimizacijos algoritmo metu	42
42 pav. Konvejerio greičio kitimas optimizacijos algoritmo metu	42
43 pav. Orapūčių greičio kitimas optimizacijos algoritmo metu	42
44 pav. Tikslų funkcijos verčių (44 formulė) priklausomybė nuo poveikio signalų	43
45 pav. Skirtingų maisto produktų vidinės temperatūros kreivės šaldymo proceso metu	44
46 pav. Optimizacijos algoritmo rezultatai (paklaida tarp išėigos temperatūros ir nuostato) kiekvienos iteracijos metu	45

Įvadas

Šaldymo sistemos, jų įranga ir valdymas šiuolaikinėje maisto pramonėje ir buitinės šaldymo įrangos sektoriuose turi vis didesnę reikšmę. Pramoninių šaldymo procesų kontrolė ir valdymas yra sudėtingas inžinerinis uždavinys. Maisto pramonėje yra užšaldomi konservuoti, žali arba paruošti maisto produktai, kad juos būtų galima išlaikyti ilgesnį laiką. Užšaldžius maisto produktą sulėtėja jo irimo-susiskaidymo procesas (angl. *decomposition*). Šaldymo procesas konvertuoja produkto likutinę drėgmę į šerkšną. Užšaldymas padeda išlaikyti produkto skonio savybes, spalvą ir maistines medžiagas.

Pagrindiniai iššūkiai valdant šaldymo procesą pramonėje yra optimalių valdančiųjų poveikio signalų parinkimas esant skirtingiems proceso etapams, proceso būsenos identifikavimas, tiesiogiai neišmatuojamų dydžių įvertinimas tokių kaip perteklinio šerkšno ant šilumokaičio kiekis, įrangos galios nuostoliai. Perteklinis šerkšnas, susidarantis ant šaldymo įrangos dėl prasto proceso valdymo, mažina šaldymo proceso efektyvumą ir lemia dažnesnį šaldymo proceso stabdymą, kurio metu yra nuvalomas šerkšnas-ledas nuo orapūčių / garintuvų (angl. *defrosting*). Kiekvienas šaldomas produktas ir šaldymo įrenginys turi savitas šiluminės charakteristikas, pradedant nuo produktų savitosios šilumos, vandens garavimo greičio, įrenginio ar produkto šiluminės talpos iki skirtingų specifinių šilumos pernešimo greičių. Pramonėje vis dar trūksta esminių šaldymo proceso valdymui tikslių fizikinių parametrų matavimų realiu laiku, pavyzdžiui, šilumos pernešimo ar šerkšno susidarymo greičiai. Pastarasis dydis proceso metu nėra tiesiogiai nustatomas. Siekiant minimizuoti susidariusio šerkšno-ledo kiekį šaldymo proceso metu reikia periodiškai atlikti išgarinto vandens kiekio, bei produkto temperatūros pokyčio matavimus, duomenis analizuoti realiu laiku arba procesui pasibaigus. Duomenų analitika yra sudėtingas procesas reikalaujantis žmogiškųjų ir laiko išteklių. Pramonėje esantys / veikiantys šaldymo įrenginiai yra stabdomi tik tada, kai reikia juos išvalyti ar sterilizuoti. Tokių objektų kontaktinis-eksperimentinis tyrimas yra sunkiai įmanomas, nes tai atlikti reiktų ypač didelių finansinių išlaidų. Dėl šių priežasčių pastaraisiais dešimtmečiais populiarėja ir plėtojamas alternatyvus valdymo uždavinių sprendimo būdas - tiriamojo objekto perkėlimas į modeliavimo aplinką. Yra sudaromas matematinis modelis, aprašantis realų objektą, sukuriama programiniai jutikliai tiesiogiai nematuojamų parametrų netiesioginiam įvertinimui ir prognozavimui realiu laiku. Toks būdas leidžia tirti objektą nepertraukiant jo veikimo. Šiuo atveju naudojama informacija gaunama iš šaldymo proceso metu tiesiogiai matuojamų dydžių: temperatūros, išgaravusio vandens kiekio (atšildžius ir sustabdžius procesą), santykinės drėgmės ir kt. Programiniai jutikliai yra grįsti matematiniais modeliais, kurie nustato ryšius tarp tiesiogiai matuojamų dydžių modelio įėjime ir netiesioginių prognozuojamų dydžių modelio išėjime. Matematiniams modeliams realizuoti yra taikomos metodikos ir technikos įskaitant tradicines masės, energijos balanso, empirines lygčių sistemas, bei juodosios dėžės modelius, tokie kaip dirbtiniai neuroniniai tinklai. Baigiamojo darbo projekte siekiama realizuoti pramoninio šaldymo proceso matematinį modelį bei programinį jutiklį, prognozuojantį produkto vidinę temperatūrą bei iš jo išgaravusį vandens kiekį. Modelį siekiama realizuoti taikant fundamentines medžiagų balanso lygtis.

Darbo tikslas – sukurti pramoninio šaldymo proceso matematinį modelį, skirtą skirtingiems maisto produktų šaldymo proceso režimams parinkti.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti spiralinio šaldiklio ir tiriamojo maisto produkto šilumines ir geometrines charakteristikas.
2. sukurti matematinį šaldymo proceso modelį, skirtą prognozuoti šaldomo produkto temperatūrą, modelį validuoti.
3. sukurti programinį optimizavimo metodą, skirtą šaldomo proceso poveikio signalams parinkti kai užšaldomi skirtingi maisto produktai.

1. Literatūros analizė

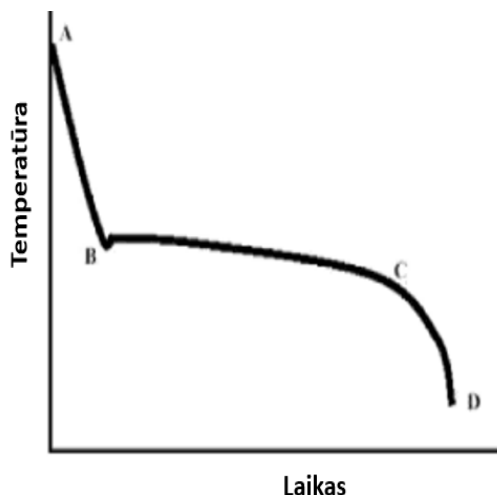
Šaldymo technologijos ir maisto užšaldymo procesas yra nagrinėjamas ir tobulinamas jau nuo senų laikų, todėl svarbu, atlikti šaldymo proceso literatūros analizę. Jos tikslas atrasti proceso svarbiausią problemą (angl. *Bottleneck*) bei jos galimus sprendimo būdus.

Toliau pateikiama analizė:

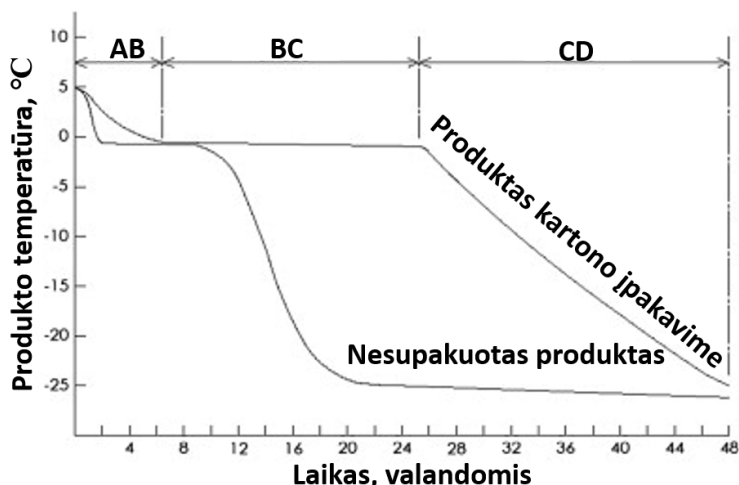
- šaldymo procesas maisto pramonėje (tikslas, proceso dinamika, metodai);
- vandens garavimo problema, dinamika;
- šaldymo proceso uždavinio technologiniai sprendiniai, tai yra šaldymo įrenginių apžvalga;
- matematinis proceso modeliavimas maisto pramonėje – taikymo sritys.

1.1. Šaldymo procesas maisto pramonėje

Švieži maisto produktai greitai genda, todėl juos reikia šaldyti kad būtų pratęstas galiojimo laikas ir sumažėtų per maistą plintančių ligų rizika. Istoriskai apskaičiuota, kad iššvaistoma net 25–30 % greitai gendančių maisto produktų ir didžiąją dalį šių atliekų būtų galima sutaupyti tinkamai užšaldžius produktą po derliaus nuėmimo [1].



1 pav. Šaldymo diagrama - temperatūros priklausomybė nuo laiko [2]



2 pav. Supakuoto ir nesupakuoto mėsos gaminio užšaldymo kreivės oro srautiniame šaldiklyje [25]

Šaldymo procese maisto produktų temperatūros kitimo dinamika pavaizduota paveiksle (žr. 1 pav.). Autoriai straipsnyje [25] palygina šilumos išspinduliavimo iš mėsos gaminio dinamikas, kai produktas supakuotas kartono įpakavime ir tuomet kai gaminytis nėra įpakavimas (žr. 2 pav.). Šaldymo diagrama vaizduoja tris šaldymo proceso fazes.

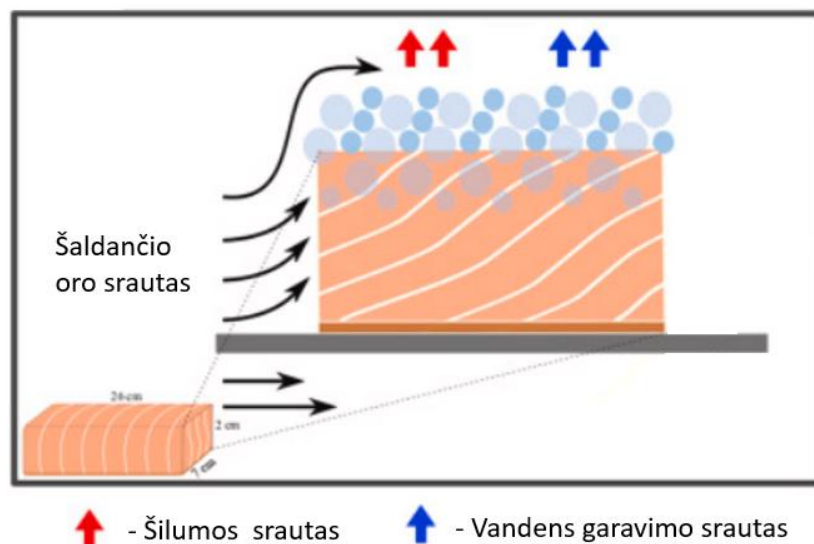
1. Fazė „AB“ – prieš užšalimą. Šioje fazėje yra pašalinama juntama šiluma. Produkto temperatūra krenta nuo pradinės iki žemesnės už užšalimo tašką temperatūros, kuri nurodo peraušinimo pradžią.
2. Fazė „BC“ – šaldymo fazė. Šioje fazėje vyksta latentinės šilumos šalinimas, didžioji dalis vandens kristalizuojasi. Kai vanduo virsta ledu, maiste atsiranda nevandeninių sudedamųjų dalių.

3. Fazė „CD“ – po užšalimo fazė. Šioje fazėje temperatūros pokytis sparčiai didėja, nes produkto šiluma yra pašalinta. Ši fazė tęsiama tol, kol pasiekama norima produkto užšaldymo temperatūra.

Pirmajame paveiksle iliustruojama, kiek maisto produkto latentinės šilumos turi būti pašalinta norint pasiekti produkto užšaldymą [2]. Matyti, kad didžiąją dalį šaldymo proceso laiko užima latentinės šilumos šalinimas – (fazė „BC“).

Peraušinimo procesas (angl. *supercooling*) yra naudojamas pramonėje prailginti įvairių maisto produktų galiojimo trukmę, įskaitant daržoves [3, 4], žuvis [5 - 7] ir mėsa [8 - 9]. Šis procesas išsamiau aptartas Stounhaušo (Stonehouse, G. G.) ir Evanso (Evans, J. A.) autorių straipsnyje „The use of supercooling for fresh foods: A review“ [10].

Įprastai maisto pramonėje produktai šaldomi oru. Šalto oro nešama šiluma konvekcijos būdu perduodama gaminio paviršiui ir šilumos laidumu aušinamam gaminiui. Tuomet šaldomame produkte akumuluotos šilumos kitimo (mažėjimo) greitis priklauso nuo šilumos nuvedimo greičio su aušinančiu oro srautu ir nuo šilumos sunaudojimo greičio vandens iš produkto garuoti.



3 pav. Vėjo srautu šaldomo produkto atvaizdavimas [11]

Produkte kaupiamos šilumos balanso lygtis produktui judant šaldymo įrenginio konvejeriu:

$$V\rho_p C_p \frac{dT_p}{dt} = -hS(T_p - T_o) - L \frac{dm_{H_2O}}{dt}, \quad (1)$$

čia T_p – produkto temperatūra (K), T_o – šaldančio oro temperatūra (K), V – aušinamo produkto tūris, m^3 ; ρ_p – produkto tankis (kg/m^3), C_p – produkto savitoji šiluma ($J/(kg K)$), L – vandens savitoji garavimo šiluma (J/kg), S – produkto paviršiaus plotas (m^2), h – šilumos pernešimo greitis ($J/(m^2 K s)$), m_{H_2O} – išgarinto vandens kiekis (kg), t – proceso laikas (s).

Ši balanso lygtis nusako šaldomame produkte akumuluotos šilumos kiekio kitimo greitį, kuris priklauso nuo šilumos išnešimo su aušinančiu oru greičio (konvekcijos) ir šilumos sunaudojimo vandens išgaravimui greičio (angl. *water vapour rate*), kur vandens garavimo iš produkto dinamika yra susijusi su šilumos pernešimo tarp šaldomo produkto ir aptekančio oro srauto dinamika.

1.2. Vandens garavimas šaldymo procese

Vandens garavimo iš produkto greitis šaldymo proceso metu priklauso nuo skirtumo parcialinių slėgių, kurie charakterizuoja drėgmės kiekį produkte ir aptekančio oro sraute. Idealaus garavimo atveju, kai aptekančio oro garų parcialinis slėgis vienodas, vandens garavimo iš produkto greitis proporcingas parcialinių slėgių skirtumui:

$$\frac{dm_{\text{H}_2\text{O}}}{dt} = R = K (p_p(T_p) - p_o(T_o)), \quad (2)$$

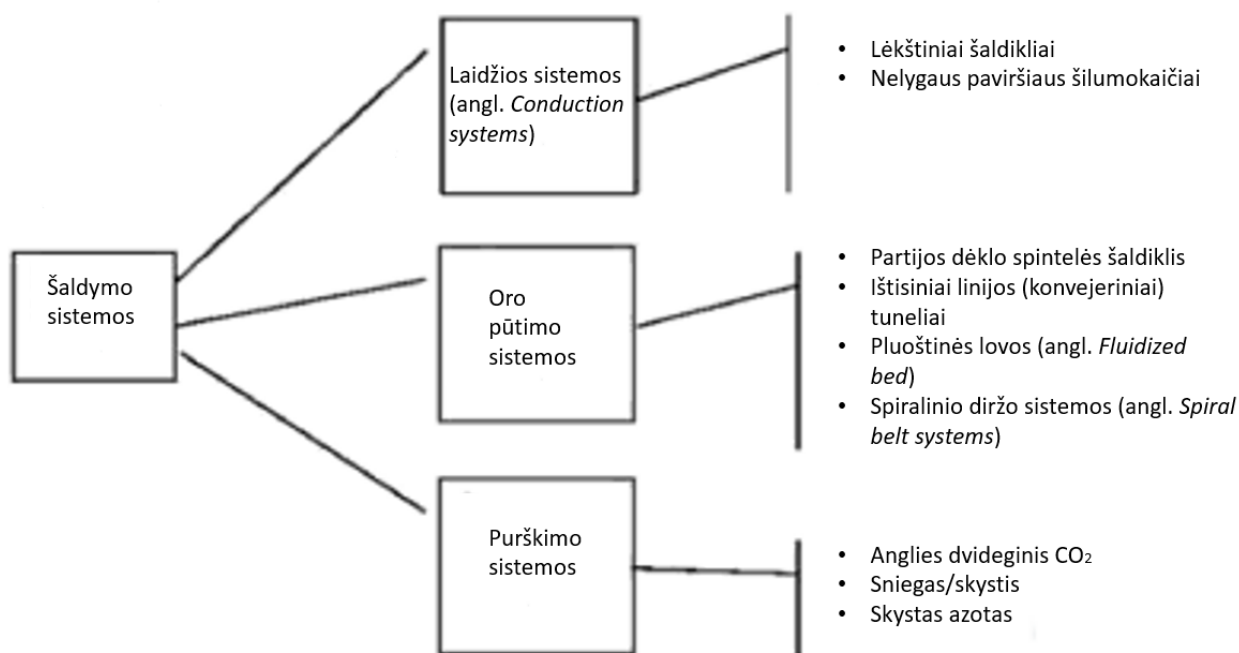
čia $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – išgarinto vandens kiekis (kg), R – garavimo greitis (kg/s), p_p - garų parcialinis slėgis aušinamo produkto viršutiniame sluoksnyje ($\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$), p_o - garų parcialinis slėgis aptekančiame ore (Pa), K – koeficientas ($\text{kg}/(\text{Pa s})$). Tarp garų parcialinio slėgio ir temperatūros yra teigiama netiesinė koreliacija, kuri autorių [22] aprašoma:

$$\text{Log}_{10}p_o = AA - \frac{BB}{T_o + CC}, \quad (3)$$

kur $AA=10.23$, $BB = 1750$, $CC = 235$ – Antuano koeficientai (angl. *Antoine coefficients*) Koeficientas K priklauso nuo šaldymo proceso technologinių parametrų. Teoriškai šios priklausomybės sunkiai sudaromos, konkretaus proceso atveju jos buvo apytiksliai nustatytos atlikus šaldymo įrenginyje specialius eksperimentus ir matavimus, remiantis eksperimentinių tyrimų duomenimis.

1.3. Šaldymo proceso technologijos pramonėje

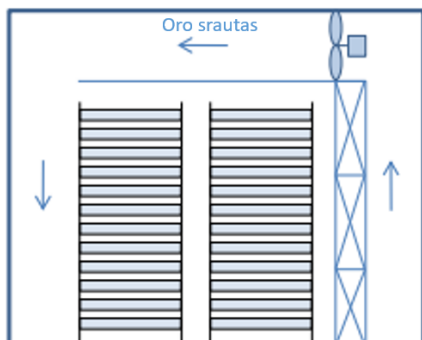
Maisto šaldymo technologijos apima oro pūtimo, kontaktinio / plokštinio, panardinimo ir purškimo užšaldymo sistemas. Pramonėje naudojamų šaldymo sistemų tipai pateikti toliau (žr. 4 pav.).



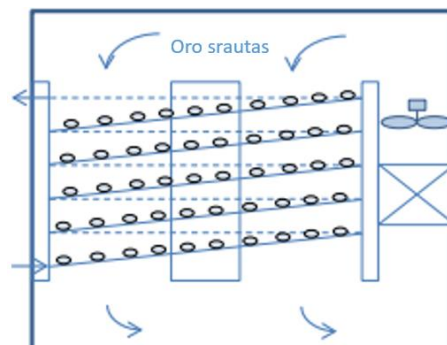
4 pav. Šaldymo sistemos ir technologijos [2]

1.3.1. Oro pūtimo šaldikliai

Šio tipo šaldymo sistemose yra sukuriamas šaldančio oro srautas, kurio temperatūra kinta nuo 35 °C iki -40 °C. Šis oro srautas tekėdamas per mechaninės šaldymo įrangos garintuvo rites yra šaldomas iki nustatytos temperatūros [12]. Tuomet šaldantis oras apteka produktą, kuris yra šaldomas.

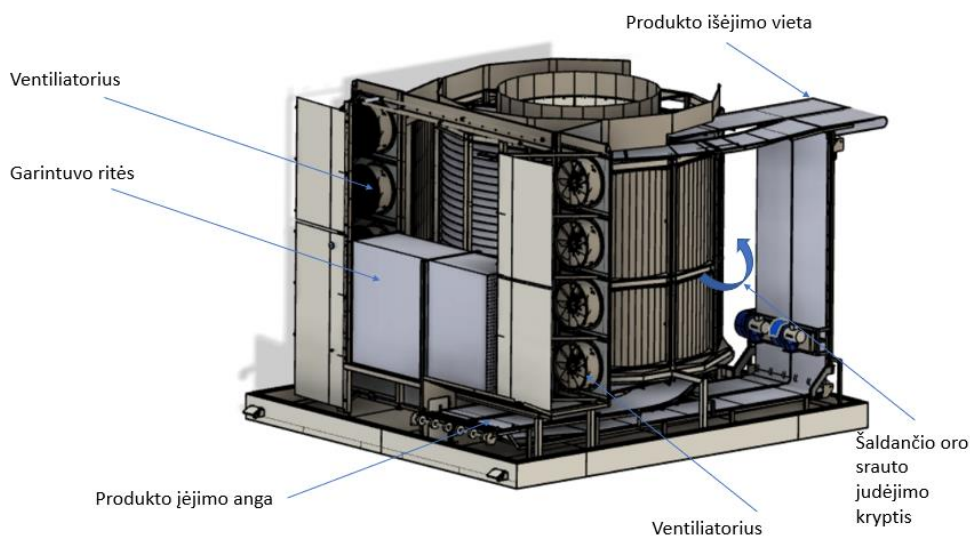


5 pav. Pūtimo šaldiklis



6 pav. Spiralinio diržo šaldiklis
(oro srautas judėjimo kryptis - vertikali)

Konvecinis šilumos perdavimo koeficientas (h_{cv}) gali būti apibrėžtas, kaip šilumos perdavimo tarp kieto paviršiaus ir skysčio greitis paviršiaus ploto vienetui ir temperatūros skirtumo vienetui. Šio parametro identifikavimas ypač svarbus pučiamo oro šaldymo sistemose (5 - 7 pav.), siekiant nustatyti šilumos perdavimo greitį (Q_{conv}) tarp produkto paviršiaus ir aplinkos oro [2, 12].



7 pav. Spiralinio diržo šaldiklis (oro srautas judėjimo kryptis – horizontali)

Šilumos konvekcinis perdavimo greitis literatūroje viena ar kita forma apibrėžiamas Niutono aušinimo dėsnio [11 -14]:

$$Q_{conv} = h_{cv} * A * \Delta T(t) = h_{cv} * A(T_{\infty} - T_0) \text{ (W)}, \quad (4)$$

kur h_{cv} – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas ($\text{W/m}^2\text{K}$), A – paviršiaus (produkto paviršiaus) plotas (m^2), T_0 – pradinė produkto temperatūra (K), T_{∞} – aplinkos temperatūra (šaldančio oro temperatūra) – sistemoje poveikio signalas $u(t)$ (K).

Tokiose šaldymo sistemose didesnis šaldančio oro srautas mažina ribinio sluoksnio storį aplink produktą, tokiu būdu yra didinamas konvekcinis šilumos pernešimas iš produkto į aplinkos orą. Tačiau didesnis pučiamo oro srautas - didina sistemos elektros energijos sąnaudas, o vidinė produkto varža – lemia šilumos pernešimo greitį ir šaldymo laiką, kurio preliminari vertė literatūroje nustatoma Plank`o lygtimi [12, 14 -16]:

$$t_f = \frac{\rho L}{T_f - T_a} \left[\frac{R_a}{h} + \frac{R_a^2}{2k_f} \right], \quad (5)$$

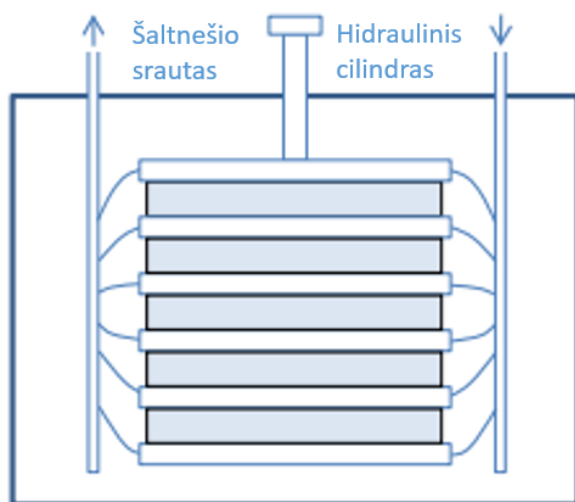
kur t_f – šaldymo laikas (s), ρ – produkto tūris (kg/m^3), L – latentinė maisto lydymosi šiluma (kJ/kg), T_f – šaldančio oro temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), T_a – vidutinė šaldymo temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), R_a – produkto parametras priklausantis nuo jo geometrinės formos, a – produkto storis, skersmuo apskritimo ar cilindro, k_f -šiluminė produkto talpa ($\text{W/m}^2\text{^{\circ}C}$). Taigi, parenkant šaldymo įrangos valdymo parametrus ir kintamuosius, svarbu atsižvelgti į elektros energijos suvartojimą, pučiamo oro greitį, šaldančio oro temperatūrą, šaldymo laiką ir šaldomo produkto savitąsias šilumines charakteristikas

Jeigu maisto produktas tokiose sistemose nėra įpakotas, drėgmės garavimas yra žalingas faktorius. Susikaupusi drėgmė ore pernešama ventiliatorių link ir kaupiasi ant jų grotelių. Po kurio laiko susidarantis šerkšnas užkemša groteles, šiltas oro srautas nebėra atšaldomas, todėl šaldiklyje akumuliuojasi šiluma. Todėl drėgmės susidarymas tokiose sistemose turi būti minimizuojamas.

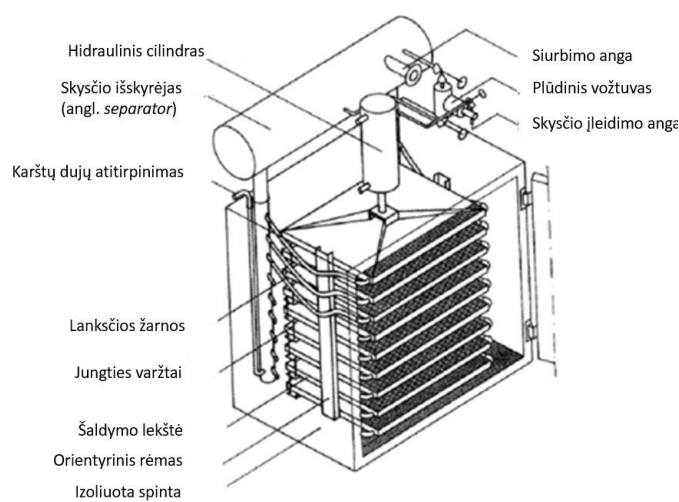
Produkto masės kitimas ir vienu metu šilumos pernešimo problema šaldymo procesuose mokslinėje literatūroje nėra išsamiai ištirta. Tuo pačiu duomenų apie produkto šilumos pernešimą, gautų iš pramoninių oro pūtimo šaldiklių (angl. *air-blast freezers*), nėra arba jų yra mažai [12].

1.3.2. Lėkštiniai šaldikliai

Lėkštiniai šaldikliai naudojami plokštiems produktams, tokiems kaip pyragaičiai, žuvies filė, jautienos paplotėliai, taip pat netaisyklingos formos daržovės, supakuotos į plokštes formas indą, šaldyti, pavyzdžiui, šparagai, žiediniai kopūstai, špinatai, brokoliai. Maistas tvirtai suspaudžiamas tarp metalinių lėkščių, kurios atvėsinamos.



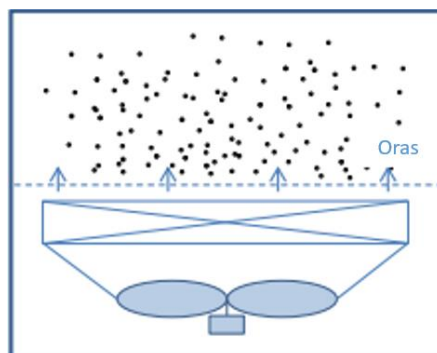
8 pav. Lėkštinis šaldiklis



9 pav. Principinė schema

1.3.3. Pluoštinės lovelės šaldikliai

Individualių vaisių, daržovių produktų, kaip braškės, žirniai, kukurūzai ir pjaustytos morkos, šaldymas pramonėje atliekamas naudojant pluoštinės lovos šaldiklį, kurio naudojimas paplitęs jau nuo 1960 metų [2].

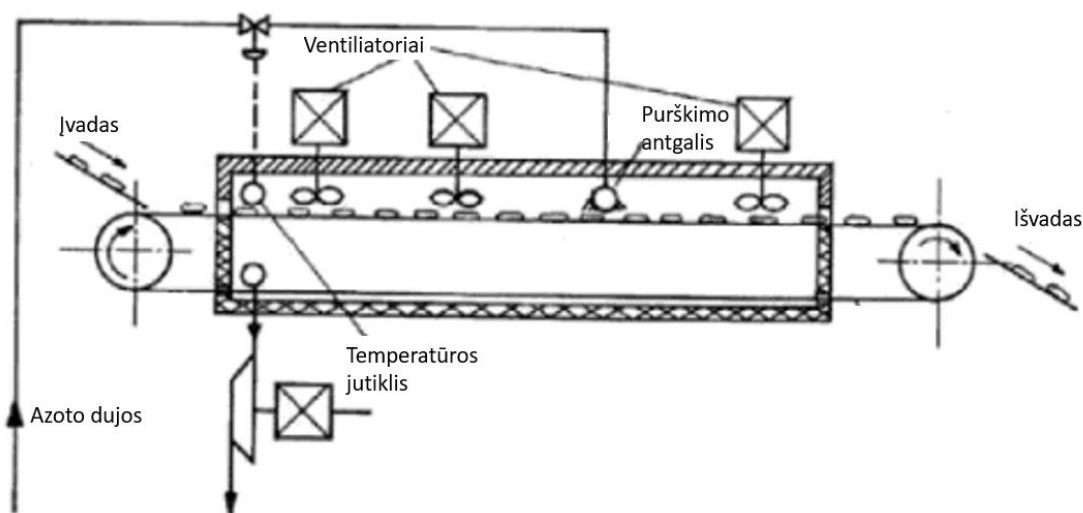


10 pav. Pluoštinės lovelės šaldiklis

Tokiose sistemose pasiekiamas didesnis šilumos perdavimo greitis tarp oro ir kietųjų detalių, dėl didelio vėjo greičio ant produkto paviršiaus ir dėl didesnio paviršiaus ploto kontakto.

1.3.4. Kriogeniniai šaldikliai

Dažniausiai maisto šaldymui naudojami kriogenai yra skystas azotas, skystas arba kietas anglies dioksidas ir skystas freonas (11 pav.). Šis šaldymo metodas apima tiesioginį kriogeno ir maisto kontaktą. Ypač žema kriogeno temperatūra lemia - didelį šilumos perdavimo greitį.



11 pav. Principinė kriogeninio šaldiklio schema

Išpurkštas skystas kriogenas pro purkštukų antgalius akimirksniu tampa dujomis. Šaltos dujos, tuomet cirkuliuoja dideliu greičiu šaldymo terpėje (2,5 m/s – 7 m/s).

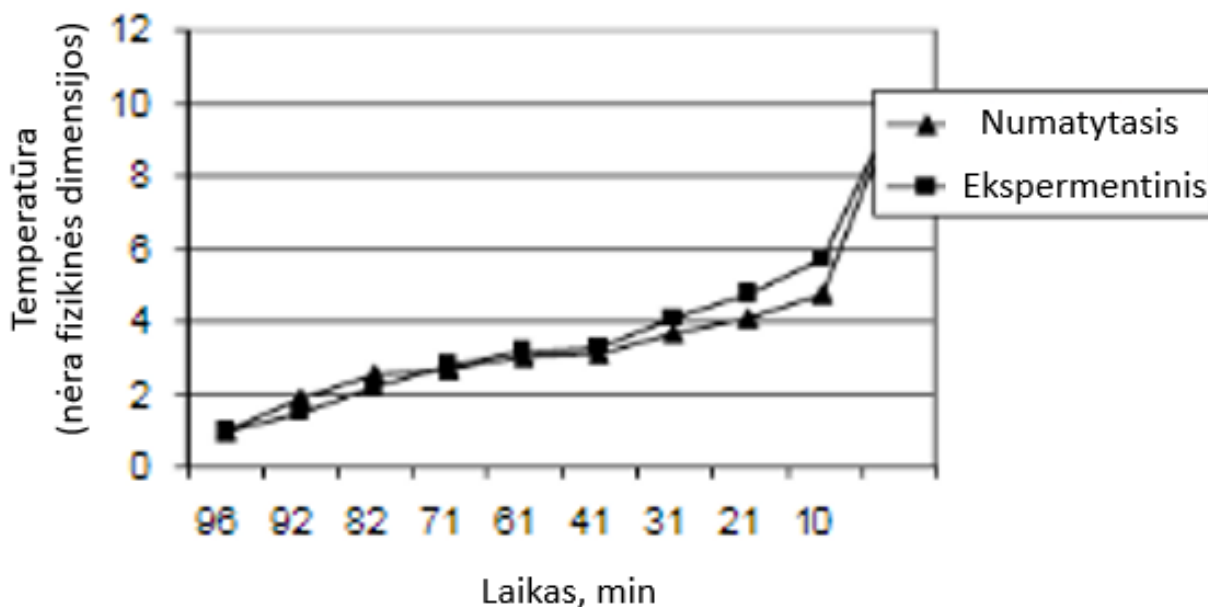
1.4. Procesų modeliavimas maisto pramonėje ir jų taikymo sritys

Maisto pramonės procesų modeliavimas išsivystė plėtojant fizikinių procesų modeliavimo metodus, atsiradus išsamesnių skaitmeninių įrankių ir programinės įrangos platformų, skirtų prognozavimui ir projektavimui gerinti bei procesams optimizuoti. Pramonės skaitmeninimo ir daiktų interneto atsiradimo kontekste skaitmeninio dvynio koncepcija neseniai pasirodė kaip priemonė įvairiapusiškesniam procesų operacijų valdymui. Skaitmeninis dvynys – tai matematiniais metodais grįstas virtualus objekto ar proceso atvaizdavimas skaitmeninėje aplinkoje (dažniausiai programinėje įrangoje), su realiu procesu jis surištas per jautrius duomenis ir duomenų analitikos įrankiais. P. Verboveno (P. Verboven), T. Defrajaus (T. Defraeye), A. Datto (Ashim K Datta) ir B. Nikolo (B. Nicolai) (2020) publikuotame straipsnyje [17] pristatomi iššūkiai ir privalumai integruojant skaitmeninį dvynį maisto pramonės procesuose bei pirmuosius jo pritaikymus žemės ūkio maisto sektoriuje.

Maisto pramonėje procesų matematinio modeliavimo svarbiausios taikymo sritys apima [18 - 21]:

- esamų įrenginių ir procesų valdymo optimizavimą;
- elektros energijos suvartojimo minimizavimą;
- maisto produktų kokybės prognozavimą šaldymo, džiovavimo ar kituose procesuose;
- šaldymo laiko prognozavimą.

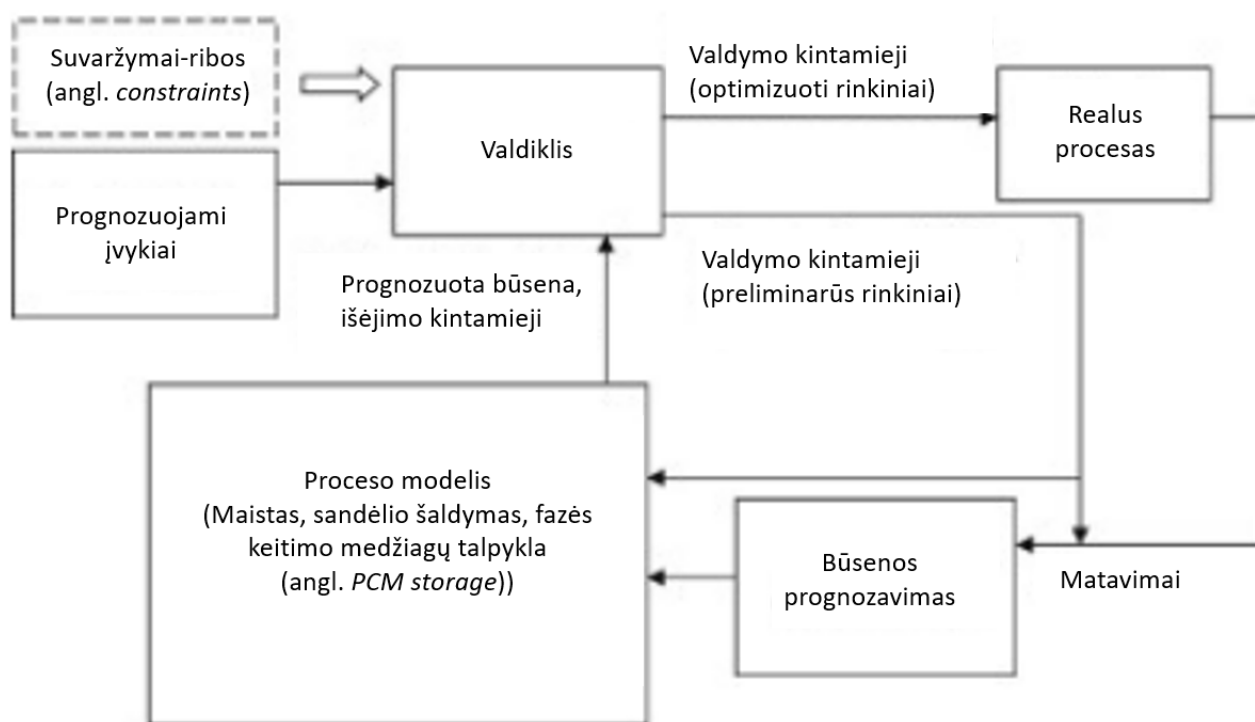
Autorius pabrėžia matematinio modelio, aprašančio šaldymo procesą, svarbą sudarant skaitmeninį proceso modelį [20]. Straipsnyje sukurtas matematinis modelis, oro-pūtimo šaldymo sistemoje prognozuojantis šaldymo proceso laiką ir leidžiantis mažinti elektros energijos suvartojimą ir gerinti produkto kokybę.



12 pav. Jautienos užšalimo prognozavimo ir eksperimentinių duomenų kreivės (laiko skalė mažėjanti)

Straipsnyje autorius prognozuoja produkto temperatūrą laike (žr. 12 pav.), atsižvelgiant į produkto šilumos perdavimo koeficientą ($115.5 \text{ W/m}^2\text{K}$), kuris buvo apskaičiuotas naudojant programinę įrangą „Eureka“ ir eksperimentinius duomenis – akriliniu keitikliu (angl. *acrilic transducer*) matuojamą lokalią temperatūrą. Paveiksle (žr. 12 pav.) temperatūros kitimas pavaizduotas kai aplinkos temperatūra lygi $-26 \text{ }^\circ\text{C}$, vėjo greitis 12 m/s . Autorius pabrėžia, kad oro srauto kryptis, greitis ir produkto geometrija turi būti įvertinti prognozuojant produkto paviršiaus šilumos perdavimo koeficientą bei šaldymo laiką. Šilumos perdavimo koeficientas yra ypač svarbus parametras, reikšmingai veikiantis produkto šilumos mainus su aplinka.

Pažangų proceso valdymo metodą – modeliu prognozuojamą valdymą (angl. *Model Predictive Control - MPD*), P. Schalbartas (P. Schalbart), D. Leducq`as ir G. Alvarezas (G. Alvarez) (2015) pritaikė optimizuoti energijos valdymą ledų sandėlio šaldymo sistemoje [18]. Sistemos modelio principinė schema pateikta paveiksle (žr. 13 pav.).



13 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo schema maistinių ledų šaldymo sistemoje

Valdomajame šaldymo procese naudojami ledai yra laikomi žemos temperatūros sandėlyje. Produktas aušinamas šaldymo įrenginyje su fazės-keitimo medžiagos (angl. *PCM - phase-change material*) talpykla (energijos akumuliavimo sistema). Modelio taikymo tikslas yra valdyti šaldomą procesą taip, kad ledo kokybė išliktų užduotose ribose ir tuo pačiu mažintų sandėlio energetines sąnaudas. Ledų kokybės kriterijus (\bar{L}) – susidaręs vidutinis ledo kristalo dydis (valgomajame lede). Kokybės nuostato viršutinė riba ne daugiau $26\mu\text{m}$ ($\bar{L} < 26\mu\text{m}$). Remiantis Ostvaldo nokinimo lygtimi (angl. *Ostwald ripening equation*) ją adaptavus, straipsnyje išvedama lygtis ledo kristalo dydžio kitimo greičiui laike įvertinti:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} = \frac{k^2}{2(\bar{L}(t) - \bar{L}_0)} \quad (6)$$

kur \bar{L}_0 - pradinis vidutinis kristalo dydis (m), k - perkristalizacijos greitis išreikštas Arrhenijaus lygtimi (angl. *Arrhenius equation*):

$$k = (K_1 * \Delta T + K_2) * e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (7)$$

kur K_1, K_2 – Arrhenijaus (Arrhenius) lygties konstantos, ΔT – temperatūrų pokytis (K), R – universaliųjų dujų konstanta (J/mol K), E_a – aktivacijos energija (J/mol).

Šilumos pernešimo modelis straipsnyje realizuotas aprašant produktų temperatūros lauką ir sprendžiant vienmatę baigtinių elementų lygčių sistemą su apibrėžtu laiko intervalu (diskretizavimo periodas):

$$\frac{\rho c T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\lambda \Delta t} = \frac{T_{i+1}^t + T_{i-1}^t - 2T_i^t}{(\Delta x)^2}, \quad (8)$$

kur Δt – laiko intervalas, Δx – žingsnis erdvėje, ρ – produkto tankis (kg/m³), c – specifinė šiluminė talpa (J/kg K), λ – šiluminis laidumas (W/m*K).

Daroma prielaida, kad sandėlyje, kuriame šilumos perdavimas vyksta tarp aušinamo skysčio, produktų ir lauko oro temperatūra yra vienodai pasiskirsčiusi. Temperatūros svyravimai pagrįsti energijos balansu:

$$\frac{dT_{WH}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{WH-ext} + \dot{Q}_{WH-products} + \dot{Q}_{WH-sf}}{C_{WH}}, \quad (9)$$

kur C_{WH} – šiluminė oro ir įrangos talpa sandėlyje, \dot{Q}_{WH-sf} – šilumos srautas aušinimo skysčio šilumokaityje (W), \dot{Q}_{WH-ext} – šilumos mainai su aplinka (W), $\dot{Q}_{WH-products}$ – produkto šilumos mainai (W).

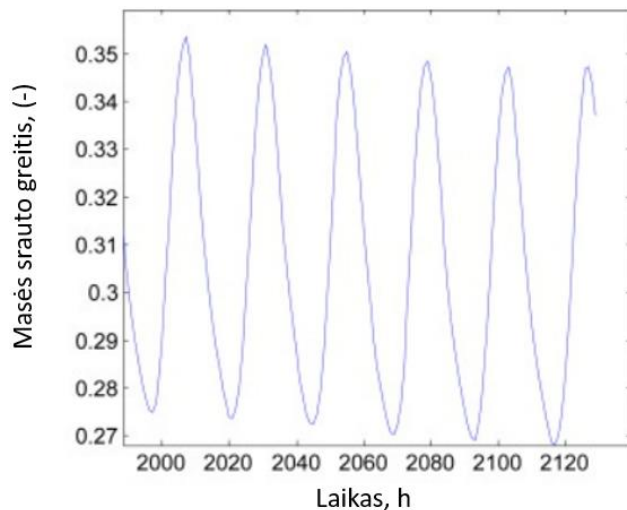
Atsižvelgiant į aušinimo pajėgumą ir energijos kaupimo įrenginio temperatūrą T_{st} , pirminio skysčio temperatūra garintuvo išleidimo angoje apskaičiuojama taip:

$$T_{refr,out} = T_{refr,in} + \frac{\dot{Q}_{refr}}{(\dot{m}c)_{pf}}, \quad (10)$$

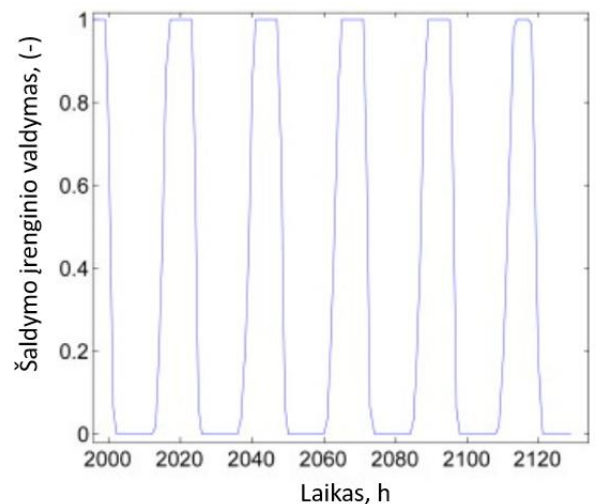
kur \dot{m}_{pf} – pirminio skysčio masės srautas per garintuvą (kg/s), $T_{refr,out}$ – pirminio skysčio temperatūra garintuvo išleidimo angoje (K), $T_{refr,in}$ – pirminio skysčio temperatūra garintuvo įleidimo angoje (K).

Šioje modeliu prognozuojamoje valdymo sistemoje valdančių poveikių signalai:

- \dot{m}_{pf} – šaldomo skysčio masės srautas cirkuliuojantis tarp energijos kaupimo įrenginio (PCM) ir sandėlio (kg/s);
- \dot{Q}_{refr} – šaldymo galia (angl. *cooling capacity*) (W).



14 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo sistemos veikimo iliustracija



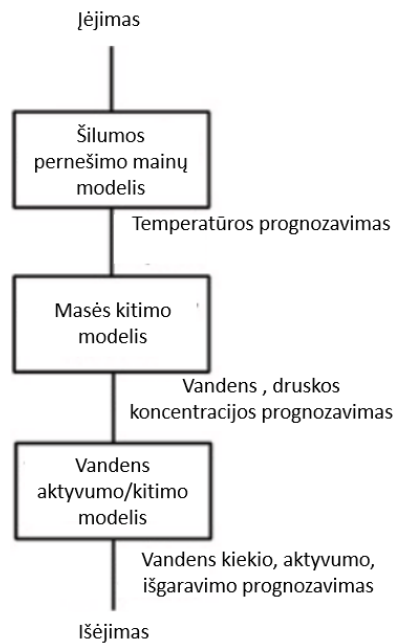
15 pav. Modeliu prognozuojamo valdymo sistemos veikimo iliustracija

Sistemos modelis ištirtas simuliuojant 3 mėnesių duomenis iš ledų gamyklos Vokietijoje, Neuenkirchene (Neuenkirchen). Autoriai pabrėžia, kad buvo pasiektas kristalo kiekis leduose $25.5\mu\text{m}$ (nuostato vertė žemiau lygi $26\mu\text{m}$), užtikrinta ledų kokybę, bei pasiektos sumažintos energijos sąnaudos palaikant reguliuojamą temperatūrą optimaliame lygyje. Straipsnyje svarstomas tokios sistemos pritaikymas kitų rūšių šaldomiems maisto produktams kai yra galimybė sudaryti jų kokybės dinamiką aprašančius modelius (pvz., brendimas arba skilimas) ir produkto savybes nusakančius kriterijus.

1.5. Matematinio modeliavimo tipai maisto pramonėje

Šaldymo procesų valdymas ir stebėjimas pramonėje yra sudėtingas uždavinys, kuriam įgyvendinti renkamosi įvairūs modeliai ir technikos. Tokių procesų matematinis modeliavimas yra komplikotas ir reikalaujantis didelių ekspertinių-analitinių žinių, tačiau turi didelį potencialą gerinti proceso efektyvumą, mažinti elektrinės galios suvartojimo išteklius bei sekti produkto kokybę.

Matematinų modelių tipai maisto pramonėje ir jų funkcijos (žr. 16 pav.)



16 pav. Modelių tipai [11]

Autoriai [11] pateikia šilumos perdavimo, masės kitimo ir vandens aktyvumo modelį. Modelio paskirtis - vandens ir druskos molekulių judėjimo (difuzijos) prognozavimas šalto rūkymo lašišoje. Autoriai lygina modelio rezultatus kai lašiša laikoma šaldytame jūros vandenyje ir lede.

Šilumos perdavimas lašišos raumenyje yra straipsnyje pagrįstas šilumos difuzijos lygtimi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_s}{c_p \rho_s} \nabla^2 T, \quad (11)$$

kur c_p – savitoji šiluminė talpa (J/kg K), ρ_s – tankis (kg/m³), k_s – šiluminis laidumas (W/m K), T – temperatūra (K), t – laikas (s), ∇ – yra Nablos operatorius išreiškiamas daline išvestine kiekviena kryptimi:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}; \quad (12)$$

Vandens masės perdavimo (12) ir druskos lašišos raumenyje koncentracijos (13) lygtys grindžiamos masės tvermės dėsniumi (Ficko antrasis dėsnis). Šis dėsnis nusako kaip vandens molekulių judėjimas sukelia koncentracijos pokyčius laike.

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = D_w \nabla^2 C_w, \quad (13)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D_s \nabla^2 C_s, \quad (14)$$

kur C_w ir C_s , atitinkamai, vandens ir druskos koncentracijos (kg/kg). D_w ir D_s yra atitinkamai, vandens ir druskos difuzijos koeficientai (m²/s).

2. Metodinė dalis

Šiame skyriuje analizuojamas maistinių ledų šaldymo procesas, kurie juda konvejeriu per spiralinį pramoninį šaldiklį. Produkto šaldymo proceso uždavinys yra atšaldyti šiuo konvejeriu judantį produktą nuo pradinės jo temperatūros iki užduotosios. Produkto šiluma konvekcijos būdu pašalinta iš produkto kaupiasi ore ir šerkšno pavidalu kaupiasi ant šilumokaičio grotelių. Šerkšno kiekio realiu laiku tiesiogiai išmatuoti neįmanoma. Šerkšno kiekis gali būti išmatuotas tik įrenginio atšildymo metu (angl. *defrost*), kada atitirpintas ledas nuo grotelių būtų pasveriamas. Tokia informacija realaus laiko proceso valdyme naudos neduoda.

Spręsti šiai problemai yra pasitelkiami matematiniais modeliais grįsti programiniai jutikliai. Šiame skyriuje sudarant modelį yra stengiamasi matematiškai aprašyti proceso fundamentinius dėsnius, eksperimentines žinias (duomenys gauti iš realaus proceso), ribines sąlygas (angl. *constraints*), šilumines produkto ir įrangos charakteristikas. Tuomet sukurtas modelis ir jo parametrai validuojami su realaus proceso duomenimis, o tai atlikus prognozuojamas tiesiogiai ne išmatuojamas dydis – specifinio šerkšno kiekis ir produkto temperatūra bet kuriuo šaldymo proceso laiko momentu. Produkto vidutinė temperatūra negali būti išmatuojama realiu laiku (įprastame darbo režime), nes tai reikalautų į šaldomą produktą įterpti temperatūros jutiklį, tokiu būdu pažeidžiant vidinę produkto struktūrą bei sterilumą.

2.1. Tiriamojo produkto geometrinės ir šiluminės charakteristikos

Projekte šaldomas produktas yra maistiniai ledai.

1 lentelė. Maistinių ledų geometrinės ir šiluminės charakteristikos apibūrinantys kintamieji.

Kintamasis/parametras	Reikšmė	Vertė	Matavimo vienetai
m	Produkto masė	0,175	[kg]
V	Produkto tūris	0,000416	[m ³]
ρ	Produkto tankis	420,673	[kg/m ³]
S	Produkto paviršiaus plotas	0,0336	[m ²]
C_{p_below}	Ledų savitoji šiluma, kai $t < 0$ °C	1670	[J/ kg K]
C_{p_above}	Ledų savitoji šiluma, kai $t > 0$ °C	3100	[J/ kg K]
C_p	Ledų įpakavimo (kartonas) savitoji šiluma	1340	[J/ kg K]
T_{p0}	Pradinė produkto temperatūra	-3,6	[°C]



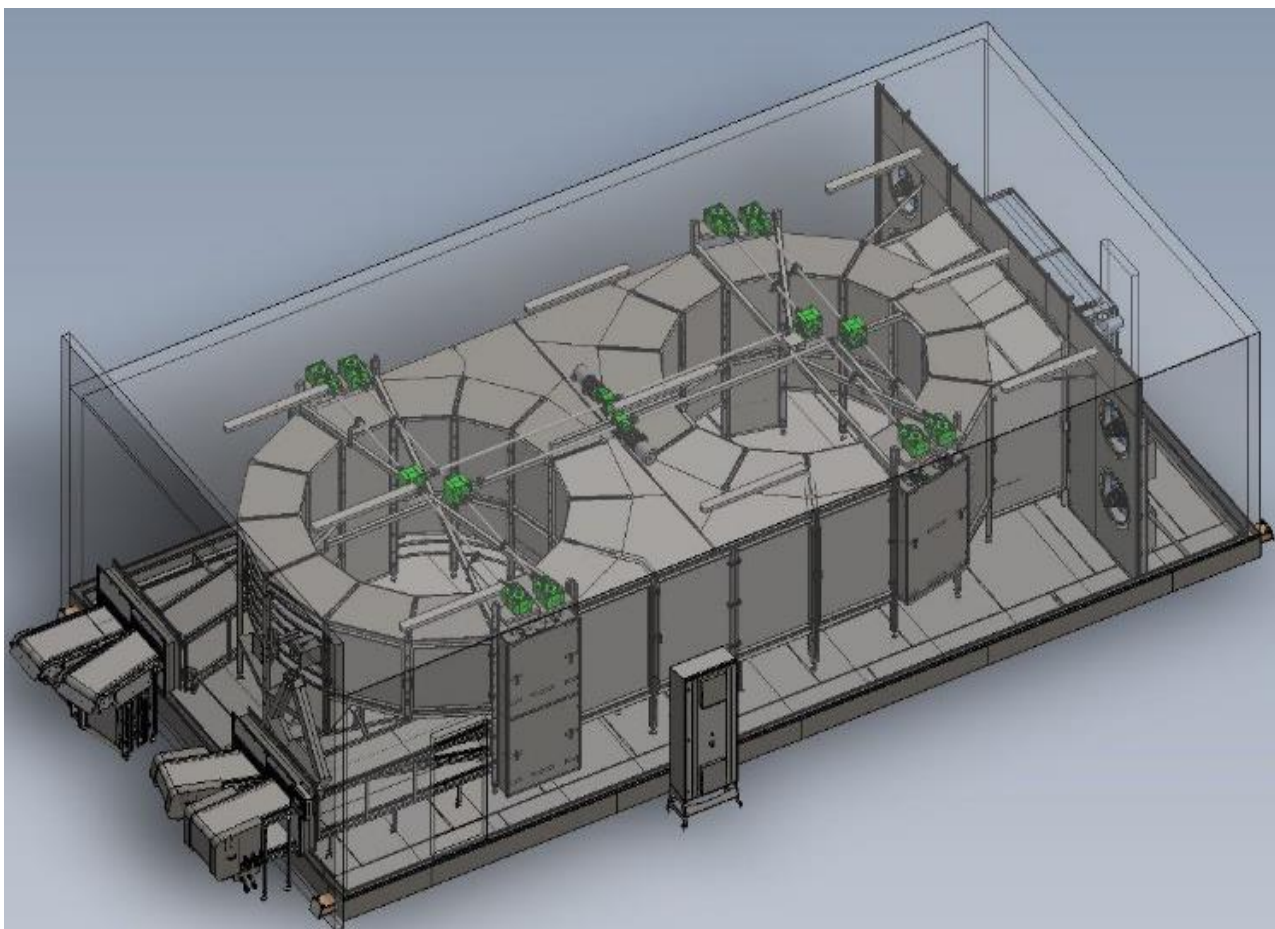
17 pav. Šaldomi ledai

2.2. Tiriamojo objekto elektrinės, geometrinės ir šiluminės charakteristikos.

2 lentelė. Spiralinio šaldiklio elektrinės, geometrinės ir šiluminės charakteristikas apibūdinantys kintamieji.

Kintamasis/parametras	Reikšmė	Vertė	Matavimo vienetai
a_{conv}	Konvejerio ilgis	340	[m]
$V_{freezer}$	Konvejerio tūris	391,4	[m ³]
A	Šaldiklio orapūčių plotas	0,502	[m ²]
Q	Šaldiklio orapūčių maksimalus vėjo kiekis	20000	[m ³ /h]
C_c	Aušinimo galia	175	[kW] (šaldymas)
P	Suvartojama galia apytikriai	16	[kW]

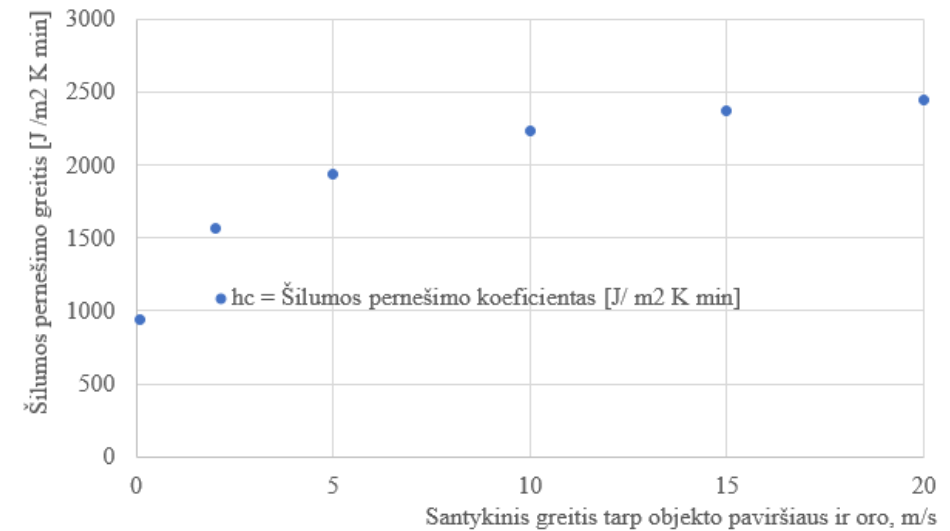
Spiralinio šaldiklio aušinimo terpė – amoniakas, garintuvų išduodama minimali temperatūra nuo -50 °C iki -52 °C. Įprastas darbo intervalas iki priverstinio stabdymo susikaupusiam šerkšniui valyti iki 60h. Nuvalymo būdas – karštom dujom. Izoliacijos storis 125mm, medžiaga – poliuretanai. Durų kiekis – 3.



18 pav. Pramoninio spiralinio šaldiklio su dviem būgnais atvaizdas

2.3. Šilumos perdavimo koeficiento identifikavimas maistiniame šaldiklyje.

Konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas (h_c) priklauso nuo terpės, dujų ar skysčio tipo srauto savybių (pavyzdžiui, greičio, klampumo ar srauto ir temperatūros priklausomybių). Šis koeficientas orui literatūroje [1] apibrėžiamas empirine priklausomybe nuo oro srauto greičio objekto paviršiaus atžvilgiu (žr. 19 pav.).



19 pav. Konvekcinis šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo oro santykinio greičio paviršiaus atžvilgiu

Šio dydžio kitimas išreiškiamas empirine formule:

$$h_c = (12.12 - 1.16v + 11.6\sqrt{v}) * 60, \quad (15)$$

kur h_c – konvekcinis šilumos perdavimo koeficientas ($J/m^2 K min$), v – santykinis oro greitis objekto paviršiaus atžvilgiu (m/s). Tačiau projekte vystomam matematiniam modeliui pastaroji priklausomybė (žr. 19 pav.) netiko (galbūt dėl šalčio nuostolių, įrenginio nesandarumų) - projekte kuriamam matematiniam modeliui buvo parinktas šilumos perdavimo koeficientas:

$$h_p = 153,7, \quad (16)$$

kur h_p – parinktas šilumos perdavimo koeficientas ($J/m^2 K min$). Parametro vertė parinkta taip, kad prognozuojama produkto vidinė temperatūra sutaptų (ar kuo mažiau išsiskirtų) nuo išmatuotos produkto temperatūros pramoninio šaldiklio viduje (žr. 29 pav.) (išsamiau parametro parinkimo procedūra aprašyta 2.4 skyriuje). Tuomet apskaičiuojamas vėjo srauto greitis išeinantis iš orapūčių:

$$v_o = \frac{Q * (duty cycle_{fans}/100)}{A * 3600}, \quad (17)$$

čia v_o - orapūčių generuojamas oro srauto greitis (m/s), Q – maksimalus oro srauto kiekis per valandą į kubinį metrą (deklaruojamas dydis ventiliatorių gamintojo) (m^3/h), $duty cycle_{fans}$ – ventiliatorių valdikliui (dažnio keitikliui) užduodamas sukimosi greitis, impulso pločio signalas (%), A - ventiliatorių aktyviosios zonos plotas (m^2), 3600 – laikas, sekundės. Įvertinus vėjo greitį išeinantį iš

orapūčių apytikriai įvertiname vėjo greitį keliaujantį šaldomo produkto paviršiaus atžvilgiu, tai yra apskaičiuojame vidutį vėjo greitį visame šaldiklio tūryje:

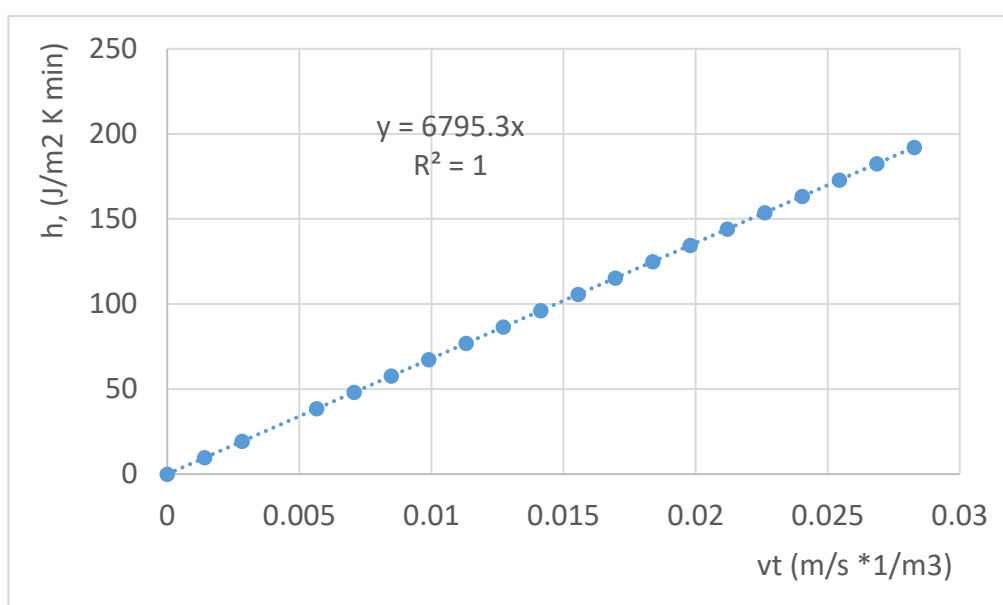
$$v_{tp} = \frac{v_o}{V_s}, \quad (18)$$

kur v_{tp} – oro srauto greitis tūrio vienetui ($\text{m/s} * 1/\text{m}^3$), V_s – šaldiklio tūris (m^3).

Panaudojus modelio apmokymo imties duomens parinktas tiesinės šilumos perdavimo koeficiento priklausomybės nuo oro greičio produkto paviršiaus atžvilgiu stiprinimo koeficientas:

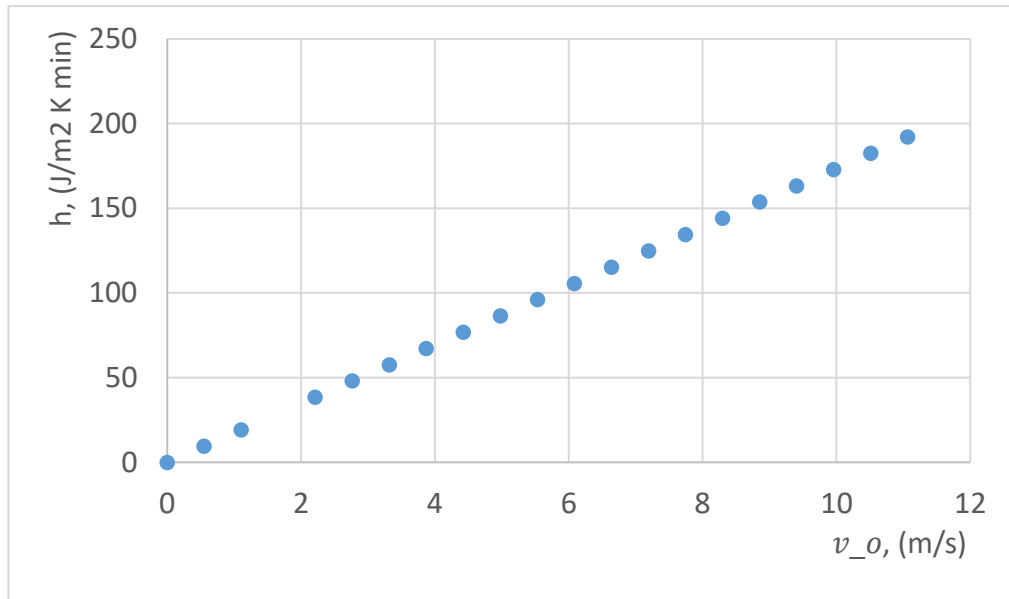
$$h = v_t * \frac{h_p}{v_{tp}} = v_t * \frac{153.701}{0.022619} = 6795,3 * v_t, \quad (19)$$

kur h_p yra parinktas šilumos perdavimo greitis ($\text{J}/\text{m}^2 \text{ K min}$), prie v_{tp} – vėjo greičio tūrio vienetui ($\text{m/s} * 1/\text{m}^3$), v_t – vėjo greitis tūrio vienetui ($\text{m/s} * 1/\text{m}^3$), ieškomo h parametro atžvilgiu (tai yra įvedamas oro greitis prie kurio ieškomas / parenkamas h parametras).



20 pav. Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo produktą aptekancio vėjo greičio (tūrio vienetui)

Ši tiesinė priklausomybė įvertina šaldymo įrenginio šilumos perdavimo ypatumus tokius kaip šalčio nuostoliai – šilumos mainai su aplinka, įrenginio nesandarumas. Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo orapūčių generuojamo vėjo greičio paveikslas pateikiamas žemiau (žr. 21 pav.)



21 pav. Šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo orapūčių vėjo greičio

2.4. Matematinis modelis šaldomo produkto temperatūros prognozavimui pramoniniame šaldiklyje

Produkto, judančio spiralinio šaldiklio konvejeriu, temperatūros dinamika apibrėžiama priklausomybe gaunama iš lygties (literatūros analizės skyriuje):

$$T_{pi} = \frac{hST_0dt - LRdt + T_{pi-1}V\rho C_p}{V\rho C_p + hSdt}, \quad (20)$$

kur T_{pi} – produkto temperatūra i -tuoju laiko momentu ($^{\circ}\text{C}$), T_{pi-1} – produkto temperatūra $i-1$ laiko momentu ($^{\circ}\text{C}$), T_0 – pradinė produkto temperatūra ($^{\circ}\text{C}$), V – produkto tūris (m^3), ρ – produkto tankis (kg/m^3), h – šilumos pernešimo greitis ($\text{J}/(\text{m}^2 \text{ K min})$), S – produkto paviršiaus plotas (m^2), dt – diskretizavimo žingsnis (s). Vandens garavimo iš produkto greitis yra proporcingas parcialinių slėgių skirtumui ir yra aprašomas žemiau pateikta formule:

$$R = K * (p_p(T_p) - p_o(T_o)), \quad (21)$$

kur p_p – garų parcialinis slėgis aušinamo produkto viršutiniame sluoksnyje ($\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$), p_o – garų parcialinis slėgis aptekančiame ore (Pa); K – koeficientas ($\text{kg}/(\text{Pa s})$). Koeficientas K priklauso nuo šaldymo proceso technologinių parametrų (vėliau parenkamas). Parcialinių slėgių priklausomybė nuo temperatūros aprašoma empirinė formule iš literatūros 1-ajame skyriuje pateiktos lygties (3). Tuomet išsprendus logaritmą (3) garų parcialinis slėgis aušinamo produkto viršutiniame sluoksnyje lygtis:

$$p_p = 10^{AA - (BB/(T_p + CC))}, \quad (22)$$

kur $AA=10.23$, $BB = 1750$, $CC = 235$ – Antuano koeficientai (angl. *Antoine coefficients*). Tuomet atitinkamai, garų parcialinis slėgis aptekančiame ore:

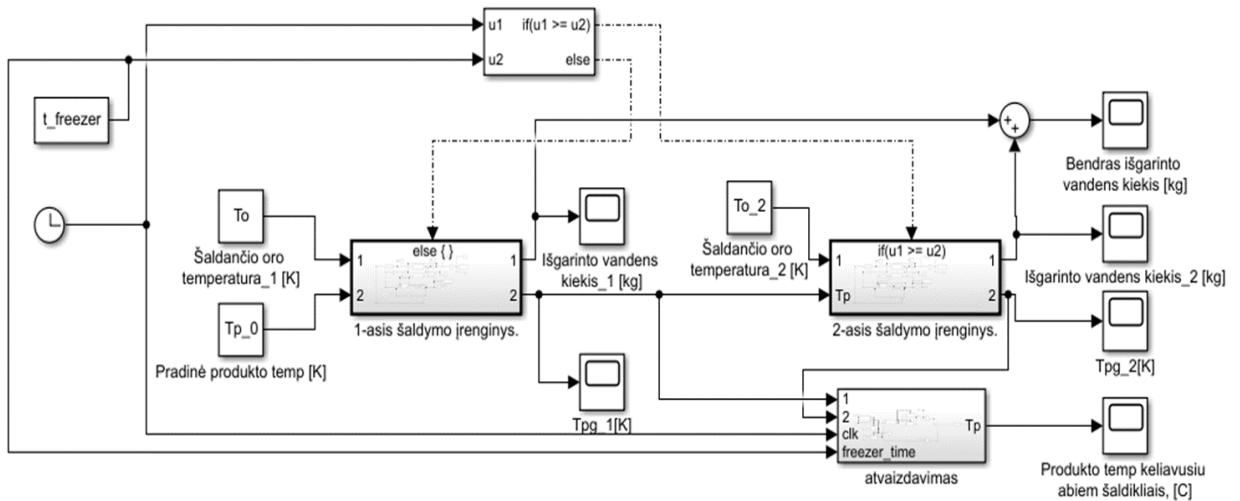
$$p_o = 10^{AA - (BB/(T_o + CC))}, \quad (23)$$

Išgarinto vandens kiekis aprašomas:

$$m_{H2Oi} = R * dt + m_{H2Oi-1}, \quad (24)$$

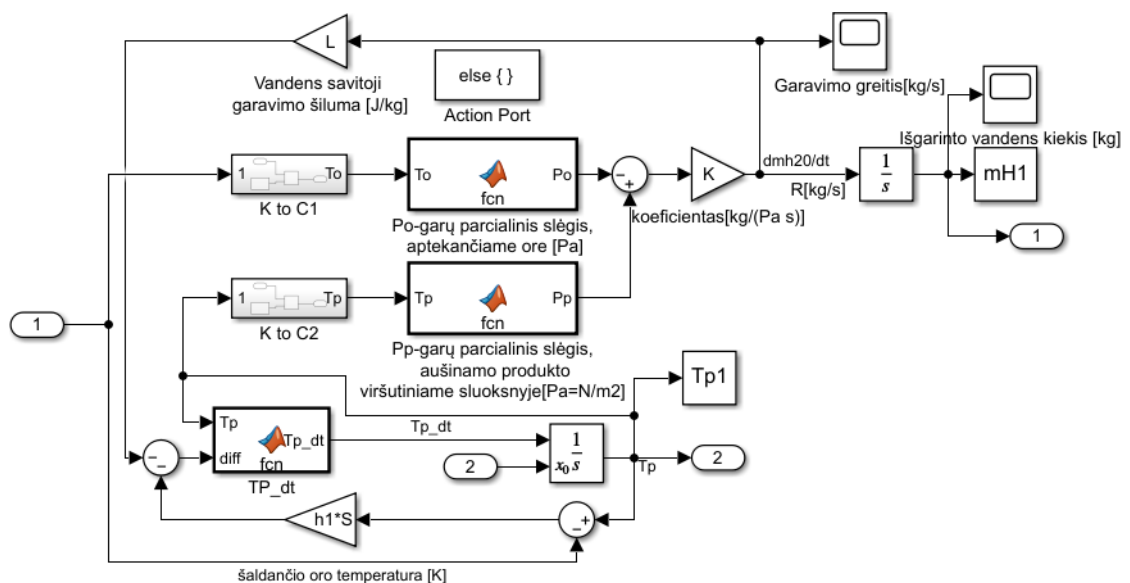
čia m_{H2O} – išgarinto vandens kiekis (kg); R – garavimo greitis (kg/s), m_{H2Oi-1} – išgarinto vandens kiekis i-1 laiko momentu (kg).

Fundamentinėmis funkcinėmis priklausomybėmis paremtas matematinis modelis realizuotas programinės įrangos „Matlab / Simulink“ aplinkoje. Modeliavimo schema pateikta žemiau (žr. 22 pav.).



22 pav. Šaldiklio modelio realizacijos programinės įrangos „Matlab / Simulink“ aplinkoje struktūrinė schema.

Išsamesnis spiralinio šaldiklio būgno matematinis modelio grafikas pateiktas žemiau (žr. 23 pav.). Paveiksle pateiktas posistemės blokas, kuriame įgyvendintos (6 - 9) lygtys, panaudojant standartines „Matlab / Simulink“ programinės įrangos blokus.



23 pav. Šaldomo produkto temperatūros ir išgaravusio vandens kiekio prognozės spiraliniame konvejeriniame šaldiklyje modelis „Simulink“ aplinkoje.

Sukurto matematinio modelio parametrai buvo parenkami atsižvelgiant į eksperimentų duomenis. Eksperimentas buvo atliktas pramoniniame šaldiklyje prie šių technologinių sąlygų:

1. konvejerio greitis – 3,8 (m/min);
2. produkto temperatūros matavimų diskretiškumas judančiu konvejerio linija šaldiklyje – 0,16 (min);
3. šaldančio oro temperatūra -42,3 (°C);
4. orapūčių sukimosi greičio nuostatas – 80 (%) maksimalios galios;
5. šaldomas produktas – maistiniai ledai;
6. produkto pradinė temperatūra -3 (°C);

Temperatūriniai jutiklių zondai patalpinami maistinio ledo viduje ir paleidžiami judėti spiralinio šaldiklio konvejeriu (žr. 25 - 26 pav.)

Temperatūrinio jutiklio parametrų specifikacija:

- vidinio įrenginio matavimo diapazonas - -40+70 (°C);
- išorinių matavimo zonduų kiekis – 2 vnt;
- 1-ojo K tipo zondo matavimo diapazonas nuo -40 °C iki +150 °C (oranžinis laidas – žr. 26 pav.);
- 2-ojo K tipo zondo matavimo diapazonas nuo -200 °C iki +1100 °C (žalias laidas - žr. 26 pav.);
- izoliacinė įrenginio medžiaga – Putų polistirolu kvadratinė dėžutė (200mm/85mm/65mm)(žr. 26 pav.);
- matavimų tikslumas $\pm 0,5$ °C arba 0,5 % (kuris didesnis);
- svoris – 70g;
- atmintis – iki 60000 matavimų;



24 pav. LOG200 TC temperatūros jutiklis



25 pav. Matavimo stendas ant konvejerio



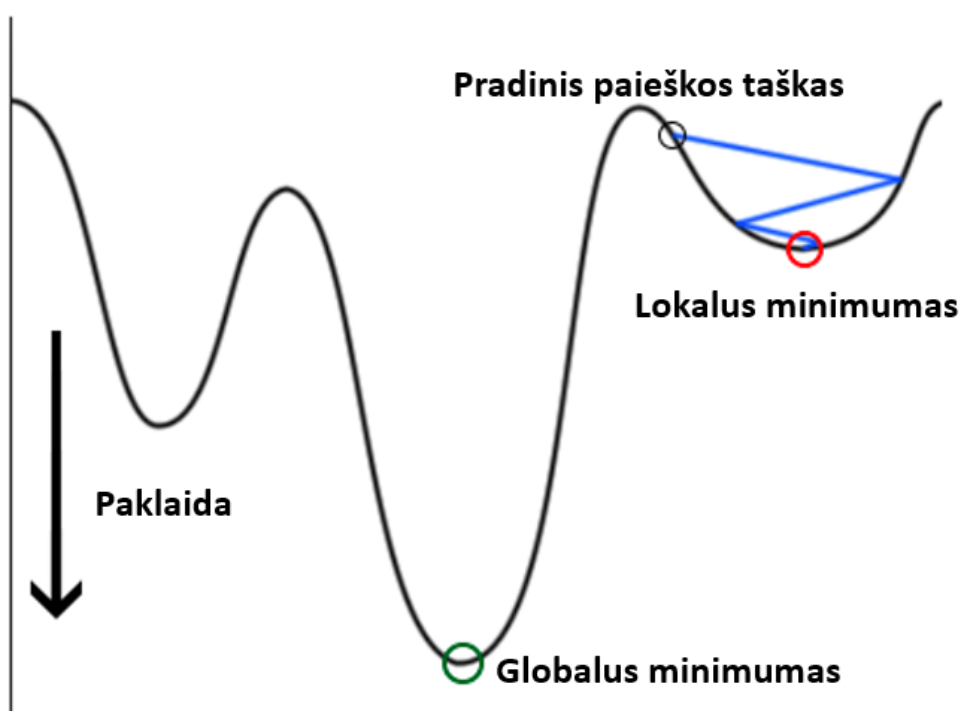
26 pav. Matavimo stendas

Surinkus ir apdorojus gautus duomenis buvo parenkamas šilumos perdavimo koeficientas h_p ir parametras K, taip kad procentinė paklaida (angl. *percentage error*, PE) tarp produkto temperatūros šaldiklio išeigoje būtų kuo artimesnė užduotajai vertei:

$$PE = \left(\left| \frac{T_{i\dot{s}}(tend) - T_p(tend)}{T_{i\dot{s}}(tend)} \right| \right) \times 100\% = 1,8\%, \quad (28)$$

kur $T_{i\check{s}}(tend), T_p(tend)$ – atitinkamai išmatuota ir modelio prognozuota produkto temperatūra simuliacijos pabaigoje (tai yra laiko momentu, kai produktas pasiekia konvejerio galą, išėigos angą), (°C).

Sprendžiant šį minimizavimo uždavinį buvo pasitelktas „Excel Solver“ programinės įrangos priedas. Šis įrankis naudojant apibendrintą sumažinto gradiento metodą (angl. *Generalized Reduced Gradient* - *GRG*) parenka tokias nurodytų parametrų vertes prie kurių paklaida mažiausia. GRG metodas sujungia linijinio programavimo ir netiesinio programavimo technikos elementus optimaliam sprendiniui gauti. Ieškant funkcijos $f(x)$ sprendinių ji yra diferencijuojama ieškomų parametrų atžvilgiu, tuomet panaudojus dalinių išvestinių reikšmes galima prognozuoti kryptį į ieškomąjį minimumo ar maksimumo tašką (esant vertei lygiai 0, randamas lokalus funkcijos ekstremumas). Šis metodas iteratyviai minimizuoja / maksimizuoja tikslo funkciją (angl. *objective function*), tuo pačiu neišeidamas iš kintamųjų erdvės (patenkindamas kintamųjų apribojimo sąlygas). Tačiau pagrindinis metodo trūkumas, kad globalus funkcijos ekstremumas gali būti nerastas. Tai įvyksta, kuomet funkcijos paieškos laukas „susitraukia“ (gradiento paieškos žingsnis per mažas) ir patenka į lokali minimumą (žr. 27 pav.).



27 pav. Gradientinio metodo paieškos laukas („įstrigęs“ lokaliame ekstremume)

Šiai problemai spręsti metodas yra paleidžiamas daug kartų iš skirtingų pradžios taškų, tokiu būdu yra išplečiamas paieškos laukas ir tuo pačiu didinama tikimybė rasti globalų funkcijos ekstremumą. Programinė įrangoje „Excel“ pasirenkamas „Multistart“ parametras. Šiam paieškos algoritmui įvedamos griežtosios ribojimo sąlygos (angl. *Hard Constraints*):

$$1 \times 10^{-8} \geq K \geq 1 \times 10^{-10}, \quad (26)$$

kur K – koeficientas, $\text{kg}/(\text{Pa min})$, tiesiogiai veikiantis vandens garavimo greitį iš produkto (2 formulė ir paaiškinimas literatūros analizės skyriuje). Atsižvelgus į ilgametę gamyklos operatorių patirtį buvo

parinktos ypač mažos šio koeficiento ribos, artimos nuliui. Anot jų iš vieno produkto išgaravusio vandens kiekis yra mažas, o didžioji dalis vandens / garo į spiralinį šaldiklį patenka per konvejerio įėjimo ir išėjimo angas.

$$300 \geq h_p \geq 10, \quad (27)$$

kur h_p - šilumos perdavimo koeficientas ($J/(m^2 C min)$). Šio koeficiento ribos parinktos atsižvelgiant į literatūros šaltinį [1] ir eksperimentine patirtimi.

3 lentelė. GRG metodo parinktųjų parametrų vertės ir rezultatai

h , ($J/(m^2 C min)$)	K , ($kg/(Pa min)$)	$MAPE$, (%)	PE , (%)	$RMSE$, ($^{\circ}C$)
153,7	3,20E-09	6,4	1,8	1,07

Vidutinė absoliutinė procentinė paklaida (angl. $MAPE$) tarp prognozuojamos produkto temperatūros ir jutikliais išmatuotų temperatūrų (28 formulė):

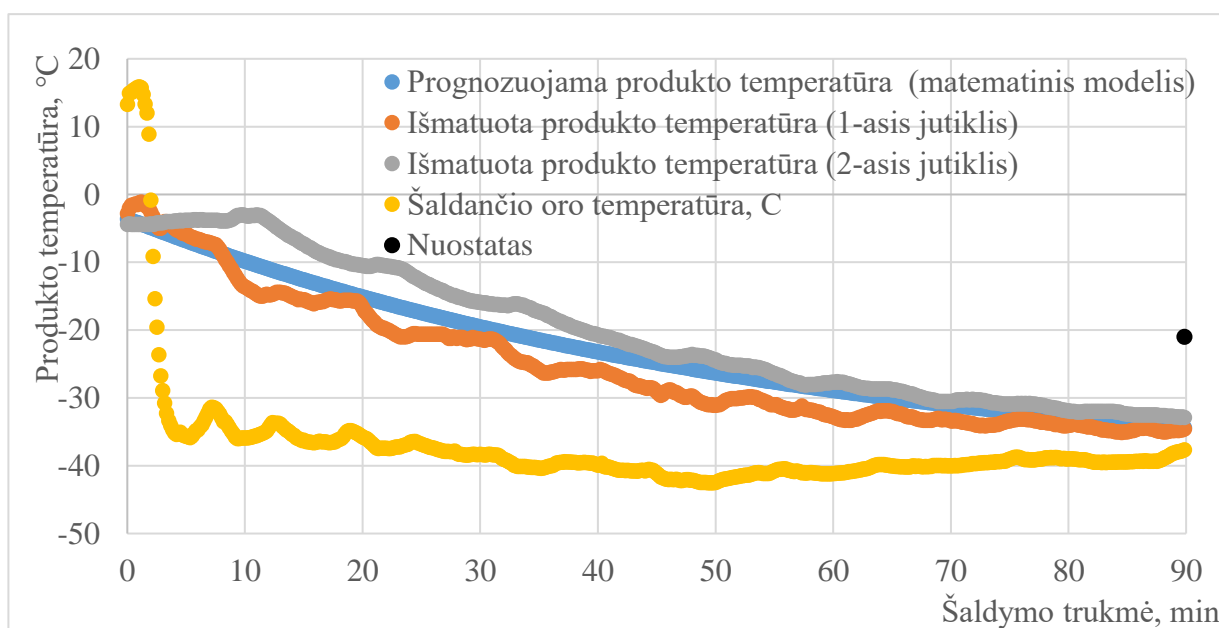
$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \times \sum \left| \frac{T_{i\check{s}} - T_p}{T_{i\check{s}}} \right| \right) \times 100\% = 6,4\%, \quad (28)$$

kur n – išmatuotų verčių kiekis per visą šaldymo procesą, $T_{i\check{s}}$ – išmatuota produkto temperatūra ($^{\circ}C$), T_p - prognozuojama produkto temperatūra ($^{\circ}C$).

Vidutinė kvadratinė paklaida (angl. $RMSE$) apskaičiuojama:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (|T_p| - |T_{i\check{s}}|)^2}{n}} = 1,07 \text{ } ^{\circ}C, \quad (29)$$

Su parinktais parametrais modeliuojamos produkto temperatūros kitimo grafikas išmatuotų eksperimentinių duomenų atžvilgiu (žr. 28 pav.).



28 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje (eksperimento sąlygomis)

Aktyvioji šaldymo galia vienam produktui per visą šaldymo laiką proporcinga šilumos perdavimo koeficiento, temperatūros pokyčio ir produkto paviršiaus ploto sandaugai:

$$P_p = h * \Delta C * S = h * (T_{p_0} - T_p(t_{end})) * S [W], \quad (30)$$

kur h – nustatytas (ankstesniame skyriuje) šilumos perdavimo koeficientas ($W/m^2 \Delta C$), S – produkto paviršiaus plotas (m^2), ΔC – temperatūrų pokytis ($^{\circ}C$), T_{p_0} – produkto pradinė temperatūra ($^{\circ}C$), $T_p(t_{end})$ – galutinė produkto temperatūra (šaldymo proceso pabaigoje) ($^{\circ}C$), t_{end} – šaldymo trukmė (min).

Įrašius į (30) skaitines vertes gaunama šaldymo galia vienam produktui:

$$P_{p1} = \frac{153,7}{60} * (-3,6 - (-33,75)) * 0,0336 = 2,59 (W); \quad (31)$$

Tuomet galima apskaičiuoti šaldymo aktyviają galią visiems produktams per visą šaldymo laiką:

$$P_{\$1} = P_{p1} * n * \frac{t_{end}}{60} = 2,59 * 5440 * \frac{90}{60} = 21,1 (kWh), \quad (32)$$

kur n – kiekis produktų per visą konvejerio ilgį (vnt.).

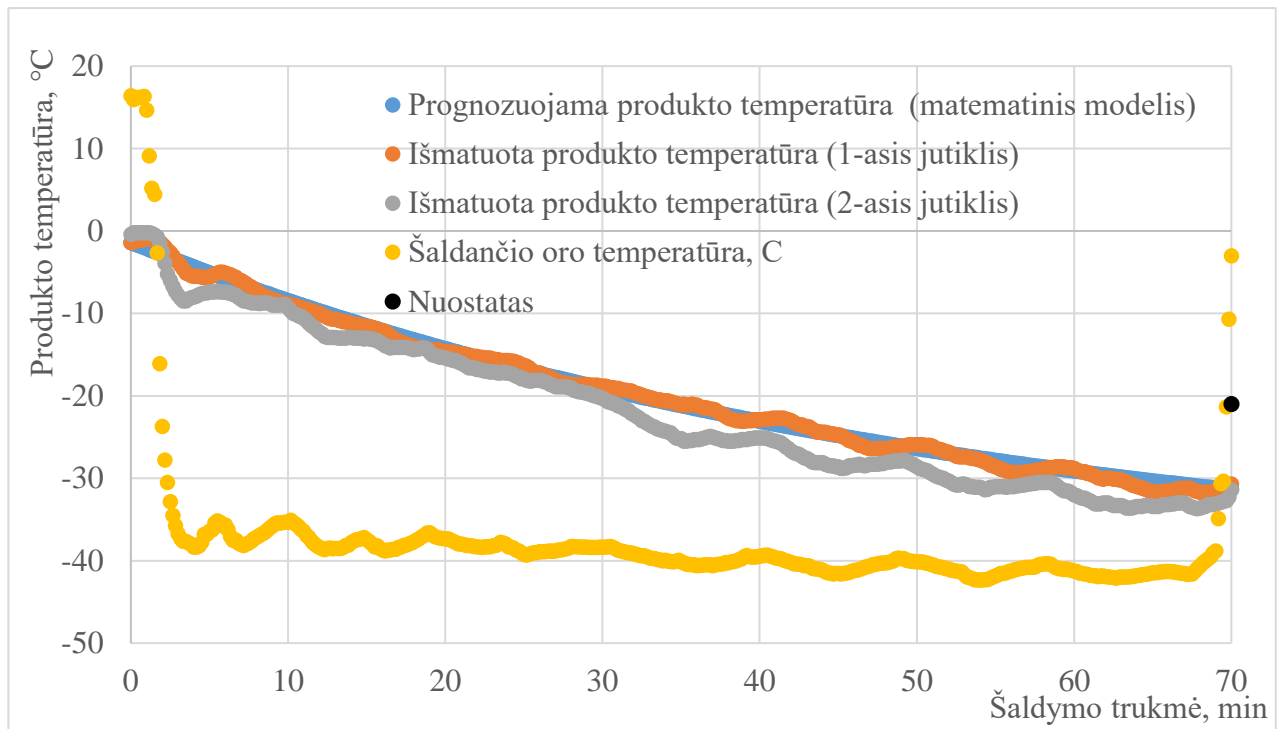
2.5. Matematinio modelio validavimas

Šio skyriaus tikslas įvertinti matematinio modelio adekvatumą ir prognozuojamų dydžių tikslumą. Sukurtas matematinis modelis buvo validuojamas atsižvelgiant į naujo eksperimento duomenis (išsamus eksperimento aprašas 2,4 skyriuje). Eksperimentas buvo atliktas tame pačiame pramoniniame šaldiklyje šaldant tapatį objektą (maistinius ledus), kitos technologinės sąlygos buvo keičiamos kiek leido pakeisti gamyklos operatoriai, nepažeidžiant (nenutraukiant) įprasto gamybinio proceso. Modelio apmokymo ir validavimo eksperimentų sąlygos nurodytos (žr. 4 lentelę).

4 lentelė. Eksperimento sąlygos

Kintamasis	Reikšmė	1-asis eksperimentas (apmokymo imtis)	2-asis eksperimentas (validavimo imtis)	Matavimo vienetai
v_{konv}	Konvejerio greitis	3,8	4,9	(m/min)
v_{orap}	Orapūčių sukimosi greičio nuostatas	80%	85%	(%) maksimalios galios
T_o	Šaldančio oro temperatūra	-42,3	-42,3	($^{\circ}C$)
T_{p0}	Produkto pradinė temperatūra	-3	-1,4	($^{\circ}C$)
dt	Produkto temperatūros matavimų diskretiškumas judančiu konvejerio linija šaldiklyje	10/60	10/60	(min)
	Šaldomas produktas	Maistiniai ledai (16 pav.)		

Eksperimente produkto vidinės temperatūros kitimo grafikas, jam judant spiralinio šaldiklio konvejeriu (žr. 29 pav.). Žemiau grafiko pateiktoje lentelėje (žr. 5 lentelė.) rezultatų suvestinė.



29 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje (2-ojo eksperimento sąlygomis)

5 lentelė. Rezultatų suvestinė

<i>h</i> , ((J/(m ² C min))	<i>K</i> , (kg/(Pa min))	MAPE , (%)	RMSE , (°C)	PE , (%)
163,3	3,20E-09	9,7	1,4	1,02

Lentelėje: ***h*** – apskaičiuotas pagal 4 formulę (2.3 skyriuje), suvedus kintamojo vertę (v_{orap}) iš (3 lentelės), ***K*** – parinktas parametras (3 lentelė), **MAPE** – vidutinė absoliutinė procentinė paklaida tarp prognozuojamos produkto temperatūros (modelio) ir jutikliais išmatuotų temperatūrų (25 formulė), **PE** – procentinė paklaida tarp prognozuojamos produkto temperatūros (modelio) ir jutikliais išmatuotos temperatūros šaldymo proceso pabaigoje (28 formulė), **RMSE** – vidutinė kvadratinė paklaida tarp prognozuojamos produkto temperatūros (modelio) ir jutikliais išmatuotų temperatūrų (29 formulė).

Taip pat apskaičiuojame aktyviąją galią eksperimente vienam produktui, skaliarines vertes įvedame į formulę (30):

$$P_{p2} = \frac{163,3}{60} * (-1,4 - (-31,05)) * 0,0336 = 2,71 (W); \quad (33)$$

Tuomet galima apskaičiuoti šaldymo aktyviąją galią visiems produktams per visą šaldymo laiką (pagal 32 formulę):

$$P_{s2} = 2,71 * 5440 * \frac{70}{60} = 17,2 (kWh), \quad (34)$$

Akivaizdu, kad šaldymo proceso laikas (žr. 28-29 pav.) yra per ilgas (arba šaldymo galia parinkta per didelė), nes produkto užšaldymo nustatytoji vertė yra **-21°C**, o produktas atšaldomas iki žemesnės

temperatūros, todėl išnaudojama pertekliniai energijos resursai, procentinė paklaida tarp nuostato ir išmatuotos produkto temperatūros šaldiklio išeigoje (pirmajame eksperimente):

$$E_1 = \frac{||T_{pn}| - |T_{i\check{s}}||}{|T_{pn}|} * 100\% = \frac{||-21| - |-33,75||}{|-21|} * 100\% = 60,7 \%, \quad (35)$$

kur T_{pn} – produkto nuostatos temperatūra šaldymo proceso pabaigoje ($^{\circ}\text{C}$), $T_{i\check{s}}$ – produkto išmatuota temperatūra šaldymo proceso pabaigoje ($^{\circ}\text{C}$).

Atitinkamai antrajame eksperimente:

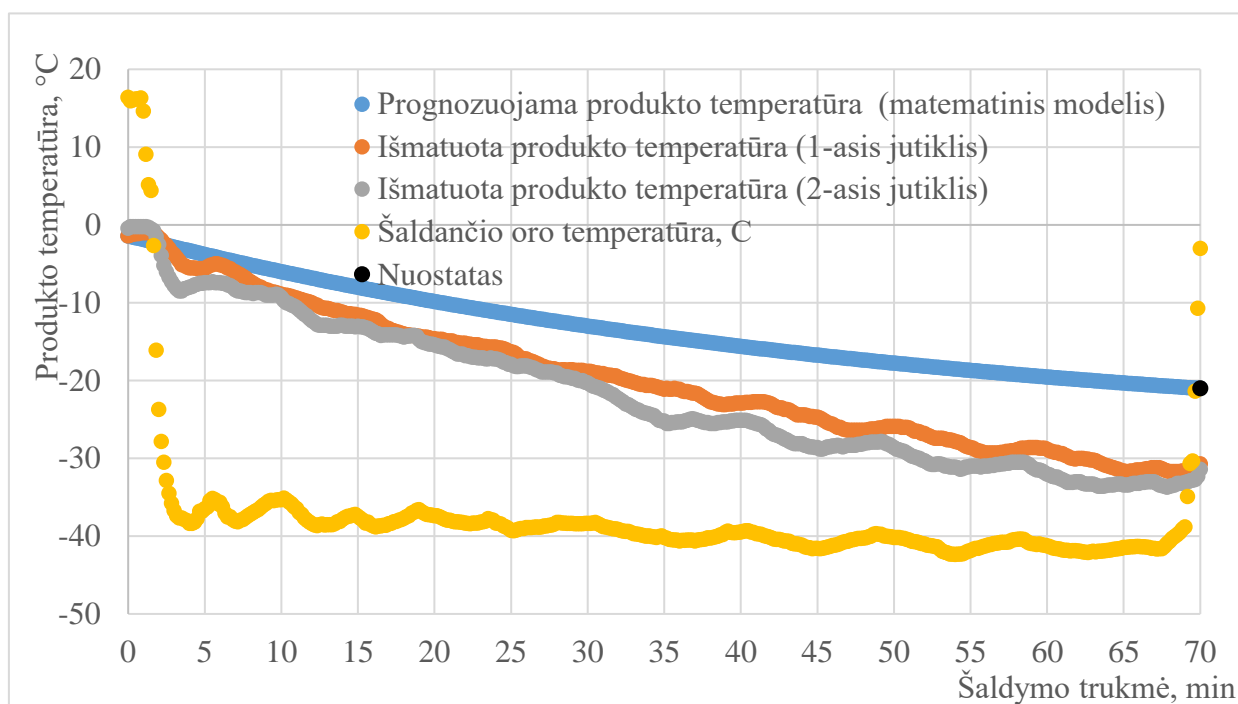
$$E_2 = \frac{||T_{pn}| - |T_{i\check{s}}||}{|T_{pn}|} * 100\% = \frac{||-21| - |-31,05||}{|-21|} * 100\% = 47,8 \%, \quad (36)$$

Galima pastebėti, kad šaldymo procesas suprojektuotas **su dideliu rezervu** (žr. 35-36 formulės) (žr. 28-29 pav.), neoptimizuojant pagal produkto bei įrenginio šilumines ir energetines charakteristikas (žr. 32, 34 formules) atitinkantį realų poreikį. Todėl kitame skyriuje bus aptarta įvairios šio šaldymo proceso optimizacijos, išbandytos įvairios valdančiųjų signalų derinių kombinacijos ir įvertintas jų poveikis procesui. Visi rezultatai bus pateikiami šių dviejų eksperimentų (pateiktų 2,4 -2,5 skyriuose) duomenų atžvilgiu.

2.6. Šaldymo režimai

Šio proceso optimizavimas gali būti pasiektas koreguojant šaldymo proceso valdymo signalus:

1. Šaldančio oro temperatūrą – T_o , $^{\circ}\text{C}$;



30 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($T_o = -28^{\circ}\text{C}$)

Padidinus šaldomo oro temperatūra iki -28°C per 70 minučių šaldymo laiko pasiekama nustatyta produkto temperatūra (-21°C). Tuomet pagal formules (30-32), šaldymo galia visiems produktams konvejeriye užšaldyti ($P_{\text{š2}_1}$):

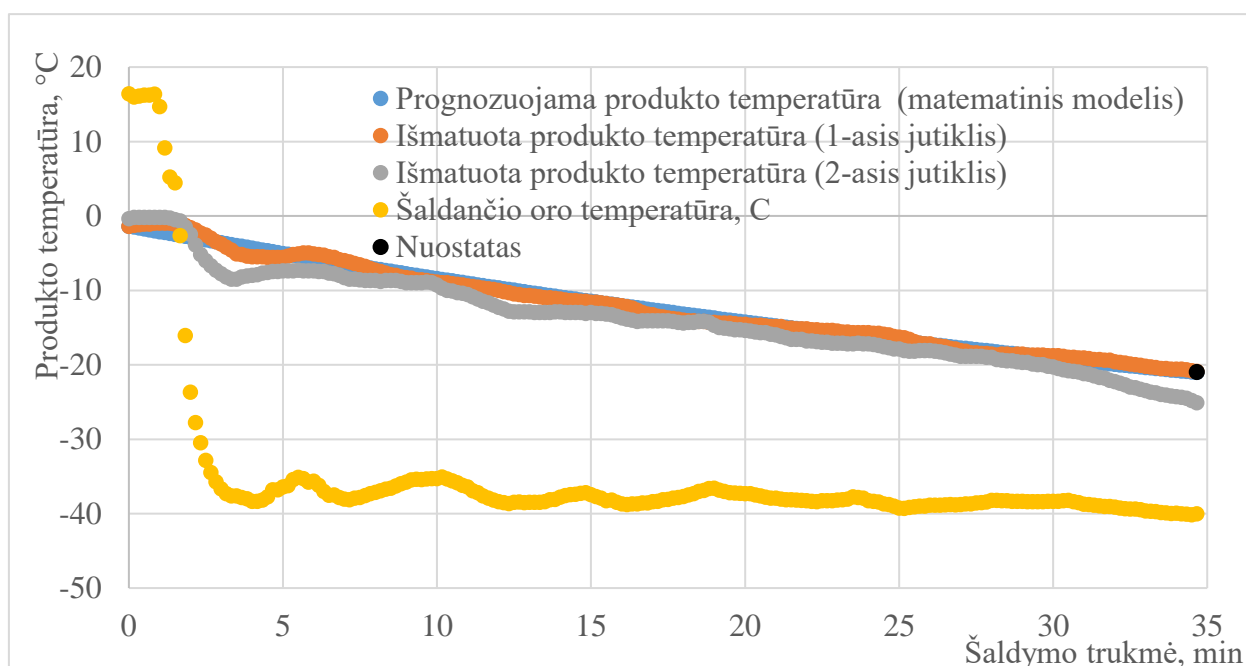
$$P_{\text{š2}_1} = \frac{163,3}{60} * (-1.4 - (-21)) * 0,0336 * 5440 * \frac{70}{60} = 11,3 \text{ [kWh]} \quad (37)$$

Apskaičiuotas šaldiklio šaldymo galios bei energetinių resursų procentinis sumažėjimas lyginant su pradinio eksperimento sąlygomis yra toks:

$$P_{\text{š_sumažinta}} = \frac{P_{\text{š2}} - P_{\text{š2}_1}}{P_{\text{š2}}} * 100\% = \frac{17,2 - 11,3}{17,2} * 100\% = 34,3 \text{ [%]}, \quad (38)$$

kur $P_{\text{š_sumažinta}}$ - sumažintos aktyviosios šaldymo galios dalis procentais lyginant su pradinėmis sąlygomis (2-ojo eksperimento atžvilgiu). $P_{\text{š2}_1}$ - šaldiklio šaldymo aktyvioji galia kai šaldomo oro srautas modifikuotas, W;

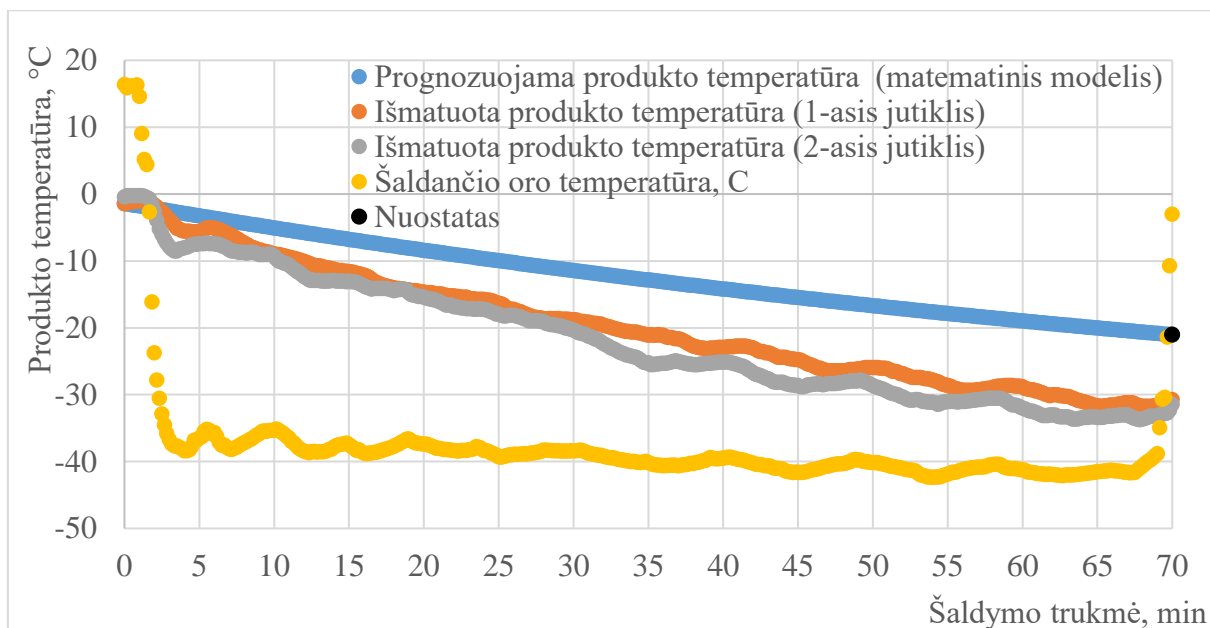
2. Konvejerio greitį - v_{konv} , (m/min);



31 pav. Šaldomo produkto (maistinis ledas) vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{\text{konv}}= 9,8$, m/min).

Padidinus konvejerio greitį iki 9.8 m/min per 34,6 minučių šaldymo laiko pasiektas produkto temperatūros nustatytoji vertė (-21°C). Tačiau šiuo būdu stipriai apkraunama konvejerio linija (jos užpildymas produktu bei jo surinkimas). Konvejerio darbo ilgaamžiškumas sumažėja dėl padidėjusios apkrovos. Tinkamas konvejerio greitis turėtų būti parinktas atsižvelgiant į gamyklos bei konvejerio darbo specifiką.

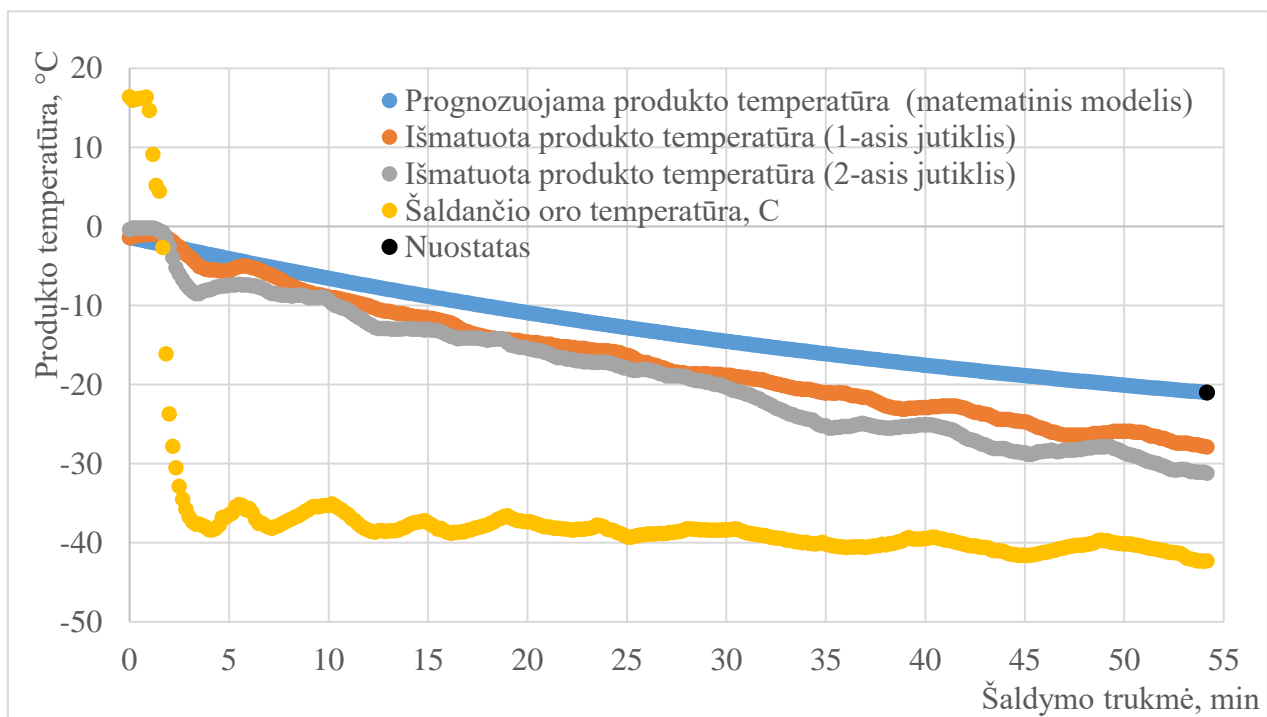
3. Šaldomo oro srauto greitį, orapūčių sukimosi greitį (valdantysis poveikis – dažnio keitiklio impulso plotis išreikštas procentine dalimi) - v_{orap} , %;



32 pav. Maistinio ledo vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{orap} = 41,5\%$).

Sumažinus orapūčių sukimosi greitį iki 41,5% taip pat pasiekama nustatytoji produkto temperatūra, tačiau atsižvelgus į orapūčių gamintojų specifikacijas orapūtės veikia optimaliu energetiniu režimu prie ~80 % sukimosi greičio, dėl to rekomenduotina sukimosi greitį palaikyti ~80 % lygyje.

4. Pastarųjų valdančių poveikių kombinacija.



33 pav. Maistinio ledo vidinės temperatūros kitimas, pramoniniame šaldiklyje ir modelyje ($v_{konv} = 4,25$ (m/min), $v_{orap} = 80$ (%), $T_o = -33$ °C).

Parinkti šaldiklio manipuluojami parametrai: konvejerio greitis – 4,3 m/min, orapūčių sukimosi greitis – 80% (efektyviausias įrenginio darbo taškas, pagal gamintojo specifikacijas), šaldomo oro temperatūra - 33, °C, šaldymo laikas – 54,2 min.

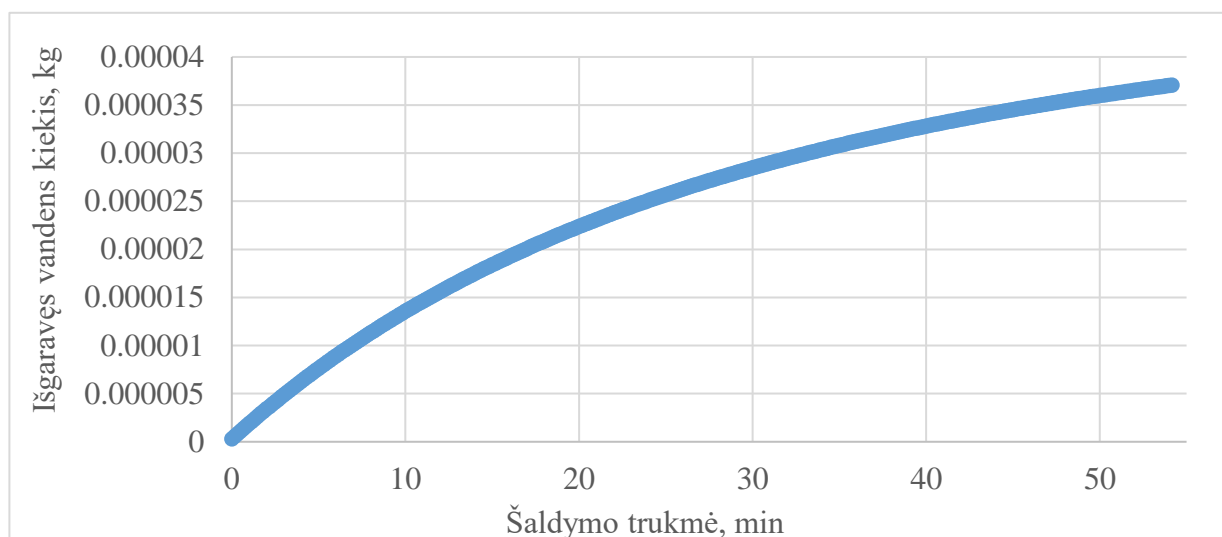
Tuomet pagal formules (30-32) , šaldymo galia (Pš1) sumažėja iki:

$$P_{\text{š}_{2,4}} = \frac{163,3}{60} * (-1.4 - (-21)) * 0,0336 * 5440 * \frac{54,16}{60} = 8,8 [kWh], \quad (39)$$

Apskaičiuotas šaldiklio šaldymo galios bei energetinių resursų procentinis sumažėjimas lyginant su pradinio eksperimento sąlygomis yra toks:

$$P_{\text{š}_{\text{sumažinta}}} = \frac{P_{\text{š}_2} - P_{\text{š}_{2,4}}}{P_{\text{š}_2}} * 100\% = \frac{17,2 - 8,8}{17,2} * 100\% = 48,8 [\%], \quad (40)$$

Išgaravusio vandens kiekio iš produkto, judančio spiraliniu šaldikliu, kreivė apskaičiuota pagal 24 formulę.



34 pav. Modeliu prognozuojama išgaravusio vandens kiekio laiko trajektorija

Šio dydžio minimizavimas yra svarbus, nes susikaupęs vanduo užšąla ir šerkšno pavidalu kaupiasi ant išgarintuvų grotelių. Tačiau pagal gamyklos inžinierių ekspertinę patirtį didžioji šerkšno dalis susikaupusi šaldiklyje susidaro dėl šilto oro srauto patenkančio per konvejerio įėjimo ir išėjimo angas. Laikui bėgant grotelės užsikemša ir nebepašalina aptekancio oro šilumos, ji pradeda kauptis šaldiklio viduje ir šaldiklio darbas turi būti stabdomas grotelių valymui.

Taigi šiame skyriuje išnagrinėta kaip produkto vidinę temperatūrą veikia skirtingi poveikio signalai: šaldancio oro temperatūra, orapūčių sukimosi bei konvejerio judėjimo greičiai. Atrasta, kad optimalus energetinis režimas gali būti pasiektas laikantis šių technologinių apribojimų / kriterijų:

- orapūčių sukimosi greitį palaikant ties **~80%**;
- konvejerio judėjimo greitį apriboti ties **3,8 (m/min)** (dėl kitų gamybos linijų apkrovos);
- reguliuoti šaldancio oro temperatūrą siekiant, kad produkto temperatūra konvejerio išeiigoje pasiektų **-21 °C**

2.6.1. Optimizavimo procedūra šaldymo režimams parinkti

Šiame skyriuje nagrinėjama valdymo signalų parinkimo procedūra, kurios paskirtis nustatyti poveikio signalus skirtingiems produktams užšaldyti iki nuostato vertės. Optimizavimo kriterijus (algoritmo tikslas) – parinkti poveikio signalus su kuriais šaldomo produkto temperatūra konvejerio išeiigoje būtų kuo artimesnė užduotajai. Remiantis šiuo kriterijumi sudaroma tikslo funkcija:

$$J = f(x) \rightarrow \min, \quad (41)$$

čia

$$x^T = [T_o, \quad v_{konv}, \quad v_{orap}], \quad (42)$$

kur T_o – šaldančio oro temperatūra, (°C), v_{konv} – konvejerio greitis, (m/min), v_{orap} – orapūčių sukimosi greitis, (%).

Pagal gamintojų pateiktas specifikacijas, orapūtės veikia optimaliu energetiniu režimu kai jos sukasi 80% savo maksimalaus sukimosi greičio (kaip aptarta 2.5 skyriuje). Dėl šios priežasties poveikio signalas - $v_{orap} = 80\%$, prilyginamas šiai vertei ir toliau nekinta. Taip pat dėl šaldymo proceso technologinių apribojimų gamykloje konvejerio greitis v_{konv} nustatomas 3,8 (m/min) ir toliau nekinta. Tuomet tikslo funkcija:

$$J = f(T_o) \rightarrow \min, \quad (43)$$

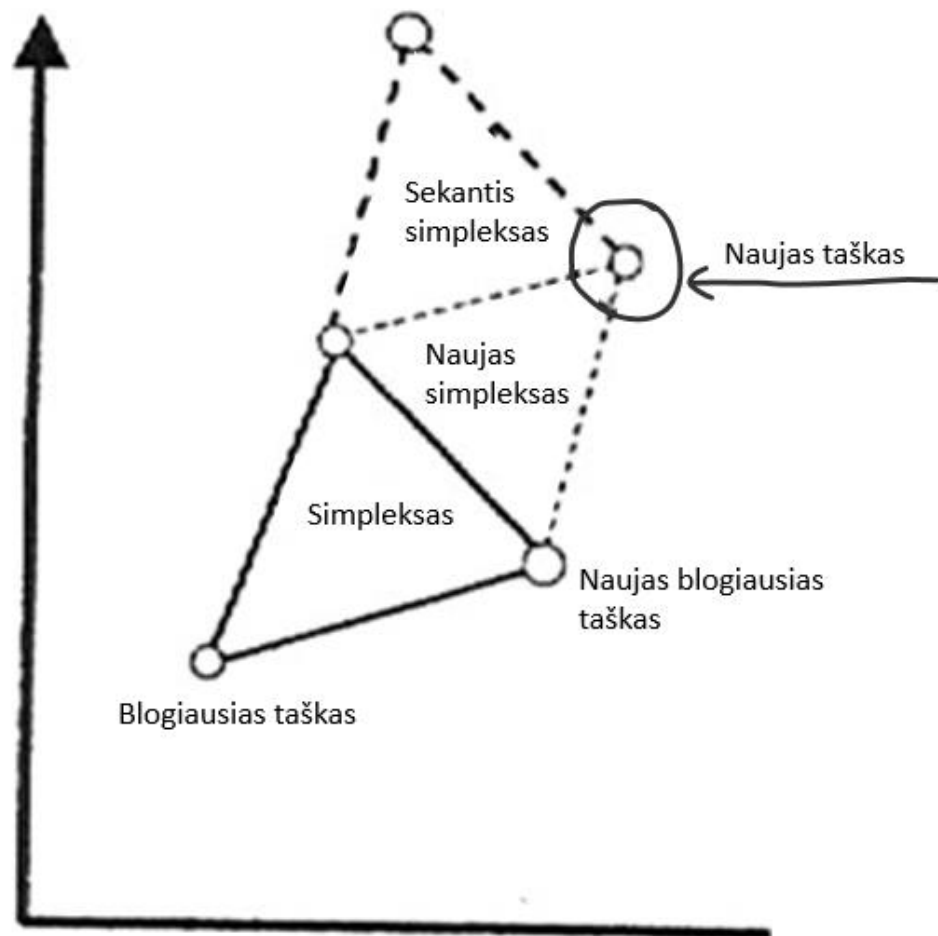
$$f(T_o) = (T_{pt} - T_{p_{sp}}) \rightarrow \min, \quad (44)$$

kur T_{pt} – galutinė produkto temperatūra konvejerio išeiigoje, °C, kai t – visas šaldymo laikas, (min), $T_{p_{sp}}$ – produkto užšaldymo temperatūros nuostatas (°C), T_{p_i} – i-tuoju laiko momentu įvertinama pagal 6 formulę (2.4 skyriuje).

Šiam minimizavimo uždaviniui spręsti pasitelkiamas „Nelder-Mead“ skaitinis metodas. Metodas lyginant su kitais optimizavimo algoritmais išsiskiria:

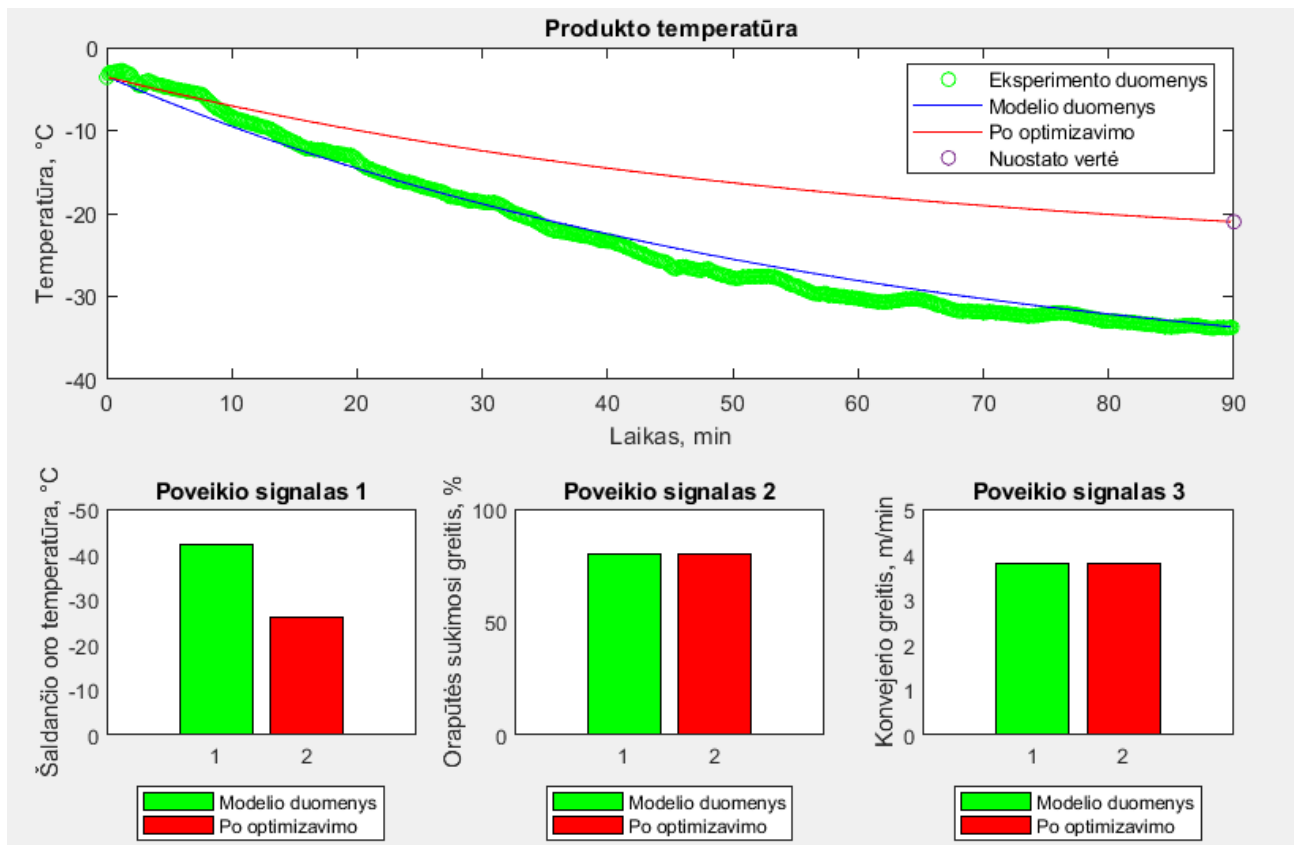
- **Paprastumu.** Nelderio-Medo algoritmą įgyvendinti gana paprasta ir jam nereikia informacijos apie gradientą ar išvestinių skaičiavimą. Naudojamas tik objektinės funkcijos aprašas / įvertinimas.
- **Patikimumu.** Tai algoritmas, galintis optimizuoti netiesines ir netolygias objektyvo funkcijas, taip pat problemas, susijusias su triukšmingais ar nepatikimais funkcijų vertinimais. Jis yra mažiau jautrus pradinėms sąlygoms, palyginti su gradiento nusileidimo metodu, kuris gali suartėti su vietiniais / lokaliais ekstremumais.
- **Lankstumas:** Nelderio-Medo algoritmas nevertina prielaidų, kad tikslo funkcija yra diferencijuojama, ištininė arba išgaubta, todėl metodas įgauna daugiau lankstumo, palyginti su tokiais algoritmais kaip gradiento nusileidimas. Dėl to jis taikomas platesniam optimizavimo problemų spektrui.
- **Greitaveika.** Metodas pasižymi didesne veikimo sparta esant ne daug optimizuojamų parametrų kiekiui (darbe nuo 1 iki 3).

Metodas įgyvendintas „Matlab“ programinės įrangos pakete (1-5 priedai). Šis metodas yra lokalių paieškos algoritmas. Metodas naudoja taisyklingą geometrinę figūrą, vadinamą simpleksu, kaip pagrindą paieškos procedūros įgyvendinimui. Dviejų paieškos kintamųjų erdvėje simpleksas yra trikampis (žr. 35 pav.), trejų - taisyklingas tetraedras, o n - kintamųjų erdvėje taisyklinga figūra, susidedanti iš $n+1$ viršūnių. Pagrindinis metodo veiksmas yra atspindys, kuris generuoja naują viršūnės tašką ir, taip pat, naują simpleksą. Atspindžio kryptis ir naujo taško pasirinkimas priklauso nuo blogiausio taško padėties simplekse. Naujai gautas taškas vadinamas blogiausio taško "papildymu". Jei bet kuris "naujas taškas" yra blogiausias taškas naujame simplekse, algoritmas pradėtų osciliuoti, kitaip tariant, jis pereitų iš vieno taško į kitą ir atgal. Kai tai atsitinka, antrasis blogiausias taškas yra naudojamas kaip taškas, naudojamas kitam "naujam taškui" rasti [23].



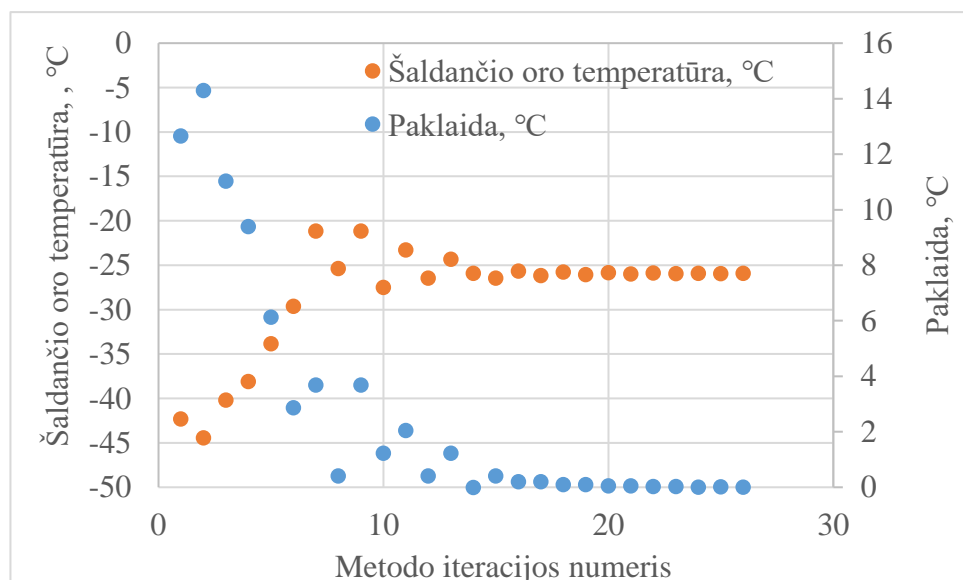
35 pav. „Nelder-Mead Simplex“ metodo veikimo principo atvaizdas dvimatėje optimizuojamų kintamųjų srityje [23]

Šiuo atveju, kai ieškoma viena kintamojo vertė, simpleksas yra tiesė. Paveiksle žemiau (žr. 36 pav.) pavaizduoti šaldymo proceso poveikio signalų rinkiniai bei kokybinio kriterijaus (produkto temperatūra) dinamika. Paveiksle lyginami eksperimento duomenys su optimizavimo algoritmo.



36 pav. Optimizavimo programos grafinė sąsaja (vienas optimizuojamas parametras)

Optimizavimo pabaigoje parinkta šaldančio oro temperatūra -25.9°C , su kuria paklaida tarp produkto temperatūros ir nuostato lygi 0.006°C . Optimizavimo laikas lygus 9.22s . Metodo tarpiniai rezultatai, kiekvienos iteracijos metu pateikti žemiau (žr. 37 pav.).



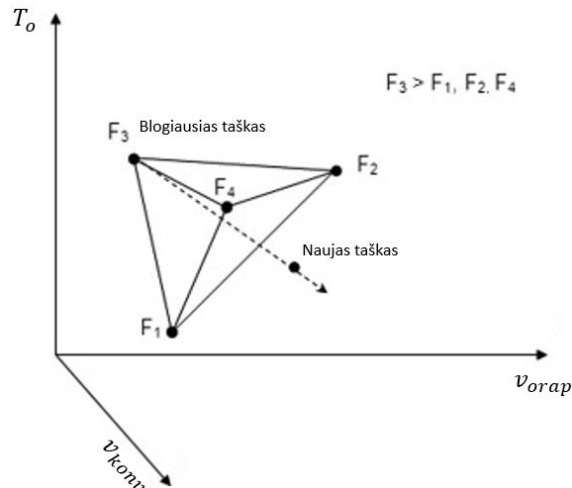
37 pav. Optimizavimo programos poveikio signalo parinkimo eiga

Ištyrus šaldančio oro temperatūros poveikį šaldymo procese toliau optimizuojama visi poveikio signalai įvedus griežtas apribojimo sąlygas:

- $75 \% < v_{orap} < 85 \%$, orapūčių optimalaus energetinio režimo darbo zona.
- $(3,775 * 0,95) \text{ m/min} < v_{konv} < (3,775 * 1,05) \text{ m/min}$, konvejerio greitis apribojimas $\pm 5 \%$ nuo eksperimente naudoto greičio (ribojamas gamyklos kitų proceso linijų).

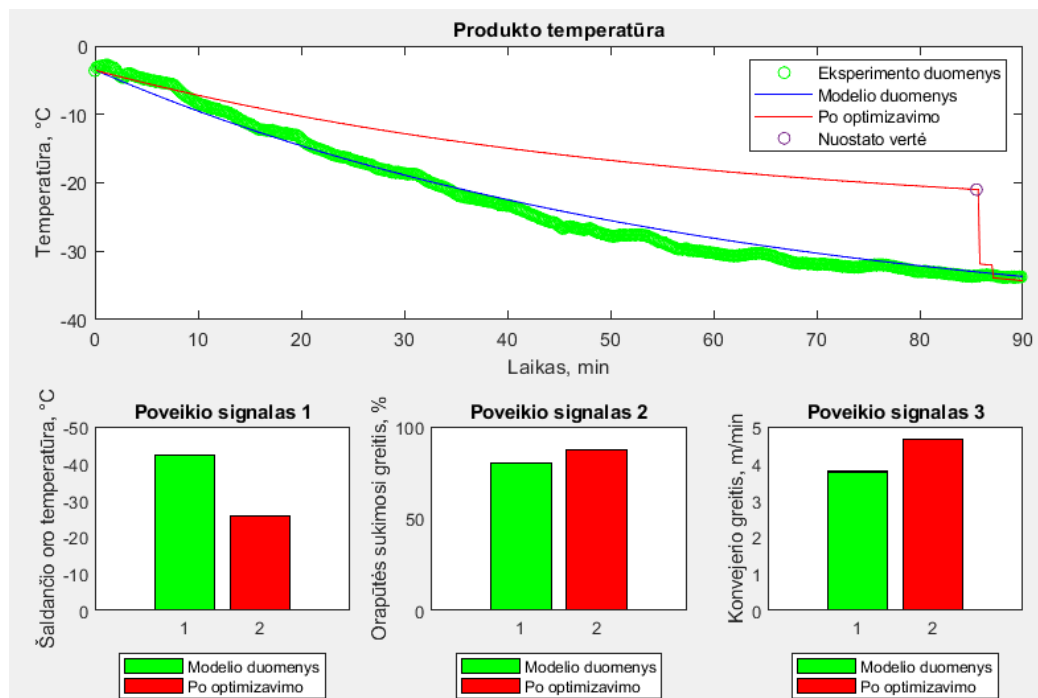
Tuomet paieškos procedūroje simpleksas įgauna tetraedro formą (žr. 38 pav.). Tikslų funkcija:

$$F(T_o, v_{konv}, v_{orap}) = (T_{pt} - T_{p_{sp}}) \rightarrow \min, \quad (45)$$



38 pav. „Nelder-Mead Simplex“ metodo veikimo principo atvaizdas trimatėje optimizuojamų kintamųjų srityje [24]

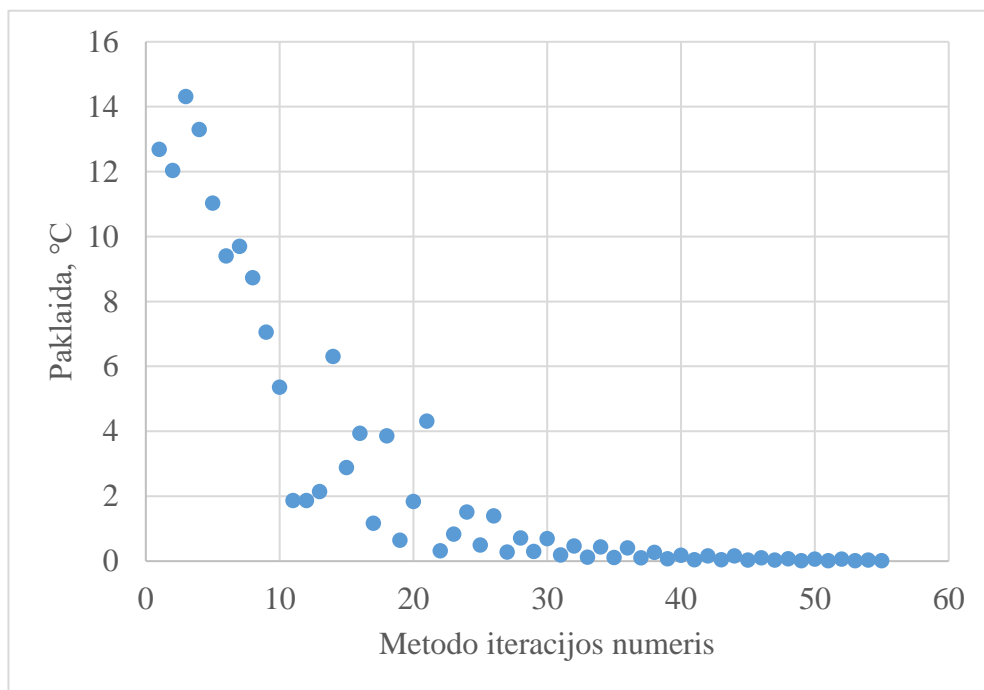
Optimizavimo programos išeities rezultatai pateikti žemiau (žr. 39 pav.).



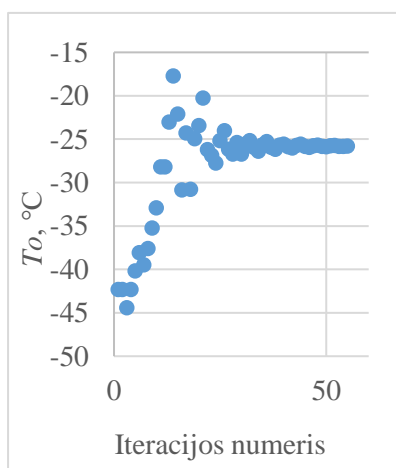
39 pav. Optimizavimo programos grafinė sąsaja (trys optimizuojami parametrai)

Optimizavimo pabaigoje parinkti šie poveikio signalai: šaldančio oro temperatūra $-25.78 \text{ (}^\circ\text{C)}$, konvejerio greitis 3.96 (m/min) , orapūčių sukimosi greitis $85 \text{ (}\%)$, su kuriais paklaida tarp produkto

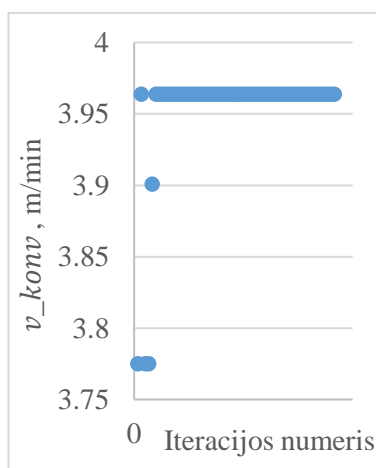
temperatūros ir nuostato lygi 0,01 °C. Galime pastebėti, kad šaldymo proceso laikas baigiasi 85,5 minutę (tolimesnė grafiko dalyje galime matyti optimizavimo algoritmo parametrų parinkimo dinamikos poveikį prognozuojamai produkto temperatūrai). Viso optimizavimo algoritmo laikas, įskaitant atvaizdavimą (žr. 39 pav.) lygus 45,8s. Metodo tarpiniai rezultatai, kiekvienos iteracijos metu pateikti žemiau (žr. 40-43 pav.).



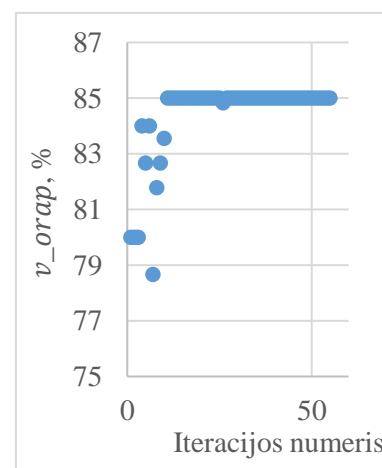
40 pav. Optimizavimo programos veikimo eigos dinamika



41 pav. Šaldančio oro temperatūros kitimas optimizacijos algoritmo metu



42 pav. Konvejerio greičio kitimas optimizacijos algoritmo metu



43 pav. Orapūčių greičio kitimas optimizacijos algoritmo metu

Taigi galime pastebėti, kad sukurtas programinis optimizavimo algoritmas parenka nurodytas parametrų vertes su kuriomis tikslo funkcija minimizuojama su paklaida artima 0 °C. Tačiau norint įsitikinti, kad metodo parinkti manipuluojamų parametrų rinkiniai nėra tikslo funkcijos lokalių ekstremumai (sprendiniai), metodas paleidžiamas 300 kartų iš skirtingų pradžios taškų (tai yra skirtingų pradžios sąlygų - pradinės valdančiųjų poveikių vertės). Padinės manipuluojamų parametrų

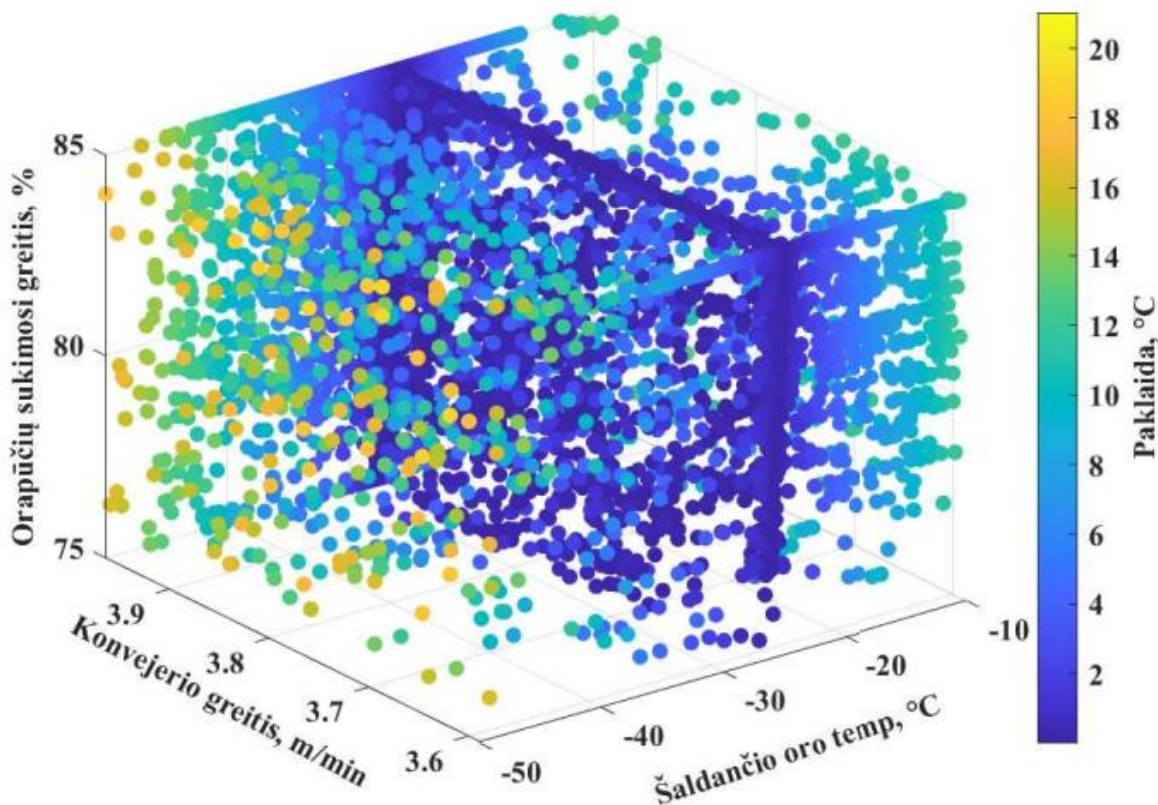
vertės yra parenkamos atsižvelgiant į anksčiau parinktus apribojimus ir prieš kiekvieną metodo iškvietimą (paleidimą) apskaičiuojami taip:

$$T_o = -50 + rand() * (-10 + 50), \quad (46)$$

$$v_{konv} = 3,59 + rand() * (3,96 - 3,59), \quad (47)$$

$$v_{orap} = 75\% + rand() * (85\% - 75\%), \quad (48)$$

kur $rand()$ – tolygiai paskirstytų atsitiktinių skaičių funkcija (gražina atsitiktinį skaliarą, iš vienodo skirstinio intervalo (nuo 0 iki 1)).



44 pav. Tikslo funkcijos verčių (44 formulė) priklausomybė nuo poveikio signalų

Pastarajame paveiksle (žr. 44 pav.), atvaizdavimo kodas pateiktas 6-ame priede, pavaizduota kiekvieno (įskaitant tarpinius paieškos algoritmo iteracijose parinktus parametrų rinkinius) manipuluojamo parametro poveikis galutinei (šaldymo proceso pabaigoje) produkto temperatūrai (nuostatas $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$). Galime pastebėti, kad šaldančio oro temperatūra yra svarbiausias parametras nuostatai pasiekti. Paveiksle išvelgiama plokštuma mėlynų taškų, šios plokštumos susikirtimo taškas su x ašimi, nusako šaldančio oro temperatūros vertę prie kurios įgaunamos mažiausios tikslo funkcijos vertės. Kiti parametrai, orapūtės sukimosi ir konvejerio judėjimo greičiai, nežymiai nusako šios plokštumos nuokrypį x ašies atžvilgiu. Galime daryti išvadą, kad pastarųjų parametrų pokytis gali kisti nurodytose ribose ir poveikio paklaidos vertei neturės arba poveikis nežymiai (tai yra vis vien egzistuos tokia šaldomo oro temperatūra prie kurios paklaida artima 0).

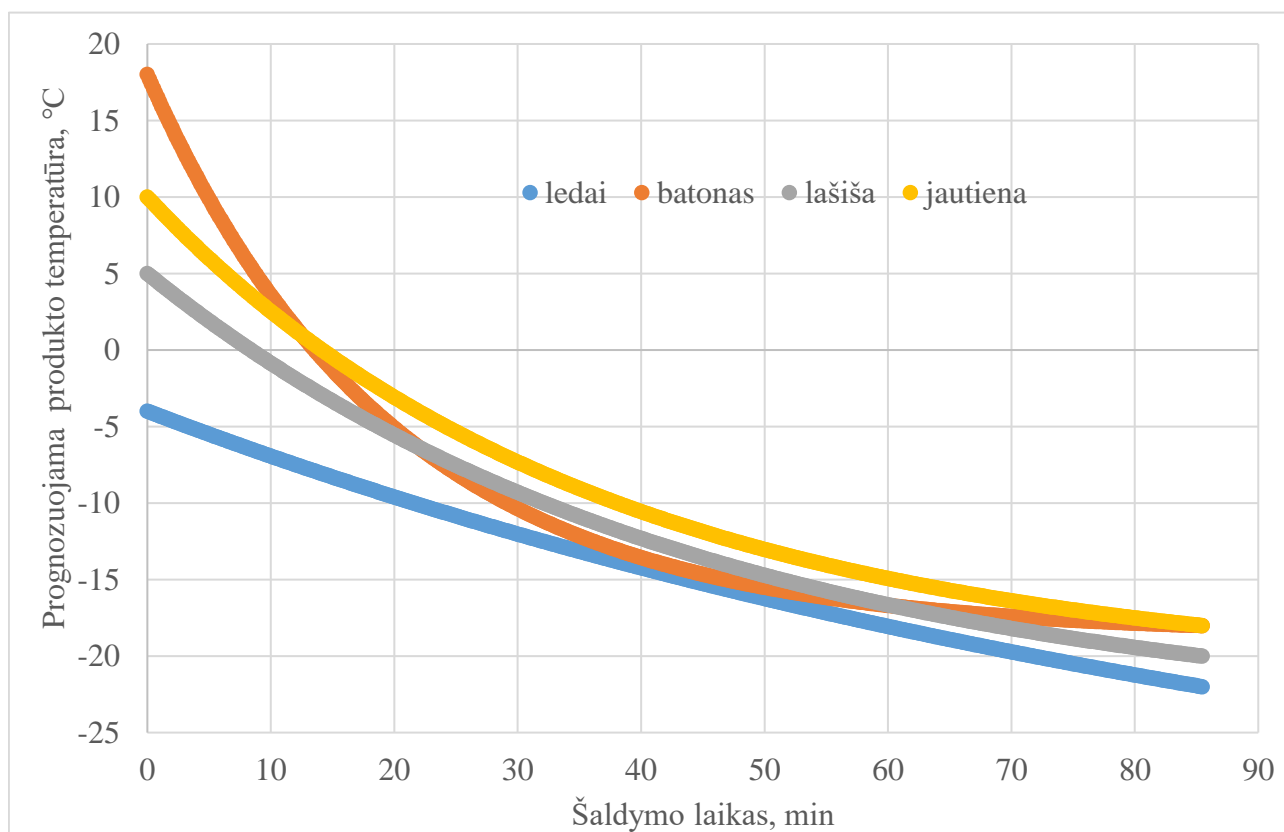
Įsitikinus, kad sukurtas optimizavimo metodas parenka parametrus su kuriais patenkama į globalų funkcijos ekstremumą, toliau šis programinis įrankis išbandomas skirtingiems maisto produktų

šaldymo režimams parinkti. Optimizuojamų maisto produktų šiluminės charakteristikos, pradinės sąlygos ir nuostato signalai pateikiami lentelėje žemiau (žr. 6 lentelė.)

6 lentelė. Šaldomų maisto produktų charakteristikos

Charakteristikos		Maistiniai ledai	Batonas „Baguette“	Lašiša	Jautienos paploteliai
Produkto specifinė šiluminė talpa (kJ/(kg °C))	kai $T < 0$, °C	1,67	1,46	1,55	1,42
	kai $T > 0$, °C	3,1	4,18	2,97	2,6
Produkto pradinė temperatūra (°C).		-4	18	5	10
Produkto išėigos (nuostato) temperatūra (°C).		-22	-18	-20	-18
Produkto masė (kg)		0,55	0,28	0,996	0,08
Produkto tūris (m ³)		0,0011	0,00187	0,00342	0,00157
Produkto tankis (kg/m ³)		500	149,57	291,22	50,955
Produkto paviršiaus plotas (m ²)		0,0607	0,132	0,2222	0,0188

Išvystytam metodui nurodžius pradinės sąlygas (4 priedas) ir produkto šiluminės bei geometrinės charakteristikas (2 priedas) iš 6-oje lentelėje pateiktų duomenų, paleidžiamas optimizavimo algoritmas. Optimizavimo pabaigoje metodas grąžina nurodyto produkto temperatūros kreivę (žr. 44 pav.) prie optimalių valdančiųjų poveikio signalų (žr. 7 lentelė.).



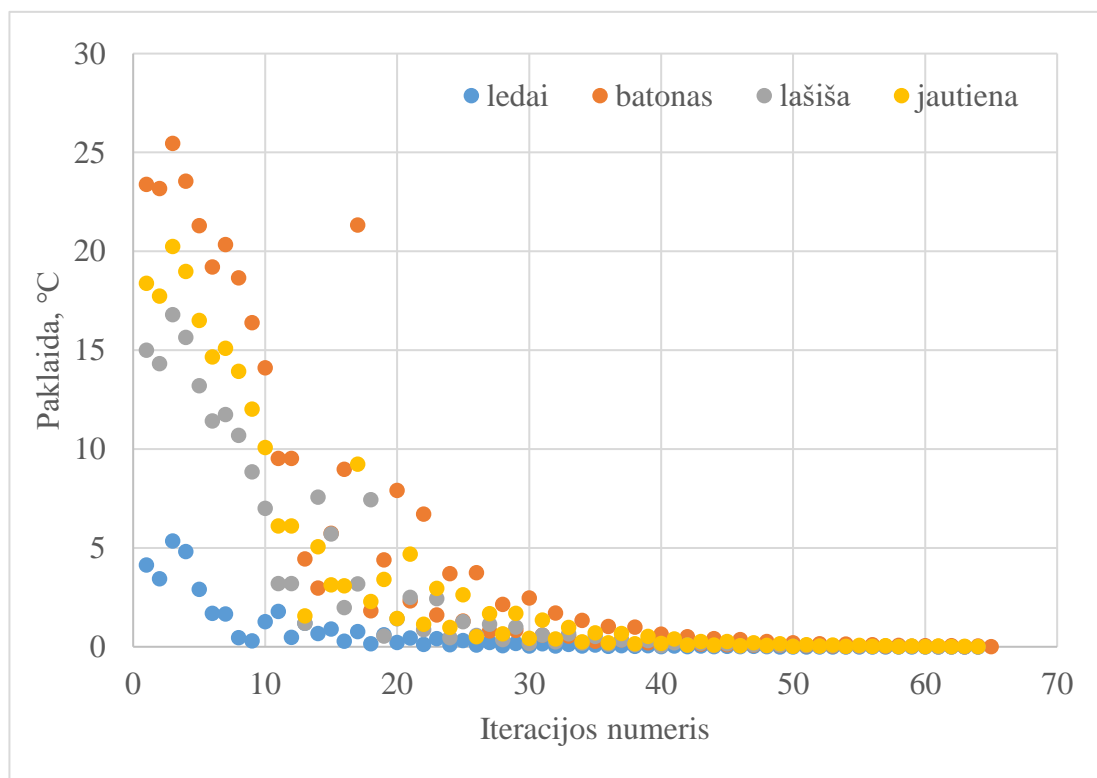
45 pav. Skirtingų maisto produktų vidinės temperatūros kreivės šaldymo proceso metu

Algoritmo griežtieji apribojimai palikti tie patys konvejerio greičiui ir orapūtėms. Iš grafiko galime matyti, kad konvejerio greitis kiekvienam misto produktui buvo parinktas toks pat (3,96 m/ min – viršutinė riba), todėl šaldymo laikas vienodas – 85.5 min (žr. 44 pav.).

7 lentelė. Optimizuotų parametų vertės ir rezultatai

	Maistiniai ledai	Batonas „Baguette“	Lašiša	Jautienos paploteliai
T_o	-36,57 °C	-18,5 °C	-24,4 °C	-21,3 °C
v_{konv}	3,96 m/min			
v_{orap}	78,28 %	85 %		
Optimizavimo metodo trukmė	0,84 s	1,02 s	0,97 s	0,8 s

Toliau pateikiama, paklaidos tarp prognozuojamos produkto vidinės temperatūros konvejerio išeigoje ir nuostato signalo verčių kitimo kreivės kiekvienos metodo iteracijos metu (žr. 45 pav.). Mažiausios pradinės paklaidos gautos šaldant ledus, nes pradinis poveikio signalų rinkinys buvo parinktas pagal eksperimente naudotus manipuluojamus parametrus (kitokios masės ir geometrinių charakteristikų ledus).



46 pav. Optimizacijos algoritmo rezultatai (paklaida tarp išeigos temperatūros ir nuostato) kiekvienos iteracijos metu

Taigi šiame skyriuje sukurtas programinis optimizavimo algoritmas parenka manipuluojamų parametų vertes skirtingiems šaldytiems produktams su kuriomis tikslo funkcija minimizuojama su paklaida artima 0 °C. Optimizavimo ir atvaizdavimo (kiekvienos iteracijos metu) trukmė apytikriai lygi 80 s.

Išvados

1. Projekte nustatyta, kad šaldymo procese „siaura vieta“ (angl. bottleneck) projektuojant modeliu prognozuojamus energijos pernešimo greičius yra šilumos pernešimo greičio koeficientas. Šio parametro tikslus identifikavimas yra itin svarbus, nes tiesiogiai veikia šilumos mainų dinamikos modelio tikslumą. Šilumos pernešimo greičio koeficiento parinkimas buvo atliktas remiantis pramoninio šaldiklio šaldymo proceso eksperimentiniais duomenimis bei teorinėmis empirinėmis priklausomybėmis iš literatūros šaltinių. Darbe atrasta šilumos pernešimo koeficiento **funkcinė tiesinė priklausomybė** nuo oro srauto greičio. Tyrimo metu pastebėta, kad produkto temperatūros kitimo **ne tiesiškumai** atsiranda dėl geometrinės šaldiklio struktūros, spiraliniu konvejeriu judantis produktas yra veikiamas šaldomo oro netiesiškai. Judant spirale pro ventiliatorius produkto temperatūra kinta didesniu pagreičiu, judant pro šilumos surinkimo ventiliatorius, produkto temperatūra kinta atitinkamai mažesniu pagreičiu. Tokia temperatūros kitimo dinamika yra pavaizduota (žr. 29 pav.).
2. Sukurtas pramoninio šaldymo proceso matematinis modelis su manipuliuojamų parametru rinkiniu (valdančio poveikio signalai). Receptų kūrimo įrankis, **prognozuoja šaldomo produkto temperatūrą**, bei iš jo išgaravusio vandens kiekį prie skirtingų valdančio poveikio signalų (šaldomo oro temperatūros, šaldomo oro srauto greičio (ventiliatorių sukimosi greičio), bei spiralinio konvejerio greičio), produkto geometrinių ir šiluminių charakteristikų, bei pradinių sąlygų. Sukurtas išmanusis pramoninio šaldymo proceso spiraliniame šaldiklyje skaitmeninis atitikmuo (modelis) įgalina programinio įrenginio naudotojus greitai ir tiksliai sukurti technologinių procesų protokolus skirtingiems gaminiams apdoroti, tokiu būdu taupant laiką bei eksperimentinių tyrimų sąnaudas. Tuo pačiu galima efektyviai gaminti nedideles šaldomų produktų partijas, operatyviai pakeičiant įrangos nustatymus atitinkamiems technologiniams procesams (receptams) realizuoti. Validavimo paklaida, tarp modelio prognozuojamos produkto temperatūros šaldymo pabaigoje ir išmatuotos temperatūros, lygi **1,02 (%)**. Projekto metu atrasta, kad parinkus šaldančio oro temperatūrą - 33.3 (°C), konvejerio greitį – 4,25 (m/min), ventiliatorių sukimosi greitį – 80 (%), energetinių resursų procentinis sumažėjimas lyginant su pradinio eksperimento sąlygomis (pramoninis šaldymo procesas) yra **48,8 (%)**, kol kokybinis proceso kriterijus yra palaikomas – produkto galutinė (užšaldymo) temperatūra (-21°C).
3. Išvystytas **programinis optimizavimo metodas** paremtas „Nelder-Mead Simplex“ algoritmu, skirtas skirtingiems maisto produktų optimaliems šaldymo receptams parinkti, tai yra tokius valdančiųjų poveikių signalus prie kurių produkto temperatūra šaldiklio išieigoje artima nuostato vertei. Vidutinė optimizavimo trukmė apytikriai lygi **1s**, vidutinė produkto išieigos temperatūros paklaida nuo užduotosios vertės lygi **0,01 °C**.

Literatūros sąrašas

1. Coulomb, D. (2008). Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. In Trends in Food Science & Technology (Vol. 19, Issue 8, pp. 413–417). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–01–15. Prieiga internetu: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.03.006>
2. „Food Engineering – Volume III“ Gustavo V. Barbosa-Cánovas EOLSS Publications, 2009-08-10 - 534 psl. Žiūrėta 2023–01–15. Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=3e2yCwAAQBAJ&dq=industrial-scale+food+freezing&lr=&hl=lt&source=gbs_navlinks_s.
3. James, C., Seignemartin, V., & James, S. J. (2009). The freezing and supercooling of garlic (*Allium sativum* L.). In International Journal of Refrigeration (Vol. 32, Issue 2, pp. 253–260). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–01–15. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.05.012>
4. Thinh, N. Q., Iwamura, K., Shrestha, R., Fukumoto, S., Takematsu, R., Yamaguchi, J., Kimura, K., Tanimizu, Y., & Sugimura, N. (2016). A study on supercooling processes of leaf lettuces produced in plant factory. In 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA). IEEE. Žiūrėta 2023–01–15. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1109/isfa.2016.7790139>
5. ANDO, M., MIZUOCHI, S., TSUKAMASA, Y., & KAWASAKI, K. (2007). Suppression of fish meat softening by strict control of storage temperature. In Fisheries Science (Vol. 73, Issue 3, pp. 705–712). Springer Science and Business Media LLC. Žiūrėta 2023–02–01. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2007.01384.x>
6. Fukuma, Y., Yamane, A., Itoh, T., Tsukamasa, Y., & Ando, M. (2012). Application of supercooling to long-term storage of fish meat. In Fisheries Science (Vol. 78, Issue 2, pp. 451–461). Springer Science and Business Media LLC. Žiūrėta 2023–02–02. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1007/s12562-011-0460-6>
7. Beaufort, A., Cardinal, M., Le-Bail, A., & Midelet-Bourdin, G. (2009). The effects of superchilled storage at -2°C on the microbiological and organoleptic properties of cold-smoked salmon before retail display. In International Journal of Refrigeration (Vol. 32, Issue 7, pp. 1850–1857). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–02–03. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.07.001>
8. Jeremiah, L. E., & Gibson, L. L. (1997). The influence of storage and display conditions on the retail properties and case-life of display-ready pork loin roasts. In Meat Science (Vol. 47, Issues 1–2, pp. 17–27). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–02–03. Prieiga per internetą: [https://doi.org/10.1016/s0309-1740\(97\)00037-5](https://doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00037-5)
9. James, S. J., Giegel, A. J., & Hudson, W. R. (1983). The ultra rapid chilling of pork. In Meat Science (Vol. 9, Issue 1, pp. 63–78). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–03–03. Prieiga per internetą: [https://doi.org/10.1016/0309-1740\(83\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0309-1740(83)90054-2)
10. Stonehouse, G. G., & Evans, J. A. (2015). The use of supercooling for fresh foods: A review. In Journal of Food Engineering (Vol. 148, pp. 74–79). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–03–03. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.007>
11. Chan, S. S., Feyissa, A. H., Jessen, F., Roth, B., Jakobsen, A. N., & Lerfall, J. (2022). Modelling water and salt diffusion of cold-smoked Atlantic salmon initially immersed in refrigerated seawater versus on ice. In Journal of Food Engineering (Vol. 312, p. 110747). Elsevier BV. Žiūrėta 2023–03–10. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110747>

12. Kristina Norne Widell (2012). Energy efficiency of freezing tunnels, towards an optimal operation of compressors and air fans. *Žiūrėta* 2023–03–11. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/324475895_Energy_efficiency_of_freezing_tunnels_towards_an_optimal_operation_of_compressors_and_air_fans
13. Datta, A. K. (2007). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 80, Issue 1, pp. 80–95). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–12. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>
14. Castell-Perez, M. E. (2020). Freezing of Food. In Holden, N. M., Wolfe, M. L., Ogejo, J. A., & Cummins, E. J. (Ed.), *Introduction to Biosystems Engineering*. *Žiūrėta* 2023–03–12. Prieiga per internetą: https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering/Freezing_Food
15. López-Leiva, M., & Hallström, B. (2003). The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 58, Issue 3, pp. 267–275). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–15. Prieiga per internetą: [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00385-0](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00385-0)
16. Edward Kolbe, Donald Kramer (2007). Planning for Seafood Freezing. *Žiūrėta* 2023–03–16. Prieiga per internetą: <https://agsci.oregonstate.edu/sites/agscid7/files/snic/planning-for-seafood-freezing.pdf>
17. Verboven, P., Defraeye, T., Datta, A. K., & Nicolai, B. (2020). Digital twins of food process operations: the next step for food process models? In *Current Opinion in Food Science* (Vol. 35, pp. 79–87). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–17. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002>
18. Schalbart, P., Leducq, D., & Alvarez, G. (2015). Ice-cream storage energy efficiency with model predictive control of a refrigeration system coupled to a PCM tank. In *International Journal of Refrigeration* (Vol. 52, pp. 140–150). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–17. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.08.001>
19. Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 121, pp. 48–57). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–18. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>
20. Frihat, Mohamed & Alzgoul, Bassam & Radaedeh, Jehad & Al-Rashdan, Maen & Al-Frihat, Ahmad. (2012). ESTIMATION OF FOOD PRODUCT FREEZING TIME. *Žiūrėta* 2023–03–18. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/306032923_ESTIMATION_OF_FOOD_PRODUCT_FREEZING_TIME
21. Becker, Bryan & Fricke, Brian. (1999). Evaluation of Semi-Analytical/Empirical Freezing Time Estimation Methods Part I: Regularly Shaped Food Items. *HVAC&R Research*. 5. 149-167. *Žiūrėta* 2023–03–18. Prieiga per internetą: [10.1080/10789669.1999.10391230](https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391230).
22. Abarham, M., Hoard, J., Assanis, D. N., Styles, D., Curtis, E. W., & Ramesh, N. (2010). Review of Soot Deposition and Removal Mechanisms in EGR Coolers. In *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* (Vol. 3, Issue 1, pp. 690–704). SAE International. *Žiūrėta* 2023–03–20. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1211>
23. Wang, P. C., & Shoup, T. E. (2011). Parameter sensitivity study of the Nelder–Mead Simplex Method. In *Advances in Engineering Software* (Vol. 42, Issue 7, pp. 529–533). Elsevier BV. *Žiūrėta* 2023–03–20. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.advensoft.2011.04.004>

24. Ouria, A., & Toufigh, M. M. (2009). Application of Nelder-Mead simplex method for unconfined seepage problems. In *Applied Mathematical Modelling* (Vol. 33, Issue 9, pp. 3589–3598). Elsevier BV. Žiūrēta 2023–03–20. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.12.001>
25. Dempsey, P., & Bansal, P. (2012). The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 41, pp. 71–83). Elsevier BV. Žiūrēta 2023–05–10. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.013>

Priedai

1 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – optimizacijos failas.

```
freezer.m * x freezerm.m x freezero.m x +
freezer Base > freezer
1 function error = freezero(par, Tp_0_K, Sp)
2 global t Tp_C mH20 Tp_C_last min_error Ploth1 Ploth2 Ploth3 Ploth4 data i
3 i=i+1;
4 if(par(3)>85)
5     par(3) = 85;
6 elseif(par(3)<75)
7     par(3) = 75;
8 end
9 if(par(1)> (3.775*1.05))
10     par(1) = (3.775*1.05);
11 elseif(par(1)<(3.775*0.95))
12     end
13
14 [t,Tp_C, mH20, Tp_C_last]=freezerm(par, Tp_0_K );
15
16 error = abs(Sp - Tp_C_last);
17 if error < min_error
18     min_error = error;
19 end
20
21 v_conveyor = par(1);
22 To_C = par(2);
23 fan_dutycycle = par(3);
24
25 fprintf('Error value: %6.2f °C, \n', min_error);
26 fprintf('with cooling air temperature of: %6.2f (°C) \n', To_C );
27 fprintf('with conveyer speed of: %6.2f (m/min) \n', v_conveyor);
28 fprintf('with fan speed of: %6.2f (prc) \n', fan_dutycycle);
29 fprintf('***** \n');
30
31 y = [-42.3,To_C ];
32 y1 = [80,fan_dutycycle];
33 y2 = [3.7777,v_conveyor];
34
35 data(i,1)=i;
36 data(i,2)=To_C;
37 data(i,3)=fan_dutycycle;
38 data(i,4)=v_conveyor;
39 data(i,5)=error;
40
41 subplot(2,3,[1,2,3]), set(Ploth1,'YData',Tp_C), drawnow
42 subplot(2,3,4), set(Ploth2,'YData',y), drawnow
43 subplot(2,3,5), set(Ploth3,'YData',y1), drawnow
44 subplot(2,3,6), set(Ploth4,'YData',y2), drawnow
45 end
```

2 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – šaldymo proceso funkcijos failas.

```

freezer.m * x freezerm.m x freezero.m x +
freezer
1 function [t,Tp_C, mH20, Tp_C_last]=freezer(par, Tp_0_K)
2 global t Tp_C mH20 Tp_C_last
3
4 v_conveyor = par(1); %% 3.77777778;
5 To_C = par(2);
6 fan_dutycycle = par(3);
7 if(fan_dutycycle>85)
8     fan_dutycycle = 85;
9 elseif(fan_dutycycle<75)
10    fan_dutycycle = 75;
11 end
12 if(v_conveyor> (3.775*1.05))
13    v_conveyor = (3.775*1.05);
14 elseif(v_conveyor<(3.775*0.95))
15    v_conveyor = (3.775*0.95);
16 end
17 % -----Produkto charakteristikos-----
18 V =0.08*0.08*0.065; %aušinamo produkto tūris [m3]
19 m=0.175; % produkto mase[kg]
20 ro_p=m/V; %produkto tankis [kg/m3]
21 S =((0.065*0.08*4)+(0.08*0.08*2)); %produkto paviršiaus plotas [m2]
22 Cp_below = 1670; %produkto savitoji šiluma [J/(kg K)], kai Tp<0 C
23 Cp_above = 3100; %produkto savitoji šiluma [J/(kg K)], kai Tp>0 C
24 Cp_paper = 1340; %produkto ipakavimo savitoji šiluma [J/(kg K)]
25
26 % -----
27 L=2260000; %Vandens savitoji garavimo šiluma [J/kg] %Vandens garavimo šiluma 40,8 kJ/mol (2260 kJ/kg)
28 AA = 10.23; % Antoine coefficients
29 BB = 1750; % Antoine coefficients
30 CC = 235; % Antoine coefficients
31 % -----Saldiklio charakteristikos-----
32 V_freezer = 391.423; % [m3]
33 distance_conveyor = 340; % [m]
34 fan_dutycycle_e = 85; % [%]
35 tend = distance_conveyor / v_conveyor; % [min]
36 % -----Orapuciu charakteristikos-----
37 A = 0.502; % [m2]
38 Q = 20000; % [m3/h]
39 % -----Sufitinti parametrai-----
40 K = 3.19600041420013E-09; % [kg/Pa min]
41 h_fitted = 153.701349247108;
42 % -----Tarpiniai skaiciavimai
43 q_ave = (Q*(fan_dutycycle/100))/(A*3600);% [m/s]
44 q_ave_e = (Q*(fan_dutycycle_e/100))/(A*3600);% [m/s]

```

3 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – šaldymo proceso funkcijos failas (2).

```
freezer.m * x freezer.m x freezero.m x +
freezer
Base > freezer
48 q_rel = q_ave / V_freezer ; % [1/(m^2s) ];
49 q_rel_e = q_ave_e / V_freezer ; % [1/(m^2s)]
50 h = q_rel*(h_fitted/q_rel_e);
51 % -----Dif lygtis
52 dt=0.166666667; %[min]
53 nd = (tend/dt);
54 Tp_C(1)=To_C;
55 To_K = To_C+ 273.15;
56 for i=1:nd
57     if(i==1)
58         Tpp_K = To_C;
59     else
60         Tpp_K = Tp_C(i-1);
61     end
62     %-----H2O transfer-----
63     Po = 10^(AA-(BB/(To_C+CC))); % [Pa=N/m2] Garų parcialinis slėgis aptakančiame ore
64     Pp = 10^(AA-(BB/(Tpp_K+CC))); % [Pa=N/m2] Garų parcialinis slėgis aušinamo produkto viršutiniame sl
65     R= K*(Pp-Po); % dmh20/dt, [kg/s]
66
67     dmh20(i) = L * R;
68     %-----Heat transfer-----
69
70     if(Tpp_K>=273.15)
71         Cp = Cp_above;
72     else
73         Cp = Cp_below;
74     end
75
76     if(i==1) %initial values
77         t(i)=dt;
78         mH20(i) = dt * R;
79         Tp_K(i) = Tp_0_K;
80     else
81         a = dt*(h*S*To_K - dmh20(i));
82         b = V * ro_p * Cp * Tp_K(i-1);
83         c = V * ro_p * Cp + h*S*dt;
84         t(i)=t(i-1)+dt;
85         Tp_K(i) = ((a+b)/c); %[K]
86         mH20(i) = dt * R + mH20(i-1);
87     end
88     Tp_C(i) = Tp_K(i) - 273.15 ; %[C]
89     Tp_C_last = Tp_C(i) ;
90 end
91 end
```

4 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – pagrindinis failas.

```
freezer.m * x freezer.m x freezero.m x +
freezer
Base > freezer
1 function freezer
2 close all, clear all, clc
3 global t Tp_C mH20 dt tend a temp time Tp_C_last
4 global L min_error Ploth1 Ploth2 Ploth3 Ploth4 data i
5
6 tim=cputime;
7 T = readtable('eksperimentas.csv');
8 time = table2array(T(:,1));
9 temp = table2array(T(:,4));
10 data(100,3)=0;
11 i=0;
12 % -----Poveikio signalai----- %
13 v_conveyor = 3.775; % [m/min] - konvejerio greitis
14 To_C = -42.3; % [C] - saldančio oro temp
15 fan_dutycycle = 80; % [%] - orapuciu sukimosi greitis isreikstas prc pov sign
16 Tp_0_K = 269.55; % [K] - produkto pradine temp
17 par=[v_conveyor To_C fan_dutycycle];% Parameters to be optimized (Start values)
18
19 [t,Tp_C, mH20, Tp_C_last]=freezerm(par, Tp_0_K );
20
21 y = [-42.3,0];
22 x = [1,2];
23 subplot(2,3,[1,2,3]), plot(time,temp,'go',t,Tp_C,'b','EraseMode','none','DisplayName','Data1'); hold on
24 Ploth1=plot(t,Tp_C,'r','EraseMode','xor','DisplayName','Data1');
25 scatter(85.5,-21);
26 xlabel('Laikas, min')
27 ylabel('Temperatūra, °C')
28 title('Produkto temperatūra');
29 xlim([0 90]);
30 legend('Eksperimento duomenys','Modelio duomenys', 'Po optimizavimo', 'Nuostato vertė')
31 subplot(2,3,4), bar(x,y,0.8,'green','EraseMode','none'); hold on
32 Ploth2=bar(x,y, 0.8,'red','EraseMode','none');
33 bar(x,y, 0.8,'green','EraseMode','none');
34 set(gca, 'YDir','reverse');
35 ylim([-50 0]);
36 ylabel('Šaldančio oro temperatūra, °C')
37 title('Poveikio signalas 1');
38 legend('Modelio duomenys', 'Po optimizavimo','Location','SouthOutside');
39 subplot(2,3,5), bar(x,[fan_dutycycle,fan_dutycycle],0.8,'green','EraseMode','none'); hold on
40 Ploth3=bar(x,[fan_dutycycle,fan_dutycycle], 0.8,'red','EraseMode','xor');
41 bar(1,fan_dutycycle, 0.8,'green','EraseMode','xor');
42 ylim([0 100])
43 ylabel('Orapūtės sukimosi greitis, %')
44 title('Poveikio signalas 2');
```

5 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – pagrindinis failas (2).

```
freezer.m * x freezerm.m x freezero.m x +
freezer
27     ylabel('Temperatūra, °C')
28     title('Produkto temperatūra');
29     xlim([0 90]);
30     legend('Eksperimento duomenys','Modelio duomenys', 'Po optimizavimo', 'Nuostato vertė'
31     subplot(2,3,4), bar(x,y,0.8,'green','EraseMode','none'); hold on
32     Ploth2=bar(x,y, 0.8,'red','EraseMode','none');
33     bar(x,y, 0.8,'green','EraseMode','none');
34     set(gca, 'YDir','reverse');
35     ylim([-50 0]);
36     ylabel('Šaldančio oro temperatūra, °C')
37     title('Poveikio signalas 1');
38     legend('Modelio duomenys', 'Po optimizavimo','Location','SouthOutside');
39     subplot(2,3,5), bar(x,[fan_dutycycle,fan_dutycycle],0.8,'green','EraseMode','none'); hold on
40     Ploth3=bar(x,[fan_dutycycle,fan_dutycycle], 0.8,'red','EraseMode','xor');
41     bar(1,fan_dutycycle, 0.8,'green','EraseMode','xor');
42     ylim([0 100])
43     ylabel('Orapūtės sukimosi greitis, %')
44     title('Poveikio signalas 2');
45     legend('Modelio duomenys', 'Po optimizavimo','Location','SouthOutside');
46     subplot(2,3,6), bar(x,[v_conveyor,v_conveyor],0.8,'green','EraseMode','none'); hold on
47     Ploth4=bar(x,[v_conveyor,v_conveyor], 0.8,'red','EraseMode','xor');
48     bar(1,v_conveyor, 0.8,'green','EraseMode','xor');
49     ylim([0 5])
50     ylabel('Konvejerio greitis, m/min')
51     title('Poveikio signalas 3');
52     legend('Modelio duomenys', 'Po optimizavimo','Location','SouthOutside');
53
54     %Optimization Procedure
55     fprintf('The optimization routine is still running!\n')
56     fprintf('Intermediate results:\n');
57     min_error=100000;
58
59     options1=optimset(...
60         'TolFun',1.e-2,...
61         'TolX',1.e-1);
62
63     Sp = -21;
64     par=fminsearch('freezero',par,options1, Tp_0_K, Sp);
65     fprintf('Galutine poveikio verte = %6.2f °C \n', par(2));
66     fprintf('CPU-time needed = %6.2f [s]\n',cputime-tim);
67     fprintf('pabaiga');
68     end
69
70
```

6 priedas. Optimizacijos algoritmo kodas – parametrų atvaizdavimas keturmatėje erdvėje

```
freezer.m x freezerm.m x freezero.m x freezer4dGrapgh.m x
1 function freezer4dGrapgh(data)
2 figure(2)
3
4 To_C = data(:,2);
5 fan_dutycycle = data(:,3);
6 v_conveyor = data(:,4);
7 error = data(:,5);
8
9 scatter3(To_C,v_conveyor, fan_dutycycle,40,error,'filled')
10 xlabel('Šaldančio oro temp, °C')
11 ylabel('Konvejerio greitis, m/min')
12 zlabel('Orapūčių sukimosi greitis, %')
13
14 ymin=(3.775*0.95);
15 ymax=(3.775*1.05);
16 zmin=75;
17 zmax=85;
18 xmin=-50;
19 xmax=-10;
20
21 xlim([xmin, xmax]);
22 ylim([ymin, ymax]);
23 zlim([zmin, zmax]);
24
25 cb = colorbar;
26 cb.Label.String = 'Paklaida, °C';
27 end
```