Rīgas Tehniskā universitāte
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Edvīns Terehovičs
Doktora studiju programmas "Vides zinātne" doktorants

ENERĢIJAS UN EKSERĢIJAS INDIKATORI ENERGOSISTĒMU EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Darba zinātniskie vadītāji:
profesore *Dr. hab. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

profesors *Dr. hab. sc. ing.*
IVARS VEIDENBERGS

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Terehovičs, E. Enerģijas un ekserģijas indikatori energosistēmu efektivitātes paaugstināšanā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 45 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes “P-19” 2019. gada 17. jūnija lēmumu, protokols Nr. 104.

ISBN 978-9934-22-397-6 (print)

978-9934-22-398-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada _____ Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ritvars Sudārs,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Profesors *Dr. sc. ing. Andres Siirde,*
Tallinas Tehnoloģiju universitāte

Docents *Dr. sc. ing.* Vladimirs Kirsanovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Edvīns Terehovičs ……. (paraksts)

Datums: ……

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 68 attēli, astoņas tabulas, kopā 128 lappuses. Literatūras sarakstā ir 127 nosaukumi.

SATURS

Lietotie saīsinājumi 5
Ievads 7
Promocijas darba aktualitāte 7
Promocijas darba mērķi un uzdevumi 8
Promocijas darba hipotēze 10
Pētījuma metodika 10
Promocijas darba zinātniskā nozīme 11
Promocijas darba praktiskā nozīme 12
Pētījuma aprobācija 12
1. Izpētes metodoloģija 14
1.1. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances noteikšana 14
1.2. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances aprēķina modeļa aspekti 14
2. Rezultāti un diskusijas 18
2.1. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskā analīze 18
2.2. No Saules enerģijas iegūtās elektroenerģijas energoefektivitātes noteikšana pārtikas rūpniecībā 22
2.3. Koksnes granulu žāvēšanas procesa enerģijas un ekserģētiskās efektivitātes noteikšana 25
2.4. Energoefektivitātes noteikšana zivju saldēšanas procesos 27
2.5. Tīrākas ražošanas pasākumu enerģētiskā analīze zivju pārstrādē 29
2.6. Parametru, kas ietekmē elektroenerģijas patēriņu zivju saldēšanā, analīze 33
2.7. Zivju saldēšanas darbības parametru izpēte, izmantojot ekserģētisko analīzi 36
Secinājumi 42
Literatūras saraksts 45

LIETOTIE SAĪSINĀJUMI

A

AER – atjaunojamie energoresursi;
a – kūpinātas brētliņas (Baltijas brētliņas un siļķes) eļļā, MWh mēnesī.

B

b – grauzdētas brētliņas (Baltijas brētliņas un siļķes) eļļā vai tomātu mērcē.

C

COP – veiktspējas koeficients (siltumsūkņi, saldēšanas/dzesēšanas sistēmas);
c – zivju frikadeles, MWh mēnesī.

D

d_{ziv} – zivju pastēte, MWh mēnesī.

E

EE – energoefektivitāte;
E_{el} – īpatnējais elektroenerģijas patēriņš, MWh_{el}/t;
E_k – enerģija, kuru izvada no aparāta kā produktu, kJ;
E_n – enerģija, kuru ievada aparātā ar izejmateriālu, kJ;
$E_{no\ tīkla}$ – elektroenerģija no tīkla, MWh;
E_p – izejmateriāla fizikālās vai ķīmiskās pārvērtības, kJ;
E_{saule} – elektroenerģija no Saules enerģijas, MWh;
$E_{x,c}$ – siltumnesēja ekserģija patērētājam piegādātajā siltumenerģijā, MWh;
$E_{x,i}$ – siltumnesēja ekserģija pēc katlumājas, MWh;
$E_{x,lossA}$ – ekserģijas zudumi siltuma zudumu dēļ, MWh;
$E_{x,lossB}$ – ekserģijas zudumi siltumnesēja transportēšanas laikā, MWh;
$E_{x,lossC}$ – ekserģijas zudumi, kas rodas siltummainī, MWh;
$E_{x,w}$ – elektroenerģijas ekserģija cirkulācijas sūknim, MWh;
E_{zud} – enerģijas zudumi apkārtējā vidē, kJ;
Ex/E; Ex/Q – ekserģijas faktors;
Ex_k – ekserģija, ko izvada no aparāta, kJ;
Ex_n – ekserģija, ko ievada aparātā, kJ;
$Ex_{noārd}$ – ekserģijas zudumi sistēmas iekšienē, kJ;
Ex_{zud} – ekserģijas zudumi apkārtējā vidē, kJ;
e – Atlantijas okeāna zivis eļļā vai tomātu mērcē, MWh mēnesī;
e_1 – žāvēšanai izmantotā gaisa ekserģijas plūsma pirms žāvētavas, kJ/s;
e_{p2} – žāvējamā materiāla ekserģijas plūsma pirms žāvētavas, kJ/s;
e_{p4} – žāvējamā materiāla ekserģijas plūsma pēc žāvētavas, kJ/s;
e_{w2} – žāvējamā materiāla ietvertā ūdens ekserģijas plūsma pirms žāvētavas, kJ/s;
η – enerģijas lietderības koeficients;
η_{ex} – ekserģijas lietderības koeficients.

H

$h_{1\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pirms kompresora, kJ/kg;
$h`_{1NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pirms pirmās pakāpes kompresora, kJ/kg;
$h_{1ž}$ – žāvēšanai izmantotā gaisa entalpija pirms žāvētavas, kJ/kg;
$h_{2\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pēc kompresora, kJ/kg;
$h`_{2\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pēc pirmās pakāpes kompresora, kJ/kg;
$h`_{3\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pirms otrās pakāpes kompresora, kJ/kg;
$h_{3ž}$ – žāvēšanai izmantotā gaisa entalpija pēc žāvētavas, kJ/kg;
$h_{5\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pirms iztvaikotāja, kJ/kg;
$h`_{5\ NH3}$ – amonjaka tvaika temperatūra pēc otrās pakāpes kompresora, kJ/kg;
$h`_{8\ NH3}$ – amonjaka tvaika entalpija pirms ievadīšanas starptraukā, kJ/kg;
$h`_{9\ NH3}$ – šķidrā amonjaka entalpija starptraukā, kJ/kg;
$h`_{10\ NH3}$ – šķidrā amonjaka entalpija pirms iztvaikotāja, kJ/kg;
h_{p_2} – žāvējamā materiāla entalpija pirms žāvētavas, kJ/kg;
h_{p_4} – žāvējamā materiāla entalpija pēc žāvētavas, kJ/kg;
h_{w_2} – žāvējamajā materiālā ietvertā ūdens entalpija pirms žāvētavas, kJ/kg;
h_{w_4} – žāvējamajā materiālā ietvertā ūdens entalpija pēc žāvētavas, kJ/kg.

I

IKP – iekšzemes kopprodukts.

M

M_A, M_B – vielas masas komponenti, kas ievadīti sistēmā kā izejvielas, kg;
M_C – gala produkta vielas masa, kg;
M_{zud} – zudumi, kas rodas procesā laikā, daļai masas iztvaikojot, paliekot aparātā, kg;
m_a – žāvēšanai izmantotā gaisa plūsmas ātrums, kg/s;
m_p – žāvējamā materiāla plūsmas ātrums, kg/s;
m_{w_2} – žāvējamajā materiālā ietvertā ūdens plūsmas ātrums pirms žāvētavas, kg/s;
m_{w_4} – žāvējamajā materiālā ietvertā ūdens plūsmas ātrums pēc žāvētavas, kg/s.

Q

$\dot{Q}_{zud}$ – siltuma zudumi no žāvētavas virsmas, W.

R

ΔR_{CO_2} – emisijas faktors CO_2 emisiju samazināšanai, t_{CO_2}/MWh;
$R^{el}_{CO_2}$ – emisijas faktors elektroenerģijai no elektrotīkla, t_{CO_2}/MWh;
$R^{saule}_{CO_2}$ – emisijas faktors elektroenerģijai no Saules enerģijas, t_{CO_2}/MWh.

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Latvijas tautsaimniecības realitāte saistīta ar to, ka Latvija atrodas tādā klimatiskā zonā, kurā gandrīz sešus mēnešus gadā nepieciešams paaugstināts energoresursu patēriņš siltumenerģijas izstrādes nodrošināšanai. Lielākoties siltumenerģiju iegūst no fosilā kurināmā, ko galvenokārt veido gāze, nafta un akmeņogles. Minētie izrakteņi Latvijas teritorijā nepieciešamajā daudzumā nav pieejami, līdz ar to Latvijas tautsaimniecības veiksmīgai attīstībai svarīgi izmantot energoefektīvas tehnoloģijas. Tas nozīmē, ka pirms jebkura tehnoloģiska projekta īstenošanas nepieciešams veikt rūpīgu energosistēmas, enerģētisko un ekserģētisko analīzi. Savukārt šī analīze balstās atzinumā, ka energosistēmas lietderības un energoefektivitātes rādītāji cieši saistīti ar energosistēmas efektivitātes indikatoriem: sistēmas lietderības koeficients, enerģijas un ekserģijas zudumi.

Jebkuras energosistēmas pamatelementi ir enerģijas ražotājs (pārveidotājs), pārvade un enerģijas patērētājs. Tautsaimniecība funkcionē, pastāvot ražošanas un pārstrādes tehnoloģiskiem procesiem un to iekārtām. Tehnoloģisko procesu un to iekārtu pilnveidošana, optimālo konstrukciju un režīmu noteikšana un pētīšana pamatojas uz fizikālo un matemātisko modelēšanu. Lai izveidotu procesu un to iekārtu matemātiskos modeļus, jāizprot procesu norises un iekārtu darbības mehānisms un jāprot to matemātiski izteikt. Analizējot procesu norisi, konstatējama šo procesu analoģija, proti, tos apraksta ar līdzīgu formulu palīdzību.

Tehnoloģiskie procesi ir izejvielu un pusfabrikātu apstrādes norises rūpniecībā. Tehnoloģiskajā procesā piedalās izejvielas, kuru īpašības procesa laikā mainās. Savukārt materiālu īpašības maiņu panāk, realizējot enerģijas un masas pārnesi starp tehnoloģiskās sistēmas atsevišķām daļām. Tehnoloģisko procesu iespējams pareizi organizēt un pārraudzīt, ja zināma tā masas un enerģētiskā bilance.

Jebkurš tehnoloģiskais process saistīts ar noteiktu vielu un enerģijas patēriņu, kā arī ar konkrētām iekārtām, kas procesa norises laikā uztur nepieciešamo darba režīmu (temperatūru, spiedienu, koncentrāciju u. c.). Parasti tehnoloģiskos procesus klasificē atbilstoši pamatlikumiem, kam tie pakļauti. Piemēram, hidromehāniskie tehnoloģiskie procesi pakļauti hidrodinamikas pamatlikumiem. Pie šiem procesiem pieder, piemēram, šķidrumu pārvietošana, nostādīšana, filtrēšana u. c. Hidromehāniskos tehnoloģiskos procesus virza spiedienu starpība, centrbēdzes spēks. Siltuma tehnoloģiskie procesi saistīti ar temperatūras maiņu vidēs, kas piedalās procesā. Šādi procesi ir sildīšana, dzesēšana, iztvaicēšana u. c. Siltuma tehnoloģisko procesu norisi virza temperatūras starpība. Masas apmaiņas (difūzijas) tehnoloģiskie procesi saistīti ar vielas masas apmaiņu starp fāzēm. Pie šiem procesiem pieder: sorbcija (absorbcija, adsorbcija), ekstrakcija, žāvēšana, pārtvaice u. c. Šos procesus virza koncentrācijas starpība atsevišķās fāzēs. Mehāniskie tehnoloģiskie procesi pamatojas uz to, ka apstrādājamais materiāls tiek pakļauts mehāniska spēka iedarbībai, t. i., smalcināšanai, sijāšanai, cietu vielu transportēšanai, presēšanai u. c. Šos procesus virza mehāniskā spiediena un centrbēdzes spēks. Ķīmiskie tehnoloģiskie procesi saistīti ar apstrādājamā materiāla

ķīmiskās uzbūves maiņu, t. i., hlorēšanu, nitrēšanu, neitralizēšanu u. c. Ķīmiskos tehnoloģiskos procesus virza ķīmiskā tieksme (virzība), temperatūra, spiediens, koncentrācija.

Atkarībā no tehnoloģisko procesu ilguma visi procesi iedalāmi periodiskos un nepārtrauktos procesos. Periodiskā tehnoloģiskā procesā tā atsevišķas stadijas notiek vienā iekārtā dažādos laikos. Nepārtrauktā tehnoloģiskā procesā tā atsevišķās stadijas dažādās iekārtās realizē vienlaikus. Nepārtrauktiem tehnoloģiskiem procesiem, salīdzinot ar periodiskiem procesiem, ir vairākas priekšrocības – uzlabojas produktu kvalitāte, iekārtas ir vienkāršākas, darba apstākļi – ērtāki, procesi – vieglāk automatizējami.

Tehnoloģisko procesu iespējams pareizi organizēt un pārraudzīt, ja zināma tā masas un enerģētiskā bilance. Masas bilances pamatā ir masas nezūdamības likums, un reālu procesu masas bilance aprakstāma vienādojumā:

$$M_A + M_B = M_C + M_{zud}. \tag{1}$$

Masas bilances datus izmanto iekārtu aprēķiniem un to izvēlei, enerģētiskās bilances sastādīšanai un citiem tehnoloģiskajiem un ekonomiskajiem aprēķiniem, kā arī tehnoloģiskā procesa pareizai organizēšanai.

Enerģētiskā bilance rāda, kā enerģija, kas nepieciešama tehnoloģiskajam procesam, sadalās, realizējot procesus.

Pēc analoģijas ar masas bilanci enerģētiskā bilanci vispārinātā veidā var izteikt šādi:

$$E_n + E_p = E_k + E_{zud}. \tag{2}$$

Pēc analoģijas ar enerģētiskā bilanci ekserģētisko bilanci vispārinātā veidā var izteikt šādi:

$$Ex_n = Ex_k + Ex_{zud} + Ex_{noārd}. \tag{3}$$

Enerģētisko un ekserģētisko bilanču kopīgais ir analoģiskajā matemātiskajā aprakstā, savukārt atšķirīgais ir tas, ka ekserģētiskajā bilancē tiek ņemti vērā ne tikai zudumi, kas izdalās apkārtējā vidē, bet arī zudumi, kas rodas pašā sistēmā.

Pēc Latvijas neatkarības atjaunošanas zinātniskajā vidē intensīvi veikti dažādi pētījumi saistībā ar enerģijas lietderīgas izmantošanas problemātiku. Autora izstrādātais promocijas darbs saistīts ar konkrētu problēmu risināšanu, proti, energosistēmu ekserģētiskās bilances modeļa izveidi un tā aprobāciju, izvēloties konkrētu praktisko problēmu piemēru.

Promocijas darba mērķi un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir analizēt enerģijas patēriņa efektivitāti, izmantojot gan enerģētisko, gan ekserģētisko bilanci, un atrast to lietošanas diapazonus un mijiedarbību dažādos energoapgādes objektos.

Darba uzdevumi ir divdimensiju, no kuriem viena dimensija ir energoapgādes uzņēmumu tvērums:

1) siltumapgādes uzņēmums;
2) zivju pārstrādes uzņēmums;
3) granulu ražošanas uzņēmums;
4) Saules elektroenerģijas ražotne.

Šis tvērums rada iespēju aptvert energosistēmu dažādību, analizēt enerģijas patēriņa efektivitāti.

Otra dimensija ir šo uzņēmumu analīzes tvērums:

1) enerģētiskā analīze ar energobilances metodes lietojumu;
2) ekserģētiskā analīze ar ekserģētiskās bilances lietojumu;
3) enerģētiskās un ekserģētiskās analīzes rezultātu salīdzinājums un mijiedarbības skaidrošana.

Šis tvērums rada iespēju izstrādāt universālu pieeju, veicot iepriekš minēto uzņēmumu enerģētisko un ekserģētisko bilanci, un noformulēt to lietošanas diapazonus un mijiedarbību.
Promocijas darbā ir trīs nodaļas. Pirmajā, izmantojot dažādus literatūras avotus, formulēta ekserģijas izpratne, ekserģijas matemātiskā aprēķina teorētiskie pamati un sniegts pārskats par dažādu Eiropas valstu siltumapgādes sistēmu ekserģētiskās analīzes aspektiem. Veidojot nodaļas saturu, izmantota atziņa, ka mūsdienās zinātniskais priekšstats par enerģiju veidots kā ekserģijas un anerģijas summa un tieši ekserģija ir tā enerģijas daļa, kas raksturo termodinamiskās sistēmas lietderīgo darbu. Efektīva saimniekošana energoresursu taupīšanas jomā virzīta uz anerģijas samazināšanu un ekserģijas pieaugumu.

Izmantojot speciālo un zinātnisko literatūru, pirmajā nodaļā formulēti arī termodinamiskās sistēmas ekserģijas aprēķinu pamati, kā arī pētīta termodinamiskās sistēmas ekserģētiskās bilances izveide. Vielas ekserģijas aprēķinā noslēgtā sistēmā izmanto šādus sistēmas termodinamiskos parametrus: iekšējo enerģiju, entropiju, temperatūru, spiedienu un tilpumu. Siltuma plūsmas ekserģijas aprēķins saistīts ar to, ka tehnoloģiskās sistēmas funkcionēšanu nosaka ar enerģijas apmaiņu ar apkārtējo vidi. Nododot enerģiju siltuma plūsmas veidā no viena ķermeņa otram ķermenim un videi, līdz ar plūsmu pārvietojas arī noteikts ekserģijas daudzums. Ekserģētiskā bilance tiek veidota, pamatojoties uz termodinamiskās sistēmas efektīvu darbību, nosakot ekserģētiskos parametrus. Jebkurai reālai sistēmai šāda bilance ir visu ekserģētisko plūsmu summa pie ieejas un izejas no tās, ņemot vērā ekserģijas patēriņu zudumus. Nodaļā pētīta arī Dānijas, Zviedrijas, Turcijas un Slovēnijas siltumapgādes sistēmu ekserģētiskā analīze un tās rezultātu izmantošanas pieredze šajās valstīs. Piemēram, izmantojot ekserģētisko analīzi, varētu noteikt piegādātās enerģijas kvalitāti, tādējādi varētu noteikt, kādu kurināmo izmantot, lai samazinātu ekserģijas zudumus. Veicot ekserģētisko analīzi, lietderīgi izmantot vairākus modeļa aprēķina scenārijus. Siltumenerģijas cenas noteikšanai jāņem vērā siltumnesēja ekserģija.

Promocijas darba otrajā nodaļā izveidots siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances aprēķināšanas modelis un noteikti ekserģijas zudumi katrā siltumapgādes sistēmas elementā, t. i., piedāvāta darba uzdevuma risinājuma konkrēta izpētes metodoloģija. Par izejas datiem ņemti siltuma ražošanas iekārtas darbības tehniskie dati. Izejas datu bloks ietver datus par katlumāja jaudu, saražoto siltumenerģiju, siltumtrases tīklu siltuma zudumus, turpgaitas un atgaitas temperatūras, cirkulācijas sūkņa patērēto elektroenerģiju, patērētājam piegādāto siltumenerģiju un citus datus. Kā zināms, siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances modelis balstās uz otro termodinamikas likumu, kas nosaka, ka, lai kādas stāvokļa izmaiņas materiālajās sistēmās notiktu, tās vienmēr pavada: izolētās sistēmās – enerģijas saglabāšana un entropijas izmaiņas; atvērtās sistēmās – enerģijas un entropijas izmaiņas. Šajā nodaļā,

veicot matemātiskus aprēķinus par ekserģijas izmaiņām siltumapgādes sistēmā, par pamatu ņemta ekserģētiskā bilance. Ar ekserģētisko bilanci noskaidrots, kā mainās siltumenerģijas ekserģija posmā no siltumcentrāles līdz patērētājam, un tas ļauj novērtēt, kurā posmā rodas lielākie zudumi.

Promocijas darba trešajā nodaļā veikta ekserģētikās bilances modeļa praktiska aprobācija dažādās energosistēmās. Ekserģijas aprēķinu modeļa aprobācija veikta, realizējot zinātniski praktiskus pētniecības projektus. Par izejas datiem ņemti šādi lielumi: saražotās siltumenerģijas daudzums, siltumnesēja turpgaitas un atgaitas temperatūra, apkārtējās vides (ārgaisa) temperatūra, katlumājas jauda, siltuma zudumi, cirkulācijas sūkņa patērētā elektroenerģija, patērētājam piegādātais siltumenerģijas daudzums un citi procesu tehnoloģiskie parametri. Ekserģētiskās bilances modeļa aprobācijas dati ir apkopoti tabulās un grafikos un salīdzināti ar Eiropas valstu pieredzi.

Promocijas darba hipotēze

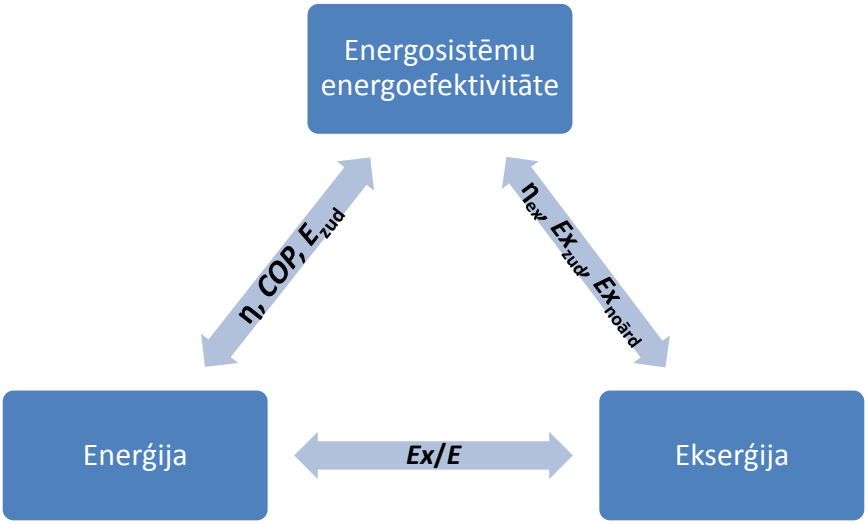
Promocijas darbā izvirzītā hipotēze – enerģētisko un ekserģētisko bilanču izmantošana radīs iespēju pilnveidot izpratni par energosistēmas zudumu rašanās iemesliem un to samazināšanas iespējām, kas savukārt radīs teorētiskus pamatus kļūdu un nepilnību novēršanai praksē.

Pārbaudot izvirzītās hipotēzes pareizību, veikts pētījums par energosistēmas energoefektivitātes novērtēšanas iespējām, samazinot nelietderīgu enerģijas patēriņu. Lai īstenotu pētījumu, bija nepieciešams noskaidrot:

- enerģijas iekšējo struktūru un raksturojošos rādītājus;
- ekserģijas apjomu energosistēmā, izmantojot ekserģijas aprēķinu teorētiskos pamatus;
- enerģijas un ekserģijas savstarpējās izmaiņas energosistēmā.

Pētījuma metodika

Izvirzītās hipotēzes pārbaudes laikā izmantotas dažādas pētniecības metodes, kas ļauj noteikt energosistēmas efektivitātes, enerģijas un ekserģijas indikatorus. Šo indikatoru mijiedarbība ilustrēta 1.1. attēlā.



1.1. att. Energosistēmas efektivitātes un tās "enerģija" un "ekserģija" indikatoru mijiedarbība.

Izpētes rezultātu ilustrēšanai ņemta vērā:

1) enerģētiskās bilances izmantošana enerģijas un energosistēmas sasaistīšanai, izmantojot šādus indikatorus: η – enerģijas lietderības koeficients; *COP* – veiktspējas koeficients (siltumsūkņi, saldēšanas/dzesēšanas sistēmas); E_{zud} – enerģijas zudumi;
2) ekserģētiskās bilances izmantošana ekserģijas un energosistēmas sasaistīšanai, izmantojot šādus indikatorus: η_{ex} – ekserģijas lietderības koeficients; Ex_{zud} – ekserģijas zudumi, kas atkarīgi no enerģijas zudumu apmēra; $Ex_{noārd}$ – ekserģijas zudumi/noārdīšana (*destruction*), kas noris energosistēmā;
3) ekserģijas faktora izmantošana enerģijas un ekserģijas sasaistīšanai, izmantojot šādu indikatoru: *Ex*/*E* – ekserģijas faktors.

Katras atbilstošās metodes izvēle bija atkarīga no konkrēta uzdevuma sarežģītības, pieejamajiem datiem un definētajām izpētes robežām, kā arī no katra pētījuma stadijas konkrētās situācijas noteiktajiem ierobežojumiem.

Promocijas darba zinātniskā nozīme

Izpētes gaitā veikts komplekss pētījums par enerģētiskās un ekserģētiskās bilances izmantošanas iespējām, pilnveidojot izpratni par energosistēmas zudumu rašanās iemesliem un to novēršanas iespējām. Tādā veidā īstenots pētījums par dažādu energosistēmu enerģijas un ekserģētisko bilanču aprēķinu modeļu izveidi.

Šis pētījums balstīts uz enerģijas un ekserģijas teorētiskajām nostādnēm un matemātiskiem aprēķinu pamatiem. Veikta empīriska energosistēmu efektivitātes indikatoru savstarpējas mijiedarbības pārbaude. Tāda veida nostādnes un matemātiskie aprēķinu pamati izmantoti, izveidojot trīs atšķirīgus pētījuma virzienus: enerģijas bilances izmantošana energosistēmas novērtēšanā, identificējot būtiskos indikatorus, ar kuriem iespējams pētīt energosistēmas energoefektivitāti; ekserģētiskās bilances izmantošana energosistēmas novērtēšanā, identificējot būtiskākos indikatorus, ar kuriem iespējams pētīt energosistēmas

energoefektivitāti; ekserģijas faktora izmantošana enerģijas un ekserģijas sasaistei energosistēmas energoefektivitātes novērtēšanai.

Promocijas darba praktiskā nozīme

Izmantojot promocijas darba rezultātus, iespējams pilnveidot priekšstatu par energosistēmu efektivitātes, enerģijas un ekserģijas mijiedarbību.

Uz šī priekšstata pamata rodas objektīva iespēja izstrādāt konkrētas praktiskas rekomendācijas atsevišķām energoietilpīgām tautsaimniecības nozarēm, piemēram, siltumapgāde, apjomīgu ražošanas procesu īstenošana uzņēmumos u. c.

Promocijas darba autoram pētījuma gaitā izdevās nodemonstrēt izvēlētās pētījuma metodikas pareizību, aprēķinot enerģijas un ekserģētisko bilanci siltumapgādes sistēmā, pārtikas ražošanā, izmantojot Saules enerģiju, koksnes granulu ražošanā un zivju pārstrādes jomā.

Promocijas darba rezultātus varēs izmantot:

1) ministrijas un aģentūras, izstrādājot likumdošanas aktus;
2) energoietilpīgu tautsaimniecības nozaru speciālisti, piemēram, siltumapgādes speciālisti, apjomīgu ražošanas procesu īstenošanai uzņēmumos, kas saistīti ar energoefektīvu ražošanu;
3) par mācību līdzekli enerģētikas speciālistu izglītošanai, īpaši jomās, kas saistītas ar energosistēmu energoefektivitātes uzraudzību.

Pētījuma aprobācija

Promocijas darbs ir aprobēts četrās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Exergy analysis for district heating network. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2016, 12–14 October 2016, Riga, Latvia.
2. Terehovics E., Khabdullin A., et. al. Why solar electricity has high potential for Kazahstan industries. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2016, 12–14 October 2016, Riga, Latvia.
3. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Energy and exergy balance methodology. Wood chip dryer. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2017, 10–12 May 2017, Riga, Latvia.
4. Terehovics E., Soloha R., Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of fish refrigeration electricity consumption. International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Riga, Latvia.
5. Terehovics E., Soloha R., Veidenbergs I., Blumberga D. Cleaner production nodes in fish processing. Case study in Latvia. 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), 22–25 August 2018, Hong Kong, China.
6. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Parameters that affect electricity consumption in fish freezing. Case study. Environmental and Climate Technologies.

Special Issue International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2019, May 2019, Riga, Latvia.

Promocijas darbs ir aprobēts septiņos zinātniskos rakstos starptautiski citējamos zinātniskajos žurnālos, *SCOPUS* vai/un *Web of Science* datubāzēs, nesaīsināti zinātniskie raksti publicēti starptautiskos zinātniskos žurnālos un konferenču materiālu krājumos.

1. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Exergy analysis for district heating network. Energy Procedia 113 2017, pp. 189–193.
2. Terehovics E., Khabdullin A., et. al. Why solar electricity has high potential for Kazahstan industries. Energy Procedia Volume 113, May 2017, pp. 417–422.
3. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Energy and exergy balance methodology. Wood chip dryer. Energy Procedia 128 2017 pp. 551–557.
4. Terehovics E., Soloha R., Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of fish refrigeration electricity consumption Energy Procedia Volume 147, August 2018, pp. 649–653.
5. Terehovics E., Soloha R., Veidenbergs I., Blumberga D. Cleaner production nodes in fish processing. Case study in Latvia. Energy Procedia Volume 158, February 2019, pp. 3951–3958.
6. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Parameters that affect electricity consumption in fish freezing. Case study. Journal of Environmental and Climate Technologies. Special Issue. 2019. 12 p. (In press). (Scopus and Web of Science Data base).
7. Terehovics E., Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of operation parameters of fish refrigeration by exergy analysis. Case study. Journal of Environmental and Climate Technologies. Special Issue. 2019. 12 p. (In press). (Scopus and Web of Science Data base).

1. IZPĒTES METODOLOĢIJA

1.1. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances noteikšana

Plānojot jebkuru tehnoloģisku procesu, nepieciešams rūpīgi apsvērt tā nepieciešamību un veikt pamatparametru analīzi, lai izvēlētos optimālo procesu un izveidotu tā modeli. Tehnoloģiskos procesos, kuru izmantošanas pamatmērķis ir siltumapgāde, kas cieši saistīta ar efektīvu energoresursu izmantošanu, vadošā loma ir siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances modeļa izveidei un tā praktiskai aprobācijai. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances modelis balstās uz rūpīgu siltuma un masas apmaiņas procesu matemātiskās aprēķināšanas algoritmu, kurā ietverta nepieciešamās informācijas bloku noteikšana un to ietekme uz gala rezultātu iegūšanu.

Katru siltumapgādes sistēmas elementu var apskatīt kā patstāvīgu termodinamisku sistēmu. Elementa darba efektivitāti var novērtēt, salīdzinot darbspēju, kāda ir ķermenim pie ieejas šajā elementā, un darbspējas zuduma (sistēmas elementos notiekošu neatgriezenisku procesu rezultātā) lielumu. Ekserģētiskās metodes priekšrocība: tā ļauj analizēt siltumapgādes sistēmas elementa termodinamiskos procesus bez nepieciešamības iepriekš izvērtēt visas siltumapgādes sistēmas lietderīgo darbu un tā zudumus visos tās elementos; tas atvieglo aprēķinu procesu. Sakarā ar to, ka vairumā gadījumu siltumapgādes iekārtu darbība ir saistīta ar darba vielas (siltumnesēja) nepārtrauktu plūsmu, šo iekārtu darbības analīzes atvieglošanai būtu nepieciešams izmantot sistēmas darbspēju jēdzienu gadījumam, kad procesi šajā sistēmā notiek plūsmā [1].

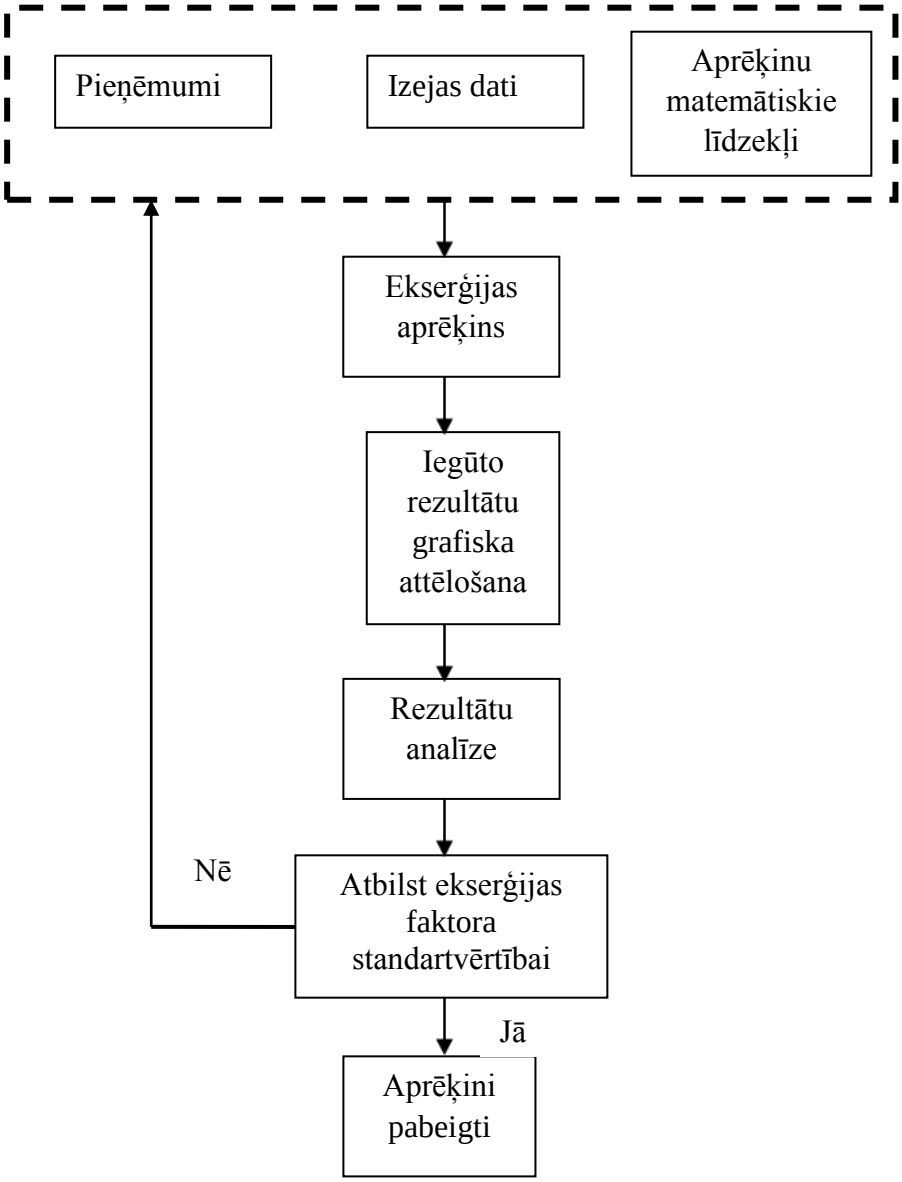
1.2. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances aprēķina modeļa aspekti

Lai izveidotu siltumapgādes sistēmas ekserģētisko bilances modeli, jāveic šādas darbības: ekserģētiskās bilances sastādīšana, nepieciešamo izejas datu iegūšana, pieņēmumu izdarīšana par nezināmajiem lielumiem, kam tālāk seko pats aprēķins, rezultātu analīze, bet nobeigumā – iegūto rezultātu grafiska attēlošana. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskās bilances modelis ir attēlots 1.1. attēlā.

Izejas datu bloks ietver datus par siltuma ražošanas iekārtas darbības tehniskajiem rādītājiem. Jebkurai aprēķina metodei svarīga ir izejas datu izvēle. Izejas dati šajā modelī ir otra svarīgākā komponente pēc formulām. Datu izvēle galvenokārt ir atkarīga no izvēlētajām formulām. Izejas datu bloks ietver datus par katlumājas jaudu, saražoto siltumenerģiju, siltumtrases tīklu siltuma zudumiem, turpgaitas un atgaitas temperatūrām, cirkulācijas sūkņa patērēto elektroenerģiju, patērētājam piegādāto siltumenerģiju un citus datus.

Pieņēmumu datu bloks, pirmkārt, atkarīgs no aktuālās temperatūras datiem. Piemēram, telpu gaisa komforta temperatūra ir atkarīga no tradicionālā dzīves veida un ģērbšanās ieradumiem. Dažādās valstīs tā ir šāda: Šveicē – no 18 °C līdz 20 °C , Vācijā – no 18 °C līdz 20 °C, ASV – no 19,6 °C līdz 21,8 °C, Anglijā – no 15,5 °C līdz 20 °C. Ķermeņa siltuma

izdalīšanās apkārtējā vidē iespējama četros veidos: kondukcija, konvekcija, izgarošana, radiācija. Siltumapmaiņa saistīta ar siltuma atdevi tiešā kontaktā starp vidi un virsmām. Konvekcija nodrošina siltuma atdevi ar vielas pārnesi. Enerģijas patēriņš moderno dzīvokļu siltā ūdens apgādei ir 30 % no summārā siltuma patēriņa. Tāpēc šajā procesā var iegūt lielu enerģijas ietaupījumu. To sasniedz, iestatot ūdens temperatūru konstantā pēc iespējas zemā līmenī; vairumā gadījumu 55 °C ir pietiekama temperatūra, jo pie tās samazinās katlakmens nosēdumi un nav applaucēšanās bīstamības [2]. Otrkārt, pieņēmumu datu bloks atkarīgs no tā, kā notiek siltumenerģijas padeve dažādās siltumapgādes sistēmās, piemēram, krāsns apkure, ūdens centralizētā apkure, centralizētā apkures sistēma vai starojuma veidā (žāvēšana vai kaltēšana) [3].



1.1. att. Siltuma apgādes sistēmas ekserģētiskās bilances modeļa algoritms.

Treškārt, pieņēmumu datu bloks ietver teorētiskās zināšanas, kas ir aktuālas mūsdienu zinātnes skatījumā. Siltuma apgādes sistēmas darbības ideja balstās uz Karno ciklu.

Siltumapgādes sistēmas darbība balstīta uz siltumapgādes sistēmas ekserģijas iespējām, kuru pamatu veido vairāki atzinumi [4].

1. Entropija ir sistēmas darbspējas zuduma mērs neatgriezenisku procesu rezultātā. Darbspējas zudumi neatgriezenisku procesu rezultātā ir tieši proporcionāli entropijas pieaugumam. Neatgriezeniskuma ietekmi uz darbspējas zudumu var novērtēt kvantitatīvi. Maksimālo daļu siltuma, kas nodots no vienas sistēmas otrai, var pārveidot sistēmas darbā, ko nosaka Karno cikla lietderīgā darba koeficients.
2. Entropija ir sistēmas darbspējas, siltuma tehnoloģiskās efektivitātes (vērtības) mērs. Izolētas sistēmas entropijas pieaugums saistīts ar enerģijas vērtības krišanos, t. i., tās ekserģētiskā potenciāla samazināšanos.
3. Entropija ir sistēmas nekārtības, degradācijas un dezorganizācijas mērs. Ja siltums tiek aizvadīts no sistēmas, tās entropija samazinās. Līdz ar to palielinās sistēmas sakārtotība, jo samazinās molekulu un atomu siltumkustības haotiskums. Visu iespējamo neatgriezenisko mērījumu rezultātā sistēma degradējas un pāriet šādā stāvoklī:
   - visi sistēmas ķermeņi sasnieguši vienādu temperatūru;
   - viss derīgā darba daudzums pārvērsts siltumā;
   - sistēmā izlīdzinājusies vielas koncentrācija un spiediens;
   - sistēmā notikusi vielas galēja sasmalcināšanās un vienmērīga vielas samaisīšanās.

Termodinamiskā metode pamatota ar to, ka, lai arī kādas stāvokļa izmaiņas materiālajās sistēmās notiktu, tās vienmēr pavada: izolētās sistēmās – enerģijas saglabāšana un entropijas izmaiņas, savukārt atvērtās sistēmās – enerģijas izmaiņas un entropijas izmaiņas [4].

Šobrīd termodinamikā tiek izmantotas divas pieejas ekserģijas izpētei tehniskajās sistēmās. Pirmā pieeja pamatota ar Karno tiešo un atgriezenisko ciklu analīzes metodēm. Tipisks piemērs ir absolūtās temperatūras skalas veidošana, kur mākslīgi tiek ievadīti vairāki secīgi saistīti Karno cikli. Šīs metodes, pamatojoties uz pirmo un otro termodinamikas likumu, ļauj atrast saikni starp siltuma un darba daudzumu un sistēmas parametriem. Sastādot sistēmas ekserģētisko bilanci, iespējams atrast koeficientus, kas raksturo pētāmo ciklu, un salīdzināt tos ar atbilstošo ideālo ciklu koeficientiem. Šajā gadījumā ir iespēja konkrētajā sistēmā noteikt summāros darba zudumus, kas radušies procesu neatgriezeniskuma rezultātā. Šos zudumus varētu iedalīt divās daļās. Pirmā daļa, kas saistīta ar cikla procesu nepilnīgumu, attiecas uz iekšējiem zudumiem. Otrā zudumu daļa saistīta ar sistēmas un ārējo enerģijas avotu un saņēmēju mijiedarbību un attiecināma uz ārējiem zudumiem [4].

Otrā pieeja pamatota ar termodinamisko potenciālu izmantošanu, lai analizētu enerģijas pārveidošanos dažādās sistēmās. Ciklu metodei nepieciešami mākslīgi veidojumi/konstrukcijas un apkārtceļi konkrētu uzdevumu risināšanai. Līdz ar termodinamisko sistēmu attīstību aktuāla kļuvusi otrā pieeja, kas pamatojas uz termodinamisko funkciju veidošanu. Termodinamisko funkciju, kuru skaits ir pietiekami liels, vidū tiek izceltas tā sauktās raksturojošās funkcijas, kam piemīt īpašība, ka pie izvēlētajiem stāvokļa parametriem atsevišķie raksturojošās funkcijas atvasinājumi pēc parametriem ir vienādi ar kādu no sistēmas parametriem. Pateicoties šim apstāklim, šādi atvasinājumi iegūst vienkāršāko izteiksmi un fizikālo jēgu. Par stāvokļa raksturojošajām funkcijām sauc

funkcijas, ar kuru palīdzību var tikt skaidri izteiktas visas termodinamiskās īpašības, tai skaitā – stāvokļa vienādojumi [4].

Termodinamikas potenciāli ļauj tieši atrast jebkura darba veida lielumu tajos vai citos apstākļos. Ar to palīdzību var novērtēt enerģijas plūsmu un vielas darbspēju jebkurā apskatāmās sistēmas punktā neatkarīgi no tās struktūras un sarežģītības [4].

Ekserģija atšķirībā no enerģijas, kas ir saistīta ar matērijas fundamentālām īpašībām, ir atsevišķs jēdziens, kas raksturo enerģijas lietderību konkrētos apkārtējās vides apstākļos. Par ekseģētisko metodi sauc izpētes metodi, kas pamatota uz termodinamisko procesu darbspējas zudumu analīzi. Ekserģiskie rādītāji tieši saistīti ar iekārtas tehniski ekonomiskajiem raksturlielumiem; tas ļauj atrast projektējamās siltumenerģētiskās iekārtas visizdevīgākos parametrus un izmērus [4].

Ekserģija ir atkarīga no energonesēja un apkārtējās vides temperatūrām. Jo mazāk atgriezenisks būs process un jo vairāk tiks iegūts derīgais darbs, jo lielāka būs ekserģija. Tas ļauj ieviest tā sauktās procesa ekserģētiskās efektivitātes jēdzienu jeb ekserģētisko lietderības koeficientu. To nosaka ar attiecību starp izmantoto ekserģiju un piegādāto ekserģiju. Siltummaiņos tas būs siltumnesēja ekserģijas pie izejas attiecība pret tā ekserģiju pie ieejas. Ekserģiskais lietderības koeficients ļauj ņemt vērā zaudējumus tikai neatgriezenisko procesu dēļ, jo tikai neatgriezeniskajos procesos notiek ekserģijas zudumi. Tāpēc visu atgriezenisko ciklu analīzei tas nav izmantojams, t. i., visos gadījumos $\eta_e = 1$ [4].

Ekserģijas aprēķinā apvieno izejas datus, pieņēmumus un formulas. Aprēķini ir jāveic vairākus mēnešus, lai iegūtu priekšstatu par siltumapgādes sistēmas darbības efektivitāti pie dažādām slodzēm. Tik lielus aprēķinus labāk veikt *MS Office Excel* vidē, lai ātri un precīzi iegūtu rezultātus. Gadījumā, ja ir pamanīta kāda kļūda izejas datos vai formulā, to var ātri izlabot.

Veicot matemātiskus aprēķinus par ekserģijas izmaiņām siltumapgādes sistēmā, par pamatu ņemta ekserģētiskā bilance. Ekserģētiskā bilance ļauj aprakstīt un noskaidrot, kā mainās siltumenerģijas ekserģija posmā no siltumcentrāles līdz patērētājam, kas ļauj novērtēt, kurā posmā rodas lielākie zudumi. Bilanci (1.1.) var uzrakstīt šādi [5]:

$$E_{\mathrm{x,i}} + E_{\mathrm{x,w}} = E_{\mathrm{x,lossA}} + E_{\mathrm{x,lossB}} + E_{\mathrm{x,lossC}} + E_{\mathrm{x,c}}. \qquad (1.1.)$$

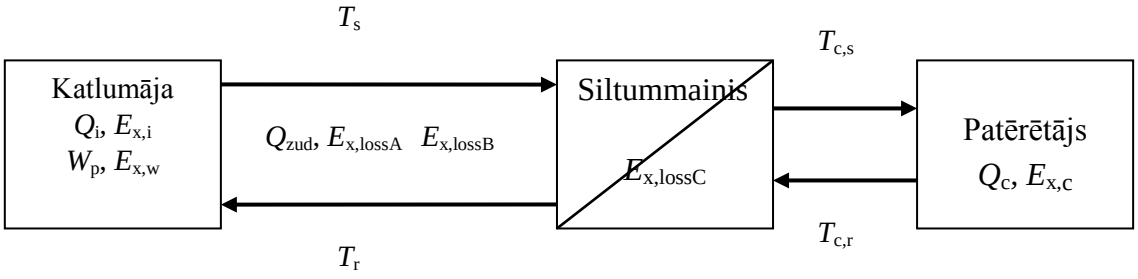
Bilances kreisajā pusē $E_{\mathrm{x,i}}$ ir siltumnesēja ekserģija pēc katlumājas, $E_{\mathrm{x,w}}$ ir elektroenerģijas ekserģija cirkulācijas sūknim. Labajā pusē $E_{\mathrm{x,lossA}}$ parāda, kādi ir ekserģijas zudumi siltuma zudumu dēļ, $E_{\mathrm{x,lossB}}$ ir ekserģijas zudumi siltumnesēja transportēšanas laikā, $E_{\mathrm{x,lossC}}$ ir zudumi, kas rodas siltummainī, $E_{\mathrm{x,c}}$ ir siltumnesēja ekserģija patērētājam piegādātajā siltumenerģijā.

Ekserģētiskās bilances kreisajā pusē ir parādīts, cik daudz ekserģijas ir ievadīts siltumapgādes sistēmā, labajā pusē – kā kopējā ekserģija sadalās pa konkrētajiem zudumiem.

2. REZULTĀTI UN DISKUSIJAS

2.1. Siltumapgādes sistēmas ekserģētiskā analīze

Siltumapgādes sistēmu ekserģētiskās analīzes aprobācija veikta, par piemēru ņemot Ludzas siltumapgādes sistēmu. Ludzas siltumapgādes sistēma, ko pārvalda SIA "Ludzas Bio-enerģija", sastāv no sazarotiem cauruļvadiem, kas nogādā siltumenerģiju no katlumājas līdz patērētājam. Cauruļvadu sistēma ir iedalīta 25 maģistrālajos posmos. Šādas sistēmas galvenie elementi ir katlumāja un cauruļvadi. Katlumājā saražotais siltums tiek pārnests no augstākas uz zemākas temperatūras vidi, un tā rezultātā samazinās siltumenerģijas kvalitāte. Cauruļvadus izmanto, lai transportētu saražoto siltumenerģiju līdz patērētājam, un tā ir viena no galvenajām siltuma zudumu rašanās vietām. Apskatītajā sistēmā siltuma zudumi vidēji bija 8,54 % no saražotās siltumenerģijas. Cauruļvadu sistēma tika atjaunota pirms 13 gadiem, nomainot padomju laiku caurules ar mūsdienu prasībām atbilstošām rūpnieciski izolētām caurulēm. Šo cauruļvadu iekšējais diametrs ir robežās no 37 mm līdz 263 mm.



2.1. att. Siltumapgādes sistēmas principiālā shēma.

Kopējais cauruļvadu garums ir 9770 m. Vidējā turpgaitas un atgaitas temperatūra siltumtrasē ir 71,31 °C un 47,13 °C, vidējais spiediens – 8 bar. Patērētāja pusē vidējā turpgaitas un atgaitas temperatūra attiecīgi ir 63,32 °C un 39,15 °C, spiediens ir atkarīgs no atmosfēras spiediena. Siltumenerģija no siltumtrases uz patērētāja siltumtīklu tiek pārnesta, izmantojot plākšņu siltummaini.

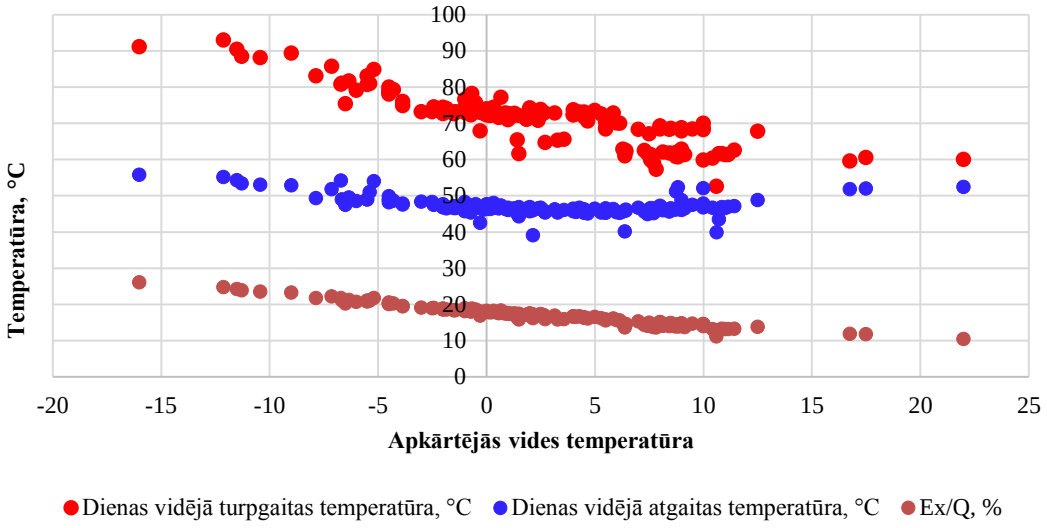
Modeļa aprobācija balstīta SIA "Ludzas Bio-enerģija" siltumapgādes datos. Izejas dati apkopoti par 2008./2009. gada apkures sezonu, kas ilga no oktobra līdz aprīlim ieskaitot, kopā 214 dienas. Informācija par visu gadu nebija pieejama, jo siltumenerģijas patēriņa pierakstīšana uzskaites žurnālā vasaras mēnešos nebija regulāri dokumentēta. No siltumapgādes sistēmas uzskaites žurnāla ņemti šādi dienas vidējie dati:

- saražotās siltumenerģijas daudzums;
- siltumnesēja turpgaitas un atgaitas temperatūra;
- apkārtējās vides (ārgaisa) temperatūra;
- stacijas jauda;
- siltuma zudumi;
- cirkulācijas sūkņa patērētā elektroenerģija;
- patērētājam piegādātais siltumenerģijas daudzums.

Aprēķinu gaitā tika pieņemts, ka vidējais temperatūras kritums siltummainī starp siltumtrases siltumnesēju un patērētāja kontūra siltumnesēju ir 5 °C. Siltumnesēja temperatūras kritums no katlumājas līdz pēdējam patērētājam ir 3 °C. Dati par brīvdienām nebija pieejami, tāpēc tika pieņemts, ka brīvdienās esošie izejas dati ir vidējais aritmētiskais starp dienu pirms brīvdienām un dienu pēc brīvdienām.

Ekserģijas aprēķinā apvienoti izejas dati, pieņēmumi un formulas, lai veiktu konkrētas siltumapgādes sistēmas ekserģētisko analīzi. Aprēķini jāveic pa vairākiem mēnešiem, lai iegūtu priekšstatu par siltumapgādes sistēmas darbības efektivitāti pie dažādām slodzēm. Tik apjomīgus aprēķinus labāk veikt *MS Office Excel* vidē, lai ātri un precīzi iegūtu rezultātus. Gadījumā, ja ir pamanīta kāda kļūda izejas datos vai formulā, to var operatīvi izlabot.

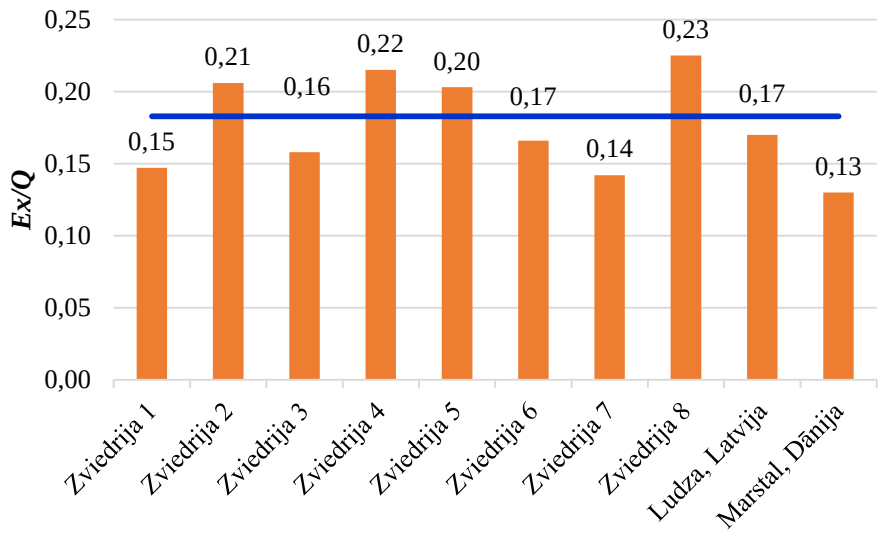
Grafiski attēlotus rezultātus ir vieglāk analizēt, jo ir iespējams pamanīt iespējamās kļūdas aprēķinos, kas izpaužas kā rezultātu neiekļaušanās kopējā rezultātu dinamikā. Šo kļūdu galvenais iemesls ir nepareizi ievadīta formula aprēķinu modelī vai izejas datos.



2.2. att. Temperatūru un ekserģijas faktoru izmaiņas atkarībā no ārgaisa temperatūras.

Salīdzinājums, kā mainās siltumapgādes sistēmas temperatūras un ekserģijas faktors atkarībā no ārgaisa temperatūras, ir redzams 2.2. attēlā. No attēla var secināt, ka, apkārtējās vides temperatūrai samazinoties, pieaug turpgaitas temperatūra, un tā rezultātā palielinās ekserģijas faktors. Atgaitas temperatūra galvenokārt ir atkarīga no patērētāja vajadzībām. Kā redzams attēlā, turpgaitas un atgaitas temperatūru starpība pieaug, pazeminoties ārgaisa temperatūrai, bet samazinās, ārgaisa temperatūrai pieaugot. Tas skaidrojams ar to, ka, laikam kļūstot vēsākam, pieaug siltuma atdeve no radiatoriem, samazinot siltumnesēja temperatūru. Savukārt, laikam kļūstot siltākam, siltuma atdeve samazinās, līdz ar to temperatūras kritums siltumnesējā ir mazāks.

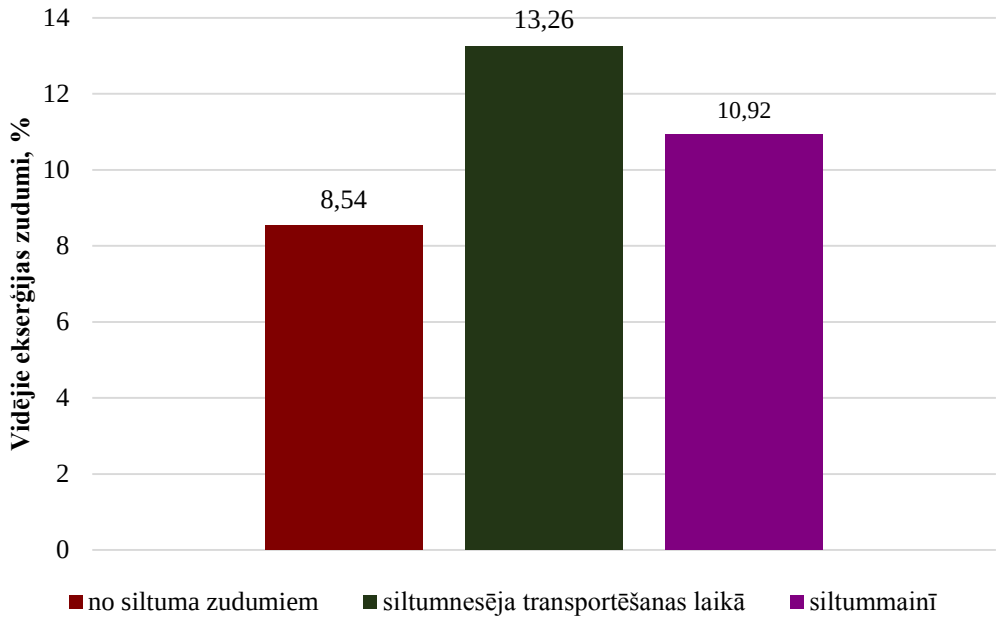
Ja salīdzina iegūtos ekserģijas faktorus ar literatūrā atrodamajām ekserģijas faktoru standarta vērtībām siltumapgādes sistēmām, ir iespējams noskaidrot, vai veiktie aprēķini ir korekti. Iegūtie rezultāti par Ludzas siltumapgādes sistēmu tika salīdzināti ar citu valstu siltumapgādes sistēmu (skat. 2.3. att.) gada vidējām vērtībām, konkrēti – salīdzinājums veikts ar Zviedrijas un Dānijas siltumapgādes sistēmām.



2.3. att. Ekserģijas faktoru salīdzinājums [6, autors].

Salīdzinot ar citu valstu siltumapgādes sistēmām (skat. 2.3. att.), var secināt, ka Ludzas siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktors ir tuvāk Zviedrijas nekā Dānijas siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktoram. Ekserģijas faktora izmaiņas ir saistītas ar ārgaisa, turpgaitas un atgaitas temperatūrām. Pieaugot turpgaitas un atgaitas temperatūrām, bet samazinoties ārgaisa temperatūrai, ekserģijas faktors pieaug, un otrādi. No siltumapgādes sistēmas viedokļa ekserģijas faktoram jābūt maksimāli zemam, tādējādi samazinot kopējos ekserģijas zudumus.

Ekserģijas zudumi, kas rodas no siltuma zudumiem, siltumenerģijas transportēšanas laikā, siltummainī redzami 2.4. attēlā.

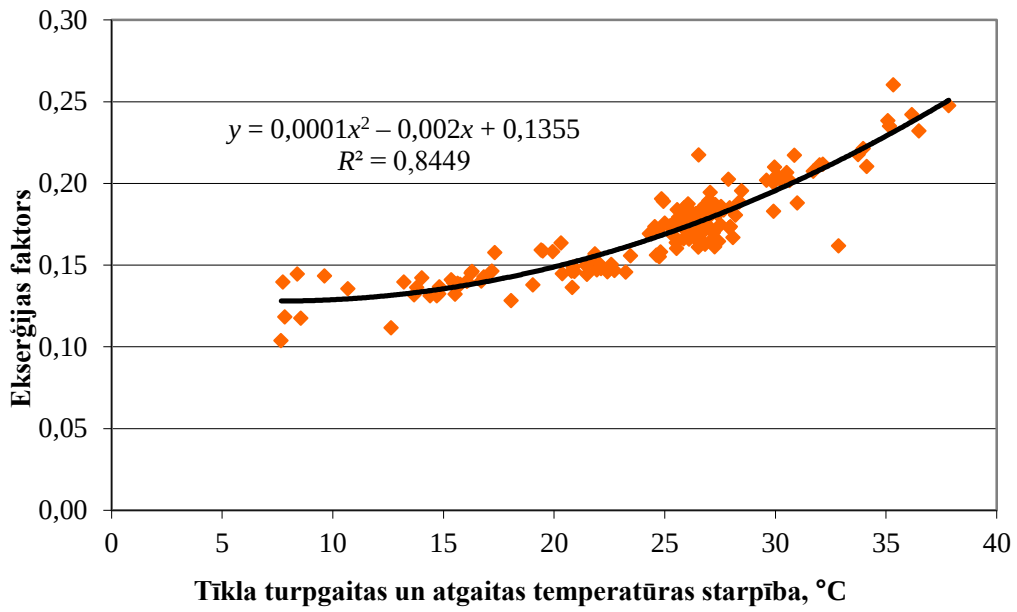


2.4. att. Siltumapgādes sistēmas ekserģijas zudumi.

Lielākie ekserģijas zudumi (skat. 2.4. att.) rodas siltummainī un siltumenerģijas transportēšanas laikā. Mazākie ekserģijas zudumi rodas no siltuma zudumiem. Lai samazinātu ekserģijas zudumus siltummainī, vispirms būtu jāizvērtē siltummaiņa tehniskais stāvoklis, jo vecākiem siltummaiņiem siltumapmaiņas virsmas pārklājas ar nogulsnēm, kā rezultātā samazinās to efektivitāte un palielinās ekserģijas zudumi. Tāpēc būtu regulāri jāseko siltummaiņu tehniskajam stāvoklim.

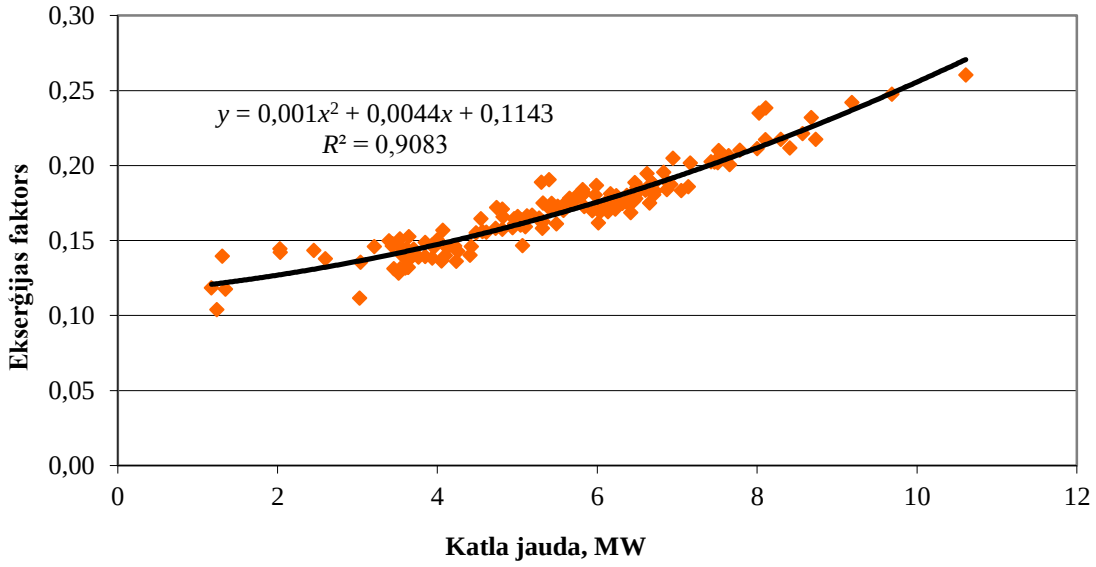
Ekserģijas zudumi siltumnesēja transportēšanas laikā ir atkarīgi no siltumnesēja temperatūras – jo lielāka temperatūra, jo mazāki ekserģijas zudumi, bet, no otras puses, – augstāka siltumnesēja temperatūra nozīmē lielākus siltuma zudumus.

Siltumnesēja transportēšanas laikā radušos zudumus var samazināt, izvēloties energoefektīvus cirkulācijas sūkņus ar nepieciešamo jaudu, kas spēj nodrošināt vajadzīgo spiedienu siltumtrasē. Otrs veids, kā samazināt elektroenerģijas patēriņu, ir frekvenču pārveidotāju uzstādīšana sūkņiem. Tādējādi ir iespējams mainīt sūkņa apgriezienu skaitu, nesamazinot lietderības koeficientu. Ar frekvenču pārveidotāju ir iespējams samazināt elektroenerģijas patēriņu par 30 %.



2.5. att. Ekserģijas faktora izmaiņas atkarībā no siltumapgādes tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūras starpības.

Pieaugot tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūru starpībai (skat. 2.5. att.), nelineāri pieaug ekserģijas faktors. Nelielu temperatūras starpību gadījumos ekserģijas faktors pieaug minimāli, bet straujāk tas pieaug, temperatūras starpībai pieaugot. No korelācijas koeficienta var secināt, ka temperatūras starpība starp tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūrām ļoti labi korelē ar ekserģijas faktoru.



2.6. att. Ekserģijas faktora izmaiņas atkarībā no katlumājas jaudas.

2.6. attēlā parādīta katla jaudas ietekme uz siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktoru. Kā redzams grafikā, ekserģijas faktors pieaug, palielinoties katla jaudai. Katla jauda ir atkarīga no tā, kādu temperatūru siltumnesējam ir jāsasniedz: jo lielāka siltumnesēja temperatūra, jo lielāka katla jauda ir nepieciešama. No tā var secināt, ka pie augstākas siltumnesēja temperatūras ir augstāks ekserģijas faktors. Šo saistību ļoti labi atspoguļo korelācijas koeficients R^2.

2.2. No Saules enerģijas iegūtās elektroenerģijas energoefektivitātes noteikšana pārtikas rūpniecībā

Pētījuma mērķis ir novērtēt no Saules enerģijas iegūtās elektroenerģijas izmantošanas potenciālu un CO_2 emisiju samazināšanas iespējas Kazahstānas un Latvijas pārtikas rūpniecībā.

Lai atrastu CO_2 emisiju samazināšanas iespējas, pētījumā analizēti vienas tautsaimniecības nozares – pārtikas rūpniecības – dati, balstoties uz indikatoru salīdzinājuma metodi. Pārtikas rūpniecības iespējas pētītas divu iemeslu dēļ: pirmkārt, šī rūpniecības nozare ir attīstīta katrā valstī, tāpēc ir iespējams līdzvērtīgs salīdzinājums, otrkārt, pārtikas nozarei ir plašs elektroenerģijas izmantošanas diapazons laikā.

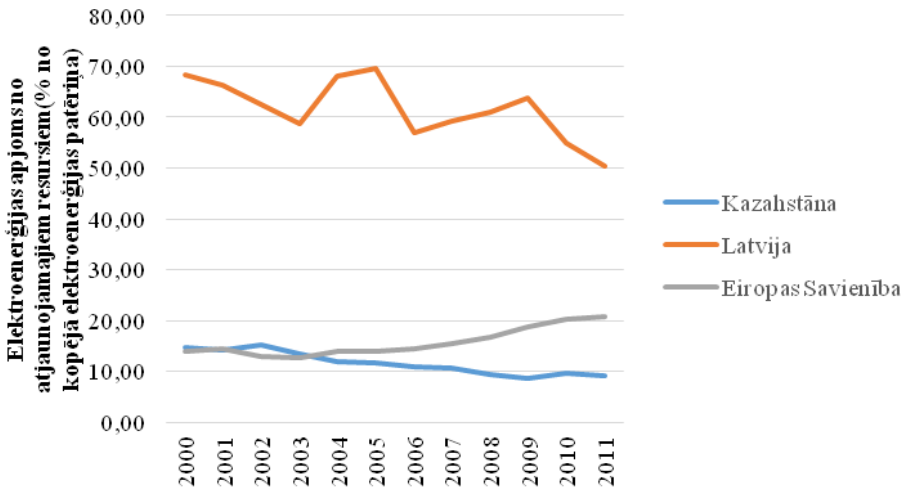
Pētījuma metodikā izmantots divu veidu indikatoru salīdzinājums:

1) enerģijas avota – atjaunojamās elektroenerģijas izmantošanas potenciāla noteikšana;
2) enerģijas lietotāja – pārtikas rūpniecības elektroenerģijas patēriņš.

Izmantojot šos divus indikatoru tipus, ir iespējams izvērtēt iespējas samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas un tādējādi mazināt ietekmi uz klimata pārmaiņām.

Zems energoefektivitātes līmenis rada gan enerģētiskās drošības, gan ilgtspējīgas attīstības, gan konkurētspējas riskus, savukārt šī līmeņa paaugstināšana ir ātrākais un

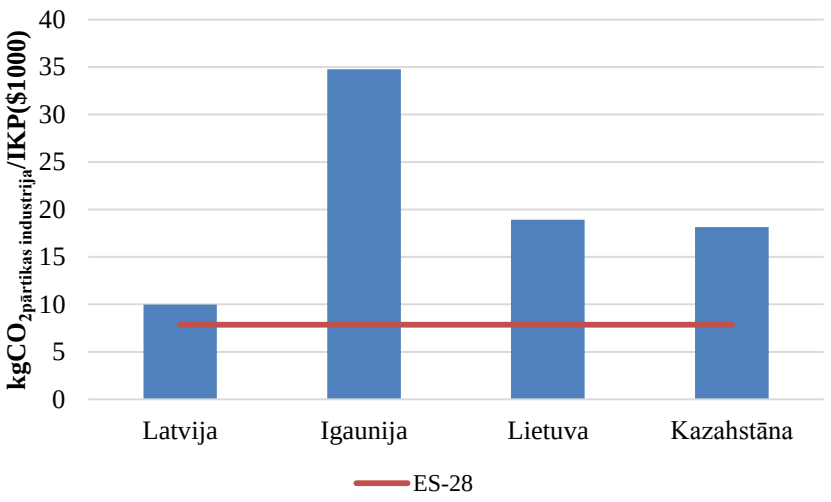
izmaksu ziņā efektīvākais risku samazināšanas veids, vienlaikus radot papildu darbavietas un veicinot ekonomisko izaugsmi. Tādēļ ir svarīgi apzināt katras valsts atjaunojamo energoresursu izmantošanas potenciālu un energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas. Šīs problēmas risināšanai nepieciešams analizēt līdzšinējās atjaunojamo energoresursu izmantošanas tendences elektroenerģijas ražošanā un to ietekmi uz CO_2 emisiju apjomu. Lai to objektīvi varētu novērtēt, atjaunojamo energoresursu izmantošanas potenciāla parametrus nepieciešams salīdzināt ar analoģiskiem rādītājiem citās valstīs. Pētījumā salīdzinātas Kazahstānas atjaunojamo energoresursu izmantošanas tendences ar analoģiskiem rādītājiem Latvijā, par vērtēšanas kritēriju ņemti Eiropas Savienības īpatnējie rādītāji.



2.7. att. Elektroenerģijas apjoms no atjaunojamajiem resursiem (% no kopējā elektroenerģijas patēriņa) [7].

2.7. attēlā redzama informācija par elektroenerģijas procentuālo daļu, kas iegūta no atjaunojamajiem resursiem kopējā saražotās elektroenerģijas apjomā. Latvijā saražotā elektroenerģija no atjaunojamajiem energoresursiem laika posmā no 2000. līdz 2011. gadam ir vairāk par 60 % no kopējā saražotās elektroenerģijas apjoma. Kazahstānā apskatītajā periodā elektroenerģijas daļa, kas iegūta no atjaunojamajiem energoresursiem, vidēji nokritās no 15 % uz 10 %. Savukārt Eiropas Savienībā šajā pašā laika periodā elektroenerģijas daļa no atjaunojamajiem resursiem pieauga no 15 % līdz 20 %.

2.8. attēlā redzama informācija par CO_2 emisiju apjomu no saražotās elektroenerģijas pārtikas rūpniecībā uz IKP. Analizējot rādītājus, var secināt, ka Kazahstānā CO_2 emisiju apjoms uz IKP pārtikas rūpniecībā ir aptuveni 2,3 reizes lielāks nekā Eiropas Savienībā, bet, salīdzinot ar Latvijas rādītājiem, tas ir 1,8 reizes lielāks. No Baltijas valstīm vislielākais CO_2 emisiju apjoms ir Igaunijā, savukārt Latvijā – viszemākais uz IKP pārtikas rūpniecībā.



2.8. att. CO_2 emisiju apjoms pārtikas rūpniecībā uz IKP [9]–[12].

CO_2 emisiju samazinājums, izmantojot no Saules enerģijas saražoto elektroenerģiju, aprēķināts pēc šādas formulas:

$$\Delta R_{CO2} = \frac{R^{el}_{CO2} E_{no\ tīkla} - R^{saule}_{CO2} E_{saule}}{E_{no\ tīkla} - E_{saule}}. \quad (2.2.)$$

$R^{el}_{CO_2}$ Latvijā ir 0,109 t_{CO2}/MWh[13], bet Kazahstānā – 0,485 t_{CO2}/MWh [14].

Kazahstānā un Latvijā Saules saražotās elektroenerģijas un energoefektivitātes ieviešanas potenciāla novērtēšanā tika pieņemts, ka no 2012. gada ar Saules saražoto elektroenerģiju tiks nosegts 10 % , un ar energoefektivitātes pasākumiem elektroenerģijas patēriņš tiks samazināts par 10 % elektroenerģijas patēriņa pārtikas rūpniecībā.

Pamatojoties uz iepriekšminēto formulu (2.2.) un pieņēmumiem, salīdzināts Latvijas un Kazahstānas CO_2 emisiju samazinājums uz katru pārtikas rūpniecībā patērēto elektroenerģijas kWh un IKP. Aprēķinu rezultāti apkopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Latvijas un Kazahstānas CO_2 emisiju samazinājums pārtikas rūpniecībā [9]–[12]

	Latvija			**Kazahstāna**		
	$kg_{CO2\ pārtikas\ industrija}$/IKP	$kg_{CO2}/kWh_{pārtikas\ industrija}$	$CO_{2pārtikas\ industrija}$, kt	$kg_{CO2\ pārtikas\ industrija}$/IKP	$kg_{CO2}/kWh_{pārtikas\ industrija}$	$CO_{2pārtikas\ industrija}$, kt
Pirms AER un EE ieviešanas	9,98	1,02	261,82	18,14	3,43	3031,88
Pēc AER un EE ieviešanas	9,78	1,00	256,51	17,64	3,33	2947,98
Samazinājuma ieguvums	**2,03 %**	**2,03 %**	**5,31**	**2,77 %**	**2,77 %**	**83,90**

2.1. tabulā redzama informācija par Saules elektroenerģijas un energoefektivitātes pasākumu ieviešanas ietekmi uz Latvijas un Kazahstānas pārtikas rūpniecības ekonomiskajiem indikatoriem. Par pamatu ņemti 2012. gada dati. Veicot šo datu salīdzinošo analīzi, var secināt, ka, aizstājot 10 % no fosilajiem energoresursiem saražotās elektroenerģijas ar Saules paneļiem saražoto elektroenerģiju un par 10 % paaugstinot

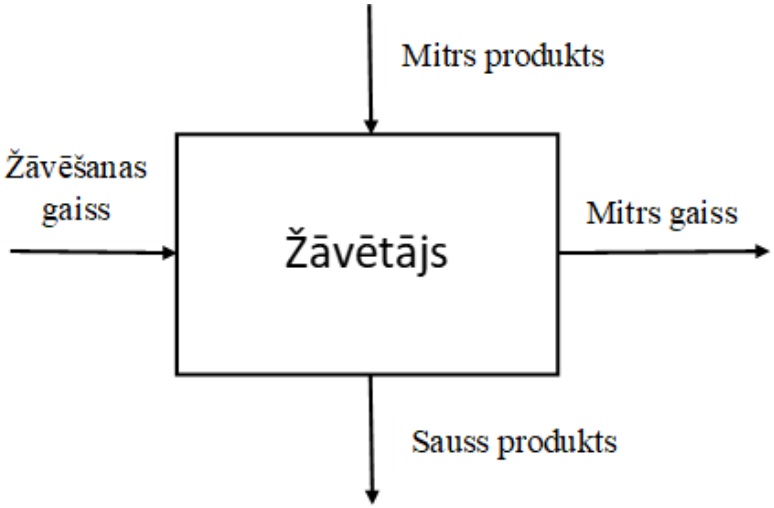
energoefektivitāti pārtikas rūpniecībā, ir iespējams samazināt CO_2 emisiju apjomu pārtikas rūpniecībā un ekonomikā kopumā.

2.3. Koksnes granulu žāvēšanas procesa enerģijas un ekserģētiskās efektivitātes noteikšana

Šajā pētījumā pētīts koksnes granulu žāvēšanas process ar enerģētisko un ekserģētisko analīzi. Lai uzlabotu ekspluatācijas apstākļus un sistēmas efektivitāti, veikta enerģētiskā un ekserģētiskā analīze par žāvēšanas procesu.

2.9. att. Metodoloģijas algoritms.

Algoritma (skat. 2.9. att.) pirmajā elementā identificēti žāvēšanas procesa dati, kas tiek analizēti ar enerģētisko un ekserģētisko bilanci. Nākamajā blokā analizēti uzlabošanas scenāriji, izmantojot enerģētiskās un ekserģētiskās bilances, piemēram, āra gaisa temperatūras ietekme uz žāvēšanas efektivitātei. Tālāk veikti enerģētiskās un ekserģētiskās bilances aprēķini, izmantojot iepriekšējo bloku datus.



2.10. att. Žāvēšanas process ar ieejošajām un izejošajām plūsmām.

Enerģētiskā bilance ietver pievadīto un izvadīto siltumenerģijas apjomu, kā arī siltuma zudumus žāvēšanas procesā. Žāvētājam pievadītās siltumenerģijas sastāvā ietilpst trīs enerģijas un masas plūsmas komponenti: žāvēšanas gaiss, produkts, ūdens produktā, kas ir atkarīgs no materiāla un tā mitruma. No žāvētāja novadītās siltumenerģijas sastāvā ietilpst četri enerģijas un masas plūsmas komponenti: gaiss ar augstu mitrumu, kas ir atkarīgs no tvaika satura gaisā, ūdens produktā, kas atkarīgs no materiāla mitruma, produkta un siltuma zudumiem no žāvētāja virsmas [15], [16]:

$$m_{\mathrm{a}}h_{1ž} + m_{\mathrm{p}}h_{\mathrm{p}_2} + m_{\mathrm{w}_2}h_{\mathrm{w}_2} = m_{\mathrm{a}}h_{3ž} + m_{\mathrm{p}}h_{\mathrm{p}_4} + m_{\mathrm{w}_4}h_{\mathrm{w}_4} + \dot{Q}_{\mathrm{zud}}. \quad (2.3.)$$

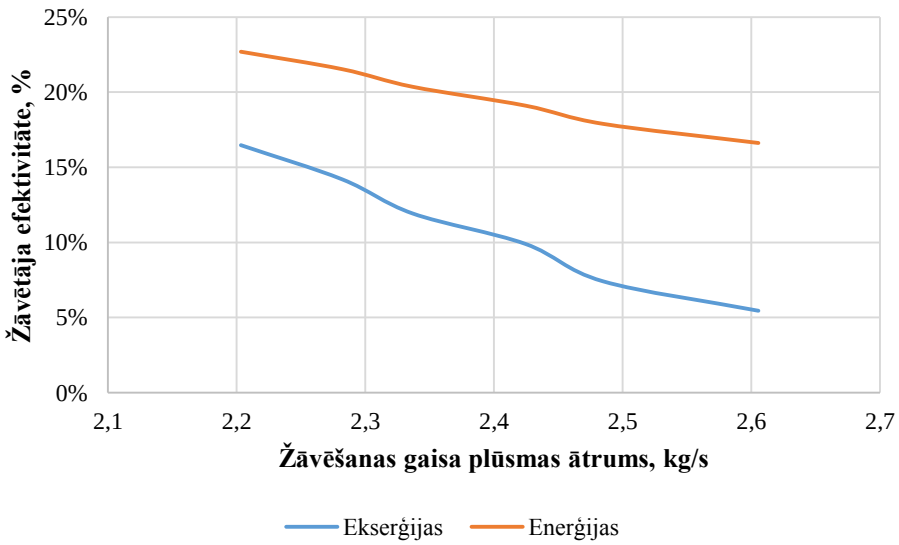
Ekserģētiskā bilance ietver ieejas un izejas ekserģiju, kā arī ekserģijas zudumus un noārdīšanās (*destruction*) žāvēšanas procesā. Žāvētājam pievadītā ekserģija ietver trīs ekserģijas un masas plūsmas komponentus: žāvēšanas gaisu, produktu, ūdeni produktā, kas ir atkarīgs no materiāla un produkta mitruma. Izejas ekserģija sastāv no pieciem komponenetiem: gaisa ar augstu mitrumu, kas ir atkarīgs no tvaika satura (gaisa mitrums) gaisā, ūdens produktā, kas ir atkarīgs no materiāla mitruma, produkta, ekserģijas zudumiem no žāvētāja un ekserģijas noārdīšanu (*destruction*) [15], [16]:

$$m_{\mathrm{a}}e_1 + m_{\mathrm{p}}e_{\mathrm{p}_2} + m_{\mathrm{w}_2}e_{\mathrm{w}_2} = m_{\mathrm{a}}e_3 + m_{\mathrm{p}}e_{\mathrm{p}_4} + m_{\mathrm{w}_4} + Ex_{\mathrm{zud}} + Ex_{\mathrm{noārd}}. \quad (2.4.)$$

Ekserģētiskās bilances aprēķinu metode tika pārbaudīta attiecībā uz koksnes šķeldas žāvētāju granulu ražošanā, lai analizētu žāvēšanas procesa efektivitātes atkarību no ekspluatācijas datiem: āra gaisa temperatūras, gaisa un gaisa masas plūsmas mitruma. Aprēķina metodoloģija ietver vairākus pieņēmumus:

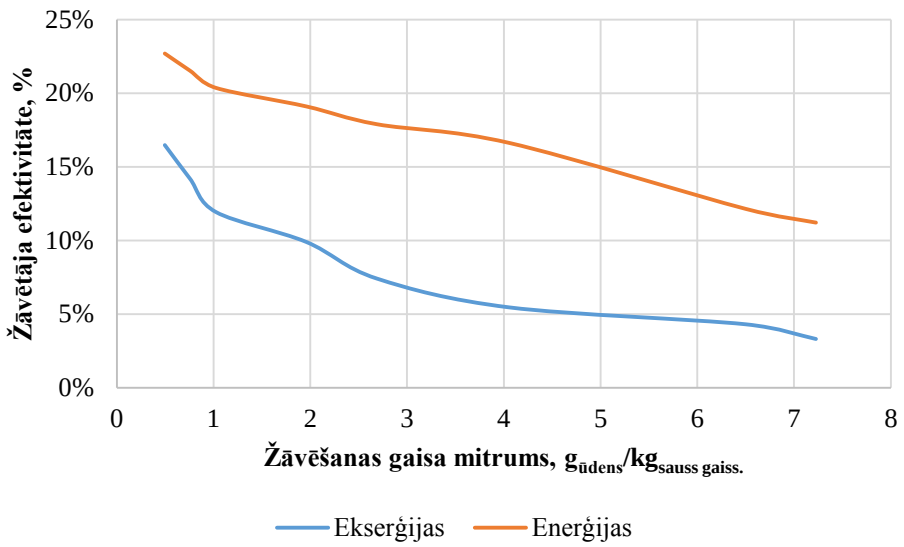
1) žāvēšanas gaisa temperatūra ir nemainīga 80 °C;
2) mitrā produkta mitrums ir nemainīgs 55 %;
3) žāvēšanas materiāla plūsmas ātrums nepārsniedz 1 t/h;
4) siltummainis gaisa žāvēšanai nepārsniedz 480 kW.

Koka žāvētāja enerģijas un ekserģētiskā efektivitāte aprēķināta, pamatojoties uz metodoloģijas nodaļā sniegtajiem enerģētiskās un ekserģētiskās bilances vienādojumiem un pieņēmumiem. Aprēķina rezultāti ir parādīti 2.11. un 2.12. attēlā.



2.11. att. Žāvētāja efektivitāte atkarībā no žāvēšanas gaisa plūsmas ātruma.

2.11. attēls atspoguļo enerģētiskās un ekserģētiskās efektivitātes izmaiņas atkarībā no žāvēšanas gaisa plūsmas. Pieaugot žāvēšanas gaisa plūsmai, samazinās enerģētiskā un ekserģētiskā efektivitāte, jo lielākai gaisa plūsmai ir nepieciešams pievadīt lielāku siltumenerģijas apjomu.

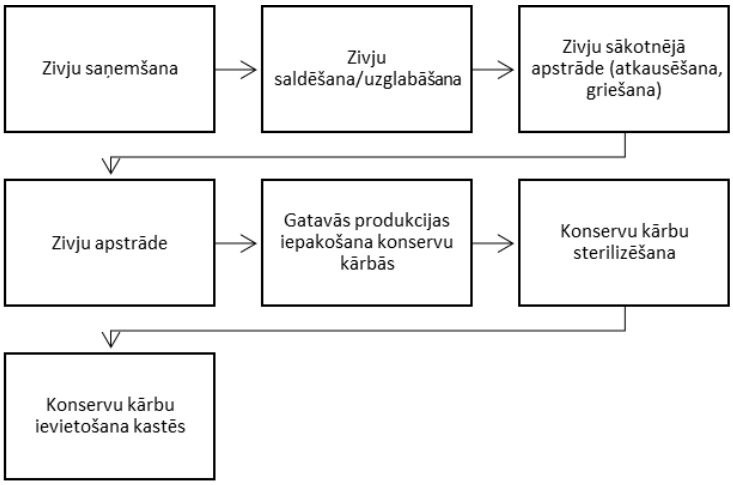


2.12. att. Žāvētāja efektivitāte atkarībā no žāvēšanas gaisa mitruma.

2.12. attēlā atspoguļotas enerģētiskā un ekserģētiskā efektivitātes izmaiņas atkarībā no gaisa mitruma. Samazinot žāvēšanas gaisa mitrumu pirms žāvētāja, palielinās enerģētiskā un ekserģētiskā efektivitāte. Tas ir tāpēc, ka žāvēšanas gaiss ar mazāku mitruma spēj piesaistīt vairāk mitruma no žāvēšanas produkta.

2.4. Energoefektivitātes noteikšana zivju saldēšanas procesos

Pētījumā aplūkots zivju apstrādes uzņēmums Latvijā. Zivju apstrādes shēma redzama 2.13. attēlā.



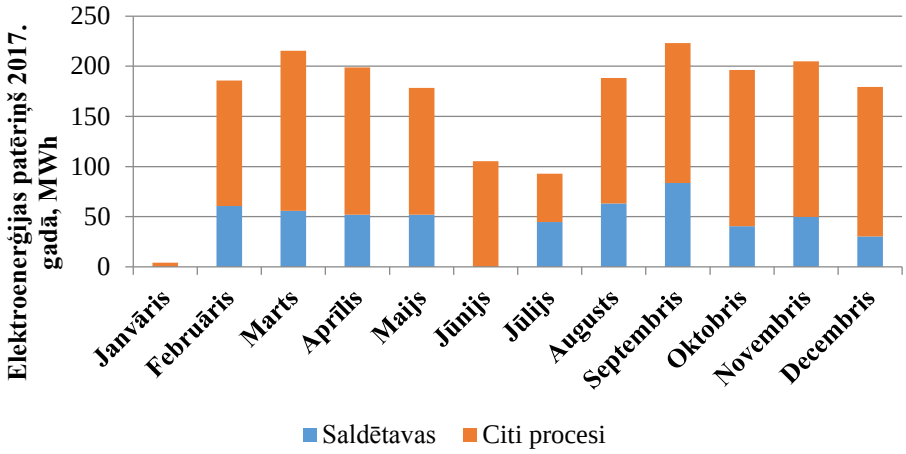
2.13. att. Zivju pārstrādes uzņēmuma principiālā shēma.

Zivju apstrāde uzņēmumā notiek septiņos posmos. Pirmajā posmā zivis iepērk no zvejniekiem vai sasaldētas zivis no citiem piegādātājiem. Otrajā posmā piegādātās zivis sasaldē vai arī uzglabā saldētavā līdz apstrādei. Trešajā posmā zivis atsaldē un sagriež, lai vēlāk termiski apstrādātu. Ceturtajā posmā zivis cep vai kūpina. Piektajā posmā termiski apstrādātās zivis iepako konservu kārbās. Sestajā posmā konservu kārbas termiski apstrādā ar

tvaiku un pēc tam atdzesē. Septītajā posmā konservu kārbas iepako kastēs, kas tālāk tiek nosūtītas tirgotājiem. Lai saprastu iespējas paaugstināt aukstuma ražošanas efektivitāti, sākta zivju pārstrādes uzņēmuma darbības analīze, lai izveidotu īpatnējā enerģijas patēriņa līmeņatzīmi un salīdzinātu ar līdzīgiem uzņēmumiem.

2.14. att. Zivju saldēšanas elektroenerģijas patēriņa analīzes algoritms.

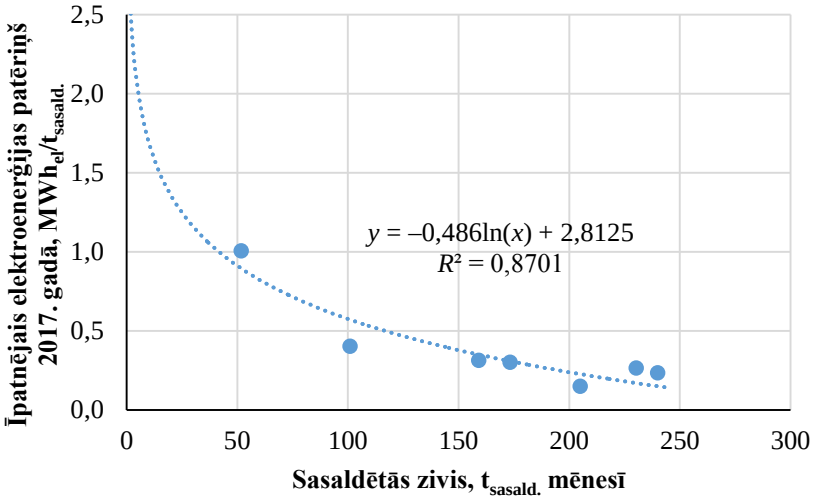
Metodikas algoritms (skat. 2.14. att.) sastāv no četriem blokiem. Pirmajā blokā ievāc datus par zivju saldēšanas iekārtu tehniskajiem un darbības parametriem. Otrajā blokā, balstoties uz iepriekš iegūtajiem datiem, aprēķina īpatnējo elektroenerģijas patēriņu uz saldēto zivju vienību. Trešajā blokā veic datu analīzi un salīdzina iegūtos rezultātus ar citiem zivju apstrādes uzņēmumiem. Pēdējā blokā tiek sniegti priekšlikumi par elektroenerģijas patēriņa samazināšanu zivju saldēšanā. Konkrētais pētījums veltīts pirmajam un otrajam solim – datu vākšanai, apstrādei un līmeņatzīmes izveidei.



2.15. att. Elektroenerģijas patēriņš zivju apstrādes uzņēmumā.

2.15. attēlā atspoguļoti dati par 2017. gada elektroenerģijas patēriņu konkrētā Latvijas zivju apstrādes uzņēmumā. Lielākais elektroenerģijas patēriņš ir no februāra līdz maijam un no augusta līdz decembrim. No grafikā redzamajiem datiem var secināt, ka elektrības patēriņš no saldētavām veido ievērojamu daļu no kopējā elektroenerģijas patēriņa.

Enerģijas patēriņš zivju pārstrādei ir atkarīgs no uzstādīšanas, aprīkojuma un procesa. Siltumenerģijai tiek izmantoti aptuveni 29 % no kopējās enerģijas konservu ražošanā, savukārt dzesēšanas un saldēšanas process veido aptuveni 16 % [17]. Konkrētajā gadījumā dzesēšana vidēji ir 24 %.



2.16. att. Īpatnējais elektroenerģijas patēriņš zivju saldēšanā.

2.16. attēlā redzami dati par saldēto zivju tonnu īpatnējo enerģijas patēriņu mēnesī. No datiem var secināt, ka īpatnējais elektroenerģijas patēriņš samazinās, palielinoties saldētu zivju daudzumam. Šo korelāciju apstiprina arī regresijas analīzes koeficients R^2, kura vērtība ir 0,87. Zivju saldēšanas vidējais elektroenerģijas patēriņš rūpnīcā ir 380 kWh uz tonnu produkta. No literatūras avotos pieejamās informācijas var secināt, ka elektroenerģijas patēriņš rūpnieciskajām saldētavām ir no 70 kWh līdz 130 kWh uz tonnu produkta [18], [19].

Pasākumi, ko varētu īstenot, lai samazinātu zivju saldēšanas enerģijas patēriņu:

1) kondensācijas temperatūras samazināšana var palielināt *COP* un samazināt enerģijas patēriņu; to var panākt, uzstādot piemērotu siltummaini, lai vasaras mēnešos sasniegtu pietiekami zemu kondensācijas temperatūru; zema kondensācijas temperatūra var tikt nodrošināta arī tad, ja kondensatora siltummainis ir tīrs un vecie tiek aizstāti ar jauniem [17];
2) ja aukstumaģenta iztvaikošanas temperatūra iztvaicētājam palielinās par 1 °C, *COP* palielinās par 4 %, savukārt saldēšanas jauda – par 6 % [17];
3) pārtikas rūpniecība bieži sastopas ar faktu, ka saldētava netiek izmantota saldēšanas produktu trūkuma dēļ; šajos bezdarbības periodos saldētavā ir nepieciešams uzturēt pietiekami zemas temperatūras, lai piegādes gadījumā produktus varētu ātri sasaldēt; to var izdarīt, izmantojot frekvences pārveidotājus ar zemu ātrumu iztvaicētāja ventilatoru; Frekvences pārveidotāji ļauj samazināt ventilatora jaudu, nemazinot to efektivitāti [17].

2.5. Tīrākas ražošanas pasākumu enerģētiskā analīze zivju pārstrādē

Konkrētā pētījuma mērķis ir novērtēt uzņēmuma pašreizējo stāvokli, ko var izmantot kā bāzes scenāriju turpmākai optimizācijai. Iegūtie dati no uzņēmuma ir mēneša dati 2016. un 2017. gadā.

Datu analīzes mērķis bija veikt materiālu un enerģijas plūsmas analīzi un noskaidrot, kādas ir saiknes starp izejvielām, enerģiju (siltumu un elektrību), ūdeni un ražošanu. Tas tika darīts, aprēķinot konkrētus darbības rādītājus:

1) īpatnējais elektroenerģijas patēriņš (MWh_{el}/t no neto produkcijas);
2) īpatnējais ūdens patēriņš (m^3/t no neto produkcijas);
3) īpatnējais siltuma patēriņš (MWh_{th}/t neto ražošanā).

Lai novērtētu aprēķinātos rādītājus, tie iespēju robežās tika salīdzināti ar vērtībām, kas pieejamas labāko pieejamo tehnoloģiju dokumentos, piemēram, viens no dokumentiem, kas tika izmantots par informācijas avotu, bija Labākās pieejamās tehnoloģijas zivju apstrādes rūpniecībā: Ziemeļvalstu perspektīva [20].

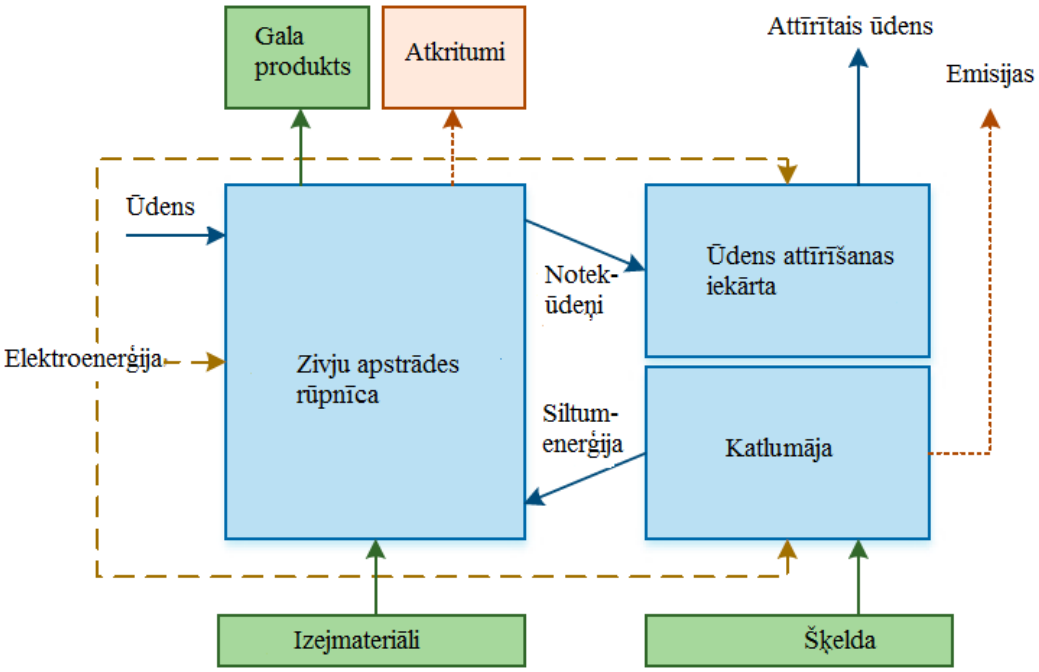
Analizētais zivju pārstrādes uzņēmums dibināts 1949. gadā un atrodas Latvijas ziemeļu daļā, Rīgas jūras līča piekrastē. Uzņēmuma galvenā darbības joma ir zivju konservu ražošana, kūpinātas zivis un grauzdētas zivis. Citi ražotie produkti ir zivju bumbiņas un zivju pastēte. Galvenās zivju sugas, ko izmanto konservētu produktu ražošanā, ir Baltijas brētliņas un siļķes. 2.17. attēlā parādīti daži zivju apstrādes procesi analizētajā uzņēmumā.

(a) (b)

2.17. att. Pētāmais zivju apstrādes uzņēmums: (a) zivju šķirošana, (b) zivju cepšana.

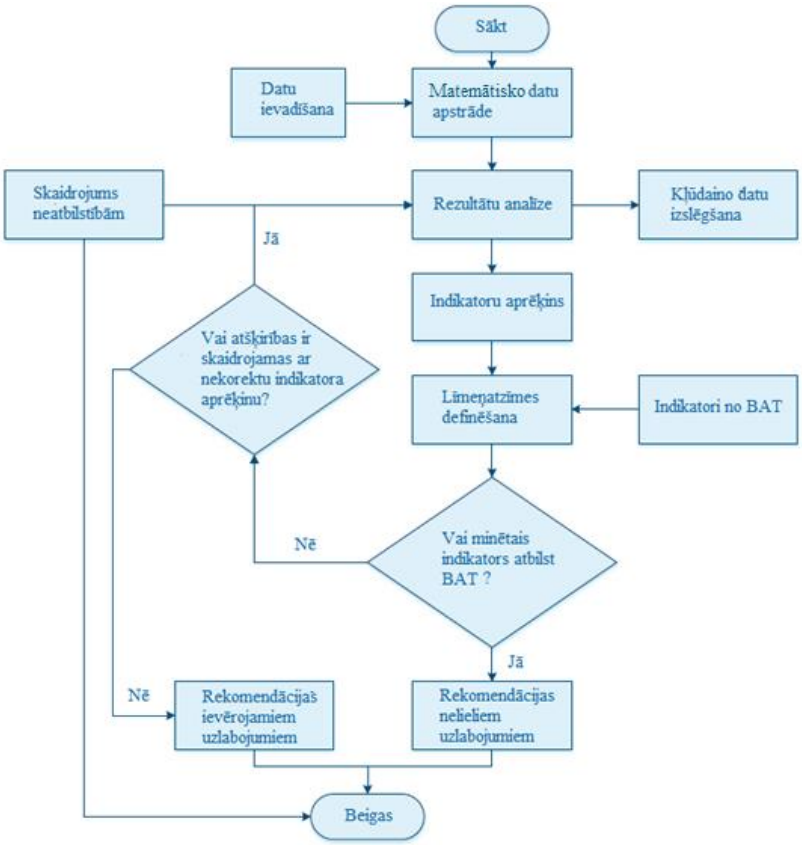
Baltijas brētliņas veido aptuveni 64 % no kopējā zivju patēriņa 2017. gadā, reņģes – 17 %, Atlantijas okeāna zivis – 19 %. Neapstrādāto zivju patēriņš 2017. gadā bija 2856 t. Kopējā produkcija 2017. gadā ir 12 342 t (ieskaitot iepakojumu), no šīs summas zivju neto svars galaproduktā bija 2593 t.

2.18. attēlā parādīta analizētā zivju pārstrādes uzņēmuma vienkāršota shēma. Uzņēmumā ir trīs galvenie komunālie pakalpojumi: ražošanas uzņēmums, katlumāja un notekūdeņu attīrīšana.



2.18. att. Vispārīgā zivju apstrādes uzņēmuma darbības shēma.

Galvenās plūsmas starp objektiem ir resursi, materiāli, enerģija (siltums un elektrība) un ūdens. Procesi, kas notiek ražotnē, ir tīrīšana, saldēšana, atkausēšana, šķirošana, kūpināšana un cepšana, iepakošana kārbās, aizzīmogošana, mazgāšana, kārbu sterilizācija, etiķešu pievienošana, iepakošana kastēs.



2.19. att. Datu analīzes metodoloģijas plūsmas diagramma.

2.19. attēlā parādīta pētījumā izmantotā datu analīzes diagramma. Datu analīze sākas ar datu iegūšanu un matemātisko datu apstrādi, lai sakārtotu no uzņēmuma saņemtos datus. Tad procedūra turpinās ar datu analīzi, kurā nav iekļauti dati, kas nav piemēroti analīzei, piemēram, datus var izņemt no analīzes, ja tie neatbilst ražošanai. Pēc tam konkrētus darbības rādītājus var aprēķināt, saistot konkrētus un atbilstošus mainīgos lielumus. Pēc tam, kad vien iespējams, aprēķinātie rādītāji tiek salīdzināti ar Labāko pieejamo tehnoloģiju indikatoru vērtībām zivju pārstrādē.

Iegūtie dati tika pārbaudīti, lai noskaidrotu, vai ir kādi nepiemēroti dati (kas nav saistīti ar ražošanu), ko nevajadzētu iekļaut analīzē. Statistiskā analīze ietver specifisku rādītāju aprēķināšanu, kā arī korelācijas un regresijas analīzi starp dažādiem parametriem. Regresijas analīzes rezultāti ir cieši saistīti ar datu kvalitāti. Pētījumā veikta multikritēriju analīze, izmantojot datu analīzes rīku *STATGRAPHICS Plus*. Multikritēriju analīze veikta, lai novērtētu, kā zivju produkcijas dažādība ietekmē konkrētu elektroenerģijas patēriņu. Kopumā multikritēriju analīzē tiek izmantoti 18 datu punkti no dažādu mēnešu datiem. Daži mēneši ir izslēgti no analīzes, jo šajos mēnešos ražošana nenotika. Regresijas analīzē ir viens atkarīgais mainīgais un pieci neatkarīgie mainīgie (dažādi produkti). Uzņēmums ražo aptuveni 190 dažādu produktu. Lai veiktu statistisko analīzi, produktu apjoms ir samazināts līdz pieci. Grupēšana ir veikta, pamatojoties uz izmantoto zivju apstrādes tehniku.

Uzstādītā modeļa multikritēriju analīzes vienādojums (2.5.) ir šāds:

$$E_{\mathrm{el}} = 0{,}855 - 0{,}000916a - 0{,}00171b - 0{,}00239c - 0{,}00587d_{\mathrm{ziv}} - 0{,}0022e. \qquad (2.5.)$$

Saskaņā ar regresijas analīzi ir konstatējama statistiski nozīmīga attiecība starp mainīgajiem lielumiem 99 % ticamības līmenī. R^2 ir 75,4 %, koriģētais R^2, kas ir vairāk piemērots dažādu modeļu salīdzināšanai, ir 65,1 %.

p vērtības koeficientam a un koeficientam b jābūt >0,05, kas nozīmē, ka šīs vērtības neatbilst 95 % ticamības intervālam. Augstākā p vērtība atbilst koeficientam a, un tā atbilst 74 % ticamības līmenim. Saskaņā ar modeli tika ierosināts izslēgt šo neatkarīgo mainīgo no analīzes, bet, ņemot vērā, ka tās ir kūpinātas zivis, kas atbilst lielākai daļai produkcijas, tika nolemts šo mainīgo modelī atstāt. Iemesls, kas varētu izskaidrot, kāpēc kūpinātas zivis nav nozīmīgas, ir tas, ka siltumenerģijas patēriņam ir svarīgāka loma kūpināto zivju ražošanā (siltums un dūmi). Tomēr saistībā ar to, ka nebija pietiekami daudz siltuma patēriņa datu, nebija iespējams veikt vairākkārtējas regresijas analīzi.

2.2. tabula

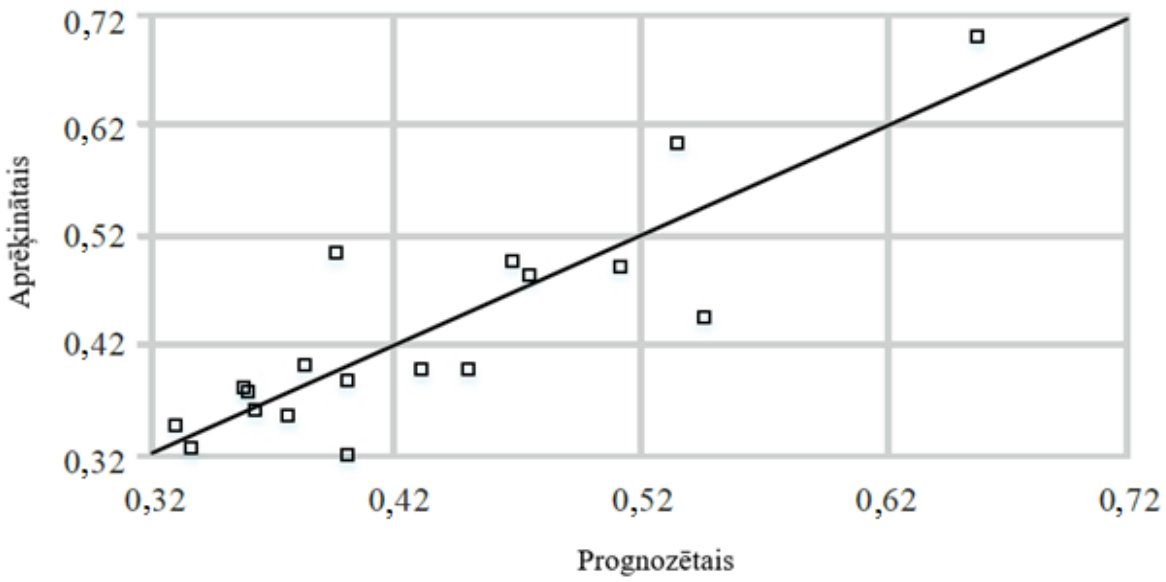
Korelācijas matrica koeficientu aprēķiniem

Koef.	Konstante	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*
Konstante	1,0000	–0,7549	–0,1047	–0,4313	0,0509	–0,1331
a	–0,7549	1,0000	–0,1509	0,0581	–0,4264	–0,2498
b	–0,1047	–0,1509	1,0000	–0,1132	0,0193	–0,2155
c	–0,4313	0,0581	–0,1132	1,0000	0,2911	0,1286
d	0,0509	–0,4264	0,0193	0,911	1,0000	0,0162
e	–0,1331	–0,2498	–0,2155	0,1286	0,0162	1,0000

Kā redzams korelācijas matricā (2.2. tabula), visas absolūtās korelācijas vērtības nav lielākas par 0,5, tādēļ nav nopietnas multikolinearitātes. Attiecību starp novērotajām un prognozētajām vērtībām (aprēķinātas pēc vienādojuma) var redzēt 2.20. attēlā.

Kā redzams 2.20. attēlā, vienādojumā aprakstīti novērotie un prognozētie (aprēķināti ar regresijas vienādojumu) dati. Iegūto vienādojumu var izmantot, lai prognozētu elektroenerģijas patēriņu dažādos ražošanas procesos.

Izpētes gaitā veikta multikritēriju analīze, lai novērtētu, kā atšķirīgi produkti (neatkarīgi mainīgie) ietekmē elektroenerģijas patēriņu (atkarīgo mainīgo) ražošanas procesā. Iegūtais daudzkārtējās regresijas vienādojums paredz konkrētu elektroenerģijas patēriņu dažādos ražošanas apstākļos. Iegūtais vienādojums apraksta 75 % no analizētajiem datiem (R^2 = 0,754), un to var izmantot kā bāzes scenāriju turpmākai analīzei.

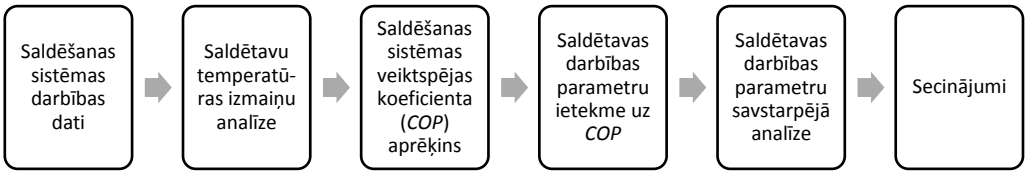


2.20. att. Īpatnējā elektroenerģijas patēriņa vērtība (MWh_{el}/t tīrā ražošanā) – prognozēts, salīdzinot ar novērotajām vērtībām.

2.6. Parametru, kas ietekmē elektroenerģijas patēriņu zivju saldēšanā, analīze

Šajā pētījumā aplūkota Latvijas zivju apstrādes uzņēmuma saldētavu darbība. Uzņēmuma īpašumā ir sešas saldētavas. Divas saldētavas izmanto zivju saldēšanai, četras – sasaldēto zivju un gatavās produkcijas uzglabāšanai. Visu saldētavu darbību nodrošina piecu divpakāpju kompresori un trīs vienpakāpes kompresori. Parasti strādā viens divpakāpju vai/un viens vienpakāpes kopresors. Vienpakāpes kompresorus izmanto, lai nodrošinātu nepieciešamās temperatūras saldētavās, kurās uzglabā sasaldētās zivis un gatavo produkciju. Savukārt divpakāpju kompresorus izmanto, lai uzturētu temperatūras saldētavās, kurās sasaldē svaigās zivis. Kompresoros par aukstumnesēju izmanto amonjaku, kondensatoru un kompresoru dzesēšanai izmanto vietējās upes ūdeni.

Pētījumā analizēts elektroenerģijas patēriņš zivju saldēšanai un sasaldēto zivju un gatavās produkcijas uzglabāšanai, kā arī kompresoru *COP* un faktori, kas ietekmē *COP* vērtību.



2.21. att. Zivju saldēšanas elektroenerģijas patēriņa analīzes algoritms.

Algoritms sastāv no sešiem blokiem (sk. 2.21. att.). Pirmajā blokā tiek apkopoti sasaldēšanas sistēmas tehniskie un ekspluatācijas parametri. Otrajā blokā, pamatojoties uz iepriekš apkopotajiem datiem, veikta saldētavas temperatūras analīze. Trešajā blokā aprēķināts kompresora bloka veiktspējas koeficients jeb *COP*. Ceturtajā blokā veikta kompresora *COP* datu analīze, salīdzinot ar ekspluatācijas parametriem, piemēram, spiediens kondensatorā un amonjaka tvaiku temperatūra pēc kompresora. Piektajā blokā tiek veikta saldētavas darbības parametru savstarpējā analīze. Pēdējā blokā tiek sagatavoti secinājumi.

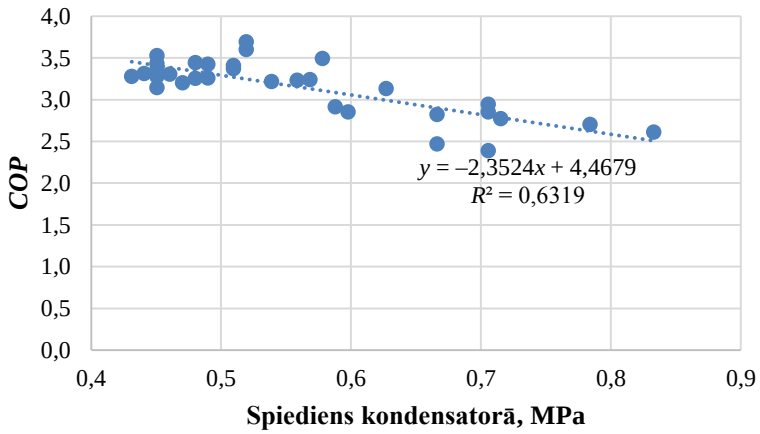
Saldēšanas sistēmas veiktspējas koeficienta jeb *COP* aprēķins vienpakāpes kompresoram [21], [22]:

$$COP = \frac{h_{1_{NH3}} - h_{5_{NH3}}}{h_{2_{NH3}} - h_{1_{NH3}}} \tag{2.6.}$$

Saldēšanas sistēmas veiktspējas koeficienta jeb *COP* aprēķins divpakāpju kompresoram [21], [22]:

$$COP = \frac{h`_{1_{NH3}} - h`_{10_{NH3}}}{h`_{2_{NH3}} - h`_{1_{NH3}} + \frac{\left(h`_{2_{NH3}} - h`_{9_{NH3}}\right)\left(h`_{5_{NH3}} - h`_{3_{NH3}}\right)}{h`_{3_{NH3}} - h`_{8_{NH3}}}} \tag{2.7.}$$

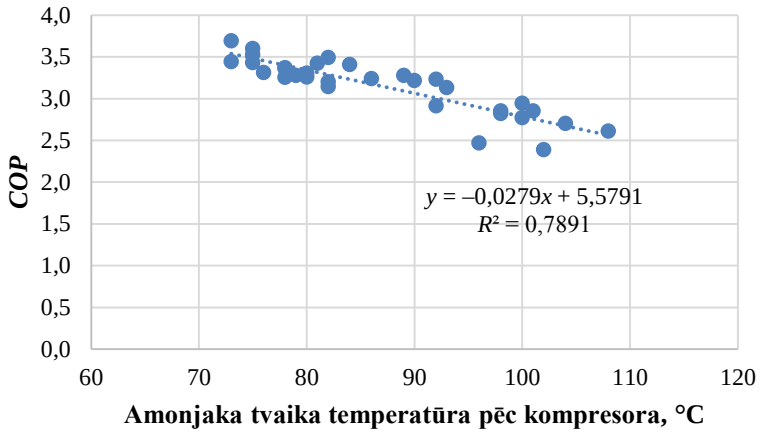
Turpmākajās diagrammās analizēts divpakāpju un vienpakāpes kompresora *COP*, kad mainās dažādi parametri, kas saistīti ar kompresora darbību.



2.22. att. Divpakāpju kompresora *COP* atkarībā no spiediena kondensatorā.

Ņemot vērā divpakāpju kompresoru darbības datus un termodinamisko ciklu, aprēķināta kompresora efektivitāte jeb *COP* (sk. 2.22. att.). Aprēķinu rezultāti liecina, ka divpakāpju kompresora efektivitātes koeficients jeb *COP* svārstās no 2,4 līdz 3,7. No attēlā redzamajiem datiem var secināt, ka *COP* ietekmē spiediens kondensatorā – jo lielāks spiediens kondensatorā, jo mazāks *COP*, un otrādi.

Korelācijas koeficients parāda, ka pastāv sakarība starp kompresora efektivitāti un spiedienu kondensatorā. Līdz ar to grafikā norādītais vienādojums izmantojams kompresora efektivitātes prognozēšanai pie konkrētā kondensatora spiediena, kur "*x*" apzīmē spiedienu kondensatorā, "*y*" – kompresora efektivitāti jeb *COP*.

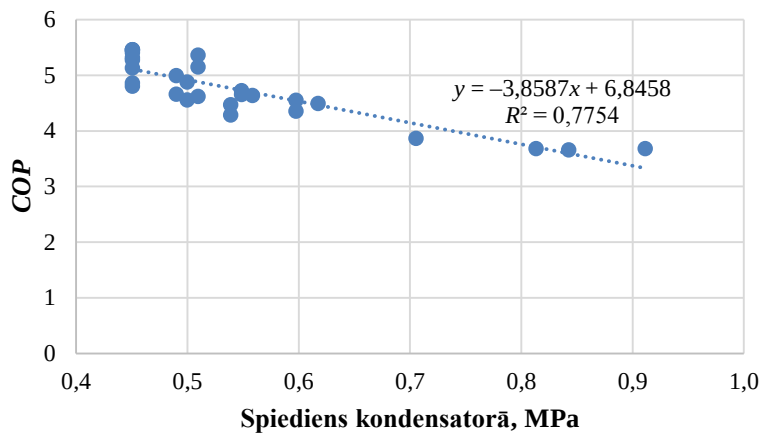


2.23. att. Divpakāpju kompresora *COP* atkarībā no amonjaka tvaika temperatūras pēc kompresora.

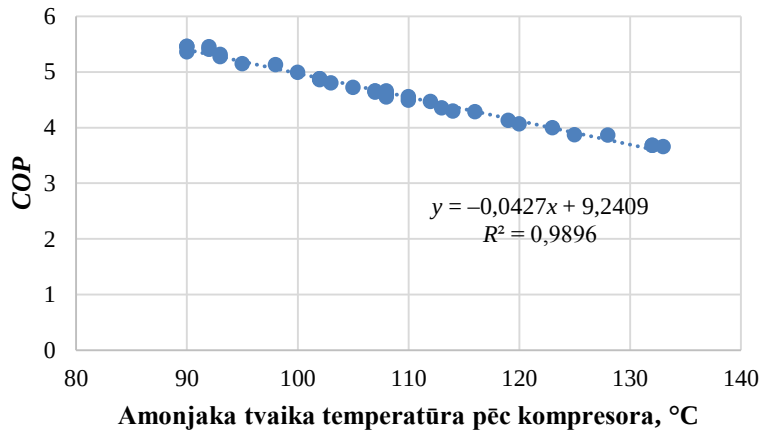
2.23. attēlā parādīta amonjaka tvaiku temperatūras pēc kompresora rezultātu ietekme uz kompresora *COP*. No rezultātiem var secināt, ka amonjaka temperatūra pēc kompresora palielinās, savukārt kompresora *COP* – samazinās. Šo korelāciju apstiprina arī korelācijas koeficients *R*. *COP* samazinās, tāpēc elektroenerģijas patēriņš, lai saražotu vienu aukstumenerģijas vienību, palielinās. Līdz ar to grafikā norādītais vienādojums izmantojams kompresora efektivitātes prognozēšanai pie konkrētām amonjaka tvaika temperatūrām pēc kompresora, kur "*x*" apzīmē amonjaka temperatūru pēc kompresora, "*y*" – kompresora efektivitāti jeb *COP*.

Pamatojoties uz vienpakāpes kompresora darbības datiem un termodinamisko ciklu, veikti kompresora efektivitātes jeb *COP* aprēķini. No aprēķinu rezultātiem (skat. 2.24. att.) var secināt, ka vienpakāpes kompresora efektivitātes koeficients jeb *COP* svārstās no 3,7 līdz 5,5. No attēlā redzamajiem datiem var secināt, ka *COP* ietekmē spiediens kondensatorā – jo lielāks spiediens kompresorā, jo mazāks *COP*, un otrādi.

Korelācijas koeficients parāda, ka pastāv sakarība starp kompresora efektivitāti un spiedienu kondensatorā. Līdz ar to grafikā norādītais vienādojums izmantojams kompresora efektivitātes prognozēšanai pie konkrētā kondensatora spiediena, kur "*x*" apzīmē spiedienu kondensatorā, "*y*" – kompresora efektivitāti jeb *COP*.



2.24. att. Vienpakāpes kompresora *COP* atkarībā no spiediena kondensatorā.



2.25. att. Vienpakāpes kompresora *COP* atkarībā no amonjaka tvaika temperatūras pēc kompresora.

2.25. attēlā parādīta amonjaka tvaiku temperatūras rezultātu pēc kompresora ietekme uz kompresora *COP*. No rezultātiem var secināt, ka amonjaka temperatūra pēc kompresora palielinās, kompresora *COP* samazinās. Šī korelācija apstiprināta ar korelācijas koeficienta *R* augsto vērtību. *COP* samazinās, tāpēc elektroenerģijas patēriņš, veidojot vienu aukstās enerģijas vienību, palielinās.

2.7. Zivju saldēšanas darbības parametru izpēte, izmantojot ekserģētisko analīzi

Uzņēmuma situācijas izpēte veikta par periodu no 09.2017. līdz 05.2018. Rūpnīcā izmanto sešas saldētavas: divas saldētavas izmanto zivju saldēšanai pie temperatūras –32 °C, divas saldētavas – sasaldēto zivju uzglabāšanai pie temperatūras no –18 °C līdz –20 °C, divas saldētavas – pusfabrikātu uzglabāšanai pie temperatūras ~0 °C. Rūpnīca svaigās zivis iepērk no vietējiem zvejniekiem, bet trūkstošo zivju apjomu – no citiem piegādātājiem sasaldētā veidā. Svaigās zivis sākotnēji sasaldē pie temperatūras –32 °C, pēc tam pārvieto uz saldētavu,

kurā uzglabā sasaldētās zivis. Savukārt iepirktās sasaldētās zivis uzreiz ievieto sasaldēto zivju uzglabāšanas saldētavā.

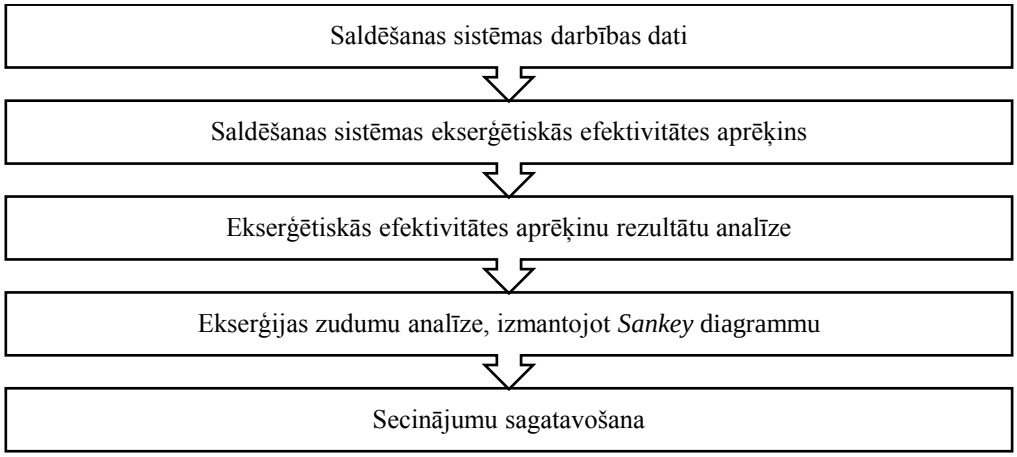
Visu saldētavu darbību nodrošina pieci divpakāpju kompresori un trīs vienpakāpju kompresori. Parasti strādā viens divpakāpju un/vai viens vienpakāpju kompresors. Vienpakāpju kompresoru izmanto, lai uzturētu nepieciešamo temperatūru saldētavās, kurās uzglābā sasaldētās zivis. Divpakāpju kompresoru izmanto, lai uzturētu temperatūru saldētavās, kurās saldē svaigās zivis.

Kompresoros par aukstumnesēju izmanto amonjaku, kondensatora un kompresoru dzesēšanai izmanto vietējās upes ūdeni.

Kompresora darbības parametrus reģistrē žurnālā. Žurnālā ik pēc divām stundām pieraksta šādus datus:

1) amonjaka temperatūru pirms un pēc divpakāpju kompresora pakāpēm un staptrauka spiedienu;
2) amonjaka temperatūra pirms un pēc vienpakāpju kompresora;
3) ūdens temperatūru pirms un pēc kompresora un kondensatora, kā arī amonjaka kondensācijas spiedienu;
4) saldētavu temperatūru;
5) ārgaisa temperatūru;
6) uz saldētavu iztvaikotājiem padodamā amonjaka temperatūru.

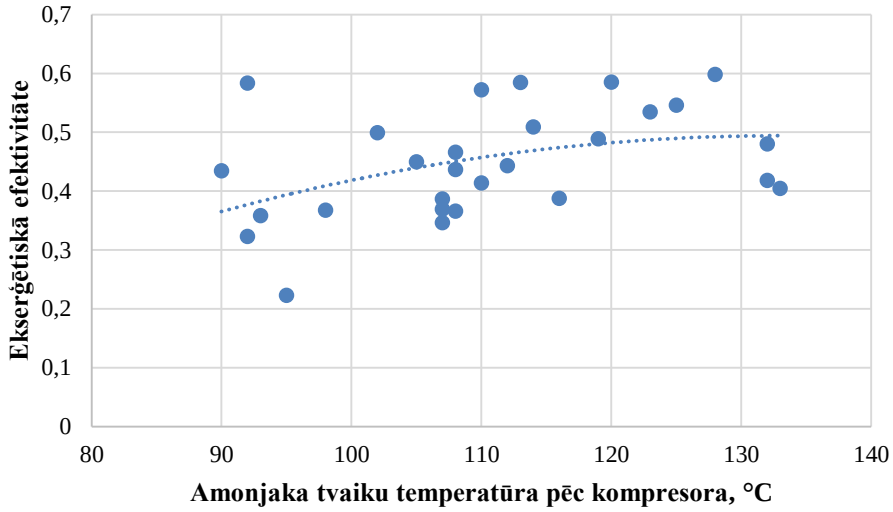
Pētījumā aprēķināta saldēšanas sistēmas ekserģētiskā efektivitāte un zudumi, kā arī analizēti parametri, kas ietekmē ekserģētisko efektivitāti un zudumus.



2.26. att. Saldēšanas sistēmas ekserģētiskās efektivitātes analīzes algoritms.

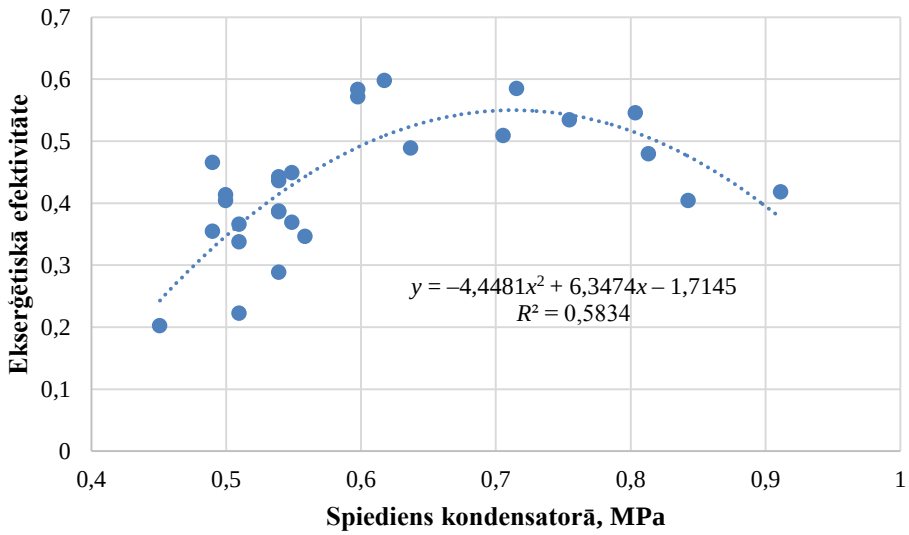
Algoritms sastāv no pieciem blokiem. Pirmajā blokā apkopoti dati par saldēšanas sistēmas tehniskajiem un ekspluatācijas parametriem. Otrajā – aprēķināta ekserģētiskā efektivitāte vienpakāpes un divpakāpju kompresoru saldēšanas sistēmai. Trešajā blokā veikta saldēšanas sistēmas ekserģētiskās efektivitātes rezultātu analīze. Ceturtajā – ekserģijas zudumu datu analīze vienpakāpju un divpakāpju saldēšanas sistēmā, izmantojot *Sankey* diagrammu. Pēdējā blokā veikta secinājumu sagatavošana.

Turpmākajos grafikos analizēta ekserģētiskā efektivitāti un zudumi vienpakāpju un divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmā.



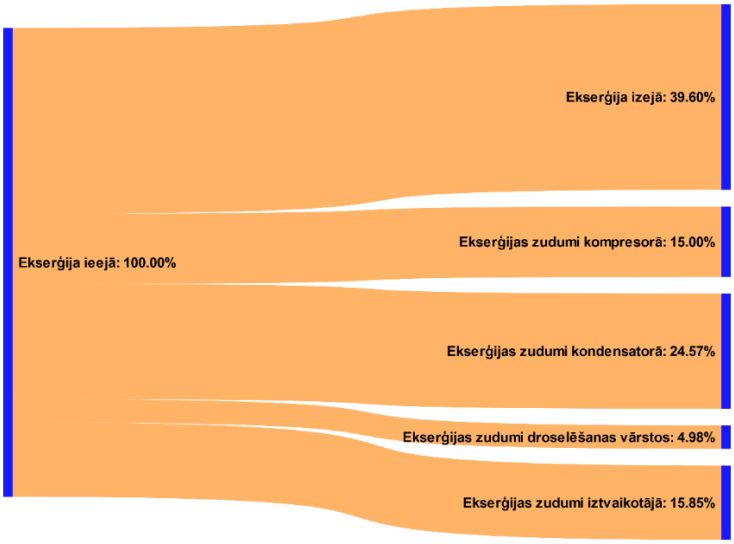
2.27. att. Vienpakāpes kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskā efektivitāte atkarībā no amonjaka tvaiku temperatūras pēc kompresora.

2.27. attēlā redzama informācija par vienpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiksās efektivitātes izmaiņām atkarībā no amonjaka tvaiku temperatūras pēc kompresora. No šīs informācijas var secināt, ka ekserģētiskā efektivitāte pieaug, palielinoties amonjaka tvaiku temperatūrai pēc kompresora. Amonjaka tvaika temperatūras pēc kompresora pieaugums ir skaidrojams ar kompresorā iesūktā amonjaka tvaika daudzumu, kas gada siltākajos mēnešos ir lielāks nekā aukstākajos mēnešos. Otrs iemesls amonjaka temperatūras pēc kompresora pieaugumam ir dzesējamā ūdens temperatūras pieaugums, ar ko nodrošina kompresora dzesēšanu. Ekserģētiskā efektivitāte maksimālo vērtību 0,6 sasniedz pie amonjaka tvaika temperatūras 128 °C. Amonjaka temperatūrai pārsniedzot 128 °C, ekserģētiskā efektivitāte samazinās.



2.28. att. Vienpakāpes kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskā efektivitāte atkarībā no spiediena kondensatorā.

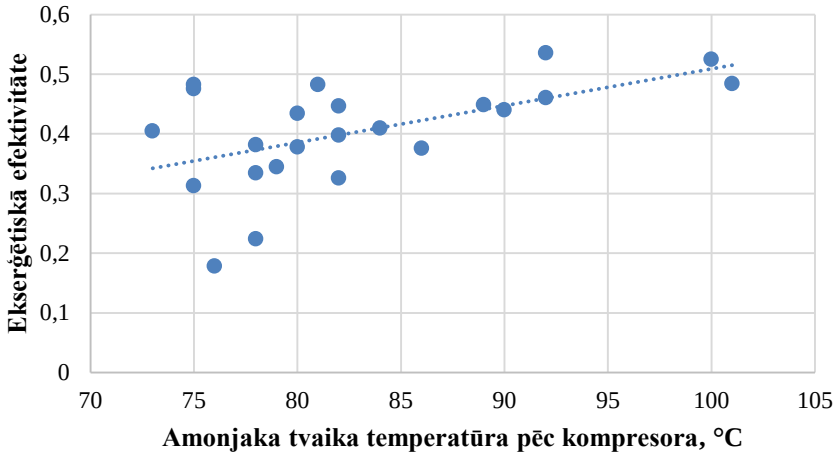
2.28. attēlā redzama informācija par vienpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskās efektivitātes izmaiņām atkarībā no spiediena kondensatorā. No šīs informācijas var secināt, ka ekserģētiskā efektivitāte pieaug, palielinoties spiedienam kondensatorā līdz 0,72 MPa, bet samazinās, pārsniedzot 0,72 MPa spiedienu kondensatorā. Spiediena pieaugums kondensatorā ir skaidrojams ar kondensatora dzesēšanai paredzētā ūdens temperatūras pieaugumu. Savukārt ekserģētiskās efektivitātes kritums, kad kondensatora spiediens pārsniedz 0,72 MPa, ir skaidrojams ar to, ka kondensatora dzesēšanai pievadītā temperatūra ir augsta, bet apkārtējās vides temperatūra samazinās. Šī situācija ir raksturīga rudens mēnešiem, kad apkartējās vides temperatūra ir zemāka nekā ūdens, ko izmanto kondensatora dzesēšanai, temperatūra. Ekserģētiskā efektivitāte maksimālo vērtību 0,6 sasniedz pie spiediena kondensatorā 0,62 MPa.



2.29. att. Ekserģijas zudumi vienpakāpes kompresora saldēšanas sistēmā.

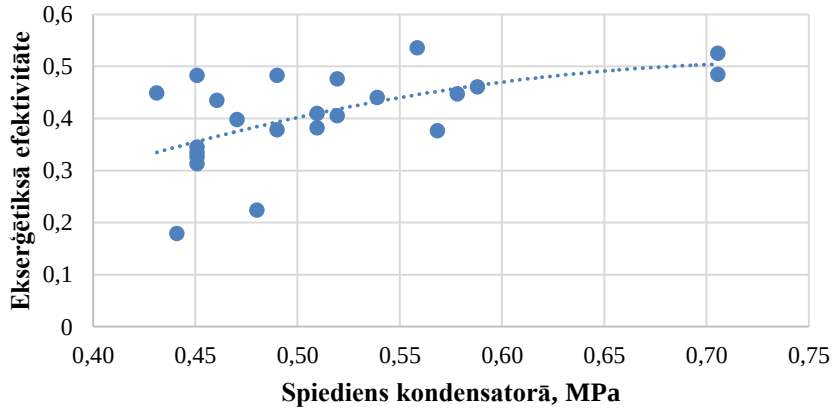
2.29. attēlā redzama informācija par vidējo ekserģijas apjomu un ekserģijas noārdīšanos (*destruction*) vienpakāpju kompresora saldēšanas sistēmā. Lielākā ekserģijas noārdīšanās (*destruction*) noris kondensatorā, kam seko iztvaikotājs ar 15,85 % un kompresors ar 15 %, savukārt vismazākā ekserģijas noārdīšanās (*destruction)* 4,98 % noris izplešanās vārstos. Ekserģijas apjoms saldēšanas sistēmā ir 39,6 %.

Ekserģijas zudumu apjoms sistēmas elementos ir atkarīgs no apkārtējās vides temperatūras un entropijas pieauguma procesa laikā. Ņemot vērā, ka apkārtējās vides temperatūru nevar mainīt, savukārt entropijas pieaugumu – var, jāizvēlas tādas iekārtas vai procesu nodrošināšanas režīmi, kas samazina entropijas pieaugumu.



2.30. att. Divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskā efektivitāte atkarībā no amonjaka tvaiku temperatūras pēc kompresora.

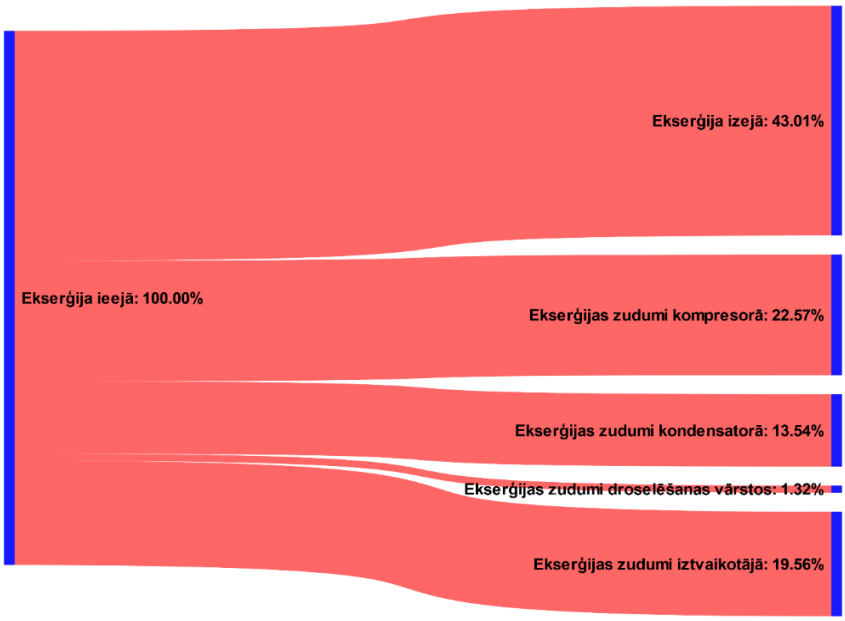
2.30. attēlā redzama informācija par divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskās efektivitātes izmaiņām atkarībā no amonjaka tvaiku temperatūras pēc kompresora. No šīs informācijas var secināt, ka ekserģētiskā efektivitāte pieaug, palielinoties amonjaka tvaiku temperatūrai pēc kompresora. Amonjaka tvaika temperatūras pēc kompresora pieaugums ir skaidrojams ar kompresorā iesūktā amonjaka tvaika daudzumu, kas gada siltākajos mēnešos ir lielāks nekā aukstākajos mēnešos. Otrs iemesls amonjaka temperatūras pēc kompresora pieaugumam ir dzesējamā ūdens temperatūras pieaugums, ar ko nodrošina kompresora dzesēšanu. Ekserģētiskā efektivitāte maksimālo vērtību 0,54 sasniedz pie amonjaka tvaika temperatūras 92 °C.



2.31. att. Divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskā efektivitāte atkarībā no spiediena kondensatorā.

2.31. attēlā redzama informācija par divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmas ekserģētiskās efektivitātes izmaiņām atkarībā no spiediena kondensatorā. No šīs informācijas var secināt, ka ekserģētiskā efektivitāte pieaug, palielinoties spiedienam kondensatorā. Ekserģētiskā efektivitāte maksimālo vērtību 0,54 sasniedz pie kondensatora spiediena 0,56 MPa. Spiediena pieaugums kondensatorā ir skaidrojams ar kondensatora dzesēšanai

paredzētā ūdens temperatūras pieaugumu. Kondensatora dzesēšanai paredzētā ūdens temperatūra maksimālo vērtību sasniedz gada siltākajos mēnešos. Savukārt zemā korelācija starp saldēšanas sistēmas ekserģētisko efektivitāti un spiedienu kondensatorā ir skaidrojama ar to, ka ekserģētisko efektivitāti ietekmē arī citi parametri, piemēram, apkārtējās vides temperatūra.



2.32. att. Ekserģijas zudumi divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmā.

2.32. attēlā redzama informācija par ekserģijas apjomu un ekserģijas noārdīšanos (*destruction*) divpakāpju kompresora saldēšanas sistēmā. Lielākā ekserģijas noārdīšanās (*destruction*) noris kompresoros, kam seko iztvaikotājs ar 19,56 % un kondensators ar 13,54 %, savukārt vismazākā ekserģijas noārdīšana (*destruction*) 1,32 % noris izplešanās vārstos. Ekserģijas apjoms saldēšanas sistēmā ir 43,01 %.

Ekserģijas noārdīšanās (*destruction*) apjoms sistēmas elementos ir atkarīgs no apkārtējās vides temperatūras un entropijas pieauguma procesa laikā. Ņemot vērā, ka apkārtējās vides temperatūru nevar mainīt, savukārt entropijas pieaugumu – var, jāizvēlas tādas iekārtas vai procesu nodrošināšanas režīmi, kas samazina entropijas pieaugumu.

SECINĀJUMI

1. Energosistēmu efektivitātes kompleksa analīze balstās uz divu jēdzienu izmantošanu – ekserģija un enerģija. Sistēmai, kas ir termodinamiskā līdzsvarā ar apkārtējo vidi, nav ekserģijas. Sistēmas ekserģija pieaug, palielinoties termodinamisko parametru skaitlisko vērtību atšķirībai starp termodinamisko sistēmu un apkārtējo vidi, kas ieskauj termodinamisko sistēmu. Enerģētiskā bilance tiek izmantota, lai noteiktu un samazinātu enerģijas zudumus, piemēram, siltuma zudumus, un arī enerģijas atgūšanas iespējas. Tomēr enerģētiskā bilance nesniedz informāciju par enerģijas vai resursu iekšējiem zudumiem procesa laikā un nenosaka dažādu enerģijas un materiālu plūsmu kvalitāti, kas plūst caur sistēmu un iziet kā produkti un atkritumi. Ekserģētiskā analīze skaidri norāda enerģijas zudumu vietas procesā un tehnoloģiskajā elementā, kurā process noris. Ekserģētiskās analīzes galvenais mērķis ir identificēt ekserģētiskās efektivitātes paaugstināšanas iespējas un ekserģijas zudumu cēloņus un patiesos apmērus. Tādējādi ekserģētiskās analīzes izmantošana energosistēmu efektivitātes noteikšanā dod reālu iespēju patiesi vērtēt enerģijas patēriņa efektivitāti.
2. Dažādos energosistēmu (siltumapgādes, zivju pārstrādes, granulu ražošanas uzņēmumos) objektos enerģijas patēriņa efektivitātes noteikšana notiek, izmantojot gan enerģētisko, gan ekserģētisko bilanci. Šī nostādne, izmantojot tādus indikatorus kā enerģijas lietderības koeficients, veiktspējas koeficients (siltumsūkņiem, saldēšanas/dzesēšanas sistēmām), enerģijas zudumi, ekserģijas lietderības koeficients, ekserģijas zudumi, kas atkarīgi no enerģijas zudumu apmēra, ekserģijas noārdīšanās, rada iespēju izstrādāt universālu pieeju, veicot iepriekšminēto uzņēmumu enerģētisko un ekserģētisko bilanču analīzi un noformulējot to lietošanas diapazonus un mijiedarbību.
3. Promocijas darba mērķi ir sasniegti, jo darbā iegūti rezultāti, kas apstiprina hipotēzi, ka, analizējot enerģijas patēriņa efektivitāti, nepieciešams izmantot gan enerģētisko, gan ekserģētisko bilanci, nosakot to lietošanas diapazonus un mijiedarbību dažādās energosistēmās. Šie rezultāti iegūti, kompleksi pētot dažādas energosistēmas (siltumapgādes, zivju pārstrādes, granulu ražotnes uzņēmumus) un to enerģētisko un ekserģētisko bilanču mijiedarbību. Ar to tika pilnveidota izpratne par energosistēmas zudumu rašanās iemesliem un to samazināšanas iespējām, kas savukārt rada teorētiskus pamatus kļūdu un nepilnību novēršanai praksē, jo enerģētiskā un ekserģētiskā bilance balstās uz enerģijas iekšējo struktūru un raksturīgajiem rādītājiem, ekserģijas apjomu energosistēmā, kā arī enerģijas un ekserģijas savstarpējām izmaiņām energosistēmā.
4. Veicot ekserģijas faktora eksperimentālo pētījumu, izmantojot Latvijas pilsētas Ludzas centralizētās siltumapgādes sistēmas datus, iegūti šādi rezultāti: vidējais ekserģijas faktors aprēķinu periodā ir 0,17; pieaugot siltuma slodzei, palielinās apkures katla jauda un paaugstinās ekserģijas faktors; samazinoties āra gaisa temperatūrai un pieaugot siltumtīklu turpgaitas un atgaitas temperatūrai, siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktors pieaug. Salīdzinot Ludzas siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktoru ar Dānijas un Zviedrijas siltumapgādes sistēmām pie vienādas ārgaisa temperatūras, var secināt, ka Dānijas un Ludzas siltumapgādes sistēmu ekserģijas faktori ir līdzīgi, savukārt Zviedrijas siltumapgādes sistēmas ekserģijas faktors ir augstāks, jo turpgaitas un atgaitas temperatūru starpība ir lielāka

nekā Dānijas siltumapgādes sistēmā. Tādējādi ekserģijas faktors parāda, kāds ir ekserģijas apjoms patērētājam piegādātājā siltumenerģijā. Zems ekserģijas faktors ir siltumapgādes sistēmām, kurās izmanto zema potenciāla siltuma avotus – Saules siltumu, katlu dūmgāžu dziļās dzesēšanas siltumu un siltumu pēc rūpniecības tehnoloģiskajiem procesiem.

5. Darbā analizēta granulu žāvēšanas procesa enerģētiskā un ekserģētiskā efektivitāte atkarībā no žāvēšanas procesa parametriem. Granulu žāvēšanas procesa enerģijas efektivitāte svārstās no 23 % līdz 10 %, savukārt ekserģētiskā efektivitāte – no 16 % līdz 1 %. Skaitlisko vērtību atšķirība starp ekserģētikso un enerģētisko efektivitāti ir skaidrojama ar to, ka ekserģētiskās efektivitātes aprēķinā ievēro ne tikai enerģijas zudumus, kas nonāk apkārtējā vidē, bet arī zudumus, kas rodas sistēmas iekšienē, piemēram, žāvēšanas kamerā, žāvēšanas gaisa sildītājā. Granulu žāvēšanas gaisa masas plūsmas samazināšanās palielina enerģētisko un ekserģētisko efektivitāti, jo siltuma žāvēšanai ir nepieciešama mazāka siltuma plūsma. Samazinoties gaisa mitruma līmenim pirms žāvētāja, palielinās enerģētiskā un ekserģētiskā efektivitāte, jo žāvēšanas gaiss ar mazāku mitruma spēj piesaistīt vairāk mitruma no žāvēšanas produkta.
6. Promocijas darbā saldēšanas iekārtas enerģētiskā analīze veikta, izmantojot iekārtas veiktspējas koeficientu (*COP*), kas rāda iegūto aukstuma enerģiju uz patērētās elektroenerģijas vienību. Analīze rāda, ka divpakāpju kompresora *COP* svārstās no 2,4 līdz 3,7, vienpakāpes kompresora *COP* – no 3,7 līdz 5,5. Abu kompresoru darbību ietekmē spiediens kondensatorā un amonjaka tvaika temperatūra pēc kompresora – palielinoties amonjaka tvaiku temperatūrai un spiedienam kondensatorā, kompresora *COP* samazinās. Tas palielina enerģijas patēriņu, kas nepieciešams, lai ražotu vienu aukstās enerģijas vienību. Spiedienu kondensatorā un amonjaka tvaiku temperatūru pēc kompresora ietekmē kondensatora un kompresoru dzesēšanai izmantotā ūdens temperatūra. Pieaugot dzesēšanas ūdens temperatūrai, samazinās kompresora *COP* un pieaug elektroenerģijas patēriņš.
7. Saldēšanas iekārtas ekserģētiskā analīze veikta ar ekserģētiskās efektivitātes indikatora η_{ex}, ekserģijas zudumu Ex_{zud} un ekserģijas noārdīšanās Ex_{noard} palīdzību. Ekserģētiskā efektivitāte vienpakāpes kompresoram sasniedz 60 %, salīdzinot ar 54 % vērtību divpakāpju kompresora gadījumā. Efektivitātes vērtības ietekmē apkārtējās vides temperatūra, saldēšanas kameras temperatūra un iekārtas darbības parametri – spiediens un amonjaka temperatūra pēc kompresora. Ekserģētiskās efektivitātes starpību vienpakāpes un divpakāpes kompresoru gadījumā galvenokārt nosaka saldēšanas kameras temperatūra, kas iekārtās ar vienpakāpju kompresoru ir no –20 °C līdz –23 °C (zivju uzglabāšana), divpakāpju kompresora iekārtās no –32 °C līdz –34 °C (zivju ātrā saldēšana).
8. Saldēšanas sistēmas elementu padziļināta ekserģijas izmaiņu analīze veikta ar ekserģijas zudumu palīdzību. Elementa ekserģijas zudumi aptver zudumus, saistītus ar enerģijas zudumu ekserģiju un ekserģijas noārdīšanos. Ekserģijas zudumu apjoms sistēmas elementos ir atkarīgs no apkārtējās vides temperatūras un entropijas pieauguma procesa laikā. Analīzes piemērs rāda, ka vienpakāpes iekārtā lielākie ekserģijas zudumi ir kondensatorā (25 %), tam seko iztvaikotājs (16 %), kompresors (15 %) un droselēšanas vārsti (5 %). Divpakāpes kompresora iekārtā lielākie zudumi ir kompresorā (23 %), iztvaikotājā (20 %), kondensatorā (14 %) un droselēšanas vārstos (1,3 %). Ekserģijas zudumu analīzē iegūtās skaitliskās vērtības norāda, kuros iekārtas elementos vispirms ir veicams zudumu samazinājums.

9. Viena no enerģijas patēriņa analīzes metodēm ir energosistēmu darbības datu regresijas analīze. Darbā novērtēts zivju apstrādes uzņēmuma pašreizējais stāvoklis, ko var izmantot par bāzes scenāriju turpmākai uzņēmuma optimizācijai, kas vērsta uz uzņēmuma enerģijas patēriņa samazināšanu. Daudzfaktoru regresijas analīzi ir iespējams izmantot, lai novērtētu, kā atšķirīgi produkti (neatkarīgi mainīgie) ietekmē elektroenerģijas patēriņu (atkarīgo mainīgo) ražošanas procesā. Iegūtais daudzkārtējās regresijas vienādojums paredz konkrētu elektroenerģijas patēriņu dažādos ražošanas apstākļos. Iegūtais vienādojums apraksta 75 % no analizētajiem datiem (R^2 = 0,754), un to var izmantot par bāzes scenāriju turpmākai analīzei.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Camberos A. J., Moorhouse J. D. Exergy Analysis and Design Optimization for Aerospace Vehicles and Systems. Progress in Astronautics and Aeronautics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.
2. Barkāns J. Kā taupīt enerģiju un saudzēt vidi. Rīga, 1997.
3. Ристхейн Э. Введение в энерготехнику. Таллинн, 2008.
4. Кудинов В. А., Карташов З. М. Техническая термодинамика. Издание пятое. Москва, 2007.
5. Çomakli K., Yüksel B., Çomakli Ö. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network. Applied Thermal Engineering 2004:24:1009–1017.
6. Müllera A., Kranzla L., et. al. Estimating exergy prices for energy carriers in heating systems: Country analyses of exergy substitution with capital expenditures. Energy and Buildings 2011:43:3609–3617.
7. The World Bank. electricity production from renewwable sources, including hydroelectric (% of total), 2013 [Tiešsaiste]. [Skatīts 15.09.2016]. Pieejams: http://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.RNWX.ZS.
8. Nadyrov Sh. M., Kasymov S. M., Nugerbekov S. N., Temirhanov E. U., Bopieva Zh. K. Spatial organization of territory in Kazakhstan for the period until 2030. Kazakh Institute of Economic Research, 2008.
9. Обзор электроэнергетической отрасли Республики Казахстан в 2013 году [Tiešsaiste]. [Skatīts 20.09.2016]. Pieejams: http://www.kdb.kz/file.php?id_file=5054.
10. International Energy Agency. Kazahstan, Latvia, Lithuania, Estonia, European Union [Tiešsaiste]. [Skatīts 20.09.2016]. Pieejams: http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=KAZAKHSTAN&product=electricityandheat&year=2010.
11. The World Bank. CO_2 emissions (kt) [Tiešsaiste]. [Skatīts 15.09.2016]. Pieejams: http://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT.
12. Eurostat. Energy balances [Tiešsaiste]. [Skatīts 22.09.2016]. Pieejams: http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances.
13. Converant of Mayors. Emission factor for electricity consumption [Tiešsaiste]. [Skatīts 23.09.2016]. Pieejams: http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf.
14. WISIONS of sustaina bility. Electricity emission factors [Tiešsaiste]. [Skatīts 23.09.2016]. Pieejams: http://www.wisions.net/files/uploads/SEPS_GHG_Baseline_Calculation.pdf.
15. Dincer I., Sahin A. Z. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. International Journal of Heat and Mass Transfer 2004:47:645–652.
16. Coskun C., Bayraktar M., et al. Energy and exergy analyses of an industrial wood chips drying process International Journal of Low-Carbon Technologies 2009:4:224–229.
17. Vipin Y. Cold Storage: A View of Energy Efficient Technologies and Practices. International. Conference on Clean Energy Technologies and Energy Efficiency for Sustainable Development, 2010.
18. Alves A., et. al. Optimization of Energy Consumption in Cold Chambers in the Dairy Industry Energy Procedia 2014:50:494–503.
19. European Commision. reference document on Best Available tehniques un the Food, Drink and Milk Industries, 2006.
20. Nordic Council of Ministers. BAT in fish processing industry: Nordic perspective, 2015.
21. Dincer I., Kanoglu M. Refrigeration Systems and Applications. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.
22. Alda D., Ciarlo D. Refrigeration Systems, Design Technologies and Developments. Manufacturing Technology Research. Nova Science Publishers, Incorporated, 2013.