

Varis Žentiņš

**CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES DARBĪBAS
EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN FOSILO
KURINĀMO AIZSTĀŠANA AR ALTERNATĪVIEM
ENERĢIJAS AVOTIEM (SILTUMA AVOTA
PARAMETRISKĀS OPTIMIZĀCIJAS ALGORITMI)**

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Varis Žentiņš

Doktora studiju programmas “Siltumenerģētika un siltumtehnika” doktorants

**CENTRALIZĒTĀS SILTUMAPGĀDES DARBĪBAS
EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN FOSILO
KURINĀMO AIZSTĀŠANA AR ALTERNATĪVIEM
ENERĢIJAS AVOTIEM**

(Siltuma avota parametriskās optimizācijas algoritmi)

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs

asociētais profesors

Dr. sc. ing. SIGURDS JAUNDĀLDERS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Žentiņš, V. Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem (Siltuma avota parametriskās optimizācijas algoritmi). Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 110 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "P-04" 2022. gada 13. oktobra lēmumu Nr. 54.

Šis pētījums tapis sadarbībā ar SAM 8.2.2. "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" projektu Rīgas Tehniskajā universitātē Nr.8.2.2.0/18/A/017.

Vāka attēls no SIA "Industry Service Partner" arhīva.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 15. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Ph.D., Oļegs Jakovļevs
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr. habil. sc. ing. Namejs Zeltiņš,
Fizikālās enerģētikas institūts, Latvija

Profesors *Dr.* Giedrius Janušas,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis(usi) šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Vārds Uzvārds (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu/angļu valodā, tajā ir ievads, 6 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 57 attēli, 7 tabulas, 13 pielikumi, kopā 110 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 105 nosaukumi.

PATEICĪBAS

Liels paldies mana promocijas darba zinātniskajam vadītājam profesoram Sigurdam Jaundālderim par pacietību un ieguldīto darbu! Paldies par Jūsu ticību man, kā arī par vērtīgu padomu sniegšanu visā darba izstrādes laikā. Liels paldies par Jūsu morālo atbalstu un motivāciju darba izstrādes laikā. Bez Jūsu atbalsta promocijas darbs nebūtu tapis!

Paldies kolēģiem par uzaicinājumu un uzticību kļūt par siltuma akumulācijas sistēmas izbūves atbildīgo būvdarbu vadītāju. Paldies AS "RĪGAS SILTUMS", SIA "Fortum Latvia" (šobrīd SIA "Gren Latvija"), SIA "Juglas Jauda" darbiniekiem un vadībai par pretimnākšanu, zinātniskajām diskusijām, praktiskajiem padomiem un palīdzību eksperimentu un publikāciju tapšanā!

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei: sievai, vecākiem, sievas vecākiem, kas bija klāt promocijas izstrādes procesā, atbalstīja, uzmundrināja un ļāva veltīt vakarus un brīvdienas pētniecībai un promocijas darba izstrādei!

Varis Žentiņš

SATURS

IZMANTOTO TERMINU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS	7
IZMANTOTO ATTĒLU SARAKSTS	7
IZMANTOTO TABULU SARAKSTS	11
IZMANTOTO PIELIKUMU SARAKSTS	12
IEVADS	13
Promocijas darba aktualitāte	13
Promocijas darba hipotēze	13
Promocijas darba mērķis	13
Promocijas darba uzdevumi	14
Pētījumu metodika	14
Promocijas darba zinātniskā novitāte	15
Darba praktiskā nozīme	15
Promocijas darba forma, struktūra un saturs	16
Promocijas darba aprobācija	17
1. LITERATŪRAS APSKATS	20
1.1. Klimata īpatnības un efektivitātes paaugstināšanas iespējas koģenerācijas stacijām	20
1.2. Koģenerāciju staciju apskats Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana	23
1.3. Siltuma akumulācijas tvertnes piemēri Eiropā un Latvijā	24
1.4. Siltumietilpības akumulācija un to fizikālie principi	26
1.4.1 Siltuma akumulatora efektivitātes rādītāji	27
1.5. Nodaļas secinājumi	31
2. SILTUMA AVOTA DARBĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN IZMEŠU SAMAZINĀŠANA	33
2.1. Absorbcijas tipa siltumsūkņa pielietošana	33
2.2. Siltuma akumulatora izmantošana	38
2.3. Nodaļas secinājumi	39
3. SILTUMU ZUDUMU APRĒĶINĀŠANAS METODIKA AKUMULATORA DARBĪBAS REŽĪMIEM	41
3.1. Nodaļas secinājumi	50
4. EKSPERIMETĀLĀS METODES IZMANTOŠANA FAKTISKO SILTUMA ZUDUMU NOTEIKŠANAI	51

4.1. Eksperimentā izmantotie mērīšanas instrumenti un precizitāte	53
4.2. Eksperimenta rezultāti.....	55
4.3. Termisko tiltu noteikšana un aprēķināšana	56
4.4. Siltuma akumulatora siltuma zudumu verifikācija	59
4.5. Siltuma akumulatora siltuma zudumu aprēķina rezultāti	60
4.6. Nodaļas secinājumi	60
5. SILTUMSLODZES PROGNOZĒŠANA.....	61
5.1. Siltumenerģētikas situācija Latvijā	61
5.2. Siltumenerģijas slodzes prognozes	62
5.3. Siltumsloдzes profils.....	63
5.4. Siltumsloдzes vienkārši lineāri regresijas modeļi	64
5.5. Nodaļas secinājumi	66
6. KOĢENERĀCIJAS STACIJAS LĒMUMU PIENĒMŠANAS ALGORITMA OPTIMIZĒŠANA IZMANTOJOT SILTUMA AKUMULATORA DZIĻO ANALĪZI UN IEKĻAUJOT ZUDUMU MODELI	67
6.1. Elektroenerģijas tirgus Nord Pool.....	67
6.1.2 Elektroenerģijas tirgus cenas analīze.....	69
6.2 Siltuma akumulatora dziļā analīze - darbības tehnoloģiskie procesi un ietekmējošie faktori.....	71
6.2.1. Akumulatora darbības tehnoloģiskie procesi	73
6.2.2. Siltuma akumulatora uzlādes un izlādes jaudas	74
6.2.3. Siltuma akumulatora siltumietilpība.....	75
6.2.4. Difuzora aprēķins	76
6.2.5. Tīkla ūdens aizsardzība no skābekļa	78
6.3. Siltuma akumulatora darbības režīma izmaksu modelis	80
6.4. Lēmuma pieņemšanas algoritms	81
6.5. Nodaļas secinājumi	85
7. SECINĀJUMI	86
8. PIELIKUMI	89
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	103

IZMANTOTO TERMINU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS

- ANO- Apvienoto Nāciju Organizācija
ASV – Amerikas Savienotās Valstis
ATS – absorbcijas tipa siltumsūkņi
ĀT – ārējais temperatūra
 C_{CO_2} – biržas cena izmešu CO_2 , Eur/t
 $C_{el,losses}$ – elektriskie zudumi SA darbības nodrošināšanai, Eur
 C_f – kurināmā izmaksas, Eur/MWh
 $C_{heat losses}$ – siltuma zudumi SA darbības laikā, Eur
 C_{losses} – kopējās SA zudumi, Eur
 C_{maint} – apkopes un remontu izmaksas SA zudumi, Eur
 $C_{mp,el}$ – biržas stundu cena elektrībai, Eur/MWh_{el}
 $C_{mp,th}$ – biržas stundu cena siltumam, Eur/MWh_{el}
 (\overline{Cmp}) – vidējā elektrības cena biržā
 $(\overline{Cmp})_{best\ max.\ period}$ – vislabākā perioda vidējā elektrības biržas cena, Eur/MWh_{el}
 $C_{network,el}$ – elektrības cena no tīkla, Eur/MWh_{el}
 CO_2 – oglekļa dioksīds
 $C_{pp,el}$ – ražošanas pašizmaksa elektrībai
 $C_{pp,th}$ – ražošanas pašizmaksa siltumam Eur/MWh_{th}
CSA – centralizētā siltumapgāde
CSS – centralizētās siltumapgādes sistēmas
CSP – Centrālās statistikas pārvalde
CST – centralizētie siltumtīkli
DK – dūmgāzu kondensators
DR – darbības režīmi
EEC – elektroenerģijas cena
ELSPOT – nākamās dienas elektroenerģijas tirgus
ES – Eiropas Savienība
 f – faktoru skaits
FMM – fāžu maiņas materiāls
 h – stunda
ISP – SIA “Industry Service Partner”
 J – džouls
 k – koeficients
KM – katlumāja
KS – koģenerācijas stacija
kWh – kilovatstunda
MWh – megavatstunda
 NO_x – slāpekļa oksīds
OI – obligātais iepirkums
OIK – obligātā iepirkuma komponente Pchar (forecasted) – SA uzlādes prognozētā jauda, MW

Pdisch(forecasted) – SA izlādes prognozētā jauda, MW
 (Pel)max. ar HS – maksimālā vidējā jauda KS darbībā ar SA, MW
 Pel1h – elektriskā stundu kopējā jauda, MWel
 Phmax – KS maksimālā jauda siltumslodzes nodrošināšanai, MW_h
 Ph1h – siltuma stundu jauda elektrības ražošanas procesā, MW_h
 Phs_charge – SA uzlādes jauda, MW
 Phs_discharge – SA izlādes jauda, MW
 Pmin gen – minimālā elektrības ģenerēšanas jauda, MW
 Psc – elektriskā stundu jauda pašpatēriņa nodrošināšanai, MWel
 Reel – ieņēmumi no elektrības pārdošanas, kas saražots KS, Eur
 Qhs_actual – pašreizējā siltumietilpība SA, MW_h
 Qforesc.HS – prognozētā SA siltumietilpība, MW_h
 (Q(p1-24h))⁻ – vidējā prognozētā siltumslodze; MW_h
 Qp1h – siltuma prognoze stundai, MW_h
 ReHS – ieņēmumi no elektrības pārdošanas, kas saražots KS ar SA, Eur
 RTU – Rīgas Tehniskā universitāte
 SA – siltuma akumulators
 SC – siltuma centrāle
 SEG – siltumnīcefektu emisiju gāzes
 SO₂ – sēra dioksīds
 SS – siltumslodze
 TEC – termoelektrocentrāle
 To1h(wind, precip.) – ārgaisa temperatūras, kā arī vēja stipruma un nokrišņu prognozes stundu dati;
 °C, m/s, jā/nē
 T1_1h – tīklu turpgaitas temperatūra stundai, °C
 T2_1h – tīklu atgaitas temperatūra stundai, °C
 Vr – radiālais paātrinājums (velocity), m/s
 θ – bezdimensijas temperatūra
 ξ – bezdimensijas tvertnes augstums
 λ – siltumvadītspēja
 δ – bezdimensijas termokāļa biezums
 ν – kinētiskā viskozitāte
 τ – bezdimensijas laiks
 ρ – ūdens blīvums, kg/m³
 ε – korekcijas koeficients
 δ0 – sākotnējā termokāļa bezdimensijas augstums
 μ – dinamiskā viskozitāte, Pa·s
 ω – ātruma lauka virpuļfunkcija tvertnē
 ψ – ātruma lauka plūsmas funkcija tvertnē

IZMANTOTO ATTĒLU SARAKSTS

1. Politikas instrumenta atainojums.....	16
1.1.1. att. Vidējā gaisa temperatūra Rīgā.....	20
1.1.2. att. Gaisa temperatūra Rīgā gada laikā un tā aproksimācija	21
1.1.3. att. Siltuma jauda, gaisa temperatūra un elektroenerģijas cena pēc Nordpool datiem. Janvāris 2018	21
1.1.4. att. Dronninglundas un Marstal CSS shēma CSS labajā krastā 2019. gadā	22
1.2.1. att. Koģenerāciju staciju iedalījums pēc kurināmā	23
1.2.2. att. Funkcionāla shēma 5 mainīgo bloku definēšanai.....	24
1.3.1. att. Mustikama siltumakumulācijas sistēma.	26
1.4.1. att. Stratifikācija ar temperatūras sadalījumu akumulatorā	27
1.4.1.1. att. Augstuma/diametra attiecība.....	29
1.4.1.2. att. Temperatūras un plūsmas ietekme uz sajaukšanās koeficientu.....	30
1.4.1.3.att. Plūsmas ietekme uz sajaukšanās koeficientu atkarībā no akumulatora ģeometriskiem izmēriem	30
1.3.1.4. att. Simulācijas rezultāti dažādās siltumakumulācijas tvertnēs pēc 1600 sekundēm	31
2.1.1.att. Latentā siltuma atgūšana no dūmgāzēm pēc dabasgāzes sadedzināšanas	34
2.1.2.att. Absorbcijas siltumsūkņa un dūmgāzu kondensatora darbība enerģijas atgūšanai...35	
2.1.3.att. Absorbcijas tipa siltumsūkņa COP dažāda katlajaudai.....	36
2.1.4.att. Absorbcijas siltumsūknis COP dažāda atgaitas temperatūrai	37
2.1.5. att. Enerģijas atgūšana no dūmgāzēm	37
2.2.1. att. KM siltuma slodzes grafiks (2016./2017.gada periodam)	38
2.2.2. att. Siltumavota ar siltuma akumulatoru darbība 24 stundu ciklam	38
3.1. att. Siltuma zudumu aprēķināšanas metodika	42
3.2. att. Siltuma akumulatora termoķīļa piemērs.....	43
3.3.att. Siltuma akumulators uzlādes cikla beigās.....	48
3.4. att. Bloks shēma, kas parāda siltuma akumulatora darba režīma siltuma zudumu aprēķinu	49
3.5.att. Siltuma akumulatora uzlādes un izlādes cikls 24 stundu periodam.....	49
4.1. att. Siltuma akumulatora pamata armēšanas darbi un metāla konstrukciju montāža.....	51
4.2. att. Siltuma akumulatora apšuvuma montāža.....	41
4.3. att. Vidējā aproksimētā gaisa temperatūra no 31.08 līdz 07.09.2020.....	52
4.4. att. Siltuma akumulatora temperatūras devēju izvietojums un temperatūras kritumi.....	52
4.1.1. att. Termokamera un uzņemtais akumulatora sienas attēls.....	53
4.1.2. att. Infrasarkanais termometrs.....	53
4.1.3. att. PT100 termodevējs.....	53
4.2.1.att. Siltuma akumulatora temperatūras devēju izvietojums un temperatūras kritumi....	55

4.2.2.att. Siltuma zudumu profils akumulatoram	56
4.3.1. att. Siltumu zudumu modelēšana vates stiprinājuma naglām izmantojot THERM programmu	57
4.3.2.att. Siltumizolācijas salaidumu vieta un siltuma zudumu avots	57
4.3.3. att. Konstatētie konstruktīvie termiskie tilti akumulatora izbūves laikā.....	58
4.3.4.att. Vakuumvārsta pieslēguma atloka konstatētais termiskais tilts.....	58
4.3.5. att. Pamata betona konstatētais termiskais tilts.....	58
4.4.1.att. Siltuma zudumu salīdzinājums - eksperimenta un aprēķinu rezultāti	59
4.5.1.att. Aprēķinātie siltuma zudumi un reālie ar ieviestu labojuma koeficientu.....	60
5.1.1. att. Katlumājās un koģenerācijas stacijās saražotās siltumenerģijas sadalījums.....	61
5.3.1. att. Apkārtējās temperatūras ilguma likne un atbilstošais stundu skaits 3 gadu periodam.....	63
5.3.2.attēls. Koģenerācijas stacijas ikstundas slodzes profils 2019.gadā.....	64
5.4.1. att. DHS (RP = 40 MW) atkarība no ārējās temperatūras 2017. Gadā	65
6.1.1. att. Piedāvājuma un pierasījuma grafiks	67
6.1.2. att. Enerģijas bilance no pārdevēja līdz pircējam	69
6.1.2.1.att. Parādīta elektrības cena Nordpool biržā 19.11.2020.....	70
6.1.2.2. att. Parādīta elektrības cena Nordpool biržā 12.05.2019.....	71
6.2.1. att. Biomasas koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru shēma	72
6.2.1.1. att.SA uzlādēšanas shēma.....	73
6.2.1.2. att.SA izlādēšanas shēma.....	73
6.2.2.1. att. SA uzlādes un izlādes ātrumu izmaiņas grafiks atkarībā no gaisa temperatūras.....	75
6.2.3.1. att. Siltuma akumulatora siltumietilpība.....	75
6.2.4.1. att. Siltuma akumulatora principālā difuzoru shēma pa labi un augšējais difuzors.....	76
6.3.1. att. SIA "Industry Service Partner" ieviestās aktīvu pārvaldības sistēmas laika sadalījums, sistēmas ražošanas procesu dinamikasizmaiņa.....	81
6.4.1. att. Lēmuma pieņemšanas algoritma blokshēma.....	82

IZMANTOTO TABULU SARAKSTS

2.2.1. tabula. KS darbība ar un bez akumulatora.....	39
3.1. tabula. Lielāko Latvijas siltuma akumulatoru izolācijas risinājumi.....	41
3.2. tabula. Robežnosacījumi.....	46
3.3. tabula. Ričardsona skaitļa ietekme uz termisko stratifikāciju.....	48
4.1.1. tabula. Izmantotā termogrāfa un infrasarkanā termometra svarīgāko parametru salīdzinājums	54
5.1.1. tabula. Koģenerācijas staciju darbību raksturojošie rādītāji 2019. Gadā	62
5.4.1. tabula. CSS gadījumu izpētes dati par dažādiem RP un laika periodiem	64

IZMANTOTO PIELIKUMU SARAKSTS

1.pielikums. SIA"Ģren Latvija" atzinums.....	90
2. pielikums. SIA"Juglas Jauda" atzinums.....	91
3.pielikums. Akts par būves pieņemšanu ekspluatācijā	92
4. pielikums. Vara Žentiņa būvprakses sertifikāts.....	93
5. pielikums. Jelgavas pilsētas siltumenerģijas piegādes parametri.....	94
6. pielikums. Koģenerācijas stacijās patērētais kurināmais Latvijā.....	95
7. pielikums. Iekārtu apkalpošanas grafiks un izmaksas.....	96
8. pielikums. Iekārtu uzturēšanas algoritms Infor sistēmā.....	97
9. pielikums. Siltuma akumulatora siltuma zudumu vērtības plkst. 07:00 Objektam Y	98
10. pielikums. Apkopotie siltuma zudumi katram slānim 24 stundu ciklam objektam y.	99
11. Siltuma akumulatora eksperimenta sākuma/beigu dati	100
12. Kalibrēšanas sertifikāts Endress+Hauser TR88 Modulārajam RTD termometeram.....	101
13. Eksperimenta laikā izmantotā siltuma akumulatora siltumizolācijas konstrukcijas un griezumā.....	102

IEVADS

Promocijas darba aktualitāte

Centralizētās siltumapgādes sistēmas darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar atjaunojamiem energoresursiem ir viens no galvenajiem enerģētikas nozares uzdevumiem, kas jāveic, lai sasniegtu Eiropas Savienības ilgtermiņa klimata neitralitāti līdz 2050. gadam [1, 3, 5]. Šis politiskais mērķis ir nepieciešams ne tikai globālo klimata pārmaiņu samazināšanai un novēršanai, tas pozitīvi ietekmē energoapgādes drošību, valsts ekonomiku, konkurētspēju. Latvijā ir labi attīstīta CSS, un 69,5 % iedzīvotājiem tiek nodrošināta apkure un karstais ūdens [2].

Promocijas darba aktualitāti pamato arī pieņemtie likumdošanas akti – ES direktīvās noteiktie jaunie klimata un enerģētikas mērķi. Klimata neitralitātes sasniegšanai līdz 2050. gadam noteikts starptermiņš 2030. gads. Lai veicinātu tuvošanos klimata neitralitātei, atjaunojamo enerģijas avotu un energoefektivitātes mērķi tika pārskatīti un paaugstināti 2018. gadā, un tie ir jāsasniedz laika posmā no 2021. līdz 2030. gadam:

- siltumnīcefekta emisiju gāzu samazinājums vismaz par 40 % (salīdzinot ar 1990. gada līmeni);
- vismaz 32 % atjaunojamās enerģijas;
- energoefektivitātes uzlabojums vismaz par 32,5 % [4].

Priekšlikumi nemitīgi tiek papildināti, un 2020. gada decembrī ES līderi izvirzīja jaunu mērķi *fit 55*, kas paredz SEG samazinājumu jau par 55 % (salīdzinot ar 1990. gada līmeni) [6]. Lai izpildītu saistības un virzītos uz jaunajiem mērķiem, ir nepieciešams pārbūvēt visu enerģētikas sektoru un attīstīt jaunu centralizētās siltumapgādes konceptu. Notiek aktīvi pētījumi un diskusijas ne tikai par ceturtais paaudzes, bet jau par piektās paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas konceptiem, kuros parādās tas, ka katrs sistēmas elements var būt patērētājs un ražotājs. Šādām sistēmām ļoti liela nozīme ir gan zema potenciāla siltuma izmantošana ar siltumsūkņu tehnoloģiju, gan arī sistēmas balansēšanai ar siltuma akumulatoriem. Promocijas darbā piedāvāta daudzperspektīvu analīze un izstrādāts algoritms, kas ļauj novērtēt vienu no galvenajiem virzītājspēka elementiem – siltumenerģijas akumulāciju, kas nākotnē būtiski paātrinātu pāreju uz nākamo paaudžu centralizētas siltumapgādes sistēmām un ļautu izpildīt saistības.

Promocijas darba hipotēze

Ir iespējams atrast optimālus koģenerācijas stacijas darbības režīmus, izmantojot siltuma akumulāciju tehnoloģiju brīvās elektroenerģijas tirgus apstākļos, lai palielinātu efektivitāti un samazinātu fosilo kurināmo.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izpētīt dažādus Latvijas koģenerāciju staciju darbības režīmus un piedāvāt risinājumus to efektivitātes palielināšanai un fosilo kurināmo samazināšanai

mainīgos darba apstākļos. Izstrādāt aprēķinu metodiku siltuma akumulācijas zudumiem darba režīmiem un iekļaut šo bloku koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritmā.

Promocijas darba uzdevumi

Promocijas darba mērķa sasniegšanai definēti vairāki uzdevumi.

- 1) Veikt pētījumu par klimata īpatnībām un efektivitātes paaugstināšanas iespējām koģenerācijas stacijās. Koģenerācijas staciju analīze Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana brīvās elektroenerģijas tirgū.
- 2) Siltuma avota darbības efektivitātes paaugstināšana un izmešu samazināšana, absorbcijas tipa siltumsūkņa un siltuma akumulatora izmantošana.
- 3) Veikt pētījumu un izstrādāt siltuma zudumu aprēķināšanas metodiku siltuma zudumiem dažādiem darbības režīmiem. Pēc izstrādātās metodikas salīdzināt efektīvāko siltumizolācijas risinājumu trīs lielākajiem siltuma akumulatoriem Latvijā.
- 4) Eksperimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai, veicot siltuma akumulatora verifikāciju.
- 5) Veikt pētījumu par siltuma slodzes prognozēšanu.
- 6) Koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritma optimizēšana, izmantojot siltuma akumulatora dziļo analīzi un iekļaujot akumulatora zudumu modeli.

Pētījumu metodika

Lai precīzi tiktu sasniegti darba mērķi, ievada daļā lietota vispārējās izziņas metode, ar kuras palīdzību veikta jaunāko publikāciju pētīšana, analīze un apkopošana. Izzināti siltumenerģijas akumulācijas un siltumsūkņu tehnoloģiju veidi, jaunākās tendences un tēmas aktualitāte. Akumulācijas tvertnes darbības un efektivitātes kompleksa sistēmas uzvedības ietekmējošo faktoru noteikšanai tika izmantota sistēmdinamikas pētījuma metode.

Pielietojot empīriskās izziņas metodi, eksperimentu laikā veikta fakta, informācijas uzkrāšana par pētāmajiem objektiem. Pētījumi veikti, izmantojot reāli darbojošās akumulācijas iekārtas. Tika lietota tiešā mērīšana, kuras rezultātā noteikti faktiskie siltuma zudumi. Lai iegūtu visticamākos rezultātus, tad empīriskā novērošana notika objekta dabiskajos apstākļos. Noteikti faktiskie siltuma zudumi, izmantojot eksperimentu laikā iegūto datu analīzi, un veikti aprēķini. Veikta savstarpēja eksperimenta un teorētisko aprēķinu salīdzināšana.

Veikta tehnoloģiskās efektivitātes novērtēšana siltumizolācijai. Darbā izveidotā aprēķinu metodika ļauj aprēķināt siltuma zudumus dažādos darba režīmos un salīdzināt risinājumus savā starpā. Izprotot siltuma akumulācijas sistēmas uzvedību un veicot dažādu uzņēmumu pieredzes apkopošanu, tika izveidots lēmumu pieņemšanas algoritms, kas ļauj paaugstināt kopējo stacijas lietderību, samazināt CO₂ izmešus un aizstāt fosilo kurināmo.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

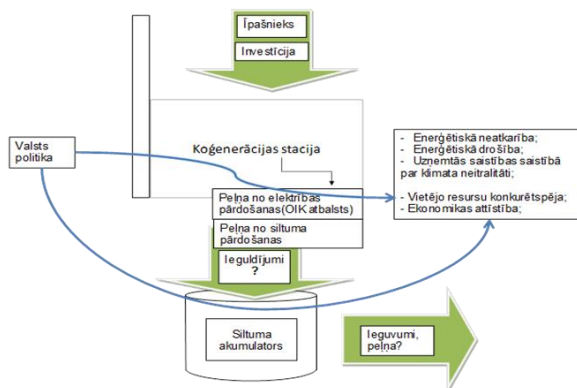
Darbā veiktie pētījumi parāda koģenerācijas staciju režīmu optimizācijas iespējas, lietojot siltumsūkņa un akumulācijas iekārtas. Veiktajos pētījumos izmantoti reāli siltumapgādes uzņēmumu dati Latvijas klimatiskajos apstākļos.

Pētījuma rezultātā optimizēts koģenerācijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulācijas iekārtu, kas apraksta piecu savstarpēji saistītu bloku uzvedību (elektroenerģijas pašizmaksas un tirgus cenas analīze, laikapstākļu prognoze, koģenerācijas režīmi un siltuma akumulatora darbības parametri), kas ļauj pētīt sistēmai piemītošās atgriezeniskās saites. Katrs no blokiem ir aprakstīts ar apakšsistēmām un vienādojumiem, kas raksturo sistēmas darbības kritērijus un mijiedarbību. Piedāvātā metodoloģija ļauj ne tikai diferencēti analizēt siltuma akumulatora darbību, bet arī dod iespēju apskatīt šīs iekārtas lietderību un izmantošanas iespējas integrējot siltumapgādes sistēmā. Nozīmīgs pētījums veikts par siltuma akumulatora zudumiem, tika izveidota aprēķina metodika un tā tika integrēta lēmumu pieņemšanas algoritmā dažādiem darbības režīmiem

Darba praktiskā nozīme

Promocijas darbs ir ieguvis Latvijas lielāko koģenerācijas staciju – SIA “Gren Latvia” un SIA “Juglas Jauda” – atzinumus. Balstoties šī darba izpētes rezultātos, būs iespējams pārdomāti izvēlēties investīciju politiku ne tikai siltumapgādes uzņēmumos, bet arī valsts enerģētikas politikas kursam, lai sasniegtu definētos mērķus.

Centralizētās siltumapgādes sistēmu siltamovotu pāreja uz brīvā elektroenerģijas un siltumapgādes tirgu saistīta ar tehnoloģiskā procesa efektivitātes celšanu un ražošanas algoritma maiņu. Iepriekšējā politiskā izšķiršanās ļāva veicināt jaunu koģenerācijas staciju būvniecību un palielināt atjaunojamo resursu izmantošanas īpatsvaru. Šobrīd daudzu staciju atbalsta periods beidzās par garantēto elektroenerģijas iepirkuma maksu kā parādīts 1. att. nenodrošināja brīva tirgus apstākļus un konkurenci.



1.att. Politikas instrumenta atainojums (autora izveidots).

Šobrīd līdz ar atbalsta beigšanos ir pienācis laiks jaunai politikai un soļiem attīstībai brīvajā elektroenerģijas un siltumapgādes tirgū, kas saistīts ar tehnoloģiskā procesa efektivitātes celšanu, ražošanas algoritma maiņu.

Izstrādātais algoritms koģenerācijas stacijai darbībā ar siltumenerģijas uzglabāšanas akumulatoru ļaus uzlabot, precīzi un ekonomiski pamatoti prognozēt ieņēmumus brīvajā elektroenerģijas tirgū un ātri pieņemt pamatotu ražošanas lēmumu.

Promocijas darba forma, struktūra un saturs

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā. Tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi un rekomendācijas, pielikumi un literatūras saraksts. Darbā ir 59 attēli, astoņas tabulas, kopā 110 lappušu. Literatūras sarakstā norādīti 105 izmantotās literatūras avoti.

Pirmā nodaļa veltīta Latvijas klimata īpatnībām un efektivitātes paaugstināšanas iespējām koģenerācijas stacijās. Veikta koģenerāciju staciju analīze Latvijā, pētīta valsts atbalsta politika un ražošanas lēmuma pieņemšana brīvās elektroenerģijas tirgū.

Otrā nodaļa veltīta siltuma avota darbības efektivitātes paaugstināšanai un izmešu samazināšanai, izmantojot absorbcijas tipa siltumsūkni un siltuma akumulatoru; aprakstīts veiktais pētījums par siltuma atgūšanu no dūmgāzēm, kā arī pētīta siltuma akumulatora izmantošanas pamatotība koģenerācijas stacijas ražošanas procesā.

Trešajā nodaļā aprakstīts veiktais pētījums un izstrādātā siltuma zudumu aprēķināšanas metodika. Pēc izstrādātās metodikas salīdzināti efektīvākie siltumizolācijas risinājumi trīs lielākajiem siltuma akumulatoriem Latvijā.

Ceturtajā nodaļā veltīta eksperimentālās metodes izmantošanai faktisko siltuma zudumu noteikšanai, veicot siltuma akumulatora verifikāciju. Izmantojot eksperimentālo metodi, izmērīti siltuma zudumi. Nodaļā publicēts eksperimenta apraksts, informācija par izmantotajiem

mērīšanas instrumentiem un to precizitāti, kā arī eksperimenta plānošanas gaita. Iegūtie eksperimenta rezultāti salīdzināti ar teorētisko aprēķinu. Termiskie tilti konstatēti ar termogrāfijas metodi un aprēķināti siltuma zudumi. Veikta verifikācija siltuma akumulatoram, ieviešot labojuma koeficientu.

Piektajā nodaļā apskatīta siltumenerģētikas situācija Latvijā, un siltumslodzes prognozēšanai ar siltumslodzes profilu.

Sestajā nodaļā aprakstīta koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritma optimizēšanas gaita, izmantojot siltuma akumulatora dziļo analīzi un iekļaujot akumulatora zudumu modeli, kā arī siltuma akumulatora izmaksas modeļa analīze, kurā novērtēti zudumi procesa nodrošināšanai. Apskatīta apkalpošanas un remontu izmaksas ietekme un efektivitātes paaugstināšana, izmantojot aktīvu pārvaldības sistēmu.

Autora personiskais ieguldījums

Promocijas darbs izstrādāts ciešā sadarbībā ar zinātnisko vadītāju asociēto profesoru S. Jaundālderu un citiem līdzautoriem. Autors piedalījās visos darba posmos – datu iegūšanā, aprēķinos vajadzīgo ieejas datu apkopošanā un simulāciju rezultātu analīzē. Autors izveidoja aprēķinu metodi *Microsoft Excel*, *Therm* un *Matlab* programmatūrā un veica nepieciešamos eksperimentus ar reālu siltuma akumulatoru un centrālām siltumapgādes sistēmām.

Darbā veikta siltumenerģijas akumulācijas izpēte un apkopota dažādu siltumapgādes uzņēmumu pieredze. Darba gaitā autors izstrādājis savu lēmumu pieņemšanas algoritmu brīvās elektroenerģijas tirgus apstākļiem, ko atzinīgi novērtējuši nozares uzņēmumi.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba galvenie zinātniskie sasniegumi un rezultāti prezentēti piecās starptautiskās zinātniskās un trīs vietējās konferencēs.

Par promocijas darba tematu ir publicēti pieci pilna teksta zinātniskie raksti, piecas pilna teksta publikācijas konferenču rakstu krājumā un piecas zinātniskās konferenču tēzes.

Promocijas darba aprobācija

Par darba rezultātiem ziņots un tie tika apspriesti četrās starptautiskās konferencēs.

1. Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā conference 2018. gada 12. oktobrī, Rīgā, Latvijā.
2. 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2020. gada 20.–22. maijā, Jelgava, Latvija.

3. 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2019) 2019. 7–9 oktobrī, Rīga, Latvija.
4. 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020) 2020. gada 5.–6. novembrī, Rīga, Latvija.
5. Rīgas Tehniskās universitātes 61. starptautiskā zinātniskā konferences. 2020. gada 14. oktobrī, Rīga, Latvija.
6. Riga Technical University 62nd International Scientific Conference. 2021. gada 15. oktobrī. Rīga, Latvija.
7. RTU 62. studentu zinātniski tehniskā konference. Sekcija “Ražošanas tehnoloģija” 2021. gada 29. aprīlī, Rīga, Latvija.
8. Zinātniski metodiskā konference «Izaicinājumi inženierzinātņu augstākajā izglītībā». 2021. gada 15. oktobrī. Rīga, Latvija.

Promocijas darba publikācijas

1. Soročins, A., Rusovs, D., Nagla, J., **Žentiņš V.** The Influence of the Thermal Storage on the Electricity Production in a Co-Generation in Peak and Off-Peak Time Range. *2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*: 5–6 2020. November, Riga, Piscataway: IEEE, 2020, pp. 136–139. ISBN 978-1-7281-9511-7.
2. Soročins, A., Nagla, J., **Žentiņš V.** District Heating Simulation Model Development to Solve Optimization Problems in the Market Conditions. *No: 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*, Latvija, Riga, 5.–6. novembris, 2020. Piscataway: IEEE, 2020, Article number 9316575. ISBN 978-1-7281-9511-7.
3. Rusovs D., **Žentiņš V.** Steam driven absorption heat pump and flue gas condenser applied for heat recovery in district heating network. *19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2020, Jelgava:, pp. 1627–1632. ISSN 1691-5976.
4. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Cars A. Increasing the efficiency of the heat storage by using a absorption heat pump. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. gada 15. oktobrī, p. 9, ISBN 978-9934-22-756-1.
5. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Cars A., Analysis of different thermal insulation solutions of a heat storage. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. gada 15. oktobrī, p.5, ISBN 978-9934-22-756-1.
6. Vostrikovs S., **Žentiņš V.**, Rusovs D., Klimatneitralitāte, tehnogēno risku mazināšana un atjaunojamo energoresursu izmantošana siltumapgādē un enerģētikā. *Zinātniski metodiskā konference “Izaicinājumi inženierzinātņu augstākajā izglītībā”*. 2021. gada 15. oktobrī, Rīga, p. 82–84, ISBN 978-9934-22-672-4.

7. **Žentiņš V.**, Soročins A., Koģenerācijas staciju ražošanas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltuma akumulatoru. *RTU 62. studentu zinātniski tehniskā konference. Sekcija "Ražošanas tehnoloģija"*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021. ISBN 978-9934-22-649-6.
8. **Zentins V.**, Sorocins A., Nagla J., Rusovs D., Insulation cost impact on heat accumulation unit heat loss. *Rīgas Tehniskās universitātes 61. starptautiskā zinātniskā konference*. 2020. gada 14. oktobrī. ISBN 978-9934-22-503-1.
9. **Žentiņš V.**, Valpētris M., Ķibilds A., Mitruma un temperatūras sensoru izstrāde. *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. oktobrī.
10. **Žentiņš V.** Nagla J. Ūdenssildāmā katla KVG100 efektivitātes paaugstināšana, izmantojot siltumsūkni *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. Oktobrī.
11. Nagla J., **Žentiņš V.**, Jaundālders S., Soročins A., Metodika tirgus apstākļiem piemērota centralizētās siltumapgādes sistēmas optimizācijas modeļa izstrādei, Latvija. *Rīgas Tehniskās universitātes 59. starptautiskā zinātniskā konference*. Rīga, 2018. gada 12. oktobrī.

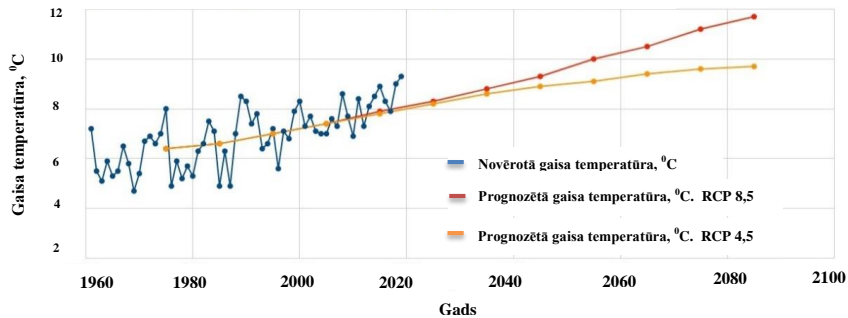
Raksti zinātniskajos žurnālos

1. Rusovs, D., Jakovļeva, L., **Žentiņš, V.**, Baltputnis, K. Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, Vol. 58, No. 3, 121.–136. lpp. ISSN 0868-8257.
2. **Žentiņš V.**, Rusovs D., Soročins A., Decision Making Control Algorithm for Cogeneration Plants in Operating with the Heat Accumulator Deep Analysis Model. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly Journal 2022*, Rīga No. 30, ISSN: 2255-9922.

1. LITERATŪRAS APSKATS

1.1. Klimata īpatnības un efektivitātes paaugstināšanas iespējas koģenerācijas stacijām

Novērojumu dati liecina, ka klimata pārmaiņas notiek arī Latvijā, tās saistītas ar globālo sasilšanu. No 1961. gada līdz 2016. gadam ir novērojama vienmērīga gaisa temperatūras paaugstināšanās, kas ir izteikta gan vidējās gaisa temperatūras vērtībās, gan minimālās un maksimālās gaisa temperatūras vērtībās. Piemēram, vidējās gaisa temperatūras klimatiskā standarta norma (1981.-2010. gads) ir par 0,7 °C augstāka nekā klimatiskās references perioda (1961.-1990. gads) gada vidējā gaisa temperatūra. [63]



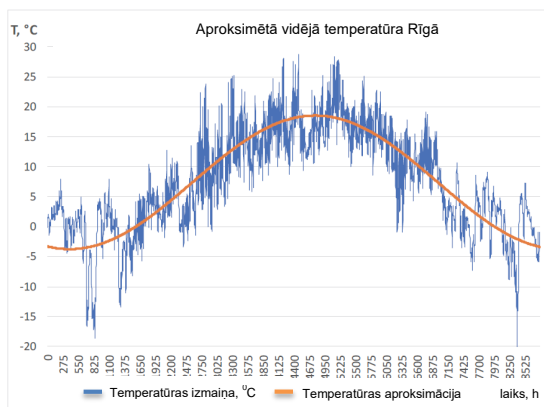
1.1.1.att. Vidējā gaisa temperatūra Rīgā [64]

2019. gada kalendārajā ziemā (decembris-februāris) Latvijā vidējā gaisa temperatūra bija +2,7 °C (5,7 °C virs sezonas normas), tādējādi 2019./2020. gada ziemai kļūstot par siltāko novērojumu vēsturē, par 1,7 grādiem pārspējot 1924./1925. gada ziemas rekordu.

2019. gada rudens (septembris-novembris) vidējā gaisa temperatūra Latvijā bija +8,3°C, kas ir 1,6°C virs sezonas normas. Pavasara vidējā gaisa temperatūra Latvijā bija +6,0°C, kas ir 0,4° virs sezonas normas, un šis bija 20. siltākais pavasaris novērojumu vēsturē. [64,65]

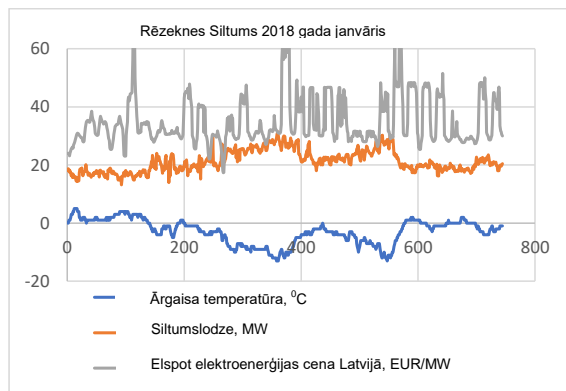
Vidējā gaisa temperatūra katru gadu paaugstinās, to var redzēt 1.1.1.att. un pēc zinātnieku novērojumiem klimata pārmaiņas turpināsies. Klimata pārmaiņu rezultātā nav izteiktu ilgstošu, aukstu ziemas periodu, kā arī pavasara un rudens mēneši palikuši siltāki, bet ar krasām temperatūras svārstībām.

Latvija atrodas mērenajā klimata joslā, kur vasaras un ziemas gaisa temperatūras ir ne tikai ļoti mainīgas sezonāli, bet arī diennaktī bieži mainās pat 15-20 °C diapazonā. [7] No 1.1.2. att. var redzēt kā mainās gada laikā gaisa temperatūra Rīgas pilsētā



1.1.2.att. gaisa temperatūra Rīgā gada laikā un tā aproksimācija [105].

Lai nodrošinātu stabilu siltuma slodzi, apkures sistēmā pie mainīgiem klimatiskiem datiem nepieciešams nepārtraukti regulēt jaudu siltumavotiem[69]. Ražojot koģenerācijas režīmā, mainīga ir ne tikai siltuma slodze, bet arī svārstīgas elektrības tirgus cenas, piemēram, Nordpool sistēmā.



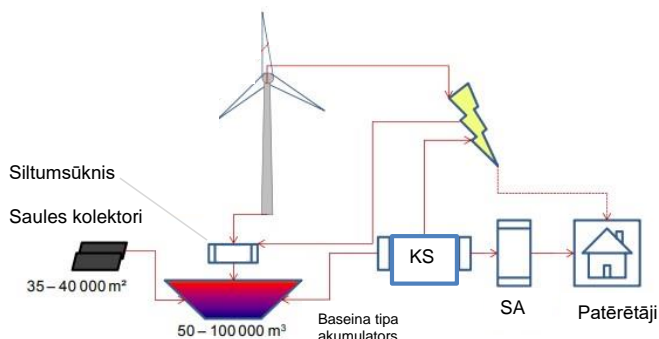
1.1.3.att. Siltuma jauda, gaisa temperatūra un elektroenerģijas cena pēc Nordpool datiem. Janvāris 2018 [6].

Siltuma akumulācija dod iespēju atdalīt siltuma un elektrības ražošanu, tādējādi ļaujot ražošanas iekārtām strādāt maksimāli bāzes režīmos un izvairīties no cikliskām slodzēm, kas var

novest pie bojājuma [76]. Brīvās siltuma enerģijas tirgus apstākļos akumulācija nodrošina iespēju elastīgi sekot enerģijas pieprasījumam un ražot enerģiju ar tādiem iekārtas režīmiem, kādi ir maksimāli efektīvi no kurināmā patēriņa viedokļa [93]. Tādējādi ir iespējams efektīvi izmantot, esošās staciju jaudas tajā skaitā elektroenerģijas ražošanu maksimālās slodzes režīmos pie augstas tirgus cenas [86]. Termiskā uzglabāšana ir 100 reizes lētāka, salīdzinot ar ieguldījumiem uz vienu uzglabāšanas jaudas vienību elektrībai [9].

Tehnoloģijām attīstoties, energoefektivitātes pasākumi un ar atjaunojamiem energoresursiem saistīti risinājumi tiek pakāpeniski ieviesti siltumapgādes sistēmās, tādējādi virzoties uz 4. [79,80] vai pat 5. paaudzes[81] viedajiem CSS. Mūsdienās dienās CSS apvieno daudzus enerģijas avotus - biomasas, saules, vēja u.c.[10,11]. Balansēšana starp tiem ir ļoti sarežģīta, jo, piemēram, vēja un saules enerģija nav pastāvīga, savukārt, koģenerācijas stacijai nav pastāvīga pieprasītā siltumslodze un ir mainīga elektroenerģijas cena.

Kā rāda Dānijas pilsētu Dronninglundas un Marstalas CSS piemēri no attēla 1.1.4., tad tiek balansēta ne tikai siltumenerģija, bet arī elektroenerģija caur sezonālo siltuma akumulācijas tvertni izmantojot siltumsūkņa sistēmas tehnoloģiju. Zemas elektroenerģijas cenas brīžos tā tiek uzkrāta siltumenerģijas veidā.



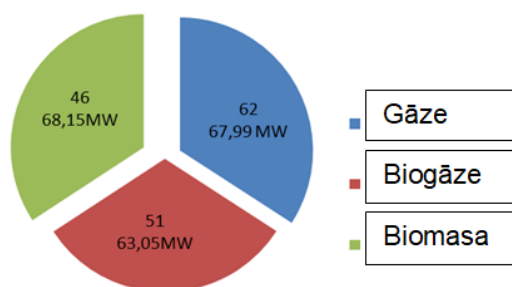
1.1.4. att. Dronninglundas un Marstalas CSS shēma [66].

Šis projekts ļauj Marstal centralizētajai siltumapgādei piegādāt apkuri patērētājiem no 100% atjaunojamiem enerģijas avotiem, no kuriem aptuveni 50% ir saules enerģija, kas iegūta no solārajiem paneļiem [7]. Lai maksimāli efektīvi izmantotu visus šos enerģijas avotus, tad ir nepieciešama enerģijas uzkrāšana ne tikai diennakts akumulācija, bet arī nedēļas, mēneša un sezonāla.

1.2. Koģenerāciju staciju apskats Latvijā un ražošanas lēmuma pieņemšana

Enerģētikas tirgus liberalizācija un ES mērķi par energoefektivitātes uzlabojumu katrai dalībvalstij [4] veicina siltuma akumulācijas iekārtu strauju attīstību. Precīza ražošanas plānošana ir ļoti svarīga koģenerācijas stacijās, kas darbojas elektroenerģijas brīvās tirgus apstākļos [40, 53], bet, izmantojot siltuma akumulatoru, tās nozīmē būtiski palielinās gan sarežģītības, gan papildu aprēķina funkciju dēļ. Turklāt ražošanas procesu ietekmē mainīgās siltuma, CO₂ un kurināmā izmaksas [41]. Latvijā 175 stacijas koģenerācijas režīmā saražo 75 % siltumu. 2019. gadā no visām KS (koģenerācijas stacijas) 159 saņēma OI atbalstu elektroenerģijas ražošanai, piecas lielākās stacijas virs 10 MW_{el} – uzstādītās jaudas maksu, kas patērētājiem veido OIK, kas tiek pieskaitīts elektrības rēķinam. KS zem 10 MW_{el}, kas saņēma OIK atbalstu, kopējā uzstādītā elektriskā jauda ir 199,2 MW_{el}.

Koģenerāciju skaits un kopējā jauda



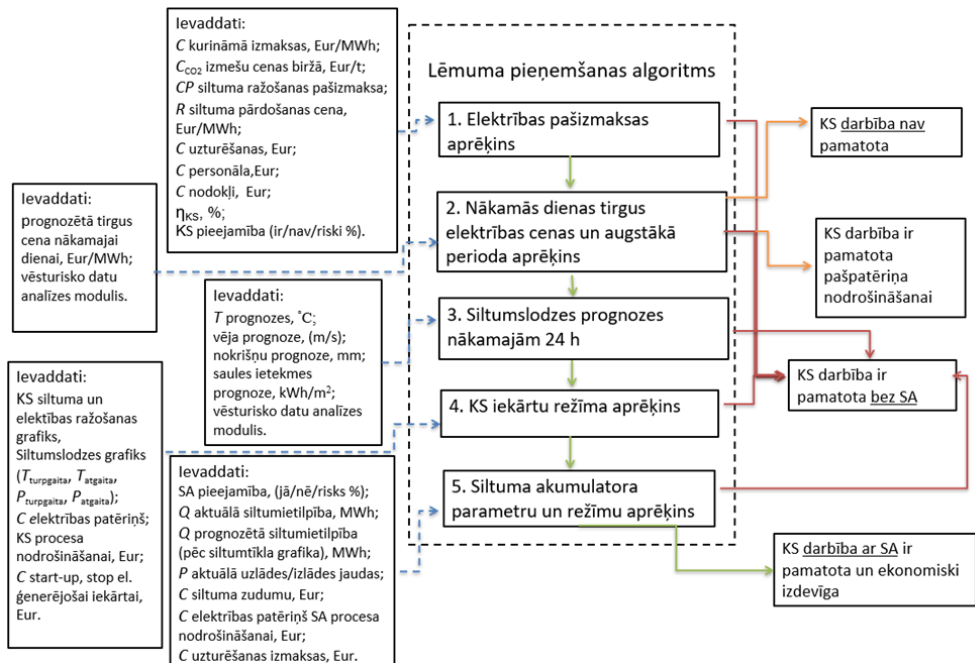
1.2.1.att. Koģenerāciju staciju iedalījums pēc kurināmā [42].

Kopējā uzstādītā jauda 62 gāzes, 51 biogāzes un 48 biomasas KS ir robežās no 63,05 MW_{el} biogāzei līdz 68,15 MW_{el} biomasai. Savukārt piecām lielākajām koģenerācijas stacijām uzstādītā jauda ir 1061,90 MW_{el}, un tās saņem uzstādītās jaudas atbalstu, kas arī ietilpst OIK [42]. Kopā no 2020.–2022. gadam atbalstu zaudēs 61 stacija [43] no pavisam 164 stacijām jeb 37 % no kopējā skaita. Arī pēc 2022. gada staciju skaits, kam beidzas valsts atbalsts, samazināsies, jo garantētais OI elektroenerģijai paredzēja no 10–15 gadu atbalsta periodu [44]. Lielai daļai KS, tuvojoties vai jau beidzoties OIK atbalstam, ir jāpārorientējas brīvās tirgus apstākļiem, tas nozīmē, ka elektroenerģija netiek iepirkta garantētās maksas ietvaros.

Lai maksimāli īsākā periodā varētu pieņemt maksimāli precīzu rezultātu dalībai brīvā elektroenerģijas tirgū, piemēram, *Nord Pool* nākamās dienas tirgus, kur piedāvājuma un pieprasījuma piedāvājumi nākamajai dienai jāizvieto ne vēlāk kā līdz pulksten 12 dienā [22], ir jāspēj apstrādāt liels datu apjoms. Šajā datu apjomā ietilpst nākamās dienas siltumslodzes prognozes, KS darbība, elektrības cenas izmaiņas, turklāt SA gadījumā jāņem vērā arī tā

darbības parametri. Ja netiek ņemti vērā visi apstākļi, var rasties situācija, kad KS darbība ar SA var neradīt maksimālo labāko rezultātu, vai arī radīt pat zaudējumus.

Mainoties ārējiem faktoriem, piemēram, siltuma slodzei, kā arī elektroenerģijas tirgus cenai [22], ir gandrīz neiespējami panākt perfektu koģenerācijas režīmu plānošanu nākamajai dienai, taču šo mērķi var tuvināt, izmantojot dažādas metodikas. Ir vairāki veidi, kā panākt elastīgāku koģenerācijas staciju ekspluatāciju tirgus apstākļos [58]. Viens no tiem ir SA izmantošana [59]. Turklāt, plānojot saskaņotu koģenerācijas stacijas darbību ar SA, var paaugstināt efektivitāti, taču tas plānošanas uzdevumu padara vēl sarežģītāku [60]. Koģenerācijas stacijas daudzlīmeņu algoritma kontroles mērķis ir iegūt maksimālu pozitīvu rezultātu, ātri izslēdzot tos darbības scenārijus, kuros KS ar SA darbība nav tehniski vai ekonomiski lietderīga.



1.2.2. att. Funkcionāla shēma piecu mainīgo bloku definēšanai [62].

Šis algoritms ietver vairāku līmeņu sistēmas ar galvenajiem pieciem bloku aprēķinu moduļiem, katram modulim ir savi ievaddati, katrs no tiem var savstarpēji mijiedarboties ar savu funkcijas izeju jeb rezultātu. Izejot cauri visām funkciju ķēdēm, tiek izfiltrēti gadījumi, vai KS darbība ar SA ir efektīva, vai nav. Turklāt ir iespējams, ka ievaddatu parametru aprēķinu funkciju rezultāti kādā no šiem atsevišķiem blokiem parāda, ka SA izmantošana nav lietderīga.

Lai sasniegtu visefektīvāko rezultātu, ir nepieciešams optimizēt lēmumu pieņemšanas algoritmu, kas apvieno šos atsevišķos procesus vienotā. Algoritms ietver piecus lielus pamatblokus, kas definē galvenos procesus, piešķirot lielu nozīmi siltuma akumulatora darbības režīmu parametriem un zudumiem.

1. **Elektrības pašizmaksas aprēķina modulis** – viens galvenajiem rādītājiem, lai varētu startēt brīvajā tirgū, ir precīza kalkulācija aktuālajai saražotās elektrības pašizmaksai [61], ko ietekmē tādi mainīgi faktori, kā kurināmā izmaksas, siltuma ražošanas pašizmaksa pret pārdošanas cenu, kā arī CO₂ izmešu cenas biržas faktora, ja stacija neizmanto atjaunojamo kurināmo. Turklāt šajā blokā nosaka iekārtu pieejamību un darbības riskus.

2. **Elektrības tirgus cenas aprēķina modulis** nosaka nākamās dienas elektrības cenas prognozes. Tirgus cenas kalkulācijā tiek analizēti un meklēti elektrības maksimālie un minimālie vidējie cenu periodi, salīdzinot ar vidējo elektroenerģijas pašizmaksas cenu. Turklāt daudzos pētījumos tiek izmantota vēsturisko datu analīze, kas palīdz veikt plānošanu ilgākam periodam [45].

3. **Siltumslodzes aprēķina modulis** paredz precīzu siltuma slodzes prognozes veikšanu katrai stundai [36] nākamajās 24 h, kas būtiski ietekmē visu ražošanas plānošanas procesu. Neprecīzas prognozes rezultātā siltuma akumulators var tikt priekšlaicīgi uzlādēts un, turpinot ražot lieko siltumu, vairs nebūtu iespējams uzkrāt, kas ietekmētu to, ka jāsamazina ražošanas jaudas. Var būt arī situācija, kad, sākot jauno biržas ciklu, SA vēl nav izlādēts. Arī šajā gadījumā ražošana ar noteikto jaudu notikt nevar.

4. **Koģenerācijas darbības režīma modulis** kurā atkarībā no siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas attiecības un ģenerācijas bloku elastības ir jāveic aprēķins, lai pieņemtu lēmumu par ražošanas sākšanu. Turklāt ir jāņem vērā arī koģenerācijas stacijas palaišanas un izslēgšanas apstākļi un ražošanas jaudas amplitūda diennakts laikā, kas var kaitēt iekārtu tehniskajām sastāvdaļām [39]. Jāņem vērā arī KS iekārtas palaišanas un apstāšanās apstākļi un izmaksas [46].

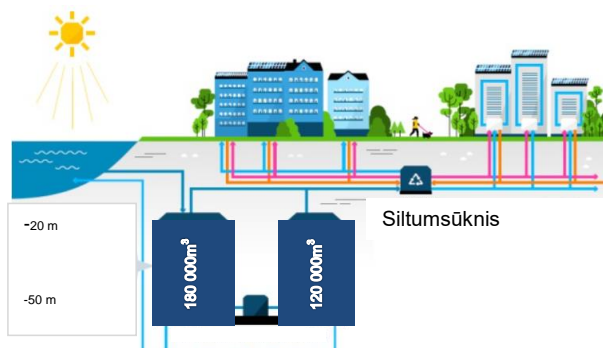
5. **Siltuma akumulatora aprēķina modulis** ietver siltuma uzkrāšanas tehniskos parametrus un aprēķinu funkcijas: siltuma jauda, uzlādes un izlādes jauda, zudumi, elektriskie u. c. tehniskie parametri. Ļoti svarīga ir iekārtu pieejamība akumulācijas sistēmai.

1.3. Siltuma akumulācijas tvertnes piemēri Eiropā un Latvijā

Eiropā siltuma akumulācijas iekārtas ir vairāk izplatītas ziemeļvalstīs un līderes to izmantošanā ir Dānija un Zviedrija. Kopējā akumulācijas tvertņu siltumietilpība ir liela, piemēram, Zviedrijā tā ir 42GWh, bet Dānijā pat 50 GWh. Eiropā vislielākās siltumakumulācijas

tvertnes atrodas Dānijā. Pašreiz pati lielākā tvertne ir Odensē un tās ietilpība ir 75 000 m³, siltumietilpība var sasniegt 3,6 GWh [12].

Šobrīd Somijā izbūves procesā ir pasaulē lielākās siltuma akumulācijas tvertnes, kuras parādītas 1.3.1. attēla principiālā shēmā. Izbūvi bija plānots pabeigt 2021.gadā, šīs tvertnes atrodas Mustikama salā Helsinkos. Tās atrodās pazemē - klintīs - 50 m zem jūras līmeņa. Iepriekš šajā vietā tika glabāti naftas krājumi. Alas būtiski nav jāpārveido, tās tiks izmantotas kā tvertnes, no kurām vienai ietilpība ir 180 000 m³, bet otrai - 120 000 m³[73]. Alas-tvertnes izmantos sezonālās enerģijas uzglabāšanai, ūdens temperatūra šajos siltuma akumulatoros būs 45-100 °C, bet klints karstums tehniskajos tuneļos būs līdz 60 °C. [74] Darbības pamatā ir siltumsūkņi, kuri tiks izmantoti ēku apsildei un dzesēšanai. Vasarā alas piepildīs ar saules sasildītu jūras ūdeni, bet ziemā šis ūdens tiks izmantots kā enerģijas avots siltumsūkņim. Liekā saules enerģija vasarā no ēkām tiks savākta un uzglabāta alu siltumakumulācijas sistēmā. Uzkrātā enerģija tiks izmantota, kad radīsies tāda nepieciešamība. Šo siltumakumulatoru jauda ir 120 MW un ar to pietiek, lai 4 dienas apsildītu daļu Helsinku [73].



1.3.1. att. Mustikama siltumakumulācijas sistēma [73].

Latvijā pirmās SA tvertnes ar tilpumu virs 1000 m³ tika izbūvētas sākot ar 2019.gadu, kur pirmā atklāta SIA “Salaspils Siltums” ar tilpumu 8000 m³. Šajā pašā gadā Jelgavas pilsētā uzņēmumā SIA “Fortum Latvia” tapa SA ar 5000 m³ un 180 MWh siltumietilpību [26]. A/S “Latvenergo” TEC-2 2021. gada 26. martā tika pieņemts ekspluatācijā un ir Baltijā lielākais SA, ar tilpumu 18 000 m³ [78], kurš ir salīdzināms jau ar ziemeļvalstu SA.

1.4. Siltumietilpības akumulācija un to fizikālie principi

Siltumenerģētikā visbiežāk izmanto siltumietilpības akumulāciju, jo tā ir visvienkāršākā un lētākā [12,67]. Darbības pamatā ir temperatūru izmaiņa akumulācijas vielai. Enerģijas daudzums ir proporcionāls temperatūras pieaugumam, akumulatora materiāla īpatnējai siltumietilpībai un masai. Visplašāk akumulācijai izmanto ūdeni, kas ir vislētākais un pieejamākais. Ūdenim piemīt

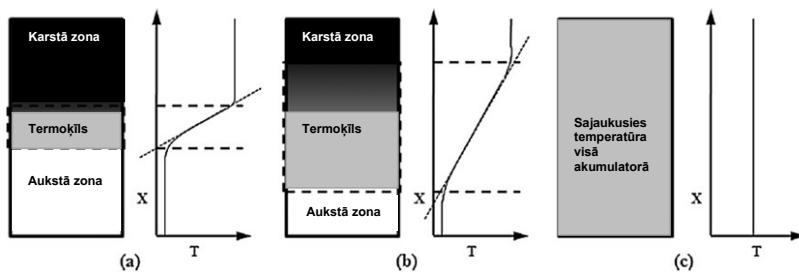
labas siltuma akumulēšanas spējas ar augstu enerģijas blīvumu akumulācijas tilpumā, kas ir mainīgs atkarībā no temperatūras, bet $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $4180\text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Ūdens SA salīdzinājumā ar citiem siltumakumulācijas materiāliem ir vairākas priekšrocības:

- Vieglāk kontrolējama darbība nekā, piemēram, fāžu maiņas materiāliem [87] vai termokīmiskiem akumulatoriem [88];
- Drošība, ja rodas plīsums siltumtrasē, tad ir iespēja veikt papildus piebarošanu.

Viens no mīnusiem ir fāžu pāreja no šķidrā stāvokļa uz gāzveida stāvokli pie $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pie atmosfēras spiediena uz jūras līmeņa un 0°C cietā stāvoklī.

Pētījumā tika apskatītas ūdens akumulējošo vides stratifikācijas tipa siltuma akumulatori, kur gan karstais, gan aukstais ūdens noslāņojas un vienlaicīgi atrodas SA. Šī sadalīšanās notiek Arhimēda spēka ietekmē [13]. Paaugstinoties ūdens temperatūrai, tā blīvums paliek mazāks un sāk celties augšup, savukārt aukstais ūdens noslāņojas SA apakšā. No attēla 1.4.1. a tvertnē redzams, ka starp šiem slāņiem ir sajaukusies temperatūra (termoķīlis) un to nevar izmantot siltumtīkliem.



1.4.1. att. Stratifikācija ar temperatūras sadalījumu akumulatorā [16, 68].

Tvertnē - c ir vienmērīgs temperatūras sadalījums un nav vērojama stratifikācija, savukārt tvertnē - b sajaucies ir gandrīz viss akumulatora tilpums, kas nozīmē, ka zaudēts lietderīgi izmantojamais tilpums.

1.4.1 Siltuma akumulatora efektivitātes rādītāji

Termālās enerģijas uzglabāšanas sistēmas jeb siltumakumulatori ļauj izmantot uzkrāto enerģiju brīdī, kad tas ir nepieciešams. Taču, lai to varētu efektīvi uzkrāt un pēcāk izmantot, ir nepieciešams radīt energoefektīvus siltumakumulatorus [89]. To izbūvē ir nepieciešams ņemt vērā dažādus faktorus.

Augstu stratificētās sistēmās termoķīļa augstums ir zems. Tā biežums nosaka sajaukšanās pakāpi starp karstu un aukstu ūdeni. Plāns, stabils termoķīlis samazina arī siltuma daudzumu, kas tiek pārnestas starp karstu un aukstu ūdeni iekšpusē, tvertnes uzlādes un izlādes laikā, nodrošinot

labāku stratifikāciju. Lai arī stratifikācija ir dabisks process, to ietekmē dažādi faktori, kas maina stratifikācijas pakāpi:

1. siltuma zudumi no akumulatora uz apkārtējo vidi [85];
2. kinētisko spēku iedarbība, ieplūstot vai izplūstot ūdenim no tvertnes, samaisot ūdeni [58];
3. siltuma difūzija un siltuma vadīšana ūdenī, akumulatora sienās [84];
4. akumulatora augstuma/diametra attiecība [56].

Ūdens sajaukšanās tiek uzskatīta par vienu no visbūtiskākajiem iemesliem kāpēc notiek stratifikācijas pasliktināšanās un tādēļ akumulatori zaudē kapacitāti [70]. Lai nodrošinātu labāku stratifikāciju un samazinātu sajaukšanos ir svarīga pietiekami liela temperatūras atšķirība starp tvertnē esošo un ieplūstošo ūdeni. Jo šī starpība ir lielāka, jo labāka stratifikācija un plānāks termoklīvis. Tā biežumu ietekmē arī ūdens plūsmas ātrums – ieplūdes un izplūdes ātrums, jo šie ātrumi ir lielāki, jo vairāk notiek ūdens sajaukšanās un termoklīvis kļūst biežāks. Līdz ar to samazinās siltumakumulatora efektivitāte. Kā vēl vienu ļoti svarīgu aspektu labai stratifikācijai un plānam termoklīvim, jāmin akumulatora augstuma/diametra attiecību – ja tā ir lielāka, tad notiek mazāka ūdens sajaukšanās ar plānu termoklīvi.

Augstuma/diametra attiecību aprēķina:

$$AR = \frac{\text{tvertnes augstums}}{\text{tvertnes diametrs}} \quad (1.4.1.1.)$$

Ūdens ieplūdes ātruma ietekmi uz stratifikāciju un sajaukšanos var aprēķināt izmantojot Ričardsona (*Richardson*) un Reinoldsa (*Reynolds*) skaitļus. Ir zināms, ka sajaukšanās koeficients cieši saistīts termoklīva izzušanu to var izteikt kā attiecību Reinoldsa un Ričardsona skaitļiem [71] Sajaukšanās koeficientu "Z" aprēķina pēc šādas formulas:

$$Z = 1,688 \cdot 10^4 \left(\frac{Re}{Ri} \right)^{0,67} \quad (1.4.1.2.)$$

Sajaukšanās koeficients no viena norāda uz ļoti labi stratificētu sistēmu bez ūdens sajaukšanās. Reinoldsa un Ričardsona attiecībai mazinoties ūdens sajaukšanās reducējas. Šo attiecību attēlo vienādojumā:

$$\frac{Re}{Ri} = \frac{\rho d v^2}{\mu g \beta \Delta T h} \quad (1.4.1.3.)$$

kur Z-sajaukšanās koeficients;

d – rezervuāra diametrs, m;

g-brīvās krišanas paātrinājums, m/s²;

h-rezevuāra augstums,m;

Re- Reinoldsa skaitlis;

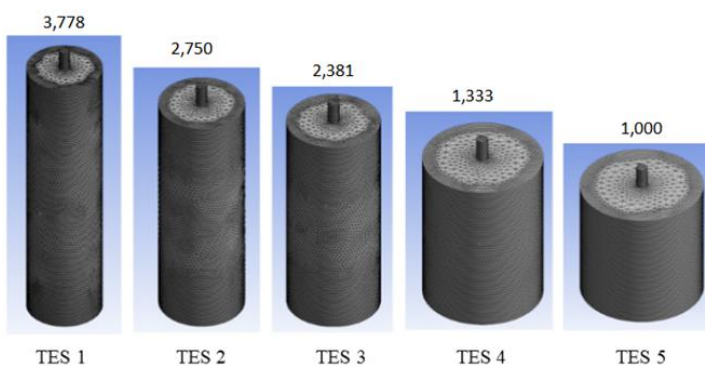
Ri- Ričardsona skaitlis;

ΔT -temperatūras starpība, °C;
 v -ieplūdes ātrums, m/s;
 β - termālās izplešanās koeficients;
 ρ -ūdens blīvums, kg/m³;
 μ -dinamiskā viskozitāte.

Ūdens blīvuma, viskozitātes un termiskās izplešanās parametri ir atkarīgi no temperatūras. Sajaukšanās samazināšanos rada:

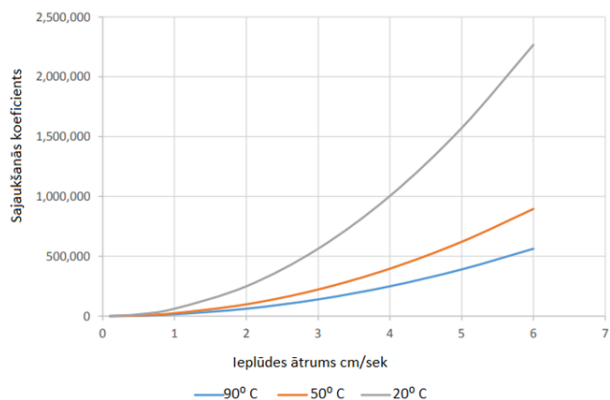
- samazināts ieplūdes ātrums;
- palielināta temperatūras starpība;
- palielināts attālums starp ieplūdes un izplūdes punktiem (palielināta augstuma/diametra attiecība) [72].

SA darbības kapacitāte un stratifikācijas izmaiņas iepriekš minēto faktoru ietekmē tika pētītas simulācijā [72]. Veiktajos pētījumos tika modulētas 5 cilindriskas formas akumulācijas tvertnes ar dažādām augstuma/diametra attiecībām, bet vienādu tilpumu skat. 1.4.1.1.attēlu.



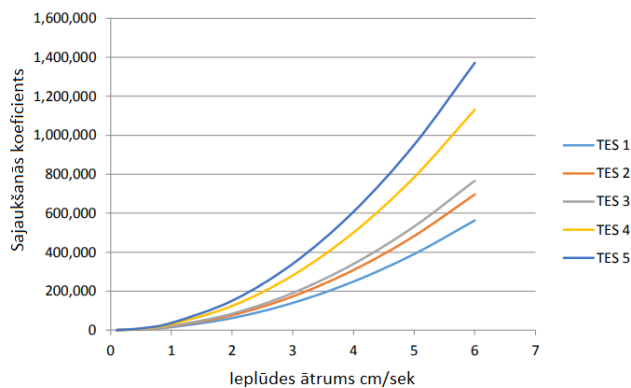
1.4.1.1.att. Augstuma/diametra attiecība [57].

Pētot sajaukšanās koeficienta lielumu, tvertnēs tika vērtēta temperatūras ietekme pie dažādām tvertnes temperatūrām (20 °C, 50 °C, 90 °C) ar nemainīgu ieplūstošā ūdens temperatūru (10°C) un dažādiem ieplūstošā ūdens ātrumiem. Kā redzams attēlā 1.4.1.2., tad sajaukšanās koeficients ir augstāks, ja ir vērojama zemāka temperatūras starpība starp ieplūstošo ūdeni un akumulatorā esošo ūdeni.



1.4.1.2.att.Temperatūras un plūsmas ietekme uz sajaukšanās koeficientu [57].

Sajaukšanās samazinās, ja ir lielāka temperatūras starpība un tādējādi SA darbības kapacitāte palielinās. Papildus var redzēt, ka lielāka ieplūdes plūsma arī pastiprina sajaukšanos, turklāt tas ir vērojams pie visām temperatūrām, bet izteiktāk, ja ir mazāka temperatūras starpība. Līdz ar to efektīvai SA darbībai būtu nepieciešams ievadīt ūdeni, kura temperatūrai ir liela starpība ar akumulatora temperatūru un pēc iespējas ar mazāku plūsmu, tādējādi samazinot sajaukšanos un nodrošinot augstu stratifikāciju.

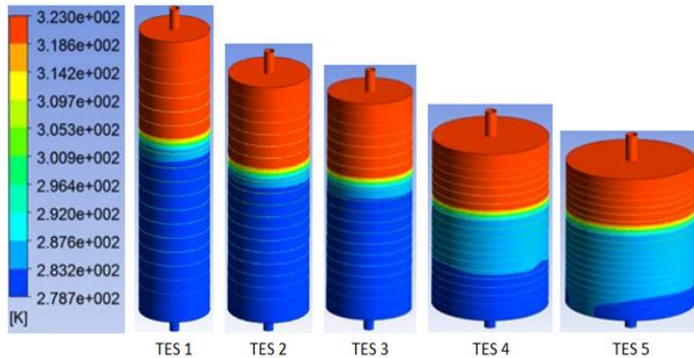


1.4.1.3.att. Plūsmas ietekme uz sajaukšanās koeficientu atkarībā no akumulatora ģeometriskiem izmēriem [57].

Jāņem vērā arī plūsmas ietekme uz sajaukšanās koeficientu dažādos augstuma/diametra attiecību SA. Attēlā 1.4.1.3. vērojams, ka sajaukšanās koeficients ir mazāks tajos SA, kuros augstuma/diametra attiecība ir lielāka salīdzinot ar mazāku attiecību. Turklāt lielākas

augstuma/diametra attiecības SA sajaukšanās koeficientu mazāk ietekmē iepļūdes ātruma pieaugums. Sajaukšanās koeficients pie iepļūdes ātruma 6 cm/sec TES5 akumulatorā

ir pieaudzis par 143% salīdzinot ar TES1 akumulatoru. Tas skaidrojams ar attālumu starp iepļūdes un izpļūdes vārstiem.



1.4.1.4. att. simulācijas rezultāti dažādās siltumakumulācijas tvertnēs pēc 1600 sekundēm [57].

Attēls 1.4.1.4. parāda, ka veiktajās simulācijās tika noskaidrota termokļūļa veidošanās un tā ir atkarīga no dažādām augstuma/diametra attiecībām, kā arī iepļūdes ātruma ietekme uz sajaukšanās koeficientu. Vērojams, ka visās tvertnēs ir izveidojies termokļūlis, taču ūdens sajaukšanās ir daudz izteiktāka mazas augstuma/diametra attiecības tvertnēs. Tādējādi tiek pierādīts arī iepriekšējais teorētiskais apgalvojums par augstuma/diametra attiecības nozīmīgumu efektīvas siltumakumulācijas tvertnes izbūvē.

1.5. Nodaļas secinājumi

Literatūras analīze parāda: lai nodrošinātu stabili siltuma slodzi centralizētās siltumapgādes sistēmā mainīgos klimatiskos apstākļos, ir nepieciešams nepārtraukti regulēt jaudu siltuma avotos. Mainīgā diennakts siltumslodze ietekmē darba režīmus, un ražošanas plānošana ir salīdzinoši vienkārša, ja koģenerācijas stacija saņem valsts atbalstītu elektroenerģijas iepirkumu. Līdz 2022. gadam 37 % koģenerācijas staciju notiek pārorientācija uz brīvā tirgus apstākļiem un valsts atbalsta zaudēšana, šo staciju darbības režīmus ietekmē arī svārstīgais elektroenerģijas tirgus. Enerģētikas politika arī turpmāk virzīsies uz brīvā tirgus apstākļiem. Tādējādi šo staciju ražošanas darba režīmu lēmumus sarežģīt ne tikai mainīgā elektroenerģijas tirgus cena, bet arī tas, ka lēmums par nākamās dienas elektroenerģijas ražošanas apjomu jānosauca kārtējā dienā no plkst. 10 līdz 12. Attiecīgi biržā tiek veidoti pieprasījumi un piedāvājumi.

Siltuma akumulācijas vai siltuma sūkņu tehnoloģiju izmantošanas gadījumā vēl vairāk palielinās mainīgie faktori un nenoteiktība gala ražošanas lēmumu pieņemšanā. Nepieciešams plānot un ņemt vērā iekārtu tehniskos un ekonomiskos parametrus mainīgajos tirgus un vides apstākļos. Piemēram, siltuma akumulatora tehnoloģija var paaugstināt kopējo siltuma avota efektivitāti, taču bez plānošanas un tehnoloģiskiem aprēķiniem var to arī samazināt vai pat radīt zaudējumus atsevišķos darbības režīmos.

Tika definēti pieci lieli algoritmu pamatbloki: elektrības pašizmaksas, elektrības tirgus cenas, siltumslodzes, koģenerācijas darba režīmu un siltuma akumulatora aprēķina modulis, kas visvairāk ietekmē koģenerācijas stacijas ražošanas lēmumu pieņemšanu. Katrs modulis veido aprēķinu funkcijas, kur atkarībā no ievaddatiem izejas funkcijas veido piecus stāvokļus, kuri pamato ražošanas lēmumu.

2. SILTUMA AVOTA DARBĪBAS EFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANA UN IZMEŠU SAMAZINĀŠANA

Latvijas koģenerācijas stacijas nonākot brīvās tirgus apstākļos ir jākonkurē savā starpā ar citām stacijām un elektrības un siltuma pārdotais apjoms atkarīgs no tā pašizmaksas. Staciju kopējās efektivitātes paaugstināšana var būt izšķiroša nozīme rentablai darbībai un pastāvēšanai tirgus apstākļos, ko ietekmē gan pamatiekārtu lietderības koeficients, gan arī uzstādītās palīgiekārtas, kuras sniedz iespēju maksimāli uzmantot kurināmā potenciālu [53]. Uzstādītās palīgiekārtas ietekmē ražošanas procesus pamatiekārtām, gan arī pašas palīgiekārtu darba režīmi ir atkarīgi no pamatiekārtu darbības. Šī savstarpējā darbība prasa papildus izpēti un analīzi dažādiem mainīgiem apstākļiem darba režīmos.

Otrā daļa veltīta, lai piedāvātu risinājumus koģenerācijas stacijas efektivitātes paaugstināšanai, izmešu un fosilo kurināmo samazināšanai ar dūmgāzu ekonomizera, siltumsūkņa vai siltuma akumulatora tehnoloģiju. Plānojot iespējamus darba režīmus stacijai, tad palīgiekārtām ir būtiska nozīme un nepieciešams šos blokus iekļaut koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritmā, kā tas ir nodefinēts 1.2.2. attēla funkcionālās shēmas 4. punktā.

2.1. Absorbcijas tipa siltumsūkņa pielietošana

Dūmgāzu kondensatora izmantošana kļūst par izplatītu risinājumu stacijas efektivitātes paaugstināšanai. Rezultātā kopējā sistēmas efektivitāte pārsniedz 100%, salīdzinot to tikai ar katla lietderību. Katla dūmgāzu rāsas punkts ir aptuveni 50-60 °C, kas atbilst dūmgāzu efektīvam rekuperācijas sliksnim un ir atkarīgs no CST atgaitas ūdens temperatūras. Dūmgāzu dziļā dzesēšana (zem 40-45 °C) un zema potenciāla atgūšana nav iespējama ar tiešu siltuma apmaiņu starp dūmvadiem un tīkla atgaitas ūdeni. Šajā nodaļā apskatīta esošā dūmgāzu kondensatora sistēmas modernizācija, kurai tika pieslēgts esošais absorbcijas tipa siltumsūknis (ATS) ar nominālo jaudu 2,1 MW, lai atgūtu papildus siltumu no dūmgāzēm. Dūmgāzu dziļās dzesēšanas rezultātā samazinās kurināmā patēriņš un tādējādi nodrošinot oglekļa emisiju samazināšanos. Kurināmā mitrums un ūdeņradis kā sastāvdaļa rada ievērojamu mitruma koncentrāciju dūmvados, kas kondensējas. Izplūdes gāzu mitruma kondensācija paaugstina sadegšanas efektivitāti un samazina emisijas līmeni uz enerģijas vienību. Piemēram, sadegot metānam veidojas reakcijas produkts - vismaz 2,25 kilogrami ūdens tvaika uz kilogramu metāna. Kondensācijas rezultātā tvaika daudzums atgriežas enerģijas bilancē no 4 līdz 5 MJ uz kilogramu kurināmā.

Apkures siltumslodzes režīmu atgaitas temperatūras vērtības nosaka kondensācijas ātrumu un siltuma atgūšanu. Attēlā 2.1.1 parādīta kondensācijas ātruma un siltuma atgūšanas sakarība no dūmgāzu temperatūras. [14]. No attēla redzams, ka 45°C temperatūrā tiek kondensēta tikai puse no visa iespējamā mitruma.

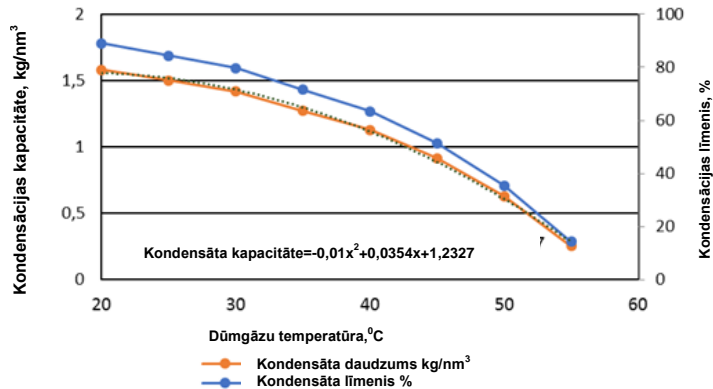
Dūmgāzu temperatūras pazemināšana līdz 25-35 °C, dod iespēju gāzes katla kurināmā siltuma efektivitāti uzlabot līdz pat 16 % [15] un cieto daļiņu samazinājumu biomasas katliem par 33-44

% [16]. Eksperimentālie rezultāti kurināmam ar mitruma saturu 50,9 % liecina, ka izmantojot ATS atgūs līdz 44 % enerģijas no dūmgāzēm, salīdzinot ar 23 % tikai ar DK.

Ja centralizētajai siltumapgādes sistēmai tiek pielietota ATS sistēma, tad ļoti būtisks ir COP pievadītā siltuma daudzuma Q_{sup} un Q_{rec} latentā siltuma, kas atgūts no dūmgāzēm, attiecības [17].

$$COP = \frac{Q_{sup}}{Q_{sup} - Q_{rec}} \quad (2.1.1)$$

Literatūrā minēts, ka šādas sistēmas COP pie līdzīgu parametru vērtībām var sasniegt 1,762 [18].

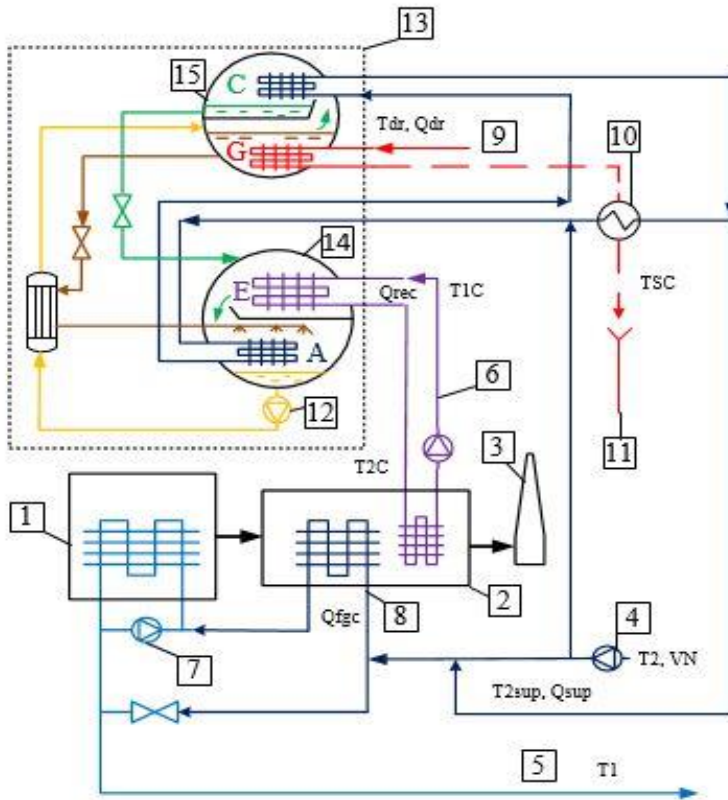


2.1.1.att. Latentā siltuma atgūšana no dūmgāzēm pēc dabasgāzes sadedzināšanas [14].

Absorbcijas sistēma sastāv no trim galvenajām daļām: absorbers, kurā tiek atdesētas dūmgāzes, ģenerators un dzesētājs, kur iztvaicēšanas rezultātā tiek iegūts tvaiks un tas kondensējas pie lielāka spiediena. Nominālā dzesēšanas jauda ir 2,1 MW, dzesēšanai ūdens plūsma 70 m³/h un dūmgāzu atdesēšana no 55 °C līdz 29°C. Piegādātā ATS siltumenerģija sastāv no enerģijas Q_{dr} (no karstām dūmgāzēm, tvaika vai ūdens), kas nonāk ģeneratorā ar nominālo jaudu 2,7 MW. Nominālā dzesēšanas darbība bija ar COP = 0,78 pie ūdens cirkulācijas 110 m³/h slēgtā kontūrā starp no DK un ATS. Savukārt temperatūra DK bija no T_{1C} = 17 °C līdz T_{2C} = 25 °C. Q_{rec} – dūmgāzu daudzums jeb latentā enerģija, kas iegūta DK, tiek izmantota ATS iztvaicēšanas procesam. Pēc tam iztvaicēto ūdeni ar enerģiju absorbē Li-Br šķīdums. Atgaitas ūdens plūsma ATS ir ierobežota un tā novērojuma laikā bija apmēram 350 m³/h. Šī plūsma pēc sasilšanas absorbētājā nonāk ATS kondensatorā, kur Q_{dr} – tvaika ģenerators enerģijai jābūt līdzsvarotai ar atpakaļgaitas CST plūsmu. Atgaitas ūdens plūsma iegūst enerģiju

absorbētājā – Q_{rec} un kondensatorā Q_{dr} . Kopējā enerģija $Q_{sup} = Q_{dr} + Q_{rec}$ ar temperatūru T_{2sup} tiek pievadīta CST atgaitas ūdens plūsmai.

Pētījuma mērķis ir izstrādāt empīrisku sakarību starp siltuma atgūšanas ātrumu dažādiem katla ar ATS un DK darbības režīmiem. Reālā apkures režīmā jaudas pieprasījuma ātrums prasa rūpīgi apsvērt tīklu termiskās inerces ietekmi [19] un enerģijas uzkrāšanu uzlādes plānošanai atbilstoši [20] uzrādītajam tirgus pieprasījumam.

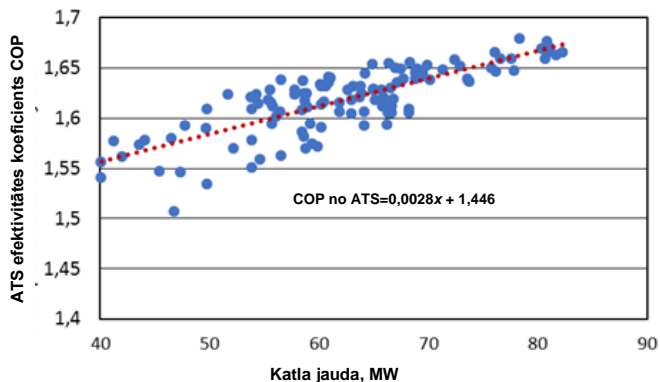


2.1.2. att. Absorbcijas siltumsūkņa un dūmgāzu kondensatora darbība enerģijas atgūšanai: 1 – katls; 2 – dūmgāzu kondensators (DK); 3 – skurstenis; 4 – tīkla cirkulācijas sūknis, atgaitas ūdens no centralizētās siltumapgādes tīkla (CSS); 5 – turpgaitas ūdens uz CSS; 6 – dūmgāzu enerģijas kondensācijas cilpa ATS iztvaicētājam (E); 7 – katla recirkulācijas sūknis; 8 – dūmgāzu enerģijas cilpa; 9 – ūdens tvaika piegāde ATS; 10 – ūdens tvaika kondensatora dzesētājs; 11 – ūdens tvaika kondensāta noteka; 12 – litija bromīda šķidrums cirkulācijas sūknis; 13 – absorbcijas tipa siltumsūkņa (ATS); 14 – iztvaicētājs (E) un absorbētājs (A); 15 – kondensators (C) un ģenerators (G) [21].

Dati, kas parādīti 2.1.3., 2.1.4. un 2.1.5. attēlos, tika iegūti pēc temperatūras un plūsmas ātruma mērījumiem dotajos punktos atbilstoši katru stundu pētāmā darbības periodā ar rūpnieciskās precizitātes līmeni.

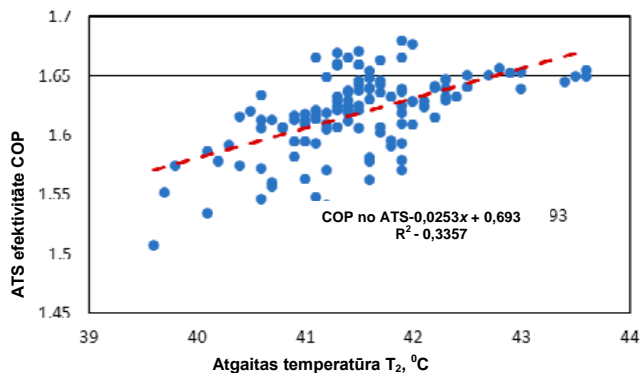
Jaudas un COP daudzuma izkliede aplūkotās diagrammās rodas plašā darbības parametru diapazonā. Piemēram, katla jauda un atgaitas temperatūra T_2 . ATS jaudas Q_{sup} lielumus nominālajai katla jaudai var noteikt, novērtējot ATS darbību. Siltuma atgūšana no tvaika kondensāta tiek nodrošināta kondensatora dzesētājā punktā Nr.10.

Būtiskās ATS COP svārstības katla jaudas izmaiņai var izskaidrot ar dažādas atgaitas temperatūras T_2 vērtībām un ūdens plūsmas izmaiņas daudzumu Q_{DR} . 2.1.3. attēlā tendences rāda, ka COP palielinās tad, kad dūmgāzu daudzums pieaug kopā ar ūdens tvaika daudzumu. ATS tvaika jauda Q_{DR} nodrošina zema potenciāla siltuma atgūšanu no dūmgāzu atdzesēšanas. Tomēr 2.1.3. attēls parāda COP palielināšanos ATS, kad iztvaicētāja temperatūra pieaug. ATS uzvedību var raksturot šādi: COP parasti palielinās, palielinoties iztvaikošanas temperatūrai. Temperatūra ATS iztvaicētājā ir atkarīga no saistītā absorbētāja dzesēšanas vai no atgaitas ūdens temperatūras T_2 . Atgaitas temperatūras vērtība T_2 sniedz informāciju par katla siltuma pieprasījumu CST.



2.1.3.att. Absorbcijas tipa siltumsūkņa COP dažāda katla jaudai [21].

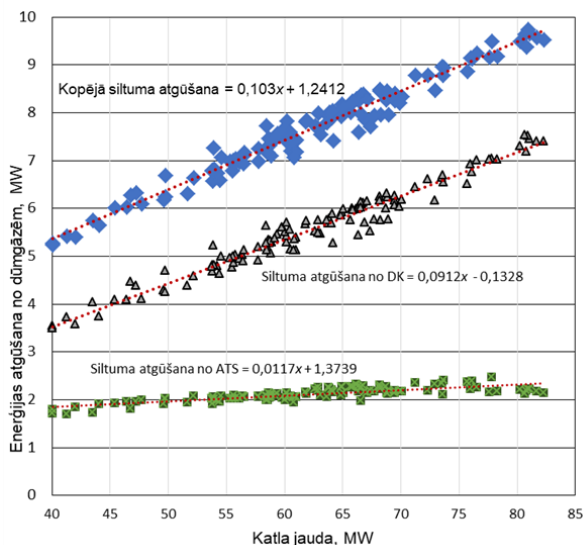
Kad siltuma patēriņš CSS pieaug, tad T_2 samazinās. Līdz ar to katlam tiek palielināta jauda un pēc noteikta laika T_2 vērtību atgūst un seko izstrādātajam temperatūras grafikam. Termiskā inerence katlam un CSS padara T_2 saistību ar katla izvades jaudu diezgan nenoteiktu. Piemēram, $T_2 = 42$ °C var būt katla jaudai diapazonā no 45 līdz 80 MW



2.1.4.att. Absorbcijas siltumsūkņis COP dažādai atgaitas temperatūrai [21].

Dūmgāzu latentajai siltumenerģijai jābūt proporcionālai kurināmā daudzumam, tādējādi siltuma atgūšanai vajadzētu augt kopā ar katla jaudu. 2.1.5. att. parāda sakarību enerģijas atgūšanai DK kopumā.

Var redzēt, ka kopējā enerģijas atgūšana seko katla jaudas pieauguma novirzei, kur pie 40 MW jaudas atgūst 5,2 MW siltuma. Pie 80 MW katla jaudas vajadzētu būt 10,4 MW, bet reālā ekspluatācijā reģenerācijas vērtība ir tikai 9,5 MW.



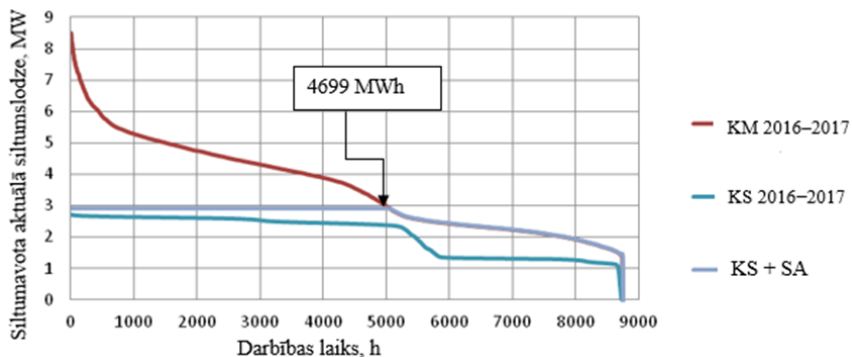
2.1.5. att. Enerģijas atgūšana no dūmgāzēm: ATS (Q_{rec}) ■, DK (Q_{fgc}) ▲ un kopējā ($Q_{rec} + Q_{fgc}$) ◆ [21].

Šo 10 % deficītu var izskaidrot ar ierobežoto Q_{rec} . Kad katla jauda dubultojas no 40 līdz 80 MW, ATS sistēmā Q_{rec} vērtība palielinās par 35-40 %. Empīriskie vienādojumi, kas parādīti diagrammās no 2.1.3. līdz 2.1.5. att., atspoguļo katla ietekmi uz jaudu, atgaitas temperatūru T_2 un uz reģenerācijas efektivitāti COP vērtību. Šīs attiecības sakarības pavērs ceļu ražošanas plānošanai, siltumtīklu darbības simulācijai, kā arī sistēmas darbības tālākai uzlabošanai.

2.2. Siltuma akumulatora izmantošana

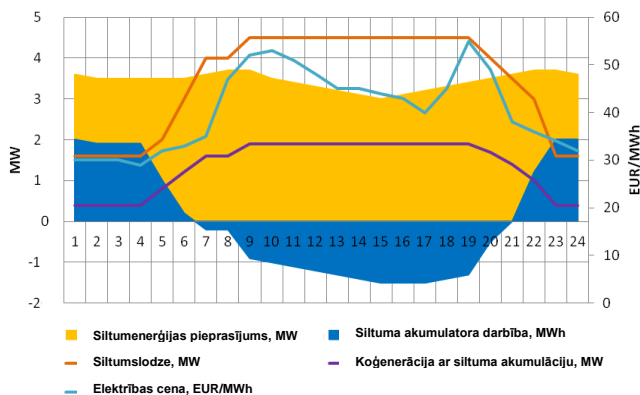
Pamatojoties uz siltuma skaitītāju datiem par trīs gadu periodu: 2015./2016., 2016./2017.g. un 2017./2018.g., tika analizēti KM siltuma slodzes dinamikas stundas dati. Veicot datu apstrādi un konstruējot siltumslodzes grafiku no 2.2.1. attēla redzama kopējā siltumavota slodze KM un KS režīmos. Modulācijas rezultātā, tika sastādīts siltumslodzes grafiks KS darbībā ar SA.

Katram apkures periodam tika sastādīts faktiskais siltuma slodzes ilguma grafiks jeb tā sauktais Rosandera grafiks, atsevišķi sadalot koģenerācijas un katla siltuma slodzi (2.2.1.att.). Koģenerācijas iekārta neatrodas maksimālās slodzes sadaļā no ~ 4000 līdz 8760 stundām.



2.2.1. att. KM siltuma slodzes grafiks (2016./2017.gada periodam) [22].

KS vienmērīgas darbības nodrošināšanai mainīgas siltumslodzes un elektroenerģijas tirgū ir risinājums ar SA pielietošanu kā parādīts 2.2.2.attēlā[23]. Tajā redzams, ka galvenie ieguvumi no SA pielietošanas ir: panākta iekārtu vienmērīga darbība, elektrības cenas pīķu stundās tiek maksimāli izmantotas koģenerācijas iekārtas. Modulējot situāciju, lai novērtētu KS darbību ar SA un iespējamo papildu saražoto elektroenerģiju salīdzinot KS bez SA tika izmantoti Nordpool spot dati, kur bija iespējams atrast stundas vēsturiskos datus par elektroenerģijas cenām Latvijā [8]. Aprēķinos tika analizēta atšķirība elektroenerģijas cenās starp vidējo cenu “pīķa” periodā un periodu, kad elektroenerģijas cena ir kritusies (vidējais svērtais laiks ārpus pīķa).



2.2.2.att. Siltumavota ar siltuma akumulatoru darbība 24 stundu ciklam [22].

Izmantojot SA tiek panākta koģenerācijas iekārtas nepārtraukta darbība diapazonā no 50% līdz 100% no uzstādītās jaudas. Salīdzinot ar 3 gadu vidējo apkures periodu, koģenerācijas režīmā ir iespējams ražot papildus 4272 MWh elektroenerģijas un kombinētā ciklā iegūtu 4699 MWh siltumenerģijas.

2.2.1. tabula

KS darbību ar un bez akumulatora [22]

Nosaukums	Vienība	Pirms SA	Pēc SA uzstādīšanas	Starpība
		Vidējais 3 gadu	Prognozētais	Pirms-Pēc SA
Pārdotā elektrība	MWh	14651	18453	3802
Pārdotais siltums	MWh	22061	22061	0
Elektrības saražotais koģenerācijas režīmā	MWh	16462	20734	4272
Siltuma enerģijas saražotais	MWh	31516	31516	0
KS	MWh	18108	22807	4699
Katls	MWh	13408	8709	-4699
Kurināmā patēriņš	MWh	54836	60721	5885
KS	MWh	41155	51834	10679
Katls	MWh	13682	8887	-4795

2.3. Nodaļas secinājumi

Efektivitātes paaugstināšanu, izmešu samazināšanu un siltumsloдzes balansēšanu var panākt, ekspluatācijas stadijā modernizējot stacijas ar siltuma akumulācijas un siltumsūkņa tehnoloģiju.

- Dziļai dūmgāzu dzesēšanai ar absorbcijas tipa siltumsūkni ir plašs potenciāls lietojums, gan koģenerācijas stacijās, gan katlumājās uzstādītiem ūdenssildāmiem katliem, lai

uzlabotu kopējo efektivitāti. Efektīvai enerģijas atgūšanai no dūmgāzēm ir daudz komponentu (dūmgāzu kondensatori, absorbcijas dzesētāji, siltummaiņi utt.). Joprojām nav pietiekami daudz pētījumu siltumsūkņa nominālās jaudas noteikšanai dažādiem darbības apstākļiem. Eksperimentālie un teorētiskie aprēķinu dati pierāda, ka katla siltumefektivitāti var uzlabot līdz 16 %, ja dūmgāzu temperatūru samazina līdz 25 °C.

- Reālu datu analīze parāda, ka elektrības cenas nakts stundās bieži ir zemākas, taču siltumsloдзе šajā brīdī pieaug, savukārt dienas stundās pie zemākas siltumsloдzes elektroenerģijas cenas sasniedz pīķus. Īslaicīgā siltuma akumulācija ļauj balansēt siltuma slodzi un dienas laikā uzkrāt papildus saražoto siltumu. Pētījums liecina, ka siltuma akumulācijas iekārtas izmantošana koģenerācijas stacijā, kurā ir uzstādītas koģenerācijas iekārtas ar kopējo elektrisko jaudu 2,64 MWel, izmantošana dod iespēju gada laikā saražot un pārdot papildu elektroenerģiju līdz 4272 MWh pie esošās siltumsloдzes. Fosilā kurināmā gadījumā tiek novērsta 959 t CO2 izmešu nokļūšana atmosfērā.

3. SILTUMU ZUDUMU APRĒKINĀŠANAS METODIKA AKUMULATORA DARBĪBAS REŽĪMIEM

Siltumizolācijas biežums un siltumvadītspēja SA ietekmē ne tikai zudumus, bet arī efektivitāti. Slikta siltumizolācija, radot lielus siltuma zudumus, var izjaukt stratifikāciju akumulatora iekšienē un izjaukt karstā un aukstā ūdens slāņus [55,56]. Efektivitāti ietekmē arī SA forma, kur lielākas augstuma un diametra attiecības gadījumā stratifikācija kļūst izteiktāka [57]. Galvenais šīs nodaļas mērķis bija izveidot aprēķina metodiku, lai varētu noteikt siltuma zudumus akumulatora darbības režīmiem un salīdzināt trīs reālu siltuma akumulatoru siltumizolācijas risinājuma efektivitāti veicot to analīzi, kuri pielietoti 3 lielākiem Latvijas siltuma akumulatoriem.

3.1.tabula

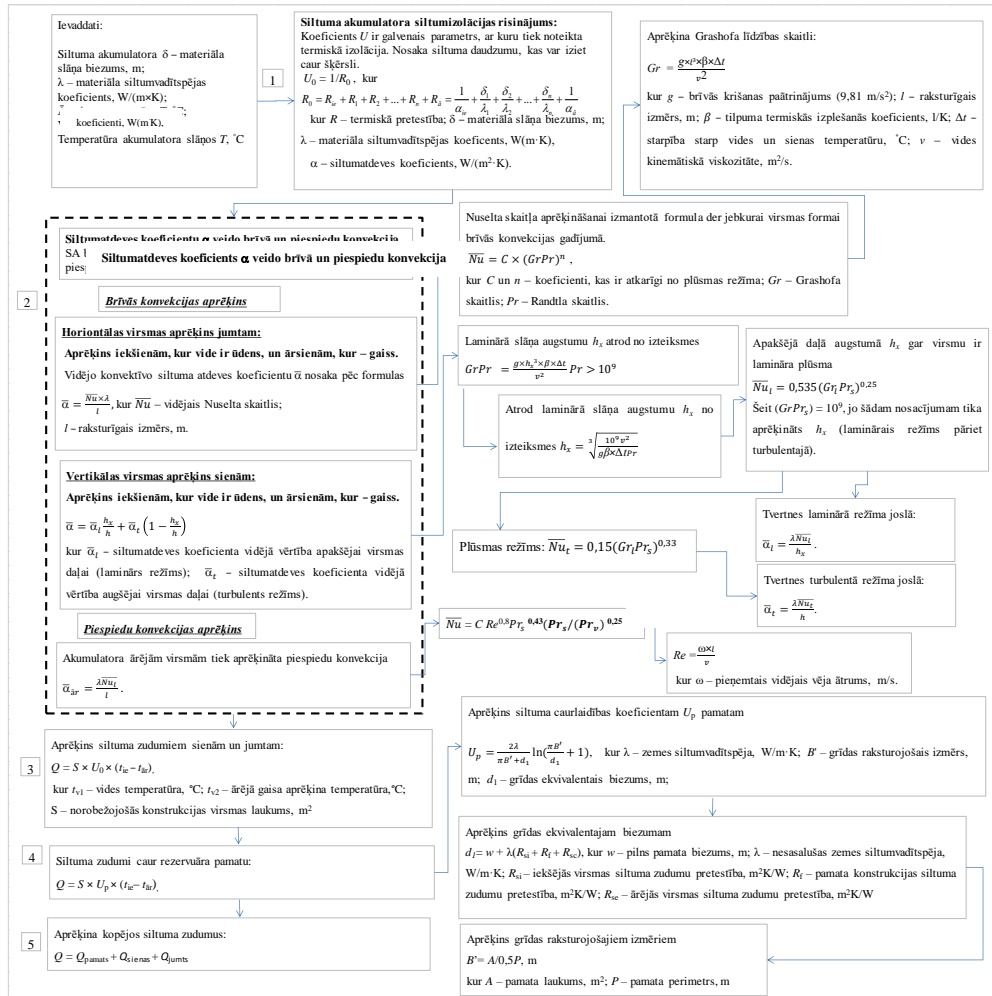
Lielāko Latvijas siltuma akumulatoru izolācijas risinājumi [30]

Konstruktīvas nosaukums	Slānis	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)	Objekts, materiāls	Biezums, m	λ , W/(m·K)
		Objekts x			Objekts z			Objekts y		
Rezervuāra jumts	1	tērauds	0,006	50	Tērauds	0,006	50	Tērauds S355 J2H	0,006	50
	2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,0002	0,2
	3	Rokwool s1960	0,5	0,045	PAROC ROS 30	0,26	0,036	PAROC ROS 30	0,3	0,036
	4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	PAROC ROS 50	0,04	0,038	PAROC ROB 80	0,02	0,038
	5				Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	Apšuvuma skārds	0,006	14,4
			U , W/(m ² ·K)	0,0899			0,1208			0,11285
Rezervuāra sienas	1	Tērauds	0,18	50	tērauds	0,012	50	Tērauds S355 J2H	0,08	50
	2	Krāsa (polurītāna)	0,002	0,2	Krāsa (polurītāna)	0,002	0,2	Krāsa (polurītāna bāze)	0,002	0,2
	3	Rokwool s1930	0,4	0,049	PAROC WAS 50	0,3	0,034	PAROC ROS 30	0,3	0,036
	4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	Apšuvuma skārds	0,0006	14,4	PAROC WAB 10t	0,02	0,036
	5							Apšuvuma skārds	0,0006	14,4
			U , W/(m ² ·K)	0,12233			0,1132			0,11235

Aprēķins tika veikts SA ar tilpumu $V = 5000 \text{ m}^3$ un vienādiem ģeometriskiem izmēriem – $S_{\text{pam}} = 200,96 \text{ m}^2$, $S_{\text{jumts}} = 220 \text{ m}^2$, $S_{\text{sienas}} = 1246 \text{ m}^2$, taču mainās siltumizolācijas risinājumi, ko var redzēt pēc 3.1. tabulas datiem kā objektu x, y un z. Tika veikti aprēķini siltuma zudumiem $0 \text{ }^\circ\text{C}$ gaisa temperatūrā, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ karstajam slānim, $47 \text{ }^\circ\text{C}$ aukstajam slānim, kas atbilst reālam CSS grafikam. Sajaukšanās zonas temperatūra tika pieņemta $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Raksturīgie izmēri ir siltuma akumulatora augstums – $25,86 \text{ m}$ un diametrs 16 m . Lai iegūtu ticamāku simulācijas rezultātu,

tika noteiktas α vērtības pie izvēlētajā siltuma akumulatora darbības parametriem gan piespiedu, gan brīvajai konvekcijai.

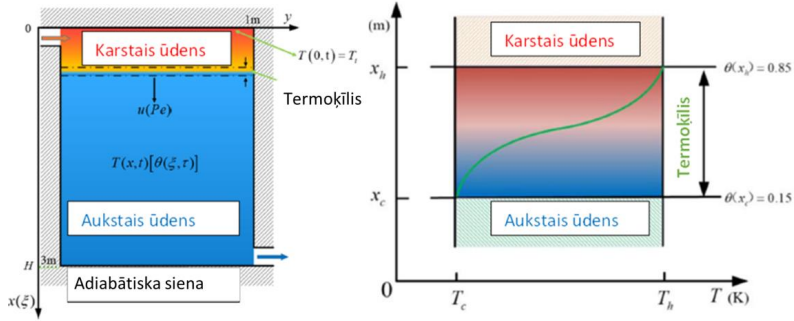
Teorētiskā siltuma zudumu noteikšana vai modelēšana SA prasa ietilpīgus aprēķinus, ko autors veica *Microsoft Excel* datorprogrammā. Lai varētu veikt modelēšanu siltumizolācijas risinājumiem, tad tika izveidota aprēķina metodika blokshēmas veidā, kas redzama 3.1. attēlā.



3.1. att. Siltuma zudumu aprēķināšanas metodika [29,31,32,33].

Nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma siltuma zudumu aprēķins, bet arī termokāļa augstums. Termokāļa augstums dažādos darba režīmos, var samazināt

vai palielināt akumulatora siltumietilpību. Attēlā 3.2. attēlā redzamo termoķīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība [57], siltumizolācijas efektivitāte [56].



3.2. att. Siltuma akumulatora termoķīļa piemērs [101]

Termoķīļa augstums tiek aprēķināts izmantojot diferenciālvienādojumus:

Nepārtrauktības vienādojums izsaka ar uzlādētā akumulatora ūdens masas aprēķina vienādojumu uzlādes cikla laikā. Tas ir izteikts saskaņā ar koordinātu sistēmu [101]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.2.)$$

Impulsa vienādojums nodrošina šķidruma plūsmas ātrumu siltuma akumulatorā (V_r , V_θ un V_z) un spiediena lauka attīstību. To izsaka uz r ass kā 3.2. vienādojumā:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial V_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho V_r V_r)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(V_\theta V_r)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(V_z V_r)}{\partial z} \\ = & -\rho \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} \right) \right] + \mu \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right] + \mu \left[-\frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\rho V_\theta^2}{r} + \rho g_r \beta \Delta T \end{aligned} \quad (3.3.)$$

Uz ass izteikts impulsa vienādojums:

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r\rho V_r V_\theta)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(V_\theta V_\theta)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(V_z V_\theta)}{\partial z} \\ = & -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_\theta)}{\partial r} \right) \right] + \mu \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) - \frac{\rho V_r V_\theta}{r} + \rho g_\theta \beta \Delta T \end{aligned} \quad (3.4.)$$

Uz z ass izteiktais impulsa vienādojums:

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(r\rho V_r V_z)}{\partial r} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(V_\theta V_z)}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial(V_z V_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r V_z)}{\partial r} \right) \right] + \mu \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \beta \Delta T \quad (3.5.)$$

Enerģijas vienādojums tiek izsteikts:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C \bar{u} \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3.6.)$$

Nepārtrauktības vienādojums tiek izteikts polārajās koordinātēs:

$$\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{U}{r} = 0 \quad (3.7.)$$

Impulsa vienādojums tiek projicēts uz r ass, kā vienādojumā:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} + V \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\rho} f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (3.8.)$$

Impulsa vienādojums tiek projicēts uz z ass, kā vienādojumā:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial r} + V \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho} f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (3.9.)$$

Siltuma pārnese enerģijas vienādojums, kas ļauj aprēķināt temperatūras lauku:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial r} + V \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.10.)$$

Virpuļvienādojums ir atvasināts no (3.7.) un (3.8.). Pirmais vienādojums tiek diferencēts attiecībā pret z un otrs tiek diferencēts attiecībā pret r, arī otrais vienādojums tiek atņemts no pirmā [101]:

$$\omega = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial V}{\partial r} \quad (3.11.)$$

Tādējādi virpuļvienādojumam var izteikt:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} - \frac{U}{r} \omega + U \frac{\partial \omega}{\partial r} + V \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} [rot f]_\phi + \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\omega}{r^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \quad (3.12.)$$

kur $F = [f_r f_z]$ ir nepieciešams papildu vienādojums, jo ir nepieciešams aprēķināt U un V. Plūsmas funkcijas ψ vienādojums, ir iegūts

$$U = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad V = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3.13.)$$

Ieliekot U un V vienādojumā 3.11. iegūst šādu vienādojumu:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -r\omega \quad (3.14.)$$

Pacelšanas spēki blīvuma starpība dēļ izsaka ar *Boussinesq* tuvinājumu:

$$\rho(T) = \beta \rho_0 (T - T_0), \quad (3.15.)$$

kur β - termiskās izplešanās koeficients, g - gravitācijas paātrinājums un T_0 ir temperatūra.

Šo vienādojumu izmanto, lai izteiktu *Boussinesq* aproksimāciju virpuļtransportā [101]:

$$\frac{1}{\rho_0} [\text{rot} f]_{\theta} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho(T)}{\partial x} = g\beta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.16.)$$

Nepārtrauktības vienādojums (trīs dimensijās):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.17.)$$

Trīsdimensiju enerģijas pārnese vienādojums:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + T\beta \frac{dP}{dt} - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{v})^2, \quad (3.18.)$$

kur β tilpuma termiskās izplešanās koeficients un μ dinamiska viskozitāte.

Vienas dimensijas enerģijas pārnese vienādojums:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.19.)$$

Bezdimensijas temperatūra tilpumā x ass virzienā:

$$\theta(x) = \frac{T(x) - T_C}{T_h - T_C} \quad (3.20.)$$

Termoķīlis rodas, kad notiek siltuma akumulatora uzlādes process un karstais ūdens ieplūst no augšas T_h , Termoķīlis veidojas dažādu ūdens blīvumu dēļ, kuru ietekmējusi tā temperatūra [101].

Termoķīlis pastāv kad $0,15 < \theta(x) < 0,85$ Termoķīļa augšā $\theta(x_h) = 0.85$ un apakša $\theta(x_c) = 0.15$

Mērķis ir noteikt termoķīļa biezumu $\Delta h = x_h - x_c$ Bezdimensijas koordināte ξ un laiks τ vai Furjē skaitlis

$$\xi = \frac{x}{H} \quad \text{un} \quad \tau = Fo = \frac{t a}{H^2}, \quad (3.21.)$$

kur $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ ir temperatūras vadītspēja, H – tvertnes augstums un t uzpildes laiks

Tabula 3.2.

Robeža nosacījumi (dziļums x , laiks t)

	Temperatūra	Bezdimensijas temperatūra
tvertnes sākuma temperatūra (auksts stāvoklis)	$T(x,0) = T_c$	$\theta(\xi, 0) = 0$
silta ūdens uzlāde(no augšas)	$T(0,t) = T_h$	$\theta(0, \tau) = 1$
Pieņemta temperatūra no ārpuses	$T_c = T(\infty,0)$	$\theta(\infty, 0) = 0$

Bezdimensijas ātruma vai Peklē skaitlis:

$$u = Pe = \frac{vH}{a}, \quad (3.22.)$$

kur $v = \frac{Q}{A}$ konvektīvais ātrums termokila kustībai lejup. A – šķērsriezuma laukums tvertnei un Q – tilpuma plūsma uzlādes laikā m^3/s

Lai atrastu analītisko risinājumu, ir pieņemti šādi nosacījumi:

- Termoķīļa temperatūras sadalījums ir asimetrisks un neatkarīgs no radiālā sadalījuma bez sajaukšanās vai traucējumiem.
- Siltuma zudumi, ko izraisa vadīšana caur tvertnes sienu, ir niecīgi.
- Ieplūdes temperatūra un masas plūsma tiek uzturēta nemainīga.
- Augšējā un apakšējā seguma un sānu virsmu termiskie robežnosacījumi ir adiabātiski.

Tiek transformēt Laplasa analītisko risinājumu:

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) + e^{u\xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{\xi + u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (3.23.)$$

kur $\operatorname{erfc}()$ ir kļūdas funkcija

Var vienkāršot, tāpēc ka x un t abas ir lielākas par 0, bet vienādojums tuvojas 0:

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - u\tau}{2\sqrt{\tau}} \right) \right] \quad (3.24.)$$

Viena dimensijas aprēķins nevar pilnībā analītiski atrisināt uzdevumu ar temperatūras sadalījumu, līdz ar to nepieciešams ieviest korekciju caur koeficientu ε un normalizētu laiku $\bar{t} = \text{Pe Fo}$

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\xi - \bar{t}}{2\sqrt{\bar{t}}} \sqrt{\text{Pe}} \right) \right] \quad (3.25.)$$

Peklē skaitli izsaka ar formulu:

$$\text{Pe} = \frac{vH}{\varepsilon a} \quad (3.26.)$$

Ekspierimentu gaitā ir atrasts, ka [101]

$$\varepsilon = 1.22 \times 10^{-6} e^{2.29 \ln(\text{Re}_s)}, \quad (3.27.)$$

kur tvertnes Reynolds skaitlis

$$\text{Re}_s = \frac{vD}{\nu} < 1708 \quad (3.28.)$$

Difuzora izplūde (karsts ūdens)

$$\text{Re}_i = \frac{q}{\nu}, \quad (3.29.)$$

kur q caurplūde uz difūzera perimetra garuma vienību $q = Q/(\pi d)$

(un q ir tilpuma plūsma uz difuzora garuma vienība, kas ir difuzora plāksnes perimetrs)

Fruda skaitlis ir

$$\text{Fr}_i = \frac{q}{\sqrt{(h^3 g \frac{\Delta \rho}{\rho})}}, \quad (3.30.)$$

k kur: ρ – ūdens blīvums tvertnē; $\Delta\rho$ – blīvuma starpība starp tvertnē esošo ūdeni un no difuzora ieplūstošo ūdeni.

Tad termoķīļa sākotnējais biezums ir

$$\delta_0 = 5.74Fr_i^{1.34}Re_i^{-0.48} \quad (3.31.)$$

Ričardsona skaitlis parāda sajaukšanās attiecību, kas tiek plaši izmantots, lai novērtētu termisko stratifikāciju siltuma akumulatoram [103]

$$Ri = \frac{g\beta h(T_{top} - T_{bott})}{v_s^2} > 1 \quad (3.32.)$$

kur v_s ieplūdes ātrums caur difuzoru.

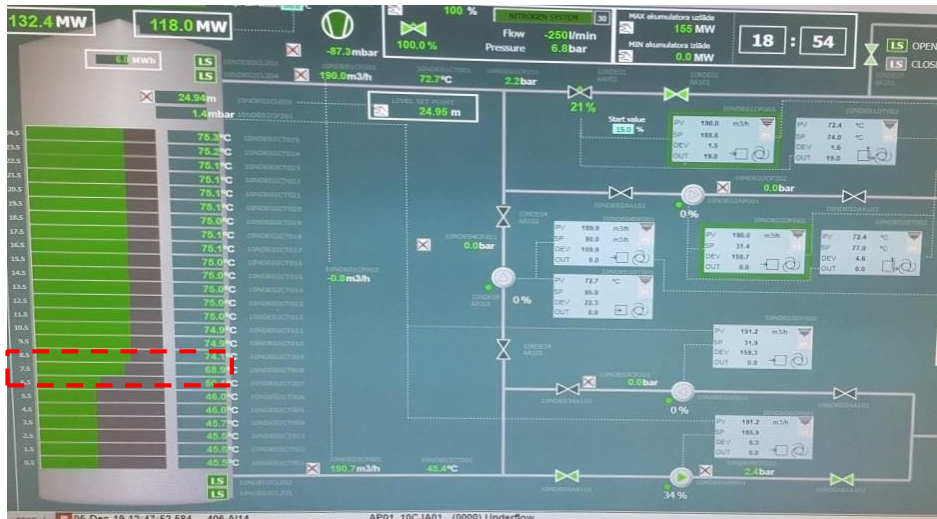
$$V_s = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3.33.)$$

Tabula 3.3.

Richardsona skaitļa ietekme uz termisko stratifikāciju [102]

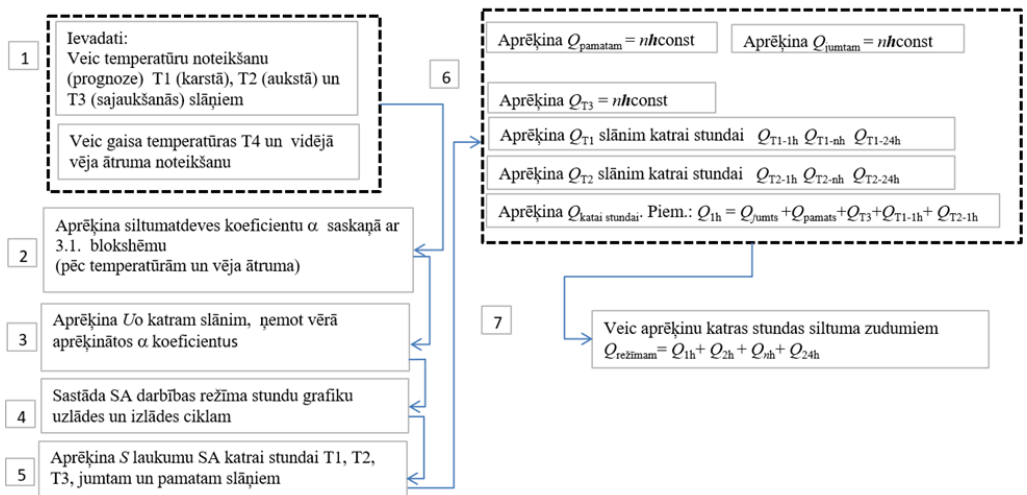
Ri < 3.6	Ieplūdes ģeometrijai ir būtiska ietekme uz stratifikāciju
Ri > 10	Ieplūdes efektu var neņemt vērā
Ri > 10-20	Tiek novērota skaidra sajaukšanās
Ri = 0.615	Parādās stratifikācija

3.3. attēlā parādīts operatora kontroles rīks siltuma akumulatora darbības parametru kontrolei, kur var konstatēt, ka termoķīļa augstums ir 1m (zonā ar sarkano raustīto līniju). Izveidojies termoķīlis šajā darbības režīma punktā atrodas zonā 6,5 un 7,5m

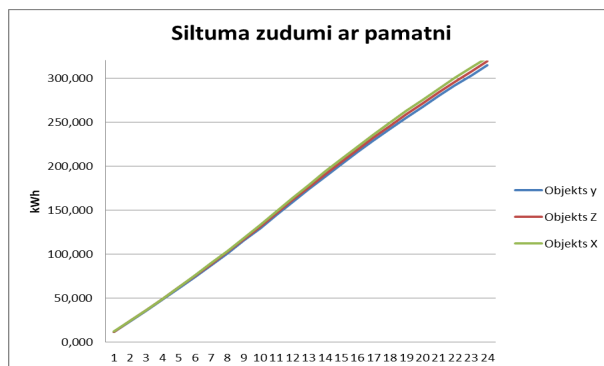


3.3. att. Siltuma akumulators uzlādes cikla beigās

Attēlā 3.4. ir izstrādāta siltuma zudumu aprēķinu metodika siltuma akumulatoram, kurā apvienota gan 3.1. attēla aprēķinu metodika, gan termoķīļa aprēķins. Blokshēmā nodefinētas galvenās aprēķinu funkcijas, lai varētu atrast siltuma zudumus katrai stundai, kuras apvienojot iegūst viena darbības ciklu no uzlādes līdz izlādei.



3.4. att. Blokshēma, kas parāda siltuma akumulatora darba režīma siltuma zudumu aprēķinu [62].



3.5. att. Siltuma zudumi SA 24 stundu periodam [29]

Viszemākie siltuma zudumi bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam ar 314,29 kWh 24h periodā, kas ir par 2,8 % labāki par objekta X siltumizolācijas risinājumu un 1,4 % labāki par objekta Z. Pētījuma rezultāti parāda, ka teorētiskie aprēķini un darba režīmi ir ļoti līdzīgi visiem 3 siltumizolācijas risinājumiem, lai arī tika pielietota atšķirīgu materiālu un biežumu izvēle.

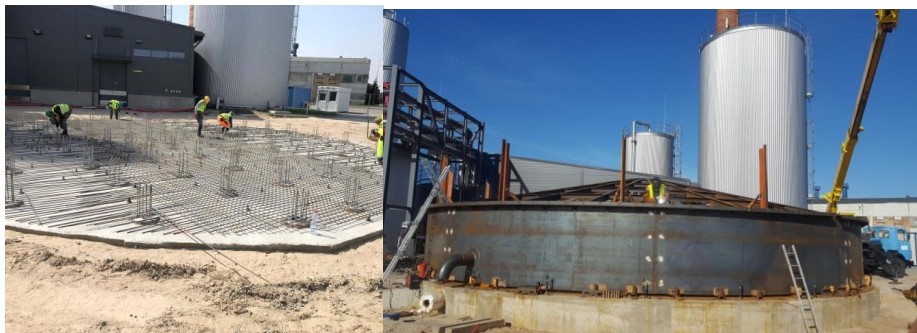
3.1. Nodaļas secinājumi

Teorētisko siltuma zudumu noteikšana siltuma akumulācijai darba režīmos prasa ietilpīgus daudzpakāpju aprēķinus, jo jāņem vērā daudzi faktori: siltumizolācijas pretestība; iekšējās temperatūras izmaiņas; brīvā un piespiedu konvekcija; gaisa temperatūra; vējš un citi faktori. Pētījums liecina, ka nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma zudumu aprēķins, bet arī termoķīļa augstums. Turklāt termoķīļa augstums dažādos darba režīmos ne tikai ietekmē siltuma zudumus, bet var arī samazināt vai palielināt akumulatora siltumietilpību. Termoķīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība, siltumizolācijas efektivitāte. Tika izstrādāta daudzpakāpju siltuma zudumu un termoķīļa aprēķina metodika, lai varētu šos vienādojumus integrēt kā moduļa daļu siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

Veicot aprēķinus trīs Latvijas lielākajiem siltuma akumulatoriem un to siltumizolācijas risinājumiem, tika konstatēts, ka ir izmantoti atšķirīgi risinājumi, tajā skaitā izolācijas biežums. Piemēram, objekta X jumta (biežums – 0,5 m) siltumizolāciju caurlaidības koeficients U ir vislabākais $0,089 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, savukārt sienām tas bija vissliktākais – $0,122 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Atšķirīgie siltumizolācijas risinājumi aprēķinos parādīja, ka koeficienta U vērtības ir ļoti tuvas un 24 stundu darba režīma modulēšanā pie vienādiem parametriem tika iegūti 2,8 % siltuma zudumu atšķirība starp objektiem. Viszemākie siltuma zudumi – 314,29 kWh – bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam.

4. EKSPERIMETĀLĀS METODES IZMANTOŠANA FAKTISKO SILTUMA ZUDUMU NOTEIKŠANAI

Šobrīd viena no Latvijas lielākajām siltumenerģijas akumulācijas tvertnēm atrodas biomasas koģenerācijas stacijā Jelgavā, Rūpniecības ielā 73, kas nodots ekspluatācijā 2019.gadā 1.novembrī. Atbildīgais būvdarbu vadītājs šajā objektā bija promocijas darba autors.



4.1. att. Siltuma akumulatora pamata armēšanas darbi un metāla konstrukciju montāža

Akumulatoram siltumizolācija izveidota no PAROC ROS30 300mm biezumā 3 kārtās pa 100mm. Gan Jumtam, gan sienām papildus uzlikta īpaši cieta 20mm biezumā izolācija PAROC ROB80 un WAB10t termisko tiltu un pretvēju iedarbībai

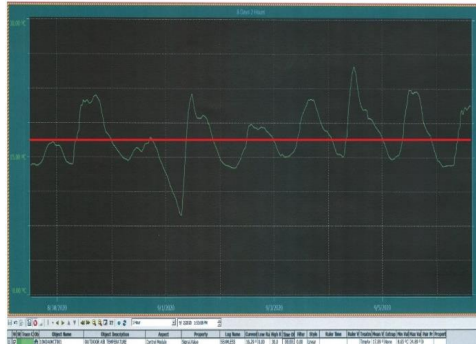


4.2. att. Siltuma akumulatora apšuvuma montāža [autora attēls].

Galvenie eksperimenta mērķi bija noteikt SA reālos siltuma zudumus pie vides apstākļiem. Iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar teorētiski aprēķinātajiem, izdarīti secinājumi un ieviests labojuma koeficients. Tika noteikts arī termisko tiltu īpatsvars SA izmantojot termogrāfiju un

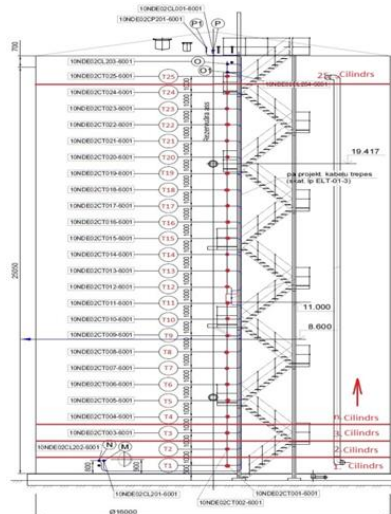
aprēķinu, lai pamatotu eksperimentā iegūto rezultātu. Kā arī tika analizēti iespējamie uzlabojumi termisko tiltu īpatsvara samazināšanai, lai panāktu lielāku SA efektivitāti.

Eksperiments bija organizēts tests, kurš satur mērījumus SA tvertnes atdzišanas procesam no 31.08.2020. līdz 07.09.2020. Šajā periodā SA sistēma bija pilnībā apturēta un nenotika nekāda tehnoloģiska darbība, kā uzlādes vai izlādes process, drenēšana vai uzpildīšana.



4.3.att. Vidējā apromsimētā gaisa temperatūra no 31.08 līdz 07.09.2020.

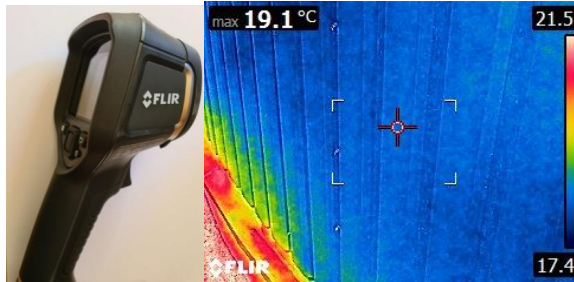
Vidējā apromsimētā temperatūra eksperimenta laika periodā bija $+17,09^{\circ}\text{C}$, vidējais vēja ātrums $3,14\text{m/s}$. Nekonrolējamie faktori, kuri netika ņemti vērā bija gaisa mitrums un saules starojuma ietekme. Tika izvēlēts novērojuma periods, kurā netika novēroti nokrišņi, kas radītu papildus kļūdas iespējamību. Šajā periodā tika novēroti SA ūdens temperatūras kritumi 25 punktos visā tā augstumā.



4.4.att. Siltuma akumulatora temperatūras devēju izvietojums un temperatūras kritumi [62].

4.1. Eksperimentā izmantotie mērīšanas instrumenti un precizitāte

Siltuma akumulatora norobežojošo konstrukciju termotiltu noteikšanai, kas radušies projekta laikā, kā piemēram, siltumizolācijas un apšuvuma stiprināšanai vai arī izbūves rezultātā, kur vietām var būt nekvalitatīva siltumizolācijas iestrāde, nepieciešami mērinstrumenti. Lai kvalitatīvi novērtētu siltuma zudumus un temperatūras sadalījumu kā 4.1.1. attēlā tiks lietotas speciālas ierīces - kā infrasarkanais termometrs EXTECH un termokamera FLIR.



4.1.1. att. Termokamera un uzņemtais akumulatora sienas attēls.

Termokamera jeb termovizors ļauj vizuāli attēlot temperatūras sadalījumu izmantojot krāsu skalu un dod iespēju šo informāciju saglabāt kā arī veikt tālāko analīzi.

Viens no būtiskākajiem faktoriem termogrāfiskos mērījumos ir liela temperatūras starpība starp akumulatora iekšējo un ārējo vidi, tas ļauj noteikt labāk termotilta vietas.

Izmantotā termokamera ir ar lielu temperatūras jūtību, kas ir 0,06 °C un augstu temperatūras mērīšanas ticamību. Instrumenta kļūda ir robežās līdz 2%

Paralēli termokameras mērījumiem, lai mazinātu kļūdas iespējamību tika izmantots arī distances infrasarkanais termometrs kā parādīts 4.1.2. attēlā. Šis instruments ir samērā vienkāršs, precīzs ar instrumenta kļūdu līdz $\pm 2\%$, kas ļauj noteikt vidējo temperatūru vienā virsmas punkta apkārtnē.



4.1.2. att. Infrasarkanais termometrs.



4.1.3. att. TR88 Modularārie RT temperatūras sensors

Lai iegūtu korektus rezultātus, mērījumi jāveic bezvēja, beznokrišņu apstākļos un maksimāli jāizvairās no saules iedarbības. Visi minētie klimatiskie apstākļi var radīt kļūdainus mērījumus, piemēram, saules apspīdēts objekts

Iekšējos akumulatora siltuma zudumus noteica izmantojot uzstādītos Endress+Hauser TR88 Modularārie RTD termometeram, kuri ir ļoti precīzi ar kļūdas iespējamību līdz 0,26% pie 100°C (skat. pielikuma Nr.13). 4.1.3. att. parādīts temperatūras sensorus, kas ievietots čaulās 0,6m tvertnes iekšienē skatoties no tvertnes vertikālās sienas. Tālāk signāls no devēja iet uz pārveidotāju 4-20 mA 24V, kas tālāk iet cauri ekranizētam kabelim LiYCY(TP) un nonāk kontrolierī. Kabeļiem ir nomērītas pretestības un ieviestas korekcijas, šajā posmā kļūdas praktiski neveidojas.

Aktuālie temperatūras mērījumi tiek vizualizēti uz stacijas vadības monitoriem un ierakstās SCADA sistēmā.

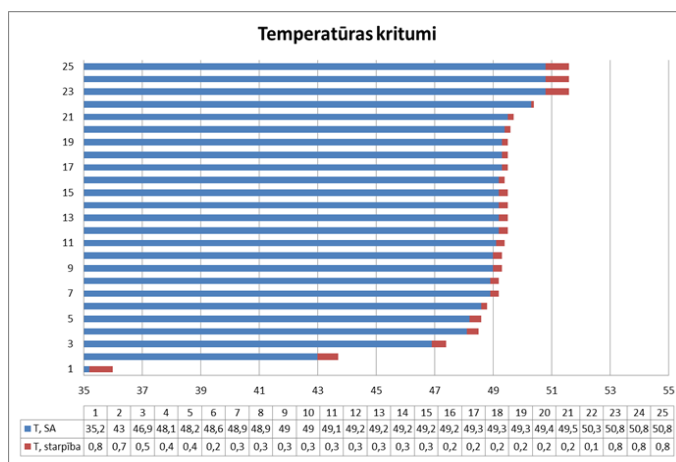
4.1.1. tabula

Izmantoto termogrāfa un infrasarkanā termometra svarīgāko parametru salīdzinājums.

Parametrs	FLIR E8-XT termokamera	EXTECH infrasarkanais termometrs	Endress+Hauser TR88 Modularārais RTD termometers
Mērīšanas diapazons	-20...550 °C	-50...600°C	0°C ...110°C
Mērīinstrumenta kļūda	±2 °C vai 2 %, atkarīgs no tā, kurš lielums lielāks pie nominālās temp. 25 °C	0,1...1 °C ±2%	±0,1 °C (0 °C), ±0,13 °C (100 °C) jeb 0,26%
IR izšķirtspēja	320 × 240 pikseļi		
Temperatūras jutība	ne vairāk, kā 0,06 °C		
Redzeslauks	45° x 34°		
Mērījumu biežums	9 Hz		

4.2. Eksperimenta rezultāti

Temperatūras devēju T1 līdz T25 izvietojums uz rezervuāra parādīts 4.2.1.att.. Lai noteiktu faktiskos siltuma zudumus reālas vides apstākļos, SA tika sadalīts 25 atsevišķos slāņos jeb cilindros ar savu tilpumu jeb zonās, kurās ir izvietoti temperatūras devēji ar noteiktu tilpumu.



4.2.1.att. Siltuma akumulatora temperatūras devēju izvietojums un temperatūras kritumi [62].

Siltuma zudumi katram atsevišķam slānim ar tilpumu tika noteikti izmantojot formulu:

$$Q_{sl} = V_{sl} \cdot \rho \cdot c_p \cdot dT \quad (4.2.1.)$$

kur T_1 - sākuma temperatūra, °C;

T_2 - beigu temperatūra °C;

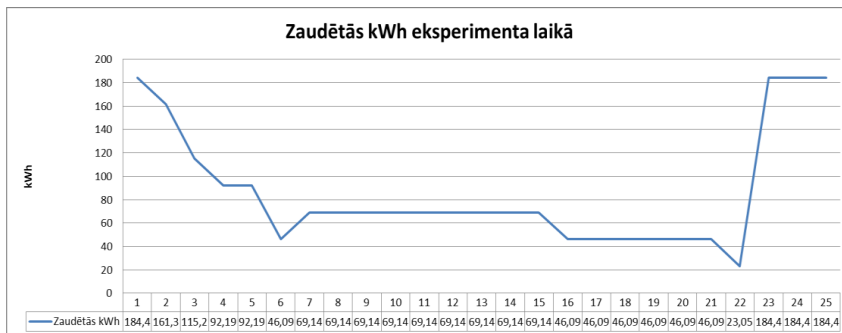
V - ūdens tilpums mērījumu zonā, m³ [29]

Kopējos siltuma zudumus iegūst summējot katra slāņa siltuma zudumus:

$$Q = Q_{sl.1} + Q_{sl.2} + Q_{sl.n} + Q_{sl.25} \quad (4.2.2.)$$

Attēlā 4.2.2. iegūtie rezultāti rāda SA 7 diennakšu jeb 168 h temperatūras kritumus.

Lielākos kritumus uzrādīja rezervuāra temperatūras devējs Nr.1 un augšējie devēji Nr.23,24,25 ar maksimālo temperatūras kritumu 0,8^oC. Savukārt rezervuāra vidusdaļā devēji Nr.16-22 uzrādīja temperatūras kritumu no 0,1 līdz 0,2^oC.



4.2.2.att. Siltuma zudumu profils akumulatoram [62]

Vislielākie siltuma zudumi veidojas 1, 23,24,25 cilindros, kuros katrā tie veido 184,4 kWh. Šie 4 mērījumu siltuma zudumi veido 34% no visiem siltuma zudumiem. Kopējie siltuma zudumi šajā novērojuma periodā sastādīja 2160,46 kWh jeb 12,71kW katru stundu.

4.3.Termisko tiltu noteikšana un aprēķināšana

Termiskais tilts ir jebkurš paaugstinātas siltumvadītspējas ieslēguma elements rezervuārā, tas arī var rasties nehomogēnas siltumizolācijas montāžas rezultātā.

Tika aprēķināts siltuma zudumu koeficients H_T ($W K^{-1}$), kas norāda enerģijas zudumus (W)

$$H_T = \sum_i U_i S_i + \sum_i \psi_i l_i + \sum_k X_k, \quad (4.3.1)$$

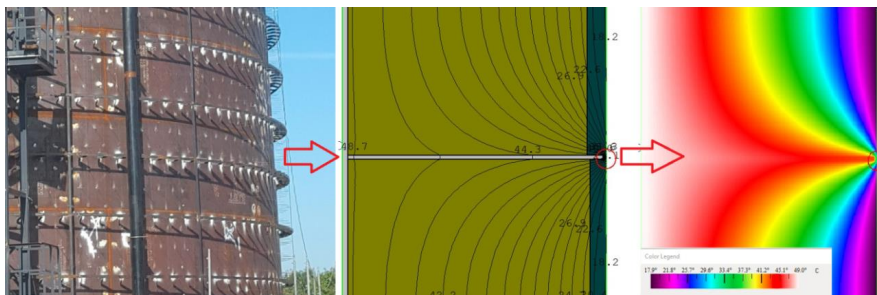
Kur ψ_i -lineārā termiskā tilta j aprēķina siltuma caurlaidība ($W m^{-1}K^{-1}$),

l_i -lineārā termiskā tilta j projektējamais garums (m);

X_k – punktveida termiskā tilta k aprēķina siltuma caurlaidība (WK^{-1}) [31].

Konstrukciju divdimensiju un trīsdimensiju aprēķinus termiskos tiltus var tikt modulēti un aprēķināti izmantojot tādas programmas, kā ASV izveidotās *Lawrence Berkely National Laboratory* programmas *THERM*, *Physibel*, *BISCO* vai *TRISCO* atbilstoši LVS EN ISO 10211 un EN ISO 10211-2 noteiktajiem kritērijiem un nav iespējams veikt manuāli. Piemēram, *THERM* simulācijas aprēķina programma klasificējas kā augstas precizitātes aprēķina metode ar $\pm 5\%$ precizitāti [34].

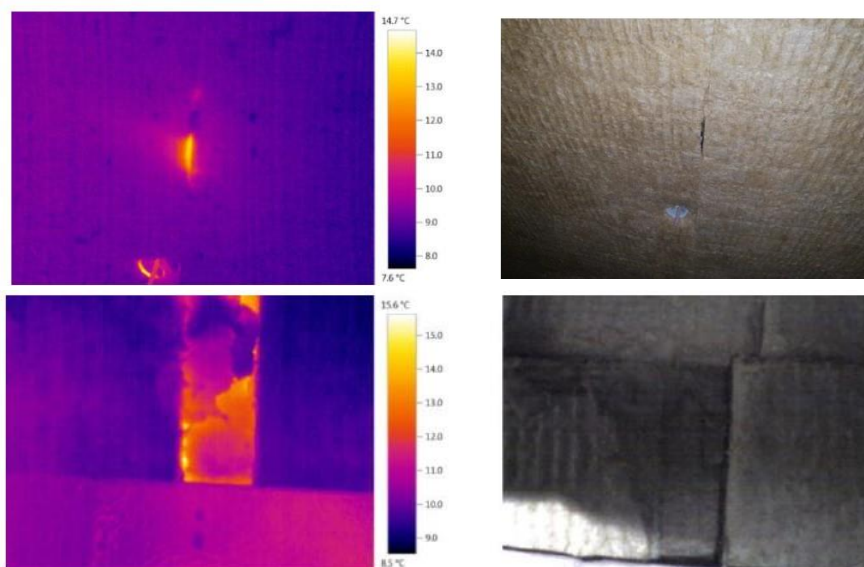
Veicot siltuma akumulatora siltumizolācijas izbūvi tika pielietota termogrāfiskās diagnostikas metode, lai konstatētu termiskos tiltus, kas radušies siltumizolācijas montāžas laikā. Lai to izdarītu akumulators pirms siltumizolācijas montāžas tika uzpildīts ar siltumtīklu atgaitas ūdeni, kura temperatūra sasniedza $+41^{\circ}C$.



4.3.1. att. Siltumu zudumu modelēšana vates stiprinājuma naglām izmantojot THERM programmu [62].

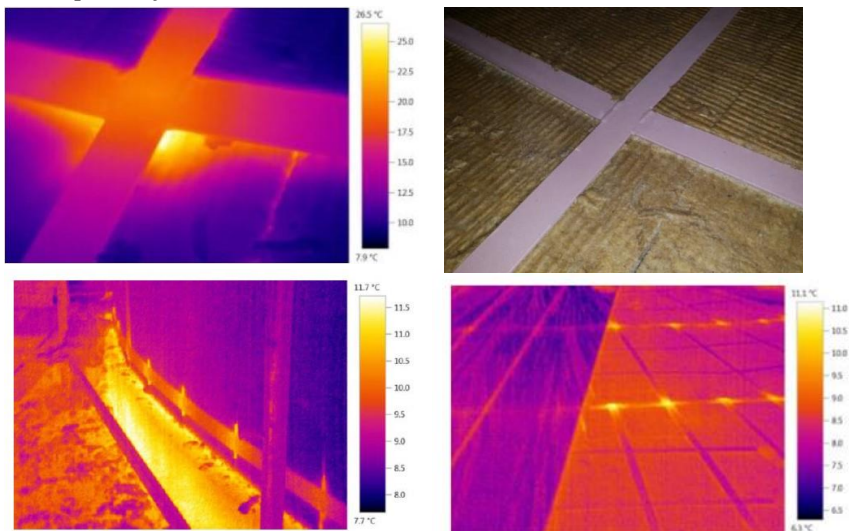
4.3.1.att. tika veikta simulācija izmantojot THERM programmu izolācijas stiprinājumiem eksperimenta apstākļos.

Veicot termisko tiltu noteikšanu un analīzi, tika konstatēts, ka ļoti daudzi ir veidojušies nehomogēnas siltumizolācijas montāžas laikā un ir redzami ar termokameru lielu temperatūras starpības dēļ. Šādu termisko tiltu kā 4.3.2.attēlā noteikšana ir laikietilpīga un modelēšana ir sarežģīta dēļ nezināma materiāla profila.

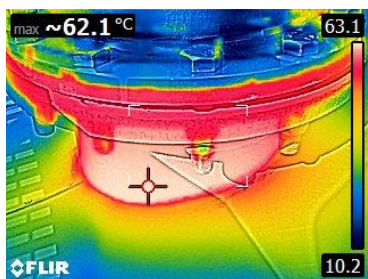


4.3.2.att. Siltumizolācijas salaidumu vieta un siltuma zudumu avots (autora fotogrāfijas)

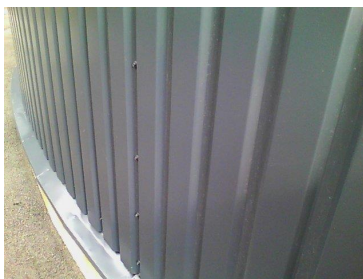
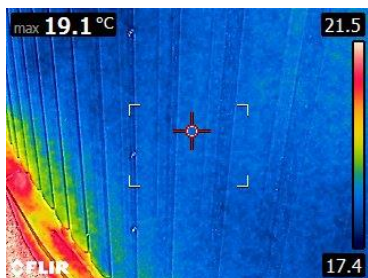
Attēlā 4.3.2. redzams, ka termiskie tilti noklāj visu rezervuāru - gan jumtu, gan sienas un arī pamatu. Savukārt attēlos 4.3.2. un 4.3.3. redzami tipiski termiskie tilti jau pēc akumulatora nodošanas ekspluatācijā.



4.3.3. att. Konstatētie konstruktīvie termiskie tilti akumulatora izbūves laikā.



4.3.4.att. Vakuumvārsta pieslēguma atloka konstatētais termiskais tilts.



4.3.5. att. Pamata betona konstatētais termiskais tilts

Akumulatorā termisko tiltu noteikšanas laikā atradās tīklu ūdens ar temperatūru 72,3⁰C un attēlā 4.3.3.redzams, ka vakuumvārsta pieslēguma izvads ar atloku sasniedz 62,3⁰C. Savukārt attēlā 4.3.4. redzams termiskais tilts nenosiltinātam siltuma akumulatora pamatam.

4.4. Siltuma akumulatora siltuma zudumu verificācija

Iegūtie dati ļauj novērtēt aprēķina precizitāti pret reālām eksperimenta vērtībām un ieviest labojuma koeficientu.

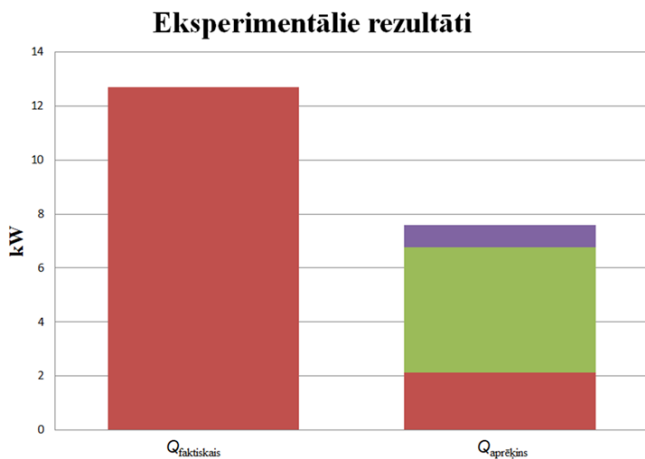
Verificējot šādā veidā SA rezervuāru tālākos tā darbības režīmos ir iespējams precīzi prognozēt siltuma zudumus un izmaksas.

Teorētiskie siltuma zudumi tika aprēķināti pēc 3. nodaļas metodikas pie eksperimenta vides apstākļiem (vidējā aproksimētā temperatūra eksperimenta laika periodā bija +17,09 ⁰C, vidējais vēja ātrums 3,14 m/s).

Lai varētu noteikt n – labojuma koeficientu, tad tika aprēķināti teorētiskie siltuma zudumi šim periodam:

$$n = Q_{\text{teor}} / Q_{\text{eksp}} * 100 \quad (4.2.2.)$$

Pēc šādas formulas rezultāti tika savstarpēji salīdzināti Q_{teor} , $Q_{\text{teor}} + Q_{\text{ter.til.}}$, Q_{eksp}

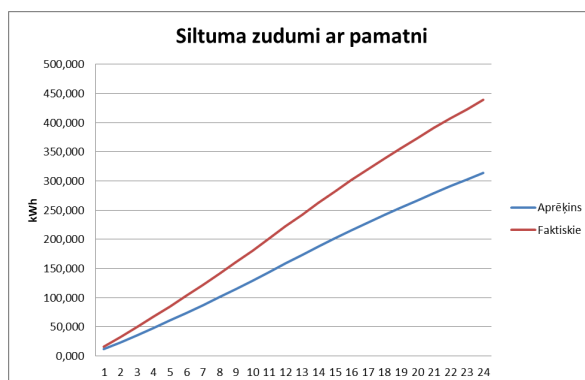


4.4.1.att. Siltuma zudumu salīdzinājums eksperimenta un aprēķinu rezultāti [62].

Attēlā 4.4.1. redzams SA salīdzinājums, pirmais stabiņš ir eksperimentā iegūtā vērtība 12,71 kW/h. Otrais stabiņš – teorētiskā aprēķinā iegūtā vērtība 7,59 kW/h, neņemot vērā termiskos tiltus. Teorētisko aprēķinu gaitā iegūtais rezultāts bija par 40,25 % mazāks, ja pieņem, ka siltumizolācija bija homogēna un tajā nebija termisko tiltu.

4.5. Siltuma akumulatora siltuma zudumu aprēķina rezultāti

Veicot siltuma zudumu aprēķinu, SA darba režīmam uzlādes-izlādes ciklam pie parametriem (gaisa temperatūra 0°C , turpgaitas tīkla ūdens temperatūra 75°C , atgaitas tīkla ūdens temperatūra 47°C , termoķīļa temperatūra 60°C) pielietojot 3. nodaļas metodiku un ieviešot labojuma koeficientu no 4.5.1.att. grafikā redzams, ka tad faktiskie siltuma zudumi sastāda 440 kWh.



4.5.1.att. Aprēķinātie siltuma zudumi un reālie ar ieviestu labojuma koeficientu

4.6. Nodaļas secinājumi

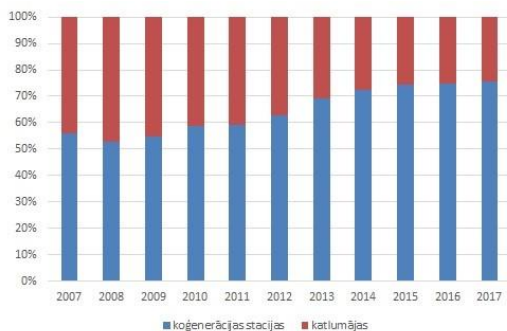
Ekspierimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai reālos apstākļos ir precīzāka, nekā veicot termisko tiltu meklēšanu, modelēšanu un aprēķinu. Tika veikts eksperiments, kura laikā tika apturēta siltuma akumulācija un novēroti siltuma zudumi 168 h ilgā laikā. Šajā laika periodā tika fiksēti temperatūras kritumi, salīdzinot tos ar teorētisko aprēķinu. Novērojumu dati liecināja, ka eksperimenta apstākļos akumulators zaudēja siltumu ar 12,79 kW. Veicot teorētisko aprēķinu eksperimenta apstākļos un neņemot vērā termiskos tiltus, tika iegūta 7,59 kW siltuma zuduma jauda. Siltuma akumulatora verificācijas laikā tika ieviests labojuma koeficients 1,403. Šāda siltuma akumulatora siltuma zudumu verificēšana ir nepieciešama, lai varētu šo koeficientu ieviest vienādojumos un integrēt modulī siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

5. SILTUMSLODZES PROGNOZĒŠANA

Šī nodaļa veltīta katlumājās un koģenerācijas stacijās saražotās siltumenerģijas sadalījuma analīzei. Latvijas kopējā saražotā siltumenerģijas bilance parāda, ka koģenerācijas režīmā saražotā siltumenerģija ieņem aizvien lielāku daļu. Koģenerācijas stacijai brīvās elektroenerģijas tirgū viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslodzi pieteiktam elektroenerģijas ražošanas nākamajam 24 stundu periodam. Izmantojot kombināciju koģenerācijas stacija ar siltuma akumulāciju un plānojot iespējamus darba režīmus nākamajai dienai, tad siltumslodzes prognoze ir būtiska nozīme lēmumu pieņemšanai un ir noteikta 1.2.2. attēla algoritma funkcionālās shēmas 3. punktā. Siltumslodzes prognozēšana ietekmē arī 1.2.2. attēla aprēķina bloku Nr. 5. - siltuma akumulācijas parametri, kur izmantojot izstrādāto 3 nodaļas aprēķinu metodiku notiek siltuma zudumu aprēķināšana akumulācijai, lai varētu aprēķināt zudumu izmaksas un iekārtas pielietojuma lietderību.

5.1. Siltumenerģētikas situācija Latvijā

Latvijā lielāko daļu siltumenerģiju ražo katlumājās un koģenerācijas stacijās. Joprojām ļoti mazu daļu aizņem saules kolektori siltuma ražošanai un faktiski kopējā bilancē tā neatspoguļojas. No attēla 5.1.1. ir redzams, ka kopš 2007. gada ir būtiski mainījies sadalījums - katlumājās un koģenerācijas stacijās saražotā siltumenerģijas bilance. Koģenerācijas režīmā saražotā siltumenerģijas kopējais īpatsvars ir palielinājies no 56,0% 2007. gadā līdz 75,7% 2017. gadā.



5.1.1. att. Katlumājās un koģenerācijas stacijās saražotās siltumenerģijas sadalījums [75].

No tabulas 5.1.1., kurā apkopoti CSP dati, redzams, ka 2019. gadā siltumenerģijas koģenerācijas stacijas kopskaitā ir 175 un saražoja 5383 GWh siltumenerģiju un 4173,7 GWh elektroenerģiju.

Tabula 5.1.1.

Koģenerācijas staciju darbību raksturojošie rādītāji 2019. gadā [42]

Koģenerācijas staciju uzstādītā elektriskā jauda	Koģenerācijas staciju skaits	Uzstādītā elektriskā jauda, MW	Saražotā elektroenerģija, GWh	Saražotā siltumenerģija, GWh
Pavisam	175	1 269,7	4 173,7	5 383,0
≤ 0,2 MW	22	3,1	16,0	29,1
0,2 < P* ≤ 0,5 MW	28	9,8	57,1	264,8
0,5 < P ≤ 1 MW	67	55,6	333,2	603,8
1 < P ≤ 5 MW	51	125,7	735,0	1 955,2
5 < P ≤ 20 MW	3	27,7	103,9	163,5
> 20 MW	4	1 047,8	2 928,5	2 366,6

*P – jauda

Kā rāda pielikums Nr.6, tad kopš 2011. gada vairākas reizes ir palielinājies kurināmās koksnes patēriņš koģenerācijas stacijās. Tabulas dati rāda, ka 118 stacijās uzstādītā elektriskā jauda ir 0,5-5 MW. Rīgas reģionā tika saražots 41,4% no kopējā saražotā siltumenerģijas daudzuma jeb 3412 GWh. Pierīgas reģionā no kopējās centralizētās siltumapgādes sistēmās saražotās siltumenerģijas apjomiem 2019. gadā saražoja 1267 GWh jeb 15,4%, Latgales reģionā – 996 GWh jeb 12,1%, Kurzemes reģionā 897 GWh, jeb 10,9%, Zemgales reģionā – 844 GWh, jeb 10,2% , Vidzemes reģionā – 831 GWh jeb 10,1%

5.2.Siltumenerģijas slodzes prognozes

Siltumavotiem un CST darbība tiek plānota izmantojot prognozes, bet ēku siltummezgli un ēkas tiek regulētas pēc faktiskā siltuma pieprasījuma individuāli. Līdz ar to prognozes un faktiskās CSS slodzes var ievērojami atšķirties [35].

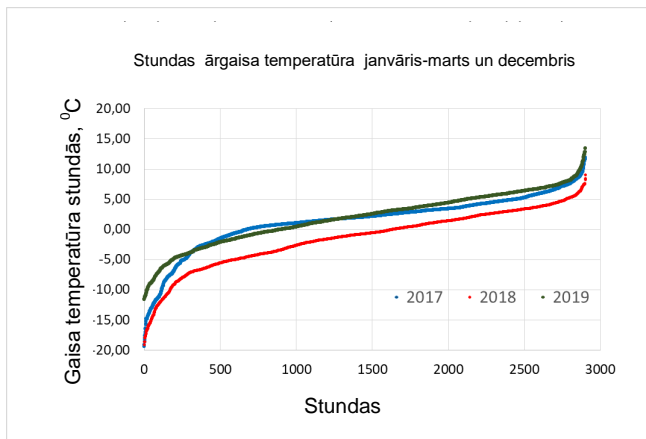
Daudzos pētījumos CSS tīklos slodzes prognozēšana tiek veikta ikdienas apjomiem[104]. Lai plānotu koģenerācijas staciju elektroenerģijas ražošanas grafiku, daļībai elektroenerģijas vairumtirdzniecības tirgū nepieciešams pielāgot uz tirgu orientētu darbības un plānošanas modeli atbilstoši tādām elektroenerģijas tirdzniecības platformām kā Nord Pool. Lai to izdarītu jāpārvieta prognozes izšķirtspēja vismaz uz stundas mērogā [35].

Šajā nodaļā tiek izmantots apkures slodzes prognozēšanas algoritms, kas aprakstīts un rūpīgāk izstrādāts, lai pārbaudītu tā precizitāti CSS slodzes prognozēšanā vairākās atšķirīgās sistēmās, dažādos apkures sezonas periodos un ar mainīgiem modeļa parametriem. Iegūtās prognozētās novirzes no faktiskajām patēriņa vērtībām analizē, īstenojot kļūdu mēru vidējo procentuālo kļūdu (MAPE) un normalizēto vidējo novirzes kļūdu (NBIAS) [36].

5.3. Siltumslodzes profils

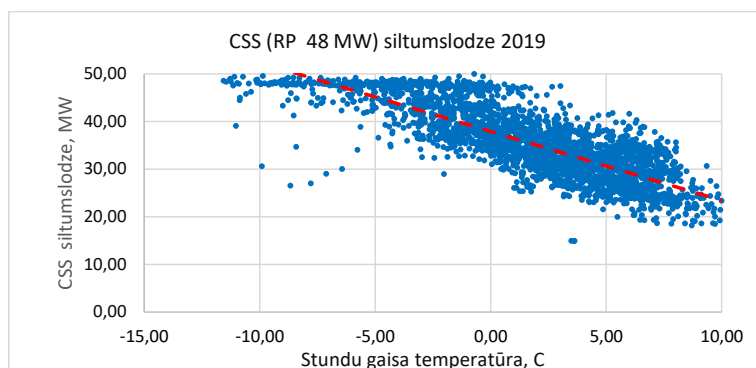
CSS tīkli piegādā siltumenerģiju diviem galvenajiem mērķiem - apkurei un karstā ūdens apgādei. Siltuma patēriņš gaisa sildīšanai ventilācijas sistēmās apkopoto datu apjomā ir nenozīmīgs. Siltuma slodzes vērtība ir atkarīga no daudziem faktoriem, piemēram, gada sezonas, apkārtējās vides temperatūras, vēlamās iekšējās temperatūras, gaisa mitruma, saules starojuma, vēja ātruma un virziena utt. Iedzīvotāju skaits un viņu aktivitātes arī ietekmē radīto siltuma pieprasījumu. Tāpēc siltuma slodzes prognozēšana kopumā ir ļoti sarežģīts process.

Šī pētījuma dati par stundas DHS parametriem (siltuma slodze MWh/h un apkārtējās vides temperatūra °C).



5.3.1. att. Apkārtējās temperatūras ilguma līkne un atbilstošo stundu skaits 3 gadu periodam [36].

5.3.1.attēlā parādīts stundas apkārtējās temperatūras ilguma līknes piemērs. Apkures sezonas ilgums Latvijā parasti ir aptuveni 200 dienas jeb 4800 stundas gadā. Gada profila otrajā daļā (starpsezonā) CSS apkures slodze galvenokārt paredzēta karstā ūdens piegādei.



5.3.2.attēls. Koģenerācijas stacijas ikstundas slodzes profils 2019.gadā [36].

Attēlā 5.3.2. parādīta atbilstoša koģenerācijas siltuma slodze (Q) 2019.gadā, kur redzams, ka visvairāk stundas tiek strādātas temperatūrā no -5°C līdz 10°C . Gada profilu var iedalīt divās daļās - apkures sezonā, kad apkārtējā temperatūra ir zemāka par 0°C , un starpsezonā. Redzams, ka zem 0°C ļoti palielinās stacijas darbība maksimālā siltumrežīmā ar siltumenerģijas jaudu 48MWh [36].

5.4. Siltumslodzes vienkārši lineāri regresijas modeļi

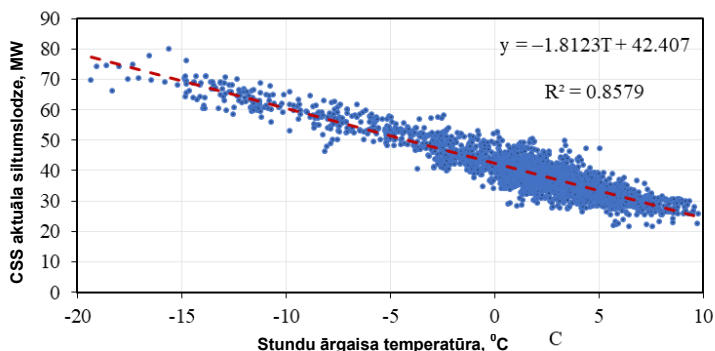
Tabulā 5.4.1. parādīta dažādu pilsētas tīklu apkures slodzes gada decembra – marta periodā. Tika izslēgti dati par oktobri-novembri un aprīli, jo tad apkures slodze nav stabila. 5.4.1. tabulā ir sniegta statistisko datu analīze par stundu siltuma slodzi, kas ļauj veikt lineāro regresiju siltuma slodzes liknēm. Trīs gadu periodā (2017. – 2019.gads) tika iegūti dati par divām dažādām CSS ar nominālo jaudu (RP, t.i., vidējais patēriņš), kas svārstās no 20 līdz 48 MW.

5.4.1. tabula

CSS gadījumu izpētes dati par dažādiem RP un laika periodiem [36]

CSS RP numurs	Apkures sezona	Vidējā slodze Q_0 , MWh/h	Minimālā/maksimālā slodze, MWh	Lineārās regresijas vienādojums ($Q = aT + Q_0$)	R^2	Normalizēts slīpums, a/Q_0
RP20	2017 –2018	18.56	14...38	$Q = -0.7972T + 18.563$	0.877	-0.043
RP40	2017	42.41	22...80	$Q = -1.8123T + 42.407$	0.8579	-0.043
RP40	2018	40.94	12...75	$Q = -1.8357T + 40.937$	0.8977	-0.045
RP40	2019	41.95	22...62	$Q = -1.6395T + 41.946$	0.8039	-0.039

Regresijas analīzes, kas redzamas 5.4.1. attēlā, parāda, kā mainās siltumslodze atkarībā no ārējās temperatūras. Analīzes mērķis bija iegūt pēc iespējas mazāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kurš vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem.



5.4.1. att. DHS (RP = 40 MW) atkarība no ārējās temperatūras 2017.gadā [36].

Katrai apkures sezonai bija savs parametru kopums (piemēram, gaisa temperatūras profils), un tāpēc vienas un tās pašas sistēmas lineārās regresijas vienādojumi var būt atšķirīgi. Lai to ilustrētu, dati par CSS ar RP 40 MW tika salīdzināti trīs atšķirīgās apkures sezonās (2017., 2018., 2019.), un rezultāti tika atspoguļoti 5.4.1. tabulā un 5.4.1. attēlā

Tabulā parādītie vienkāršie lineārās regresijas vienādojumi attēlo apkures pieprasījuma atkarību no ārējās temperatūras. Turklāt 5.4.1.tabulā ir ietverti noteikšanas koeficienti (R2) katram gadījuma pētījumam, kas tika izmantots kā indikators noteiktā lineārā vienādojuma piemērotībai. Tas parāda izmērītās CSS slodzes novirzes no tās, ko aprēķina regresijas līnija. R2 vērtība ir CSS slodzes kvadrātisko noviržu summa no vidējās vērtības. Parasti tiek uzskatīts, ka iegūtie regresijas modeļi ir spēcīgi, ja R2 ir tuvu 1. Piemēram, RP20 gadījumā 5.4.1.attēlā R2 vērtība ir 0.87, kas ir pietiekami tuvu 1. Tomēr citos gadījumos koeficients ir ievērojami mazāks. Apkures pieprasījuma lineārā regresija pret āra temperatūru parasti parāda labu korelāciju, tomēr, veicot analīzi mazākā mērogā (dzīvojamo ēku līmenī), korelācija ir ievērojami vājāka. Piemēram, ikdienas siltuma patēriņa R2 pret gaisa temperatūru bija tikai 0,5459 [37]. Tomēr, plašākā mērogā atsevišķas patērētāju novirzes zināmā mērā izzūd, bet visas kopējās sistēmas regresijas rezultāti ir daudz labāki. Piemēram, otrās pakāpes polinomu vienādojumiem, kas izstrādāti siltumtīklu atgaitas temperatūrai [38], noteikšanas koeficients bija 0,9 no gaisa temperatūras funkcijas.

Tomēr ir jārisina problēma, ka lielākajā daļā šajā nodaļā izklāstīto gadījumu, izpētes lineārās regresijas vienādojumu noteikšanas koeficients ir zemāks par 0,9, un tāpēc tas parāda lielāku atšķirību starp iegūto vienādojumu un savāktajiem datiem. R2 vērtība četriem pētījumiem CSS tīkliem ir no 0,9 līdz 0,8 jeb, citiem vārdiem sakot, 10 līdz 20% no aprēķinātajiem CSS slodzes datiem nevar paredzēt ar izvēlēto neatkarīgo mainīgo - gaisa temperatūru.

5.5. Nodaļas secinājumi

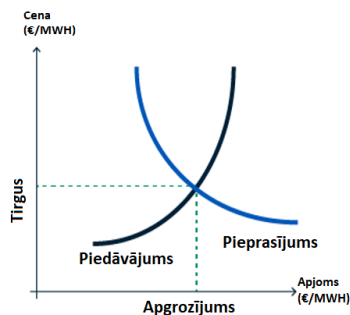
Lai precīzi pieteiktu saražoto elektroenerģijas apjomu nākamajai dienai un izvēlētos pareizu darbības režīmu, koģenerācijas stacijai strādājot brīvās elektroenerģijas tirgū, viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslodzi nākamās diennakts ciklam. Turklāt saistībā ar elektroenerģijas ikstundas cenas izmaiņām biržā arī siltumslodzes prognozes izšķirtspēja jāpārveido vismaz uz stundu mērogu. Analīzes mērķis bija iegūt pēc iespējas mazāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kas vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem.

Pēfītas iespējas ieviest aprakstošu CSS parametru – bezdimensiju apkures līknes – normalizētu slīpumu, ko aprēķina kā lineārās regresijas vienādojuma temperatūras koeficienta attiecību pret vidējo CSS siltuma slodzi jeb *RP*. Siltumslodzes sniegtā statistisko datu analīze parāda, ka vienkāršās lineārās regresijas koeficients ir robežās no 0,8 līdz 0,94 dažādu Latvijas CSS atkarībā no āra gaisa temperatūras.

6. KOGENERĀCIJAS STACIJAS LĒMUMU PIENĒMŠANAS ALGORITMA OPTIMIZĒŠANA IZMANTOJOT SILTUMA AKUMULATORA DZIĻO ANALĪZI UN IEKĻAUJOT ZUDUMU MODELI

6.1. Elektroenerģijas tirgus Nord Pool

Latvija kopš 2013.gada darbojas elektroenerģijas biržā un tā ir kopēja ar citām Eiropas savienības valstīm [94]. Tas nozīmē arī, ka elektroenerģijas sistēmas ir saistītas ar citu valstu sistēmām. Latvijai esot elektroenerģijas biržā, elektrības cena tiek noteikta pēc piedāvājuma un pieprasījuma apjoma. Pašreiz Latvija darbojas tikai vienā elektroenerģijas biržā un tā ir Nord Pool. Biržā strādā ar diviem tirdzniecības modeļiem – tekošās dienas (intraday) tirgu un nākamās dienas (day ahead) tirgu [96]. Tekošās dienas tirgū pircēji (patērētāji) un ražotāji (pārdevēji) biržā iesniedz elektroenerģijas apjomu, kuru vēlas patērēt un kuru ir spējīgi saražot. Šie piedāvājumi un pieprasījumi biržā ir jāiesniedz ne vēlāk kā stundu pirms operatīvās stundas. Tādējādi kopā tiek savienots konkrēts pircējs ar konkrētu pārdevēju. Tekošās dienas tirgū cena tiek noteikta pēc principa – pirmais pircējs saņem izdevīgāko cenu.



6.1.1. att. Piedāvājuma un pierasījuma grafiks [8].

Savukārt nākamās dienas elektroenerģijas tirgū cena tiek noteikta pēc pieprasījuma un piedāvājuma attiecības. Patērētājs (pircējs) norāda elektroenerģijas apjomu kāds ir nepieciešams nākamajai dienai, bet ražotājs (pārdevējs) – cik daudz spēš piegādāt tirgum. Tādējādi apvienojot pieprasījumu un piedāvājumu tiek aprēķinātā elektroenerģijas cena katrai nākamās dienas stundai un katrai tirdzniecības zonai [8]. Tas īpaši svarīgi ir lieliem uzņēmumiem, kuri patērē lielu elektroenerģijas apjomu, piemēram, plānojot remontdarbus un daļēji apturot uzņēmuma darbu. Tādējādi mainās pieprasījuma piedāvājuma attiecība biržā un attiecīgi arī elektroenerģijas cena. Līdzīga situācija notiek arī ar elektroenerģijas ražotājiem – piemēram, hidroelektrostaciju gadījumā – samazinoties ūdens apjomam vairs nav iespējams saražot maksimālo elektroenerģiju

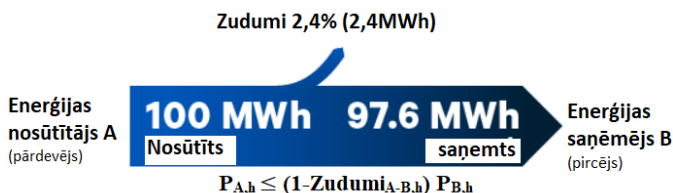
un ja uzņēmums ir pieteicies biržā ar lielāku enerģijas apjomu, kā tas var saražot, tad uzņēmumam pašam nepieciešams iegādāties enerģiju, lai spētu izpildīt piegādes nosacījumus. Jāņem arī vērā tīkla ierobežojumi, tādēļ ir svarīgi savlaicīgi sniegt informāciju [8].

Šo abu tirdzniecības modeļu darbība biržā nodrošina, ka Latvijas elektroenerģijas tirgus ir pārskatāms, uzticams un tam ir augsta likviditāte [100].

Strādājot Nord Pool biržā ir iespējams sadarboties ar 15 valstīm un strādāt 21 cenu zonā. Gada laikā caur biržu tiek pārdoti aptuveni 500 TWh elektroenerģijas. Sadarbojoties ar biržu, uzņēmumam, kuram nepieciešama elektroenerģija, ir redzama elektroenerģijas cenu līkne katrai dienas stundai. Tādējādi ir iespējams plānot darbus un izmantot elektroenerģiju, kad tās cena ir zemāka. Visbiežāk vakardienas nākamās dienas tirgus (elektroenerģijas apjoms, kas tika ieplānots vakar uz šodien) kalpo kā pamats jaunajam nākamās dienas tirgum ar iespēju to koriģēt. Katru dienu līdz pulksten 10:00 pēc Centrāleiropas laika tiek paziņotas tīkla pieejamās jaudas, bet līdz pulksten 12:00 pēc Centrāleiropas laika pircējiem un pārdevējiem jāizsaka savi piedāvājumi/pieprasījumi. Šī informācija tiek apkopota, lai varētu notikt izsole par elektroenerģiju nākamās dienas tirgum. Turklāt pieprasījumi/piedāvājumi tiek saskaņoti ar citiem pieprasījumiem/piedāvājumiem Viseiropas tirgus savienošanas procesā un izmanto kopējo algoritmu Euphemia. Pēc informācijas apkopošanas tiek noteikta izsoles vienotā cena katrā stundā un zonā. Cena par elektroenerģiju nākamās dienas tirgū tiek paziņota 12:40 vai nedaudz vēlāk. Konkrētais pircējs un pārdevējs uzzina cenu pēc tās publicēšanas.

Baltijas reģions ir atdalīts no Ziemeļvalstu reģiona un izsoles notiek atsevišķi katram reģionam [82]. Tas darīts ar nolūku, lai neveidotos sastrēgums elektrotīklos. Dažādos reģionos iespējams elektroenerģijas deficīts, pārpalikums. Elektroenerģijas plūsma ir no apgabaliem, kur ir zemāka piedāvātā cena uz tiem apgabaliem, kur ir lielāks pieprasījums un attiecīgi lielāka piedāvātā cena. Ja pārvades jauda starp solīšanas apgabaliem nav pietiekama, lai panāktu pilnīgu cenu konverģenci visos apgabalos, pārslodzes rezultātā piedāvājumu apgabaliem būs atšķirīgas cenas. Ja enerģijas plūsma starp solīšanas apgabaliem ir pārvades sistēmas operatoru noteiktajās jaudas robežās, teritoriju cenas šajās dažādajās cenu zonās būs identiskas. Visiem ražotājiem maksā saskaņā ar aprēķināto platības cenu, un līdzīgi visi patērētāji maksā vienādu cenu.

Elektrības pārvade ir saistīta ar daļēju elektroenerģijas zudumu pārvades procesa laikā. Tas nozīmē, ka ražotājs pārdod lielāku elektroenerģijas apjomu nekā pircējs saņem. Šajā situācijā noteicošie faktori ir temperatūra un attālums cik tālu ir jāpārvada elektroenerģija. Zināms, ka Baltijas kabelim noteiktais elektrības zudumu procents ir 2,4. Piemēram, tirgotājs pārdod 100 MW elektroenerģiju, bet tīklā ir zudumi 2,4% un rezultātā pircējs saņem 97,6 MW elektroenerģiju.



6.1.2. att. Enerģijas balance no pārdevēja līdz pircējam [8].

Sūtot elektroenerģiju no viena apgabala uz otru tiek izvēlētas tās elektrolīnijas, kurās ir iespējams vismazākais enerģijas zudums.

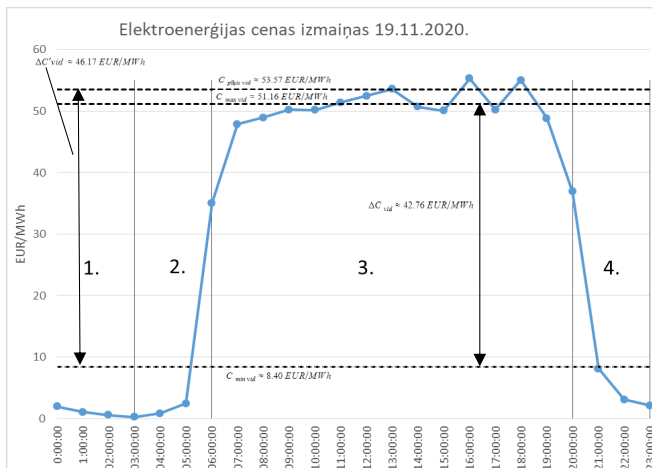
Tehniskie zudumi iedalās divās daļās – fiksētie un mainīgie. Vairums ir fiksētie enerģijas zudumi, kuri rodas paša tīkla dēļ un tas nav atkarīgs no tīkla slodzes. Šos zudumus rada tīkla komponenti – transformatori un vadītāji. Zudumi rodas arī tad, ja enerģija netiek piegādāta patērētājam, jo tīkls ir elektrificēts un zudumi izpaužas kā troksnis un siltums, turklāt nav nozīmes jaudai kādu tīkls piegādā. Transformatoros ir divu veidu zaudējumi – “dzelzs zudumi” un “vara zudumi.” “Dzelzs zudumi” rodas no tērauda magnētiskās polaritātes maiņas transformatora serdeņos katrā maiņstrāvas ciklā. Tas izraisa materiāla impulsu un uzsilst. “Vara zudumi” rodas no inducētu strāvu cirkulācijas vadošās daļās, kas nav vara tīnumi, piemēram, transformatora dzelzs korpusa vai tērauda serde. Papildus fiksētos zudumus izraisa nepilnības elektriskās izolācijas sistēmās un to sauc par “dielektriskiem zudumiem” vai “noplūdes strāvas zudumiem”.

Mainīgos enerģijas zudumus rada elektrības plūsma caur jebkādiem vadītājiem (transformatoru ruļļi, gaisvadu līnijas, pazemes kabeļi, drošinātāji). Šie zudumi saistīti ar silšanu caur iepriekšminētajiem vadītājiem elektrības plūsmas laikā. Zudumu apjoms ir atkarīgs no enerģijas plūsmas lieluma. Mazāki zudumi ir vērojami pie augstāka sprieguma, jo nepieciešama mazāka voltāža, lai pārvadītu to pašu elektrības apjomu. Mainīgos zudumus ietekmē elektrolīnijas garums un šķērsriezums. Vadītāja pretestība samazinās, ja palielinās tā šķērsriezuma laukums, līdz ar to zudumus var samazināt ar lielāka diametra kabeļiem. Netehniskie zudumi – tos rada apstākļi ārpus elektrotīkla. Ir vērojami dažādi netehniskie elektrības zudumi – nelegāli pieslēgumi tīklam un nenoteikta elektrības piegāde – ierīcēm, kurās nav iespējams mērīt patēriņu un tas tiek aprēķināts tikai aptuveni. Šādas elektroiekārtas var būt ielas apgaismojums, luksofori un citas iekārtas [99, 101].

6.1.2 Elektroenerģijas tirgus cenas analīze

Šajā sadaļā tika veikta divu dienu elektroenerģijas cenu piemēru salīdzinājums 2020. gada 19. novembrī un 2019. gada 5.decembrī. Elektronenerģijas cenu izmaiņas atspoguļotas grafika attēlos 6.1.2.1. un 6.1.2.2. Nejausi izvēlētas dienas parāda elektroenerģijas cenu izmaiņas tendences – elektroenerģijas cenu pieaugums dienas laikā kopā ar rīta un vakara iestāšanās

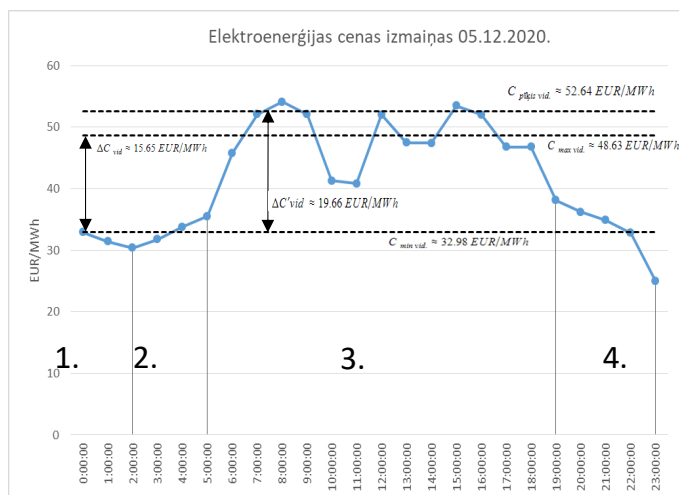
pīķiem un nakts cenas samazinājumu. Izvēlētās dienas parāda arī kopējo elektroenerģijas tirgus tendenci to, ka nakts stundas periodā cena biržā ir zemāka nekā dienas periodā.



6.1.2.1.att. Elektriības cena Nordpool biržā 19.11.2020 [8].

Elektroenerģijas cenu izmaiņu periodi darbadienās gandrīz neatšķiras. Tos var iedalīt četros posmos. Pirmais posms mūsu izvēlētajās dienās ilgst no pusnakts līdz 2:00 vai 3:00. Šajā posmā elektronereģijas cena zemākā visas diennakts laikā. Otrais posms abās apskatītājās dienās ilgst trīs stundas un var novērot elektroenerģijas cena pieaugumu gandrīz līdz maksimālajām vērtībām.

Trešais posms ir visgarākais, abos izvēlētajos piemēros ilgst četrpadsmit stundas. Šajā posmā EUR/MWh sasniedz savu augstāko vērtību un iespējams arī novērot vērtības pīķus. Izvēlētajos piemēros redzams, ka pīķu ilgums var būt no 1 līdz 3 stundām. Pēdējā posma garums ir no 4 līdz 5 stundām šajā posmā novērojams elektroenerģijas vērtības samazinājums. 6.1.2.1.att atspoguļo 2020.gada 19.novembra elektroenerģijas cenas izmaiņas diennakts laikā. Šajā diennaktī tika novēroti divi nelieli elektroenerģijas pīķi plkst, 16.00 un 18.00. Šīs dienas maksimālā vērtība bija 55.3 EUR/MWh. Aprēķinātā diennakts maksimālā vidējā elektroenerģijas vērtība 51.16 EUR/MWh un minimālā vidējā 8.4 EUR/MWh. Līdz ar to diennakts vidējais elektroenerģijas cenas pieaugums 42.76 EUR/MWh.



6.1.2.2.att.Elektības cena Nordpool biržā 12.05.2019 [8].

Otrajā grafikā atspoguļota 2019.gada 5.decembra elektroenerģijas cenas izmaiņa diennakts laikā. Šajā diennaktī tika novēroti 3 elektroenerģijas cenas pīķi no 7.00 līdz 9.00, 12.00 un 16.00 līdz 17.00. Šīs diennakts maksimālā vērtība bija 54.09 EUR/MWh. Aprēķinātā diennakts maksimālā vidējā elektroenerģijas vērtība 48.63 EUR/MWh un minimālā vidējā 32.98 EUR/MWh. Līdz ar to diennakts vidējais elektroenerģijas cenas pieaugums 15.65 EUR/MWh. Aprēķinātā diennakts laikā novēlēto elektroenerģijas cenas pīķu vidējā vērtība – 52.65 EUR/MWh, līdz ar to starpība dienas pīķa cenu un nakts cenu $\Delta C'_{vid}$ - 19.66 EUR/MWh.

6.2 Siltuma akumulatora dziļā analīze - darbības tehnoloģiskie procesi un ietekmējošie faktori

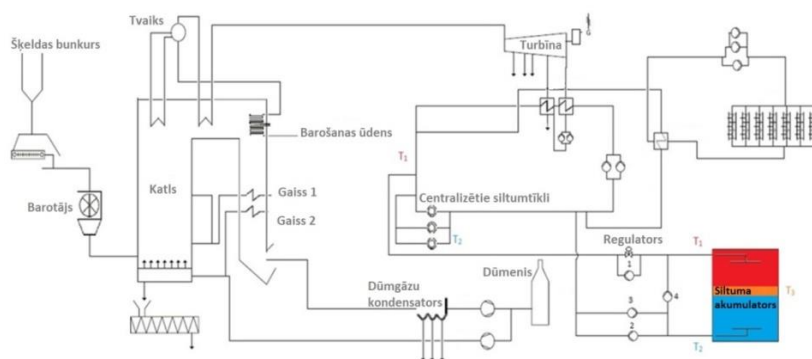
Enerģētikas tirgus liberalizācija un ES izvirzītie mērķi par energoefektivitātes uzlabojumu katrai dalībvalstij veicina siltuma akumulācijas iekārtu strauju attīstību [4]. Precīza ražošanas plānošana ir ļoti svarīga koģenerācijas stacijās, kas darbojas elektroenerģijas brīvās tirgus apstākļos, bet izmantojot siltuma akumulatoru tās nozīme būtiski palielinās gan no sarežģītības, gan no papildus aprēķina funkciju viedokļa [40,53]. Turklāt ražošanas procesu ietekmē mainīgās siltuma, CO₂ un kurināmā izmaksas [41].

Pārorientācija tirgus apstākļiem prasa jaunus izaicinājumus KS darbības plānošanai [40], kā nākamās dienas laikapstākļu un siltumprognozes [45], vai, piemēram, iekārtu darbības izmaksu plānošanu atkarībā no palaišanas (aukstā, siltā, karstā) apstākļiem [46]. Prognožu precizitāte ietekmē KS siltuma un elektrības ražošanas režīmus [47] un attiecīgi stratēģijas brīvā tirgus apjomu noteikšanai[48]. Centralizētajā siltumapgādes tīklā siltumenerģijas pieprasījuma prognozēšanai tiek izmantots mākslīgais neironu tīkla modelis. Savukārt elektroenerģijas cenai

tiek pielietoti dažādi prognožu modeļi: prognoze — ekstrēmas mācību mašīnas, daudzslāņu perceptrons, automātiskā ARIMA un trīskāršā eksponenciālā izlīdzināšanas metode [45]. Vēsturisko datu analīze veicina šo metožu un rīku attīstību, un precizitāti. Tirgus apjomu noteikšana nākamās dienas tirgū notiek īsā laikā ar apjomīgu datu ievadi, tādēļ prognozēšanas rīki kombinācijā ar daudzpakāpju programmēšanas modeļēšanas koncepcijas metodēm sniedz jau ticamu rezultātu un lēmumu [49,50]. Panākot arvien efektīvāku KS darbību tiek veicināta dekarbonizācija [51], turklāt pielietojot SA var uzlabot visas stacijas efektivitāti [52]. SA pielietošana kā sistēmas elements ietekmē visas sistēmas darbību [45], palielina nenoteiktību iekārtas darbības efektīvai pielietošanai, ja netiek izvērtēti visi kritēriji, kā, piemēram, zudumi [54]. Veikts elektrisko un siltuma zudumu izmaksu ietekmes aprēķins SA darbības režīmam, kas ietverts izmaksu modelī. Izveidots lēmumu pieņemšanas algoritms koģenerācijas stacijām elektrības brīvās tirgus apstākļiem, kas balstīts uz elektrības pašizmaksas un detalizētu SA analīzi ar iekļauto tā darbības izmaksu modeli. Algoritms kalpo kā īstermiņa datorsistēmu plānošanas rīks, kura mērķis ir maksimāli palielināt kopējo bruto ieņēmumu robežu koģenerācijas darbības plānošanai un izslēgt tādas darbības režīmus, kurš var radīt zaudējumus.

Uzstādītās siltumakumulācijas sistēmas efektīvu darbību ietekmē tādi faktori, kā aktuālā siltumietilpība, uzlādes, izlādes ātrumi un jāspēj noteikt vai iekārta izpildīs uzdoto darbības režīmu. Darbības režīms atkarīgs no tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūrām T_1 , T_2 , SA termiķļa augstuma ar temperatūru T_3 . Savukārt operatoram darbības plānošanā jāņem vērā arī tādi faktori kā SA siltuma zudumi, kas atkarīgi no siltumizolācijas pretestības, no $T_{\text{ārgaisa}}$, vēja iedarbības, elektrības patēriņa papildus sūkņu Nr.1,2,3,4 darbībai procesa nodrošināšanai un iekārta uzturēšanas izmaksas. Turklāt KS, strādājot nākamās dienas tirgū, SA darbības plānošanai nepieciešama ikstundas prognoze nākamām 24 stundām, kur brīvās tirgus apstākļos ir mainīgas elektroenerģijas, siltuma, CO₂ izmešu (ja fosilais kurināmais) un kurināmā cenas.

Biomases koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru shēma parādīta 6.2.1. attēlā. kur autors veica šī elementa dziļo analīzi.

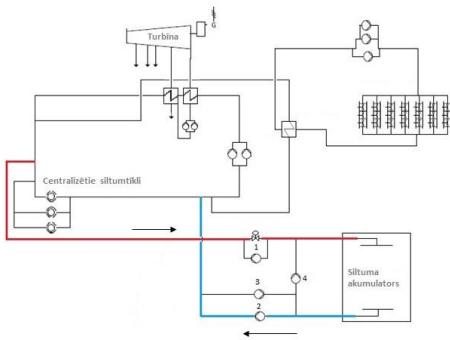


6.2.1.att. Biomases koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru shēma [25].

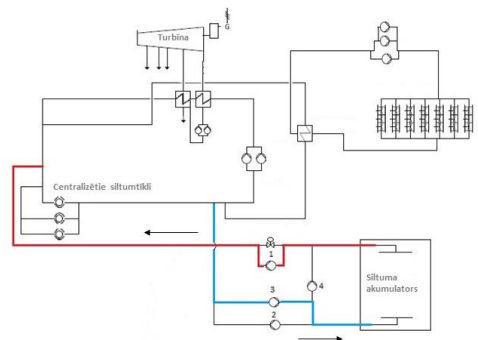
6.2.1. Akumulatora darbības tehnoloģiskie procesi

Veicot akumulatora uzlādēšanu, šim nolūkam karstā ūdens daļa no turpgaitas tīkla ūdens cauruļvada pa cauruļvadu tiek padots akumulatorā caur regulatoru skatīt att. 6.2.1.1. Uzlādes režīmā, pie tīkla ūdens temperatūras līdz 95°C un gadījumā, ja nav nepieciešams atdesēt tīkla ūdeni, tad sistēmas darbību nodrošina tikai tīkla ūdens atsūkņēšanas sūkņi Nr. 2., kurš no akumulatora apakšas padod uz siltumtrasi auksto ūdeni.

Šajā procesā ir ļoti svarīgi, lai ir regulatora un sūkņa Nr.2 savstarpējā plūsmas sinhronitāte (pēc līmeņa mērītāja un caurplūduma mērītāju rādījumiem). Maksimāli iespējamais caurplūdums nepārsniedz 432 m³/h.



6.2.1.1. att.SA uzlādēšanas shēma[25].



6.2.1.2. att.SA izlādēšanas shēma [25].

Gadījumā, ja akumulatora uzlādēšana tiek veikta pie ārējā gaisa temperatūras, kas zemāka par mīnus 15°C, kad turpgaitas tīkla ūdens temperatūra pārsniedz 95°C, tad tiek iedarbināts cirkulācijas sūkņi Nr. 4 (recirkulācijas), kas, piejaucot „auksto” ūdeni no akumulatora karstā ūdens cauruļvadā, nodrošina tā temperatūras samazināšanu līdz pieļaujamajai. Dzesējošā ūdens caurplūdumu regulē frekvences pārveidotājs.

Akumulatora izlādēšanas laikā vienlaicīgi darbojas divi sūkņi:

- Nr. 1 – karstā ūdens atsūkņēšanas sūkņi;
- Nr. 3 – atgaitas tīkla ūdens iesūkņēšanas sūkņi.

No att. 6.2.1.2. var redzēt plūsmas virzienus akumulatora izlādēšanas procesā. Izlādēšanas procesa laikā, tāpat kā uzlādēšanas ir ļoti svarīga sūkņu sinhronitāte, lai nevienmērīgu plūsmu rezultātā akumulatorā neveidojas straujas līmeņa svārstības. Šīs straujās līmeņa svārstības var izjaukt slāpekļa spilvenu tvertnes augšā, gan stratifikāciju. Sūkņi Nr.1 un Nr.3 ir ar atšķirīgām jaudām, kas saistīts ar to ka sūkņim Nr.1 ir jāpārvar tīkla turpgaitas spiediens, kas ir lielāks kā atgaitā. Šīs sistēmas ierobežojošais faktors ir sūkņu minimālais ražīgums (ne vairāk par 30% no

nominālā ražīguma – ap 120 m³/h) līdz ar to ir minimālā izlādes jauda. Sūkņu ražīgumu regulē frekvences pārveidotāji.

Izlādēšana ir pārtrauc un akumulators ir pilnīgi izlādēts tad, kad termokēlis ir pacēlies līdz aptuveni 24 metru atzīmei, t.i. pusmetru līdz difuzoram.

6.2.2. Siltuma akumulatora uzlādes un izlādes jaudas

Siltuma akumulatora uzlādes un izlādes ātrums ir atkarīgs no sūkņu ražības, kas esošā stacijā ir 432 m³/h un visiem sūkņiem vienāda ražība. Sūkņi ir aprīkoti ar frekvences pārveidotājiem, tas nozīmē, ka var mainīt sūkņa ražību un izmainīt uzlādes vai izlādes ātrumu atkarībā no nepieciešamās situācijas. Uzlādes un izlādes ātrumus šajā stacijā ierobežo sūkņu minimālais ātrums, kas ir 30% no nominālā sūkņa ražīguma.

Uz SA ieejošiem cauruļvadiem ir uzstādīti plūsmas mērītāji, caur kuriem tiek kontrolēts sūkņu darbības ātrums un sinhronitāte. Šis SA ir komplicētstādēļ, ka jāuztur nemainīgs līmenis mainīgos darba apstākļos – temperatūras ietekmē var svārstīties līmenis vai arī iespējams minimāls sūkņu sinhronās darbības disbalans.

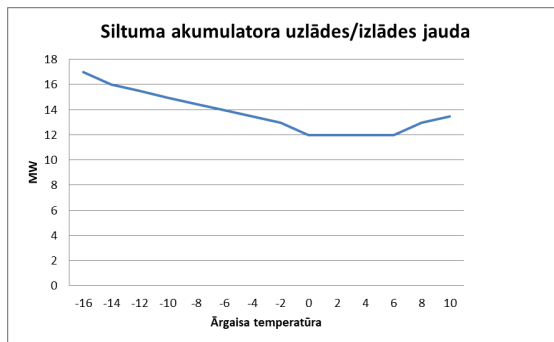
Saskaņā ar formulu:

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot dT \quad (6.2.2.1)$$

kur T_1 - turpgaitas temperatūra, °C;
 T_2 – atgaitas temperatūra °C;
 V - ūdens tilpums, m³;
 ρ - ūdens blīvums kg/m³;
 c_p - siltumietilpība, J/(kg·K) [29]

tad, piemēram, pie 10⁰C ārgaisa temperatūras pēc CST parametriem uzlādes un izlādes jauda būs 13,475MW

Saskaņā ar pielikumu Nr.5 uzlādes un izlādes ātrumi ir tieši atkarīgi no siltumapgādes tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūras starpības.



6.2.2.1. att. SA uzlādes un izlādes ātrumu izmaiņas grafiks atkarībā no gaisa temperatūras

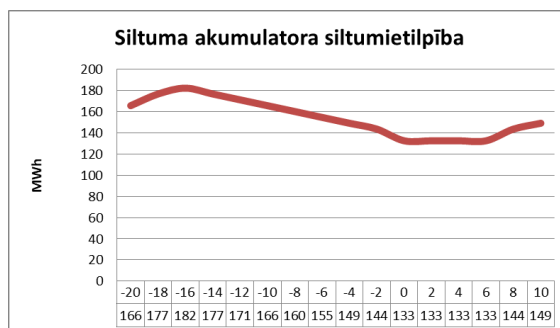
Turklāt operatoram jāņem vērā, ka mainoties ārējai temperatūrai maksimālā jauda var mainīties no 16,9MW pie -16 °C līdz 11,9MW pie 0°C, kas attiecīgi mainās 29,42% robežās.

6.2.3. Siltuma akumulatora siltumietilpība

Siltumenerģijas akumulatoriem viens no būtiskākajiem parametriem ir siltumietilpība jeb kādu enerģijas daudzums iespējams akumulēt. Siltumietilpības akumulatoriem ar mainīgu temperatūru, kur par darba vielu izmanto siltumtīklu ūdeni, tad saskaņā ar 6.2.2.1 formulu temperatūras starpība un tilpums tiešā veidā ietekmē SA siltumietilpību.

Pētāmajam SA esošā ūdens temperatūra ir tiešā veidā pakļauta tīkla ūdens turpgaitas un atgaitas temperatūrai un saskaņā ar 5. pielikumu, kur redzama tīkla ūdens temperatūras attiecība pret ārējai temperatūrai. Izmantojot 6.2.2.1 formulu tika aprēķināta SA siltumietilpība.

Aprēķinot siltumietilpību tika ņemts vērā, ka akumulatora augšējā ierobežojošā temperatūra ir 95°C.



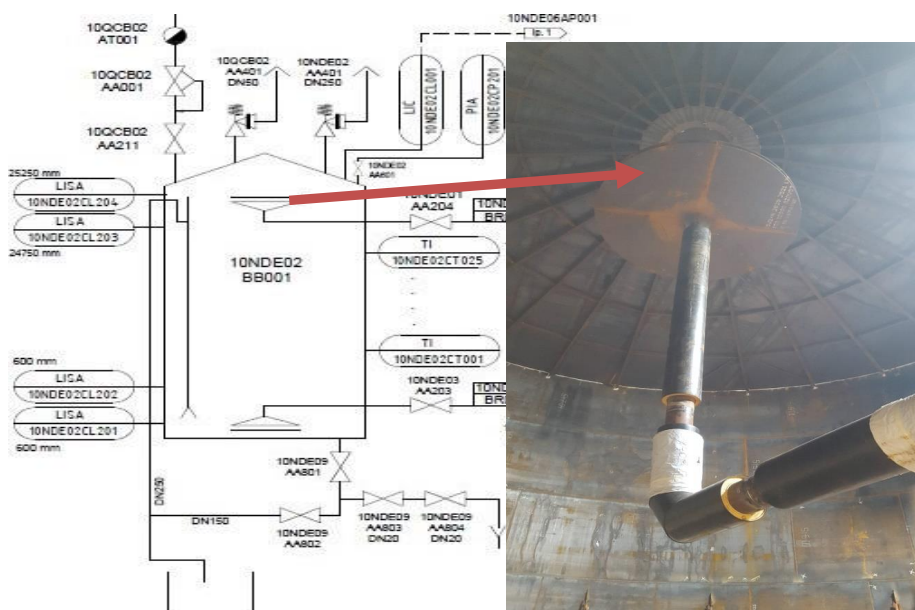
6.2.3.1. att. Siltuma akumulatora siltumietilpība.

No 6.2.3.1.att.redzams, ka akumulatoram strādājot ar siltumtīklu ūdeni, tad siltumietilpība mainās saskaņā ar gaisa temperatūru un tīklos uzdoto temperatūras režīmu. Siltumietilpības var izmainīties vairāk kā 25% diapazonā attiecīgi pie -16⁰C sasniedz 182 MWh, pie 2⁰C sasniedz vairs tikai 133MWh.

Šī siltumietilpības izmaiņas ir jāņem vērā pie SA akumulācijas un īpaši, ja tiek prognozēts nākamās dienas tīkla režīms, elektroenerģijas ražošanas apjomā uzglabājamā siltuma daudzums.

6.2.4. Difuzora aprēķins

Akumulācijas tvertnes darbība ar siltumtīkla ūdeni balstās uz ūdens stratifikācijas parādību (temperatūru sadalīšana slāņos) [55]. Līdz ar to ūdens, kas tiek piegādāts tvertnē, netiek samaisīts ar citiem temperatūras slāņiem, bet nonāk līdzīgas temperatūras slānī (karstais pie karstā un aukstais pie aukstā ūdens). Difuzora galvenais uzdevums ir samazināt rezervuārā ieejošās un izejošās tīkla ūdens plūsmas ātrumu līdz tādām ātruma, lai maksimāli samazinātu iespēju izjaukt stratifikāciju [97].



6.2.4.1. att. Siltuma akumulatora principālā difuzoru shēma pa labi un augšējais difuzors [9].

Lai nodrošinātu bezsajaukšanās tvertnes darbību nepieciešams izmantot difuzorus ūdens pievadīšanai un izvadīšanai no tvertnes. Attēlā 6.2.4.1. var redzēt principālo shēmu ar difuzoru izvietojumu SA, kur augšējais – turpgaitas, bet apakšējais atgaitas tīkla ūdenim.

Katras akumulācijas tvertnes difuzora aprēķins un izvēle ir individuāls process, tālāk ieskatam tiks parādīts aprēķina piemērs šim SA:

Rezervuāra uzpildes un nosūces cauruļvads ir Ø273 x 6 (iekšējais diametrs Ø261 mm), sūkņu maksimālā ražība- $Q = 432 \text{ m}^3/\text{st} = 0,12 \text{ m}^3/\text{sek}$

1. Aprēķina šķērsriezuma laukumu cauruļvadam:

$$S_1 = \pi r^2 \quad (6.2.4.1.)$$

2. Ūdens plūsmas ātrums cauruļvadā:

$$V_1 = \frac{Q}{S_1} \quad (6.2.4.2.)$$

3. Tika iegūts plūsmas ātrums cauruļvadā, kas ir 2,243 m/sek. Savukārt, lai neizjauktu stratifikāciju akumulatorā, tad plūsmas ātrums izejā / ieejā no difuzora pēc tehniskā uzdevuma $V_1 = 0,2 \text{ m/sek}$.

4. Difuzora izejas laukuma aprēķins saskaņā ar Bernulli vienādojumu (caur abiem atvērumiem vienādā laika intervālā iziet vienāds šķidrums daudzums):

$$S_1 V_1 = S_2 V_2, \quad (6.2.4.3.)$$

kur V_1 – ūdens plūsmas vidējais ātrums pieplūdes cauruļvadā, (2,4 m/sek);

S_1 – cauruļvada laukums (0,05 m²);

V_2 – ūdens plūsmas vidējais ātrums izejā no difuzora, m/s;

S_2 – difuzora laukums, m².

5. Tiek aprēķināts, ka minimālam difuzora izejas laukumam jābūt: $S_2 = 0,6 \text{ m}^2$. Difuzora izmēra aprēķins (minimālais Attālums starp plāksnēm) pieņemts difuzora ar diametru 2m, pieņemts attālums starp plātnēm 130 mm, tad cilindra laukums ir:

$$S_2 = \pi \cdot d \cdot h \quad (6.2.4.4.)$$

Tika iegūts, ka difuzora izplūdes laukums ir $0,816 \text{ m}^2$

No Bernulli formulas izsakām plūsmas ātrumu izejā no difuzora:

$$v_2 = \frac{V_1}{S_2} \cdot S_1 \quad (6.2.4.5.)$$

Tika aprēķināts V_2 , kur $0,147 \frac{\text{m}}{\text{sek}} < 0,2 \text{ m/sek}$

6. Reynoldska skaitlis tika aprēķināts pēc hidrauliskā rādiusa (Rr) šķidrums (ūdens) plūsmas šķērsgrīzumam:

$$Re = \frac{v \cdot Rr}{\nu}, \quad (6.2.4.6.)$$

kur V – vidējais ūdens ātrums cauruļvadā ar taisnstūra šķērsgrīzumu;

Rr – hidrauliskais rādiuss pie spiediena plūsmas taisnstūra šķērsgrīzumā;

ν – ūdens kinemātiskā viskozitāte.

Hidrauliskais rādiuss Rr taisnstūra kanālam tiek noteikts kā a un b izmēri kanālam. Mūsu gadījumā difuzora riņķa līnija $3,14 \cdot 2 = 6,28 \text{ m}$, kur a ir attālums starp plāksnēm $0,12 \text{ m}$.

$Re = 13169$

Pēc pieejamās informācijas, līdzīgiem rezervuāriem Re ir robežās no $10000 - 30000$ [98]. Šajā sakarā nav nepieciešamība palielināt difuzoru, kas protams samazinās Re , jo tas praktiski neietekmēs plūsmu, bet sarežģīs difuzora konstrukciju, palielinās tā svaru kā arī stiprinājuma konstrukcijas pie rezervuāra.

6.2.5. Tikla ūdens aizsardzība no skābekļa

Tikla ūdens aizsardzībai no skābekļa, kas atrodas gaisā ir dažādi tehniskie risinājumi bez spiediena akumulatoriem. Latvijas SA izmanto gan tvaika spilvenus, gan slāpekļa spilvenus.

Pētāmajam SA, lai nodrošinātu tikla ūdens aizsardzību no aerācijas (piesātināšanas ar skābekli) ir tehnisks risinājums ar slāpekļa spilvenu. Ir svarīga ne tikai vienreizēja slāpekļa uzpilde, bet arī iespējamo slāpekļa zudumu (izmešana atmosfērā), kas sasitīti ar nepietiekamo sistēmas balansēšanas nodrošināšanu, piemēram, palaišanas laikā, uzlādes, izlādes sūkņu nevienmērīgu darbību, vai kādu procesa automātiskās kontroles un vadības sistēmas elementu novirzes gadījumu. Temperatūru izmaiņu rezultātā pašā SA ūdens var svārstīties $\pm 5 \text{ cm}$ no nominālā līmeņa.

Saskaņā ar Boila-Mariota likumu spiediens slāpekļa spilvenā ir apgriezti proporcionāls tā apjomam $p_1V_1=p_2V_2$, t.i., ūdens līmenim rezervuārā paceļoties, gāzu spilvena apjoms samazinās, taču spiediens tajā paaugstinās.

Tālāk sniegts slāpekļa sistēmas aprēķina piemērs akumulēšanas sistēmas darbības procesa nodrošināšanai.

- $p_1=1,005 \text{ bar}$ – spiediens spilvenā, ko uztur tiešās darbības regulators;

- $V_1=257,75 \text{ m}^3$ – spilvena apjoms nominālajā ūdens līmenī.

Noteiksim ūdens līmeņa celšanās lielumu (Δh), pie kura spiediens spilvenā sasniegs aprēķina spiediena robežlielumu (1,01 bar):

$$\Delta h = DV/S = \frac{V_2 - V_1}{S} \quad (6.2.5.1.)$$

kur- S – ūdens virsmas laukums rezervuārā

$$V_2 = 256.47$$

$$\Delta h = 0.006 \text{ m vai } 0,6 \text{ cm}$$

t.i., praktiski līdz ar ūdens līmeņa celšanos ar soli 0,5 cm virs 25,006 m atmosfērā tiks izmests 1 nm^3 slāpekļa. Gadījumā, ja ūdens līmenis rezervuārā turpmāk palielināsies, nepieciešams paredzēt sistēmas automātisku atslēgšanos, ūdenim paceļoties par 5 cm no nominālā līmeņa (25,05 m). Lai saglabātu pieļaujamo spiedienu spilvenā 1,01 bar un nepārsniegtu gan standarta bezspiediena rezervuāra prasības, gan projekta konstrukcijas stiprību no rezervuāra atmosfērā tiks izlaisti 9 nm^3 slāpekļa ar pārspiediena vārsta palīdzību. Šādu daudzumu nepieciešams automātiski papildināt, izmantojot regulatoru, kas uztur spiedienu spilvenā.

Savukārt samazinoties ūdens līmenim, rezervuārā par projektā pieļaujamiem 5 cm no nominālā līmeņa 25 m, būs nepieciešami tie paši 9 nm^3 slāpekļa. Pamatojoties uz šo aprēķinu, ir nepieciešami slāpekļa rezerves resīveri, ņemot vērā slāpekļa ģenerators ražīgumu, lai nodrošinātu pietiekamu rezervi slāpekļa spilvena uzturēšanai.

Galvenajā koģenerācijas ēkā tika uzstādīts slāpekļa ģenerators ar četriem resīveriem, tilpums 900 l katrs ar darba spiedienu 6 bar, lai nodrošinātu kopējo slāpekļa rezervi $21,6 \text{ nm}^3$. Paša ģenerators ražīgums ar saspīstā gaisa caurplūdumu $27 \text{ m}^3/\text{h}$ un slāpekļa attīrīšanas pakāpi 99,9-99,5% ir 6,6-10,4 m^3/h . Slāpekļa ģenerators saņem saspīsto gaisu no blakus izvietotās esošās gaisa kompresoru iekārtas.

Normālos akumulēšanas sistēmas ekspluatācijas apstākļos, slāpekļa zudumi saistīti ar iespējamām ūdens līmeņa svārstībām maksimāli pieļaujamajās robežās $\pm 5 \text{ cm}$ no nominālā līmeņa (25 m) un normatīvo prasību (EN 14015:2004) [83], kas nosaka atmosfēras tipa rezervuāriem kritumu ne lielāku par 0,015 bar (no +0,01 līdz -0,005 bar no atmosfēras spiediena) [83]. Lai panāktu (EN 14015:2004) izpildi, drošumu straujām spiedienu svārstībām pret vakuumu un pārspiedienu, ir uzstādīti papildus drošības vārsti.

Akumulators, lai paaugstinātu CSS drošumu tīklu avārijas plīsumu gadījumos ir paredzēts arī avārijas piebarošanai, izmantojot tajā esošo sagatavoto tīkla ūdeni. Maksimālais ūdens patēriņš avārijas piebarošanai ir $30\div 40 \text{ m}^3/\text{h}$, ilgums līdz četrām stundām.

Gadījumā, ja avārijas piebarošanas ūdens caurplūdums sasniedz līdz $40 \text{ m}^3/\text{h}$, slāpekļa rezerves resīveros pietiks 0,5 stundai spiediena uzturēšanai spilvenā. Tāpēc ir uzstādīta slāpekļa balonu iekārta “Megapack-4”, kura ieslēgsies, ja slāpekļa sistēmas samazināsies zem 5 bar.

Caur regulatoru, slāpekļa spilvenā sāks ieplūst slāpekļis no baloniem. Slāpekļa rezerve balonos ir 180 nm^3 , kas pietiek vēl 4.5-5 stundu sistēmas darbībai siltumtīkla piebarošanas režīmā, neiedarbojoties vakuuma drošības vārstam rezervuārā, un līdz ar to, neielaižot gaisu rezervuārā un nepieļaujot ūdens aerāciju akumulatorā.

6.3. Siltuma akumulatora darbības režīma izmaksu modelis

Siltuma akumulatora pielietošana nedrīkst pasliktināt KS kopējo efektivitāti [39] tādēļ ieņēmumi $\text{Re}^{\text{KS}} < \text{Re}^{\text{KS}} + \text{Re}^{\text{HS}}$ - ($C_{\text{kopējās}}$ izmaksas procesa nodrošināšanai). Galvenās izmaksas šajā modelī veido - elektrības, siltuma zudumu un apkalpošanas un remonta, kuras izsaka ar formulu:

$$C_{\text{kopējās}} = C_{\text{siltuma}} + C_{\text{el}} + C_{\text{apkalpošanas izmaksas}} \quad (6.3.1.)$$

Autora izveidotā metodika siltuma zudumu aprēķināšanai parādīta 3. nodaļā, kur tika iegūti siltuma zudumi 438 kwh, siltuma zudumus nosaka:

$$C_{\text{sil}} = Q_{\text{sil}} \cdot C_{\text{pph}} \quad (6.3.2.)$$

Biomases koģenerācijas stacijas ar siltuma akumulatoru darbojas trīs sūkņi procesa nodrošināšanai:

Pie siltumenerģijas uzlādes strādā sūknis Nr.2 ar el.jaudu 75 kW

Pie siltumenerģijas izlādes strādā sūknis Nr.1 ar el.jaudu 200 kW un sūknis Nr.3 ar el.jaudu 30 kW

$$C_{\text{el}} = P \cdot h \cdot C_{\text{ppl}}, \quad (6.3.3)$$

kur P - jauda, kwh; h – darba stundu skaits

Analizējot SA darbību maksimālajā režīmā 12 stundas uzlādes un 12 izlādes režīmam:

Uzlādes process maksimālais:

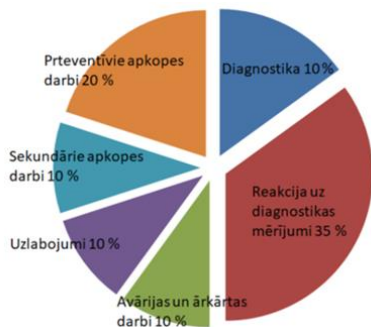
$$Q_{\text{sūknis nr.2}} = 75 \cdot 12 = 825 \text{ kWh}$$

Izlādes process maksimālais :

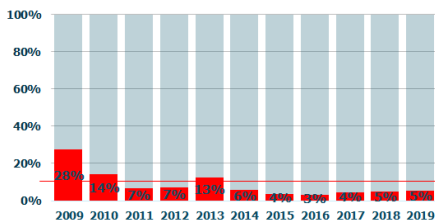
$$Q_{\text{sūknis nr.1}} + Q_{\text{sūknis nr.3}} = 200 \cdot 12 + 30 \cdot 12 = 2200 + 330 = 2530 \text{ kWh}$$

Lai novērtētu SA akumulatora efektivitāti, nedrīkst neņemt vērā sistēmas apkalpošanas, remonta izmaksas un sistēmas pieejamību. SA sistēma ietver ļoti daudz iekārtas, kā sūkņus, vārstus, skaitītājus, devējus un citas iekārtas darbības nodrošināšanai. Šīs ietilpstošās iekārtas prasa regulāru apkalpošanu pretējā gadījumā var rasties atteikumi, kuri ietekmēs ražošanas procesu.

Aktīvu pārvaldības sistēmas ļauj vadīt, plānot un izsekot darbus un nepieciešamos resursus to izpildei. Prasmīga fizisko aktīvu uzturēšana nodrošina to, ka avārijas darbu apjoms kopējo darbu apjomā nepārsniedz 10%. Pasaules klase rāda, ka uzņēmumu spēj sasniegt tehnisko pieejamību līdz 98.6% [27]



Avārijas apstāšanās un preventīvie pasākumi kopš Infor sistēmas ieviešanas



6.3.1. att. SIA "Industry Service Partner" ieviestās aktīvu pārvaldības sistēmas laika sadalījums, sistēmas ražošanas procesu dinamikas izmaiņas [28]

6.3.1. attēlā, kur uzņēmumā SIA "Industry Service Partner" ieviesta aktīvu pārvaldības sistēma Infor un to atteikumu dinamika 10 gadu garumā. Sākotnēji 2009.gadā uzņēmuma iekārtu atteikumi sastādīja pat 28% gadījumu. Grafiks parāda, ka šāda uzņēmuma atteikumi samazināti pirmajā gadā 2 reizes un 5 gadu laikā nostabilizējušies un vidēji sastāda 5% no kopējā iekārtu uzturēšanas laika. Pārējo laiku jeb 95% aizņem preventīvie pasākumi.

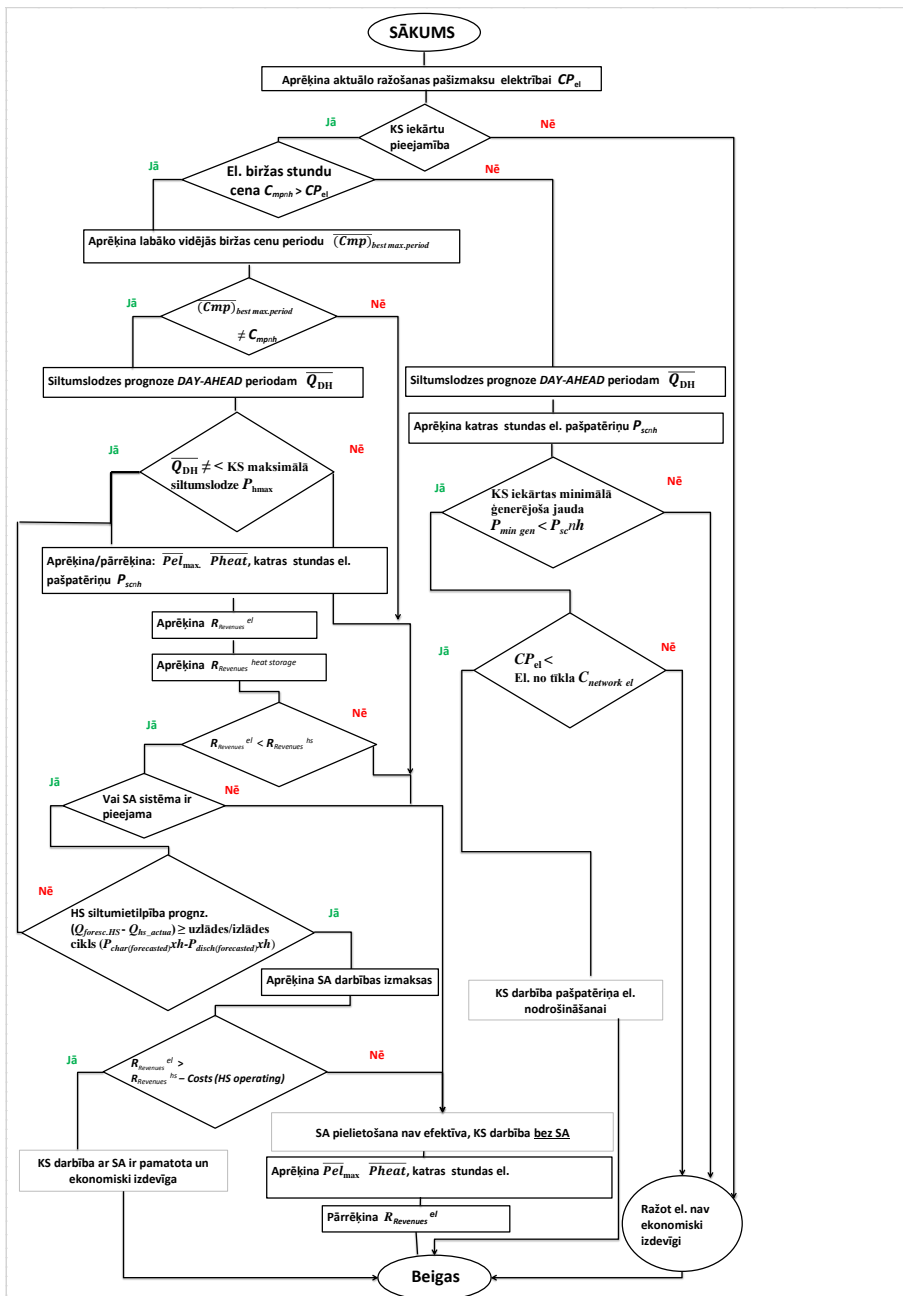
Apkalpošanas vidējās izmaksas dienai tiek aprēķinātas:

$$C_{\text{apkalpošanas izmaksas}} = C_{\text{gada apkalp. izm}} / h, \text{ kur} \quad (6.3.4.)$$

h- darbības gada stundas

6.4. Lēmuma pieņemšanas algoritms

Par pamatu ņemot piecu līmeņu *Funkcionālo shēmu* no 1.2.2 att. tika izveidots daudzlīmeņa Eiklīda blokshēmas lēmuma pieņemšanas algoritms KS darbībā ar SA, kas parādīts attēlā 6.2.1. Šie 4.1. un 4.2. viens otru papildina, kur 4.1. ir parādīti galvenie ievaddati un 4 izejas funkcijas. Savukārt 4.2. parādīta aprēķina secība un ietekmējošo faktoru Jā/Nē izejas funkcijas. 4.2. algoritma galvenais uzsvars ir likts uz SA dziļās analīzes datu iekļaušanu, kuras rezultātā tiek precizētas SA darbības izmaksas, lai izslēgtu tādas darbības režīmus, kas KS darbībā ar SA radītu zaudējumus.



6.4.1.att. Lēmuma pieņemšanas algoritma blokhēma

Lai iegūtu pozitīvu rezultātu, kur SA izmantošana būs efektīva un nesīs peļņu, tad jāiziet cauri 12 pozīciju filtram. Algoritms var novest arī pie šādiem rezultātiem: KS darbība bez SA, KS darbība tikai pašpatēriņa elektrības ražošanai un elektrības ražošana nav ekonomiski izdevīga. Sākuma izejas pozīcijā ir jāveic KS aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajā stāvoklim nav apdraudējumu, kas ietekmēs ražošanas procesu [27].

1. Starta pozīcija sākas ar elektroenerģijas ražošanas pašizmaksas ($C_{pp, el}$) aprēķinu. Ražošanas izmaksas ietekmē daudzi faktori, piemēram, CO₂ biržas cenas, siltumenerģijas tarifs, koģenerācijas efektivitāte, kurināmā, personāla izmaksas u.c. faktori [61].
2. Šajā blokā ir jāveic KS aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajā stāvoklim nav apdraudējumu, kas ietekmēs ražošanas procesu [27].
3. Sākotnēji ir jāprognozē elektroenerģijas tirgus cena visam diennakts periodam un jāsalīdzina ar ražošanas izmaksām. Šis solis nosaka, vai elektroenerģijas stundas cena tirgū ir augstāka par elektroenerģijas ražošanas pašizmaksu:

$$C_{mp, el} \geq C_{pp}, \quad (6.1.)$$

Ja elektroenerģijas ražošanas pašizmaksa $C_{pp, el}$ ir augstāka ikdienas stundas prognozētā, tad SA nav efektīvi pielietot ieņēmumu gūšanai. Var rasties situācija, kad KS darbība ir ekonomiski neefektīva vai iespējama tikai KS pašpatēriņa vajadzību segšanai. Turklāt, jāņem vērā vai ģeneratora tehnoloģiskā minimālā jauda atbilst pašpatēriņam un varbūt iepirkta elektrība no tīkla ir lētāka par saražotās pašizmaksas cenu.

4. Situācijā, kad cena nākamās dienas elektroenerģijas tirgū ir vienāda vai gandrīz vienāda ar vidējo tirgus cenu visā 24 stundu periodā, tad, SA iekārtas darbība ir neefektīva un tā uzlāde un izlāde būs neizdevīga siltuma un elektrības zudumu dēļ:

$$\overline{(Cmp)} \neq C_{mp} \mathbf{1h} \approx C_{mp} \mathbf{nh} \approx C_{mp} \mathbf{24h} \quad (6.2.)$$

Šajā gadījumā iegūst rezultātu, ka KS darbība jāorganizē bez SA.

5. Aprēķina labāko vidējo biržas cenas laika periodu virs elektrības ražošanas cenas $\overline{(Cmp)}_{\text{best max period}}$

$$\overline{(Cmp)}_{\text{best max period}} = (C_{mp} \mathbf{1h} + C_{mp} \mathbf{2h} + C_{mp} \mathbf{nh}) / \mathbf{nh} \quad (6.3.)$$

Šī funkcija nosaka labāko periodu, kurā KS darbība tirgus apstākļos var nest lielākos ienākumus gan KS, gan KS darbībā ar SA.

6. Papildus elektroenerģijas tirgus cenai ir svarīgi prognozēt arī nākamās dienas apkures pieprasījumu, pirms tiek pieņemts lēmums vai siltuma uzglabāšanas darbība varētu būt izdevīga. Precīza siltuma slodzes prognozes veikšana būtiski ietekmē visu ražošanas plānošanas procesu. Ļoti būtiski siltumslodzi prognozēt ik stundai nākamām 24 stundām un jānosaka tīkla turpgaitas un atgaitas temperatūras. Tas saistīts ar biržas pieteikto periodu nākamajai dienai tekošajā dienā plkst. 12:00 [8]. Tas nozīmē, ka neprecīzas prognozes rezultātā siltuma akumulators var tikt priekšlaicīgi uzlādēts, tad nebūs kur utilizēt saražoto siltumu un nāksies samazināt koģenerācijas ražošanas jaudu. Var būt arī situācija, ka, ja visa enerģija no SA netiek izlādēta zemās elektroenerģijas tirgus stundās, tad nākamajā pieteiktā cikla gadījumā netiks saražots pieteiktās jaudas apjomā, kur pie labas elektroenerģijas biržas cena, būs ne tikai neiegūtā peļņa, bet arī liela nesaražotā apjoma gadījumā būs jākompensē zaudējumi [8].
7. Gadījumā, ja prognozētā siltumslodze atbilst KS maksimālajai jaudai vai ir lielāka, tad koģenerācijas bloku var noslogot vēlamajā režīmā maksimālā tirgus cenu diapazonā un nav lietderīgi izmantot SA ienākumu gūšanai.
8. Atkarībā no siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanas attiecības un ražošanas bloku elastības ir jāveic aprēķins, lai pieņemtu lēmumu KS darbības režīmam ik stundai. Turklāt KS kopējo režīmu ietekmē 2. nodaļas definētās iekārtas (dūmgāzu ekonomizeris, siltumsūkņi u.c.), kuras paaugstina stacijas kopējo efektivitāti iegūstot papildus siltumenerģiju. Rekomendējams, ka tiek ņemts vērā arī koģenerācijas stacijas palaišanas (aukstā, siltā un karstā), jaudas paaugstināšanas vai samazināšanas apstākļi [39]. Šajā blokā tiek noteikta arī pašpatēriņa Psc elektriskās enerģijas nepieciešamība procesa nodrošināšanai.
9. Šajā blokā tiek noteikti divi ieņēmumi skaitļi Pr^{el} , kur maksimālie ieņēmumi KS darbībā bez SA un Pr^{hs} , kur KS darbībā ar SA.
10. Ir jāveic SA aprīkojuma pieejamības novērtēšana. Turklāt ir jāidentificē riski, vai tehniskajā stāvoklī nav apdraudējumu, kas ietekmēs ražošanas procesu [27].
11. Tiek veikts aprēķins atlikušajam siltumam siltuma akumulatorā, kā arī veikts prognozētais KS režīms ar saražoto papildus siltumu nodrošinās SA uzlādi un vēlāk maksimālu izlādi. Šie parametri var būt mainīgi atkarībā no prognozētā siltumtīklu temperatūras grafika. Var gadīties, ka SA siltumietilpība neļauj veikt elektrības ražošanas režīmā radušos visa siltuma uzkrāšanu vai arī, ja viss akumulatorā esošais siltums netiek izmantots nakts

darba režīmā, nepieciešamas papildus kalkulācijas KS darbībai, lai varētu pielāgot režīmu aktuālajai un prognozētajai SA situācijai.

12. Šajā blokā tiek pielietota 3. nodaļā veiktā siltuma akumulatora darbības režīmu izmaksas modeļa novērtēšana. No ieņēmumiem tiek atņemti kopējie zudumi. Tiek salīdzināti ieņēmumi tikai no KS, un KS ar SA- zudumi. Izejas funkcija - SA darbība ir efektīva, vai arī, ka zudumi sastāda lielāku daļu, kā ieņēmumi, tad ieteicama KS darbība bez SA.

6.5. Nodaļas secinājumi

Optimizēts koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulatoriem, veicot akumulatora dziļo analīzi un ieviešot tā parametriskās funkcijas. Algoritma iznākumā rodas četri izejas stāvokļi jeb rezultāti: KS darbība ar SA; KS darbība bez SA; KS darbība pašpatēriņa nodrošināšanai; elektroenerģiju ražot nav izdevīgi, kas nodrošinās maksimālus ieņēmumus, ātri izslēgs tādus darbības režīmus, kas var nest zaudējumus brīvajā elektroenerģijas tirgū. Siltuma akumulācijas aprēķinu modulī tika ietverts ne tikai siltumietilpības, uzlādes-izlādes jaudas, siltuma zudumi, bet arī vairākas parametriskās funkcijas.

- Algoritmā ietverot SA darbības režīma izmaksu modeli, tas parādīja, ka lielākās izmaksas veido elektriskais patēriņš, kur darbības režīmā tika patērēts 3,355 MWh darbības nodrošināšanai. Savukārt siltuma zudumi aprēķinātajam darba režīmam veidoja 0,43 MWh.
- SA pieejamība un apkalpošanas izmaksas funkcija ļoti ietekmē ražošanas plānošanu, ja pastāv iekārtu atteikumu riski. Lielāka iekārtu pieejamība sniedz būtisku iespēju izmantot tās visefektīvākos un ekonomiski pamatotos darba režīmos, lai arī uz kopējām izmaksām ir vismazākās. Aktīvu pārvaldības sistēmas ieviešana uzņēmumā palīdz pat piecas reizes samazināt avārijas iekārtu remontiem patērēto laiku, ja tiek vairāk palielināti preventīvie pasākumi un diagnostika

7. SECINĀJUMI

1. Literatūras analīze liecina: lai nodrošinātu stabilu siltuma slodzi centralizētās siltumapgādes sistēmā mainīgos klimatiskos apstākļos, ir nepieciešams nepārtraukti regulēt jaudu siltuma avotos. Mainīgā diennakts siltumslozde ietekmē darba režīmus, savukārt ražošanas plānošana ir salīdzinoši vienkārša, ja koģenerācijas stacija saņem valsts atbalstītu elektroenerģijas iepirkumu. Līdz 2022. gadam 37 % koģenerācijas staciju notiek pārorientācija uz brīvā tirgus apstākļiem un valsts atbalsta zaudēšana, šo staciju darbības režīmus ietekmē arī svārstīgais elektroenerģijas tirgus. Enerģētikas politika arī turpmāk virzīsies uz brīvā tirgus apstākļiem. Tādējādi šo staciju ražošanas darba režīmu lēmumus sarežģīt ne tikai mainīgā elektroenerģijas tirgus cena, bet arī apstākļi, ka lēmums par nākamās dienas elektroenerģijas ražošanas apjomu jānosauc kārtējā dienā no plkst. 10 līdz 12. Attiecīgi biržā tiek veidoti pieprasījumi un piedāvājumi.

Siltuma akumulācijas vai siltuma sūkņu tehnoloģiju lietošanas gadījumā vēl vairāk palielinās mainīgie faktori un nenoteiktība gala ražošanas lēmumu pieņemšanā. Nepieciešams plānot un ņemt vērā iekārtu tehniskos un ekonomiskos parametrus mainīgos tirgus un vides apstākļos. Piemēram, siltuma akumulatora tehnoloģija var paaugstināt kopējo efektivitāti siltuma avotam, taču bez plānošanas un tehnoloģiskiem aprēķiniem var arī samazināt vai pat radīt zaudējumus atsevišķos darbības režīmos.

Tika nodefinēti pieci lieli pamatbloki algoritmam – elektrības pašizmaksas, elektrības tirgus cenas, siltumslozdes, koģenerācijas darba režīmu un siltuma akumulatora aprēķina moduļi, kas visvairāk ietekmē koģenerācijas stacijas ražošanas lēmumu pieņemšanu. Katrs no moduļiem veido aprēķinu procesus, kur ar ievaddatiem un vienādojumiem veidojas izejas funkcijas ar pieciem stāvokļiem, kas definē ekonomiski pamatotu ražošanas lēmumu.

2. Efektivitātes paaugstināšanu, izmešu samazināšanu un siltumslozdes balansēšanu var panākt, ekspluatācijas stadijā modernizējot stacijas ar siltuma akumulācijas un siltumsūkņa tehnoloģiju.

- Dziļai dūmgāzu dzesēšanai ar absorbcijas tipa siltumsūkni ir plašs lietojums gan koģenerācijas stacijās, gan katlumājās ūdenssildāmiem katliem, lai uzlabotu efektivitāti. Efektīvai enerģijas atgūšanai no dūmgāzēm ir daudz komponentu (dūmgāzu kondensatori, absorbcijas dzesētāji, siltummaiņi utt.). Joprojām nav pietiekami daudz pētījumu siltumsūkņa nominālās jaudas noteikšanai dažādos darbības apstākļos. Eksperimentālie un teorētiskie aprēķinu dati pierāda, ka katla siltumefektivitāti var uzlabot līdz 16 %, ja dūmgāzu temperatūru samazina līdz 25 °C.

- Reālo datu analīze liecina, ka elektrības cenas nakts stundās bieži ir zemākas, taču šajā brīdī siltumslozde pieaug, savukārt dienas stundās pie zemākas siltumslozdes elektroenerģijas cenas – sasniedz pīķus. Īslaicīgā siltuma akumulācija ļauj balansēt siltuma slozdi un dienas laikā uzkrāt papildus saražoto siltumu. Pētījums rāda, ka siltuma akumulācijas iekārtas izmantošana koģenerācijas stacijā, kurā ir uzstādītas koģenerācijas iekārtas ar kopējo elektrisko jaudu 2,64 MW_{el}, lietošana gada laikā dod iespēju saražot un pārdot papildu elektroenerģiju līdz 4272 MWh pie esošās siltumslozdes. Fosilā kurināmā gadījumā tiek iekonomētas 959 t CO₂ izmešu.

3. Teorētisko siltuma zudumu noteikšana siltuma akumulācijai darba režīmos prasa ietilpīgus daudzpakāpju aprēķinus, jo jāņem vērā daudzi faktori: siltumizolācijas pretestība; iekšējās temperatūras izmaiņas; brīvā un piespiedu konvekcija; gaisa temperatūra; vējš u. c. Pētījums parādīja, ka nozīmīgs siltuma akumulatora efektivitātes rādītājs ir ne tikai siltuma zudumu aprēķins, bet arī termokīļa augstums. Turklāt termokīļa augstums dažādos darba režīmos ietekmē siltuma zudumus, taču var samazināt vai palielināt siltumietilpību akumulatoram. Termokīļa augstumu ietekmē tādi faktori kā siltuma akumulatora augstuma un diametra attiecība, siltumizolācijas efektivitāte. Tika izstrādāta daudzpakāpju siltuma zudumu un termokīļa aprēķina metodika, lai šos vienādojumus varētu integrēt kā moduļa daļu siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

- Veicot aprēķinus trīs Latvijas lielākajiem siltuma akumulatoriem un to siltumizolācijas risinājumiem, tika konstatēts, ka lietoti atšķirīgi risinājumi, tajā skaitā – izolācijas biezums. Piemēram, objekta X jumta (biezums – 0,5 m) siltumizolāciju caurlaidības koeficients U ir vislabākais 0,089 W/m²·K, savukārt sienām tas bija vissliktākais – 0,122 W/m²·K. Atšķirīgie siltumizolācijas risinājumi aprēķinos parādīja, ka koeficienta U vērtības ir ļoti tuvas, un 24 stundu darba režīma modulēšanā pie vienādiem parametriem tika iegūta 2,8 % siltuma zudumu atšķirība starp objektiem. Viszemākie siltuma zudumi bija objekta Y siltumizolācijas risinājumam ar 314,29 kWh.

4. Eksperimentālās metodes izmantošana faktisko siltuma zudumu noteikšanai reālos apstākļos ir precīzāka, nekā veicot termisko tiltu meklēšanu, modelēšanu un aprēķinu. Tika veikts eksperiments, kura laikā tika apturēta siltuma akumulācija un novēroti siltuma zudumi 168 h ilgā periodā. Šajā laika periodā tika fiksēti temperatūras kritumi, un tie salīdzināti ar teorētisko aprēķinu. Novērojumu dati liecināja, ka eksperimenta apstākļos akumulators zaudēja siltumu ar 12,79 kW. Veicot teorētisko aprēķinu eksperimenta apstākļiem un neņemot vērā termiskos tiltus, tika iegūta 7,59 kW siltuma zuduma jauda. Siltuma akumulatora verifikācijas laikā tika ieviests labojuma koeficients 1,403. Šāda siltuma akumulatora siltuma zudumu verificēšana ir nepieciešama, lai varētu šo

koeficientu ieviest vienādojumos un integrēt modulī siltuma akumulatora dziļās analīzes kopējā koģenerācijas stacijas lēmuma pieņemšanas algoritmā.

5. Lai precīzi pieteiktu saražoto elektroenerģijas apjomu nākamajai dienai un izvēlētos pareizu darbības režīmu, koģenerācijas stacijai strādājot brīvās elektroenerģijas tirgū, viens no būtiskākajiem faktoriem ir precīzi prognozēt siltumslodzi nākamās diennakts ciklam. Turklāt saistībā ar elektroenerģijas ikstundas cenas izmaiņām biržā arī siltumslodzes prognozes izšķirtspēja jāpārveido vismaz uz stundu mērogu. Analīzes mērķis bija iegūt pēc iespējas mazāku kvadrātu summu un uzzīmēt līniju saskaņā ar lineārās regresijas vienādojumu, kas vislabāk atbilst savāktajiem CSS datiem.

Pētītas iespējas ieviest aprakstošu CSS parametru – bezdimensiju apkures līknes normalizētu slīpumu, ko aprēķina kā lineārās regresijas vienādojuma temperatūras koeficienta attiecību pret vidējo CSS siltuma slodzi jeb *RP*. Siltumslodzes sniegtā statistisko datu analīze parāda, ka vienkāršās lineārās regresijas koeficients ir robežās no 0,8 līdz 0,94 dažādu Latvijas CSS atkarībā no āra gaisa temperatūras.

6. Optimizēts koģenerācijas stacijas lēmumu pieņemšanas algoritms darbībā ar siltumenerģijas akumulatoriem, veicot akumulatora dziļo analīzi un ieviešot tā parametriskās funkcijas. Algoritma iznākumā rodas četri izejas stāvokļi jeb rezultāti: KS darbība ar SA; KS darbība bez SA; KS darbība pašpatēriņa nodrošināšanai; elektroenerģiju ražot nav izdevīgi, kas nodrošinās maksimālus ieņēmumus, ātri izslēgs tādas darbības režīmus, kas var nest zaudējumus brīvajā elektroenerģijas tirgū. Siltuma akumulācijas aprēķinu modulī tika ietverts ne tikai siltumietilpības, uzlādes-izlādes jaudas, siltuma zudumi, bet arī vairākas parametriskās funkcijas.

- Algoritmā ietverot SA darbības režīma izmaksu modeli, tas parādīja, ka lielākās izmaksas veido elektriskais patēriņš, kur darbības režīmā tika patērēts 3,355 MWh. Savukārt siltuma zudumi aprēķinātajam darba režīmam veidoja 0,43 MWh.

- Algoritmā ietverta SA pieejamība un apkalpošanas izmaksas. Šī daļa ir nebūtiska pret kopējiem darbības izdevumiem, bet ļoti ietekmē ražošanas plānošanu, ja pastāv atteikumu riski. Aktīvu pārvaldības sistēmas ieviešana uzņēmumā palīdz pat piecas reizes samazināt avārijas iekārtu remontiem patērēto laiku. Vairāk palielinot preventīvos pasākumus un diagnostiku, iespējams krietni paaugstināt iekārtu un kopējo sistēmu pieejamību.

8. PIELIKUMI

1. Pielikums



SIA „Gren Latvija“

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Siltumenerģētisko sistēmu katedras doktorantam
Varim Žentiņam

Jelgavā,
2022. gada 16. februārī Nr.1-1/18

ATZINUMS

Par promocijas darbu “Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem”.

Apliecinām, ka Vara Žentiņa promocijas darbā “Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem” veiktie pētījumi ir nozīmīgi, novērtējot siltuma akumulācijas elementa darbības parametru ietekmi un iekļaujot to izstrādātajā lēmuma pieņemšanas algoritmā. Promocijas darbā iegūtie rezultāti ir izmantojami gan projektējot jaunus objektus, gan uzlabojot esošo objektu ražošanas plānošanas procesu. Rekomendējam turpināt tālākus pētījumus.

SIA “Gren Latvija”
Valdes loceklis



I. Kaprāns

SABIEDRĪBA AR IEROBEŽOTU ATBILDĪBU
"JUGLAS JAUDA"

Limited Liability Company "Juglas Jauda"

Mārkalna iela 1A, Rīga, LV - 1024,
LATVIJA reģ. Nr.40003659385
tel/phone:+371 67 524043

1A Markalna street, Riga, LV-1024
LATVIA reg. No.40003659385
fax:+371 67 524044

2022.g. 15.februārī

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Siltumenerģētisko sistēmu katedras doktorantam
Varim Žentiņam

ATZINUMS

Par promocijas darbu "Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem".

Apliecinām, ka Vara Žentiņa promocijas darbā "Centralizētās siltumapgādes darbības efektivitātes paaugstināšana un fosilo kurināmo aizstāšana ar alternatīviem enerģijas avotiem" veiktie pētījumi ir nozīmīgi un izmantojami reālajā darbā. Praktiski ieviešot lēmuma pieņemšanas algoritmu var uzlabot siltumenerģijas ražošanas procesu, kā arī atvieglot investīciju lēmumu pieņemšanu attiecībā uz jaunu tehnoloģiju ieviešanu un efektivitātes paaugstināšanu. Rekomendējam turpināt iesāktos pētījumus.

SIA "Juglas Jauda" valdes loceklis
Edvīns Boriņš



Jelgavas pilsētas pašvaldības administrācijas Būvvalde

Reģistrācijas Nr. 90000042516, Lielā iela 11, Jelgava, LV-3001
tālrunis: 63005576; 63005566, fakss: 63029059, e-pasts: buvvalde@dome.jelgava.lv,
http://www.jelgava.lv

Akts par būves pieņemšanu ekspluatācijā Kods 19043410090000 (19 00099 0090 000)

Par objekta Siltumenerģijas akumulācijas iekārta Rūpniecības ielā 73A, Jelgavā (Siltumtīklu ūdens rezervuārs (fosilā kurināmā siltumavota aizstāšana palietot no atjaunojamiem energoresursiem ražotās siltumenerģijas īpatsvaru Jelgavas centralizētajā siltumapgādē) Rūpniecības ielā 73A, Jelgavā) pieņemšanu ekspluatācijā.

Jelgava

01.11.2019.

Būvniecības ierosinātais **SIA "Fortum Latvia", 40103854352, Rūpniecības iela 73A, Jelgava, LV-3008**
(Pasūtītājs):

1. Pieņemšanas darbu veic būvvalde:

- 1.1. Būvinspektors **Dainis Petzāls**
- 1.2. Būvvaldes vadītājas – **Zeltīte Bīmane**
galvenās arhitektes
vietniece

2. Pieņemšanas darbā pieaicinātie:

- 2.1. būvuzraugs **5-01680, Antons Basajs**
- 2.2. būvuzraugs **3370-R, A/S "Inspecta Latvia", 40003130421, Skanstes iela 54A, Rīga, LV-1013, 67607900, latvia@kiwa.com**
- 2.3. būvdarbu veicējs **11029-R, SIA "Industry Service Partner", 40003635527, Zemeņu iela 74, Jūrmala, LV-2008, 67798008, info@ispartner.lv**
- 2.4. būvdarbu vadītājs **4-00504, Varis Žentiņš**

3. Būvvalde iepazīnās ar:

- 3.1. tās rīcībā nodotu būvprojektu
- 3.2. būvdarbu izpildi un būvdarbu izpildes dokumentāciju
- 3.2.1. būvdarbu žurnālu Nr. 092741
- 3.2.2. nozīmīgo konstrukciju un segto darbu pieņemšanas aktus 1 sējumā uz 63 lapām
- 3.2.3. būvuzrauga pārskatu par būvuzraudzības plāna izpildi uz 30 lapām

4. Būvvalde izvērtēja:

- 4.1. būvniecības ierosinātāja apliecinājumu: Apliecinājums par inženierbūves gatavību

Lietas numurs: BIS-28023-937 (J1715)

Dokumenta numurs: 19043410090000 (19 00099 0090 000)

1.lpp no 4 lpp



LATVIJAS SILTUMA, GĀZES UN ŪDENS TEHNOLOĢIJAS
INŽENIERU SAVIENĪBAS BŪVNICĪBAS SPECIĀLISTU
SERTIFICĒŠANAS CENTRA

BŪVPRAKSES SERTIFIKĀTS

VARIS ŽENTIŅŠ

010987-12852

Saskaņā ar LSGŪTIS būvniecības speciālistu sertificēšanas centra 2016. gada 19. decembrā lēmumu Nr. 0426/16/SF tiek aktualizēta informācija Būvniecības informācijas sistēmā, reģistrējot Vara Žentiņa p.k.010987-12852 būvprakses sertifikātu:

Nr.4-00504

Sfēras Nr.23-50-00626-siltumapgādes, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu būvdarbu vadīšana.

Savā darbībā sertifikāta saņēmējs apņemas ievērot Latvijas Republikas likumus un pastāvošos būvniecības normatīvus.

Ar informāciju par būvspeciālistu reģistrā iekļautajām ziņām var iepazīties BIS tīmekļa vietnē https://bis.gov.lv/bisp/lv/specialist_certificates.

Būvprakses sertifikāts izsniegts bez termiņa ierobežojuma.

LSGŪTIS BS SC vadītājs

D.Ģēģers

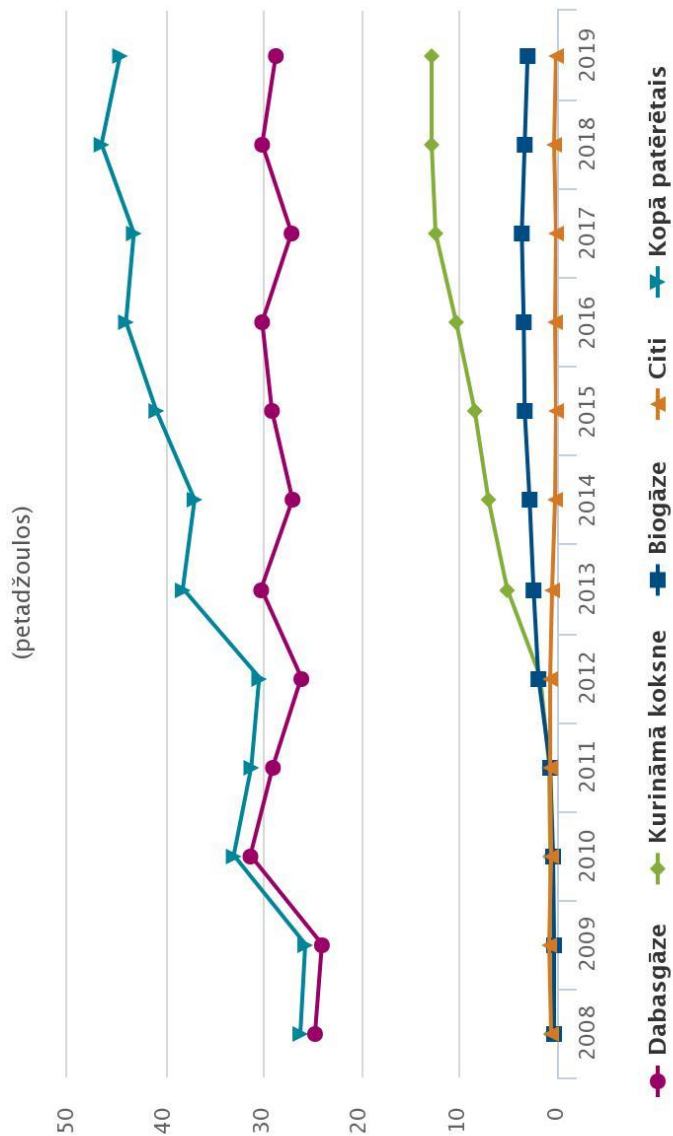


Jelgavas pilsētas siltumenerģijas parametri

	<i>Turpgaitas temperatūra uz SP (°C)</i>	<i>Atgaitas temperatūra no SP (°C)</i>
-20	105	65
-18	100	63
-16	96	62
-14	92	60
-12	89	58
-10	86	56
-8	83	54
-6	80	52
-4	77	50
-2	74	48
0	71	47
2	70	46
4	69	45
6	68	44
8	68	42
10	68	41

Pieļaujamās temperatūras novirzes no grafika $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Koģenerācijas stacijās patērētais kurināmais

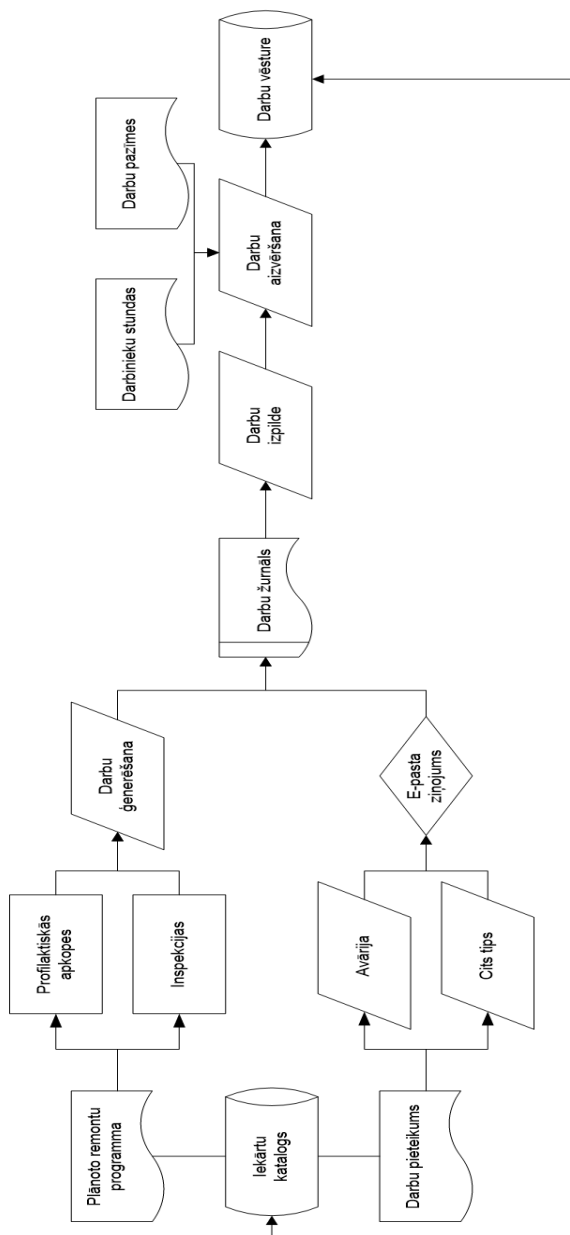


7.Pielikums

Siltuma akumulatora iekārtu apkopes grafiks

N.p.k.	APKALPOŠANA nosaukums	1 reize ceturksnī	1 reize pusgadā	1 reize gadā
1	SILTUMA AKUMULATORS			
1.1	Tvertnes apsekošana, vizuālā pārbaude			x
1.2	Drošības vārsti vakumam un pārsiediena vārsts, darbības pārbaude			x
2	SLĀPEKĻA SISTĒMA			
2.1	Slāpekļa ģeneratora apkope pēc ražotāja instrukcijas			x
2.2	Rokas vārstu, aizbīdņu vizuālā pārbaude, darbības pārbaude (atvērts-aizvērts), defektācija un "štoka" iesmērēšana			x
2.3	Regulatori, darbības pārbaude, vizuālā pārbaude			x
3	MĒRIEKĀRTAS			
3.1	Plūsmas mērītāju, devēju pārbaude, (manometri, termometri, līmeņa) darbības pārbaude			x
3.2	Rādoši termometri, manometri kalibrēšana, verificēšana			x
4	TĪKĻA ŪDENS SISTĒMA			
4.1	Recirkulācijas sūknis			
4.1.1	Centrējuma pārbaude, vizuāla pārbaude, konstrukciju vizuāla pārbaude (plaisas)			x
4.1.2	Darbības pārbaude pilnā diapazonā, vibrāciju datu analīze par nostrādāto periodu	x		
4.1.3	Elektrodzinēja un barojošā kabeļa elektriskie mērījumi (meģerēšana) kontaktu pievilksana			x
4.2	Sūknis Nr.1			
4.2.1	Centrējuma pārbaude, vizuāla pārbaude, konstrukciju vizuāla pārbaude (plaisas)			x
4.2.2	Darbības pārbaude pilnā diapazonā, vibrāciju datu analīze par nostrādāto periodu	x		
4.2.3	Elektrodzinēja un barojošā kabeļa elektriskie mērījumi (meģerēšana) kontaktu pievilksana			x
4.3	Sūknis Nr.2			
4.3.1	Centrējuma pārbaude, vizuāla pārbaude, konstrukciju vizuāla pārbaude (plaisas)			x
4.3.2	Darbības pārbaude pilnā diapazonā, vibrāciju datu analīze par nostrādāto periodu	x		
4.3.3	Elektrodzinēja un barojošā kabeļa elektriskie mērījumi (meģerēšana) kontaktu pievilksana			x
4.4	Sūknis Nr.3			
4.4.1	Centrējuma pārbaude, vizuāla pārbaude, konstrukciju vizuāla pārbaude (plaisas)			x
4.4.2	Darbības pārbaude pilnā diapazonā, vibrāciju datu analīze par nostrādāto periodu	x		
4.4.3	Elektrodzinēja un barojošā kabeļa elektriskie mērījumi (meģerēšana) kontaktu pievilksana			x
4.5	Sūkņu- 4 gab apkope pēc ražotāja instrukcijām			x
4.6	Caurulvadu vizuālā pārbaude uz neblīvumu, stiprinājumu vizuālā pārbaude			x
4.7	Rokas vārstu, aizbīdņu vizuālā pārbaude, darbības pārbaude (atvērts-aizvērts), defektācija un "štoka" iesmērēšana			x
4.8	Elektrificēto aizbīdņu vizuālā pārbaude, darbības pārbaude (atvērts-aizvērts), defektācija un "štoka" iesmērēšana, elektrisko kontaktu pievilksana			x
4.9	Regulatora darbības pārbaude (pa % pozīcijām 0-100%), vizuālā pārbaude, defektācija			x
4.10	Sieta filtru atvēršana, tīrīšana			x
4.11	Automātiskais atgaisotājs ar noslēgkrānu R1/2" darbības pārbaude			x
5	AUTOMATIZĀCIJAS UN VADĪBAS SISTĒMA			
5.1	Galveno AVS sadalnes apkope (tīrīšana, kontaktu pievilksana), programmatūras, iestatījumu un SCADA pārbaude, termogrāfija, barojošā kabeļa elektriskie mērījumi			x
5.2	Frekvenču pārveidotāju apkope pēc ražotāja instrukcijām			x
6	AKTĪVU PĀRVALDĪBAS SISTĒMA			
6.1	Apkopes plāna sagatavošana, aktīvu pārvaldības sistēmas ieviešana, uzturēšana			x
		x4	x2	x1
Apkope gadā				

Iekārtu uzturēšanas algoritms *Infior* sistēmā



Objektam Y siltuma akumulatora siltuma zudumu aprēķinu vērtības pukst. 07:00

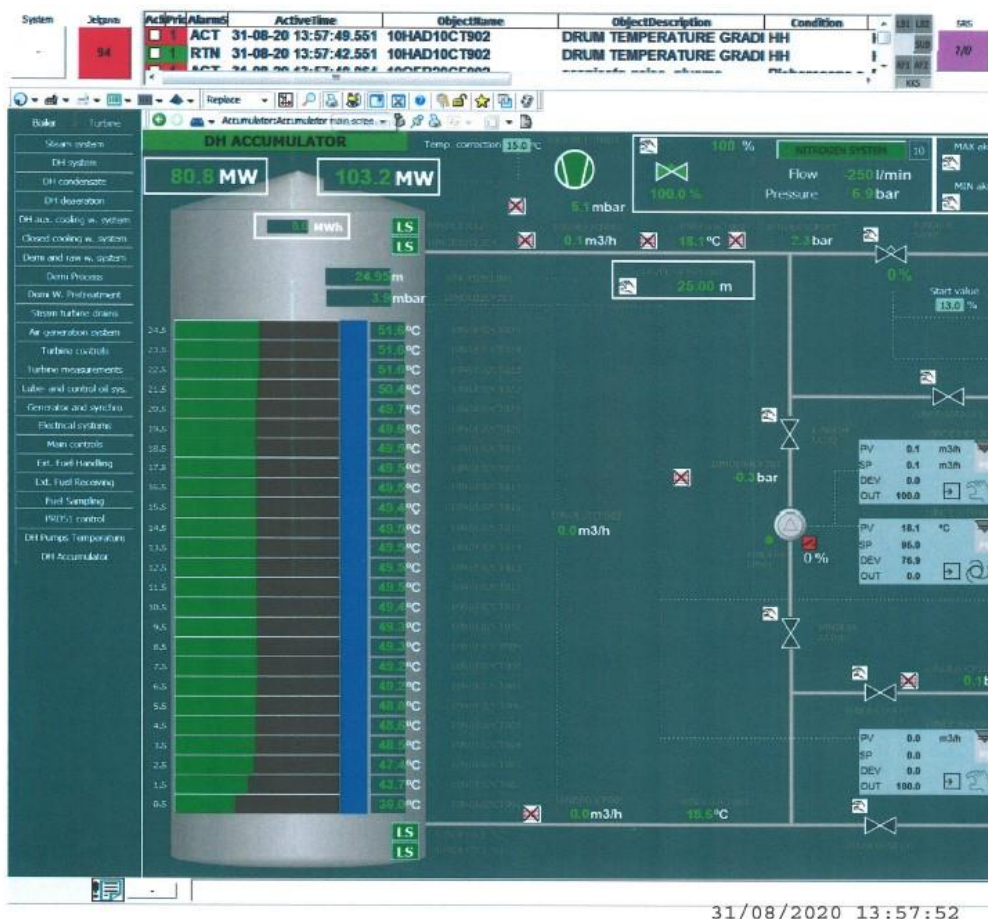
Konstrukcijas nosaukums	Apzīmējums	Konstrukcijas specifikācija	Norobežotās konstrukcijas laukums, m ²	Norobežotās konstrukcijas izmēri biezums, m	Siltuma materiāla siltumvadītspējas koeficients, W/(m·K)	Siltumvadītspējas koeficientu noteikšana R (W/(m ² ·K))	k=1/R siltumapgādes koeficients (W/(m ² ·K))	Ārējais temp. C/ grāds	Temperatūras starpība (starp iekšu un āru) C	Q=F·U·(t _{ie} -t _{āru}) ⁿ (W)	Norobežotās konstrukcijas siltuma zudumi, kW
Rezervuāra jumts		Brīvā konvekcija ūdens		—	486,70	0,0020547					
	1	tērauds S355 J2H	220,96	0,006	50	0,00012					
	2	Krāsa (polimēra bāze)	220,96	0,0002	0,2	0,001					
	3	PAROC ROS 30	220,96	0,3	0,036	8,3333333					
	4	PAROC ROB80	220,96	0,02	0,038	0,5263158					
	5	Apšuvuma skārds	220,96	0,0006	14,4	4,167E-05					
		Brīvā konvekcija gaiss		1	6,18	0,1618123					
		Kopā:				9,024678	0,110807281	0	75	1836,298	1,836
Rezervuāra sienas karstais slānis		konvekcija		—	542,48	0,0018434					
	1	tērauds S355 J2H	100,48	0,08	50	0,0016					
	2	Krāsa (polimēra bāze)	100,48	0,002	0,2	0,01					
	3	PAROC ROS 30	100,48	0,3	0,036	8,3333333					
	4	PAROC WAB 10t	100,48	0,02	0,036	0,5555556					
	5	Apšuvuma skārds	100,48	0,0006	14,4	4,167E-05					
		Brīvā konvekcija gaiss		1	7,5	0,1333333					
		Kopā:				9,035707	0,110672023	0	75,00	834,024	0,834
Rezervuāra sienas termoķīlis (sajaukusies)		konvekcija		—	471,41	0,0021213					
	1	tērauds S355 J2H	50,24	0,08	50	0,0016					
	2	Krāsa (polimēra bāze)	50,24	0,002	0,2	0,01					
	3	PAROC ROS 30	50,24	0,3	0,036	8,3333333					
	4	PAROC WAB 10t	50,24	0,02	0,036	0,5555556					
	5	Apšuvuma skārds	50,24	0,0006	14,4	4,167E-05					
		Brīvā konvekcija gaiss		1	7,5	0,1333333					
		Kopā:				9,035985	0,110668619	0	60,00	333,599	0,334
Rezervuāra sienas aukstais slānis		konvekcija		—	456,11	0,0021925					
	1	tērauds S355 J2H	1105,28	0,08	50	0,0016					
	2	Krāsa (polimēra bāze)	1105,28	0,002	0,2	0,01					
	3	PAROC ROS 30	1105,28	0,3	0,036	8,3333333					
	4	PAROC WAB 10t	1105,28	0,02	0,036	0,5555556					
	5	Apšuvuma skārds	1105,28	0,0006	14,4	4,167E-05					
		konvekcija		1	7,5	0,1333333					
		Kopā:				9,036056	0,110667747	0	47,00	5748,986	5,749

10.pielikums

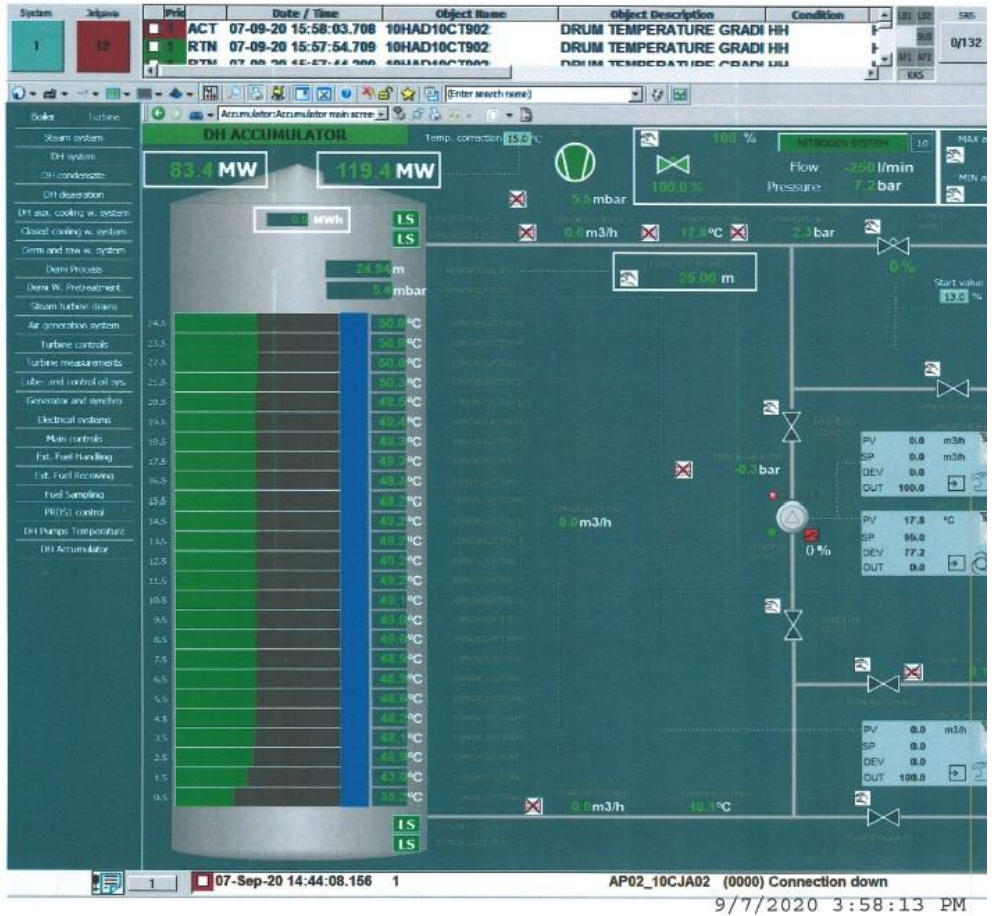
Objektam Y apkopoties siltuma zudumi darba režīmam katram slānim 24 stundu ciklam

Laiks	Gaisa temp, C	karstais slāņa augstums, m	aukstā slāņa augstums, m	Laukums karstajam slānim, m2	Laukums aukstajam slānim, m2	Karstais slānis zudumi, kwh	Aukstais slānis, kwh	Sajaukšanās slāņa zudumi, kwh	Jumta zudumi, kwh	Apakša zudumi, kwh	Kopā, kwh
07:00	0	2	22	100,48	1105,28	0,834	5,749	0,334	1,830	2,791	11,538
08:00	0	4	20	200,96	1004,8	1,668	5,226	0,334	1,830	2,791	11,850
09:00	0	6	18	301,44	904,32	2,502	4,704	0,334	1,830	2,791	12,161
10:00	0	8	16	401,92	803,84	3,336	4,181	0,334	1,830	2,791	12,473
11:00	0	10	14	502,4	703,36	4,170	3,658	0,334	1,830	2,791	12,784
12:00	0	12	12	602,88	602,88	5,004	3,136	0,334	1,830	2,791	13,095
13:00	0	14	10	703,36	502,4	5,838	2,613	0,334	1,830	2,791	13,407
14:00	0	16	8	803,84	401,92	6,672	2,091	0,334	1,830	2,791	13,718
15:00	0	18	6	904,32	301,44	7,506	1,568	0,334	1,830	2,791	14,029
16:00	0	20	4	1004,8	200,96	8,340	1,045	0,334	1,830	2,791	14,341
17:00	0	22	2	1105,28	100,48	9,174	0,523	0,334	1,830	2,791	14,652
18:00	0	23	1	1155,52	50,24	9,591	0,261	0,334	1,830	2,791	14,808
19:00	0	22	2	1105,28	100,48	9,174	0,523	0,334	1,830	2,791	14,652
20:00	0	20	4	1004,8	200,96	8,340	1,045	0,334	1,830	2,791	14,341
21:00	0	18	6	904,32	301,44	7,506	1,568	0,334	1,830	2,791	14,029
22:00	0	16	8	803,84	401,92	6,672	2,091	0,334	1,830	2,791	13,718
23:00	0	14	10	703,36	502,4	5,838	2,613	0,334	1,830	2,791	13,407
00:00	0	12	12	602,88	602,88	5,004	3,136	0,334	1,830	2,791	13,095
01:00	0	10	14	502,4	703,36	4,170	3,658	0,334	1,830	2,791	12,784
02:00	0	8	16	401,92	803,84	3,336	4,181	0,334	1,830	2,791	12,473
03:00	0	6	18	301,44	904,32	2,502	4,704	0,334	1,830	2,791	12,161
04:00	0	4	20	200,96	1004,8	1,668	5,226	0,334	1,830	2,791	11,850
05:00	0	2	22	100,48	1105,28	0,834	5,749	0,334	1,830	2,791	11,538
06:00	0	1	23	50,24	1155,52	0,417	6,010	0,334	1,830	2,791	11,383
										Kopā:	314,29

Siltuma akumulatora ūdens temperatūras eksperimenta sākumā 31.08.2020.



Siltuma akumulatora ūdens temperatūras eksperimenta beigās 07.09.2020.



Kalibrēšanas sertifikāts **Endress+Hauser** TR88 Modulārajam RTD termometeram

Endress+Hauser Sisetterm
Via Martin Luther King 7
20060 Pessano con Bernago Italy
Tel.: +39 02 959 941
Fax.: +39 02 959 944 05
www.endress.com

Endress+Hauser 
People for Process Automation

Factory Calibration Certificate

Certificate-No.: P504DF14158
Revision: 1
Date of issue: 29/05/19
E+H Order No.: 8/3009299281/1021350957 3001879253-0020
Description of the Test Unit: TR88-AB1E3X24T0B0 / TMT180 / (0...110°C)
S.N.: P504DF14158 / P50920143E5 / P508C714202

Standards used

Description of the standard	ID-number of the standard	Certificate number
Digital multimeter	01-SM-04	UKAS 1-10648801589-1B
Reference thermometer	78-00055	LAT 078 180357-1

Procedure of calibration/Measurement and ambient conditions

Procedure-No.: QPA-9805
Immersion depth used for calibration: 250mm

The temperature values are according to the ITS-90.

The calibrations at 0°C were made at the melting ice-point.

At all others temperatures comparison calibrations were carried out inside an homogeneous temperature field, using a liquid stirred bath between -80°C < t < 500°C. The measurement between 500°C < t < 650°C were made in electric furnace by comparison.

All measurements have been made in ambient controlled at 23°C ± 2 and R.H. 20%...80%.

On the thermometers with replaceable inset the calibration is made without thermowell.

Measurement results

Nominal calibration point	Standard reference temperature	Measured output	Temperature value	Deviation	Measurements uncertainties	Max. allowed deviation
(°C)	(°C)	(mA)	(°C)	(K)	(±K)	(±K)
0	0,00	4,005	0,03	0,03	0,10	0,35
100	100,02	18,566	100,14	0,13	0,13	0,55

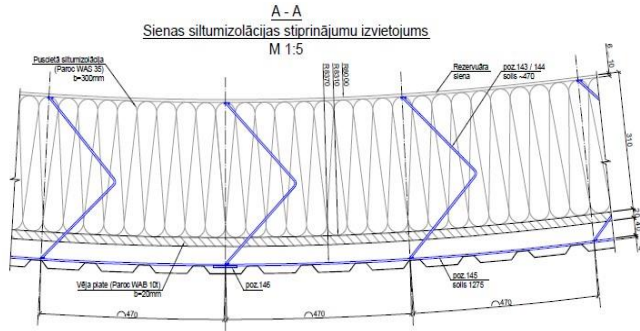
The manufacturer confirms that all measuring equipment used to assure the quality of the products has been calibrated and is traceable to national and international standards.

The measurements uncertainty were estimated at twice the standard deviation.

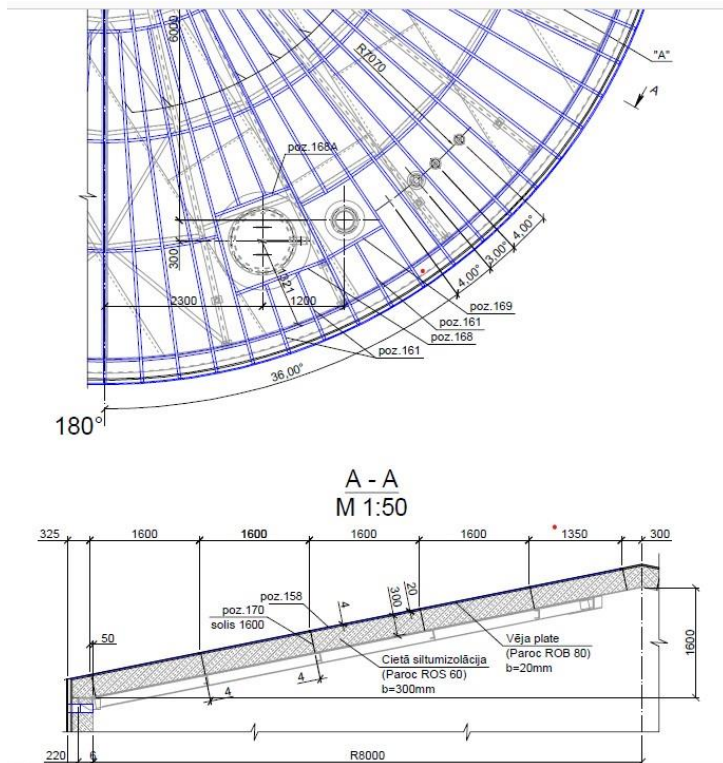
Pessano, 29/05/19 D.Scotti

This certificate is generated electronically and is also valid without signature.

Eksperimenta laikā izmantotā siltuma akumulatora siltumizolācijas konstrukcijas un griezumi



SIA "Fortum Latvia" siltuma akumulatora jumta konstrukcijas un siltumizolācija



IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. *Enerģētikas likums* (1998) [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 1998. gada 3. septembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018. gada 1. martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=49833>.
2. *Likums par Latvijas Nacionālo enerģētikas un klimata plānu 2021.-2030. gadam.* (2020) [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 2020. gada 4. februārī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018.g. 1.martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/312423-par-latvijas-nacionalo-energetikas-un-klimata-planu-20212030-gadam>.
3. *Parīzes nolīgums – ANO Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām* [tiešsaiste]. Brisele, ratificēts ES 2016. gada 5. Oktobrī, Oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2018.g. 1. martā]. Pieejams: <https://eur-lex.europa.eu/content/paris-agreement/paris-agreement.html?locale=lv>
4. *Klimata un enerģētikas satvars laikposmam līdz 2030. Gadam* [tiešsaiste]. Brisele, pieņemts ES 2014. gada 23. Oktobrī, oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2020. 1. Novembrī]. Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/lv/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>.
5. *Likums par Par Apvienoto Nāciju Organizācijas Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām* [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 1995. gada 3. septembrī, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2018.g. 1.martā]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/34198-par-apvienotaj-organizacijas-visparejo-konvenciju-par-klimata-parmainam>.
6. *Eiropas zaļais kurss un pakete "Gatavi mērķrādītājam 55 %"* [tiešsaiste]. Brisele, pieņemts ES Vides padomē 2022. gada 17. martā, Oficiāla Eiropas Savienības tīmekļa vietne [skatīts 2022. 18. Martā]. Pieejams: <https://www.consilium.europa.eu/lv/policies/green-deal/timeline-european-green-deal-and-fit-for-55/>.
7. *Metroloģisko novērojuma dati* [tiešsaiste]. Rīga, 2018. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra tīmekļa vietne videscentrs.lv/gmc.lv [skatīts 2018.g. 1.martā]. Pieejams: <https://www.meteo.lv/meteorologija-datu-meklesana/?nid=461>.
8. *Elektroenerģijas cenas biržā* [Tiešsaiste]. Ziemeļu un Baltijas reģions Nord pool birža, 2021 [skatīts 2021. 1. Decembrī]. Pieejams: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>
9. Henrik L., Østergaard P. A., Connolly D., Ridjan I., Mathiesen B. V, Hvelplund F., Thellufsen J. Z., Sorknæs P. Energy Storage and Smart Energy Systems. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2016.11.211: 3–14. doi:10.5278/ijsepm..
10. H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. Thorsen, F. Hvelplund un M. B.V, 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating Smart Thermal Grids Into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*. 2014; 68: 1–11.
11. Buffaa S., Cozzinia M., D'Antonia M., Baratierib M., Fedrizzia R., 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Elsevier*. 2019, vol.104(C), pp.504-522.
12. Bertelsen N., Petersen U. R. Thermal Energy Storage in Greater Copenhagen. Master's Thesis MSc in Engineering Sustainable Cities Department of Planning. Denmark, University Copenhagen, 2017.
13. Pinel P., Cynthia A. Cruickshank, Ian Beausoleil-Morrison, Adam Wills. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications;

14. Hou J., Che D., Liu Y., Jiang Q. A new system of Absorption Heat Pump Vs. Boiler for recovering Heat and water Vapor in Flue gas. *Energy Procedia*. 2018, vol. 152, pp. 1266-1271.
15. Che D, Liu Y, Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas-fired boiler into a condensing boiler. *Energy Convers Manage*. 2004, vol. 45, pp. 3251-3263.
16. Westerlund L., Hermanson R., Fagerström J. Flue gas purification and heat recovery: A biomass fired boiler supplied with an open absorption system. *Applied Energy*. 2012, vol. 96, pp. 444-450.
17. Yang B., Jiang Y., Fu L., Zhang S. Conjugate heat and mass transfer study of a new open-cycle absorption heat pump applied to total heat recovery of flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 138, pp. 888-899.
18. Yang B., Yuan W., Fu L., Zhang S., Wei M., Guo D. Techno-economic study of full-open absorption heat pump applied to flue gas total heat recovery. *Energy*. 2020, vol. 190, 116429
19. Sauhats, A., Dolgicers, A., Kozadajevs, J., Zālītis, I., Boreiko, D. The Impact of the District Heating System Thermal Inertia on the CHPP Operation Mode. In: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Conference Materials, Latvia, Riga, 7-9 October, 2019*. Piscataway: IEEE, 2019, pp.225-229. ISBN 978-1-7281-3943-2 .
20. Sauhats A., Kozadajevs J., Dolgicers A., Zālītis I., Boreiko D. Thermal Energy Storage for CHP in Power Market Conditions. *16th European Energy Market Conference*. 2019. September, (EEM 2019), Slovenia, Ljubljana, 18-20 .
21. Rusovs D., Zentins V. Steam driven absorption heat pump and flue gas condenser applied for heat recovery in district heating network. *19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2020, Jelgava.*, pp.1627-1632. ISSN 1691-5976
22. Soročins, A., Rusovs, D., Nagla, J., Žentiņš, V. The Influence of the Thermal Storage on the Electricity Production in a Co-Generation in Peak and Off-Peak Time Range. *2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*: 5-6 2020. November, Riga, Piscataway: IEEE, 2020, pp.136-139. ISBN 978-1-7281-9511-7.
23. Kavvadias K. Jimenez Navarro J.P., Zucker A., Quoilin S. Case study on the impact of cogeneration and thermal storage on the flexibility of the power system.: *Joint Research Centre*. 2017. Tech. rep. Luxembourg doi: 10.2760/814708.
24. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, CO2 emisiju no kurināmā stacionārās sadedzināšanas aprēķinu metodika, Rīga, 2020. gada janvāris
25. Cimdira G., Blumberga D., Veidenbergs I. Analysis of wood fuel CHP operational experience, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies – CONECT 2014, *Energy Procedia* 72 (2015) 263 – 269, Riga
26. *Akumulatora izbūve* [tiešsaiste]. Jelgava, 28.02.2019. [skatīts 2020.g. 1.novembrī] Pieejams: <https://www.jelgava.lv/jaunumi/zinu-arhivs/siltumapgades-uznemums-fortum-jelgava-buve-siltumenerģijas-akumulatoru/>.
27. Raikar V.A., Naik G., Naik P., A Simulation Model for Overall Equipment Effectiveness of a Generic Production Line. *OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2015 Sep. - Oct., e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 12, Issue 5 Ver. III PP 52-63.

28. Neilands R., Šaršuns N., Automatic monitoring and control system, Wastewater treatment process supervision in Riga city. SIA "Industry Service Partner" prezentācija. Rīga, 2020. October 1.
29. Nagla J., Saveljevs A., Ciemins R., Siltumtehnikas pamati, Rīga "Zvaigzne" 1981.
30. Žentiņš V., Rusovs D., Soročins A., Cars A., Analysis of different thermal insulation solutions of a heat storage. *Riga Technical University 62nd International Scientific Conference*. 2021. Gada 15. Oktobrī, p.5, ISBN 978-9934-22-756-1.
31. Ekonomikas ministrija, Metodiskie norādījumi Latvijas būvnormatīva LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika” izpildei, Rīga, 2005.
32. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ISBN: 9781118137253.
33. U.S. Department of Energy, Thermodynamics, Heat Transfer and Fluid Flow. DOE Fundamentals Handbook, Volume 2 of 3. May 2016.
34. European Committee for Standardization, Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, LVS EN ISO 14683:2008, 2007.
35. Baltputnis, K., Petričenko, R., Soboļevskis, D. Heating Demand Forecasting with Multiple Regression: Model Setup and Case Study. No: 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, *Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2018)*, Lietuva, Vilnius, 8.-10. novembris, 2018. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, 91.-95.lpp. ISBN 978-1-7281-2000-3Lithuania
36. Rusovs, D., Jakovļeva, L., Žentiņš, V., Baltputnis, K. Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, Vol. 58, No. 3, 121.-136. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2021-0021.
37. Blumberga, D., Blumberga, A., Vitolins, V. *Energy audits in dwelling buildings in Latvia. Data analysis*. [skatīts 2020. 20. Decembrī]. Rīga, 2005. Pieejams: <https://docplayer.net/18489666-Energy-audits-in-dwelling-buildings-in-latvia-data-analysis.html>
38. Talcis, N., Dzelzītis, E., Līckrastiņa, A.. Return Temperature in DH as Key Parameter for Energy. *International Journal of Modern Engineering Research*. (2018) 8 (7), pp.88 – 92.
39. Ivanova P. Termoelektrocetrāļu elastīguma un efektivitātes palielināšana mainīgos darbības apstākļos. *Promocijas darba kopsavilkums*. Rīgas Tehniskā universitāte izdevniecība 2018.
40. Dvorák M, Havel P, Combined heat and power production planning under liberalized market conditions Applied Thermal Engineering Volume 43, October 2012, pp. 163-173.
41. Lam L. H., Valentin I., Bovo C., European day-ahead electricity market coupling: Discussion, modeling, and case study. *Electric Power Systems Research*. 2018. February .
42. 2019. gadā elektroenerģijas ražošanas līmenis koģenerācijas stacijās saglabājās nemainīgi augsts [tiešsaiste]. LR Centrālā statistikas pārvalde 19.05.2020 [skatīts 2020. 20. Decembrī]. Pieejams: <https://www.csb.gov.lv/lv/statistika/statistikas-temas/vide-energetika/energetika/meklet-tema/2685-koģenerācijas-staciju-darbība-2019-gada>.
43. Šogad atbalstu zaudējušas 10 OIK elektrostacijas; valsts ietaupījusi 14,63 milj. EUR [Tiešsaiste]. LR Ekonomikas Ministrija, preses relīze 16.07.2020. [skatīts 2020. 20. Decembrī] Pieejams: <https://www.em.gov.lv/lv/sogad-atbalstu-zaudejusas-10-oik-elektrostacijas-valsts-ietauptijusi-1463-milj-eur>.

44. Valdība lemj par tālākajiem soļiem OIK samazināšanai [Tiešsaiste]. LR Ekonomikas ministrija preses relīze 22.09.2020. [skatīts 2020. 21. Novembrī] Pieejams: <https://www.mk.gov.lv/lv/aktualitates/valdiba-lemj-par-talakajiem-solciem-oik-samazinasanai>
45. Zymelka P., Szega M., Short-term scheduling of gas-fired CHP plant with thermal storage using optimization algorithm and forecasting models. *Energy Conversion and Management*. 2021 March Volume 231, 1, 113860.
46. Mitra S., Sun L., E. Grossmann I., Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices. *Energy*. 2013 June, Volume 54, 1 pp.194-211.
47. Atānāsoae P., The Operating Strategies of Small-Scale Combined Heat and Power Plants in Liberalized Power Markets. *Energies*. 2018. 11, pp 3110; doi:10.3390/en11113110.
48. CUI H., SONG K., DOU W., NAN Z., WANG Z., ZHANG N., Bidding Strategy of a Flexible CHP Plant for Participating in the Day-Ahead Energy and Downregulation Service Market. *Journal IEEE ACCESS*. 2021. 1. Oktober. November, pp. 49647 – 149656, ISSN: 2169-3536DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116981.
49. Kumbartzky N., Schacht M., Schulz K., Werners B., Optimal operation of a CHP plant participating in the German electricity balancing and day-ahead spot market. *European Journal of Operational Research*. Volume 261, Issue 1, 16 August 2017, pp. 390-404.
50. Schledorn A., Guericke D., Andersen A. N., Madsen H., Optimising block bids of district heating operators to the day-ahead electricity market using stochastic programming, *Smart Energy*. 2021. February Volume 1, , 100004.
51. Koch K., Alt B., Gaderer M., Dynamic Modeling of a Decarbonized District Heating System with CHP Plants in Electricity-Based Mode of Operation. *Energies*. 2020, 13, 4134; doi:10.3390/en13164134.
52. Fang T., Lahdelma R., Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method, *Applied Energy*. 2016, 15 January, Volume 162, pp. 723-732.
53. Al-Mansoura F., Kožuh M., Risk analysis for CHP decision making within the conditions of an open electricity market. *Energy*. (2007) 32 1905–1916.
54. Zheng P., Liu P., Zhang Y., Economic Assessment and Control Strategy of Combined Heat and Power Employed in Centralized Domestic Hot Water Systems, *Appl. Sci*. 2021, 11(10), 4326.
55. Fan J., Furbo S., Thermal stratification in a hot water tank established by heat loss from the tank. *Renewable Energy Shaping Our Future Proceedings of the ISES Solar world congress Johannesburg, South Africa*. 2009. pp. 341-350 ISBN 978-1-920017-42-2 .
56. Haller M.Y., Yazdanshenas E., Andersen E., Wolfgang Streicher C. B., Furbo S., A method to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes independently from storage heat losses. *Solar Energy*. 2010. ISSN 0038-092X, E-ISSN 1471-1257, Vol. 84, no 6, p. 997-1007.
57. Karim A., Burnett A., Fawzia S. Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Performance for Heating and Cooling Applications. *Energies*. 2018, Vol. 11, p. 1049.
58. Ying L; Fengzhong S., Qiannan Z., Xuehong C., Wei Y. Numerical Simulation Study on Structure Optimization and Performance Improvement of Hot Water Storage Tank in CHP System. *Energies*. 2020, Vol.13(18), p.4734.

59. Henrik L., P. A. Østergaard, D. Connolly, I Ridjan, Vad Mathiesen B., Hvelplund F., Zinck J. Sorknæs P. Energy Storage and Smart Energy Systems.” *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2016. 11: 3–14. doi:10.5278/ijsep.2016.11.2.
60. Tjardo S., Persis D., Claudio ; Tesi, Pietro Modeling and Control of Heat Networks With Storage: The Single-Producer Multiple-Consumer Case *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, March Vol.25(2), pp.414-428.
61. Likums "Par sabiedrisko pakalpojumu regulatoriem" Koģenerācijas tarifu aprēķināšanas metodika [tiešsaiste]. LR likums Rīga: pieņemts Rīgā 2011. gada 16. jūnijā, Latvijas Vēstnesis, interneta vietne Likumi.lv [skatīts 2020.g. 8.septembrī]. Pieejams: <https://likumi.lv/ta/id/211966-kogeneracijas-tarifu-aprekinasanas-metodika>.
62. Žentiņš V., Rusovs D., Soročins A., Decision Making Control Algorithm for Cogeneration Plants in Operating with the Heat Accumulator Deep Analysis Model. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly Journal* 2022, Riga No.30, ISSN: 2255-9922.
63. Klimata pārmaiņu rīks[tiešsaiste]. Rīga, 2019. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra tīmekļa vietne [skatīts 2019. 20. oktobris]. Pieejams: <https://www4.meteo.lv/klimatariks/>.
64. Latvijas klimats [tiešsaiste]. Rīga, 2019. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra tīmekļa vietne [skatīts 2019. 20. oktobris] Pieejams: <https://www.meteo.lv/lapas/laiks/latvijas-klimats/latvijas-klimats?id=1199&nid=562>.
65. 2019. gads noslēdz dekādi ar rekordaugstu siltumu, ledāju atkāpšanos un jūras līmeņa paaugstināšanos [tiešsaiste]. Rīga, 2019. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra tīmekļa vietne [skatīts 2019. 20. oktobris] Pieejams: <https://www.meteo.lv/jaunumi/laika-apstakli/2019-gads-nosledz-dekadi-ar-rekordaugstu-siltumu-ledaju-atkapsanos-un?id=2166&cid=100>.
66. Sørensen P. A. and Schmidt T. Design and Construction of Large Scale Heat Storages for District Heating in Denmark. *14th International Conference on Energy Storage* 25-28 April 2018, Adana, Turkey.
67. Karim, M.A. Experimental investigation of a stratified chilled-water thermal storage system. *Appl. Therm. Eng.* 2010, 31, p.1853–1860.
68. Njoku, H.O.; Ekechukwu, O.V.; Onyegegbu, S.O. Analysis of stratified thermal storage systems: An overview. *Heat Mass Transf.* 2014, 50, pp. 1017–1030.
69. Soročins, A., Nagla, J., Žentiņš V. District Heating Simulation Model Development to Solve Optimization Problems in the Market Conditions. *No: 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020)*, Latvija, Rīga, 5.-6. novembris, 2020, Article number 9316575. ISBN 978-1-7281-9511-7.
70. Osman, K.; Khaireed, S.M.N.A.; Ariffin, M.K.; Senawi, M.Y. Dynamic modelling of stratification for chilled water storage. *J. Energy Conserv. Manag.* 2008, 49, 3270–3273.
71. Nelson, J.E.B.; Balakrishnan, A.R.; Murthy, S.S. Experiments of stratified chilled-water tanks. *Int. J. Refrig.* 1999, 22, 216–234.
72. Karim A., Burnett A., Fawzia S. Investigation of Stratified Thermal Storage Tank Performance for Heating and Cooling Applications. *Energies* 2018, 11, 1049.
73. The world's first seasonal energy storage facility of its kind is planned for the Kruunuvuorenranta rock caverns [tiešsaiste]. Finland, Published: 30.01.2018 11:57 [skatīts 2020. 30. Janvārī],

- Pieejams: <https://www.helen.fi/en/news/2018/seasonal-energy-storage-facility-is-planned-for-the-kruunuvuorenanta-rock-caverns>.
74. N. Blomqvist; A. Wegelius; R. Schamarin. Underground Oil Caverns Conversion to Heat Storage Facility in Helsinki [tiešsaiste]. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Published: June 14 2020[skatīts 2020. 30. Janvārī]. Pieejams: <https://onepetro.org/ISRMEUROCK/proceedings-abstract/EUROCK20/All-EUROCK20/ISRM-EUROCK-2020-206/447382>.
 75. Latvijas siltumapgādes un dzesēšanas sistēmu attīstība [tiešsaiste]. Latvijas Valsts pētījumu programma, 2018. Nr. VPP-EMEE-2018/1-0002, [skatīts 2020. 20. septembrī] Pieejams: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/lv_ca_2020_lv.pdf.
 76. Kuņickis, M., Balodis, M., Linkevičs, O., Ivanova, P. Flexibility Options of Riga CHP2 Plant Operation under Conditions of Open Electricity Market. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 12 Latvia, Riga, 11–13 May 2015. Riga: Riga Technical University, 2015, pp. 548–553.
 77. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A., Juszczak A. Methodology and a Continuous Time Mathematical Model for Selecting the Optimum Capacity of a Heat Accumulator Integrated with a CHP Plant. *Energies* 2018, 11(5), 1240; <https://doi.org/10.3390/en11051240>.
 78. Balodis M., Stuklis I., Linkevičs O., Ivanova P. Siltuma akumulācijas sistēmas izveidošana Rīgas TEC-2 konkurētspējas paaugstināšanai. Rīgas enerģētikas aģentūra. REA Vēstnesis / Nr. 29 (2016.gada 1.izdevums).
 79. A. Dyrelund, S. Market Manager, Ramboll Energy 4th Generation District Energy the back bone of liveable and resilient compuses and cities. Ramboll 06-12-2017.
 80. Pakere I., Romagnoli F., Blumberga D., Introduction of Small-Scale 4th Generation District Heating System. Methodology Approach, *Energy procedia*, 2018-09, Vol.149,pp.549-554.
 81. Buffa S., Cozzinia M., D'Antonia M., Baratierib M., Fedrizzia R., 5th generation district heating and cooling systems. *A review of existing cases in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 104, April 2019, pp.504-522.
 82. Latvijas elektroenerģijas tirgus . AS "Sadales tīkls" Pārvades sistēmas operatora ikgadējais novērtējuma ziņojums par 2020. gadu, Rīga 2021.
 83. Latvijas Nacionālā standartizācijas institūcija [tiešsaiste]. Latvijas Valsts standarti oficiālā interneta vietne [skatīts 2020.19.Novembrī]. Pieejams: https://www.lvs.lv/lv/products/ics/621?ProductsSearch_page=7.
 84. Cynthia C., Harrison A, Stephen J. Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage. *Energy and buildings*. 2010, Vol.42(10), pp.1703-1710.
 85. C. Suarez , F.J. Pino b, F. Rosa b, J. Guerra Heat loss from thermal energy storage ventilated tank foundations. *Solar Energy*. Volume 122, December 2015, pp. 783-794.
 86. Bogdana Ž., Kopjarb D., Improvement of the cogeneration plant economy by using heat accumulator. *Energy*. 31 (2006) 2285–2292.
 87. Pardo P, Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., Rougé S., Cabassud M., Cognet P. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable & sustainable energy reviews*. April 2014, Vol.32, pp.591-610.

88. Pielichowska, K ; Pielichowski, K, Phase change materials for thermal energy storage. *Progress In Materials Science*, 2014 Aug, Vol.65, pp.67-123.
89. Ivanova P., Linkevics O., Cers A. The Evaluation of Feasibility of Thermal Energy Storage System at Riga TPP-2. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. - Vol.52, Nr.6 (2015), 22.-37.lpp.
90. Terhan M., Comakli K., Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas. *Applied Thermal Engineering* 100 (2016) 1007–1015
91. Zajacs A., Bogdanovics R., Borodinecs A., Analysis of low temperature lift heat pump application in a district heating system for flue gas condenser efficiency improvement. *Sustainable Cities and Society* Volume 57, June 2020.
92. Lepisaar K., Volkova A., Ruseļjuk P., Siirde A., The effect of the District Heating Return Temperature Reduction on Flue Gas Condenser Efficiency. *journal Environmental and Climate Technologies* 2020, vol. 24, no. 3, pp.
93. Oļekšijs, R., Sauhats, A., Olekshii, B. Power Plant Cooperation in District Heating Considering Open Electricity Market. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021, Vol. 58, No. 3, 66.-81.lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2021-0017
94. Bride D., Zvaigzne A., Electricity market development in Latvia, *Latgale National Economy Research*. 2016, Issue 1, pp5-19.
95. Zigurs A., Kunickis M., Balodis M., Linkevics O., Stuklis I., Ivanova P., Evaluation of Exhaust Gas Condensing Economizer Installation at Riga CHP Plants, dvanced HVAC & Natural Gas Technologies : Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 : Riga, Latvia, May 6-9.
96. Elektroenerģijas tirgus organizācija [tiešsaiste]. AS "Augstsprieguma tīkls" oficiālā vietne.2021 [skatīts 2021. 16. Februārī]. Pieejams: <https://www.ast.lv/lv/content/elektroenerģijas-tirgus-organizacija>.
97. Kocijēl L., Mrzljak V., Glažar V., Pressure drop in large volumetric heat storage tank radial plate diffuser. *Journal of Energy Storage* Volume 29, June 2020, 101350.
98. Xu C., Liu M. , Jiao S., Tang H., Yan J., Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 186, 1 May 2022, 122478.
99. Elektroenerģijas tirgus un zudumi [tiešsaiste]. United Kingdom, 2021. [skatīts 2021. 17. Februārī]. Pieejams: <https://www.westernpower.co.uk/smarter-networks/losses/what-causes-losses>
100. Latvijas elektroenerģijas tirgus . AS "Sadales tīkls" Pārvades sistēmas operatora ikgadējais novērtējuma ziņojums par 2019. gadu, Rīga 2020.
101. Survey J., Account of Losses in Electricity Sales, digest Book and Electronic Proceedings. *54th International Scientific Conference of Riga Technical University. Section of Power and Electrical Engineering*. - Riga : RTU Press, 2013.
102. Xu C., Liu M., Jiao S., Tang H., Yan J., Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022, May Volume 186, 1 122478.
103. Fertahi S., Jamil A., Benbassou A., Review on Solar Thermal Stratified Storage Tanks (STSST): Insight on stratification studies and efficiency indicators. *Solar Energy*. 2018. December, Volume 176, pp. 126-145.

103. Bouzahera M. T., Bouchahma N., Guerirab B., Bensacib C., Lebbi M. On the thermal stratification inside a spherical water storage tank during dynamic mode. *Applied Thermal Engineering*. 2019. august, Volume 159, 113821.
104. D. Petković, M. Protić, S. Shamshirband, S. Akib, M. Raos, and D. Marković, "Evaluation of the most influential parameters of heat load in district heating systems," *Energy Build.*, vol. 104, pp. 264–274, 2015.
105. Zajacs A., Promocijas darbs "CENTRALIZĒTO SILTUMAPGĀDES SISTĒMU ATTĪSTĪBAS SCENĀRIJU NOVĒRTĒJUMS», Rīga, 2017. Izdevniecība RTU.