

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Artūrs BRAHMANIS**

**NETIEŠĀ IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANA GAISA  
KONDITIONĒŠANAS SISTĒMĀS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2014**

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Būvniecības fakultāte  
Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts

**Artūrs BRAHMANIS**

Doktora studiju programmas „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

**NETIEŠĀ IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANA GAISA  
KONDITIONĒŠANAS SISTĒMĀS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr.sc. ing., profesors  
**Arturs LEŠINSKIS**

Rīga 2014

Brahmanis A. Netiešā iztvaikošanas dzesēšana gaisa kondicionēšanas sistēmās. Promocijas darba kopsavilkums. – R.: RTU Izdevniecība, 2014. – 20 lpp.

Iespiests saskaņā ar SGŪT institūta 2014. gada 16. oktobra lēmumu, protokols Nr. 9/1.



*Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».*

*This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».*

*Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».*

ISBN .....

**PROMOCIJAS DARBS**  
**IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**  
**RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. g. 24. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16/20, 250. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Dr.sc.ing., prof. Anatolijs Borodiņecs  
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr.sc.ing., Gaļina Kaškarova  
Fizikālās enerģētikas institūts

Dr.habil.sc.ing., prof. Uldis Iljins  
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Artūrs Brahmanis .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 62 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 119 lappuses. Literatūras sarakstā ir 112 nosaukumi.

## SATURS

IEVADS.....	5
1. IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANAS TEORĒTISKIE PAMATI .....	6
1.1. Iepriekšējie pētījumi .....	6
1.2. Netiešā iztvaikošanas dzesētāja fizikālo procesu apraksts .....	7
2. IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI.....	8
2.1. Eksperimentu plāns .....	8
2.2. Pētījumu metodika.....	9
2.3. Laboratorijas pētījumi .....	10
2.4. Pētījumi eksperimentālā objektā.....	14
3. DZESĒŠANAS SISTĒMU ENERĢIJAS PATĒRIŅU UN EKONOMISKIE APRĒĶINI .....	16
3.1. Sezonālas darbības efektivitātes novērtēšana.....	16
3.2. Dzesētāju tipu izvēles ekonomiskie aspekti. Atmaksāšanas termiņš. ....	18
SECINĀJUMI.....	19
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS .....	20

## IEVADS

Dzesēšanas sistēmu enerģijas patēriņš vidēji sastāda ievērojamu daļu no dzīvojamo un publisko ēku kopējā enerģijas patēriņa. Pēc Eiropas Komitejas 2009. gadā publicēta pētījuma, 27 Eiropas Savienības dalībvalstīs, dzesēšanai ventilācijas un gaisa kondicionēšanas (VK) sistēmās tika patērēts 21TWh elektroenerģijas, kas sasniedz aptuveni 11% no kopēja šo valstu elektrības patēriņa. Enerģijas patēriņš ēkās sastāda 30-40% no kopējiem enerģijas patēriņiem Eiropas valstīs, pie kā ventilācijas un gaisa kondicionēšanas (VK) segments patērē vidēji 19% no ēku kopējās enerģijas patēriņa.

Viena no metodēm enerģijas patēriņa samazināšanai gaisa kondicionēšanas procesā ir ūdens iztvaikošanas dzesēšanas pielietošana, kurā konstantas entalpijas procesā iztvaikojošais ūdens dzesē siltumapmaiņas virsmu.

Vēsturiski šis dzesēšanas paņēmiens visplašāk tiek pielietots kārstajos, sausajos reģionos, kur zemā āra gaisa mitruma apstākļos ūdens iztvaikošana sniedz vislielāko dzesēšanas efektivitāti. Tomēr, līdz ar gaisa kondicionēšanas nozares attīstību, un „augstās temperatūras” dzesēšanas straujo izplatīšanu, šis dzesēšanas veids kļūst arvien ekonomiski pievilcīgāks pielietošanai arī mitrāka, mērena klimata apstākļos. Sausā un mitrā termometra mazās temperatūru starpības dēļ, iztvaikošanas dzesēšana atsevišķi, „tīrā” veidā nespēj nodrošināt komfortablu vidi visas dzesēšanas sezonas garumā. Tāpēc VK sistēmās daudzviet pasaulē arvien populārāka kļūst kombinēta kompresijas cikla un iztvaikošanas dzesētāju pielietošana. Piemēram, ūdens izsmidzināšana uz freona kondensatora virsmas ievērojami, līdz 10-15%, paaugstina dzesētāja efektivitāti.

Latvijas būvniecības nozarē VK sistēmās iztvaikošanas dzesēšana tiek izmantota diezgan reti. Tas var būt skaidrojams ar projektētāju un citu nozares speciālistu skeptisku attieksmi pret šī dzesēšanas veida efektivitāti, samērā nelielu tirgū pārstāvētu ražotāju skaitu, kā arī ar lielākiem kapitālieguldījumiem, kas ir nepieciešami ar iztvaikošanas dzesēšanas ciklu kombinētu dzesēšanas iekārtu iegādei.

Promocijas darba mērķis ir noteikt netiešās iztvaikošanas ūdens dzesēšanas sistēmu pielietošanas tehniski - ekonomiskus aspektus mērenā Latvijas klimatā, izvērtējot tās enerģijas patēriņa ekonomijas iespējas.

Tiek izvirzīti sekojoši pētījuma uzdevumi:

1. Izvērtēt esošās aprēķinu metodes, un izstrādāt sezonālo enerģijas patēriņu un ekonomisko aprēķinu metodiku un veikt aprēķinus ar kompresijas ciklu kombinētas netiešās iztvaikošanas ūdens dzesēšanas (KKCD) sistēmas izmantošanai, salīdzinot to ar citiem dzesēšanas principiem.
2. Pārbaudīt netiešās iztvaikošanas dzesēšanas (NID) metodi darbībā eksperimentālā objektā dzesēšanas sezonas garumā.
3. Noteikt NID efektivitātes un āra gaisa mitruma korelāciju, izmantojot pētniecības objektā iegūtos datus.
4. Laboratorijas apstākļos izvērtēt ar NID metodi dzesētā ūdens lietderīgās temperatūras (aukstumnesēja turpgaitas temperatūra, kas var tikt pielietota dzesēšanas sistēmas) pieejamību.

Darba zinātniskā novitāte: ir izveidota dzesētāju sezonālā enerģijas patēriņa aprēķinu metodika, balstoties uz proporcionālas jaudas un enerģijas efektivitātes radītāja (EER) sadalījuma atbilstoši tipiskajam meteoroloģiskajam gadam. Metodika ir aprobēta dzesēšanas sistēmas enerģijas patēriņa aprēķinos esošai vēsturiskai ēkai Latvijas klimatā.

Darba praktiskā nozīmība: lai paaugstinātu ekonomisku un enerģijas patēriņu aprēķinu precizitāti, ir piedāvāts veikt izmaiņas Eiropas standartā 14511:3-2007, kas nosaka sezonālas efektivitātes ESEER aprēķinu procedūru, ievērojot dažādu objektu tipu specifiku un vēsāka klimata nosacījumus. Ir noteikti iztvaikošanas dzesēšanas pielietošanas tehniski – ekonomiskie radītāji. Piedāvātā sezonālā enerģijas patēriņu izvērtēšanas metodika var tikt pielietota citu vēsturisku rekonstruētu ēku enerģijas aprēķinos.

Darbā veikto un līdzīgo pētījumu rezultāti ir paredzēti gaisa kondicionēšanas sistēmu energoefektivitātes uzlabošanai, pielietojot netiešās iztvaikošanas dzesēšanas principus. Tos var izmantot AVK projektētāji, arhitekti un attīstītāji ēku inženiersistēmu ilgtspējīgo risinājumi novērtēšanai.

Par pētījumu rezultātiem ir ziņots 4 pilna teksta publikācijās starptautiskajos izdevumos, kā arī 4 starptautiskās konferencēs.

## **1. IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANAS TEORĒTISKIE PAMATI**

### **1.1. Iepriekšējie pētījumi**

Zinātniskajos datu bāzēs ir atrodami vairāki raksti par tiešās un netiešās iztvaikošanas dzesēšanas procesu pētījumiem.

J.Facao un A.C.Oliveira savā pētījumā 2000. gadā, laboratorijas apstākļos notestēja uz to brīdi jaunu kompakto dzesēšanas torni, kas tika radīts speciāli VK sistēmām ar dzesētiem griestiem. Autori salīdzināja eksperimentu rezultātus ar aprēķiniem pēc trim dažādiem siltumapmaiņas modeļiem.

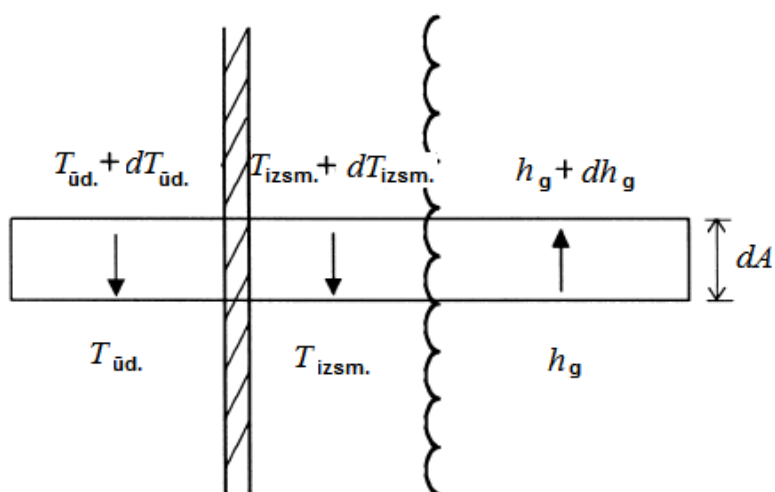
B. Costelloe un D. Finn 2002. gada analītiskā pētījuma rezultāti parādīja plašu iztvaikošanas ūdens dzesēšanas izmantošanas potenciālu mērena Eiropas klimata apstākļos ģeogrāfiskā platumā no Dublīnas līdz Milānai. Iztvaikošanas dzesēšanas pētījumus veikuši arī zinātnieki: K.T. Chan E. Dzelzītis, T. Džaiāni, A. Hasan, W.A. Kals, O. Kokorins, D. Kona, A. Krēsliņš, E. Manus, R. Mizushina, J. R. Watt, F.W. Yu, u.c.

## 1.2. Netiešā iztvaikošanas dzesētāja fizikālo procesu apraksts

Netiešās iztvaikošanas dzesēšanas procesu, kas notiek iekārtā, var sadalīt trijos etapos:

1. siltumapmaiņa starp primāro un sekundāro kontūru ar šķidrums – šķidrums tipa siltummaini;
2. siltumapmaiņa starp sekundāro kontūru un āra gaisu caur gais – ūdens tipa siltummaini;
3. tiešā āra gaisa iztvaikošanas dzesēšana ar ūdens iztvaikošanas - recirkulācijas kontūru.

Iztvaikošanas siltummaiņa elementārais siltuma un masas apmaiņas mezgls parādīts att. 2.2.



1.1. att. Elementāra siltuma un masas apmaiņas virsma

Vienlaicīga siltuma un masas pārnese gadījumā siltuma plūsmu var aprēķināt, izmantojot entalpijas potenciālu:

$$q = \alpha_m (h_i - h_g), \quad (1.1)$$

kur:

$\alpha_m$  – ir ūdens tvaika masas pārnese koeficients, s·kg/J

$h_g$  – gaisa entalpija

$h_i$  – entalpija uz ūdens plēves / gaisa robežas.

Entalpijas bilance elementārās apmaiņas virsmas  $dA$  gadījumā, zinot gaisa masas plūsmu  $m_g$  var tikt izteikta kā:

$$m_g dh_g = \alpha_m (h_i - h_g) dA. \quad (1.2)$$

Dzesētāja saražotā dzesēšanas jauda aprēķināta, izmantojot formulu:

$$Q = g \cdot \rho \cdot c_{cw} (T_{in} - T_{out}), \quad (1.3)$$

kur:

$Q$  – dzesēšanas jauda, kW

$g$  – dzesēšanas šķidruma plūsma, m<sup>3</sup>/s

$\rho$  – dzesēšanas šķidruma blīvums, kg/m<sup>3</sup>

$c_{cw}$  – dzesēšanas šķidruma īpatnējā siltumietilpība, kJ/(kg·°C)

$T_{in}, T_{out}$  – atpakaļgaitas un turpgaitas šķidruma temperatūras, °C.

Kā dzesēšanas šķidrums sistēmā izmantots 35% etilēnglikola šķīdums ūdenī,  $\rho = 1045 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{cw} = 3.585 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{°C)}$ . Dzesēšanas iekārtas efektivitāte, saskaņā ar enerģijas bilances vienādojumu, ir:

$$EER = \frac{\text{Dzesēšanas jauda}}{\text{Elektriskā jauda}}. \quad (1.4)$$

Netiešās iztvaikošanas dzesēšanas termiskā efektivitāte  $\varepsilon_{ni}$ , lielā mērā ir atkarīga no darba gaisa slapjā termometra temperatūras. Tāpēc  $\varepsilon_{ni}$  ir definēta kā:

$$\varepsilon_{ni} = 100 \frac{T_{\text{ūd.1}} - T_{\text{ūd.2}}}{T_{\text{ūd.1}} - t_s}, \quad (1.5)$$

kur:

$\varepsilon_{ni}$  – netiešās iztvaikošanas dzesēšanas efektivitāte, %

$t_{\text{ūd.1}}$  – ienākošā dzesējamā šķidruma sausā termometra temperatūra, °C

$t_{\text{ūd.2}}$  – izejošā dzesējamā šķidruma sausā termometra temperatūra, °C

$t_s$  – ienākošā darba gaisa slapjā termometra temperatūra, °C.

Ūdens patēriņš iztvaikošanas dzesēšanas procesā, zinot darba gaisa sākotnējos (ieņemšanā) un beigas (izmešanā) parametrus, ir aprēķināts pēc formulas:

$$m_{\text{ūdens}} = m_g (x_{\text{beigu}} - x_{\text{sākumā}}) 1000 \quad (1.6)$$

kur:

$m_{\text{ūdens}}$  – ūdens patēriņš, kg/st

$m_g$  – gaisa masas plūsma, kg/st

$x_{\text{beigu}}, x_{\text{sākumā}}$  – darba gaisa mitruma saturs procesa beigās un sākumā, attiecīgi kg/kg.

## 2. IZTVAIKOŠANAS DZESĒŠANAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

### 2.1. Eksperimentu plāns

Viens no šī promocijas darba mērķiem ir izvērtēt ekonomiskus aspektus netiešās iztvaikošanas dzesēšanas izmantošanai Latvijas klimata apstākļos. Sezonālo enerģijas patēriņu aprēķiniem nepieciešamā informācija par iekārtu efektivitāti ir stipri ierobežota. Parasti ir pieejamās iekārtas pilnās efektivitātes EER, un sezonālās efektivitātes ESEER dati, kurus nosaka testu procedūrās pēc attiecīgajiem standartiem.



## **Laboratorijas eksperimentu plāns**

Pieejamās tehniskās informācijas trūkums rada sarežģītumus sezonālo enerģijas aprēķinu veikšanai. Līdz ar to ir nepieciešama pētījumu veikšana laboratorijas apstākļos, izvirzot sekojošus uzdevumus:

1. Kombinētās iztvaikošanas dzesēšanas – kompresijas cikla iekārtas efektivitātes datu ārpus tehnisku izdruku diapazona iegūšana;
2. Dzesētās ūdens lietderīgas temperatūras pieejamības izvērtēšana, izmantojot iztvaikošanas dzesēšanu. Respektīvi, pie kādiem āra gaisa parametriem ir iespējams iegūt dzesēšanas procesā izmantojamo ūdeni;
3. Ūdens izsmidzināšanas siltummainī gaiss – ūdens ietekme uz dzesēšanas procesu.

## **Pētījumu plāns eksperimentālā objektā**

Nākošais faktors, kuru ir nepieciešams ņemt vērā, ir dzesētāja saražotās enerģijas daudzums pie āra gaisa temperatūrām. Tas ir cieši saistīts ar ēkas, kur atrodas sistēma, norobežojošo konstrukciju siltumtehnikajām īpašībām, siltuma izdalījumu intensitāti un ēkas inerci. Iztvaikošanas dzesēšanas gadījumā nepieciešams precizēt āra gaisa mitruma ietekmi uz procesa efektivitāti. Ir nepieciešams veikt analītiskus pētījumus eksperimentālā objektā, kas aprīkots ar darbībā esošo netiešās iztvaikošanas dzesēšanas sistēmu, izvirzot sekojošus uzdevumus:

1. Dzesēšanas enerģijas sadalījuma pēc āra gaisa temperatūras noteikšana dzesēšanas sezonas griezumā;
2. Āra gaisa mitruma ietekmi uz kombinētās dzesēšanas procesa efektivitāti ilglaicīgā perspektīvā.

## **2.2. Pētījumu metodika**

Par eksperimentālu objektu šī darba ietvaros tika izvēlēta 2011. gadā rekonstruētā vēsturiska Rīgas Biržas ēka, kurā pašreiz ir iekārtots Mākslas muzejs „Rīgas Birža”. Analītiskie pētījumi apkopo iztvaikošanas ūdens dzesēšanas sistēmas darbības rezultātus no 2011. gada augusta līdz 2012. gada oktobrim. Elektrības un ūdens patēriņa, dzesētāja darbības režīmu un dzesēšanas sistēmas temperatūras dati tika uzkrāti ar vienas minūtes laika intervālu. Analīzes periodu ilgums tika izvēlēts pamatojoties uz ēkas dzesēšanas pieprasījuma. Pēc kļūdu analīzes, iegūtie dati tika pārrēķināti uz stundu vidējām vērtībām. Pētījumā izmantoti āra gaisa dati no datu krājēja, kas atrodas aptuveni 400–600 m attālumā no eksperimentāla objekta.

2011. gada darbības periodā pēc āra gaisa parametru analīzes tika izvēlēta augusta pēdējā nedēļa, kā viskarstākais periods apskatītās dzesēšanas sezonas laikā. Izmantojot *MS Excel Pivot Table* funkcijas, tika noteikta visbiežāk novērotā (1038 minūšu laikā) temperatūra periodā, kas sastādīja diapazonu no 21.5 °C līdz 22.5 °C. Pieņemot ārā gaisa temperatūru šajā diapazonā par konstantu ar precizitāti 22±0.5 °C, tika veikta grafiskā vizualizācija āra gaisa mitruma satura  $x$  un dzesētāja efektivitātes sakarības noteikšanai.

2012. gada dzesēšanas sezonas analītiskajā pētījumā ir apkopoti dati par 8 mēnešu ilgu sistēmas darbības periodu un āra gaisa temperatūru diapazonā no 11 līdz 34 °C tika atlasīti 7 temperatūras vērtību intervāli ar soli 2 °C. Temperatūru vērtības šajos intervālos tika uzskatītas par konstantām, un izmantoti turpmāko EER –  $x$  empīrisko korelāciju noteikšanai.

Laboratorijas pētījumi veikti Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes SGŪT institūta energoefektivitātes laboratorijā. Pētījumi tika veikti, izmantojot netiešās iztvaikošanas ūdens dzesēšanas laboratorijas iekārtu un sistēmu dažādos režīmos:

1. bez dzesēšanas slodzes un bez ūdens izsmidzināšanas (sausā dzesētāja režīmā), lai noteikt zemāko iespējamo dzesējamā ūdens turpgaitas temperatūru;
2. bez dzesēšanas slodzes, palaižot ūdens izsmidzināšanu ieņemšanas gaisā („slapjā” dzesēšanas torņa režīmā), lai noteiktu zemāko iespējamo dzesējamā ūdens turpgaitas temperatūru;
3. ar mainīgo dzesēšanas slodzi, ko nodrošināja elektriskais sildītājs, bez ūdens izsmidzināšanas
4. ar mainīgo dzesēšanas slodzi, izmantojot ūdens izsmidzināšanu ieņemšanas gaisā.

Pētījumos izmantoti dati no laboratorijā esošiem datu krājējiem, kā arī tos uzkrājot / vizualizācijas rīka *BACnet / COSMOweb*. Āra gaisa parametru mērījumi veikti ar *PRODUAL* kombinēto mitruma / āra gaisa temperatūras devēju palīdzību. Atsevišķi tika veikti izmešanas gaisa parametru mērījumi pēc dzesētāja, izmantojot termo-higrometru *Testo 605-H1*, daudzfunkcionālu anemometru *TESTO 435-4*. Ūdens temperatūras kontroles mērījumiem pie caurulēm tika izmantots kontakta termometrs ar *Ni Cr-Ni* termopāru, pieslēdzams pie daudzfunkcionālā anemometra. Izmešanas gaisa parametru mērījumi veikti caur atvērumiem gaisa vadā, 3 m attālumā no iekārtas (Att. 2.1).



2.1. att. Eksperimentālas iekārtas Dzesētāja izmešanas gaisa parametru mērīšana

Mērījumos iegūtie dati tika apstrādāti *EXCEL* vidē un pēc mērījumu kļūdu novērtēšanas izmantoti analītiskajā pētījumā.

### 2.3. Laboratorijas pētījumi

Ar mērķi novērtēt kombinētās freona cikla - netiešās iztvaikošanas ūdens dzesēšanas iekārtas darbības efektivitāti plašāka āra gaisa temperatūru diapazonā, tika veikta laboratorijas eksperimentu sērija. Pētījumi veikti, izmantojot Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes SGŪT institūta energoefektivitātes laboratoriju. Eksperimenti veikti divos etapos:

- vasaras periodā, darbinot iekārtu pie nosimulētā konstanta aukstuma patēriņa;

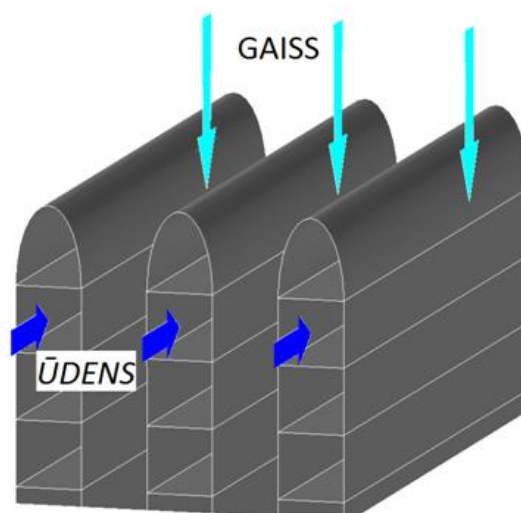
- rudenī, kad iekārta tika darbināta pie nosimulētām mainīgām dzesēšanas slodzēm. Laboratorijas iekārtas dati izklāstīti tabulā 2.1.

2.1. tabula

Laboratorijas iekārtas tehniskie dati

Nominālā ieņemšanas gaisa plūsma, m <sup>3</sup> /s	1,22	Sūkņu el. jauda „adiabātiskajā” lokā, kW	2·0.64
Ventilatora patērētā el. jauda, kW	2.13	Sekundārā loka brīvās dzesēšanas sūkņa el. jauda, kW	0.44
Ūdens – ūdens siltummaiņa tips	alumīnija plākšņu	Sekundārā loka kondensatora sūkņa el. jauda, kW	0.44
Ieregulētā ūdens plūsma uz sistēmu, kg/s	0.83	Kompresora elektriskā jauda, kW	17.9

Laboratorijas iekārta ir aprīkota ar plākšņu iztvaikošanas ūdens - gaiss siltummaini ar ūdens izsmidzināšanas sprauslām gaisa ieņemšanas pusē. Siltummainis ir dubultais, t.i. dzesējamās ūdens plūsmu samitrinātais darba gaiss šķērso divkārt, šķērsplūsmas (cross-flow) virzienā. Plāksnes izgatavotas no polipropilēna, un ir ribotas ūdens pusē, izveidojot kvadrāta šķērsriezuma ūdens kanālus (Att 2.2).

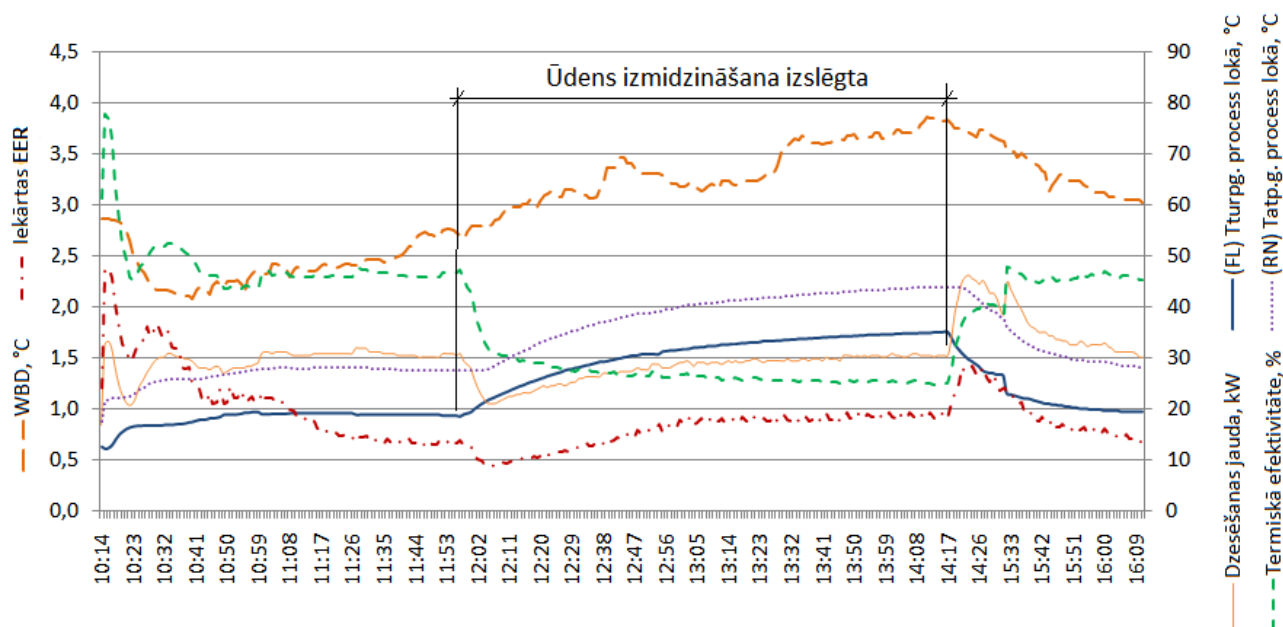


2.2. att. Laboratorijas iekārtas ūdens – gaiss iztvaikošanas siltummaiņa shēma

Siltuma slodzi iekārtai nodrošināja elektriskais caurteces ūdens sildītājs ar nominālu elektrisko jaudu 24 kW. Lai nodrošināt patēriņu, esošā hidrauliskajā shēmā tika modificēta, sacilpojot dzesēšanas un sildīšanas kontūrus. Dzesēšanas iekārtas galvenās komponentes ir: ūdens – gaiss siltummainis ar ūdens izsmidzināšanas sprauslām, cirkulācijas sūkņi, ūdens – ūdens un ūdens – freons siltummaiņi, centrālās ventilators ar frekvenču pārveidotāju, gaisa kondensators un kompresors. Laboratorijas iekārta (shēma parādīta Att. 2.4) ir aprīkota ar ūdens–gaiss siltummaini

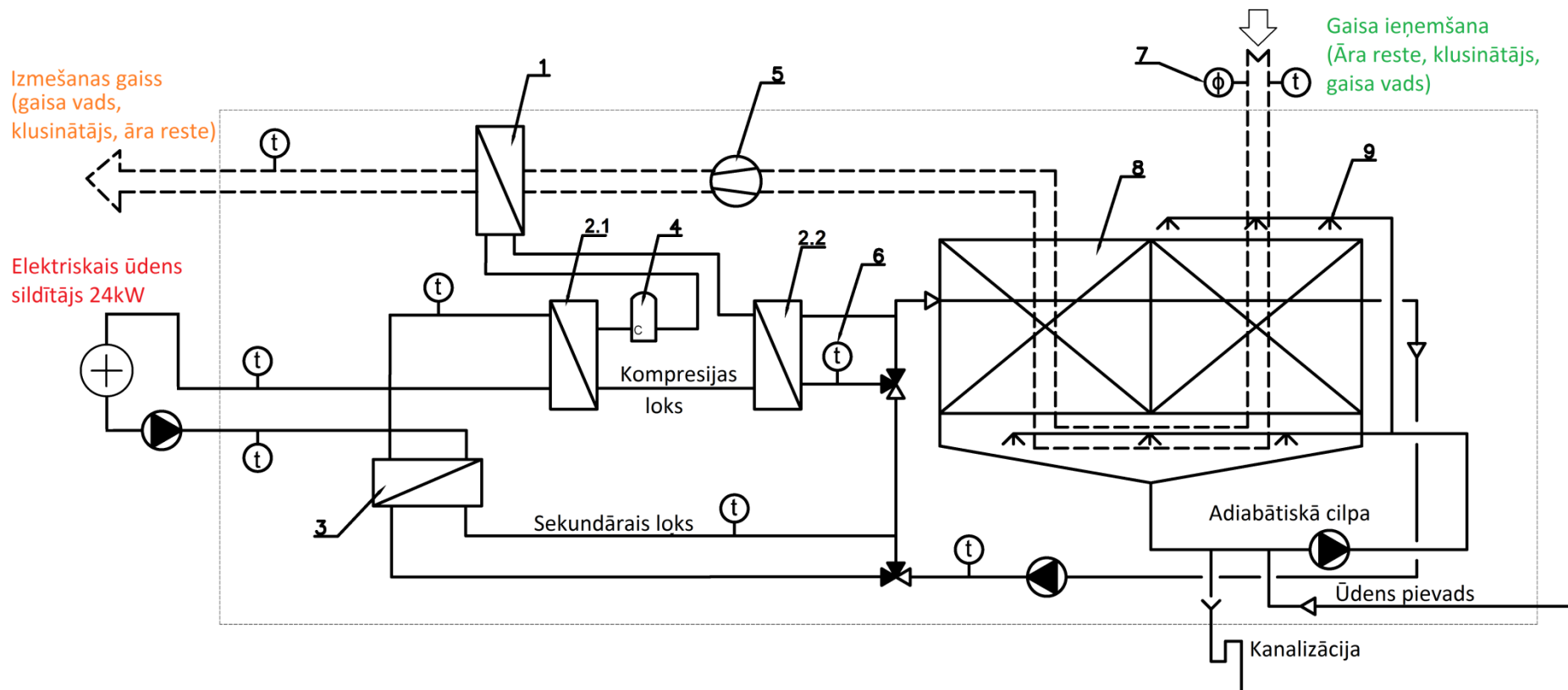
(8), kas dzesē sekundāro cilpu ar adiabatiski dzesētu āra gaisu. Āra gaiss tiek pārvietots ar centrālās ventilatora palīdzību (5), iztvaikošanas dzesēšana tiek nodrošināta ar ūdens padeves sprauslām (9). Freons–gaiss (1) un freons–ūdens (2.2) siltummaiņi – kondensatori utilizē kompresora (4) saražoto siltumu. Kompresijas ciklā siltums tiek pārnesti primāra loka iztvaikotāja (2.1) uz kondensatoru.

Dzesētāja darbības pētījumi rudens āra gaisa apstākļos norāda uz to, ka pārejot no sausā uz mitru dzesēšanas torņa darbības režīmu, dzesēšanas jauda, kā arī kopējā efektivitāte EER praktiski nemainās. Šajā pētījumu etapā darbības stabilos posmos jauda abos režīmos sasniedza 29.7 kW, ar nebūtiskām svārstībām, un EER no 15.0 līdz 18.0. Ievērojamās EER izmaiņas novērotas pie režīmu pārejas dzesēšanas turpgaita un atpakaļgaitas temperatūru starpības dēļ. Ieslēdzot ūdens izsmidzināšanu dzesēšanas termiskā efektivitāte  $\epsilon_{ni}$  ievērojami pieaug – no 30.0 līdz 45.0%, tas ir līdz 50%, izslēdzot – krīt no 30.0 līdz 20.5%, kas atbilst 30%. Abu noviržu ilgums ir aptuveni 60 minūtes (Att. 2.3).



2.3. att. Eksperimentālās sistēmas  $T_{atp.g.}$ ,  $T_{turpg.}$ , dzesēšanas jauda, WBD, procesa EER un termiskā efektivitāte 2013.10.31.

Sasniedzamās dzesēšanas  $T_{turg.}$  un  $T_{atp.g.}$ , atšķirībā no EER pie dažādiem režīmiem mainās ievērojami, saglabājot praktiski vienādu starpību  $\Delta T = 9.0$  °C. Sausā dzesēšanas torņa režīmā vidēji  $T_{turpg.} = 34.0$  °C, mitrajā  $T_{turpg.} = 19.5$  °C. Tas ir nozīmīgi pielietojamas ziņā, jo temperatūras, augstākas par +22 °C praktiski nav izmantojamas ēku dzesēšanas sistēmās, bet līdz 20 °C var tikt pielietotas augsto temperatūru sistēmās, piemēram, dzesētos griestos.



2.4. att. Iztvaikošanas dzesēšanas – kompresora cikla kombinētā eksperimentālā sistēma, kur:

1 – freons–gaiss siltummainis;

2.1 un 2.2 – freons–ūdens siltummaiņi;

3 – ūdens–ūdens siltummainis;

4 – kompresors;

5 – radiālais ventilators;

6 – temperatūras devējs;

7 – gaisa relatīvā mitruma devējs;

8 – ūdens–gaiss siltummainis;

9 – ūdens padeves sprauslas.

## 2.4. Pētījumi eksperimentālā objektā

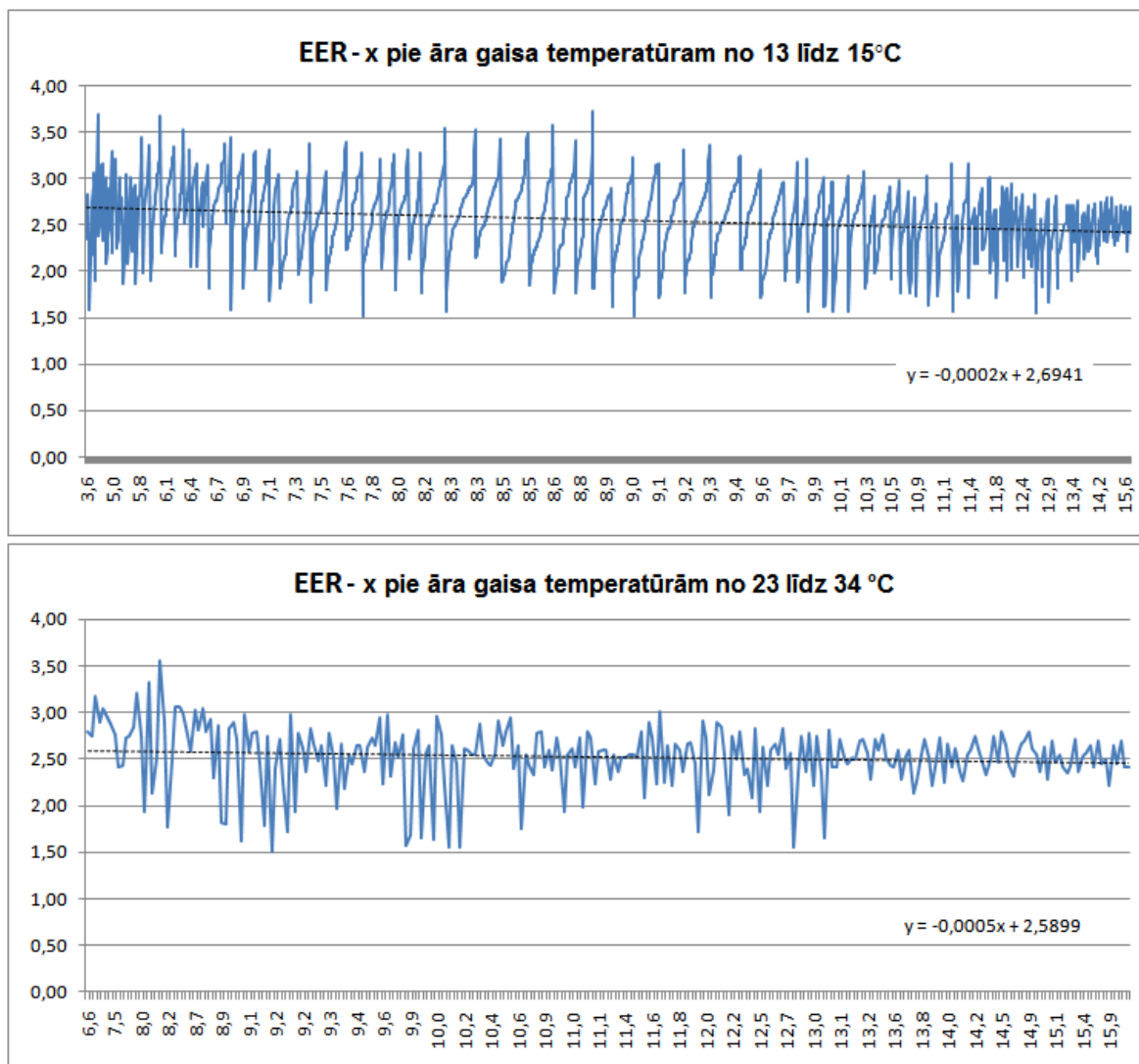
Lai noteikt dzesēšanas enerģijas sadalījumu darbībā esošajā objektā atkarībā no āra gaisa temperatūras dzesēšanas sezonas garumā, ir veikti pētījumi eksperimentālā objektā. Par eksperimentālu objektu šī darba ietvaros izvēlēta nesen rekonstruētā 19. gs. vidū būvēta vēsturiska Rīgas Biržas ēka, kura 2011. gadā ir atklāta un darbojās kā Mākslas muzejs „Rīgas Birža” (Att. 2.5). Analītiskie pētījumi apkopo iztvaikošanas ūdens dzesēšanas sistēmas darbības rezultātus no 2011. gada augusta līdz 2012. gada oktobrim. Pielietojot augstāk aprakstītas metodes, tika veikti trīs analītiskie pētījumi atsevišķiem laika periodiem.



2.5. att. Netiešās iztvaikošanas dzesētājs eksperimentālā objektā Mākslas muzejs „Rīgas Birža”

Pieņemot āra gaisa temperatūras diapazonu par konstantu ar precizitāti  $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , tika veikta grafiskā vizualizācija āra gaisa mitruma satura un dzesētāja efektivitātes sakarības noteikšanai. Datu aproksimācija norāda uz ļoti lēzenu tiešu sakarību starp āra gaisa mitrumu un iekārtas efektivitāti, un šo sakarību var izteikt ar vienādojumu  $y = 0,0002x + 1,2024$ , kur  $y$  = vidējais 5–minūšu EER,  $x$  – āra gaisa mitruma saturs g/kg, kas nofiltrēts augošā secībā. Pētījuma rezultāti par eksperimentālā objekta dzesēšanas sistēmas darbību 2011. gadā, divu ar pusi mēnešu periodā no sistēmas palaišanas liecina par vāji izteiktu tiešu sakarību starp āra gaisa mitruma saturu un dzesētāja efektivitāti. Izanalizējot šo parādību, mēs esam nonākuši pie secinājuma, ka iekārtas iztvaikošanas dzesēšanas funkcija pie palaišanas netika ieregulēta, un aukstuma jauda tika nodrošināta ar iebūvēto kompresoru palīdzību. Pieaugot gaisa mitruma saturam, pie vienādas temperatūras, pieaug arī gaisa blīvums, līdz ar to, pieaug arī gaisa siltumietilpība, kas sekmē freons-gaiss siltummaiņa, un, galu galā, visas iekārtas efektivitātes kāpumu.

2012. gada eksperimentālā objekta dzesēšanas sistēmas pētījumā ir apkopoti dati par 8 mēnešu ilgu sistēmas darbības periodu. Āra gaisa temperatūru diapazonā no  $11^\circ\text{C}$  līdz  $34^\circ\text{C}$  tika atlasīti 7 temperatūras vērtību intervāli ar soli  $2^\circ\text{C}$ . Temperatūru vērtības šajos intervālos tika uzskatītas par konstantām, un izmantoti turpmāko EER– $x$  empīrisko korelāciju noteikšanai (Att. 2.6).



2.6. att. EER (y) un āra gaisa mitruma saturs (x, g/kg) temperatūru diapazonos no 11 līdz 13°C un no 23-34 °C

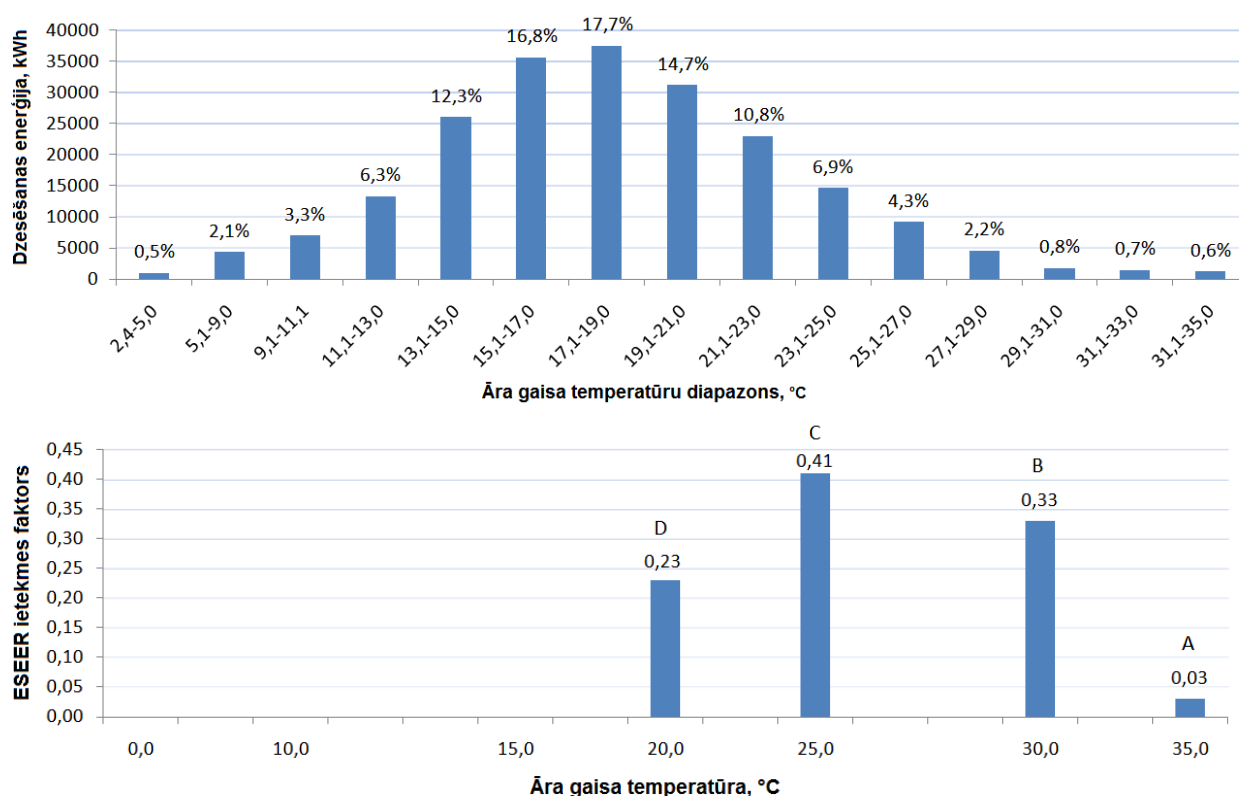
Pie zemākām āra gaisa temperatūrām EER-x korelācija ir stiprāk izteikta, nekā pie augstākām temperatūrām. Temperatūras diapazonā no 13 līdz 15 °C tika reģistrēts 1434 stundu laikā, un tajā mitruma saturam palielinoties no 3,6 g/kg līdz 15,6 g/kg, EER samazinās par 10,0%. Savukārt, EER–x korelācija āra gaisa temperatūru diapazonā no 23 °C parāda, ka stundu vidēja dzesētāja EER ir diezgan maz atkarīga no āra gaisa mitruma satura. Āra gaisa siltumietilpība  $c_p$  un mitruma saturs ir saistīti taisni proporcionāli. Līdz ar to var secināt, ka augstākā, virs 24 °C āra gaisa temperatūru diapazonā iztvaikošanas dzesēšanas efektivitātes kritums augstā mitruma dēļ tiek kompensēts ar freons–gaisa siltummaiņa efektivitātes kāpumu.



### 3. DZESĒŠANAS SISTĒMU ENERĢIJAS PATĒRIŅU UN EKONOMISKIE APRĒĶINI

#### 3.1. Sezonālas darbības efektivitātes novērtēšana

Promocijas darbā ir veikts dažādu ūdens dzesētāju tipu tehniskais salīdzinājums, izstrādāts dzesētāju atpirkšanās termiņa aprēķina shematiskais algoritms. Ir apskatīti daži Latvijas klimata datu modeļi. Augstās precizitātes un datu sakārtojuma dēļ sezonālo enerģijas patēriņu aprēķinos ir izmantots M. Zariņa Latvijas Lauksaimniecības universitātē izstrādāto Rīgas Tipiskā meteoroloģiska gada modelis. Ar mērķi noteikt saražotās dzesēšanas enerģijas procentuālu sadalījumu atkarībā no āra gaisa temperatūras, tika izanalizēta kombinētā iztvaikošanas – kompresijas cikla dzesētāja darbība objektā Rīgas Birža, 2012. gada dzesēšanas sezonas garumā. Ir izvērtēta sezonālas efektivitātes ESEER aprēķina metodikas pielietošana saskaņā ar EN14511:3-2011 Latvijas klimata apstākļos. Izanalizējot eksperimentāla objekta dzesēšanas sistēmas darbības īpašības, konstatētas izteiktas dzesēšanas jaudu – āra gaisa temperatūras sadalījuma atšķirības no ESEER definētas metodes (Att. 3.1). Sakarā ar to ir piedāvāta proporcionālā sadalījuma aprēķinu metode, kas var tikt izmantota arī citos vēsturiskajos objektos līdzīga klimata apstākļos.



3.1. att. Saražotās dzesēšanas enerģijas sadalījums āra gaisa temperatūru diapazonos (augšā) un ESEER aprēķinu ietekmes faktori atbilstoši EN14511:3-2011

Izmantojot proporcionālā sadalījuma metodi, ir veikti sezonālas enerģijas patēriņu aprēķini sekojošiem dzesēšanas iekārtu tiptiem: kompakts kompresijas cikla ar gaisu dzesējamais dzesētājs (KCD), kompresijas cikla ar ūdeni dzesējamais dzesētājs – sausais dzesēšanas tornis (KCD-DT), un kombinētais kompresijas cikla – iztvaikošanas dzesētājs.



Sezonālais elektroenerģijas patēriņš tika aprēķināts pēc izteiksmes:

$$Q_{el.sez.} = \sum_{\Delta T_n} \left( \frac{Q_{dz.nom.}}{EER_{\Delta T_n}} DS_{\Delta T_n} GS_{\Delta T_n} \right) + Q_{el.ds} \quad (3.1)$$

kur:

$Q_{el.sez.}$  – elektroenerģijas patēriņš dzesēšanas sezonas laikā, kWh

$\Delta T_n$  – āra gaisa temperatūras intervāls

$Q_{dz.nom.}$  – iekārtas nominālā dzesēšanas jauda standarta apstākļos, kW

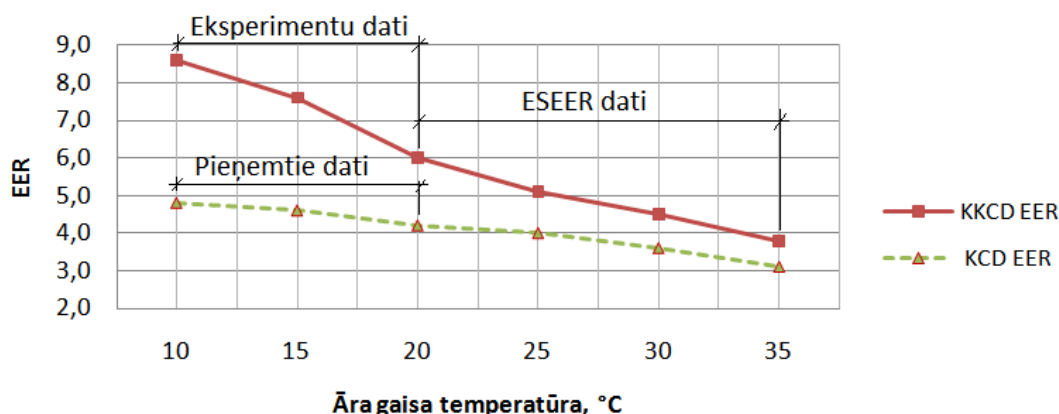
$EER$  – enerģijas efektivitātes radītājs dotajā temperatūras intervālā

$DS$  – dzesēšanas slodze dotajā temperatūras intervālā, % vai daļas no 1, no nominālās iekārtas jaudas

$GS$  – dzesēšanas grādu stundu skaits dotajā temperatūras intervālā, h

$Q_{el.ds.}$  – elektroenerģijas patēriņš dīkstāvē, kWh

Efektivitātes EER dati pie noteiktām āra gaisa temperatūrām un izejas jaudām temperatūru diapazonā no 20 °C līdz 35°C tika ņemti no ražotāju programnodrošinājuma. Pie āra gaisa temperatūras zem +20°C izmantoti laboratorijas pētījumos noteiktie EER dati. Piemērs EER datu izvēlei parādīt Att. 3.2:



3.2. att. EER dati 16/20°C KCD un KKCD iekārtām

KCD-DT sistēmas kopējā efektivitāte pilnā slodzē tika aprēķināta, dalot dzesētāja attīstīto dzesēšanas jaudu uz visas iekārtas (dzesētājs, sūkņi, dzesēšanas tornis) uzstādītas elektriskās jaudas summu. Sistēmas efektivitātes vērtības pie mazākām dzesēšanas jaudām un āra gaisa temperatūras tika pieņemtas līdzīgas kā dzesētāja sezonālās EER vērtības attiecībā pret  $EER_{100}$ .

$$EER_{KCD-DT} = \frac{Q_{dz}}{P_{DZ} + P_S + P_{DT}} \quad (4.3)$$

kur:

$EER_{KCD-DT}$  – kopējā efektivitāte sistēmai dzesētājs – sausais dzesēšanas tornis

$Q_{dz}$  – dzesēšanas jauda, kW

$P_{DZ}$  – dzesētāja elektriskā jauda, kW

$P_S$  – cirkulācijas sūkņa elektriskā jauda, kW

$P_{DT}$  – dzesēšanas torņa elektriskā jauda, kW.

### 3.2. Dzesētāju tipu izvēles ekonomiskie aspekti. Atmaksāšanas termiņš.

Ekonomiskiem aprēķiniem elektroenerģijas tarifs pieņemts 0,15 EUR/kWh, T2 pieslēgumam ievada slēdžiem virs 40A. Ikgadējie izdevumi uz servisa apkalpošanu pieņemti 600EUR, un ūdens patēriņš 500EUR (vēsturiskais par 2012. gadu no eksperimentālā objekta Rīgas Birža). Ūdens tarifs pieņemts 0.514 EUR/m<sup>3</sup>. Ikgadējie izdevumi uz KCD servisa apkalpošanu ir pieņemti 300 EUR apmērā (Tabula 3.1).

3.1. tabula

Atmaksāšanas termiņa aprēķinos pieņemtās izmaksas, EUR

Iekārtas apzīmējums	Sākotnējie ieguldījumi	Apkalpošanas / ekspluatācijas izmaksas gadā
KKCD	90000	600 + 500 (ūdens patēriņš)
KCD	45000	300
KCD-DT	59500	450

Atmaksāšanas perioda aprēķinos pie diskontētas naudas plūsmas pieņemts diskonta koeficients 5%. Diskonta faktors katram ekspluatācijas gadam aprēķināts pēc:

$$df = \frac{1}{(1+p)^n}, \quad (4.4)$$

kur:

$df$  – diskonta faktors,

$p$  – diskonta koeficients jeb likme, % vai simtdaļās,

$n$  – gads, kurā izmaksas tiek veiktas, attiecībā pret bāzes gadu.

Tīrās tagadnes vērtība nosaka naudas plūsmas tagadnes vērtību, diskontējot to ar nepieciešamu atgriešanas likmi pēc sekojošās izteiksmes:

$$TTV(\text{projektam}) = A_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k+p_t)^t}, \quad (4.5)$$

kur:

$F_t$  – tīrā naudas plūsma periodā  $t$ ,

$k$  – noteiktā atgriešanas likme,

$A_o$  – sākotnējie kapitālieguldījumi (negatīvā vērtībā, jo tā ir izejošā naudas plūsma)

Atpirkšanas termiņu aprēķini veikti KCD un KCD-DT dzesēšanas iekārtu veidiem, 7/12 °C un 16/20 °C dzesēšanas temperatūru režīmiem izvērtējot to nomaiņas uz KKCD izdevīgumu. Aprēķins KCD-DT sistēmas aizvietošanai ar KKCD parādīts Att. 3.3.

Pašreiz tirgū ir pieejami vairāki programmnodrošinājuma līdzekļi, ko var izmantot ēku un inženiersistēmu sezonālā enerģijas patēriņa novērtēšanai. Tie pamatā ir orientēti uz siltumtehniko analīzi, un siltuma patēriņiem / dzesēšanas jaudu aprēķiniem. Pie pazīstamākam enerģijas aprēķinu programmām var pieskaitīt *RETScreen 4*, *RIUSKA*, *EnergyPlus*, *TRNSYS*, u.c. Atkarībā no cenas un izmēra, šīs programmas ļauj veikt dažādas sarežģītības aprēķinus, sākot ar ātras dzesēšanas sistēmas izdevīguma izvērtēšanas (*RETScreen4*) līdz detalizētām ēkas siltuma procesu simulācijām ārējo apstākļu ietekmē (*TRNSYS*).



3.3. att. Atmaksāšanas grafiks 7/12 °C temperatūru režīmā KKCD salīdzinot ar KCD–DT dzesēšanas sistēmu

Ar mērķi salīdzināt aprēķinu rezultātus pēc piedāvātas metodes tika veikti izdevīguma aprēķini datorprogrammā RETScreen4 apskatītiem dzesēšanas sistēmu tipiem. Aprēķinu rezultātā pie vienādiem ievadāmiem parametriem ir konstatētas nesaistes KCD–DT sistēmas aizvietošanai ar KKCD 18% robežās, KCD sistēmas gadījuma nesaiste sastādīja 28%. Šīs ievērojamās nesaistes norāda uz to, ka standarta ESEER efektivitātes radītāja izmantošana ar Dzesēšanas Grādu stundām, ir salīdzinoši neprecīza metode Latvijas klimata apstākļos, ko vēl pastiprina korekcijas faktoru neesamība dažādiem objektu tipiem.

## SECINĀJUMI

Promocijas darba ietvaros ir izvērtētas esošās dzesēšanas sezonālo enerģijas patēriņu aprēķinu metodes, un konstatēts, ka tās nav tieši izmantojamās Latvijas klimata apstākļos. Sakarā ar to ir piedāvāta aprēķinu metodika, kas aprobācijas gaitā eksperimentālā objektā sniedza ievērojami precīzāku rezultātu.

Veikti ekonomiskie aprēķini ar kompresijas ciklu kombinētas netiešās iztvaikošanas ūdens dzesēšanas sistēmas izmantošanai, salīdzinot to ar citām dzesēšanas principiem / sistēmām. Ir secināts, ka diskontētas naudas plūsmas gadījumā, neņemot vērā iespējamus grantus / subsīdijas, NID pielietošana ir ekonomiski attaisnojama, jo atpērkas 8 gadu laikā (Att. 3.3).

Ekonomisku un enerģijas patēriņu aprēķinu precizitātes paaugstināšanai, ir piedāvāts veikt izmaiņas Eiropas standartā 14511:3–2007, kas nosaka sezonālas efektivitātes ESEER aprēķinu procedūru, ievērojot dažādu objektu tipu specifiku, un vēsāka klimata nosacījumus.

NID metode ir pārbaudīta darbībā eksperimentālā objektā Mākslas muzejs Rīgas Birža dzesēšanas sezonas garumā. Ir noteikts saražotās dzesēšanas enerģijas procentuālais sadalījums atkarībā no āra gaisa temperatūras dzesēšanas sezonas garumā, un tas ir rekomendēts izmantošanai dzesēšanas sistēmas enerģijas patēriņu aprēķinu veikšanai līdzīgajās vēsturiskajās ēkās.

Izmantojot pētniecības objektā iegūtos datus, ir noteiktas korelācijas starp kombinētā netiešās iztvaikošanas dzesētāja efektivitāti un āra gaisa mitruma saturu āra gaisa temperatūras diapazonā no +11 °C līdz +34 °C. Ir konstatēts, ka pie āra gaisa temperatūras virs 24 °C āra gaisa saturam nav būtiska ietekme, un šī korelācija tuvojās konstantai EER vērtībai. Savukārt, pie zemākās āra gaisa temperatūras mitruma satura ietekme uz efektivitāti ir vairāk izteikta (Att. 2.6).

Eksperimentāli izvērtēta ar NID metodi atdzesētā ūdens lietderīgās temperatūras pieejamība. Ir konstatēts, ka pie āra gaisa temperatūras +15 °C un zemāk ūdens temperatūra primārā kontūrā tiek pazemināta līdz 19 °C, un var tikt izmantotā augstās temperatūras dzesēšanas sistēmās, tādas kā dzesētie griesti.

Pētījuma rezultātus var izmantot AVK projektētāji, arhitekti un nekustamo īpašumu attīstītāji ēku inženiersistēmu ilgtspējīgo risinājumu novērtēšanai.

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Brahmanis A, Frīdenbergs G., Borisova V. Economical aspects of water–mist assisted air–cooled chillers usage in the temperate climate of Latvia. Proc. 13<sup>th</sup> SCANVAC Int. Conference on Air Distribution in Rooms. Sao Paulo, Brazil, 19–22.10.2014. – 8 p [accepted].
2. Frīdenbergs G., Brahmanis A., Lešinskis A., Experimental device modelling for IEAC thermal performance study. Proc. 13<sup>th</sup> SCANVAC Int. Conference on Air Distribution in Rooms. Sao Paulo, Brazil, 19–22.10.2014. – 8 p [accepted].
3. Brahmanis A., Pelīte U. Investigation of Combined Indirect Evaporative Ducted Cooling equipment efficiency in Historical Building in Temperate Climate. *Construction Science*, vol. 15, 2014. – 6 p.
4. Brahmanis A., Lešinskis A., Krūmiņš A. Case Study of Indirect Adiabatic Cooling System in Historical Building. *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 8,. 2014. - p. 313-317
5. Pelīte U., Krūmiņš, A., Brahmanis A. Energoefektīvas ēkas simulators RTU. *Latvijas būvniecība*, Nr. 2, 2013. - lpp. 92-93.
6. Brahmanis A., Lešinskis A., Krūmiņš A. Case study of indirect adiabatic cooling system in historical building. In: 11<sup>th</sup> REHVA World Congress and 8<sup>th</sup> International Conference on IAQVEC “CLIMA 2013”, Prague, Czech Republic, 2013 – 7 p.
7. Brahmanis A., Lešinskis A., Indirect Evaporative Pre-Cooled Compressor Cooling System Performance under Various Outdoor Air Humidity Conditions. In: Conference “Civil Engineering `13”, Jelgava, Latvia, 2013– 7 p.
8. Brahmanis A. Mikroklimats peldbaseinos. *Eneģija un Pasaule*, Nr. 2, 2011. - lpp. 43-44.
9. Brahmanis A., Pelīte U., Lešinskis A., Kona D., Kon Tai Bui. Extract air energy utilization using heat pump in buildings with indoor swimming pools. Proc. Int. The 8<sup>th</sup> International Conference of Young Scientists on Energy Issues “CYSENI2011”, Kaunas (Lithuania), 26.-27.05.2011. – 9 p.
10. Brahmanis A., Pelīte U., Lešinskis A., Krūmiņš A. Energy efficient indoor climate model for public buildings with high humidity gains and spectator areas. – Proc. Int. Conference “Clima 2010”, Antalya (Turkey), 9-12.05.2010. – 8 p.
11. Kona D., Kon Tai Bui, E.Dzelzītis, A.Lesinskis, A.Brahmanis. Weather data for indirect evaporative cooling equipment simulations. Proc. Int. Conference 41st International Congress & Exhibition on Heating Refrigeration and Air Conditioning, Belgrade (Serbia), 01.-03.12.2010. – 8p.
12. Krumins, A., Pelīte U., Dzelzītis E., Lešinskis A., Brahmanis A. Case Study of Ventilation System Development of Archive Premises. In: 6<sup>th</sup> Annual Conference of Young Scientists on Energy Issues „CYSENI 2009”, Kaunas, Lithuania, 2009. – 7 p.
13. Krūmiņš A., Pelīte U., Dzelzītis E., Lešinskis A., Brahmanis A. Optimal control strategy of air handling unit for different microclimates in working and swimming areas of a swimming pool hall. - Proc. Int. Conference „Indoor Air 2008”, Copenhagen (Denmark), 17-22.08.2008. – 8 p.