

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

Jurģis ZEMĪTIS

Doktora studiju programmas «Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija» doktorants

**TELPU GAISA KVALITĀTES ANALĪZE
UN PROGNOZĒŠANAS METODOLOĢIJA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
A. BORODIŅCS

**RTU Izdevniecība
Rīga 2015**

Zemītis J. Telpu gaisa kvalitātes analīze un prognozēšanas metodoloģija. Promocijas darba kopsavilkums. — R.: RTU Izdevniecība, 2015, 21 lpp.

Iespiests saskaņā ar SGŪT institūta 2015. gada 17. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 2/15



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 978-9934-10-688-0

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. gada 29. maijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 16/20, 250. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Egīls Dzelzītis
Rīgas Tehniskā universitāte

Pētniece, Dr. sc. ing. Kristina Ļebedeva
Fizikālās enerģētikas institūts

Profesore, Dr. sc. ing. Lina Seduikyte
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Jurģis Zemītis(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 48 zīmējumi un ilustrācijas, kopā — 96 lappuses. Literatūras sarakstā ir 90 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS	5
1. VENTILĀCIJAS SISTĒMU APRĒĶINS — AKTUĀLĀS TENDENCES	6
1.1. LIETOTĀS METODES VENTILĀCIJAS GAISA DAUDZUMA APRĒĶINAM.....	6
1.2. CO ₂ KONCENTRĀCIJA KĀ TELPAS GAISA KVALITĀTES INDIKATORS.....	7
1.3. RELATĪVAIS MITRUMS KĀ GAISA KVALITĀTES INDIKATORS.....	8
1.4. TELPU MITRUMA AVOTU ANALĪZE.....	8
1.5. MITRUMA STABILIZĒŠANA Telpā ESOŠAJOS MATERIĀLOS.....	9
2. IZSTRĀDĀTĀ METODE Telpas Gaisa Kvalitātes Parametru PROGNOZĒŠANAI	10
3. EKSPERIMENTĀLIE MĒRĪJUMI UN DATU ANALĪZE	11
3.1. CO ₂ PROGNOZĒŠANAS METODES VALIDĒŠANA.....	11
3.2. MATERIĀLU MITRUMA STABILIZĒŠANAS POTENCIĀLA MĒRĪJUMI.....	13
3.3. MĒRĪJUMI PAR MITRUMA IZDALĪŠANOS DRĒBĶU ŽĀVĒŠANAS PROCESĀ.....	14
3.4. KLIMATISKĀS KAMERAS MĒRĪJUMI PAR AUGU IZDALĪTO MITRUMU.....	15
3.5. KLIMATISKĀS KAMERAS MĒRĪJUMI PAR MITRUMA IZDALĪJUMIEM NO CILVĒKA.....	16
3.6. RELATĪVĀ MITRUMA PROGNOZĒŠANAS METODES VALIDĒŠANA.....	16
4. IZSTRĀDĀTĀS TELPU GAISA KVALITĀTES PROGNOZĒŠANAS METODES PRĶATISKĀ IZMANTOŠANA	18
4.1. LATVIJAS TIPVEIDA ĒKU VENTILĀCIJAS SISTĒMU ANALĪZE.....	18
4.2. CO ₂ KONCENTRĀCIJAS ANALĪZE UN PROGNOZĒŠANA PROJEKTĒJAMĀM ĒKĀM.....	20
SECINĀJUMI	21
PUBLIKĀCIJU SARAKSTS	22

IEVADS

Spēkā esošie lietotie normatīvi nosaka nepieciešamību ventilācijas gaisa daudzumu aprēķināt atbilstoši definētām gaisa apmaiņas kārtām atkarībā no telpas izmantošanas veida un komforta līmeņa, neņemot vērā to, ka ventilācijai ir jānodrošina noteikti telpas gaisa kvalitātes parametri. Tai pašā laikā būtu ieteicams katrā aplūkojamajā gadījumā noteikt optimālo ventilācijas gaisa daudzumu, lai nodrošinātu nepieciešamo gaisa kvalitāti, izmantojot minimālus gaisa daudzumus. Tādējādi tiktu samazināts enerģijas patēriņš ventilācijas sistēmu darbībai, kā arī ventilācijas sistēmas iekārtas būtu mazāka izmēra un līdz ar to — ekonomiski izdevīgākas. Vienlaikus šāda veida ventilācijas sistēmu dimensionēšana nodrošinātu pietiekamu svaigā gaisa daudzumu, lai novērstu «neveselo māju sindromu» vai arī noturētu iekštelpu gaisa kvalitātes parametrus iepriekš definētās robežās, kas būtu svarīgi dažāda tipa ēkām, piemēram, muzejiem un sporta hallēm.

Šajā jomā pētījumus veikuši zinātnieki *Carsten Rode, Anton TenWolde, Andris Krēsliņš, Iain S. Walker, Olli Seppänen, Kaisa Svennberg* u. c.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju, ar kuru varētu prognozēt galvenos telpu gaisa kvalitātes parametrus un noteikt optimālo ventilācijas gaisa daudzumu.

Promocijas darba galvenie **uzdevumi**:

- 1) izanalizēt esošās normas, kas regulē ventilācijas gaisa izvēli;
- 2) telpas gaisa kvalitātes parametru analīze un robežvērtību noteikšana, kas nodrošina pietiekamu gaisa kvalitāti pie samazināta ventilācijas gaisa daudzuma;
- 3) izpētīt telpu CO₂ un mitruma avotus, kā arī mijiedarbību starp ventilācijas apjomu, mitruma izdalījumiem un mitruma buferēšanu telpā esošajos objektos;
- 4) matemātiska modeļa izstrāde telpu gaisa kvalitātes parametru prognozēšanai atkarībā no ventilācijas apjoma, iekštelpu piesārņotājiem, ventilācijas gaisa parametriem un telpā notiekošajiem procesiem;
- 5) izstrādātās metodes validēšana, salīdzinot prognozētos un izmērītos telpas gaisa kvalitātes parametru lielumus;
- 6) pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, piedāvāt metodi optimāla ventilācijas gaisa daudzuma noteikšanai daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamajām mājām.

Zinātniskā novitāte: metodoloģija nepieciešamā ventilācijas gaisa daudzuma aprēķinam atbilstoši prasītajiem telpu gaisa kvalitātes parametriem, ietverot mitruma absorbciju/desorbciju iekštelpu objektos.

Praktiskais lietojums:

- 1) metode projektētājiem, pēc kuras noteikt optimālo ventilācijas gaisa daudzumu, kas nepieciešams, lai sasniegtu konkrētus telpas gaisa kvalitātes parametrus, vienlaikus samazinot enerģijas patēriņu;
- 2) iespēja ēku apsaimniekotājiem izmantot piedāvāto metodi telpas gaisa parametru dinamiskais prognozēšanai.

1. VENTILĀCIJAS SISTĒMU APRĒĶINS — AKTUĀLĀS TENDENCES

1.1. Lietotās metodes ventilācijas gaisa daudzuma aprēķinam

Ņemot vērā, ka cilvēki 80–90 % savas dzīves pavada iekštelpās, ir īpaši svarīgi nodrošināt labu un veselīgu telpu vidi. To panāk, izmantojot ēku klimatiskās sistēmas — ventilāciju, apkuri un gaisa kondicionēšanu. Tajā pašā laikā šīs sistēmas patērē lielu daļu kopējās izmantotās enerģijas, tādējādi sniedzot labu iespēju ietaupīšanai. Atbilstoši aprēķiniem ventilācijas sistēmas patērē 15 % līdz 25 % kopējās enerģijas mūsdienīgās, labi siltinātās ēkās. Tas nozīmē, ka, samazinot ventilācijas gaisa daudzumu, varētu ievērojami ietaupīt enerģiju, kā arī samazināt ventilācijas agregātu un gaisa vadu izmērus. Tajā pašā laikā nepietiekams ventilācijas gaisa daudzums var izraisīt dažādas veselības problēmas, paaugstināt korozijas un pelējuma sēnīšu rašanās risku un samazināt darba efektivitāti. Lai to novērstu, nepieciešams nodrošināt atbilstošus telpas gaisa kvalitātes parametrus, un to var panākt, precīzi aprēķinot ventilācijas gaisa daudzumu.

Patreiz tikai divi normatīvi Latvijā regulē ventilācijas gaisa daudzuma aprēķinu: noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 211-08 «Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami», kas nosaka nepieciešamo ventilācijas gaisa daudzumu atbilstoši telpu tipam un laukumam, un noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 231-03 «Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija», kas nosaka, ka minimālais ventilācijas gaisa daudzums ir 5 l/s, ja cilvēks ir vienīgais piesārņojuma avots. Līdzīga aina paveras, ja aplūko citu valstu normatīvus. Tie nosaka ventilācijas gaisa daudzumu vai nu atbilstoši ēkas, vai telpas tipam, nosakot nepieciešamo gaisa daudzumu l/s/m², vai arī dod atbilstošus norādījumus par ventilācijas daudzumu l/s uz cilvēku. Veikto nepieciešamā ventilācijas gaisa daudzuma salīdzināšanu biežāk sastopamajiem nedzīvojamo telpu tipiem atbilstoši dažādiem valstu normatīviem skatīt 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Nepieciešamais ventilācijas gaisa daudzums nedzīvojamām ēkām pēc dažādu valstu normatīviem

Telpas tips	Valsts/Normatīvs		
	Latvija/CR 1752	ASV/ASHRAE 62.1	Somija/D2
	Pieplūdes/Nosūces gaisa daudzums		
Indiv. ofiss	0,8; 1,4 vai 2,0 l/s/m ²	0,3 l/s/m ² + 2,5 l/s/pers.	1,5 l/s/m ²
Atvērts ofiss	0,7; 1,2 vai 1,7 l/s/m ²		
Konferenču zāle	2,4; 4,2 vai 6,0 l/s/m ²	0,3 l/s/m ² + 2,5 l/s/pers.	4 l/s/m ² + 8 l/s/pers.
Klases telpa	2,4; 4,2 vai 6,0 l/s/m ²	0,6 l/s/m ² + 5 l/s/pers.	3 l/s/m ² + 6 l/s/pers.

Lai gan aprēķinu metodes, kas ņem vērā tikai cilvēku skaitu vai telpu platību, ir ātras un neprasa daudz darba, tās nesniedz informāciju par gaidāmo telpas gaisa kvalitāti. Līdz ar to nevar tikt uzskatītas par precīzām, jo katrā atsevišķā situācijā ir dažādi lielumi — dzīvojamā platība uz vienu cilvēku, āra gaisa kvalitāte, iekštelpu piesārņotāji, pieļaujamais piesārņojuma līmenis, telpas tilpums utt. Visi šie faktori ietekmē svaigā gaisa daudzumu, kas būtu nepieciešams, lai nodrošinātu labu telpas gaisa kvalitāti. Galvenie raksturlielumi, kas definē telpas gaisa kvalitāti, ir CO₂ līmenis un relatīvais mitrums. Tādējādi vispirms ir nepieciešams noteikt šo lielumu pieļaujamās robežvērtības un iespējamās izdalījuma lielumus telpās, lai izvēlētos precīzu ventilācijas daudzumu katrā konkrētajā situācijā.

1.2. CO₂ koncentrācija kā telpas gaisa kvalitātes indikators

Par visplašāk izmantoto parametru, kas raksturo telpas gaisa kvalitāti, tiek izmantota CO₂ koncentrācija. Viena no šīs metodes priekšrocībām ir salīdzinoši vieglā tās mērīšana augsto koncentrāciju dēļ, parasti starp 350 ppm un 3000 ppm. Vēl viens pluss izmantot CO₂ koncentrāciju kā indikatoru ir tas, ka to parasti ietekmē tikai telpā esošās personas. Straujas koncentrācijas izmaiņas ir dzīvu būtņu — cilvēku, mājdzīvnieku — tuvumā elpošanas procesiem un sviedru izdalīšanas dēļ. Tomēr pati CO₂ koncentrācija parasti nav iemesls sūdzībām. Tieši CO₂ līmenis norāda, ka citi piesārņojuma līmeņi telpā varētu būtu paaugstināti, un tas savukārt izsauc cilvēku neapmierinātību ar gaisa kvalitāti.

Latvijā spēkā esošie normatīvi nereglemantē CO₂ līmeni telpās, līdz ar to, lai noteiktu tā pieļaujamo līmeni, ir nepieciešams piemērot citus standartus un normatīvus. Visplašāk izplatītākais uzskats definē, ka CO₂ koncentrācijai jābūt zem 1000 ppm. Citi pētījumi norāda, ka jau pie koncentrācijas 800 ppm var izpausties tādi simptomi kā galvassāpes, nogurums, koncentrācijas zudums, kā arī acu un aizdegunes jutīgums.

Jāatzīmē, ka CO₂ koncentrācija telpās ir tieši atkarīga no tās koncentrācijas āra gaisā. Atkarībā no vietas tā var svārstīties starp 350 ppm lauku apvidū līdz 700–800 ppm vidēji piesārņotā pilsētā. Šis ir iemesls, kāpēc pareizāk ir nevis definēt absolūti pieļaujamo CO₂ koncentrāciju telpā, bet gan tās atļauto pieaugumu attiecībā pret āra gaisu, kā to dara daži normatīvi, piemēram, Eiropas standarts CEN EN 13779:2007.

1.3. Relatīvais mitrums kā gaisa kvalitātes indikators

Atšķirībā no CO₂ koncentrācijas, kurai ir noteikta tikai augšējā robeža, relatīvajam mitrumam ir jābūt noteiktas robežas ietvaros, lai nodrošinātu labu un nekaitīgu iekštelpu klimatu. Tas ir tādēļ, ka paaugstināts mitrums var izsaukt pelējuma sēnīšu augšanu, kas bojā ēkas konstrukcijas, kā arī palielināt cilvēku saslimšanu risku. Arī pazemināts mitrums var negatīvi ietekmēt cilvēka veselību, kā arī veicināt acu sausumu.

Vienīgais normatīvs, kas nosaka pieļaujamo relatīvo mitrumu Latvijā, ir Ministru kabineta noteikumi MK 359 «Darba aizsardzības prasības darba vietās». Tas reglamentē, ka relatīvajam mitrumam visa gada garumā ir jābūt robežās starp 30 % un 70 %.

Praksē visbiežāk tiek uzskatīts, ka zemākais pieļaujamais relatīvais mitrums ir 30 %, jo tas nodrošina nekaitīgu vidi un pastiprināti neizsauc veselības problēmas. Ja relatīvais mitrums ir zem 30 %, sausuma dēļ var būt nepatīkamas sajūtas acīs un augšējos elpceļos, ķermeņa āda kļūst sausāka, kā arī var rasties vispārēja diskomforta sajūta. Savukārt maksimāli pieļaujamā augšējā relatīvā mitruma vērtība telpā ir noteikta ar robežšķirtni, pēc kuras strauji pieaug sēnīšu un pelējuma rašanās risks. Atbilstoši pētījumiem tiek uzskatīts, ka sēnīšu augšanas risks pastāv, ja telpas konstrukciju virsmas mitrums vairākas dienas pēc kārtas ir virs 80 %, bet korozijas risks pieaug jau pie vairāku dienu konstrukciju mitruma virs 60 %.

1.4. Telpu mitruma avotu analīze

Lai prognozētu relatīvo mitrumu telpā, vispirms jānosaka āra gaisa mitrums, jo tas caur ventilāciju tiešā veidā ietekmē relatīvā mitruma līmeni telpās. Ir jāatzīmē, ka mitruma saturs āra gaisā ir ļoti mainīgs un Latvijā tas var būt robežās no 0,002 kg/kg ziemā līdz aptuveni 0,015 kg/kg vasarā. Tas ir stipri atkarīgs no ģeogrāfiskā izvietojuma, Latvijā tas ir salīdzinoši augsts Baltijas jūras tuvuma dēļ.

Daži no mitruma avotiem telpās ir šādi: cilvēki, augi, grīdas un trauku mazgāšana, veļas žāvēšana, mitruma izdalījumu no konstrukcijām, ēdiena gatavošana, duša un vanna, kā arī mitruma difūzija caur norobežojošām konstrukcijām. Vairāki esošie pētījumi sniedz informāciju par šo mitruma avotu lielumu.

Atbilstoši šiem pētījumiem cilvēka mitruma izdalījumi ir novērtēti robežās starp 30 g/h un 70 g/h. Ir pieņemts, ka kaķi izdala ap 2 g/h, bet vidēja lieluma suņi — ap 7 g/h. Vēl viens mitruma avots telpās ir duša un vanna. Piecu minūšu laikā lietojot dušu, izdalās starp 0,11 kg un 0,23 kg ūdens tvaiku. Trauku mazgāšanai četru cilvēku ģimenē izdalās ap 0,2 kg un 0,3 kg mitruma. Vienas pilnas veļas mašīnas drēbju žāvēšanas laikā telpā pievadītā mitruma daudzums tiek novērtēts kā 2,0 kg līdz 4,7 kg. Pētījumi ziņo, ka grīdas mazgāšanas laikā izdalās 0,005 kg/m² līdz pat 0,15 kg/m² ūdens tvaiku. Savukārt augi izdala starp 39 g/dienā un 101 g/dienā jeb 5 g/dienā — 20 g/dienā (atkarībā no auga lieluma).

Papildus jau aprakstītajiem mitruma avotiem jāatzīmē arī tādi, kas nav atkarīgi no telpā esošajiem procesiem un nevar tikt kontrolēti. Viens no šādiem ir mitruma izdalīšanās no ēkas konstrukcijas elementiem pēc būvniecības beigām vai caur mitriem pamatiem. Atbilstoši esošajiem pētījumiem tie var sniegt ievērojamu pienesumu un pilnīgi nomākt pārējos mitruma avotus. Tie ir atkarīgi no būvniecības kvalitātes, kā arī valdošajiem vējiem un to stipruma. Literatūrā pieejamie dati liecina, ka tie var būt robežās no 0 kg/dienā līdz pat 105 kg/dienā.

1.5. Mitruma stabilizēšana telpā esošajos materiālos

Daudzas no iepriekš minētām aktivitātēm (piemēram, dušas izmantošana, ēdiena gatavošana vai grīdas mazgāšana) izdala mitrumu ļoti straujā un koncentrētā veidā, bet īsos periodos. Tajā pašā laikā esošie pētījumi rāda, ka šis izdalītais mitrums tiek akumulēts higroskopiskajos materiālos, kas atrodas telpās, gan uz to virsmām, gan tilpumā, un tikai vēlāk, pēc vides relatīvā mitruma samazināšanas, atdots telpas gaisam. Tādējādi telpā vienmērīgi (nevis momentāni) atdotais mitrums ir jāņem vērā, veicot ilgtermiņa mitruma prognozēšanu. Tomēr šis uzdevums ir komplicēts, jo bieži ēkas projektēšanas stadijā ir neiespējami paredzēt, kādi materiāli tiks izvietoti telpā, līdz ar to mitruma stabilizēšanas potenciāls ir nenoteikts un var mainīties atkarībā no materiālu mitruma ietilpības, ūdens tvaiku caurlaidības, blīvuma un mitruma izmaiņu periodiskuma. Līdz ar to ir nepieciešams veikt pieņēmumus par mitruma stabilizēšanas potenciāla vērtību biežāk sastopamajiem materiālu veidiem un pēc šo datu ieguves piedāvāt standarta vērtību atkarībā no ēkas veida, telpas tipa un iespējamā interjera risinājuma.

Esošie pētījumi parāda materiālu mitruma absorbcijas-desorbcijas īpašības svarīgumu un ietekmi uz ēkas telpu gaisa mitruma satura stabilizēšanu, kā arī enerģijas taupīšanas potenciālu, kas var sasniegt pat 30 %. Šāds nozīmīgs enerģijas ietaupījums var tikt sasniegts, izmantojot higroskopiskos materiālus kopā ar precīzi kontrolētu un aprēķinātu AVK sistēmu

darbību. Tādējādi gaisa apmaiņas daudzums var tikt samazināts par 30–40 %, kas nozīmē enerģijas samazinājumu 10 % līdz 17 % ziemas laikā.

2. IZSTRĀDĀTĀ METODE Telpas Gaisa Kvalitātes PARAMETRU PROGNOZĒŠANAI

Telpas gaisa kvalitātes parametru prognozēšanas metodes izstrāde balstās uz masas balansa principu. Tas vispārīgi nosaka, ka visa masa, kas ieiet sistēmā, ir vai nu jāizvada no tās, vai arī jāakumulē pašā sistēmā. Lai teorētiski prognozētu dinamiski mainīgo telpas gaisa parametru lielumus, tika izstrādāts matemātisks modelis, kas balstās uz ventilācijas gaisa daudzumu, telpas tilpumu, piesārņojuma daudzumu un āra gaisa parametriem. Lai iegūtu izteiksmi, kas apraksta CO₂ koncentrāciju telpā jebkurā momentā, jāveic šādas darbības (skat. izteiksmi (2.1.) līdz (2.8.)):

$$\frac{dM_{CO_2}}{dt} = CO_2_{outdoors} + CO_2_{produced} - CO_2_{exhausted} . \quad (2.1.)$$

Zinot, ka masa var tikt izteikta kā koncentrācijas un tilpuma reizinājums, varam aizstāt izteiksmes (2.1.) kreiso pusi $\frac{dM_{CO_2}}{dt}$ ar $\frac{Vdc_{in}}{dt}$ un labajā pusē varam izteikt saražoto CO₂ kā reizinājumu starp cilvēku skaitu un viena cilvēka izdalīto CO₂. Tādējādi iegūstot:

$$\frac{Vdc_{in}}{dt} = nVc_{out} + n_{pers}q - nVc_{in} , \quad (2.2.)$$

kur: V — telpas tilpums, m³;
 n — gaisa apmaiņas kārtas;
 c_{out} — CO₂ koncentrācija āra gaisā, kg/m³;
 n_{pers} — cilvēku skaits telpā;
 q — CO₂ ko saražo viens cilvēks, kg/h;
 c_{in} — CO₂ koncentrācija telpas gaisā, kg CO₂/m³.

Šādi mēs izdalām abas puses ar V un iznesam parametru n pirms iekavām:

$$\frac{dc_{in}}{dt} = -n(c_{in} - c_{out}) + \frac{n_{pers}q}{V} . \quad (2.3.)$$

Tad mēs aizstājam $(c_{in} - c_{out})$ ar y , kas dod $\frac{dy}{dt} = \frac{dc_{in}}{dt} - \frac{dc_{out}}{dt}$, bet tā kā c_{out} ir

konstants, tad $\frac{dc_{out}}{dt} = 0$ un $\frac{dy}{dt} = \frac{dc_{in}}{dt}$. Šo ievieto izteiksmes (2.3.) kreisajā pusē, kas dod:

$$\frac{dy}{dt} = -ny + \frac{n_{pers}q}{V} . \quad (2.4.)$$

Pārkārtojot iepriekšējo izteiksmi un integrējot pēc laika no $t = 0$ līdz $t = t$, mēs iegūstam:

$$\int_{y(0)}^{y(t)} \frac{dy}{\left(\frac{n_{pers.q}}{V}\right) - n \cdot y} = \int_0^t dt. \quad (2.5.)$$

Kas rezultējas šādi:

$$\ln\left(\frac{n_{pers.q}}{V} - ny(t)\right) - \ln\left(\frac{n_{pers.q}}{V} - ny(0)\right) = -nt. \quad (2.6.)$$

Aizstājot y ar sākotnējo izteiksmi un zinot, ka sākuma laikā $t = 0$ CO₂ koncentrācija telpas gaisā ir C_0 , mēs varam iegūt šādu izteiksmi:

$$\ln\left(\frac{n_{pers.q}}{V} - n(c_{in} - c_{out})\right) - \ln\left(\frac{n_{pers.q}}{V} - n(c_0 - c_{out})\right) = -nt. \quad (2.7.)$$

Izmantojot logaritmu starpības īpašību, eksponējot abas izteiksmes puses un pārnesot mainīgos, lai izteiktu c_{in} , mēs varam iegūt galīgo izteiksmi, kas izsaka dinamiski mainīgo CO₂ koncentrāciju telpas gaisā:

$$c_{in}(t) = c_{out} + (c_0 - c_{out})e^{-nt} + (1 - e^{-nt}) \frac{n_{pers.q}}{nV}. \quad (2.8.)$$

Teorētiski līdzīgu principu varētu lietot, lai noteiktu telpas mitruma saturu.

3. EKSPERIMENTĀLIE MĒRĪJUMI UN DATU ANALĪZE

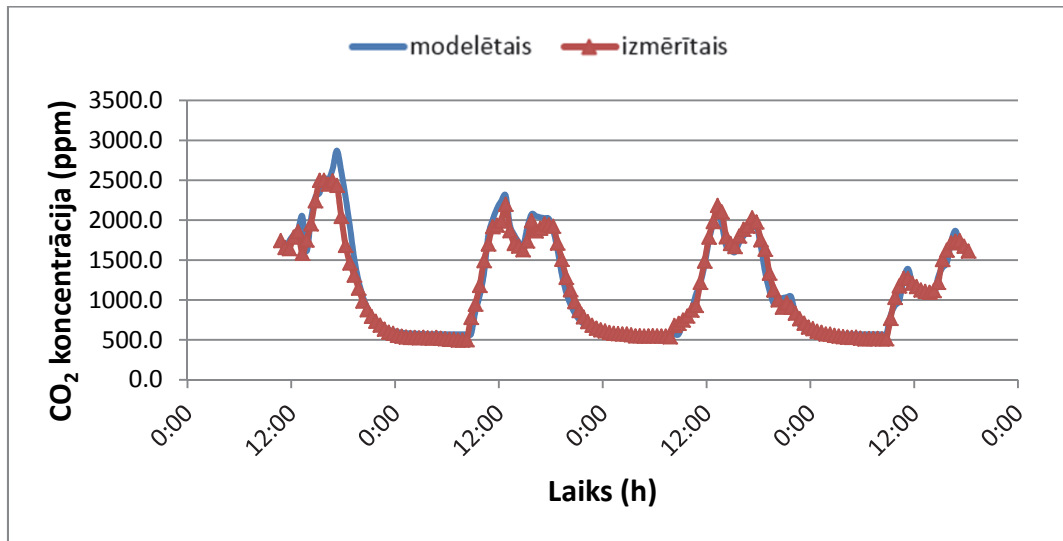
3.1. CO₂ prognozēšanas metodes validēšana

Izstrādātās CO₂ koncentrācijas prognozēšanas metodes validēšanai tika veikti mērījumi gan reālās ēkas, gan klimatiskajā kamerā. Metodes validācijas process sevī ietvēra izmērīto un teorētiski prognozēto rezultātu salīdzinājumu. Reālo objektu mērījumi tika veikti divu dažādu funkciju ēkās ar atšķirīgu cilvēku noslogotību — dzīvojamajās un ofisa tipa. Katrai ēkai mērījumi tika atkārtoti divas reizes.

Aplūkotā daudzstāvu dzīvojamā ēka ir tipveida padomju laiku bloku māja, būvēta pagājušā gadsimta 70. gados. Ventilācijas sistēma šajā ēkā ir dabiska veida ar pieplūdes gaisu cauri logiem un konstrukciju nepilnībām, nosūce ir cauri ventilācijas kanāliem tualetē, vannasistabā un virtuvē. Apskatītās guļamistabas telpa ir vienas personas apdzīvota laikā no plkst. 18.30 līdz 10. Āra gaisa CO₂ koncentrācija mērījuma laikā bija 570 ppm.

Ofisa ēka ir koka tipa, būvēta pagājušā gadsimta 60. gados, nesen renovēta. Ofisam nav mehāniskās ventilācijas sistēmas, bet līdzīgi kā dzīvojamajai ēkai ir dabiskā ventilācijas sistēma ar pieplūdi cauri šķirbām loga rāmī un nosūci sanitārajā mezglā. Ofiss ir noslogots katru darba dienu no plkst. 9 līdz 19 ar mainīgu cilvēku skaitu tajā atkarībā no konkrētās stundas,

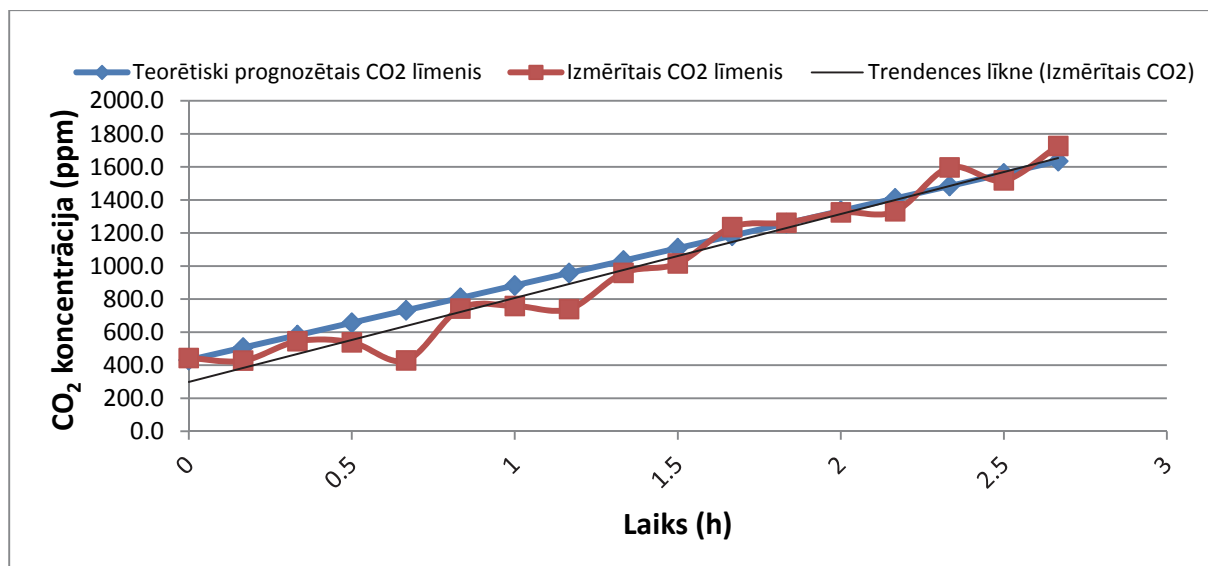
maksimālais cilvēku skaits — 6, vidējais — 4 personas. Izmērītā āra gaisa CO₂ koncentrācija — 580 ppm.



3.1. att. Prognozētā un izmērītā CO₂ koncentrācija ofisa telpā.

Iegūtie rezultāti parādīja, ka piedāvātā metode dod precīzus rezultātus CO₂ koncentrācijas prognozēšanai (skat. 3.1. att.) ar vidējo visu mērījumu precizitāti 93 %.

Bez mērījumiem īstās ēkā pēc analoga principa metode tika validēta arī kontrolētos apstākļos klimatiskajā kamerā, lai iegūtu precīzākus rezultātus. Eksperimenta laikā testa kamerā četras stundas atradās viena persona. Pirmie rezultāti rādīja, ka CO₂ koncentrācija netiek prognozēta precīzi. Tajos tika pieņemts, ka izdalītais CO₂ daudzums no personas ir 0,02 m³/h, kas ir atbilstoši esošajiem pētījumiem. Tomēr pēc dažādu vērbu pārbaudes tika secināts, ka, pieņemot, ka izdalītais CO₂ daudzums ir 0,012 m³/h, prognozētie rezultāti ļoti tuvu atspoguļo izmērītās vērtības (skat. 3.2. att.). Līdz ar to var pieņemt, ka konkrētā persona, šajos apstākļos izdalīja mazāk CO₂ nekā pieņemts esošajā literatūrā.



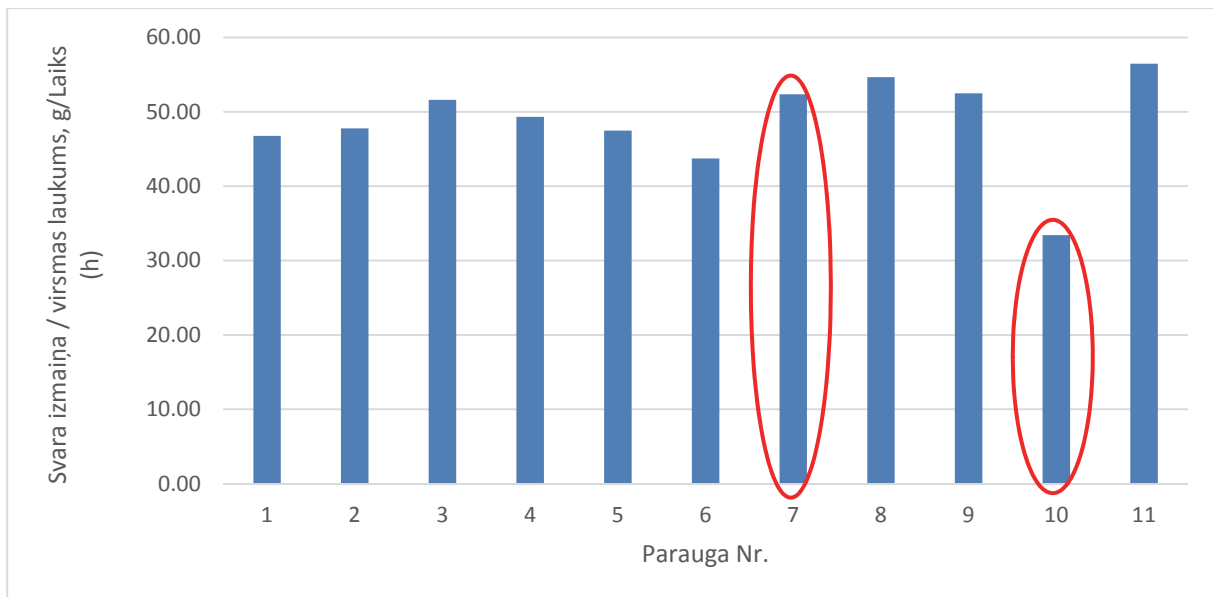
3.2. att. Prognozētā un izmērītā CO₂ koncentrācija klimatiskajā kamerā ar laboto CO₂ izdalīšanās daudzumu.

3.2. Materiālu mitruma stabilizēšanas potenciāla mērījumi

Lai veiktu analīzi par mitruma absorbēšanas iespējām plaši lietotos mēbeļu materiālos, tikai izvēlēti vienpadsmit paraugi. Šie paraugi bija veidoti no saplākšņa tipa materiāla, kuriem vai nu visas vai divas virsmas ar lielākajiem laukumiem bija laminētas. Tie atspoguļo plaši lietotu materiālu veidu, ko izmanto mājāsaimniecībās, ka arī mācību iestādēs kā galdu un krēslu materiālu.

Eksperimenta laikā aplūkotie materiālu paraugi tika novietoti gaisa necaurlaidīgā klimatiskajā kamerā ar neeksistējošu gaisa apmaiņu un kontrolētu mitruma un temperatūras līmeni. Mitruma saturs telpas gaisā tika datēts, izmantojot mitruma mērītāju, bet mēbeļu paraugos — ar to svēršanu. Dati par paraugu svara izmaiņu tika pierakstīti ik pēc dažām dienām. Smagā koka struktūras paraugu mitruma stabilizēšanas potenciāla novērtēšanai temperatūra klimatiskajā kamerā tika uzturēta $+23,0 \pm 2$ °C, relatīvais mitrums — 60 ± 5 %.

Eksperimenta laikā tika analizēta kopējā materiālu mitruma ietilpība, kā arī mitruma satura izmaiņu ātrums. Materiāli tikai turēti klimatiskajā kamerā tik ilgi, kamēr to masa turpināja nozīmīgi pieaugt. Lai veiktu novērtējumu par to, kā relatīvais mitrums ietekmē materiālus un otrādi, ir jānosaka materiālu paraugu relatīvā masas izmaiņa un jāaprēķina masas izmaiņas lielums attiecībā pret virsmas laukumu, jo caur to notiek mitruma iesūkšanās paraugā.



3.3. att. Attiecība starp materiālu paraugu svara izmaiņu un to virsmas laukumu.

Kā redzams 3.3. att., masa pēfītajiem paraugiem eksperimenta laikā izmainījās no 40 g/m^2 līdz 50 g/m^2 . Izmaiņas lielums visiem aplūkotajiem paraugiem ir ļoti līdzīgs, izņemot vienu paraugu, kuram visas puses bija laminētas. Pirms eksperimenta veikšanas tika sagaidīts, ka paraugiem ar visām laminētām pusēm (atzīmēti ar sarkanu) masas izmaiņas būs mazākas, jo tie uzsūks mazāk mitruma. Tomēr rezultāti nav viennozīmīgi, jo viens no šiem paraugiem demonstrē lielāku pretestību vides mitrumam, bet otrs absorbēja tieši tikpat daudz ūdens tvaiku kā nelaminētie paraugi.

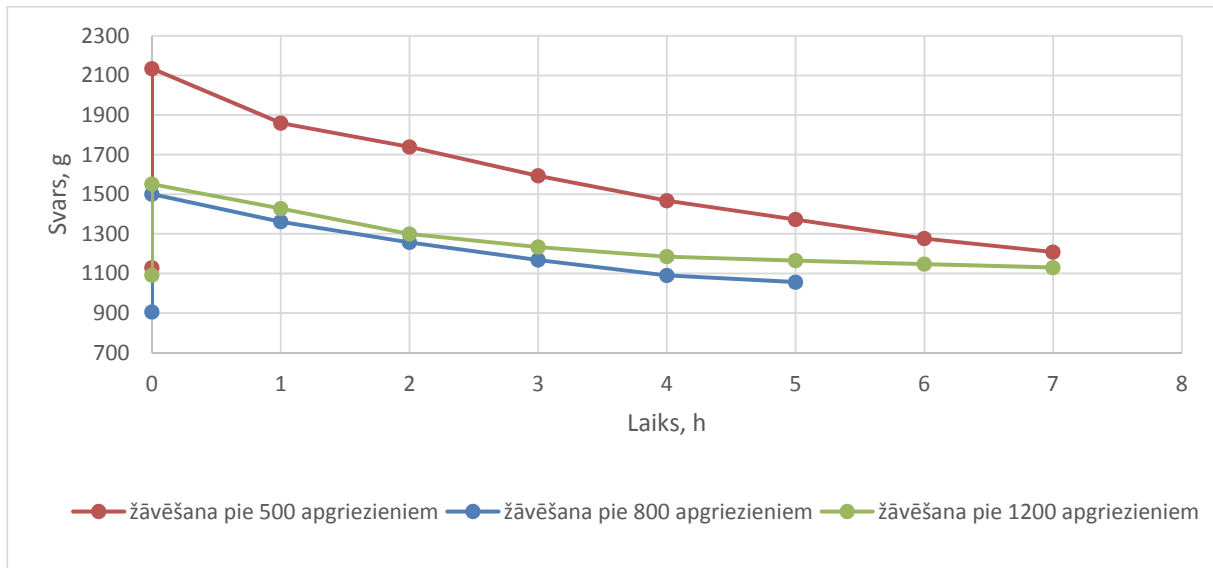
3.3. Mērījumi par mitruma izdalīšanos drēbju žāvēšanas procesā

Promocijas darbā, lai novērtētu dažus no iespējamajiem telpas mitruma avotiem, tika veikti mērījumi par mitruma izdalīšanos no drēbju žāvēšanas, augiem un cilvēka. Lai novērtētu izdalītā mitruma telpas gaisā dabiskā drēbju žāvēšanas procesā, pēc mehāniskās žāvēšanas veļas mašīnā tika veikti mērījumi pieciem dažādiem apģērbiem — džinsu tipa garajām biksēm, kokvilnas apakšveļai, džemperim, T-kreklam un uzvalka tipa kreklam. Drēbes tika mazgātas tipiskā automātiskajā veļas mašīnā ar mehānisko žāvēšanu (1200, 800 un 500 apgriezieni minūtē). Pirms un pēc mazgāšanas drēbes tika svērtas. Žāvēšana notika dabiskā veidā dzīvoklī pie temperatūras $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ un relatīva mitruma aptuveni 55 %.

Salīdzinot rezultātus par trim dažādiem mehāniskās žāvēšanas procesiem pie 1200, 800 un 500 apgriezieniem, var secināt, ka vidēji relatīvā starpība drēbju paraugu svarā tieši pēc mazgāšanas, salīdzinot ar svaru pirms mazgāšanas, ir stipri atkarīga no apgriezienu ātruma. Svara izmaiņas attiecīgi mainās no 42 % uz 66 % un 89 %. Ir novērojamas atšķirības arī

paraugu relatīvajā svara izmaiņā atkarībā no drēbju materiāla, un tās ir robežās no 50 % līdz pat 90 %. Lielākais masas pieaugums ir novērojams T-kreklam, bet mazākais — parastajam kreklam. Kopumā var secināt, ka, ja apģērbs ir mazāks izmērā un izgatavots no kokvilnas vai cita mitrumu uzsūcoša materiāla, masas procentuālās izmaiņas ir lielākas.

Visš mitrums, kas ir saglabājies pēc mehāniskās žāvēšanas, tiek palēnām atdots telpas gaisam dabiskās žāvēšanas procesa laikā. Rezultāti, kas parāda dabiskās žāvēšanas dinamiku pēc mehāniskās žāvēšanas ar dažādu apgriezīenu ātrumu, ir parādīts 3.4. attēlā.



3.4. att. Drēbju svara izmaiņa laikā dabiskā žāvēšanā pēc automātiskās mazgāšanas.

Lai noteiktu kopējo izdalīto mitruma daudzumu drēbju mazgāšanas procesā, ir nepieciešams noteikt, cik daudz drēbju katru nedēļu mazgā viena persona. Zinot, ka vidējās veļas mašīnas ietilpība ir 7 kg un vidējais svara pieaugums pēc mazgāšanas ir 66 %, var noteikt, ka kopējais pieaugums nedēļā būs 9240 g jeb aptuveni 1320 g/dienā, ja nedēļā tiek izmazgātas divas pilnas veļasmašīnas.

3.4. Klimatiskās kameras mērījumi par augu izdalīto mitrumu

Lai noteiktu augu izdalītā mitruma daudzumu, tika veikti divi eksperimentāli mērījumi. Pirmajā tika mērīts mitruma daudzuma pieaugums klimatiskajā kamerā, ja tajā novieto trīs augus, bet otrajā — ja ievieto sešus augus. Visi augi ir vidēja izmēra. Eksperimenta laikā tika datēta temperatūra un relatīvais mitrums.

Kopējā mitruma satura izmaiņas klimatiskās kameras gaisā starp testa beigu un sākuma stāvokli tika noteiktas, lai aprēķinātu augu izdalītā mitruma daudzumu. Pirmā eksperimenta rezultāti rādīja, ka sākotnējais mitruma saturs bija 175 g, bet testa beigās tas bija pieaudzis līdz 245,3 g. Tādējādi var noteikt, ka vidējais pieaugums bija tikai 4,7 g/dienā. Pieņemot, ka visi trīs

augi izdala aptuveni vienādu mitruma daudzumu, jo ir līdzīga izmēra, viena auga izdalītais mitruma daudzums būtu 1,57 g/dienā. Otrajā eksperimentā (ar sešiem augiem) iegūtie rezultāti rādīja, ka piecu dienu periodā kopējais mitruma saturs ir pieaudzis par 84,2 g — no 205,7 g sākumā līdz 289,9 g mērījumu beigās. Tas nozīmē, ka vidējais pieaugums ir 16,84 g/dienā jeb 0,7 g/h. Pieņemot, ka visi augi ir līdzīgi, katrs no tiem izdalīja 2,8 g/dienā jeb 0,12 g/h.

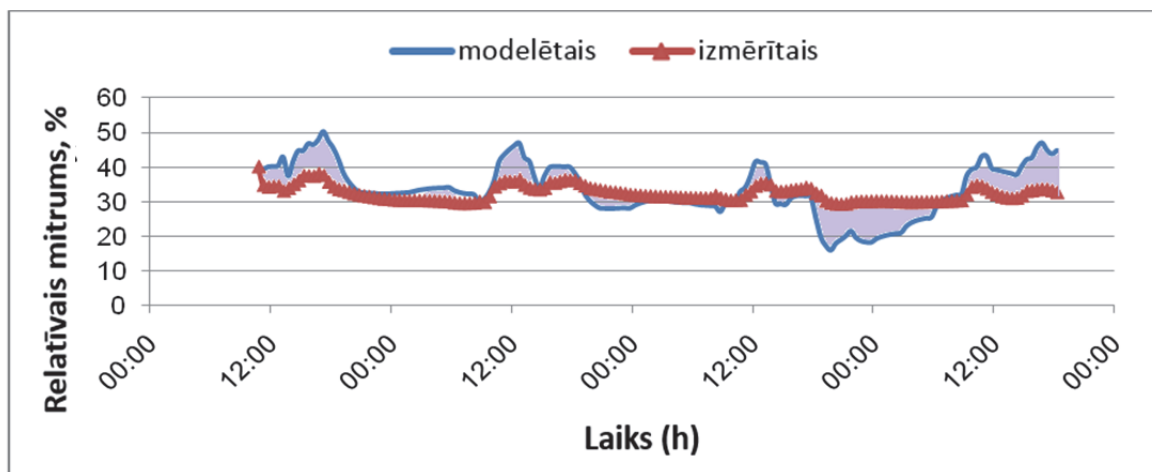
3.5. Klimatiskās kameras mērījumi par mitruma izdalījumiem no cilvēka

Lai verificētu literatūrā atrodamo informāciju par mitruma izdalīšanos daudzumu no cilvēka tika veikts mērījums klimatiskajā kamerā. Šī testa laikā kamerā atradās viena persona uz četrām stundām. Rezultāti parādīja, ka aptuveni pirmo pusstundu mitruma saturs gaisā bija nemainīgs. To varētu skaidrot ar to, ka telpā atradās dažādi objekti, kā galds, krēsls, kā arī drēbes uz cilvēka. Pēc šī stabilizācijas perioda objekti sasniedza balansa līmeni ar pieaugošo telpas gaisa mitrumu un tālākā eksperimenta gaitā izdalītais mitrums nonāca tieši gaisā. Ņemot šo vērā, patiesais izdalītā mitruma daudzums var tikt aprēķināts sākot no pirmās stundas pēc testa uzsākšanas. Aprēķinātais izdalītā mitruma daudzums no personas ir 20.94 g/h. Salīdzinot to ar esošajiem datiem, kuri norāda, ka cilvēks izdala 30 g/h līdz pat 120 g/h ar vidējo vērtību 50 g/h var secināt, ka mūsu iegūtā vērtība ir par 1.5 līdz 5 reizēm mazāka.

3.6. Relatīvā mitruma prognozēšanas metodes validēšana

Piedāvātās relatīvā mitruma prognozēšanas metodes validēšana tiek veikta, izmantojot datus, kas fiksēti tajās pat ēkās, kurās tika veikti CO₂ koncentrācijas mērījumi. Prognozēšanai vispirms tika lietots tas pats princips, kas CO₂ gadījumā, atbilstoši izteiksmei 2.8. Rezultāti ir atspoguļoti 3.5. attēlā.

Iegūtie rezultāti parādīja, ka šāda veida metode nav precīza relatīvā mitruma prognozēšanai. Relatīvā mitruma izmaiņu ātrums netiek atspoguļots pareizi. Patiesais izmērītais relatīvā mitruma līmenis ir stabilāks un nemainās tik strauji kā prognozētais. To var izskaidrot ar šādiem iemesliem. Pirmkārt, ir grūti precīzi noteikt visus iekšējos mitruma izdalījumus, jo tie ir ļoti mainīgi. Tomēr svarīgākais kļūdas cēlonis ir tas, ka telpas objekti ietekmē mitruma saturu, kas šajā gadījumā netika ņemts vērā.



— Atšķirība starp teorētiski prognozēto un izmērīto relatīvo mitrumu

3.5. att. Teorētiski prognozētais un izmērītais relatīvais mitrums ofīsā ar 3 personām un 30 m² platību laikā no 29.03.2011. līdz 01.04.2011.

Prognozēšanas metodes uzlabošanai ir nepieciešams izmainīti piedāvāto formulu, ietverot mitruma stabilizējošo efektu. Tas tiek panākts, pievienojot papildu koeficientus, kas ierobežo vienmērīgos un straujos mitruma izdalījumus. Tādējādi izteiksme tiek pārveidota šādi:

$$G_{in}(t) = G_{out} + (G_0 - G_{out})e^{-nt} + (1 - e^{-nt}) + \frac{(G_{smooth}a) + (G_{rapid}b)}{nV}, \quad (3.16.)$$

kur: V — telpas platība, m³;

n — gaisa apmaiņas reizes;

G_{out} — mitruma saturs āra gaisā, kgH₂O/m³;

G_{in} — mitruma saturs telpas gaisā, kgH₂O/m³;

G_0 — sākotnējais mitruma saturs telpas gaisā, kgH₂O/m³;

G_{smooth} — vienmērīgi pievadītais mitrums, kgH₂O/m³;

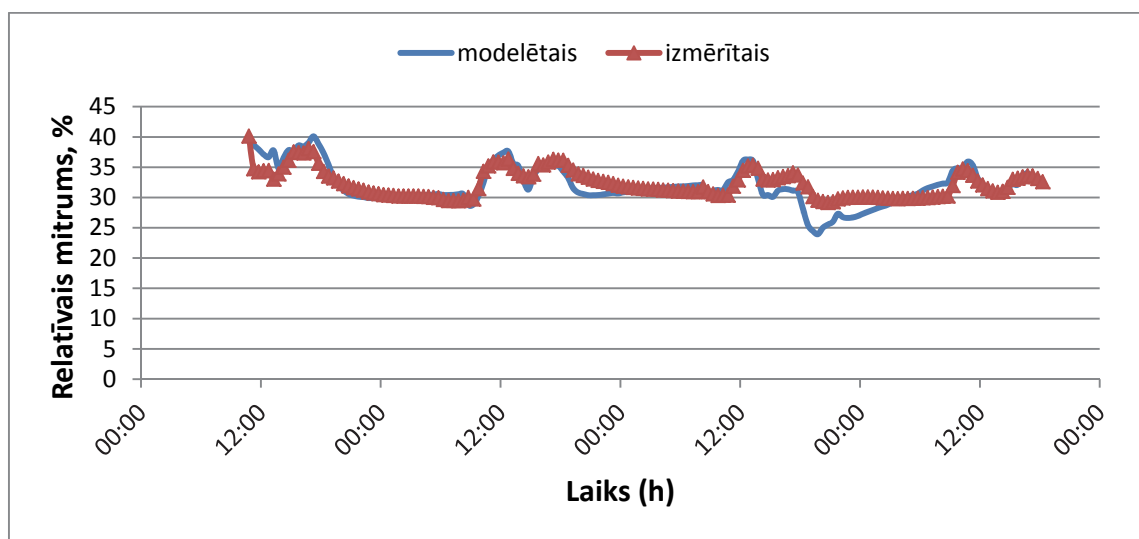
G_{rapid} — strauji pievadītais mitrums, kgH₂O/m³;

a — koeficients telpas materiālu ietekmei uz vienmērīgā mitruma pieplūdumu;

b — koeficients telpas materiālu ietekmei uz straujā mitruma pieplūdumu.

Konkrēti ierobežojošie koeficienti ir jānosaka katrā situācijā atsevišķi atkarībā no telpas tipa, iespējamajiem mitruma avotiem un telpā esošajiem materiāliem. Tālākajos aprēķinos mitruma pieplūdumi no ventilācijas, cilvēkiem, mājdzīvniekiem un augiem tiek uzskatīti par vienmērīga tipa, bet mitrums no grīdas mazgāšanas, dušas, drēbju žāvēšanas un trauku mazgāšanas — par strauja tipa. Lietotie koeficienti tika noteikti, izmantojot gan mēģinājumu un kļūdu metodi, gan ņemot vērā veiktos mērījumus par telpā esošo materiālu ietekmi uz mitruma stabilizāciju. Konkrētā gadījumā tie ir atšķirīgi guļamistabai un ofīsam, jo

telpu vide ir atšķirīga. Ofisa telpā tika pieņemts, ka koeficients vienmērīgā mitruma pieplūdumam ir 0,87, straujajam mitruma pieplūdumam — 0,50, savukārt guļamistabā — attiecīgi bija 0,84 un 0,74.



3.6. att. Prognozētais un izmērītais relatīvais mitrums ofisā, ņemot vērā mitruma stabilizāciju.

Kā rāda 3.6. att., piedāvātā metode ar papildu koeficientiem, kas ierobežo mitruma pieplūdumu, sniedz uzlabotu prognozēšanas precizitāti. Prognozētās relatīvā mitruma ātruma izmaiņas tiek atspoguļotas tuvāk patiesajām salīdzinot ar iepriekšējo versiju. Tomēr piedāvātā metode joprojām tiecas pārvērtēt mitruma pieplūdumu efektu. Lai tālāk uzlabotu prognozēšanas precizitāti, ir nepieciešams iegūt vairāk datu, pēc kuru apstrādes var piedāvāt standartizētus koeficientu lielumus atkarībā no telpu tipa, ko var lietot projektēšanas stadijā. Tas sniegtu iespēju relatīvi ātri un precīzi iepriekš prognozēt telpas relatīvo mitrumu.

4. IZSTRĀDĀTĀS TELPU GAISA KVALITĀTES PROGNOZĒŠANAS METODES PRKATISKĀ IZMANTOŠANA

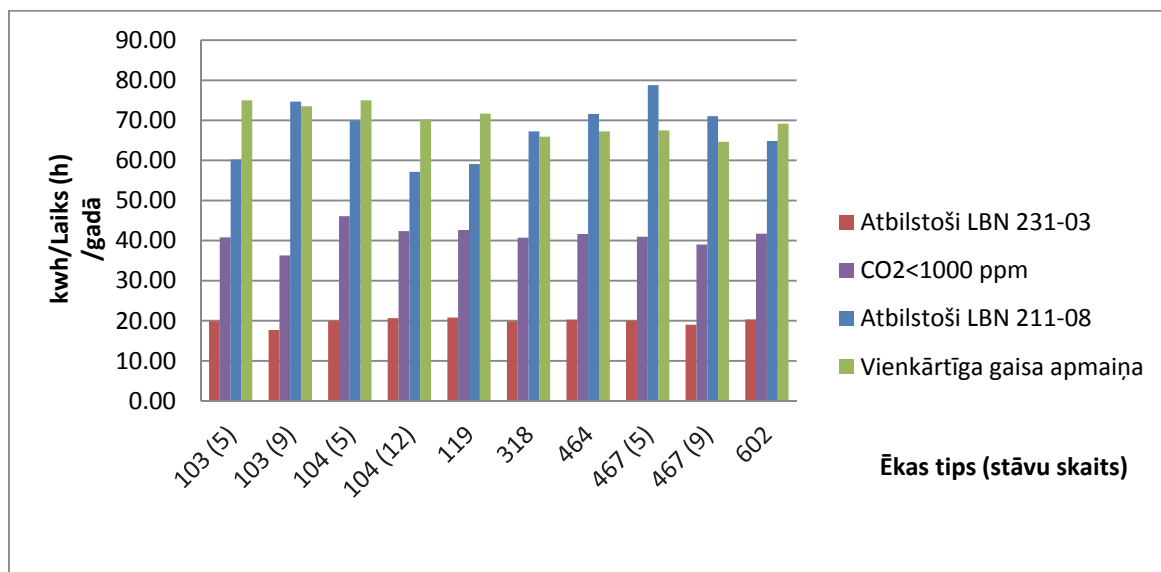
4.1. Latvijas tipveida ēku ventilācijas sistēmu analīze

Viens no izstrādātās telpu gaisa kvalitātes prognozēšanas metodes lietojumiem varētu būt tās izmantošana, lai noteiktu nepieciešamo ventilācijas gaisa daudzumu esošajām tipveida ēkām un potenciālo ekonomisko ietaupījumu. Latvijā lielākā daļa esošo ēku ir tipveida būves, kas celtas padomju laikos. Kopējā šādu ēku platība ir 20,79 miljoni m² no kopējās dzīvojamās platības, kas ir 54,6 miljoni m² 2009. gadā. Zinot, ka tuvākajā laikā šīm ēkām būs nepieciešama renovācija, tas var pavērt labu iespēju uzlabot arī ventilācijas sistēmas. Renovācijas laikā liela uzmanība ir jāpievērš tieši ventilācijai, jo šīm ēkām sākotnēji ir

paredzēta dabiska tipa ventilācija ar gaisa pieplūdi caur konstrukciju nepilnībām, kas renovācijas procesā tiek novērstas, tādējādi samazinot ventilācijas daudzumu.

Lai izmantotu izstrādāto metodi nepieciešamā ventilācijas gaisa daudzuma noteikšanai, tika izveidots izklājlapu tipa dokuments. Tajā ir jāievada aplūkojamajās ēkas novietojums, aprēķina āra gaisa temperatūra, kā arī vispārīgi dati par ēku. Šādi tiek aprēķināts ventilācijas gaisa daudzums pēc vairākām metodēm un salīdzināti rezultāti. Aprēķini tiek veikti, balstoties uz LBN 211-08 «Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami», LBN 231-03 «Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija», kā arī pieņemot vienkārtīgu gaisa apmaiņu un nosakot ventilācijas apjomu, lai nodrošinātu, ka CO₂ koncentrācija nepārsniedz 1000 ppm. Lai to noteiktu, tiek pieņemts, ka uz vienu iedzīvotāju ir 20 m² liela dzīvojamā platība.

Attēls 4.1. parāda iegūtos aprēķinu rezultātus par nepieciešamo siltuma daudzumu, kas ir vajadzīgs, lai uzsildītu iepriekš aprēķināto ventilācijas gaisa daudzumu pēc aplūkotajām metodēm. Rezultāti parāda, ka, regulējot ventilācijas gaisa daudzumu pēc CO₂ koncentrācijas gaisa daudzuma, nepieciešamo siltuma enerģiju tā uzsildei ir iespējams samazināt par aptuveni 40 % jeb līdz 41,24 kWh/m²/gadā vidēji (visa tipa ēkām). Tas var nodrošināt ievērojamus finansiālus ietaupījumus. Ja pieņemam, ka ventilācijas gaisa daudzums tiek samazināts pilnīgi visās ēkās līdz optimāli aprēķinātajam līmenim, šos ieguvumus var aprēķināt. Pieņemot, ka visa nepieciešamā siltuma enerģija tiek piegādāta no centralizētās siltuma sistēmas, un zinot, ka pašreizējās enerģijas izmaksas ir 0,06 EUR/kWh, kopējais ietaupītais naudas daudzums gadā būtu 32,69 miljoni EUR.



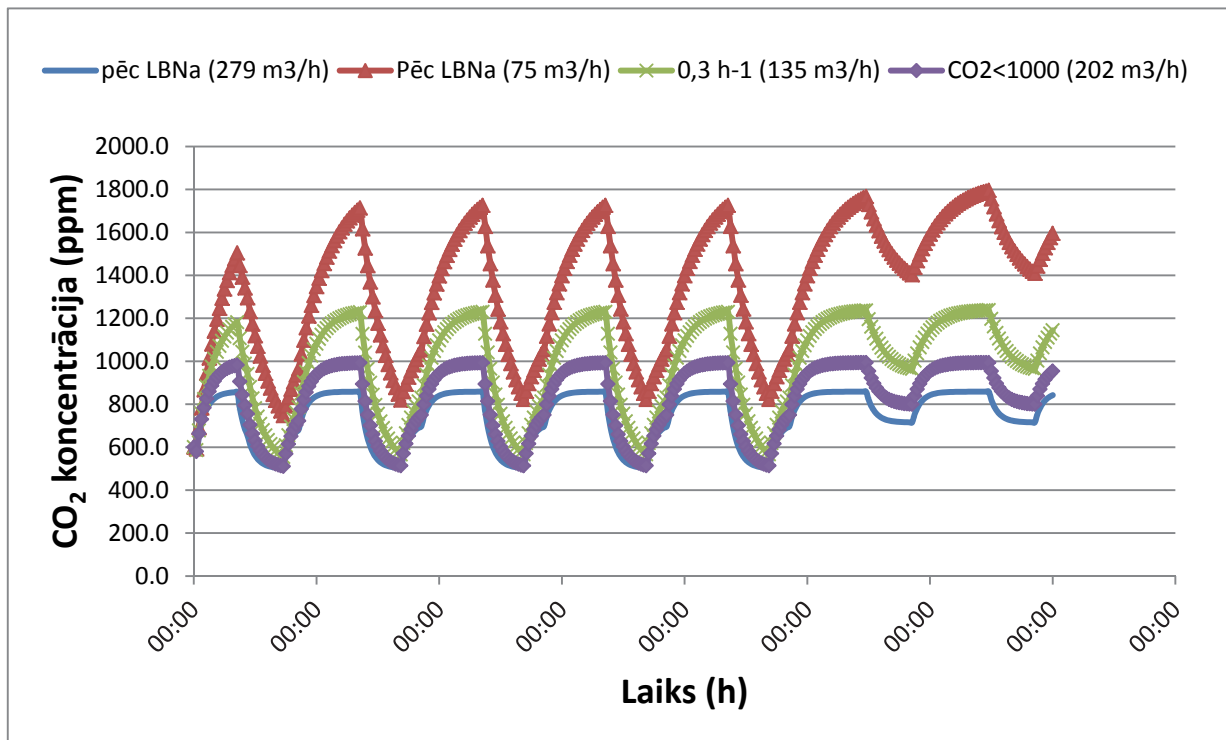
4.1. att. Salīdzinājums par aprēķināto nepieciešamo gada enerģijas patēriņu ventilācijas gaisa uzsildei pret kopējo platību (kWh/m²/gadā).

4.2. CO₂ koncentrācijas analīze un prognozēšana projektējamām ēkām

Izstrādāto metodi var izmantot, lai prognozētu CO₂ koncentrācijas līmeni jaunbūvējamām ēkām projektēšanas stadijā, tādējādi nosakot optimālo ventilācijas gaisa daudzumu. Tas var būt īpaši svarīgi ēkām, kurām ir liels tilpums, kas var kalpot kā bufertelpa, tādējādi samazinot ventilācijas gaisa daudzumu, saglabājot labu telpu gaisa kvalitāti. Piemēram, kinozālēm vai teātru ēkām ar augstiem griestiem un lielu tilpumu, iespējams, ir nepieciešams mazāks gaisa daudzums nekā noteikts normatīvos. Tāpat šīm ēkām ir telpas, kas tiek apdzīvotas tikai periodiski, un ja ventilācijas daudzums ir konstants, tad, atbilstoši to izvēloties, ir iespējams nodrošināt, ka telpa pilnīgi izvēdinās pirms nākamās grupas apmeklējuma.

Tālāku aprēķinu veikšanai ir izvēlēta viengimenes dzīvojamā ēka, kurai tiek noteikts nepieciešamais ventilācijas gaisa daudzums atbilstoši spēkā esošajiem normatīviem un izstrādātas metodes, lai paredzētu CO₂ koncentrācijas svārstības ēkā nedēļas griezumā. Teorētiski aplūkotā ēka ir ar kopējo platību 180 m² un tilpumu 450 m³. Pieņemtais iedzīvotāju skaits ir pieci.

Lai noteiktu ventilācijas daudzumu, ir pieņemti tie paši normatīvi, kas iepriekš aplūkotajā piemērā. Ar vienīgā atšķirība — pieņemot gaisa apmaiņas kārtās 0,3 reizes stundā nevis 1, jo šāds lielums tiek izmantots zemas enerģijas patēriņu ēku projektēšanā kā vispārīgi ieteikts lielums atbilstoši dažādiem avotiem. Aprēķinātais prognozētā CO₂ koncentrācijas lielums nedēļas griezumā pie pieņemta apdzīvotības profila ir aplūkojams 4.2. attēlā.



4.1. att. CO₂ līmenis (ppm) ēkā nedēļas griezumā pie dažāda ventilācijas gaisa daudzuma.

Kā redzams attēlā, ja ventilācijas daudzums tiek izvēlēts atbilstoši normatīviem, tad CO₂ koncentrācija nepārsniedz 860 ppm, kas ir zem pieļaujamajām normām, un tādējādi gaisa daudzums var tikt samazināts. Atbilstoši aprēķiniem tika noteikts, ka šai ēkai būtu nepieciešami 202 m³/h ventilācijas gaisa, lai nodrošinātu stāvokli, ka jebkurā laika momentā CO₂ koncentrācija nepārsniedz 1000 ppm. Tas nozīmē, ka ventilācijas gaisa daudzumu var samazināt par 75 m³/h jeb 27 %, salīdzinot ar normatīvos noteikto, tādējādi ietaupot enerģiju gaisa transportēšanai un uzsildei.

SECINĀJUMI

- 1) Pašreizējie noteikumi gan Latvijā, gan citās valstīs nepieprasa nodrošināt konkrētu telpu gaisa kvalitāti, izvēloties ventilācijas gaisa daudzumu. Tie regulē ventilācijas gaisa daudzumu atkarībā no telpas tipa un tās platības, cilvēku skaita tajā vai norāda nepieciešamo nosūces gaisa daudzumu konkrētām telpām. Turklāt tajos netiek ņemts vērā: telpas apjoms, nepieciešamība izvēlēties tādu gaisa daudzumu, lai nodrošinātu iekštelpu vidi katrā gadījumā individuāli, iespēja samazināt enerģijas patēriņu.
- 2) Telpu gaisa kvalitāte var tikt definēta pēc CO₂ koncentrācijas un relatīvā mitruma. Optimālais CO₂ koncentrācijas līmenis telpās saskaņā ar esošajiem pētījumiem ir robežās no 800–1200 ppm vai pārsniedz āra gaisa līmeni par 400 ppm līdz 1000 ppm. Saskaņā ar esošajiem pētījumiem, lai iekštelpu gaisam nodrošinātu labu IGK un izvairītos no negatīvas ietekmes uz cilvēka veselību, relatīvajam mitrumam vajadzētu būt robežās no 30 % līdz 60 %.
- 3) Promocijas darbā biežāk tika veikti izmantoto mēbeļu materiālu mitruma uzkrāšanas potenciāla mērījumi, kas parāda šo materiālu ietekmi uz iekštelpu mitruma bilanci, absorbējot daļu telpā izdalītā mitruma.
- 4) Darbā tika veikti mērījumi par telpā izdalītā mitruma avotu lielumu no drēbju žāvēšanas, augiem, kā arī cilvēkiem. Mērījumu rezultāti parādīja, ka drēbju žāvēšanas rezultātā telpā vidēji tiek pievadīts 1320 g/dienā, mazgājot divas reizes nedēļā. Augi izdala miruma daudzumu robežās no 0,07 g/h līdz 0.12 g/h, bet cilvēks — aptuveni 21 g/h.
- 5) Izstrādātās telpu gaisa CO₂ koncentrācijas metodes validācija parādīja, ka tai ir augsta sakritība starp prognozētajiem un izmērītajiem rezultātiem. Aplūkotajos gadījumos CO₂ koncentrācija tika noteikta ar precizitāti 93 % un vidējo kvadrātisko kļūdu 83 ppm.
- 6) Vienkāršotā metode relatīvā mitruma prognozēšanai, neņemot vērā mitruma absorbciju telpas objektos, nesniedza precīzus rezultātus. Papildinot izstrādāto metodi ar koeficientiem, kas atspoguļo objektu ietekmi uz mitruma stabilizāciju un mitruma

vienmērīgu un strauju pievadīšanu, uzlaboja rezultātus un sniedza tuvu sakritību starp prognozētajiem un izmērītajiem rezultātiem.

- 7) Darbā ir parādīts piemērs, kā noteikt optimālo ventilācijas gaisa daudzumu tipveida daudzstāvu dzīvojamajām ēkām, lai nodrošinātu, ka CO₂ līmenis nepārsniedz 1000 ppm. Rezultāti parādīja, ka, salīdzinot ar esošajiem normatīviem, ventilācijas gaisa daudzums var tikt samazināts, un, samazinot to visām ēkām gadā, var tikt ietaupīti 32,7 miljoni EUR, ņemot vērā aktuālo siltuma cenu (to nodrošina samazinātais siltuma patēriņš ventilācijas gaisa uzsildei).

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Zajacs, A., Zemītis, J., Prozuments, et al. Sustainable City Development: Implementation Practices in Riga. Applied Mechanics and Materials. 2015, vol. 725–726, pp. 1470–1476. ISSN 1662-7482. **(SCOPUS)**
2. Borodiņecs, A., Zemītis, J., Zajacs, A., Nazarova, J. Renovation of Multi-apartment Building in Latvia. Applied Mechanics and Materials. 2015, vol. 725–726, pp. 1177–1181. ISSN 1662-7482. **(SCOPUS)**
3. Zemītis, J., Borodiņecs, A. Zema enerģijas patēriņa ēku ventilācija. Saarbrücken, Germany: GlobeEdit, 2014. 65 lpp. ISBN 9783639688900.
4. Borodiņecs, A., Zemītis, J., Rodriguez-Gabriel, et al. Handbook on Buildings Renovation in Central Baltic Region. Riga: Riga Technical University, 2013. 92 p. ISBN 9789934507397.
5. Borodiņecs, A., Zemītis, J. Influence of Materials' Moisture Absorption Properties on Prediction of Indoor Relative Humidity Level. In: 2nd Central European Symposium on Building Physics, Austria, Vienna, September 9–11, 2013, pp. 883–887. ISBN 9783854373216
6. Borodiņecs A., Zemītis J., Krēsliņš A., Gaujena B. Determination of Optimal Air Exchange Rate to Provide Optimal IAQ. In: 10th International Conference on Healthy Buildings 2012: Healthy Buildings 2012, Australia, Brisbane, July 8–12, 2012, pp. 1114–1119. ISBN 9781627480758. **(SCOPUS)**
7. Zemītis, J., Borodiņecs, A. IAQ as a Function of Air Exchange Rate. In: Recent Researches in Energy, Environment and Sustainable Development: 6th WSEAS International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI '12), Portugal, Porto, July 1–3, 2012, pp. 107–112. ISBN 9781618041050.

8. Borodiņecs, A., Zemītis, J., Prozuments, A. Passive Use of Solar Energy in Double Skin Facades for Reduction of Cooling Loads. In: Proceedings of World Renewable Energy Forum (WREF 2012): World Renewable Energy Forum 2012, USA, Denver, May 13–17, 2012. Denver: American Solar Energy Society, 2012, pp. 1–6. ISBN 9781938547041. **(SCOPUS)**
9. Zemītis, J., Krēsliņš, A., Borodiņecs, A. Optimal air exchange rate in order to avoid CO₂ and moisture problems. In: 4th Nordic Passive House Conference, Finland, Helsinki, October 17–19, 2011, pp. 1–8.
10. Borodiņecs A., Gaujēna B., Zemītis J., Krēsliņš A. The Stack Effect Influence on Air Exchange Rate and IAQ in Dwelling Buildings. In: Indoor Air 2011: The 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 2011, USA, Austin., 2011, pp. 973–978. ISBN 9781627482721. **(SCOPUS)**