

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**MITRUMA IETEKME UZ BŪVKONSTRUKCIJĀM UN KOMFORTA
APSTĀKĻIEM TELPĀS**

BAKALaura DARBS

Autors: **Toms Jerums**

Studenta apliecības Nr.: tj11009

Darba vadītājs: Dr. Psys. Andris Jakovičs

RĪGA 2015

ANOTĀCIJA

Darbā analizēts kā būvēs no atšķirīgiem konstrukciju materiāliem mainās mitruma līmenis gan gaisā, gan pašās konstrukcijās atkarībā no āra gaisa relatīvā mitruma, temperatūras, ventilācijas intensitātes un ūdens iztvaikošanas intensitātes telpā. Šādi tika pētīts arī kā cilvēka izdalītais mitrums ietekmē telpu mikroklimatu.

Analizējot ilgtermiņa monitoringa datus parādīts, ka faktiskās būvkonstrukciju siltuma caurlaidības vērtības var būtiski atšķirties no aprēķinātajām vērtībām un būtiski mainīties arī būvju ekspluatācijas laikā.

Atslēgvārdi: mitrums, būvkonstrukcijas, siltuma caurlaidība, mitrināšana, termiskais komforts.

ABSTRACT

In this work was analyzed how in buildings from different materials changes moisture level in air and also in constructions depending from outside relative moisture, temperature, intensity of ventilation and water evaporation intensity indoors. In this way also were studied how occupant's emitted moisture influences indoor microclimate.

Analyzing the long-term monitoring data shows that the actual building heat transfer values may significantly differ from the estimated values and significantly change in the structures during the exploitation.

Key words: moisture, building constructions, thermal transmittance, humidification, thermal comfort.

SATURS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	5
IEVADS	6
1. ESOŠIE PĒTĪJUMI.....	8
2. PĒTĪJUMU PAMATNOSTĀDNES.....	11
2.1. Gaisa mitrums	11
2.2. Ūdens tvaika pārvades veidi.....	12
2.3. Siltuma apmaiņa.....	13
2.4. Siltuma zudumi	14
2.5. Mitruma komforta apstākļi.....	16
3. TESTĒŠANAS STENDU UN IZMANTOTO MĒRSISTĒMU APRAKSTS.....	17
3.1. Stendu konstrukcijas	17
3.2. Mērsistēmas.....	18
4. MITRUMA PĒTĪJUMI.....	22
4.1. Mitruma ietekme uz siltuma caurlaidību.....	22
4.2. Gaisa mitrums un mitrināšanas eksperiments	28
4.3. Mitrums būvkonstrukcijās.....	37
5. SECINĀJUMI.....	41
PATEICĪBAS.....	42
LITERATŪRAS AVOTI UN ATSAUCES.....	43
PIELIKUMS	45

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

T – Temperatūra [$^{\circ}\text{C}$]

ρ - blīvums [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

q – siltuma plūsmas blīvums [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

λ – siltumvadītspēja [$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$]

c – īpatnējā siltumietilpība [$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$]

U – siltumcaurlaidības koeficients [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$]

R - siltuma vadītspējas pretestība [$\frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}$]

RM – relatīvais mitrums [%]

Darbā parādās eksperimentālo stendu saīsinātie nosaukumi

AER - stends no gāzbetona

CER - stends no keramiskajiem blokiem

PLY - stends no finiera paneļiem

LOG - stends no frēzbaļķiem

EXP - stends no keramiskajiem blokiem pildīts ar polistorila granulām

MET - meteostacija

IEVADS

Pieaugot elektroenerģijas cenām, kas tieši korelē ar naftas, akmensogļu un dabasgāzes cenu pieaugumu, un samazinoties fosilajiem resursiem, kā arī pieaugot CO₂ izmešu daudzumam atmosfērā fosilo kurināmo izmantošanas dēļ, svarīgi ir pāriet no fosilajiem uz atjaunojamajiem energoresursiem. Pasaulē kļūst aktuālāk samazināt enerģijas patēriņu visās nozarēs, tai skaitā samazināt enerģijas patēriņu ēku apsildīšanā, padarot tās efektīvākas, tai pašā laikā nezaudējot dzīvošanas apstākļu kvalitāti, tāpēc ir svarīgi pētīt šos aspektus.

Aktuālāks ēku apsildīšanas energopatēriņš ir vēsāka klimata valstīm, piemēram, Latvijai, Igaunijai, Zviedrijai, utt. Vēsā klimatā liela nozīme ēku būvniecībā ir celtniecības materiāliem, pareizai siltināšanai un citām ēkas konstrukcijas daļām, kas nodrošina ēku energoefektivitāti. Būtiskākais no faktoriem, kas ietekmē energopatēriņu ēkās, ir būvniecības laikā aprēķinātais siltuma zudums caur ēkas sienām, logiem, durvīm, grīdu un griestiem. Parasti dabā reālās siltuma zudumu vērtības salīdzinājumā ar projekta aprēķinātajām vērtībām ir lielākas, jo liela ietekme būvkonstrukcijās ir mitruma līmenim. Ja mitrums konstrukcijās ir būtiski paaugstināts, tad reālās siltumu zudumu vērtības var būt pat līdz divām reizēm lielākas nekā projektētās. Iemesli, kādēļ tas tā notiek, var būt dažādi, piemēram, nekvalitatīvi, bojāti materiāli vai būvniecības fāzē nesošo konstrukciju atrašanās tiešā nokrišņu ietekmē, vai ražotājs materiālu glabā nepiemērotos apstākļos, piemēram, tiešo nokrišņu ietekmē, tādēļ šajā darbā paredzēts pētīt kā mitrums ietekmē būvkonstrukciju siltumizolācijas īpašības.

Mitruma ietekmi uz būvkonstrukcijām ir svarīgi pētīt, jo mitrums ietekmē ne tikai siltuma caurlaidību, bet arī termisko komfortu telpās un būvkonstrukciju ilgtspēju. Šāda izpēte nodrošina efektīvāku būvmateriālu izmantošanu, izvēloties materiālus un konstruktīvus risinājumus, kas novērstu mitruma akumulāciju, tādējādi samazinot enerģijas patēriņu un uzlabojot cilvēka komforta apstākļus telpā, kā arī pagarinot ēkas ekspluatācijas periodu.

Termiskais komforts ^[1] ir prāta stāvoklis, kurš nosaka gandarījumu ar vidi. Tas ir būtisks ēkām, lai cilvēks tajās varētu dzīvot un justies labi. Termisko komfortu ietekmē personiskie faktori - vielmaiņas ātrums, ģērbšanās veids, un arī vides faktori - gaisa temperatūra, siltuma starojums, relatīvais mitrums un gaisa plūsmas ātrums. Galvenokārt šajā darbā tiks pētītas iespējas nodrošināt termiskajam komfortam atbilstošu mitruma līmeni.

Ēku ilgtspēja ir ^[2] kompleksi risinājumi, kas samazina enerģijas, ūdens un citu resursu patēriņu, līdz ar ko tiek palielināta ēkas efektivitāte. Tas tiek panākts izvēloties kompleksus un kvalitatīvus konstrukciju risinājumus, kā arī izvēloties pareizu ēku novietojumu, lai ēka būtu saimnieciski izdevīga, ievērojot visus tās „mūža” etapus - būvēšanu, ekspluatāciju un nojaukšanu. Vissvarīgākais ir būvniecības materiālu izvēle. Ja mitrums būvkonstrukcijās ir palielināts, tiek samazināta ēku ilgtspēja, piemēram, notiek pūšana vai pelēšana, kas ļoti ietekmē ne tikai siltuma caurlaidību, bet arī cilvēka veselību un dzīves vides kvalitāti.

Siltuma caurlaidība ir siltuma plūsmas blīvums ar kādu tiek aizvadīts siltums prom no ēkām vai pievadīts ēkām, piemēram, caur griestiem, sienām, grīdu, logiem un citām ēku konstrukcijas daļām, ja temperatūras starpība starp iekšpusi un ārpusi ir 1°C. Klasiski tā ir atkarīga no materiāla siltumvadītspējas koeficienta un materiāla biezuma. Kopējo plūsmu nosaka sienu laukums. Mitruma ietekme uz materiāla siltumv

adītspējas koeficientu ir liela, līdz ar to mitruma ietekmei parādās saikne ar siltumvadītspējas koeficientu. Jo lielāks mitruma daudzums materiālā, jo lielāka ir siltuma caurlaidības vērtība.

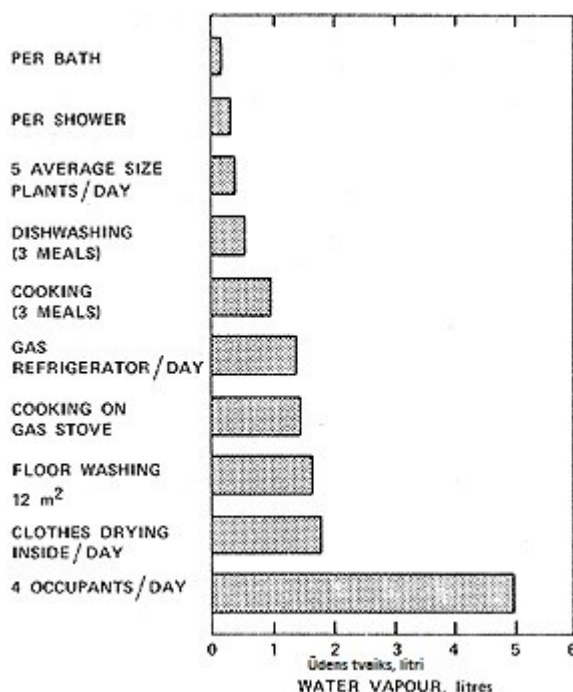
Lai izpētītu mitruma ietekmi uz būvkonstrukcijām un komforta apstākļiem telpās Latvijas relatīvi vēsajā un mitrajā klimatā, LU Botāniskajā dārzā ^[3] izveidoti 5 eksperimentāli stendi, kuriem ir vienādi iekštelpas izmēri (3x3x3 m), vienādas aprēķinātās siltuma caurlaidības sienām ($U = 0.16 \frac{W}{m^2 \cdot K}$), vienāds ģeogrāfiskais novietojums, vienādi logi ($U = 0.7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$), durvis ($U = 0.8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$) un mērsensoru novietojums ēkās, bet ēkas uzbūvētas ar atšķirīgiem būvkonstrukciju materiāliem, lai varētu salīdzināt dažādu būvkonstrukciju energoefektivitāti un veikt ilgtspējas pētījumus vienādos ekspluatācijas apstākļos ilgā laika periodā. Tādā veidā, izmantojot poligonu un tā infrastruktūru, kurā ir iespējams veikt dažādus eksperimentus, var veidot informācijas bāzi būvkonstruktīvo risinājumu optimizācijai.

Autors izvirza darba mērķi - pētīt mitruma ietekmi uz būvkonstrukcijām un telpu mikroklimatu. Lai to sasniegtu autors izvirza darba uzdevumus:

1. Analizēt dažādās būvkonstrukcijās esošā mitruma dinamiku ilgā laika periodā.
2. Analizēt mitruma ietekmi uz būvkonstrukciju siltuma caurlaidību.
3. Veikt mērķtiecīgu mitrināšanu (arī cilvēks ir mitruma avots), lai pētītu tā ietekmi uz mitruma apstākļiem telpās.

1. ESOŠIE PĒTĪJUMI

Tika analizēts 1983. gada pētījums Kanādā, ^[4] ko veica National Research Council Canada pētnieka Richard L. Quiorette vadībā. Šajā darbā tika pētīti mitruma avoti mājās un iespējas kā tos samazināt. Šajā ziņojumā ir atsauce uz 1948. gada pētījumu ^[5] „Research in Home Humidity Control” („mājas mitruma kontroles pētījums”), ko veica S.C. Mite and J.L. Bray. Šajā 1948. gada pētījumā ir analizēti mitruma avotu veidi, ko rada mājas iemītnieki, kā arī šo avotu izdalītais ūdens tvaika daudzums. Eksperimentā tika izmantota 4 cilvēku ģimene, kuras ikdienišķās iekštelpu aktivitātes, kas var izraisīt mitruma izdalīšanos, tika pētītas un analizētas. Atklājās, ka 4 cilvēku ģimene, elpojot un svīstot pie ikdienišķas slodzes, izdala aptuveni 0.2 litrus ūdens stundā (1 cilvēks vidēji 0.052 litri stundā,) jeb aptuveni 5 litrus dienā. Veicot citas saimniecībā un ikdienā noderīgas darbības, kas nav saistītas ar cilvēka metaboliskajiem procesiem, piemēram, grīdas mazgāšana, mazgāšanās dušā vai vannā, ēst gatavošana, tiek radīts papildus mitrums. Vidējais mitruma pieaugums no šīm darbībām bija 2.4 litri dienā salīdzinoši ar mājas iemītnieku izdalīto mitrumu. Skatīt 1.1. attēlu.



1.1. att. Izdalītais ūdens tvaika daudzums dienā atkarībā no aktivitāšu veida ^[5]

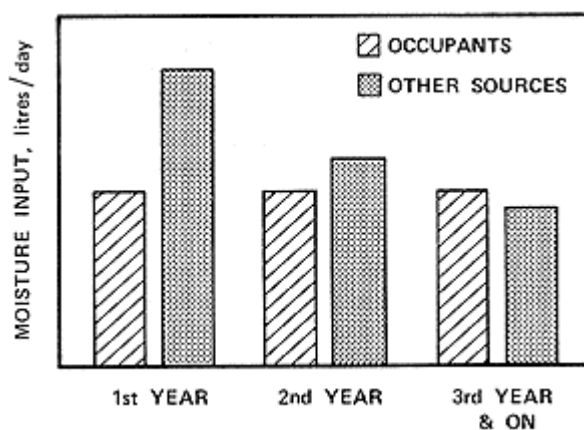
1983. gada pētījumā tiek apskatīts mitrums konstrukcijās. Izmatojot divstāvu māju *Mark XI*, ^[6] tika aprēķināts kopējais svars karkasa kokiem, kas tika izmantoti, lai konstruētu

sienas un savienotu tās ar grīdām, lai izveidotu pirmo un otro stāvu. Kopējais svars bija 2100 kg. Izmantotie kokmateriāli saturēja 19% mitruma, un tie izžūstot līdz 9% mitruma (līdzsvara mitrums) izdalīja vairāk nekā 200 litrus ūdens tvaika. Šis mitrums tiek atdots mājas interjeram un ietekmē kopējo mitruma daudzumu ēkā (arī ir mitruma avots).

Liels mitruma avots tikko uzceltās ēkās ir ne tikai nesošās konstrukcijas, kas šajā pētījumā bija kokmateriāli, bet arī betona pamati. Piemēram, ja pamati ir 2.5m augsti, 0.25m biezi un 35m gari pa perimetru, aprēķinot iznāk 22m³ betona. Ierēķinot ēkas pagraba grīdu kopā sanāk 26m³ betona. Vienā kubikmetrā betona nepieciešami aptuveni 210 litri ūdens vai pat vairāk atkarībā no konsistences, bet ar mitrināšanu beigās tas saglabā nedaudz vairāk kā 120 litri ūdens. Kopumā vidēji betons atbrīvo 2340 litrus ūdens sacietēšanas laikā. Šis ūdens daudzums tiek atbrīvots pirmajos divos gados betonam žūstot (visvairāk pirmajā gadā).

Kokmateriāli un betons žūstot rada 2000-3000 litru ūdens tvaika iekštelpās atkarībā no ēkas izmēriem, mitruma satura nesošajās konstrukcijās un betona virsmas, kas ir nenoklāta. Ja pieņem, ka žūšanas periods ir 18 mēneši, tas rada vidēji 4-5 litrus ūdens tvaika dienā, kas ir ievērojams mitruma avots, salīdzinot ar mājas iemītņieku izdalīto ūdens daudzumu. Respektīvi pēc ēkas uzcelšanas divu gadu laikā būtu jāizzūd augstajam mitruma līmenim.

Šajā pētījumā izdarītie secinājumi pēc dažādo mitruma avotu apskatīšanas ir, ka mikroklimats telpās ir atkarīgs ne tikai no iemītņieku izdalītā mitruma, bet arī no daudziem citiem mazāk redzamiem avotiem, piemēram, konstrukcijas mitruma, pagrabiem, pažobelēm. Pētnieks secināja, ka pirmajā gadā kopējais mitruma daudzums no iemītņiekiem un citiem avotiem var būt aptuveni 20 vai vairāk litri dienā ziemas laikā. Tā kā ēkas materiāli žūst, kopējais mitruma daudzums var samazināties uz 15 litriem dienā otrajā gadā un trešajā gadā samazināties aptuveni līdz 10 litriem dienā. Skatīt attēlu 1.2.



1.2. att. Izdalītais ūdens tvaika daudzums dienā atkarība no ēkas vecuma (pirmie 3 ekspluatācijas gadi) ^[4]

Amerikas Savienotajās Valstīs 2010. gadā Lois Arena un Pallavi Mantha no Steven Winter Associates Norwalk, CT Achilles) un N. Karagiozis no Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge TN veica pētījumu „Monitoring of Internal Moisture Loads in Residential Buildings”,^[7] kurā tika pētīta mitruma ietekme uz ēku konstrukcijām atkarībā no ģeogrāfiskā novietojuma un klimatiskajiem apstākļiem ASV.

Tika izdalītas trīs klimatiskās zonas atkarībā no ģeogrāfiskā novietojuma – Jūras klimats Ziemeļrietumos, karsts un mitrs klimats Dienvidaustrumos un auksts klimats Ziemeļaustrumos. Katrā no klimatiskajām zonām tika izvēlētas tur jau esošas 20 mājas pēc noteiktiem parametriem (ēku tipu daudzveidīgums, iedzīvotāju skaits, ēkas vecums un platība). Šajās ēkās gada garumā tika vākti monitoringa dati par relatīvo gaisa mitrumu un temperatūru iekštelpās un ārā.

Apkopojot un analizējot datus, pētījuma secinājumi bija, ka mitruma līmeni mājās ietekmē ne tikai āra temperatūra un mitrums, bet arī iemītnieku daudzums ēkā uz kvadrātpēdu (1 kvadrātpēda = 0.0929 kvadrātmetri jeb 1 kvadrātmetrs = 10.76 kvadrātpēdas), pamatu esamība vai neesamība un to stāvoklis, izmantotie materiāli ēkas celtniecībā, ēkas vecums, gaisa plūsmas ātrums.

Dr.Ing.sc. Jāzeps Paplavskis prezentācijā *Siltumtehnikās prasības energoefektīvām ārsienām*^[20] salīdzināja siltuma caurlaidības koeficientu divu dažādu veidu gāzbetona blokiem no dažādiem ražotājiem un keramzītbetona blokus. Autora mērķis bija aprēķināt vai no šiem materiāliem celtām ēkām bez papildus siltinājuma var iekļauties būvnormatīva vērtībās. Lai sasniegtu būvnormatīva siltuma caurlaidību $U \leq 0,3$ (W/m²K), Aeroc Eco Term materiāla biezumam jābūt 375mm, citas firmas gāzbetonam 600mm, savukārt keramzītbetonam 900mm. Jāpiezīmē ka šie aprēķini veikti, ja materiālā ir 5% ūdens daudzums, kas nozīmē ka reālos apstākļos faktiskie rezultāti varētu būt sliktāki, dēļ mitruma ietekmes uz šiem materiāliem.

2. PĒTĪJUMU PAMATNOSTĀDNES

2.1. Gaisa mitrums

Lai raksturotu, kas ir gaisa mitrums jāapskata būtiskās definīcijas un likumsakarības.

Absolūtais mitruma daudzums ir ūdens tvaika kopējā masa. Tvaika daudzumu vienā tilpuma vienībā raksturo ar blīvumu $\rho = \frac{m_{\bar{u}}}{V_{net}}$

$m_{\bar{u}}$ - ūdens tvaika masa, V_{net} - kopējais gaisa un ūdens tvaika maisījuma tilpums.

Bieži gaisā uzdod mitrumu gramos uz kubikmetru $\left(\frac{g}{m^3}\right)$.

Relatīvais mitrums φ ir ūdens tvaika parciālspiediena p attiecība pret piesātināta tvaika parciālspiedienu p_0 tajā pašā temperatūrā.

To var arī izteikt kā gaisa absolūtā mitruma $\rho\left(\frac{g}{m^3}\right)$ attiecību pret piesātināta tvaika maksimālo absolūto mitrumu dotajā temperatūrā $\rho_0\left(\frac{g}{m^3}\right)$ [2.1. tabula] ^{[8][9]}.

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\% = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

2.1. tabula

Piesātināta ūdens tvaika spiediens un blīvums dažādās temperatūrās ^[8]

Gaisa temperatūra, °C	Ūdens tvaiku maksimālais parciālspiediens, (mmHg) 1mmHg = 133.32 Pa	Ūdens tvaika blīvums $\rho_0(\text{kg/m}^3)$
-10	1,95	1,95
0	4,58	4,85
5	6,54	6,8
10	9,21	9,4
11	9,84	10,01
12	10,52	10,66
13	11,23	11,35
14	11,99	12,07
15	12,79	12,83
20	17,54	17,3

25	23,76	23
30	31,8	30,4
37	44,07	44
40	55,3	51,1
60	149,4	130,5
80	355,1	293,8
95	634	505
96	658	523
97	682	541
98	707	560
99	733	579
100	760	598
101	788	618
200	11659	7840

Aplūkojot tabulu, var secināt, ka izobāriski (pie nemainīga spiediena) atdzesējot gaisu, ūdens tvaiks pie noteiktas temperatūras kļūst piesātināts (atkarībā no sākotnējā absolūtā mitruma gaisā un temperatūras). Šo temperatūru sauc par rasas punktu. Tabulā uzskatāmi redzams, ka pie 20°C gaisā piesātinājuma apstākļos ir aptuveni 9 reizes vairāk ūdens nekā pie 10°C.

2.2. Ūdens tvaika pārvades veidi

Gaisā notiek konvektīvā ūdens tvaika pārnese (pateicoties gaisa kustībai ko nosaka temperatūras, blīvuma un spiediena starpības starp gaisa slāņiem) un difūzijas tvaika pārvade. Savukārt materiālos galvenokārt notiek ūdens tvaika pārvade difūzijas ceļā, ja materiālā nav makroskopisku gaisa ieslēgumu. Ja tādi ir, tad darbosies arī konvekcijas mehānismi, piemēram, materiālos ar porainu struktūru, t. i. materiālos ar makroskopiskiem gāzu ieslēgumiem mitrumu var pārnest konvektīvā ceļā ar gaisa tilpumā esošo mitrumu.

Ūdens tvaika difūzijas caurlaidība $\delta \left(\frac{mg}{Pa \cdot h \cdot m} \right)$ ir materiāla ūdens tvaika vadītspējas un biezuma reizinājums. Savukārt ūdens tvaika vadītspēja ir materiāla ūdens tvaika pārvades ātruma (ūdens tvaika daudzums, kas pie noteikta biezuma pārvadīts caur laukuma vienību noteiktā temperatūrā un mitruma apstākļos) un ūdens tvaika spiediena starpības. Savukārt

būvniecībā materiālus bieži raksturo ar difūzijas pretestības koeficientu μ .^[17] (bezdimensionāls lielums). Tas parāda ūdens tvaika difūzijas pretestības atšķirību konkrētajam materiālam un tā paša biezuma nekustīgam gaisa slānim vienādā temperatūrā.

Celtniecībā bieži izmanto dažādus materiālus, kas izveido tvaika barjeras (aiztur mitro iekštelpu gaisu neļaujot tam iekļūt ēkas konstrukcijā no iekšpuses), galvenokārt, lai rasas punkts neveidotos būvkonstrukcijā, to nepadarītu mitru, kas samazina ēkas ilgtspēju. Tvaika barjeru raksturojošais fizikālais lielums ir ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients (jo mazāks, jo labāks).

2.3. Siltuma apmaiņa

Siltuma pārvade var notikt trīs dažādos veidos:

- siltuma vadīšana,
- konvekcija,
- siltuma starojums.

Siltuma vadīšanas process notiek temperatūras gradienta ietekmē, ko apraksta Furjē likums. Tas nosaka siltuma daudzumu, kas tiek pārvadīts vielas siltumvadītspējas dēļ:

$$q = -\lambda \text{ grad } T \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2.2)$$

kur q -siltuma plūsmas blīvums, λ -siltuma vadīšanas koeficients, $\text{grad } T$ – temperatūras gradients. Siltuma vadīšanas procesā tiek pārnests siltuma daudzums no viena ķermeņa uz citu ķermeni, kuriem ir jābūt saskarē vienam ar otru, un nekādas izmaiņas ķermeņu daļiņu savstarpējā sakārtojumā nenotiek.

$$dQ = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{x} S dt \quad (2.3)$$

dQ – siltuma daudzums, kas laikā dt tiek pārnests no T_1 uz T_2 , caur šķērsriezuma laukumu S . Katrai vielai šie siltuma vadīšanas procesi notiek ar atšķirīgu intensitāti, ko raksturo ar λ - siltuma vadīšanas koeficientu $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$. Reālās ēkās visā sienas biezumā materiāli nav viendabīgi, tāpēc tos mēdz raksturot ar siltuma vadīšanas koeficienta vidējo vērtību λ_{eff} .

Konvekcija darbojas pateicoties temperatūras, tātad arī blīvuma un spiediena, starpībai starp dažādiem šķidruma vai gāzes slāņiem. Tas nozīmē, ka rodas daļiņu plūsma, lai samazinātu spiedienu starpību starp slāņiem.

Siltuma starojums ir siltuma pārnese elektromagnētisko viļņu veidā. Tas raksturīgs caurspīdīgām vai puscaurspīdīgām vidēm. Šo procesu apraksta Stefana-Bolcmaņa likums:

$$\Delta Q = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

kur $\sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$. Laika vienībā izstarotā enerģija ir proporcionāla ķermeņa virsmas temperatūras ceturtajai pakāpei.

Siltuma starojums, konvekcija un siltuma vadīšana nosaka pilno siltuma plūsmu, bet šajā darbā apskatītajos procesos siltuma starojuma un konvekcijas ietekme ir minimāla.

2.4. Siltuma zudumi

Lai raksturotu siltuma zudumu būvkonstrukcijās plakanparalēlā slānī, lieto siltuma caurlaidības koeficientu U :

$$U = \frac{\lambda_{eff}}{d} = \frac{q}{T_1 - T_2} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right). \quad (2.5)$$

Siltuma caurlaidības inversā vērtība ir siltuma vadītspējas pretestība R :

$$R = \frac{d}{\lambda_{eff}} \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right) \quad (2.6)$$

Slāņainām konstrukcijām, kurās ir vairāki slāņi ar biezumiem d , un tiem ir zināmi siltumvadīšanas koeficienti, t.i. arī var aprēķināt siltuma caurlaidību:

$$U = \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{d_i}. \quad (2.7)$$

Latvijā likumdošanas būvnormatīvos LBN 002-01 „Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika”^[10] noteiktas normatīvās un maksimālās U vērtības dažāda tipa norobežojošām konstrukcijām. [2.2. tabula]

2.2. tabula

Būvelementa siltuma caurlaidības koeficienti U_{RN} $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ (normatīvās vērtības pa kreisi un maksimālās vērtības pa labi)^[10]

Būvelementi	Dzīvojamās mājas, pansionāti, slimnīcas un bērnodārzi	Publiskās ēkas, izņemot pansionātus, slimnīcas un bērnodārzus	Ražošanas ēkas
Jumti un pārsegumi, kas saskaras ar āra gaisu	0,15 k/ 0,20 k	0,20 k/ 0,25 k	0,25 k/ 0,35 k
Grīdas uz grunts	0,15 k/ 0,20	0,20 k/ 0,25 k	0,30 k/ 0,40 k
Sienas	0,18 k/ 0,23k	0,20 k/ 0,25 k	0,25 k/ 0,30 k

Logi, balkona durvis un citas stiklotās konstrukcijas	1,30 k/ 1,80 k	1,40 k/ 1,80 k	1,60 k/ 1,80 k
Ēku ārdurvis	1,80 k/ 2,30 k	2,00 k /2,50k	2,20 k/ 2,70 k

K ir temperatūras faktors. Temperatūras faktoru κ izmanto atsevišķu būvelementu siltumtehnikajam aprēķinam $\kappa = \frac{19}{\theta_i - \theta_e}$, kur θ_i – iekštelpu aprēķina temperatūra (°C) un θ_e – āra gaisa vidējā temperatūra apkures sezonas laikā (°C).

Ceļot ēkas jāievēro būvnormatīvi, kas attēloti tabulā 2.2. Siltuma zudumi ir labi un apmierinoši, ja sakrīt ar normatīvajām vērtībām, bet tie nedrīkst būt mazāki vai lielāki par normatīvajām vērtībām.

Sakarību siltuma caurlaidības noteikšanai (2.5) ir spēkā tikai stacionārā gadījumā, t.i., T_1 un T_2 vērtības mērījumu laikā nemainās. Reālie apstākļi, atšķirībā no laboratorijā mākslīgi radītajiem apstākļiem, ir nestacionāri. Līdz ar to liela ietekme ir termiskajai inercei. Mainoties āra temperatūrai, mainās arī telpu temperatūra, bet šīs izmaiņas ir nobīdītas laikā.

Termiskā inerce ir atkarīga no materiāla siltumietilpības (lielāka materiāla siltumietilpība nozīmē, ka materiālam būs lielāka termiskā inerce) [2.3. tabula]. Liela siltuma ietilpība uz tilpuma vienību ir stikla vatei un putupolistiroliem (EPS) (XPS), kā arī gāzbetonam un kokam.

2.3. tabula

Blīvuma un īpatnējās siltumietilpības piemērs dažādiem materiāliem ^[10]

Materiāls	Blīvums $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Īpatnējā siltumietilpība $c \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	Normēta siltumietilpība uz tilpuma vienību $\left(\frac{J}{m^3 \cdot K} \right)$
Stikla vate	10-120	1030	8.6-103
Māla ķieģeļi	1000-2400	1000	0.42-1
Viendabīgs koks	150	1610	10.7
Saplāksnis	150	1610	10.7
Putupolistirols(EPS)	10-50	1450	29-145
Ekstrudētais putupolistirols (XPS)	20-65	1450	22.3-72.3
Gāzbetons	115	1300	11.3

2.5. Mitruma komforta apstākļi

Cilvēks jūtas komfortabli, ja mājoklī relatīvais gaisa mitrums ir no 25 līdz 60 % ^[11]. Baltic Environmental Forum (Baltijas Vides Forums) ^[12] rekomendē nepārsniegt 50% iekštelpu relatīvo gaisa mitrumu, kad āra temperatūra ir zem nulles. Pavasarī un rudenī attiecīgi nepārsniegt 60% atzīmi, jo šādā situācijā iekštelpās veidojas pārlietu liels mitrums, sāk veidoties pelējums un izveidojas labvēlīgāki apstākļi dažādu parazītu attīstībai. Cilvēka veselības stāvoklis var pasliktināties pie paaugstināta mitruma, piemēram, var pastiprināties alerģiskas slimības, tikt kairināti elpošanas ceļi, var novērot infekcijas un toksikoloģiskās iedarbības efektus.

Latvijas darba aizsardzības likumā ^[13] darba vietas mikroklimatā tiek pieļauts relatīvais gaisa mitrums no 30-70% pie jebkuras slodzes mainīgās iekštelpu temperatūrās.

Latvijas būvnormatīvā LBN 211-08 „Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami” ^[14] rakstīts, ka veicot aprēķinus norobežojošajām būvkonstrukcijām, jāņem vērā, ka telpu relatīvajam mitrumam jābūt 55%.

Tomēr Latvijas Astmas un Alerģijas biedrība ^[15] iesaka mājas apstākļos uzturēt 40-50% relatīvā mitruma robežās.

Tādējādi autors secina, ka normāli vidēji gaisa relatīvā mitruma apstākļi telpās ir no 40-60%, ko vajadzētu nodrošināt.

3. TESTĒŠANAS STENDU UN IZMANTOTO MĒRSISTĒMU APRAKSTS

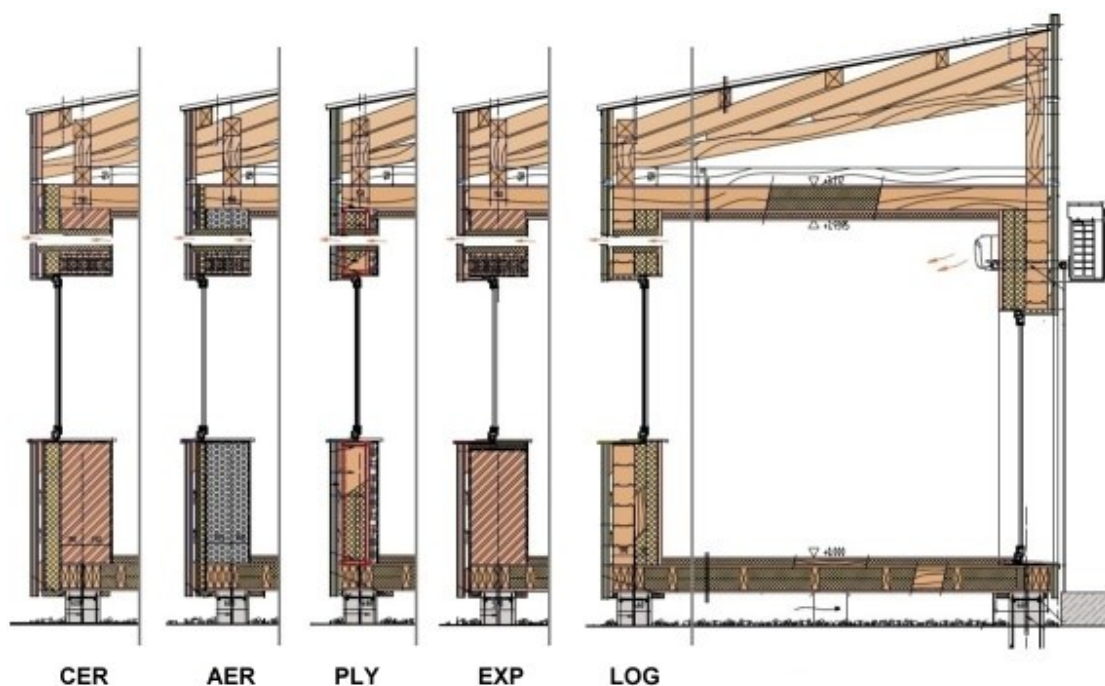
3.1. Stendu konstrukcijas

LU botāniskā dārza teritorijā izveidoti 5 testēšanas stendi ^[3], kuru ārsienas veidotas no atšķirīgām konstrukcijām, bet ar vienādu aprēķināto siltuma caurlaidību sienām un griestiem $U=0.16 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$, logiem $U=0.72 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$, durvīm $U=0.82 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ un grīdai $U=0.17 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$. Stendu šķērsriezumi redzami 3.2. attēlā un to raksturīgie būvkonstrukciju elementi redzami 3.1.attēlā. Iekštelpu izmēri ir 3x3x3metri (9 m² jeb 27 m³). Šo stendu ārsienu veidi ir šādi:

- dobi keramiskie termobloki (440mm) ar akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (CER),
- gāzbetona bloki (375 mm) ar akmens vates siltinājuma slāni ārpusē (AER),
- finiera paneļi ar akmens vates pildījumu (200 mm) un fibrolītu(70 mm) iekšpusē (PLY),
- eksperimentāli keramiski bloki (500mm) ar polistorila granulu pildījumu to dobumos (EXP),
- frēzbaļķi (200 mm) ar akmens vates siltinājuma slāni un baļķu imitācijas apdari iekšpusē (LOG).



3.1.att. Testēšanas stendu izbūvē izmantotie materiāli ^[3]



3.2.att. Testēšanas stendu vertikālie šķērs griezumi ^[3]

3.2. Mērsistēmas

Testēšanas stendos tiek nodrošināta vienāda apsilde, dzesēšana un ventilācija, lai radītu pēc iespējas vienādus apstākļus stendu iekštelpās.

Lai iegūtu datus par temperatūru, mitrumu, u.c. raksturlielumiem, stendi ir aprīkoti ar sensoriem, kuri mēra vairāk nekā 40 dažādus stenda vides un jaudas parametrus. ^[16] Sensoru aprakstu un apzīmējumu piemērs dots 3.1. tabulā, savukārt sensoru novietojums redzams 3.3.attēlā, kurā pa kreisi attēlots sensoru izvietojums dažādās konstrukcijas vietās, bet pa labi redzams sensoru novietojums pie loga un durvīm. Loga sensors atrodas pie rāmja un attēlots ar „window”, bet sensors pie durvīm ir starp durvju kārbu un sienu (attēlots ar „door”).

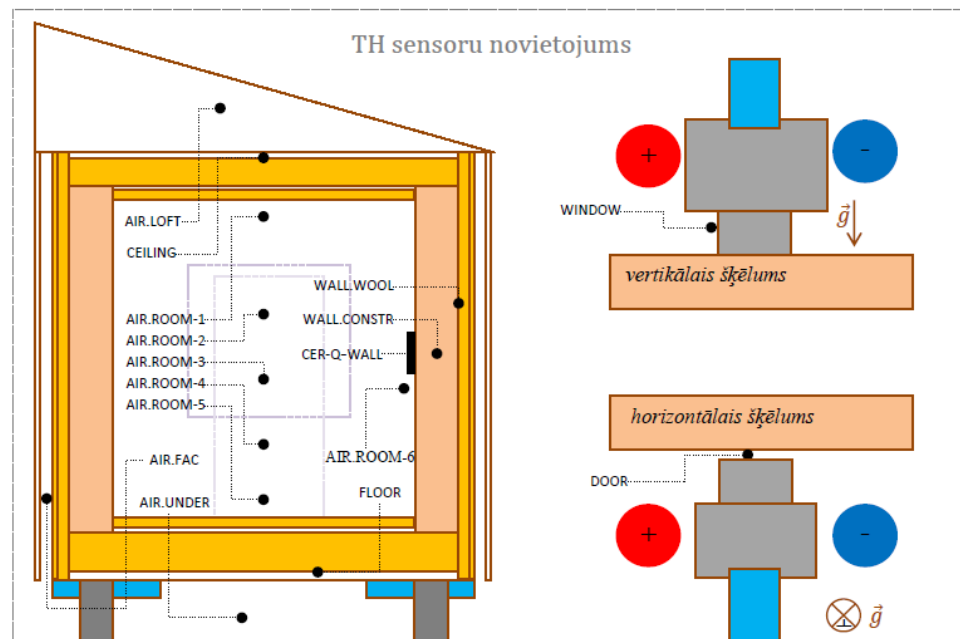
3.1.tabula

Mērsistēmas reģistrējamie parametri, to apzīmējumi ^[16]

Apzīmējums	Apraksts
ELE	Elektroenerģijas patēriņš (kWh)
POW	Momentānā aktīvā jauda (W)
ELE.HP	Siltumsūkņa gaiss-ūdens siltumenerģija (kWh)
TH-AIR.LOFT	Temp./mitruma sensors bēniņos

TH-CEILING	Temp./mitruma sensors griestos aiz ārēja vates slāņa
TH-FLOOR	Temp./mitruma sensors grīdā aiz ārējā vates slāņa
TH-WALL.CONSTR	Temp./mitruma sensors bloka dobumā (vidū)
TH-WALL.WOOL	Temp./mitruma sensors sienā pirms akmens vates slāņa
TH-WINDOW	Temp./mitruma sensors pie loga aplodas
TH-WINDOW	Temp./mitruma sensors pie durvju aplodas
TH-AIR.UNDER	Temp./mitruma sensors zem stenda
TH-AIR.FAC	Temp./mitruma sensors ventilējamajā fasādē
TH-AIR.ROOM-1	Temp./mitruma sensors telpas vidū. 0,1m no griestiem.
TH-AIR.ROOM-2	Temp./mitruma sensors telpas vidū. h=1,7 m
TH-AIR.ROOM-3	Temp./mitruma sensors telpas vidū. h=1,1 m
TH-AIR.ROOM-4	Temp./mitruma sensors telpas vidū. h=0,6 m
TH-AIR.ROOM-5	Temp./mitruma sensors telpas vidū. h=0,1 m
TH-AIR.ROOM-6	Temp./mitruma sensors 0,1 m no ārsienas. h=1,1 m
TH-AIR.ROOM-ADD	Papildus temp./mitruma sensors telpā
Q-WALL	Siltuma plūsmas blīvums uz ārsienas iekšējās virsmas
V-AIR.ROOM-1,-2,-3,-4	Gaisa plūsmas telpā (izvietojums precizējams)
P-AIR.ROOM	Gaisa spiediens telpā
P.DIF-AIR.ROOM/AIR	Gaisa spiediena starpība stars telpu un āru
SOL-AIR.ROOM	Saules starojuma telpā (izvietojums precizējams)

Sensori stendā CER



3.3.att. Piemērs sensoru izvietojumam CER stendā ^[16]

Konkrētajā darbā īpaši svarīgi ir mitruma, temperatūras un siltuma plūsmas mērījumi.

Digitālais relatīvā mitruma un temperatūras sensors *Sensirion SHT75*, kas parādīts 3.4. attēlā ^[16] sastāv no vienā korpusā integrētiem maza izmēra sensora elementiem un signālu procesora. Kapacitatīvais sensora elements tiek izmantots relatīvā mitruma mērīšanai. Temperatūras mērīšanai tiek izmantots lentveida spraugas sensors.



3.4.att. Sensora *Sensirion SHT75* izskats ^[16]

Siltuma plūsmas sensors (150-S), kas parādīts 3.5.attēlā ir ražots Leibniza Hannoveres Universitātē Elektrotehnoloģiju institūtā. Sensors sastāv no termoelementiem, kuri ģenerē ΔT proporcionālu elektrisko spriegumu caur termopāra siltajiem un aukstajiem savienojumiem. Mērāmo spriegumu iegūst no liela skaita virknē saslēgtiem termopāriem, kas vienmērīgi izvietoti pa visu sensora laukumu. Siltuma enerģijas plūsmu mēra abos virzienos, kas pozitīvā un negatīvā spriegumā.



3.5.att. Siltuma plūsmas sensors 150-S ^[16]

Mitrināšanas eksperimentā tika izmantots mitrinātājs *Daikin mck75j Ururu*, kas redzams 3.6. attēlā. Tam ir vairāki mitrināšanas režīmi (LOW, MED, HIGH un CONT), dažādas ventilācijas intensitātes un 4 litru ūdens tvertne. Režīmi LOW, MED un HIGH cenšas uzturēt noteiktu relatīvā mitruma līmeni gaisā (40-60%), bet režīms CONT pievada telpai mitrumu nepārtraukti ar noteiktu intensitāti, kas regulējama ar rotora lāpstiņu griešanās ātrumu

(ventilācijas intensitāte). Režīmiem LOW, MED un HIGH ventilācijas intensitāte nav maināma, mitrinātājs to regulē pats atkarībā no telpas relatīvā mitruma.



3.6.att. Daikin mck75j Ururu mitrinātāja izskats ^[16]

4. MITRUMA PĒTĪJUMI

4.1. Mitruma ietekme uz siltuma caurlaidību

Lai varētu kvalitatīvi analizēt būvkonstrukciju siltuma caurlaidību $U = \frac{q}{T_1 - T_2}$ jāsaprot, ka rezultāts būs objektīvāks un precīzāks, ja T_1 un T_2 starpība būs pēc iespējas lielāka un q vērtība nedrīkst būt tuva nullei. Lai salīdzinātu siltuma plūsmu dažādajās stendu ārsienās, autors, izmantojot esošos monitoringa datus stendos no dažādām būvkonstrukcijām, izvēlējās datu kopas aptuveni ik pēc 5 dienām, sākot no siltuma plūsmas datu mērīšanas sākuma 2014. gada martā līdz 2015. gada martam, izņemot vasaras, kad siltuma plūsmas blīvuma vērtības bija tuvu nullei, respektīvi, nederīgas aprēķiniem. Ik pēc šīm 5 dienām dati ņemti naktīs iegūtie dati, periodos no 6 līdz 10 stundām, kad solārais starojums bija tuvs nullei – nepārsniedza $1 \left(\frac{w}{m^2}\right)$. Dati tika izvēlēti naktīs, jo dienās tie nav objektīvi solārā starojuma dēļ, kura intensitāte var pārsniegt $10^3 \left(\frac{w}{m^2}\right)$ stendu ārpusē. Gadījumā, ja saules stari pa logu tieši spīd uz siltuma plūsmas sensoru, tad tā iegūtās mērvērtības ir neadekvātas – tās neraksturo siltuma plūsmu caur sienu, jo dominē siltuma apmaiņa, ko nosaka siltumstarojums. Savukārt gadījumā, ja uz sensoru nav tieši saules stari, dominē konvektīvā gaisa plūsma, kas rodas saules stariem sasildot konstrukcijā esošo gaisu un sienas. Otrs aspekts, kas ietekmē datu kvalitāti, ir termiskā inerce, kura atkarībā no ārsienas konstrukcijas stendos, bija dažāda. Izteikti tā bija novērojama, kad laiks ārā kļuva siltāks, jo tad siltums dienā, kas bija sasildījis konstrukcijas gan ar silto gaisu, gan ar solāro starojumu, konstrukcijas iekšpusē naktī parādījās kā temperatūras pieaugums, kamēr āra temperatūra turpināja samazināties. Šī iemesla dēļ datus no 2014. gada aprīļa vidus līdz oktobra vidum nevarēja izmantot analīzei. Sensori, no kuriem autors izvēlējās trīs datu kopas (T_1 , T_2 un q), tālākajiem siltuma caurlaidības vērtību aprēķiniem bija:

- Q-wall sensor (sensors atrodas pie sienas),
- HT-Air room-6. (temperatūras un mitruma sensors atrodas pie siltuma plūsmas sensora telpas iekšpusē),
- Met-TH-Air out (meteostacijas, kas atrodas uz viena no izbūvētajiem stendiem reģistrētās āra temperatūras un mitruma vērtības).

Šo sensoru novietojums redzams 3.3. attēlā.

Vidējot 6-12 stundu periodu mērījumus, tiek iegūta vidējā siltuma plūsma, kas tiek dalīta ar vidējoto temperatūras starpību šajā periodā:

$$U = \frac{q_{vid}}{T_{1\ vid} - T_{2\ vid}} \quad (4.1)$$

No vidējotajiem datiem tiek vidējotas arī telpas un āra relatīvā mitruma vērtības, lai dažādajās būvkonstrukcijās varētu salīdzināt mitruma ietekmi uz siltuma caurlaidību [4.1. tabula], un tiek aprēķināta siltuma caurlaidības U vērtība.

4.1. tabula

Ilustratīvs piemērs datu atlasīšanas kārtībai.

Testēšanas stends				Meteostacija		
Laiks	LOG-H-AIR.ROO M-6 (%)	LOG-Q-WALL (W/m2)	LOG-T-AIR.ROO M-6 (degC)	MET-H-AIR.OUT : (%)	MET-T-AIR.OUT: (DegC)	MET-SOL-AIR.OUT (W/m2)
2014.12.22 18:00	34,8	2,6	19,8	98,5	3,1	0,4
2014.12.22 19:00	34,9	2,7	19,9	98,5	4,1	0,4
2014.12.22 20:00	34,9	2,8	19,8	96,3	5,1	0,4
2014.12.22 21:00	34,6	2,5	19,8	94,9	4,9	0,4
2014.12.22 22:00	34,3	2,8	19,9	93,5	4,6	0,4
2014.12.22 23:00	34,1	2,6	19,8	91,8	4,5	0,3
2014.12.23 0:00	33,9	2,3	19,8	87,2	4,8	0,3
2014.12.23 1:00	33,1	2,7	19,9	84,5	4,8	0,3
2014.12.23 2:00	32,3	2,8	19,9	81,3	4,6	0,4
2014.12.23 3:00	31,8	2,6	19,8	79,3	4,3	0,4
2014.12.23 4:00	31,3	2,8	19,9	78,3	4,2	0,4
2014.12.23 5:00	30,9	2,3	19,8	76	4,2	0,4
2014.12.23 6:00	30,4	2,9	19,9	73,9	4,2	0,4
Vidēji	33,2	2,7	19,8	87,2	4,4	0,38
U (W/m ² K)						
0,17						

4.1. tabulā analizējamais periods ir 12 stundas. Kopumā ir 6 datu kopas, kuras ir vidējotas, un pēc vidējotajām vērtībām ir aprēķināta siltuma caurlaidība $U\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$. Kā redzams, visi dati mainās maz - ir relatīvi stacionāri. Dati tika atlasīti tā, lai nerastos rupjas kļūdas siltuma caurlaidības vērtības aprēķinā, piemēram, 12 stundu laikā telpas temperatūra

vidēji nemainās un paliek apmēram 19,8° C. Līdzīgi arī siltuma plūsmas mērījumi ievērojami nemainās, kuri ir no 2,3-2,9 $\left(\frac{W}{m^2}\right)$. Visbūtiskākais faktors, kas var radīt kļūdas, ir solārais starojums, bet naktī tas ir mērsistēmas svārstības līmenī - no 0,3-0,4 $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, un tādējādi neietekmē siltuma caurlaidības U aprēķinu. Āra relatīvais mitrums mainās no 98.5% līdz 73.9%. Savukārt telpas relatīvais mitrums arī samazinās no 34.8-30.6% āra relatīvā mitruma ietekmē, jo telpas tiek nepārtraukti vēdinātas (tipiska gaisa apmaiņas intensitāte $n = 0,45 \frac{1}{h}$.) Līdz ar to, ja samazinās relatīvais mitrums ārā, tad samazinās arī telpai pievadītais mitruma daudzums. Autors secina, ka visi šie faktori ir relatīvi maz mainīgi un tāpēc siltuma caurlaidības aprēķins ir uzskatāms par izmantojamu tālākajai analīzei.

Mērījumu precizitāte nav ļoti augsta, līdz ar to nav korekti norādīt precizitāti $\pm 0,1$, bet vienu ciparu aiz komata nepieciešams atstāt, lai vidējot vērtības neradītu papildus kļūdu temperatūras, mitruma un siltuma plūsmas blīvuma aprēķinos. Savukārt solārā starojuma sensors nerāda zemākas vērtības par 0,3-0,4 $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, jo šīs vērtības ir mērinstrumenta jutības sliekšņa robežās.

4.2.tabula

2014. gada pavasara periods

Laiks	LOG-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	CER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	AER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	EXP-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	PLY-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$
2014.03.05	0,14	0,12	0,19	0,27	0,09
2014.03.10	0,12	0,16	0,25	0,27	0,17
2014.03.15	0,08	0,09	0,2	0,18	
2014.03.20	0,11	0,12	0,22	0,30	0,13
2014.03.24	0,09	0,11	0,18	0,19	0,11
2014.03.30	0,06	0,05	0,15	0,16	0,14
2014.04.03	0,09	0,07	0,16	0,24	0,11
2014.04.10	0,10	0,11	0,20	0,24	0,12
2014.04.15	0,07	0,07	0,17	0,21	
2014.04.22			0,14	0,11	
Vidēji	0,10	0,10	0,19	0,22	0,13
Kv.novirze	0,02	0,03	0,04	0,06	0,02
rel. Kļūda	25%	32%	19%	27%	19%

2015. gada ziemas periods

Laiks	LOG-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	CER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	AER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	EXP-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	PLY-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$
2014.10.16	0,10			0,20	0,12
2014.10.18	0,08		0,12	0,14	0,12
2014.10.30	0,11		0,18	0,25	
2014.11.08	0,13	0,27	0,26	0,28	0,15
2014.11.15	0,14	0,24	0,26	0,29	0,18
2014.11.20	0,15	0,22	0,28	0,29	0,16
2014.11.25	0,15	0,23	0,26	0,29	0,17
2014.12.01	0,13	0,20	0,24	0,27	0,16
2014.12.06	0,15	0,31	0,27	0,38	0,15
2014.12.11	0,14	0,26	0,25	0,39	0,16
2014.12.16	0,16	0,30	0,29	0,37	0,18
2014.12.19	0,15	0,28	0,27	0,35	0,18
2014.12.23	0,17	0,30	0,31	0,40	0,18
2014.12.26	0,11	0,16	0,18	0,24	0,14
2014.12.30	0,13	0,18	0,2	0,27	0,16
2015.01.03	0,18	0,40	0,33	0,44	0,17
2015.01.07	0,11	0,13	0,17	0,20	0,14
2015.01.14	0,17	0,36	0,31	0,42	0,17
2015.01.20	0,14	0,26	0,24	0,32	0,16
2015.01.25	0,13	0,23	0,22	0,30	0,16
2015.01.30	0,16	0,29	0,28	0,37	0,17
2015.02.03	0,13	0,23	0,22	0,30	0,15
2015.02.07	0,17	0,31	0,29	0,40	0,17
2015.02.11	0,14	0,25	0,24	0,34	0,14
2015.02.16	0,11	0,17	0,18	0,25	0,13
2015.02.22	0,15	0,29	0,26	0,35	0,15
2015.02.28	0,14	0,26	0,25	0,34	0,16
2015.03.03	0,14	0,26	0,25	0,35	0,17
2015.03.06	0,14				
Vidēji	0,14	0,26	0,25	0,31	0,16
Kv.novirze	0,02	0,06	0,05	0,07	0,02
rel. kļūda	17%	24%	20%	23%	12%

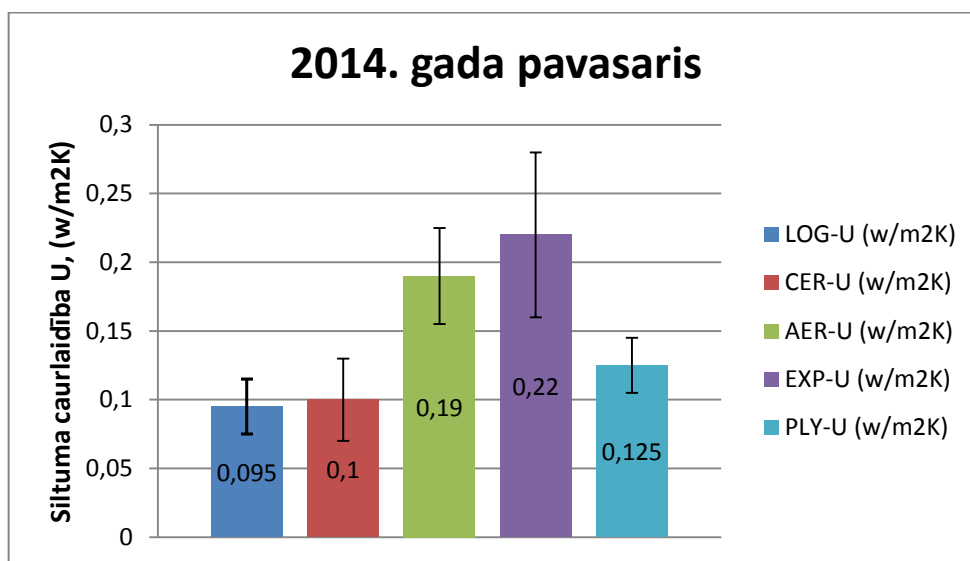
Aprēķinot U vērtības šādiem izvēlētiem laika posmiem, naktīs ik pa 5 dienām (izņemot, kur temperatūras starpība ΔT ir mazāka par 10°C , respektīvi, no agra vasaras sākuma līdz vēlām vasaras beigām), tika iegūtas datu vērtības, kuras autors sadalīja divās datu tabulās. 4.2. tabula atspoguļo mērījumus no 2014. gada marta līdz 2014. gada aprīļa beigām un 4.3. tabula - no 2014. gada oktobra vidus līdz 2015. gada martam, tas tika darīts, jo pavasarī tika novērota vidēji mazāka siltuma caurlaidība nekā 2015. gada ziemas periodā.

Projektējot LU botāniskā dārza testēšanas standus, tika aprēķināta aptuveni vienāda siltuma caurlaidība visiem stendiem $U=0.16 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$. Eksperimentālās vērtības, kuras ieguva autors, vairākos gadījumos ir stipri atšķirīgas. Tās atspoguļotas 4.4. tabulā, bet uzskatāmāka priekšstata gūšanai 4.1. un 4.2. attēlā. Kļūdas tika rēķinātas, izmantojot vidējās kvadrātiskās novirzes metodi.

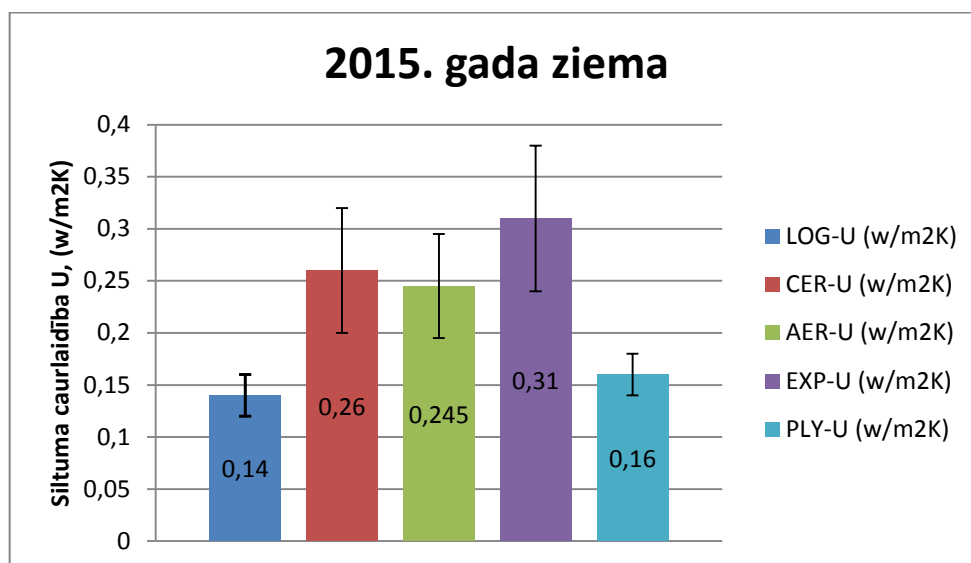
4.4.tabula

Siltuma caurlaidības aprēķinu rezultāti

	2014 Rudens			2015 ziema		
LOG-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	0,10	$\pm 0,02$	26%	0,14	$\pm 0,02$	17%
CER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	0,10	$\pm 0,03$	32%	0,26	$\pm 0,06$	24%
AER-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	0,19	$\pm 0,04$	19%	0,25	$\pm 0,05$	20%
EXP-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	0,22	$\pm 0,06$	27%	0,31	$\pm 0,07$	23%
PLY-U $\left(\frac{w}{m^2 \cdot K}\right)$	0,13	$\pm 0,02$	19%	0,16	$\pm 0,02$	12%



4.1.att. 2014. gada pavasara perioda aprēķinātās siltuma caurlaidības vērtības



4.2.att. 2015. gada ziemas perioda aprēķinātās siltuma caurlaidības vērtības

Apkopojot meteostaciju datus 2014. gada pavasara periodā, gaisa vidējais relatīvais mitrums bija 66.5% un vidējā gaisa temperatūra 6.1°C. Savukārt 2015. gada ziemas periodā vidējais relatīvais mitrums bija 87.5% un gaisa temperatūra 1.3°C.

Rezultāti parāda, ka 2014. gada pavasarī ir iegūtas mazākas siltuma caurlaidības vērtības nekā 2015. gada ziemā. Lai gan ziema nebija ļoti auksta, tās relatīvais gaisa mitrums bija par 21% lielāks un temperatūra bija par vidēji 5° C zemāka.

Veicot aprēķinus pie temperatūras 6.1° C un mitruma 66.5% absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $4.8 \frac{g}{m^3}$. Savukārt pie temperatūras 1.3° C un mitruma 87.5% absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $4.7 \frac{g}{m^3}$.

Autors secina, ka abos šajos periodos vidējais ūdens daudzums gaisā bija praktiski vienāds $4.7 - 4.8 \frac{g}{m^3}$, kas liecina, ka šajā gadījumā mitruma atšķirības neietekmē siltuma caurlaidības U vērtību, bet to ietekmē mitruma līmenis būvkonstrukcijās. Tas svārstās sezonāli, respektīvi, aukstā ziemā konstrukcijas žūst un pavasarī ir izžuvušas. Savukārt vasarā mitruma līmenis pieaug, un rudenī tās sasniedz savu augstāko mitruma līmeni gadā. Nobīde laikā ir saistīta ar tvaika difūziju. Ja difūzijas pretestība konstrukcijās būtu ļoti maza, tad fāzu nobīde praktiski nebūtu novērojama. Kad iestātos ziema, konstrukcijas samērā ātri izžūtu, bet vasarā strauji paliktu mitras. Tas nozīmē, ka būtu novērojamas būvkonstrukciju mitruma izmaiņas diennakts laikā – dienā tās žūtu, bet naktī paliktu mitras.

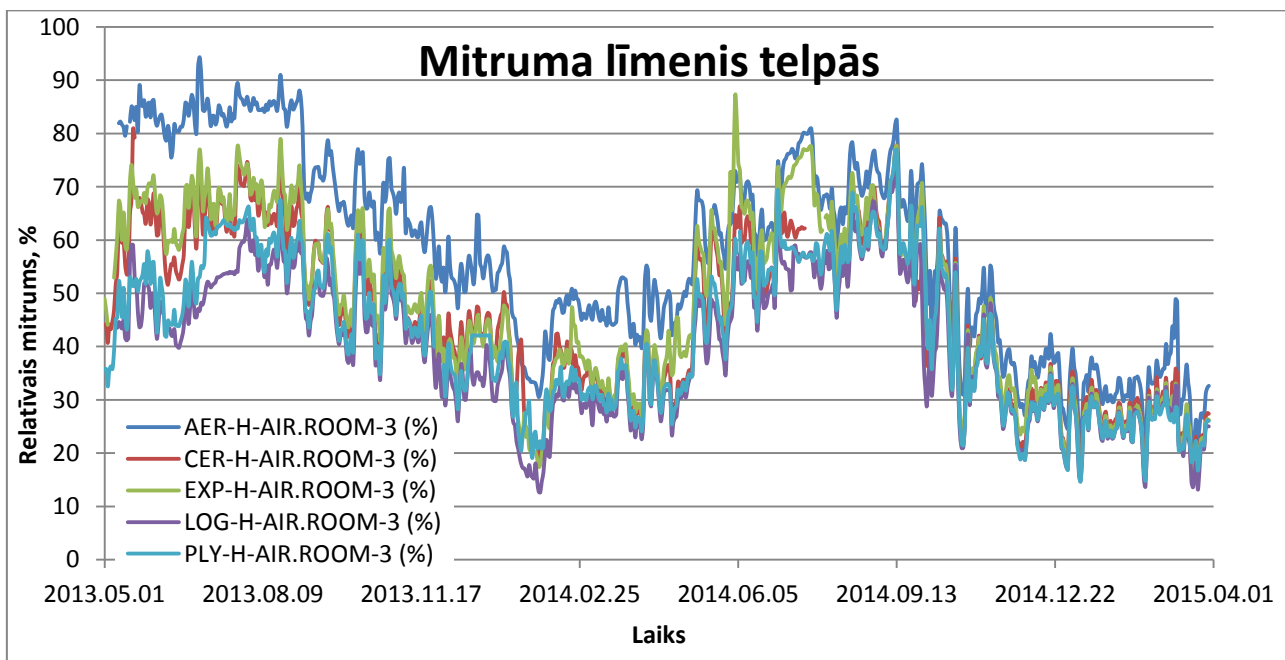
Tādējādi konstatējam, ka āra gaisa mitrums konkrētā laika periodā siltuma caurlaidību ietekmē minimāli (īslaicīga ietekme), bet U vērtību ietekmē mitruma līmenis ēku sienās. Savukārt mitrums ēku sienās samazinās vai palielinās sezonāli, atkarībā no absolūta ūdens

daudzuma gaisā (ilglaicīga ietekme). Gaisa mitrums būvkonstrukciju iekšienē analizēts punktā 4.3.

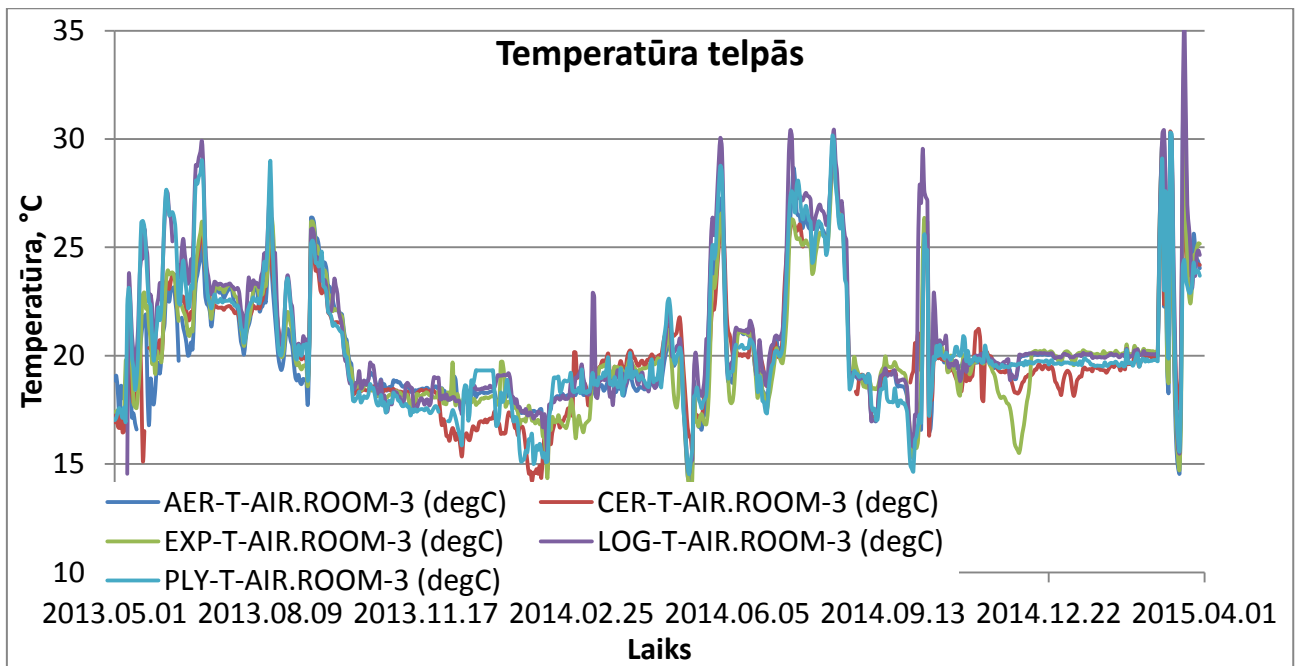
Lai varētu precīzāk novērtēt mitruma ietekmi uz siltuma caurlaidības vērtību, būtu jāņem vērā mitruma līmenis esošajās konstrukcijās.

4.2. Gaisa mitrums un mitrināšanas eksperiments

Bez ēku konstrukciju siltumcaurlaidības svarīgs faktors ēkās ir arī dzīvošanas apstākļi, kuriem jābūt termiskā komforta robežās. Kā zināms, stendiem ir dažādas siltuma caurlaidības U vērtības, līdz ar to varam secināt, ka apstākļi telpās arī būs atšķirīgi. Apkures sezonā šīs atšķirības tiek samazinātas, pieskaņojot apkures jaudu, lai nodrošinātu vēlamo temperatūru. Pat cenšoties uzturēt vienādus temperatūras apstākļus telpās, tie tomēr ir atšķirīgi, kas redzams 4.8. attēlā. Savukārt, kad nav apkures sezona, temperatūras svārstības ir no 15-30°C. 4.6. attēlā attēlots, cik ļoti atšķiras temperatūra atkarībā no stendiem. Lai salīdzinātu mitrumu līmeni telpās, tika izvēlēts temperatūras un mitruma sensors telpas vidū 1.1 m augstumā un attēlots grafikā starp dažādām būvkonstrukcijām sākot no 2013. gada maija līdz 2015. gada martam [4.3.att.][4.4.att.].

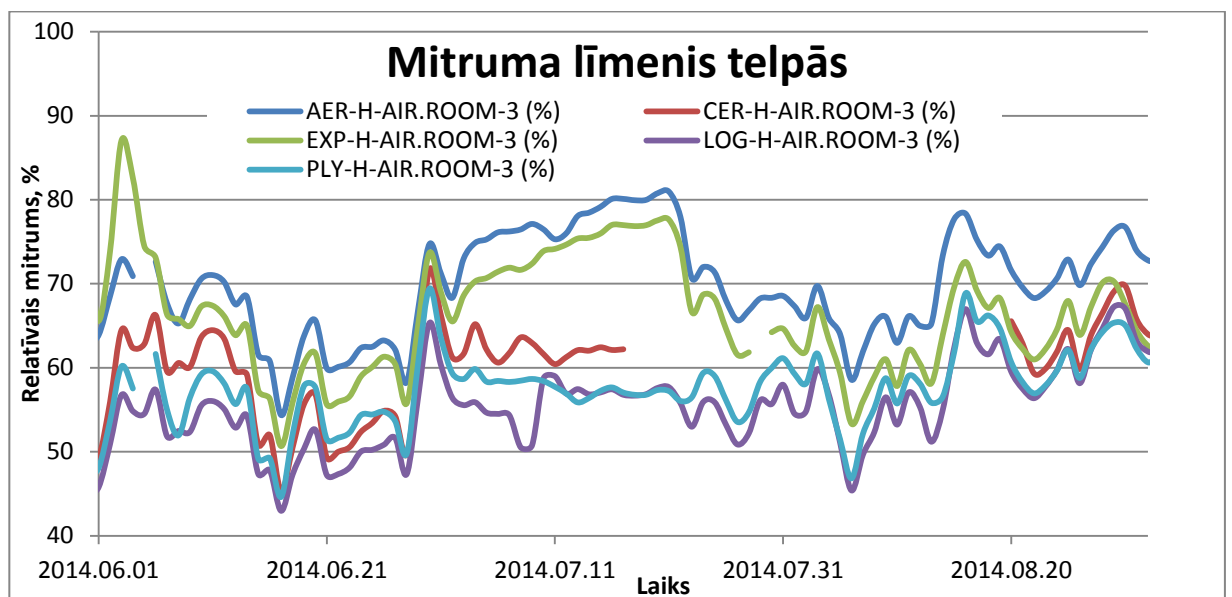


4.3.att. Mitruma līmenis telpās

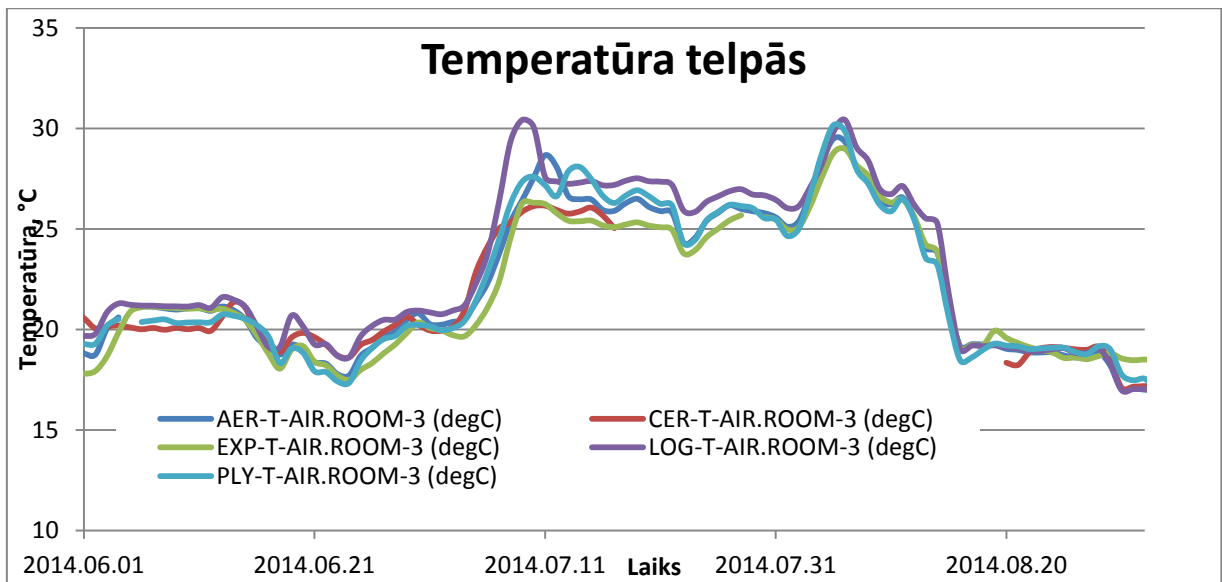


4.4.att. Temperatūra telpās

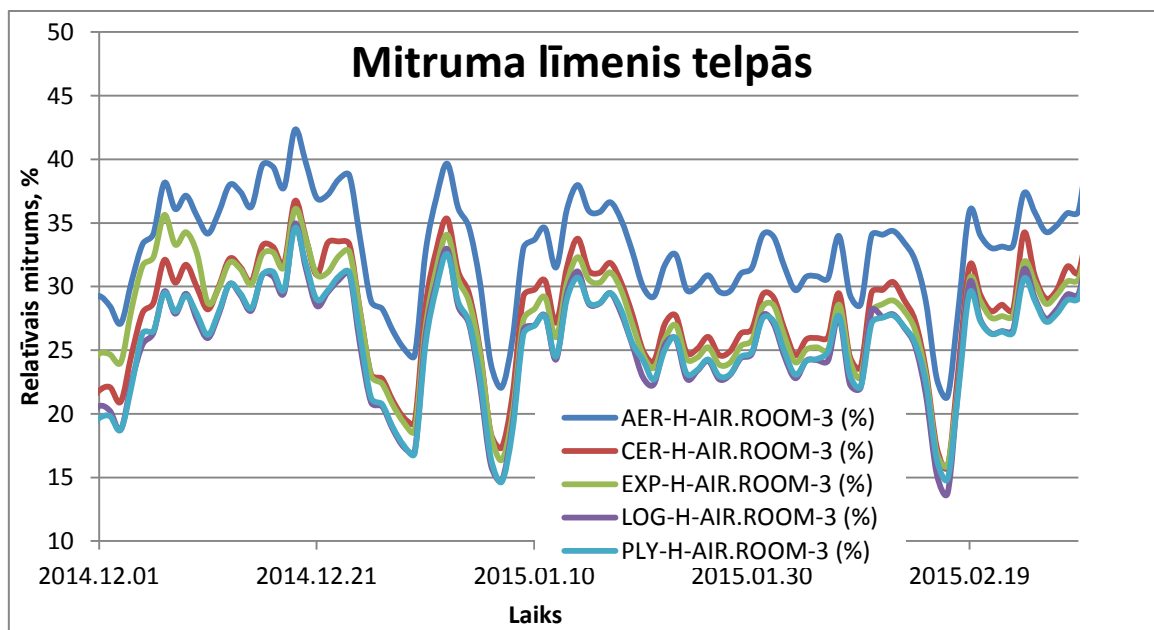
Grafikos redzams, ka temperatūras un mitruma apstākļi standos manāmi atšķiras. Kā arī, redzams, ka vasaras periodā mitruma līmenis telpās ir augtāks nekā ziemas periodos. Tas saistīts ar to, ka ziemā, piemēram, pie 0°C ar 100% gaisa relatīvo mitrumu absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $4.58 \left(\frac{g}{m^3}\right)$, bet vasarā pie 20°C ar tādu pašu relatīvo gaisa mitrumu absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $17.3 \left(\frac{g}{m^3}\right)$. No tā var secināt, ka ar ventilāciju pievadītais absolūtais mitruma daudzums vasarā ir lielāks nekā ziemā. Vasarā telpās relatīvais mitrums vidēji ir 50-80% [4.5. att.][4.6. att.], bet ziemā vidēji 20-40% [4.7. att.][4.8. att.].



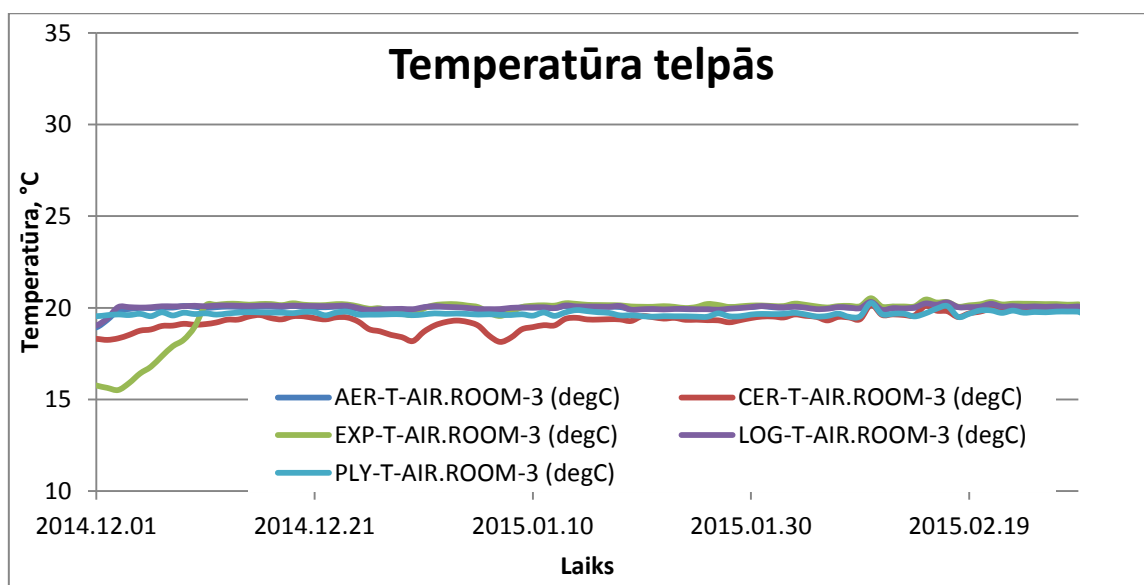
4.5.att. Mitruma līmenis telpās vasaras periodā 2014.06.01-2014.09.01



4.6.att. Temperatūra telpās vasaras periodā 2014.06.01-2014.09.01



4.7.att. Mitruma līmenis telpās ziemas periodā 2014.12.01-2015.03.01



4.8.att. Temperatūra telpās ziemas periodā 2014.12.01-2015.03.01

Aplūkojot attēlu 4.5. un 4.7. redzams, ka visaugstākais mitruma līmenis ir AER stendā. Attēlā 4.3. redzams, ka 2013. gadā drīz pēc apkures pieslēgšanas gaisa relatīvais mitrums svārstījies 80-90%, kamēr pārējos standos tas bija 60-70% CER un EXP, 40-60% LOG un PLY.

Kapilārā ūdens uzsūce māla keramiskajiem blokiem ir gandrīz trīs reizes lielāka nekā gāzbetonam. Keramisko bloku sākuma mitrums ir 0%, savukārt gāzbetonam - 60% ir ūdens svars uz kopējo masu. Tas nozīmē, ka augstais mitrums gāzbetonā radies no sākuma tehnoloģiskā mitruma, kā arī dēļ mitruma, kas radies no mūrēšanas un apmetuma. Lai arī keramisko bloku (CER, EXP) sākuma mitrums ir 0%, tie mūrēšanas un apmetuma uzklāšanas procesā uzsūc trīs reizes vairāk ūdeni nekā gāzbetona bloki. Tas saistīts ar slēgto un atklāto poru struktūru šajos materiālos. Tā kā kapilārā ūdens uzsūce keramiskajiem blokiem ir krietni lielāka nekā gāzbetonam [19], CER un EXP stendi arī iegūst salīdzinoši lielu sākuma mitrumu. Savukārt LOG un PLY ir sausa koka konstrukcijas, kurām netiek uzklāts apmetums un citi šāda veida mitruma avoti.

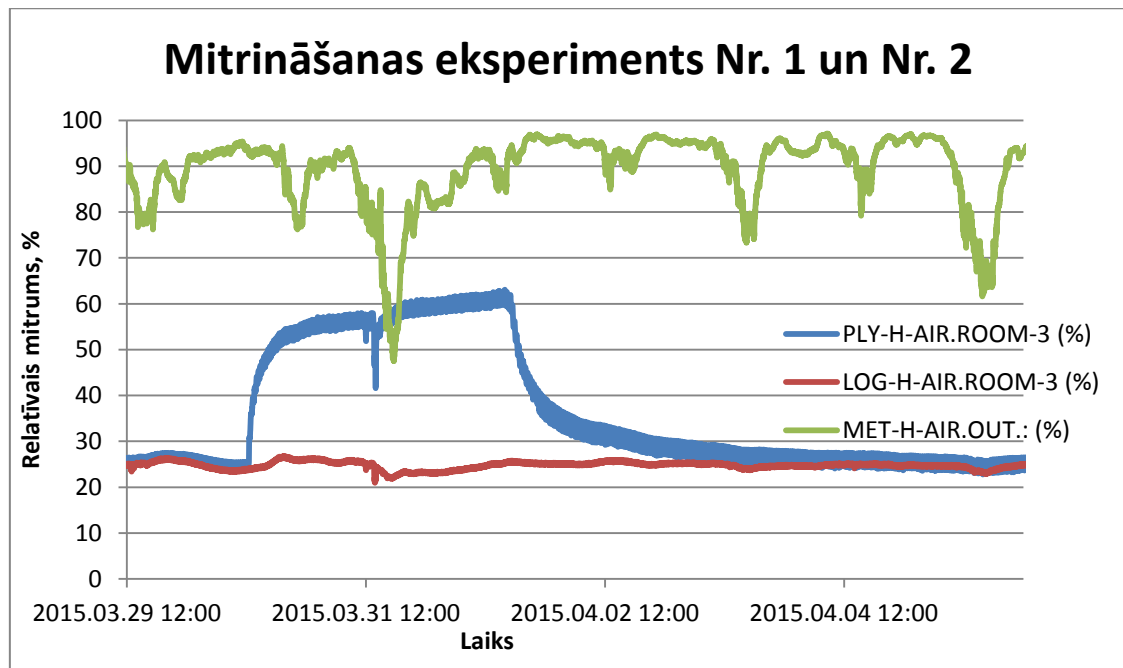
Salīdzinot standus savā starpā 2015. gadā 4.7.attēlā redzams, ka augstāks mitruma līmenis vēl joprojām ir mūrētajās ēkās (AER, CER un EXP). Savukārt LOG un PLY standos gaisa mitruma apstākļi vēl joprojām ir līdzīgi, tāpēc gaisa mitrināšana tika veikta PLY stendā un LOG tika izmantots kā references stends. Šie divi stendi tika izvēlēti, jo gaisa relatīvais mitrums ziemā ir zem komforta robežas 20-30% [4.7. att.] (termiskā komforta nosacījumi ir 40-60%).

Mitrināšana tika veikta ar mitrinātāju *Daikin mck75j Ururu* [Attēls 3.6.]. Veikti 6 mitrināšanas eksperimenti, kuru dati apkopoti tabulā 4.5.

Mitrināšanas eksperimentu apkopojums

	Norises laiks	Stenda ventilācijas intensitāte $n \cdot \left(\frac{1}{h}\right)$	Mitrinātāja darba režīms	Mitrinātāja ventilācijas uzstādījums	Eksperimenta ilgums	Pievadītais vidējais ūdens tvaiku daudzums stundā $\left(\frac{l}{h}\right)$	Cilvēku ekvivalents pievadītajam ūdens daudzumam
1	2015.03.30 12:30	0.45	CONT	mazākais	24 h	0,17	3.2
2	2015.03.31 14:00	0.45	HIGH	-	27 h	0,15	2.8
3	2015.04.07 12:35	0.45	LOW	-	43 h	0,09	1.8
4	2015.04.15 11:50	0.45	CONT	mazākais	25,5 h	0,16	3
5	2015.05.15 17:15	0	CONT	mazākais	56 h	0,07	1.4
6	2015.05.19 10:15	0.85	CONT	mazākais	10 h	0,40	7.7

Eksperimentu dati parādīti attēlos 4.9., 4.10., 4.11. un 4.12., kur redzams mitruma līmenis PLY un LOG standos. LOG tiek izmantots kā references stends. Papildus attēlos parādīts arī āra relatīvais gaisa mitrums, lai varētu novērtēt āra mitruma ietekmi uz stendu telpu mitrumu. Eksperimenti Nr. 1, 2, 3 un 4 tika veikti vienādā stenda ventilācijas režīmā $n=0.45\left(\frac{1}{h}\right)$. Eksperimentā Nr. 5 ventilācija bija izslēgta $n=0\left(\frac{1}{h}\right)$ un Nr. 6 gandrīz divkārtas intensitātes $n=0.85\left(\frac{1}{h}\right)$.



4.9.att. Mitrināšanas eksperiments Nr. 1 un Nr. 2

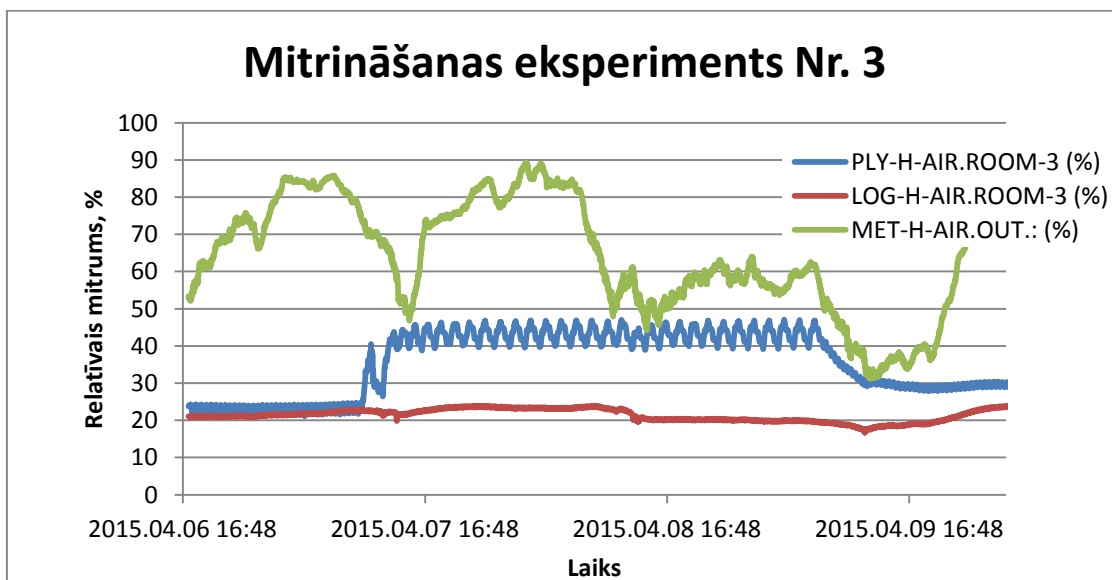
Attēlā 4.9. redzami divi mitrināšanas eksperimenti, pirmais tika veikts uzstādot režīmu CONT ar mazāko ventilācijas rotora griešanās ātrumu. Visos eksperimentos laika atskaite sākas un beidzas brīdī, kad ieslēdz vai izslēdz mitrināšanas ierīci. Eksperimenta sākumā relatīvais gaisa mitrums telpā bija ap 25 %. Mitruma līmeņa pieaugums bija ļoti straujš pirmajās 6 stundās (25-50%), vēl pēc 6 stundām mitruma līmenis bija sasniedzis savu piesātinājuma vērtību (55-56%).

Pēc 24 stundām, no eksperimenta sākuma brīža, mitruma līmenis sāka strauji kristies. Tātad mitrinātāja 4 litru ūdenstilpne bija tukša. Līdz ar to var aprēķināt vidēji pievadīto ūdens tvaika daudzumu stundā - $0.17 \left(\frac{\text{litri}}{\text{stundā}} \right)$, kas atbilst apmēram 3 cilvēku ekvivalentam stenda telpā, ja viens cilvēks izdala 0.052 litrus stundā ^[5]. Līknes pieaugumu var raksturot ar eksponenti ($RM = A - Be^{-\frac{t}{\tau}}$) $RM = 55.8 - 22.9 \cdot e^{-0.00511t}$. Raksturīgā laika konstante raksturo cik strauji aug līkne $\tau = \frac{1}{0.00511t} = 195$ minūtēs.

Kad relatīvais mitrums bija samazinājies līdz 40%, tika uzsākts otrais mitrināšanas eksperiments. 4 stundu laikā tika sasniegts mitruma līmenis 60-62%, kurš atlikušajās eksperimenta 23 stundās pieauga ļoti minimāli. Vidēji pievadītais ūdens tvaiku daudzums telpā ir $0.15 \left(\frac{\text{litri}}{\text{stundā}} \right)$, kas atbilst apmēram 3 cilvēku ekvivalentam. Kad ūdens tvertnē bija beidzies, mitruma līmenis telpā uzreiz sāka kristies. Piecu stundu laikā mitruma līmenis samazinājās ļoti strauji no 60% līdz 40 % un pēc tam tas sāka tuvojies savam līdzsvara mitruma līmenim 25%, ko sasniedza pēc 2 dienām. Līknes kritums tiek raksturots ar

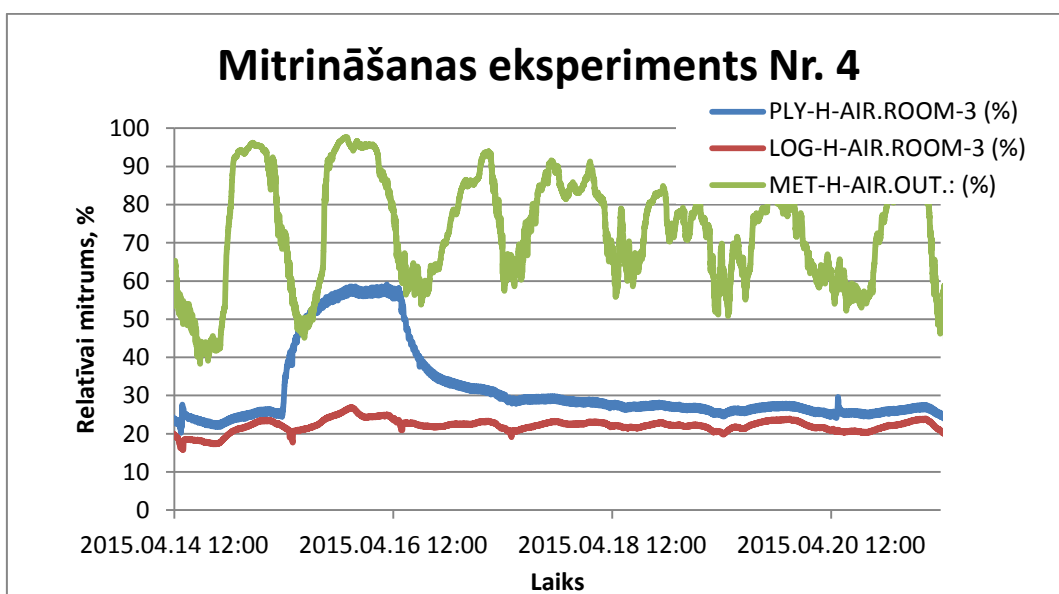
eksponenti $RM = 25.8 + 20.6 \cdot e^{-0.00115t}$. Raksturīgā laika konstante raksturo cik strauji dilst

līkne $\tau = \frac{1}{0.00115t} = 869$ minūtēs.



4.10.att. Mitrināšanas eksperiments Nr. 3

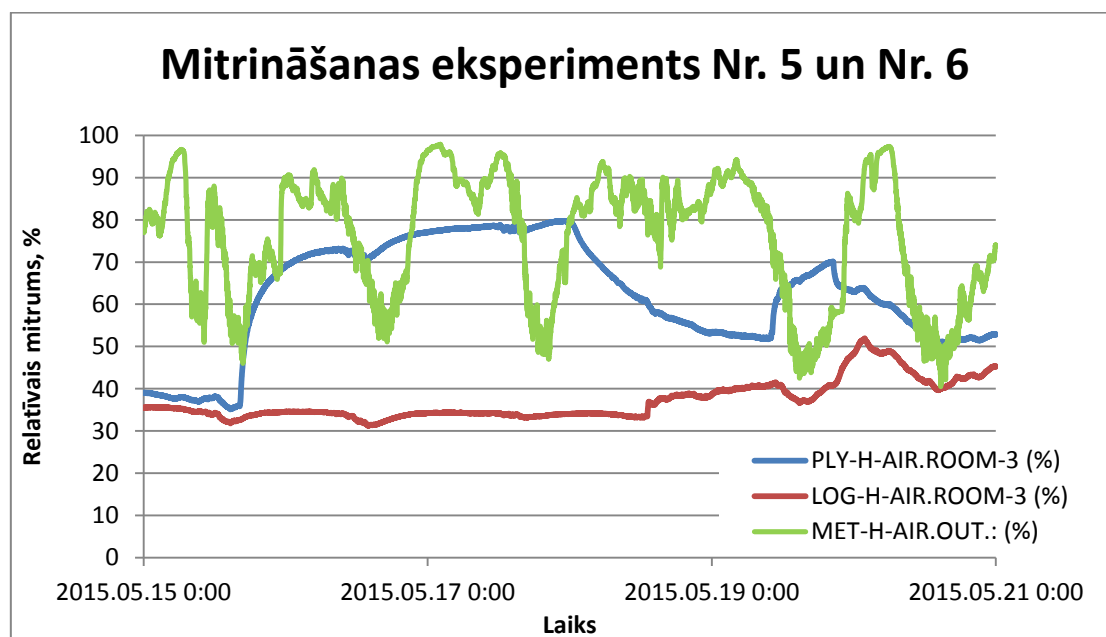
Iepazīšanās periodā ar mitrinātāju *Daikin*, lai izprastu mitrināšanas režīmus, tika veikts mitrināšanas eksperiments režīmā LOW. Šajā režīmā mitruma līmeni ierīce uzturēja nedaudz virs 40%. Mitrināšana noritēja 43 stundas, un stundā vidēji pievadītais ūdens tvaiku daudzums telpā bija $0.09 \left(\frac{\text{litri}}{\text{stundā}} \right)$, kas atbilst gandrīz 2 cilvēku mierīgai sēdēšanai telpā (viens pieaugušais un viens bērns).



4.11.att. Mitrināšanas eksperiments Nr. 4

Pirms mitrināšanas sākuma līdzsvara mitrums stendos ir līdzīgs – apmēram 23%. Mitrināšanas pirmajās 7 stundās vērojams straujš mitruma pieaugums no 23-55%. Pēc tam atlikušajās mitrināšanas eksperimenta 18,5 stundās mitruma līmenis pieaug nedaudz, vidēji līdz 58%. Vidēji pievadītais ūdens tvaika daudzums ir $0.16 \left(\frac{\text{litri}}{\text{minūtē}} \right)$, kas ir ekvivalents 3 cilvēku pievadītajam mitruma daudzumam stundā. Augošo līkni var raksturot ar eksponenti $RM = 57.4 - 29.1 \cdot e^{-0.00434t}$. Laika konstante raksturo līknes pieaugumu $\tau = \frac{1}{0.00434t} = 230$ minūtēs.

Mitruma līmeņa samazināšanās pēc mitrināšanas beigām notiek līdzīgi kā pēc otrā eksperimenta beigām, kas redzams 4.11. attēlā. Dilstošo līkni raksturo ar eksponenti $RM = 27.4 + 22.27 \cdot e^{-0.00191t}$. Laika konstante raksturo cik strauji dilst līkne $\tau = \frac{1}{0.00191t} = 523$ minūtēs.



4.12.att. Mitrināšanas eksperiments Nr. 5 un Nr. 6

Eksperimentā Nr. 5 un Nr. 6 kondicioniera darbība ir izslēgta (pirmajos četros eksperimentos kondicionieris bija ieslēgts).

Iepriekšējos mitrināšanas eksperimentos stendu ventilācija $n=0.45 \left(\frac{1}{h} \right)$. Eksperimentā Nr. 5 stendu ventilācijas plūsma ir izslēgta un eksperiments ilgst 56 stundas. Vidēji pievadītais ūdens tvaiku daudzums ir $0.07 \left(\frac{\text{litrs}}{\text{stundā}} \right)$, kas apmēram atbilst viena pieauguša cilvēka un bērna

ekvivalentam. Augošās līknes eksponente ir $RN = 77.3 - 27.4 \cdot e^{-0.00216t}$. Laika konstante raksturo līknes augšanas straujumu $\tau = \frac{1}{0.00216t} = 463$ minūtēs.

Izslēgtās ventilācijas dēļ netiek aizvadīts prom mitrums no telpas un 14 stundas no eksperimenta sākuma relatīvais mitrums ir 73%, bet nākamās 6 stundas tas samazinās līdz 70%. Tā kā stendos nav uzstādīta kondicionēšana (netiek uzturēts noteikts temperatūras līmenis telpā), uzaustot saulei palielinās āra temperatūra, tai apspīdot ēkas sienas un logu, temperatūra telpā palielinās, līdz ar to relatīvais mitrums samazinās. Āra mitrums no 90% mainījās līdz 50%, tā ietekmē samazinājās arī telpu relatīvais gaisa mitrums. References stendā pie izslēgtas ventilācijas tajā pašā brīdī arī var novērot mitruma kritumu no 34-31%

Nākamo 25 stundu laikā mitrums pieaug līdz 79%, bet, kad sākas nākamā diena ir arī vērojams neliels relatīvā mitruma samazinājums (nākamo 3 stundu laikā) gan pētāmajā, gan references stendā par 1%, jo līdzīgi kā iepriekšējā dienā, temperatūra palielinājās sākoties dienai līdz ar to relatīvais mitrums nedaudz samazinājās. Pēc tam nākamās 9 stundas turpinās ūdens tvaika izdalīšanās no mitrinātāja, līdz tā ūdenstvertne ir tukša. Mitruma līmenis sāk pakāpeniski samazināties.

Kad tiek ieslēgta ventilācija uz maksimālo intensitāti $n=0.85\left(\frac{1}{h}\right)$, references stendā uzreiz ir novērojams mitruma pieaugums, jo stendam tiek intensīvi pievadīts mitrums no āra gaisa.

Sākot eksperimentu Nr. 6 relatīvais mitrums PLY stendā ir 52% un eksperimenta beigās pēc 10 stundām ir 70%. Klasisks eksponencionāls līknes kāpums nav novērojams, jo eksperimenta sākuma brīdī āra relatīvais mitrums bija 80%, un tas strauji 5 stundu laikā samazinājās līdz 45%, līdz ar to stendā pievadītais absolūtais ūdens daudzums krietni samazinājās. References stendā arī novērojams pievadītā mitruma samazinājums.

Eksperimentā Nr. 6, kas ilgst 10 stundas vidēji pievadītais mitruma daudzums no mitrinātāja ir $0.4 \left(\frac{\text{lītri}}{\text{stundā}}\right)$, kas atbilst aptuveni 8 cilvēku ekvivalentam, kas priekš $9m^2$ telpas ir ļoti daudz.

Kopumā veicot mitrināšanas eksperimentus pie normālas ventilācijas $n=0.45 \left(\frac{1}{h}\right)$, var secināt, ka šādā telpā, ar platību $9m^2$ un tilpumu $27m^3$, 3 cilvēki ir samērā liels mitruma avots, pie kura tiek sasniegta mitruma komforta robeža 60%. Ja telpā izdalās ūdens, kas atbilst 1-2 cilvēku ekvivalentam tad mitrums ir komforta zonā.

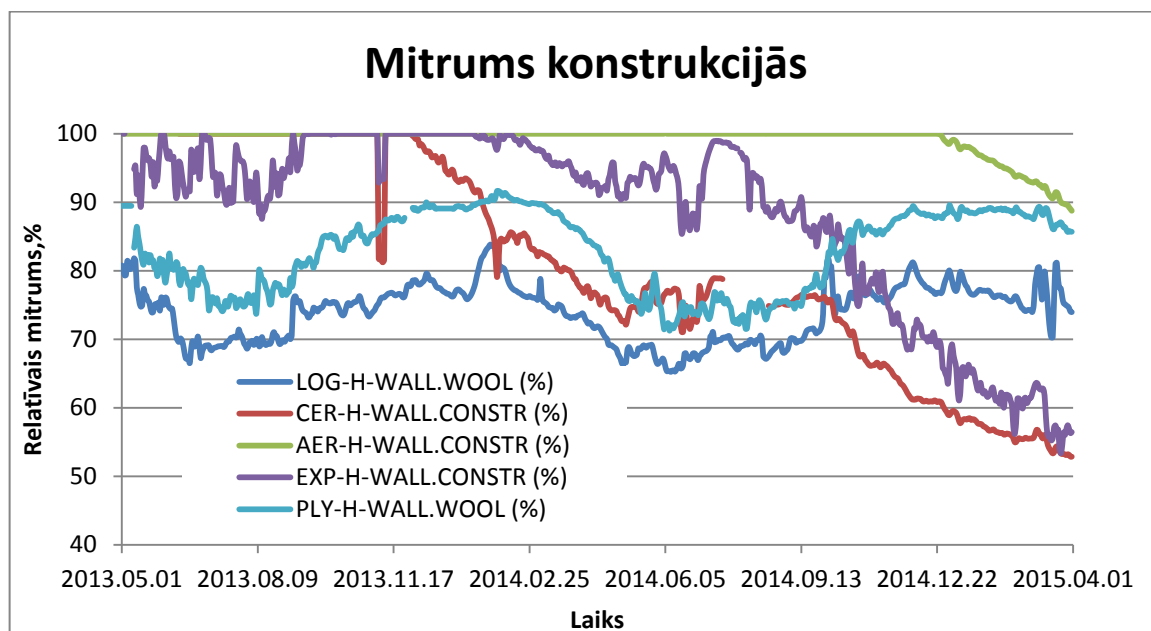
Pie izslēgtas ventilācijas $n=0 \left(\frac{1}{h}\right)$ šādā telpā atrodies pieaugušam cilvēkam un bērnam (piemēram, pa nakti guļot) 10 stundās telpas relatīvais mitrums būs sasniedzis 75%, kas ir krietni virs mitruma komforta augšējā līmeņa. Principā neventilējamā telpā cilvēks ar savu ilglaicīgu uzturēšanos var uzturēt tādu mitruma līmeni, kas izraisīs dažādu nevēlamu mikroorganismu un baktēriju attīstību. Ja mitrums ir ļoti augsts ($>70\%$), tad sāk veidoties pelējums.

Savukārt pie ventilācijas intensitātes $n=0.85 \left(\frac{1}{h}\right)$, telpu mitrums kļūst ļoti būtiski atkarīgs no āra mitruma. Par to autors pārliecinājās pirms eksperimenta Nr.6 standos uzstādot šo ventilācijas intensitāti. References standā uzreiz ievērojami pieauga relatīvā mitruma līmenis. Vēlāk eksperimenta laikā references standā, kā redzams 4.12.attēlā, telpas mitruma līmenis ievērojami svārstījās līdz ar āra mitruma izmaiņām.

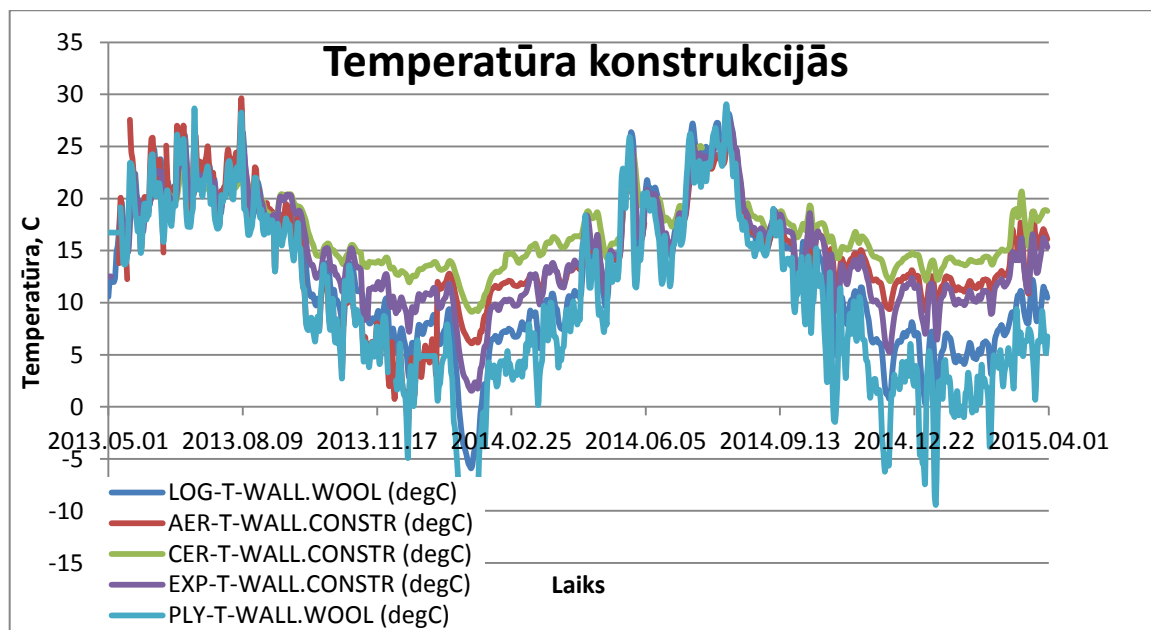
4.3. Mitrums būvkonstrukcijās

Lai novērtētu mitruma stāvokli būvkonstrukcijās, no ēkās esošajiem sensoriem tika izvēlēti to mērījumu sensoru rādījumi, kuri atradās iekšā konstrukcijās, kā arī pie loga un durvīm, un kuri reģistrēja temperatūras un mitruma izmaiņas attiecīgajās zonās.

Sensori būvkonstrukcijās mēra temperatūru un gaisa relatīvo mitrumu, kas ir indikators tam cik mitra ir konstrukcija. Ja ir liels mitrums, tad konstrukcija arī mitra. Relatīvais gaisa mitrums tieši neraksturo ūdens saturu konstrukcijā, bet to raksturo ūdens svara mitrums uz kopējo materiālu masu. Reālo ūdens daudzumu konstrukcijā var noteikt, ja paņem paraugu no sienas un ar to veic eksperimentus



4.13.att. Relatīvais mitrums stendu konstrukcijās

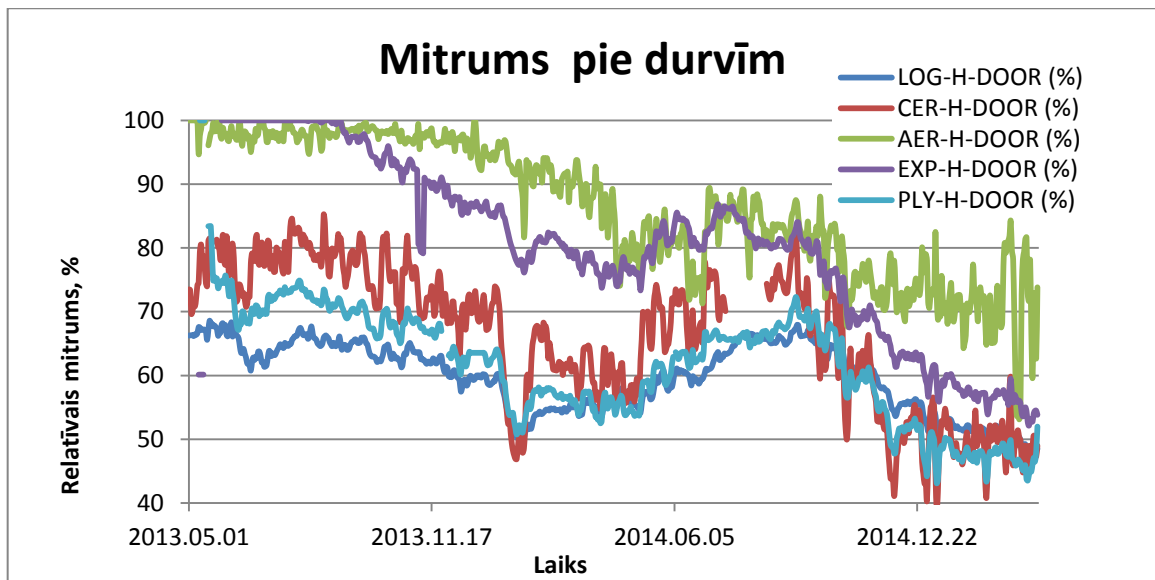


4.14.att. Temperatūra stendu konstrukcijās

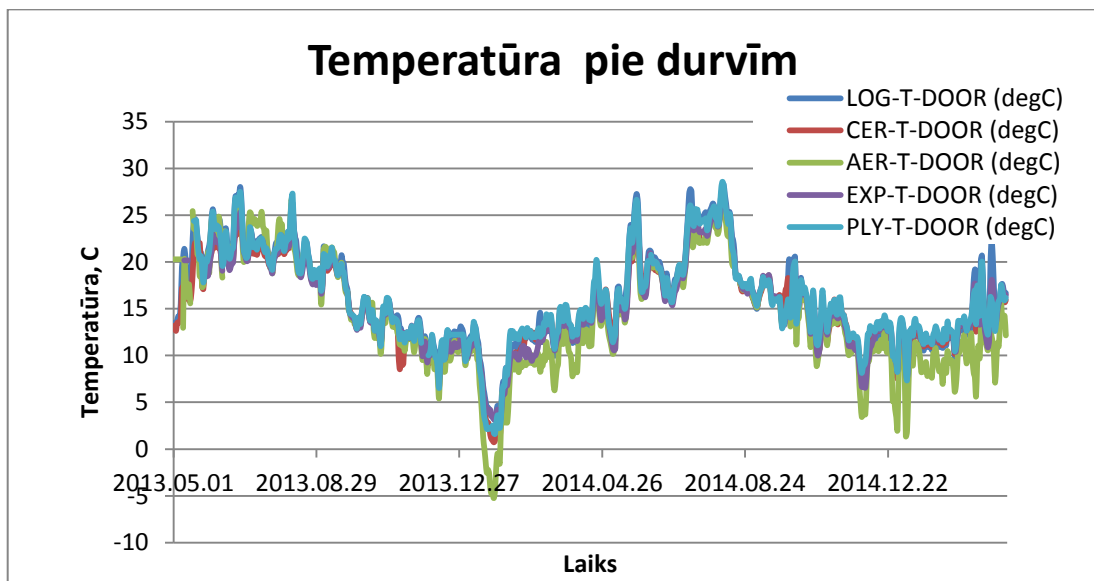
Attēlā 4.13. redzams, ka visos mūrētajos stendos (EXP, AER un CER) mitruma līmenis 2013. gada vasarā līdz ziemai ir virs 90%. Ziemas laikā absolūtais ūdens daudzums gaisā gramos uz kubikmetru ir ļoti mazs salīdzinot ar vasaru. Konstrukcijās, samazinoties āra temperatūrai, pamazinās arī rasas punkta temperatūra. Pat ja sensors ziemā rāda relatīvi augstu mitrumu 70% pie 0°C, absolūtais ūdens daudzums gaisā ir $3.4 \frac{g}{m^3}$, bet vasarā pie 20°C un tā paša relatīvā mitruma būs $12.1 \frac{g}{m^3}$. Tas nozīmē, ka ziemas laikā konstrukcija sāk žūt, bet sensori mitruma samazināšanos reģistrē tikai uz pavasara pusi. Šī īpatnība ir saistīta ar būvkonstrukciju inerci. Ārējie konstrukcijas slāņi, samazinoties āra temperatūrai žūst daudz ātrāk, bet slāņi, kas ir tuvāk vidum, žūst vēlāk, jo mitrums tiek aizvadīts difūzija ceļā. Savukārt sensori atrodas mūra konstrukcijās pašā vidū, tāpēc tas ir tikai loģiski, ka sensora reģistrētās mitruma vērtības samazinās tikai ziemas beigās. Šim faktoram arī ir ietekme uz siltuma caurlaidību, skat. sadaļu 4.1. Ja būtu pieejami siltuma plūsmas blīvuma dati vairāku gadu periodā, noteikti būtu novērojama tendence, ka salīdzinot rudeni un pavasari pie vienādām gaisa un relatīvā mitruma vērtībām, siltuma caurlaidības aprēķina vērtības rudenī būtu lielākas nekā pavasarī (konstrukciju žūšanas dēļ).

Savukārt LOG un PLY stendi būvniecības sākumā bija sausi un nav novērojama konstrukciju žūšana. Novērojamas ir tikai sezonālās mitruma svārstības. Līdzīgi kā iepriekš skaidrots, mazākas relatīvā mitruma vērtības tiek sasniegtas vasaras sākumā.

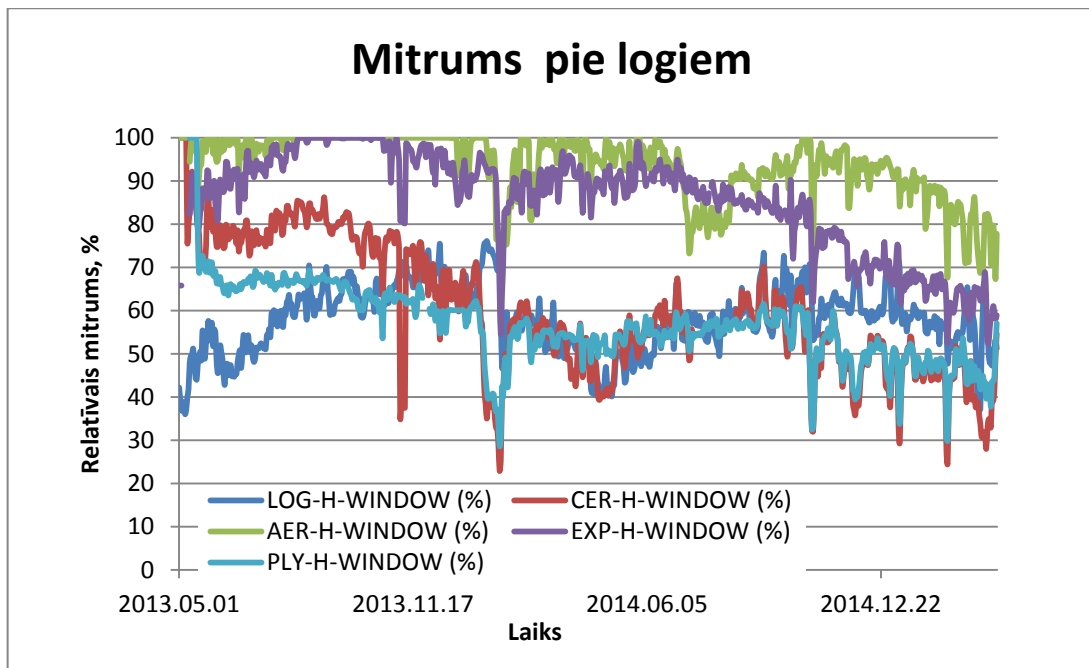
Mitrums konstrukcijās korelē ar no mērījumu datiem aprēķinātajām siltuma caurlaidības vērtībām - pie visaugstākā mitruma ir vislielākā siltuma caurlaidība.



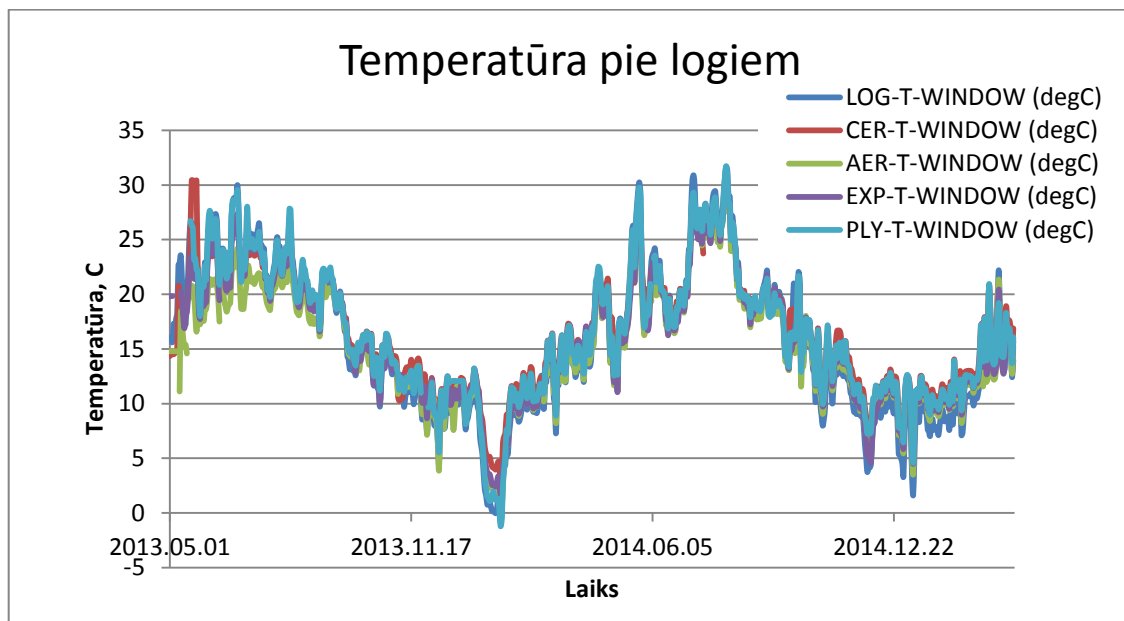
4.15.att. Mitrums ārsienas konstrukcijā pie durvīm



4.16.att. Temperatūra ārsienas konstrukcijā pie durvīm



4.17.att. Mitrums ārsienas konstrukcijā pie logiem



4.18.att. Temperatūra pie logiem

Attēlos 4.15. un 4.17. vērojamas līdzīgas tendences kā iepriekš aprakstīts. AER un EXP stendos būvkonstrukcijā pie durvīm un logiem mitrums samazinās, sezonālās svārstības nav novērojamas. Savukārt CER stendā mitrums 2013. gada ziemā samazinās, un sākot no 2014. gada vasaras ir novērojamas sezonālās mitruma izmaiņas. LOG un PLY vērojamas tikai sezonālās mitruma izmaiņas, jo konstrukciju sākotnējais mitrums pēc izbūves bija mazs

5. SECINĀJUMI

- Stendos, kuri veidoti no mūrētām konstrukcijām (it īpaši gāzbetona) un apmetuma, ir relatīvi augstāks sākotnējais mitruma līmenis, bet pēc gada jau ir novērojama konstrukciju žūšana, kas nākamajos gados turpinās, līdz ēkas būvkonstrukcijas sasniedz līdzsvara mitrumu un pakļaujas tikai sezonālajām mitruma svārstībām.
- Praksē izmērītā siltuma caurlaidība var būtiski atšķirties no projektā aprēķinātājām vērtībām – tā iemesli ir mitrums, neprecīzi materiālu dati un novirzes būvniecības procesā no projektētā.
- Siltuma caurlaidība tieši korelē ar būvkonstrukcijās esošo mitrumu, jo tas lielāks, jo lielāka būvmateriālu siltuma vadītspēja.
- Absolūtajam ūdens daudzumam gaisā ir liela ietekme uz mitrumu konstrukcijās. Ziemā absolūtais ūdens daudzums āra gaisā ir mazāks nekā vasarā, tāpēc ziemā novēro konstrukciju žūšanu, bet vasarā absolūtais mitruma daudzums gaisā ir liels, tāpēc konstrukcijas vasarā kļūst mitrākas, kas savukārt atstāj ietekmi uz siltuma apmaiņu caur ēkas būvkonstrukcijām
- Bez papildus mitrināšanas gaisa relatīvais mitrums pētāmajos stendos (it sevišķi no vieglām konstrukcijām) ir zem komforta mitruma apakšējā līmeņa (40%).
- Mitrināšanas eksperiments uzskatāmi parāda, ka cilvēku atrašanās telpā ievērojami palielina telpas relatīvo gaisa mitrumu.

PATEICĪBAS

Vēlos pateikties sava bakalaura darba vadītājam asoc. Prof. Andrim Jakovičam par sava laika veltīšanu un padomiem, kas veicināja un uzlaboja darba izstrādes procesu. Kā arī vēlos pateikties Jānim Ratniekam par veltīto laiku, saistībā ar mitrināšanas datu faila formāta pārveidi un sūtīšanu. Novērtēju arī Staņislava Gendeļa palīdzību saistībā ar ventilācijas intensitātes maiņu standos. Tā pat esmu pateicīgs arī Līgai Lācei par konsultācijām saistībā ar latviešu valodas interpunkciju, stilistiku un gramatiku.

LITERATŪRAS AVOTI UN ATSAUCES

- [1] *Thermal comfort*. Wikipedia, the free encyclopedia. Apskatāms http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_comfort
- [2] *Ilgspējīga būvniecība*. Biedrība „Zaļās mājas”, 2008. Apskatāms http://www.zalasmajas.lv/storie/editor/File/Ilgtspejiga_buvnieciba.pdf
- [3] **A. Jakovičs**. *Testa stendu energoefektivitātes monitoringa projekts*. Apskatāms <http://www.eem.lv/ERAFindex.php>
- [4] **Richard L. Quirouette**. *Moisture sources in houses*, National Research Council Canada, Canada, 1983. Apskatāms <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/bsi/83-moisture-source.html>
- [5] **S.C. Mite un J.L. Bray**. *Research in Home Humidity Control*. Research Series No. 106, The Engineering Experiment Station, Purdue University, Urbana, November 1948.
- [6] **R.L. Quirouette**. *The Mark XI Energy Research Project*. Design and Construction. Division of Building Research, National Research Council Canada, Building Research Note 131, Ottawa, October 1978.
- [7] **Lois Arena, Pallavi Mantha, Achilles N. Karagiozis**. *Monitoring of Internal Moisture Loads in Residential Buildings*. Steven Winter Associates Norwalk, CT, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, December 2010. Apskatāms - <http://www.huduser.org/Publications/pdf/InternalMoistureLoad.pdf>
- [8] *Relatīvais mitrums*. Vikipēdija, brīvā enciklopēdija. Apskatāms http://lv.wikipedia.org/wiki/Relat%C4%ABvais_mitrums
- [9] *Relative Humidity*. University of Illinois. Apskatāms [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/cld/dvlp/rh.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/cld/dvlp/rh.rxml)
- [10] **LBN 002-01**. *Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika*. Latvijas būvnormatīvs. 2001. Apskatāms <http://likumi.lv/doc.php?id=56049>
- [11] **LR Veselības ministrija Veselības inspekcija**. *Iekštelpu gaisa kvalitāte: mitrums un pelējums – veselības riski, preventīvie un korektīvie pasākumi*. Apskatāms <http://www.vi.gov.lv/lv/vides-veseliba/gaiss/iekstelpu-gaiss/mitrums-un-pelejums>

- [12] **Matthias Grätz**, tulkojis **Viesturs Silinš**. *Apkure un vēdināšana*. Baltijas Vides Forums, Vācija, Rīga. Apskatāms http://bef.lv/fileadmin/media/Publikācijas_Klimats/2011_Apkure_un_vedinasana_INTENSE.pdf
- [13] **Ministru kabinets**. *Darba aizsardzības prasības darba vietās* Darba aizsardzības likuma 25. panta 1. punkts, Rīga, aprīlis 2009. Apskatāms <http://likumi.lv/doc.php?id=191430>
- [14] **LBN 211-08**. *Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami*. Latvijas būvnormatīvs, februāris 2009. Apskatāms <http://likumi.lv/doc.php?id=187528#piel2&pd=1>
- [15] **Latvijas Astmas un Alerģijas biedrība**. Forums, 2008 Apskatāms http://www.astmaalerģija.lv/?id_p=forums4&id=286
- [16] **Testa stendu energoefektivitātes monitoringa projekts**. *Sistēmas testējamo konstruktīvo risinājumu parametru ilgtermiņa monitoringam esošajos testēšanas stendos Latvijas klimatiskajos apstākļos*. 2013. Apskatāms <http://www.eem.lv/ESFmersistema.php>
- [17] **Andris Vulāns**. *Siltumizolācijas materiālu ūdens tvaika pārvades raksturlielumi* (ņemts no darba „Mitruma režīma konstrukcijās ar putu polistirolu siltinātās ēkās aprēķins”). 2011. Apskatāms <http://www.buvfizika.lv/wp-content/uploads/Siltumizol%C4%81cijas-materi%C4%81lu-%C5%ABdens-tvaika-p%C4%81rvades-raksturlielumi.pdf>
- [18] Mitruma kalkulators (tika aprēķināts absolūtais mitrums). Apskatāms. <http://www.humidity-calculator.com/index.php>
- [19] **Andris Jakovičs**. *Ko stāsta un ko nestāsta gāzbetona ražotāji...* Vides un tehnoloģisko procesu matemātiskās modelēšanas laboratorija, Rīga, 2015. Apskatāms <http://www.eem.lv/docs/2015/2015-01-seminars/prezentacija7.pdf>
- [20] **Dr.Ing.sc. Jāzeps Paplavskis**. *Siltumtehnikās prasības energoefektīvām ārsienām*. Rīga. Apskatāms http://www.aeroc.lv/user_upload/riia_15.05.pdf

PIELIKUMS

Bakalaura darbs „Mitruma ietekme uz būvkonstrukcijām un komforta apstākļiem telpās” izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: *Toms Jerums*

(paraksts)

(datums)

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai.

Vadītājs: *asoc. Prof. Dr. Phys. Andris Jakovičs*

(paraksts)

(datums)

Recenzents: *Dr. Phys. Andris Fedotovs*

(paraksts)

(datums)

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā

Metodiķis(-e):

(vārds, uzvārds)

(paraksts)

(datums)

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījumu komisijas sēdē

(datums)

(protokola nr.)

(vērtējums)

Komisijas sekretārs(-e):

(vārds, uzvārds)

(paraksts)