EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus ja inseneeria instituut

Andi Rosental

TEHNIKAMAJA VENTILATSIOONI-JAHUTUSSÜSTEEMI ANOMAALIA JUHTUMIUURING

CASE STUDY OF A TECHNICAL BUILDING VENTILATION COOLING SYSTEM ANOMALY

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi,
õpetaja Külli Hovi,

Tartu 2022

www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Andi Rosental		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Tehnikamaja ventilatsiooni-jahutussüsteemi anomaalia juhtumiuuring			
Lehekülgi: 41	Jooniseid: 14	Tabeleid: 2	Lisasid: 8
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendajad: Mart Hovi, Külli Hovi Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2022			
Käesolevas bakalaureusetöös uuritakse Eesti Maaülikooli Tehnikamaja ventilatsioonisüsteemi ja selles olevat anomaaliat, kus ruumide jahutus ei toimi. On täheldatud, et klassiruumid on jahedad siis, kui ruumis on rohkem kui mõni inimene, aga kui ruumis on vaid paar inimest, siis on ruum ülemäära soe ja jahutus ei täida enda eesmärki. Selles töös uuritakse just seda olukorda. Et kindlaks teha, mis antud olukorda põhjustab, uuriti ruumi siseneva jaheda õhu kogust ja selle temperatuuri, ruumis olevat süsihappegaasikogust ning ruumi temperatuuri. Töös püstitatud hüpotees leidis katse näol kinnitust. Kui ruumis on palju inimesi, on ka õhus suur hulk süsihappegaasi, mille tõttu avatakse ruumi ventilatsioonitorus olev klapp ning jahe õhk saab suuremas koguses klassi jahutada. Edasiseks uurimiseks tuleks hinnata Tehnikamaja ventilatsioonisüsteemi automaatika juhtprogrammi ning uurida, mis programmi ülesehituses anomaaliat põhjustab.			
Märksõnad: hooneautomaatika, *Carnot*' tsükkel, regeneratiivne soojusvaheti, rekuperatiivne soojusvaheti, thingsboard.			

Estonian University of Life Sciences Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Andi Rosental		Curriculum: Engineering	
Title: Case Study of a Technical Building Ventilation Cooling System Anomaly			
Pages: 41	Figures: 14	Tables: 2	Appendixes: 8
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Mart Hovi, Külli Hovi Place and date: Tartu, 2022			
The aim of this thesis is to analyze the ventilation system of the Estonian University of Life Sciences' technical building and the anomaly in it, where the cooling of the rooms does not work. It has been noticed that classrooms are cool if there are more than a few people in the room, but if there are only a couple of people in the room, the room stays too warm and the cooling system does not fulfil its function. This study examines that very situation. To determine what causes this situation, the amount of cool air entering the room and its temperature, the amount of carbon dioxide in the room and the temperature of the room were examined. The hypothesis proposed in the work was confirmed in the form of an experiment. If there are many people in the room, there is a large amount of carbon dioxide in the air, due to which the valve in the room ventilation pipe opens and a larger amount of cool air can enter the room. For further research, the control program of the automation system of technical building ventilation system should be checked and the anomaly caused by the structure of the program should be investigated.			
Keywords: building automation, Carnot cycle, regenerative heat exchanger, recuperative heat exchanger, thingsboard.			

SISUKORD

SISSEJUHATUS 6
1. HOONETE JAHUTAMINE 7
1.1. Jahutuse põhimõte 7
1.1. Kompressoriga külmajaam 8
1.2. Absorbtsioonjahutusseade 9
1.3. Aurustusjahutus 9
1.4. Sorptsioonjahutus 10
1.5. Jahutuspalgid 10
1.6. Kaugjahutus 10
1.7. Tehnikamaja üldinfo 11
1.8. Tehnikamaja külmajaam 11
1.9. Soojusvahetid 12
1.9.1 Rekuperatiivne soojusvaheti 13
1.9.2. Regeneratiivne soojusvaheti 14
1.10. Ventilatsioonisüsteemi juhtimine 15
2. TEHNIKAMAJA JAHUTUSSÜSTEEMI ANOMAALIA 17
2.1. Anomaalia kirjeldus 17
2.2. Anomaalia eeldatav põhjus 17
2.3. Uurimismeetod 17
2.4. Andmete kogumine ja töötlemine 18
3. TEHNIKAMAJA JAHUTUSE KATSE 21
3.3. Ventilatsiooni katse 21
3.3.1. Külmajaam välja lülitatud 21
3.3.2. Külmajaam sisse lülitatud 24
3.3.3. Külmajaam sisse lülitatud ja sissepuhke õhu temperatuur seadistatud 16 °C 25
4. TULEMUSTE ANALÜÜS 28
4.1. Tehnikamaja jahutuse anomaalia põhjus 28
4.2. Tehnikamaja jahutuse anomaalia lahendus 28
KOKKUVÕTE 29
KASUTATUD KIRJANDUS 30
LISAD 31
Lisa 1. Tehnikamaja regeneratiivne soojustagasti 32

Lisa 2. Tehnikamaja rekuperatiivne soojustagasti 33
Lisa 3. Süsihappegaasi koguse tõstmine (CO_2 anduril kilekott ümber) 34
Lisa 4. Ventilatsioonitorus oleva kontrolleri koodiread [13] 35
Lisa 4 järg. 36
Lisa 5. Ruumi temperatuuri mõõtva kontrolleri kood [13] 37
Lisa 5 järg. 38
Lisa 6. Sissetuleva õhu mõõtmiseks seadistatud seadmed 39
Lisa 7. Ventilatsioonitoru konstandid 40
Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 41

SISSEJUHATUS

Eesti Maaülikooli Tehnikamajas on ventilatsioonisüsteem, milles on ka külmajaam. Külmajaama eesmärgiks on jahutada ruume kui ruumide temperatuur tõuseb liiga kõrgeks. Sellest olenemata on tekkinud olukordi, kus temperatuur klassiruumides on ülemäära soe. Arvestades, et ruumi siseneb jahe õhk, aga ruum ise normaalsele temperatuurile ei jõua, sai püstitatud hüpotees, et ruumi õhuvahetus on puudulik ning võib olla põhjustatud ruumis olevast süsihappegaasi (CO_2) kogusest ja automaatika loogikast.

Antud bakalaureusetöö põhieesmärk on kindlaks teha, kas püstitatud hüpotees peab paika ning pakkuda sellele anomaaliale lahendus. Hüpoteesi kontrollimiseks teostati katsed, kus uuriti ruumi õhuvahetust, süsihappegaasi kogust ja temperatuure.

Töö jaguneb neljaks peatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse jahutussüsteemi põhimõtet ja uuritakse erinevaid jahutusseadmeid. Lisaks antakse ülevaade Eesti Maaülikooli Tehnikamajas olevatest ventilatsiooniseadmetest. Teises peatükis käsitletakse Tehnikamaja jahutuse anomaalia olemust ja selgitatakse uurimismeetodit. Kolmandas peatükis uuritakse katseliselt ruumi ventilatsioonisüsteemi. Neljandas peatükis analüüsitakse katse tulemusi ja pakutakse välja lahendus.

Katse andmete kogumiseks kasutati kahte ESP8266 MOD mikrokontrollerit, mis edastas informatsiooni veebilehele. Veebilehelt sai andmeid jälgida ning kopeerida, et neid ka töödelda. Mikrokontrollerid programmeeriti programmiga Arduino IDE. Süsihappegaasi koguse õhus vaadati seinal olevalt juhtpaneelilt ning tehti märkmeid.

1. HOONETE JAHUTAMINE

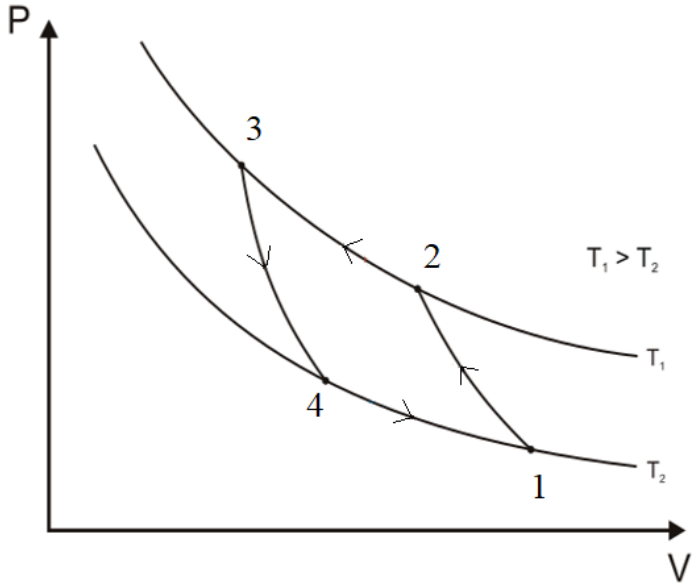
1.1. Jahutuse põhimõte

Jahutamiseks on vaja tekitada keskkonna temperatuurist madalamat temperatuuri. Selleks käsitatakse pöördringprotsessi, mida kutsutakse *Carnot*' ringprotsessiks. *Carnot*' ringprotsessi nimetatakse pöörduvaks termodünaamiliseks protsessiks, millel on kaks reservuaari. *Carnot*' ringprotsess koosneb järgmistest tasakaaluetappidest:

1) isotermiline paisumine;
2) adiabaatiline paisumine;
3) isotermiline kokkusurumine;
4) adiabaatiline kokkusurumine.

[1]

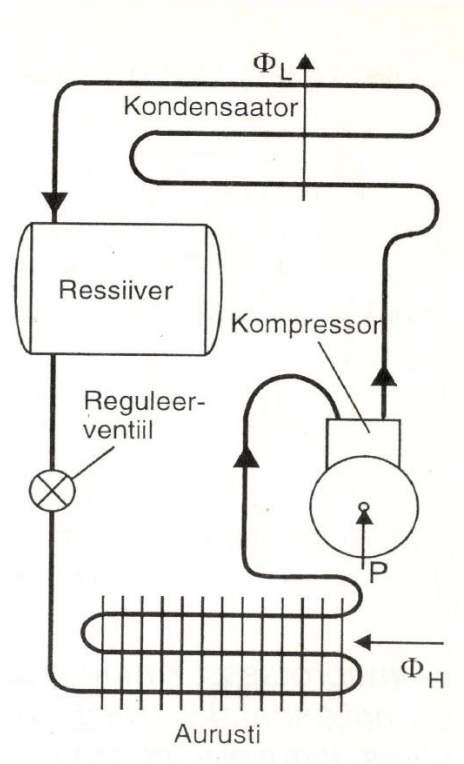
Carnot' ringprotsessi rõhu ja ruumi diagramm on näha joonisel 1.



Joonis 1. *Carnot*' tsükkel, p-V-diagramm, 1-2 gaasi temperatuur tõuseb adiabaatilisel kokkusurumisel; 2-3 gaas annab soojust ära isotermilisel kokkusurumisel; 3-4 gaas paisub adiabaatiliselt; 4-1 gaas paisub isotermiliselt. [3]

1.1. Kompressoriga külmajaam

Kompressorkülmajaama seadmes toimub külmaine ringprotsess, mis külmaaine aurustades neelab sooja ja kondenseerudes annab sooja ära. Antud protsessi on näha joonisel 2. Vaadeldes joonist, on näha, et külmaainet ajab ringi kompressor, mis on aurusti ja kondensaatori vahel. Kompressori ülesandeks on rõhu tõstmine vajalikule tasemele enne kondensaatorit. Rõhku on vaja aga alandada vahetult enne aurustit, selleks kasutatakse reguleerimisventiili. Aurustis aurustub külmaaine, mis neelab soojust aurustist läbivoolavalt veelt või õhult ning seda vett või õhku kasutataksegi ruumide jahutamiseks. Aurustist neelatud soojus pumbatakse kondensaatorisse, kust see soojus eemaldatakse ning külmaaine kondenseerub. Seda tüüpi külmaseadmed kasutasid klooritud süsivesinikke (CFC- ja HCFC-ühendid). Need ühendid on keskkonnale kahjulikud, nimelt lõhuvad need ained atmosfääri osoonikihti ning aitavad kaasa kasvuhooneefekti tekkele. [2]



Joonis 2. Külmutuse ringprotsessi seadmed. [2]

Nende kahjustavate efektide tõttu kasutatakse tänapäeval CH_2F_2 (difluorometaan) tuntud kui ka külmaaine R32, seda külmaainet läheb süsteemides vaja kuni 70% vähem ja

kliimasoojenemistegur (GWP) on kuni 300% parem, kui külmaaine R410A. Ainukeseks miinuseks R32 on, et see on tuleohtlik. [4]

Kompressoriga külmajaamaga 1 kWh jahutusenergia tootmiseks on vaja 0,2 kuni 0,3 kWh elektrienergiat [5].

1.2. Absorbtsioonjahutusseade

Absorbtsioonjahutusseade on erinev kompressorkülmajaamast selle poolest, et külmainet ei aja ringi kompressor, vaid soojusenergia. Absorbtsioonjahutusseade töötab vaid soojusega (ligikaudu +100 °C). Kui kompressorkülmajaamas kasutatakse vaid külmaainet, siis absorbtsioonjahutusseadmes kasutatakse ka absorbenti (liitiumbromiid või ammoniaak). Absorbtsioonpumba töötsükli olemus on, et absorbeeris neelatakse aurustist tulev külmaaine (vesi) vedela absorbendi poolt. Toimub külmaaine aurustumine aurustis ning selle tulemusel on aurusti töötemperatuur madal ja võtab soojuse jahutavast keskkonnast. Sealt liigub absorbent koos külmaainega küllastatud vedelikuna edasi soojendisse, kus suurema rõhu ja lisasoojusenergia toimel külmaaine aurustub lahusest ning liigub kondensaatorisse, mis eraldab soojusenergia väliskeskkonda. [6]

Sellised jahutussüsteemid pole kuigi praktilised, sest vajavad väga palju soojusenergiat. Absorbtsioojahutusseadmega 1 kWh jahutusenergia tootmiseks läheb vaja 1,2 - 1,5 kWh soojusenergiat. [5]

Küll aga saab sellised seadmeid kasutada kohtades, kus pole elektrit. Absorbtsioonjahutusseadme saab tööle panna näiteks gaasipõletiga.

1.3. Aurustusjahutus

Soojustagastusega süsteemides saab kasutusele võtta ka aurustusjahutust. Väljatõmbe õhu jahutuseks tuleb õhku niisutada veega, mille tulemusel langeb temperatuur ligikaudu adiabaatselt. Olenevalt niiskusest võib temperatuur langeda 4-5 °C. [5]

Aurustusjahutuses võtab energiat vaid õhu niisutamine, mis on olenevalt süsteemist peaaegu olematu. [5]

1.4. Sorptsioonjahutus

Sorptsioonjahutus põhimõte seisneb sissepuhkeõhu niisutamisel kui ka kuivatamisel, millele lisatakse regeneratiivne soojustagastus ning sissepuhke- ja väljatõmbeõhu niiskusülekandega. Nagu ka absorbtsioonjahutusseade vajab see seade +60 °C või kuumemat lisasoojust, seetõttu on seade õigustatud vaid siis, kui on saada odavat ja suhteliselt kõrge temperatuuriga soojusenergiat. [5]

Sorptsioomjahutus seadme 1 kWh jahutusenergia genereerimiseks läheb tarvis ligikaudu 1,5 kWh soojusenergiat [5].

1.5. Jahutuspalgid

Jahutuspalk on soojusvaheti, mis paigaldatakse ventilatsiooni sissepuhke ette. Jahutuspalkidest käib läbi vesi, mis aurustatakse jahutustornides. Ringlev vesi jahtub jahutustornis õhu märgtermomeetri temperatuurini. Üldiselt on see temperatuur madalam kui 20 °C. [5]

Jahutuspalkidel 1 kWh jahutusenergia tekitamiseks läheb tarvis kuni 0,1 kWh elektrienergiat. Seade ei võta palju energiat, kuna energiat kulub ainult vee ringlemiseks ja jahutustorni õhu ventileerimiseks. Küll aga läheb vaja suures koguses vett.[5]

1.6. Kaugjahutus

Kaugjahutus on nagu keskkütte, kuskil mujal jahutatakse aine maha ning transporditakse jahutusainega trassi mööda tarbijale. Kaugjahutuses on enamasti kasutuses suured kompressorjahutussüsteemid. Välja arvatud juhul, kui majanduslikult ja tehniliselt on otstarbekam kasutada mingit muud lahendust.[5]

Mujal maailmas on kaugjahutus muutunud üsnagi populaarseks, aga Eesti see trend pole veel jõudnud.

1.7. Tehnikamaja üldinfo

Eesti Maaülikooli Tehnikamaja asub Tartus (Kreutzwaldi 56). Tehnikamaja avati peale renoveerimist 17. veebruaril 2012. aastal. Renoveerimise käigus paigaldati uus ventilatsiooni-, kütte-, elektri- ja soojussüsteem. Tehnikamaja üldpindalaks on 6030 ruutmeetrit, kus töötab üle 80 Eesti Maaülikooli õppejõu ja õpib ligi 700 üliõpilast. [7]

1.8. Tehnikamaja külmajaam

Tehnikamajas kasutatakse hoone jahutamiseks kompressoriga külmajaama CLIMAVENETA NECS-ME 0904, mis toodeti 2011. aastal. Külmajaam asub Tehnikamajas viiendal korrusel. Külmajaam on näha joonisel 3. CLIMAVENETA NECS-ME 0904 tehnilised andmed on välja toodud tabelis 1.

Joonis 3. Tehnikamaja külmaseade.

Tabel 1. CLIMAVENETA NECS-ME 0904 tehnilised andmed.

Jahutus		
Jahutus võimsus	kW	235
Kogu sisendvõimsus	kW	67,9
EER		3,47
Soojusvaheti veevool	m^3/h	40,5
Soojusvaheti rõhu langus	kPa	38,9
Kompressor		
Kogus	N°	4
Reguleerimise tüüp		SAMM
Minimaalne sammude arv	%	25
Jahutusvedeliku tüüp		R410A
Õli kulu	kg	4,7
Müra tase		
Kogu müravõimsus	dB(A)	89
Kogu mürarõhk	dB(A)	57
Mõõtmed		
Piikus	mm	2227
Laius	mm	1020
Kõrgus	mm	1780
Kaal	kg	1185

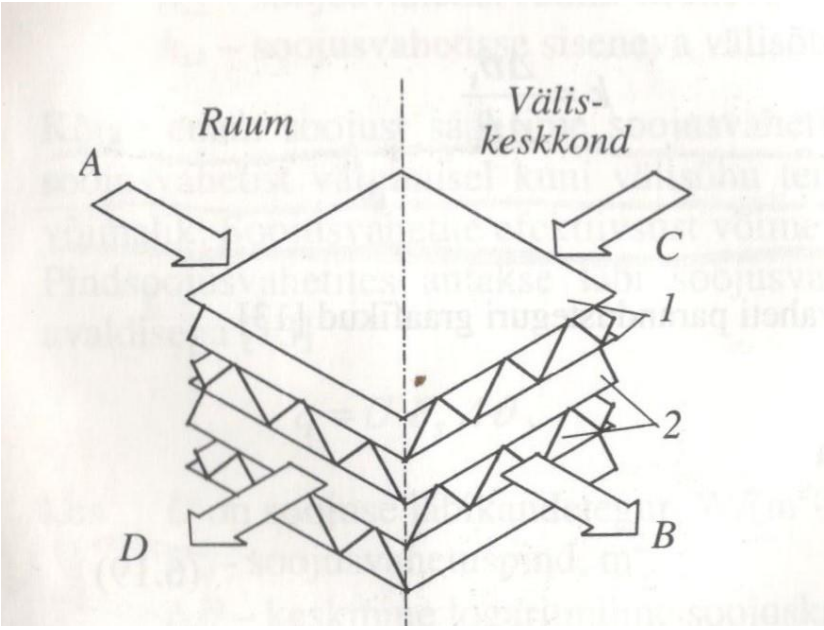
Tabelis 1 välja toodud andmete põhjal võib väita, et tegemist on võimsa jahutusega külmajaamaga. Kahetsusväärne antud jaama juures on see, et külmajaam kasutab jahutusainena R410A vedelikku, millel on suur mõju kliimasoojenemisele.

1.9. Soojusvahetid

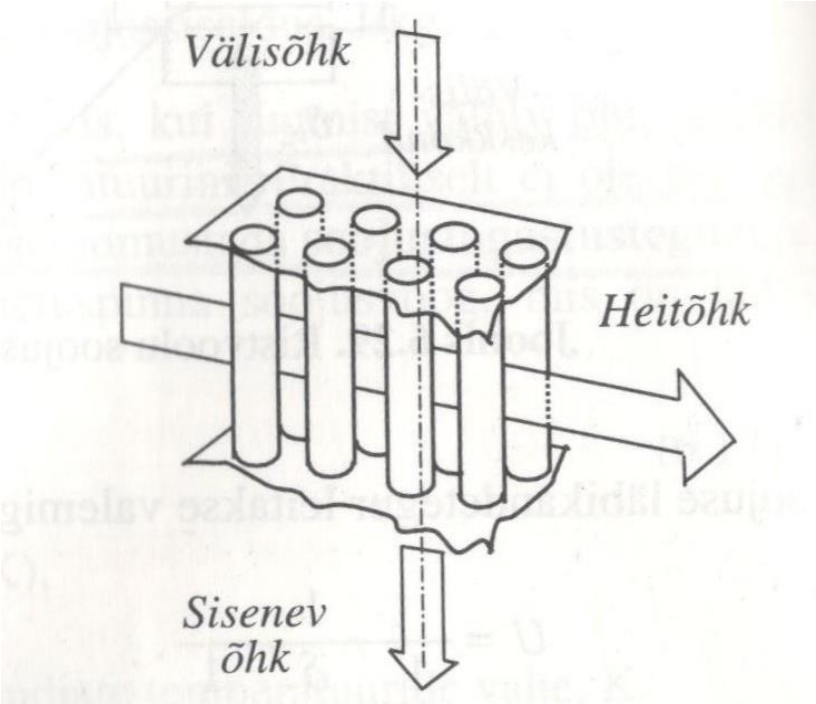
Külmajaamast tulev jahutusvedelik liigub pindsoojusvahetisse, kust kantakse külm üle ventilatsiooniõhule. Teist pindsoojusvahetit kasutatakse ka ventilatsiooniõhu kütmiseks. Et majast välja mineva õhu soojus kaotsi ei läheks, kasutatakse soojustagasteid, mis on nii regeneratiivsed kui ka rekuperatiivsed soojusvahetid. Tehnikamajas olevad soojustagastid on näha lisas 1 ja 2.

1.9.1 Rekuperatiivne soojusvaheti

Rekuperatiivses soojusvahetis ehk pindsoojusvahetis kantakse soojus üle läbi kahte õhuvoolu eraldava membraani. Tihtipeale on need membraanid tehtud alumiiniumist, klaasist, plastist või roostevabast terasest. Kuna soojus kantakse läbi kahte keskkonda eraldava materjali, siis on keskkonnad teineteisest täielikult eraldatud. Suure võimsusega soojusvaheti saamise eelduseks on suured soojusvahetuspinnad, kümnetes ruutmeetrites. Pindsoojusvahetite soojustagastustegur on vahemikus 0,25-0,45. Ehituselt eristatakse plaatsoojusvahetit joonisel 4 ja torusoojusvahetit joonisel 5. [8]



Joonis 4. Plaatsoojusvaheti skeem: 1-eraldusmembraan; 2-vahekärg; A-väljuv õhk; B-heiteõhk; C-välisõhk; D-sisenev õhk. [8]

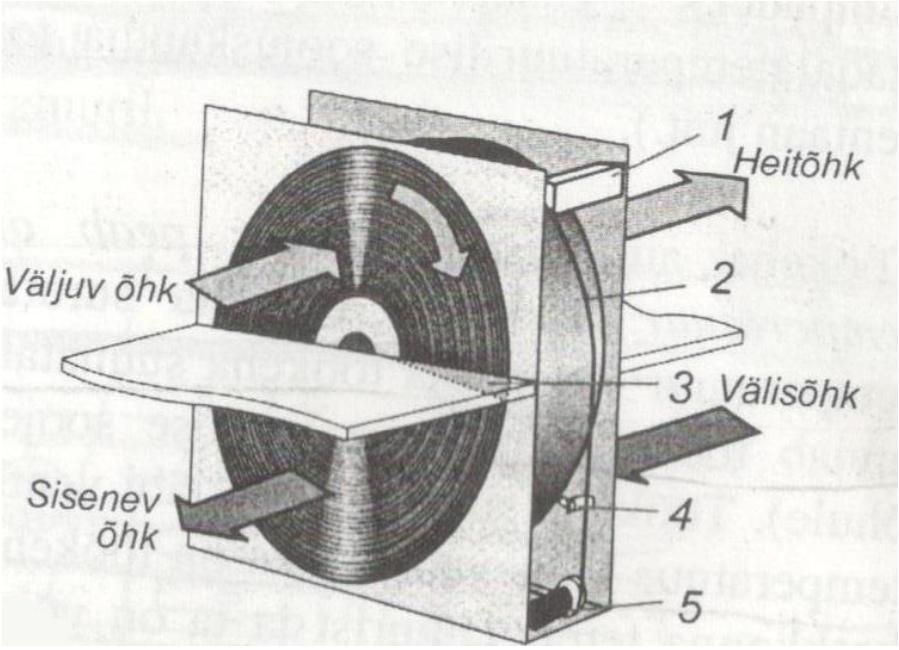


Joonis 5. Torusoojusvaheti skeem. [8]

Tehnikamaja ventilatsioonisüsteemis kasutatakse plaatsoojusvahetit soojustagastuses ning torusoojusvahetit nii jahutus- kui ka kütmissoojusvahetites. Välisõhu asemel on muidugi vedelik.

1.9.2. Regeneratiivne soojusvaheti

Regeneratiivses soojusvahetis salvestatakse perioodiliselt soojust väljuvast saastunud õhust ja soojus kandub sissetulevale külmale õhule (kasutatakse ära aine soojusmahtuvust). Soojusülekanne toimub tsükliliselt. Saastunud õhu soojusenergia kantakse üle soojust salvestavale materjalile (salve) ja võetakse sealt värskele õhule. Regeneratiivne soojussalvesti võib olla liikuv või fikseeritud hoidla, samuti vedelikuhoidla. Trummelsoojusvaheti skeem on näha joonisel 6. [8]

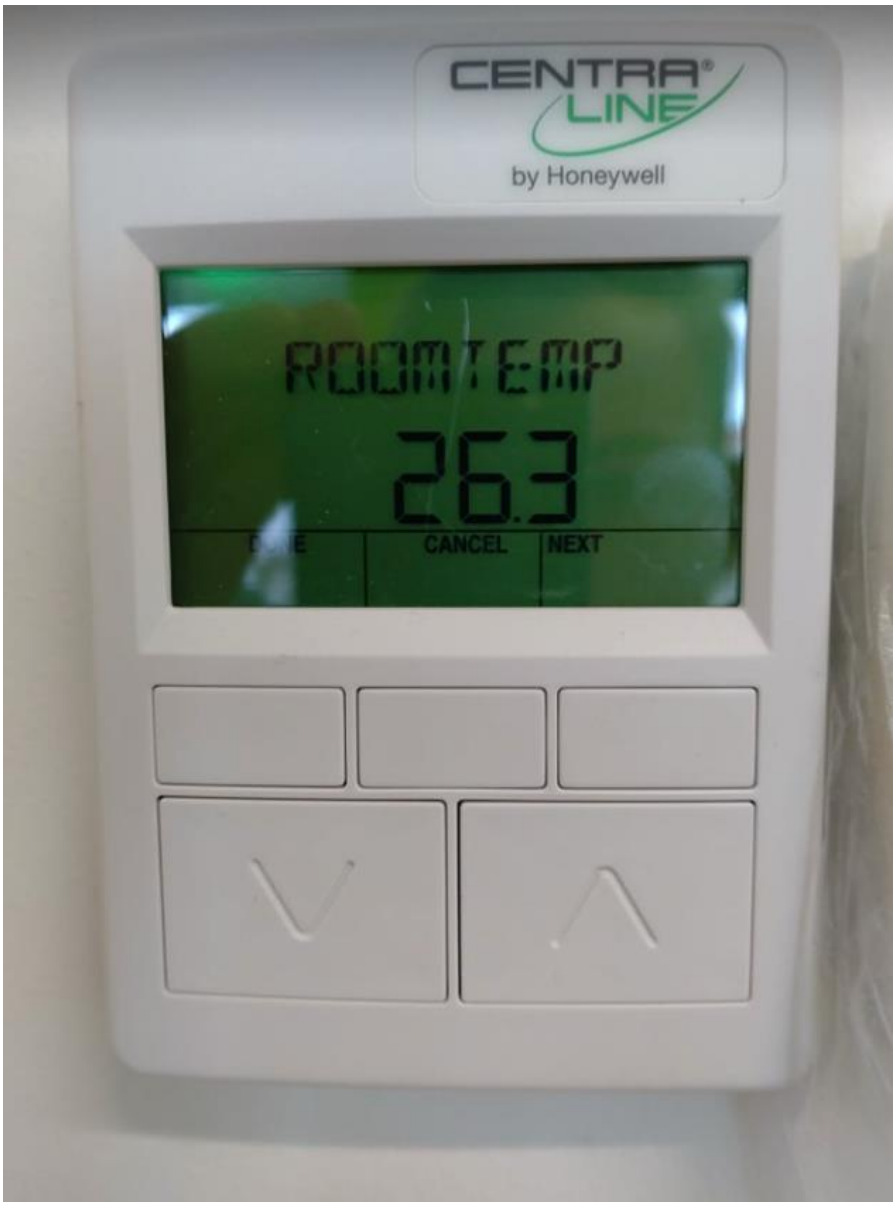


Joonis 6. Pöörleva salvega trummelsoojusvaheti: 1-juhtimisplokk; 2-veorihm; 3-puhastusseade; 4-kiiruseandur; 5-mootor. [8]

Tehnikamajas kasutatakse soojustagastites pöörleva salvega trummelsoojusvahetit.

1.10. Ventilatsioonisüsteemi juhtimine

Ventilatsioonisüsteemi kontrollitakse kontrolleri abil. Igas ruumis on kasutajaliides (joonis 7), kus saab seadistada ruumi temperatuuri, vaadata ruumi hetketemperatuuri ja süsihappegaasi kogust õhus. Kui ruumi on vaja jahutada või kütta, siis peaks automaatika tegema selles ruumis oleva ventilatsioonitorus oleva klapi lahti, selle tulemusel siseneb ruumi värske köetud või jahutatud õhk.



Joonis 7. Tehnikamaja kliima kontrollimise kasutajaliides.

Tihtipeale on ühes ruumis mitu süsihappegaasi andurit, seda saab ka näha kontrollerilt, kus on märgitud CO_2 1 ja CO_2 2.

2. TEHNIKAMAJA JAHUTUSSÜSTEEMI ANOMAALIA

2.1. Anomaalia kirjeldus

Kuumadel ilmadel on täheldatud, et klassiruumid lähevad ülemäära soojaks. Kuigi ruume ei köeta, tõuseb ruumitemperatuur kõrgemale, kui ette nähtud. Seda liigsoojust tekitab ruumides enamasti päikesekiirgus, töös olevad elektriseadmed ja inimeste enda soojaeritus. Liigsoojuse eemaldamiseks on tehnikamajal jahutussüsteem. Süsteem on ehitatud just selleks, et ka kuumade ilmadega oleks klassiruumides võimalik efektiivselt ja mugavalt tegutseda.

2.2. Anomaalia eeldatav põhjus

On pandud tähele, et ruumid on normaaltemperatuuril siis, kui ruumis on palju inimesi, aga kui ruumis viibivad ainult paar indiviidi, siis jahutussüsteem ei täida enda rolli. Seetõttu tekkis hüpotees, et kui klassiruumis on palju inimesi, siis on õhus suur kogus süsihappegaasi ning sel põhjusel on ruumis ventilatsiooniklapp rohkem avatud olekus, mille tõttu saab ruumi siseneda jahutatud õhk. Kui ruumis on vähe inimesi, siis on klapp vähem avatud olekus ja ruumi ei pääse piisavas koguses jahutatud õhku. Hüpoteesi kontrollimiseks teostati katse.

2.3. Uurimismeetod

Anomaalia põhjuse kindlakstegemiseks mõõdeti ruumi siseneva õhu temperatuuri ning õhu kogust ja samuti mõõdeti ruumi temperatuuri tavatingimustel oleval süsihappegaasi kogusel ning suurel süsihappegaasi kogusel õhus. Esialgu uuriti jahutust olukorras, kus külmajaam polnud sisse lülitatud. Teisena uuriti olukorda, kui külmajaam oli sisse lülitatud ning kolmandana, kui külmajaam oli sisse lülitatud ja sissepuhke õhu temperatuur oli seadistatud minimaalseks 16 °C.

2.4. Andmete kogumine ja töötlemine

Ventilatsioonitorust tuleva õhukoguse ja temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse mikrokontrollerit ESP8266MOD, mis võimaldab lugeda nii digitaal- kui ka analoogsignaali.

NodeMCU ESP8266 arendusplaadiga on kaasas ESP-12E moodul, mis sisaldab ESP8266 kiipi, millel on Tensilica Xtensa 32-bitine LX106 RISC mikroprotsessor. See mikroprotsessor toetab RTOS-i ja töötab 80MHz kuni 160 MHz reguleeritava taktsagedusega. NodeMCU-l on andmete ja programmide salvestamiseks 128 KB RAM ja 4 MB välkmälu. Sellel on sisseehitatud Wi-Fi, millega on hea andmeid veebi edastada. [9]

Digitaalsignaali annab temperatuuri ja niiskuse andur AM2320, mille nimiparameetrid on nähtaval tabelis 2.

Tabel 2. Anduri AM2320 spetsifikatsioonid [11].

Toitepinge	V	3,1-5,5
Temperatuuri mõõtepiirkond	°C	-40 kuni 80
Temperatuuri täpsus		±0,5 ℃
Niiskuse mõõtepiirkond	%	0-99
Niiskuse täpsus		±3%
Väljundsignaal		I2C
Mõõtmed (klemmid välja arvatud)		
Piikus	mm	15
Laius	mm	12,5
Kõrgus	mm	4,5
Kaal	g	2,4

Analoogsignaali edastas seade FläktWoods 227PM (seda seadet kasutab ka Tehnikamaja ventilatsioonisüsteem), mis mõõtis õhuliikumist ventilatsioonitorus. Seade on näha joonisel 8. Sellel seadmel on mitu erinevat seadistust, katses kasutati „test“ režiimi, sest see andis analoog väljundsignaali sinisel ja hallil juhtmel. Väljundsignaali pinge on võrdeline õhuvooluhulgaga. [10]

Suhtelise õhukoguse saamiseks mahuühikutes tuleb esialgu mõõdetud pinge arvutada ümber rõhule, selleks on Fläktwoodsi kasutajajuhendis valem:

$$P_{act} = P_{nom} \cdot \frac{U}{10} = (Pa) \ \ [10]$$

, kus P_{act} on mõõdetud rõhkude erinevus (Pa);

P_{nom} – toru pikkust arvestav konstant.

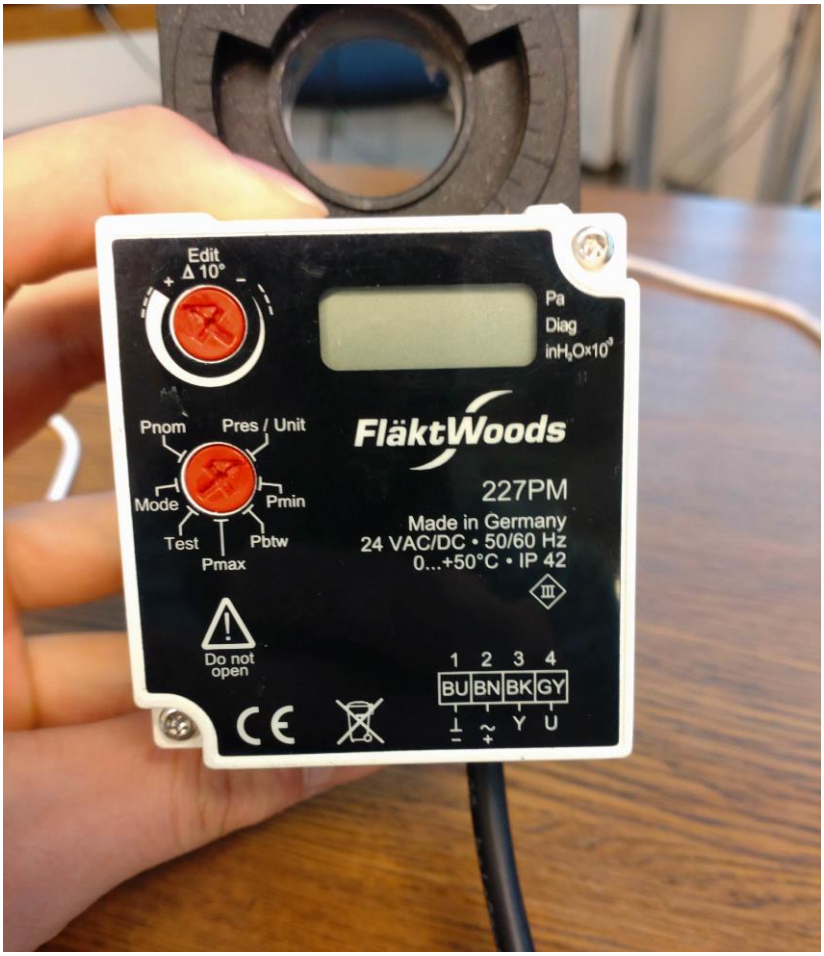
Et rõhust saada liitrit sekundis, kasutan valemit:

$$q_v = k \cdot \sqrt{P_{act}} = (l/s) \ [12]$$

, kus q_v on õhuvoolu kogus (l/s);

k- toru läbimõõtu arvestav konstant.

Kogutud andmed saatis mikrokontroller *thingsboardi* platvormile. *Thingsboard* on vabavaraline IoT (nutistu/asjade internet), mis võimaldab projekte arendada, hallata ja laiendada.



Joonis 8. Õhu koguse mõõtmiseks seade Fläktwoods 227PM.

Kasutati kahte mikrokontrollerit ESP8266MOD, ühte kasutati sissetuleva õhu mõõtmiseks, mille programm on näha lisas 4 ja teist kasutati ruumi õhu temperatuuri mõõtmiseks, selle programmikood on näha lisas 5. Programmi aluspõhi sai võetud internetist *thingsboard´*i leheküljelt, veebileht on kasutatud kirjanduse loetelus 13. Programm kohendati selliseks, et see mõõdaks peale temperatuuri ka pinget, pinget mõõdeti seadmelt *fläktwoods*. Peale selle muudetud ka, et mikrokontroller ühendaks ennast Tehnikamaja avalikku Wi-Fi võrku ning saadaks andmed *thingsboard´*i serverisse iga 10 sekundi tagant. Programmeerimiseks kasutati programmi Arduino IDE.

3. TEHNIKAMAJA JAHUTUSE KATSE

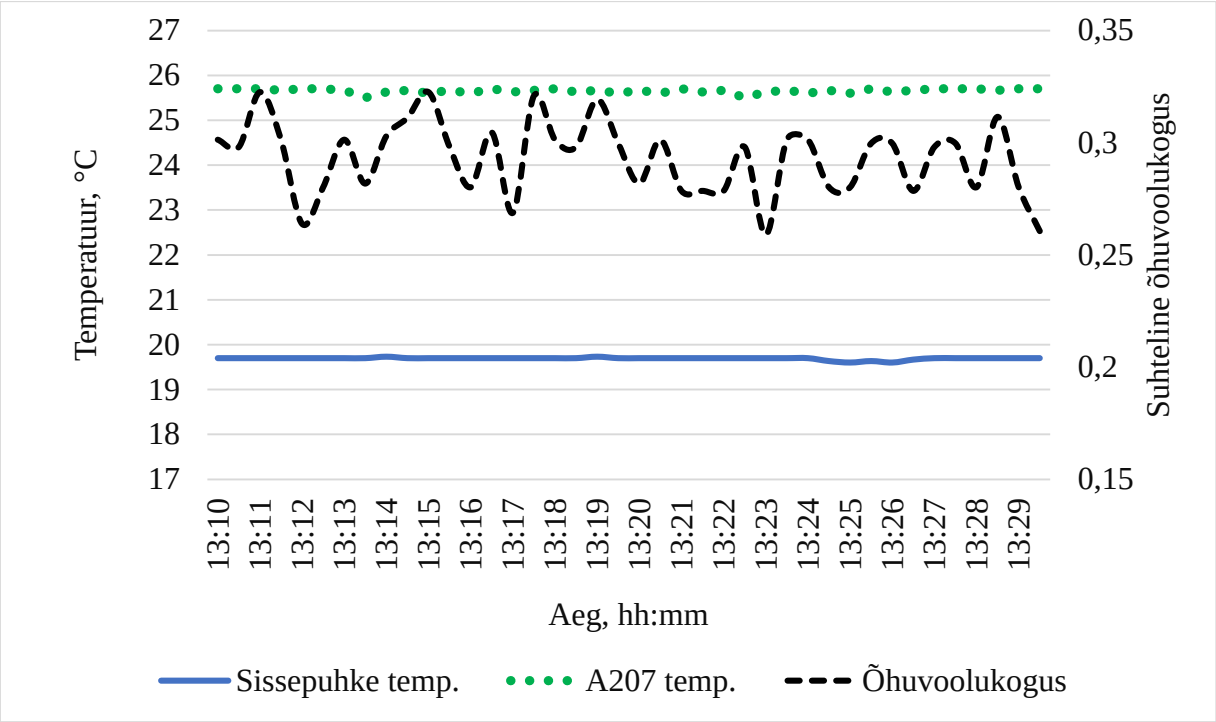
3.3. Ventilatsiooni katse

Katsed teostati Tehnikamajas olevas klassiruumis A207. Üks mikrokontroller sätiti sissepuhketoru peale ning AM2320 anduri paigutati toru sisse. FläktWoods 227PM ühendati voolikutega ventilatsioonitorude ühenduskohtadesse. Seadistust on näha lisas 6. Ruumi temperatuuri mõõtev seade oli laual. Mõõtmistulemustest sai võetud 30 sekundi keskmised.

3.3.1. Külmajaam välja lülitatud

Katse, kus külmajaam oli välja lülitatud, teostati 16. mail ajavahemikus 11:00-13:00. Katse teostamise alguses oli klassiruumi temperatuur 26 °C ja välisõhutemperatuur 14,3 °C. Temperatuure ja õhuhulka mõõdeti olukordades, kus süsihappegaasi kogus on normaalne ja üle normi.

Tavaolekus on klassiruumis süsihappegaasi kogus ligi 500 ppm (miljondikosa). Ventilatsiooniklapp oli pooleldi avatud. Õhutemperatuur 26 °C (seadistatud temp. 18 °C). Nägemaks, kuidas ventilatsioon toimetab sekkumata (ilma CO_2 andurit segamata) ja võrdlemaks, mis erineb suure CO_2 kogusel, mõõdeti ventilatsioonist tuleva õhu kogust ja temperatuuri ning ka ruumitemperatuuri. Mõõtetulemused on joonisel 9.



Joonis 9. Ventilatsiooni katse tavalisel talitlusel.

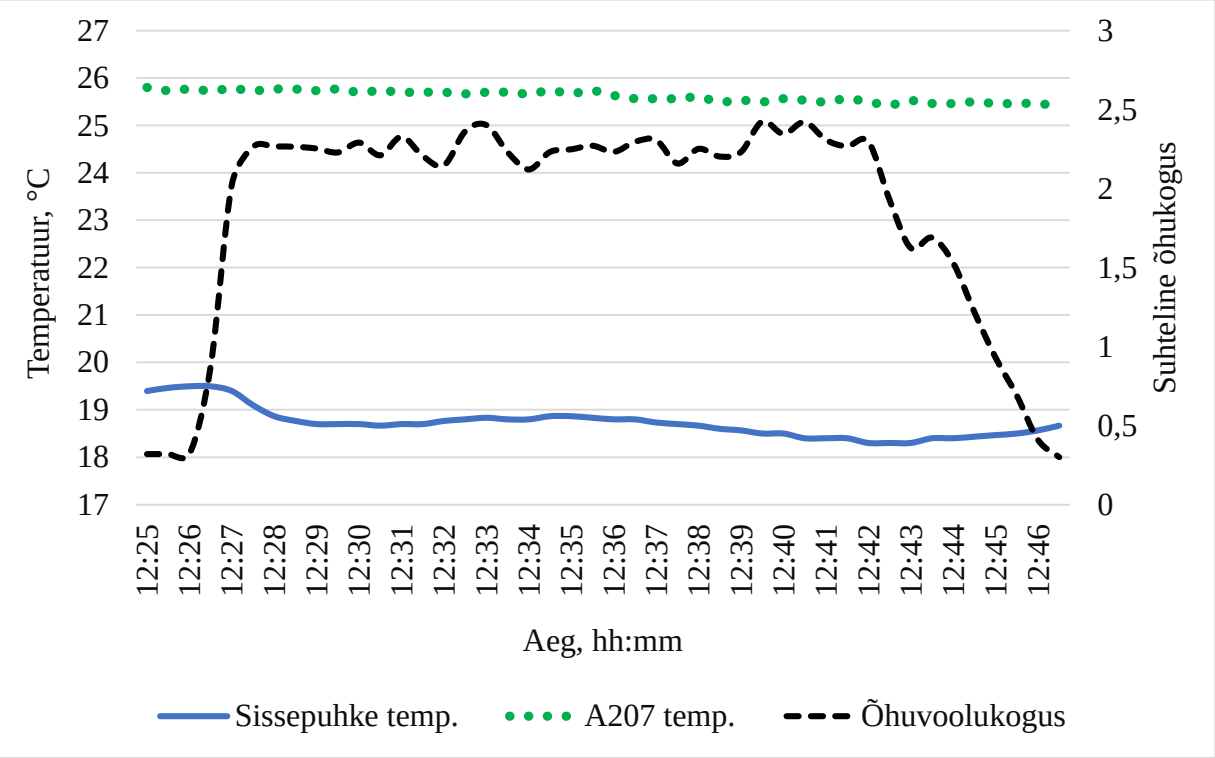
Joonisel 9. on näha, et nii sissepuhke õhu kui ka ruumi õhu temperatuur praktiliselt ei muutu, kuigi klassiruumis on 8 °C (26 °C-18 °C) soojem, kui see on ette määratud. Ruumi puhutav õhk on kõvasti jahedam 19,7 °C kui ruumis olev õhk, siiski on ruum ikka liialt soe. Sellest võib järeldada, et ruumi jahutava õhu kogus on liiga väike. Ruumi sisenev suhteline õhukogus on keskmiselt 0,29. Leidmaks, mis see liitrit sekundis võrdub, teostati järgnev arvutus:

$$q_v = k \cdot \sqrt{P_{nom} \cdot \frac{U}{10}} = \ (l/s)$$

,kus k=16 ja P_{nom}=251, need suurused olid ventilatsioonitorul (lisa 7).

$$q_v = 16 \cdot \sqrt{251 \cdot \frac{0{,}29}{10}} \approx 43{,}2\ (l/s)$$

Seejärel uuritakse, mis erineb siis, kui süsihappegaasi kogus on üle normi. Selleks sätiti seinal oleval süsihappegaasi andurile kilekoti ümber (lisa 3) ning hingati kilekotti sisse, selle tulemusena suurenes mõõdetud süsihappegaasi kogus 1996 ppm (enne oli 515 ppm) peale. Kohe kui CO_2 tase tõusis, hakkas ventilatsioonitorus olev klapp liikuma poollahtisest olekust täielikult lahtisesse ning ruumi puhutava õhu kogus kasvas kordades. Sissepuhutava õhu temperatuur hakkas aeglaselt langema. Niisamuti hakkas ka ruumi temperatuur alanema. Seda protsessi on näha joonisel 10.



Joonis 10. Ventilatsiooni katse suurel süsihappegaasi kogusel.

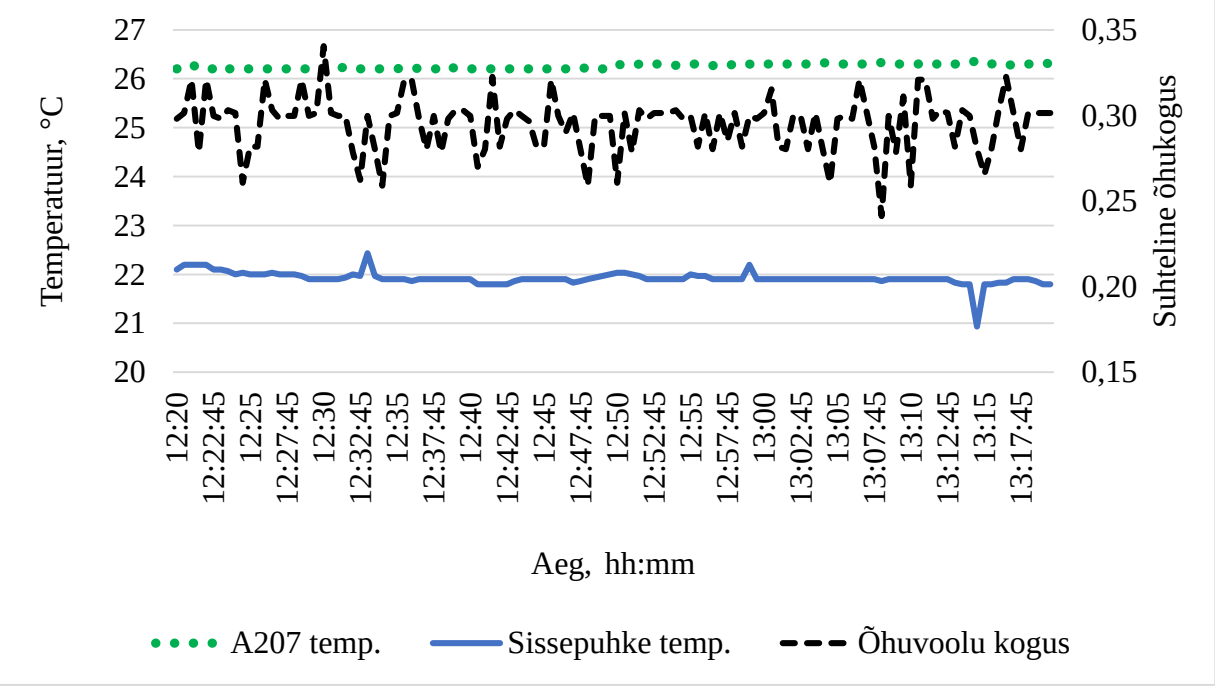
Joonisel 10 on näha, et kell 12:26 tõuseb suhteline õhukogus märgatavalt, sest sellel hetkel tõusis CO_2 kogus pea 2000le, mille tagajärjel avanes ventilatsioonitorus olev klapp ning õhk sai paremini torust läbi käi. Leidmaks, kui palju õhku ruumi puhutakse, kui ventilatsiooniklapp on täielikult avatud, teostati järgnev arvutus:

$$q_v = 16 \cdot \sqrt{251 \cdot \frac{2{,}25}{10}} \approx 120{,}2\ (l/s)$$

Kui ruumi puhutava õhuvoolukogus on hästi kõrge, siis hakkab klassiruumi temperatuur aeglaselt langema. Esialgu oli klassiruumis temperatuur 25,8 °C siis 20 minutit hiljem alanes temperatuurile 25,4 °C, graafikult on näha, et ruumi temperatuur langeb peaaegu lineaarselt. Langeb ka sissepuhke õhu temperatuur, mida võib põhjustada suur õhukoguse liikumine, mille tagajärjel ei jõua ventilatsiooni õhk torudes soojendeda.

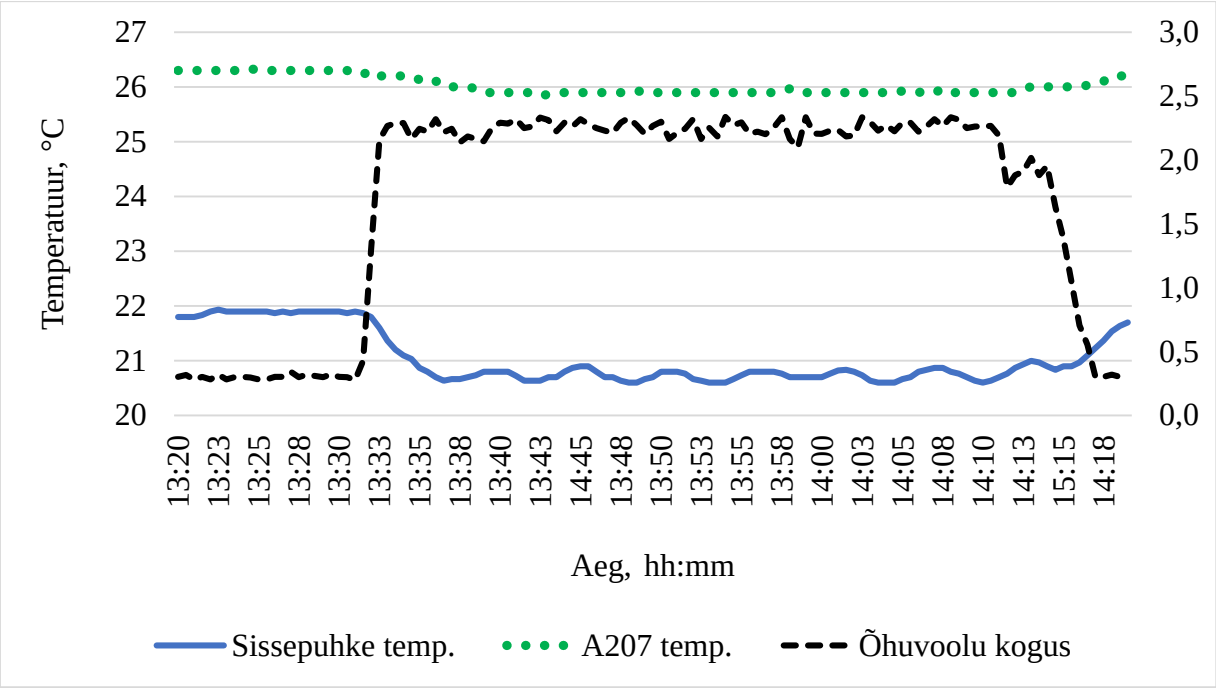
3.3.2. Külmajaam sisse lülitatud

Katse, kus külmajaam oli sisse lülitaud, teostati 25. mail ajavahemikus 12:00-14:30. Katse teostamise hetkel oli klassiruumi temperatuur 26,3 °C ja välisõhutemperatuur ligi 18 °C. Jooniselt 11 on näha uuritavaid parameetreid tavatingimustel oleval CO_2 kogusel ning joonisel 12 on näha, kus CO_2 kogus on ligi 2000 ppm.



Joonis 11. Ventilatsiooni katse, kus külmajaam on sisse lülitatud ning normaalsel talitlusel.

Joonis 11 on sarnane joonisega 9. Ehk nii sissepuhke õhu kui ka ruumi temperatuur praktiliselt ei muutu, niisamuti ei muuta ka sissepuhutava õhu kogus.

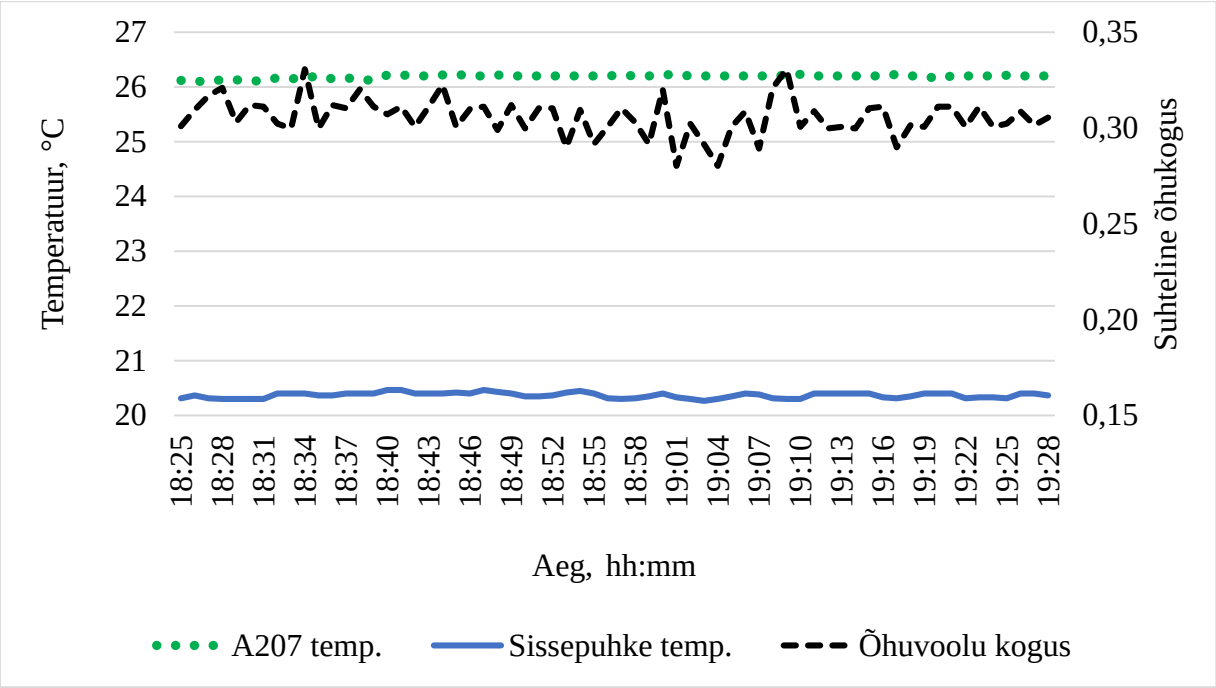


Joonis 12. Ventilatsiooni katse, kus külmajaam on sisse lülitatud, suurel süsihappegaasi kogusel

Nagu ka eelmine joonis, sarnaneb ka see joonis varem tehtud katsele (joonis 10). Kui CO_2 kogus tõusis kõrgele, tõusis ka sissepuhutava õhu kogus märgatavalt ning nii ruumi kui ka sissepuhutava õhu temperatuur langesid.

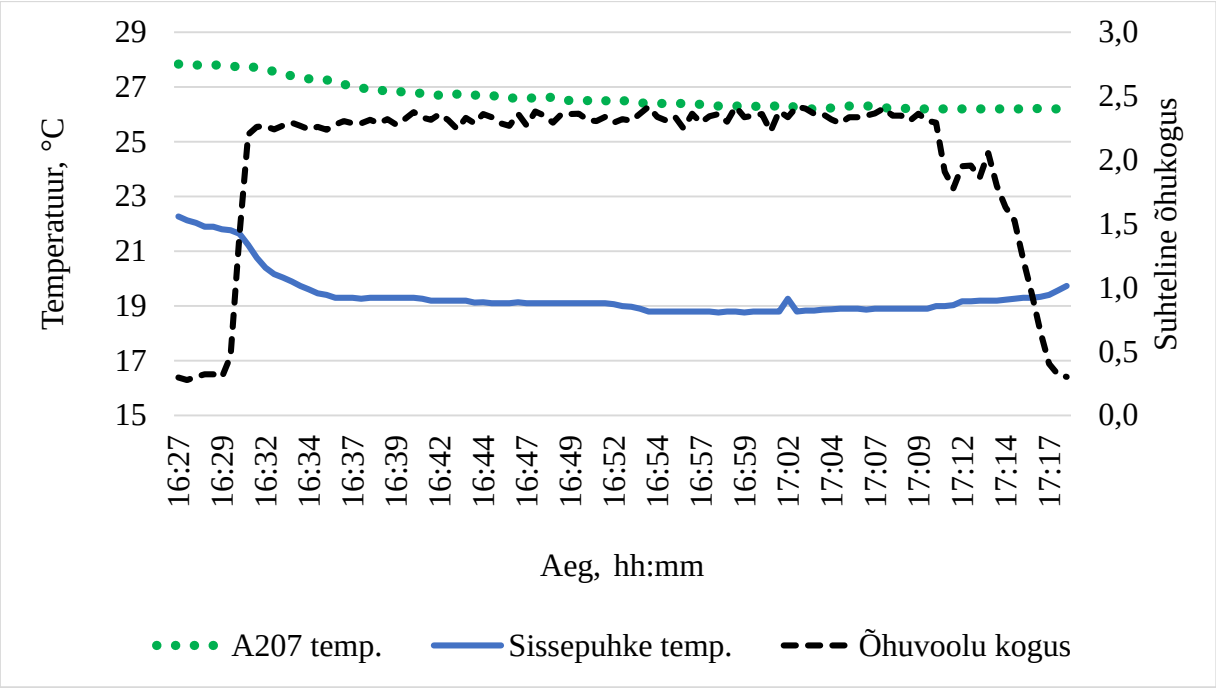
3.3.3. Külmajaam sisse lülitatud ja sissepuhke õhu temperatuur seadistatud 16 °C

Katse, kus külmajaam oli sisse lülitaud ja sissepuhke temperatuur oli seadistatud minimaalseks (16 °C), teostati 25. mail ajavahemikus 16:20-19:30. Katse teostamise alguses oli klassiruumi temperatuur 27,8 °C ja välisõhutemperatuur ligi 15 °C. Peab ka mainima, et õhtune päike paistab Tehnikamaja ruumi A207 otse peale. Jooniselt 13 on näha uuritavaid parameetreid tavatingimustel oleval CO_2 kogusel ning joonisel 14 on näha, kus CO_2 kogus on ligi 2000 ppm.



Joonis 13. Ventilatsiooni katse, kus külmajaam on sisse lülitatud ja sissepuhke temp. seadistatud 16 °C, tavalisel talitlusel

Nagu oli ka arvata, siis joonis 13 sarnaneb enda eelkäijatele. Kui ventilatsioonitorus olev klapp pole täielikult avatud, siis on sissepuhutava õhu kogus võrdlemisi väike. Seetõttu ei muutu sissepuhke temperatuur ja klassiruumi temperatuur.



Joonis 14. Ventilatsiooni katse, kus külmajaam sisse lülitatud ja sissepuhke temp. seadistatud 16 °C, suurel süsihappegaasi kogusel

Seadistades ventilatsioonisüsteemi maksimaalsele jahutusele, on näha (joonis 14), et kui ventilatsioonitorus olev klapp on täielikult avatud, saab ruumi siseneda piisavas koguses õhku, mis suudab langetada ruumi temperatuuri rohkem kui üks kraad ja vähem kui ühe tunniga. Antud juhul langes ruumi temperatuur 1,6 °C (27,8-26,2).

4. TULEMUSTE ANALÜÜS

4.1. Tehnikamaja jahutuse anomaalia põhjus

Tänu tehtud katsele võib julgelt öelda, et kui ventilatsioonitorus olev klapp oleks rohkem lahti ka siis, kui ruumi on vaja jahutada, mitte ainult siis, kui ruumis on palju inimesi, siis Tehnikamaja jahutus toimiks. Seega võiks eeldada, et selle anomaalia põhjuseks on automaatikasüsteemi juhtprogramm. Ilmselt on programmis kirjutatud, et kui ruumi õhus mõõdetud CO_2 kogus läheb kõrgemale kui mingi väärtus, siis avatakse ruumi ventilatsioonitorus olev klapp suuremas ulatuses ning ruumi saab suuremas koguses siseneda värsket õhku. Aga arvestamata on jäetud sellega, et kui ruumi temperatuur tõuseb liiga kõrgeks ja ruumi on vaja jahutada, siis on see ventilatsioonitoruklapp vähe avatud ning ruumi ei pääse piisavas koguses jahedat õhku, mis suudaks ruumi maha jahutada.

4.2. Tehnikamaja jahutuse anomaalia lahendus

Antud anomaalia süsteemist kaotamiseks tuleks uurida Eesti Maaülikooli Tehnikamaja automaatikat ja seda juhtprogrammi. Juhtprogramm tuleks teha nii, et ka jahutamisel oleks ventilatsioonitorus olev klapp piisavalt avatud ruumi jahutamiseks.

KOKKUVÕTE

Töö käigus kirjeldati erinevaid jahutussüsteeme ja Eesti Maaülikooli Tehnikamaja ventilatsioonisüsteemi ja jahutust. Jahutuseks on mitmeid erinevaid meetodeid. Antud töös uuriti kompressoriga külmajaama, absorbtsioonjahutusseadet, aurustusjahutust, sorptsioonjahutust jahutuspalke ja kaugjahutust. Enim kasutatakse kompressoriga külmajaama, kuna see on võrdlemisi kõrge kasuteguriga, võimekas ja majanduslikult kõige mõistlikum. Üha rohkem aga pakutakse kaugjahutust, Eestis see pole veel aga populaarne.

Tehnikamajal on üsnagi võimekas külmajaam, mis peaks suutma jahutada kõiki kasutuses olevaid Tehnikamaja ruume. Jahutuse jõudmiseks ruumidesse kasutatakse ventilatsioonisüsteemi, mis varustab ruumi värske köetud või jahutatud õhuga. Seda kas õhk on jahutatud või köetud kontrollib automaatika vastavalt vajadusele.

Tehnikamaja ruumides tuleb ette olukordi, kus jahutus ei rahulda enda eesmärki. Olukorda uurides tuli välja, et ruumid on jahedad siis, kui ruumis viibib rohkem kui mõni inimene, aga kui olla ruumis üksi, on ruum ikkagi kuum. Selle põhjal sai püstitatud hüpotees, et kui ruumis on palju inimesi, siis on ka õhus suur kogus süsihappegaasi ning selle tõttu vahetab ventilatsioonisüsteem klassiruumi õhku suuremas koguses. Hüpoteesi kontrollimiseks sai teostatud katse, kus uuriti, kui palju õhku ja mis temperatuuril siseneb klassiruumi ja kuidas see mõjutab ruumi temperatuuri erineval süsihappegaasi kogusel. Katsest oli näha, et suure CO_2 kogusel õhus siseneb ruumi hästi suur hulk jahedat õhku, mis suutis ka ruumi temperatuuri langetada. Aga väikesel CO_2 kogusel sisenes ruumi väike hulk värsket jahedat õhku ning ruumi temperatuur ei muutunud.

Tehnikamaja jahutuse anomaalia lahendamiseks tuleks uurida Tehnikamaja ventilatsiooni automaatika juhtprogrammi ja teha vastavad täiendused.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Soojusmasinad, adiabaatilised protsessid ja adiabaatiline invariant. [pdf-fail] https://www.ioc.ee/~kalda/ipho/Soojusmasinad.pdf (16.04.2022)
2. **Seppänen, O., Seppänen, M.** (1998). Hoone sisekliima kujundamine. Tallinn: Koolibri. -269 lk.
3. Vikipeedia. Carnot' tsükkel. [veebileht] https://et.wikipedia.org/wiki/Carnot%27_ts%C3%BCkkel (26.05.2022)
4. Kliimajaam. Külmaaine R32 VS R410A. [veebileht] https://kliimajaam.ee/kulmaaine-r32-vs-r410a/ (16.04.2022)
5. **Abel, E., Voll,** Hoonete energiatarve ja sisekliima. Tallinn: Presshouse. -249 lk.
6. Külmuti. Eesti Entsüklopeedia. (1990). 5. kd. Tallinn: Kirjastus Valgus. 333 lk.
7. Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut. Tehnikamja [veebileht] https://te.emu.ee/et/uldinfo/tehnikamaja/ (30.04.2022)
8. **Liiske, M.** (2002). Sisekliima. Tartu: Eesti Põllumajandusülikooli kirjastus. -269 lk.
9. Espressif systems. ESP8266EX *datasheet*. [pdf-fail] https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/ESP8266-NodeMCU-Datasheet.pdf (20.05.2022)
10. Flälgroup. *Compact controller* 227 PM. [pdf-fail]. https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/f25aba14-7afe-491a-981a-de98188a76af?analytics=0 (20.05.2022)
11. Aosong. *Digital Temmperature and humidity sensor AM2320 product manual*. [pdf-fail] https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3721/AM2320.pdf (20.05.2022)
12. Halton HFB. *Airflow Management Damper*. [pdf-fail] http://www.bunkersts.com/data/goodsImages/14574871902.pdf (27.05.2022)
13. Thingsboard. *Temperature upload over MQTT using Arduino Uno, ESP8266 and DHT22 sensor* [veebileht] https://thingsboard.io/docs/samples/arduino/temperature/ (26.05.2022)

LISAD

Lisa 1. Tehnikamaja regeneratiivne soojustagasti

Lisa 2. Tehnikamaja rekuperatiivne soojustagasti

Lisa 3. Süsihappegaasi koguse tõstmine (CO_2 anduril kilekott ümber)

Lisa 4. Ventilatsioonitorus oleva kontrolleri koodiread [13]

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ThingsBoard.h>
#include "DHT.h"
#include "Adafruit_Sensor.h"
#include "Adafruit_AM2320.h"

Adafruit_AM2320 am2320 = Adafruit_AM2320();

#define WIFI_AP "EMYap" // EMÜ wifi võrk
#define WIFI_PASSWORD "" //paroolita[13]
#define TOKEN "GIMiZfRTk5KPdwpe9wwv" // thingsboardi aadress[13]
#define DHTPIN 0
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
char thingsboardServer[] = "193.40.25.65";
WiFiClient wifiClient;
ThingsBoard tb(wifiClient);
int status = WL_IDLE_STATUS;
unsigned long lastSend;
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  am2320.begin();
  delay(10);
  dht.begin();
  delay(10);
  InitWiFi();
  lastSend = 0;
}
void loop()
{
  if ( !tb.connected() ) {
    reconnect();
  }

  if ( millis() - lastSend > 8700 ) { // uuendab ja edastab pärast 10
sekundit
    getAndSendTempAndVoltageData();
    lastSend = millis();
  }
  tb.loop();
}
void getAndSendTempAndVoltageData()
{
  Serial.println("Collecting temp. and voltage data.");

  int sensorValue = analogRead(A0);
  float voltage = sensorValue * (5 / 1023.0);
  delay(1000);
  float t = am2320.readTemperature();
  delay(200);
  if (isnan(voltage)) {
    Serial.println("Failed to read from FläkWoods227PM!");
    return;
  }
  Serial.println("Sending data to ThingsBoard:");
```

Lisa 4 järg.

```
 Serial.print("Voltage: ");  Serial.print(voltage);  Serial.print(" V");
  Serial.print("ts: ");  Serial.print(t);
  tb.sendTelemetryFloat("voltage", voltage);
  tb.sendTelemetryFloat("ts", t);
}
void InitWiFi()
{
  Serial.println("Connecting to AP ...");
  WiFi.begin(WIFI_AP, WIFI_PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("Connected to AP");
}
void reconnect() {
  while (!tb.connected()) {
    status = WiFi.status();
    if ( status != WL_CONNECTED) {
      WiFi.begin(WIFI_AP, WIFI_PASSWORD);
      while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
      }
      Serial.println("Connected to AP");
    }
    Serial.print("Connecting to ThingsBoard node ...");
    if ( tb.connect(thingsboardServer, TOKEN) ) {
      Serial.println( "[DONE]" );
    } else {
      Serial.print( "[FAILED]" );
      Serial.println( " : retrying in 5 seconds]" );
            delay( 5000 );
    }
  }
}
  }
}
```

Lisa 5. Ruumi temperatuuri mõõtva kontrolleri kood [13]

```
#include "DHT.h"
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ThingsBoard.h>
#include "Adafruit_Sensor.h"
#include "Adafruit_AM2320.h"

Adafruit_AM2320 am2320 = Adafruit_AM2320();

#define WIFI_AP "EMYap" //EMÜ wifi võrk
#define WIFI_PASSWORD "" //paroolita[13]
#define TOKEN "zpgB9JPt7a1X2bjSZ5Gd" //thingsboardi aadress[13]

// DHT
#define DHTPIN 0
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

char thingsboardServer[] = "193.40.25.65";

WiFiClient wifiClient;
ThingsBoard tb(wifiClient);

int status = WL_IDLE_STATUS;
unsigned long lastSend;
void setup()

{  Serial.begin(115200);
  am2320.begin();
  delay(10);
  dht.begin();
  delay(10);
  InitWiFi();
  lastSend = 0;
}
void loop()
{
  if ( millis() - lastSend > 9488 ) { // uuendab ja edastab pärast 10
sekundit [13]
     if ( !tb.connected() ) {
        reconnect();
     }
    getAndSendTemperatureAndHumidityData();
    lastSend = millis();
  }
    tb.loop();
}
void getAndSendTemperatureAndHumidityData()
{
  float t = am2320.readTemperature();
  delay(200);
  float RH = am2320.readHumidity();


  Serial.print("ts: "); Serial.print(t);
  Serial.print(" RHs: "); Serial.print(RH);
```

Lisa 5 järg.

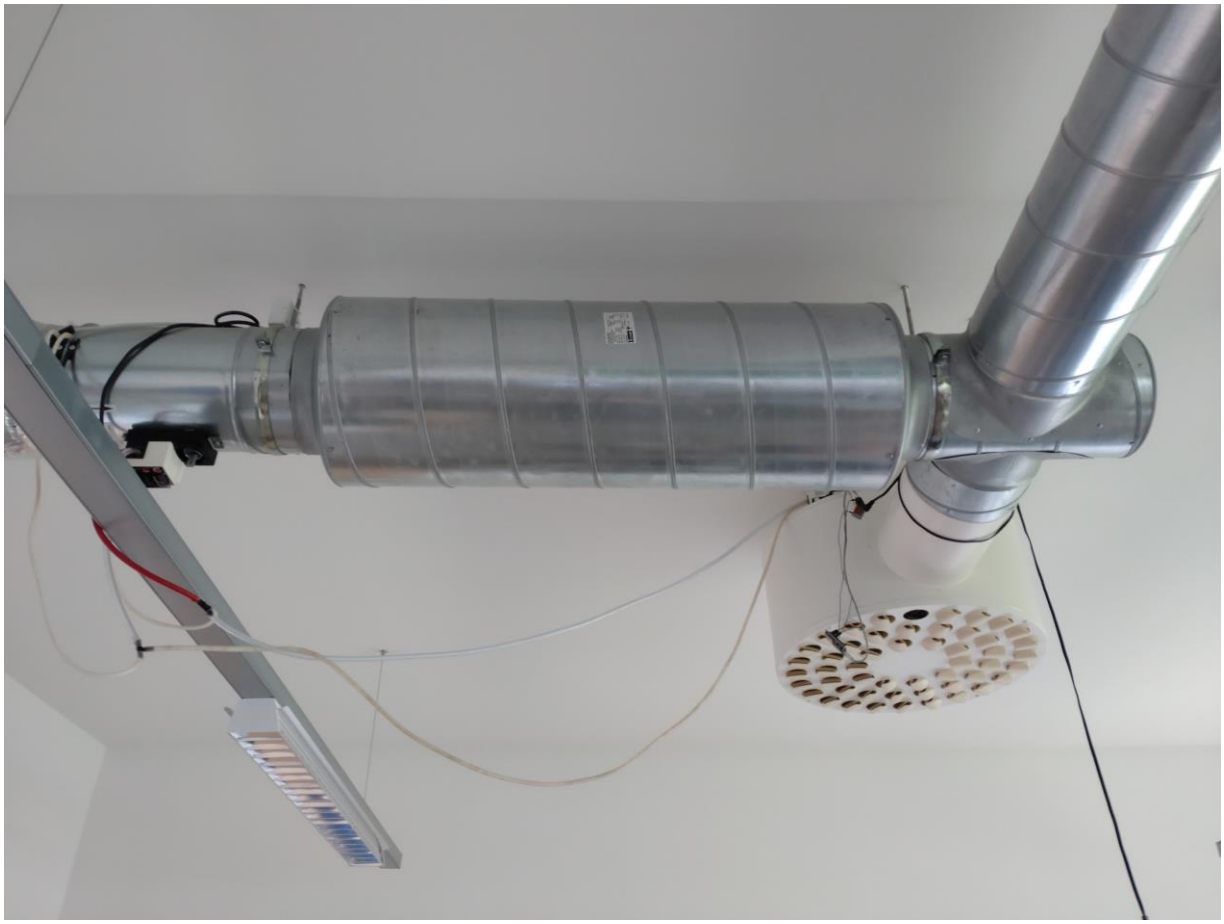
```
  Serial.print(" ds: "); Serial.println(d);
  tb.sendTelemetryFloat("ts", t);
  tb.sendTelemetryFloat("RHs", RH);
  float humidity = dht.readHumidity();
  float temperature = dht.readTemperature();
  if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }

  Serial.print("tp: "); Serial.print(temperature);
  Serial.print(" RHp: "); Serial.print(humidity);

  tb.sendTelemetryFloat("RHp", humidity);

void InitWiFi()
{
  Serial.println("Connecting to AP ...");
  WiFi.begin(WIFI_AP, WIFI_PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("Connected to AP");
}
void reconnect() {
  while (!tb.connected()) {
    status = WiFi.status();
    if ( status != WL_CONNECTED) {
      WiFi.begin(WIFI_AP, WIFI_PASSWORD);
      while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
      }
      Serial.println("Connected to AP");
    }
    Serial.print("Connecting to ThingsBoard node ...");
    if ( tb.connect(thingsboardServer, TOKEN) ) {
      Serial.println( "[DONE]" );
    } else {
      Serial.print( "[FAILED]" );
      Serial.println( " : retrying in 5 seconds]" );
      delay( 5000 );
    }
  }
}
```

Lisa 6. Sissetuleva õhu mõõtmiseks seadistatud seadmed



Lisa 7. Ventilatsioonitoru konstandid

Lisa 8. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Andi Rosental,

sünniaeg 28.04.2000,

annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

„Tehnikamaja ventilatsiooni-jahutussüsteemi anomaalia juhtumiuuring“,

mille juhendajad on Mart Hovi ja Külli Hovi.

salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.1. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.2. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Andi Rosental

(*alllkirjastatud digitaalselt*)

Tartu, 6.06.2022

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____Mart Hovi_____ _____06.06.2022_____

(*juhendaja nimi ja alllkirjastatud digitaalselt*) (*kuupäev*)

_____Külli Hovi_____ _____06.06.2022_____

(*juhendaja nimi ja alllkirjastatud digitaalselt*) (*kuupäev*)