EESTI MAAÜLIKOOL

Tehnikainstituut

Andrus Reier

SOOJUSSALVESTI ENERGIAARVESTINA

THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE AS A THERMAL ENERGY METER

Magistritöö

Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: lektor Mart Hovi, *MSc*

Juhendaja: lektor Külli Hovi, *MSc*

TARTU 2016

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		**Abstract of Master's Thesis**	
Author: Andrus Reier		Speciality: Energy Application Engineering	
Title: Thermal Energy Storage Device as a Thermal Energy Meter			
Pages: 61	Figures: 21	Tables: 3	Appendixes: 4
Department: Energy Engineering Field of research: 4.17 Energetic Research Supervisors: lecturer Mart Hovi, lecturer Külli Hovi Place and date: Tartu, 2016			

A traditional energy meter measures the flow amount of a liquid and the temperature going in to and out from a system. Based on that, it can calculate the amount of energy consumed. An alternative could be a system, where three temperature sensors are placed on an accumulation tank and based on the parameters of the system, the amount of energy stored could be calculated.

The tests were carried out in Estonian University of Life Sciences' boiler laboratory and in an apartment building in the city of Tartu. To get an understanding of how accurate such a system could be, it was compared to fifteen sensors placed on the same accumulation tank. Based on the data gathered, a linear correlation was formed, to make the readings of the three sensors more in line with the readings from the fifteen sensors.

As a result the readings modified with the found equation made the results measured with three sensors more in line with the readings taken from the fifteen sensors when enough energy was stored in the tank. This kind of a measurement system isn't suitable for measuring the output power of a boiler. The measurement system was tested using two accumulation tanks, however one of the tanks did not give the desired results. To use this kind of a system, one would need to model the thermal energy consumption of a building based on the outside temperature.

Keywords: temperature sensor, accumulation tank, boiler, stratification, output power

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		**Magistritöö lühikokkuvõte**	
Autor: Andrus Reier		Õppekava: energiakasutus	
Pealkiri: Soojussalvesti energiaarvestina			
Lehekülgi: 61	Jooniseid: 21	Tabeleid: 3	Lisasid: 4
Osakond: Uurimisvaldkond: Juhendaja(d): Kaitsmiskoht ja aasta:	Energeetika osakond 4.17 Energeetikaalased uuringud lektor Mart Hovi, lektor Külli Hovi Tartu, 2016		

Küttesüsteemides on soojusenergia mõõtmiseks kasutusel soojusarvestid. Tegemist on seadmetega, mis mõõdavad soojust kandva vedeliku hulka ning vedeliku temperatuuri enne soojust tarbivasse süsteemi sisenemist ning pärast süsteemist väljumist. Seeläbi on seadmel võimalik arvutada läbivoolanud energiahulk.

Töös prooviti välja töötada energiaarvestit, mida oleks lihtne paigaldada kas olemasolevatele või rajatavatele küttesüsteemidele. Lahendusena katsetati energiaarvestit, mille toimimiseks paigaldati akumulatsioonimahutile kolm digitaalset temperatuuriandurit tavapäraselt mahutitel olemasolevatesse sisenditesse. Andurite abil oli süsteemi parameetreid teades võimalik arvutada mahutisse salvestunud energia.

Kolme anduri abil mõõdetud tulemusi võrreldi mahutil paiknevate 15 temperatuurianduriga. Et muuta mõõdetud tulemusi sarnasemaks 15 anduri abil mõõdetud tulemustega, leiti nende vahel lineaarne seos. Katsetustest selgus, et kasutades lineaarse seose abil leitud võrrandit, muutuvad tulemused sarnasemaks, kui akumulatsioonimahutisse on salvestunud piisavalt soojusenergiat. Hetkelise katla väljundvõimsuse kirjeldamiseks selline süsteem ebatäpsuste tõttu ei sobi. Mõõtelahendust katsetati kahe mahutiga, kusjuures ühe mahutiga ei olnud võimalik saada soovitud tulemusi. Et energiaarvestit kasutada reaalses küttesüsteemis koos tarbijatega, läheb vaja hoone tarbimise mudelit sõltuvalt välistemperatuurist.

Märksõnad: Akumulatsioonimahuti, katel, temperatuuriandur, kihistumine, võimsus

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID 5
SISSEJUHATUS 7
1. KATELSEADMED 9
1.1 Küttesüsteemide liigitus 9
1.2 Keskküttesüsteem 9
1.3 Soojusenergia akumuleerimine 11
1.4 Ilmse soojuse abil salvestamine 12
1.5 Varjatud soojuse abil salvestamine 13
1.6 Keemiline salvestamine 16
1.7 Põlemine 17
2. SOOJUSENERGIA ARVESTID 19
2.1 Soojusarvesti 19
2.2 Turbiiniga vooluhulgalugeja 19
2.3 Ultraheli vooluhulgalugeja 22
2.4 Elektromagnetiline vooluhulgalugeja 27
2.5 Keeristel põhinev vooluhulgalugeja 29
2.6 Soojusarvestite probleemid 31
3. SOOJUSAKUMULAATOR ENERGIA ARVESTUSSÜSTEEMINA 32
3.1 Katseseadmed 32
3.2 Soojussalvesti kasutamine energiaarvestina 35
3.3 Akumulatsioonimahuti temperatuurid 36
3.4 Akumulatsioonimahutisse salvestunud soojusenergia 38
3.5 Katla väljundvõimsus 46
3.6 Järeldused 47
KOKKUVÕTE 48
KIRJANDUS 50
THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE AS A THERMAL ENERGY METER 52
LISAD 54
Lisa A. 14.03.2016 katlapäeviku väljavõte 55
Lisa B. 06.01.2016 katlapäeviku väljavõte 58
Lisa C. 08.01.2016 katlapäeviku väljavõte 60
LIHTLITSENTS 61

TÄHISED JA LÜHENDID

A – toru ristlõike pindala m^2;

B – magnetvälja tugevus T;

c – heli kiirus $m \cdot s^{-1}$;

c – soojustkandva vedeliku erisoojus $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

c_p – isobaarne erisoojus $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

$c_{p(t)}$ – isobaarne erisoojus aine tahkes olekus $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

$c_{p(v)}$ – isobaarne erisoojus aine vedelas olekus $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

D – toru läbimõõt m;

E – kolme digitaalse temperatuurianduri abil leitud täpsustatud salvestunud energia kJ;

E_1 – salvestunud energia kJ;

E_p – vaadeldava perioodi jooksul salvestunud energia kWh;

f_1 – saadetud signaali sagedus Hz;

k – elektromagnetilise vooluhulgalugeja konstant;

L – aine sulamissoojus $J \cdot kg^{-1}$;

m – aine mass kg;

P_v – katla keskmine väljundvõimsus kW;

Q – salvestunud soojushulk J;

q – vedeliku volumeetriline voolukiirus $m^3 \cdot s^{-1}$;

Q_p – põletatud puidu energiasisaldus;

T – süsteemi keskmine tempertuur K;

T_1 – aine algtemperatuur K;

T_2 – aine lõpptemperatuur K;

τ_1 – pärivoolu signaali levimiseks kuluv aeg s;

τ_2 – vastuvoolu signaali levimiseks kuluv aeg s;

τ_p – vaadeldava perioodi kestus h;

T_s – aine sulamistemperatuur K;

v – vedeliku voolukiirus m·s^{-1};

v_p – peegeldava osakese kiirus m·s^{-1};

X – toruga paralleelselt muundurite vahekaugus m;

x_1 – esimese ja teise anduri vahemikku jääva vedeliku massi suhe süsteemi kogumahtu;

x_2 – teise ja kolmanda anduri vahemikku jääva vedeliku massi suhe süsteemi kogumahtu;

α – signaali ja peegeldava osakese vaheline nurk;

λ_1 – saadetud signaali lainepikkus m;

λ_2 – peegeldunud signaali lainepikkus m;

η_k – katla kasutegur.

SISSEJUHATUS

Hoonetes, kus kasutatakse soojusenergia laialijaotamiseks keskküttesüsteemi, võib kasutuses olla soojusenergia akumuleerimiseks vastav akumulatsioonimahuti. Keskküttesüsteem koosneb üldiselt ühest kütteseadmest, mis on ühenduses jaotusvõrguga soojusenergia laialijaotamiseks [1]. Kütteseadmeteks võivad olla näiteks erinevatel kütustel toimivad katlad või mõnel muul põhimõttel töötavad kütteseadmed, nagu maasoojuspumbad. Soojusenergia akumuleerimist kasutatakse, et vältida ajalist konflikti soojusenergia tootmise ning tarbimise vahel. Soojusenergia akumuleerimine võimaldab näiteks lühiajalist, suurema võimsusega kütmist, võrreldes pidevale madalal võimsusel kütmisele. Toodetud soojusenergia salvestatakse, mis võimaldab selle hilisemat kasutamist. Soojusenergia salvestamise tsükkel on kirjeldatav kolme etapi abil, milleks on soojusenergia tootmine, salvestamine ning tarbimine. [2]

Küttesüsteemides tarbitud soojusenergia iseloomustamiseks kasutatakse soojusarvesteid. Seade kasutab tarvitatud soojusenergia määramiseks kahte temperatuuriandurit ning vedeliku vooluhulgaloendurit. Temperatuure mõõdetakse torul, mille abil voolab katlast väljunud soojenenud vedelik ning torul, kus voolab süsteemist väljunud, jahtunud vedelik. Teades torustiku temperatuuride vahet ning voolanud vedeliku kogust, on seadmel võimalik arvutada süsteemi poolt tarbitud energiahulk ning hetke tarbimisvõimsus. Enamasti erinevad soojusarvestid erinevatel tööpõhimõtetel toimivate vedeliku vooluhulgalugejate poolest. Olenevalt vooluhulgalugeja tööpõhimõttest, võib seadmel olla spetsiifilisi nõudmisi süsteemis kasutatavale vedelikule. [3]

2013. aastal Suurbritannia poolt tellitud uuringus selgus, et soojusenergiaarvestid ei ole paljudel juhtudel paigaldatud tootjapoolseid juhiseid järgides. Kõige suuremaid mõõtmisvigu tekitasid temperatuuriandurid, mis olid paigaldatud anduritele ettenähtud taskute asemel torude peale. Sellistel juhtudel oli sagedane mõõteviga vahemikus -15% kuni -40%. Negatiivne väärtus antud olukorras tähendab tegelikust temperatuuriväärtusest väiksemat väärtust. Seega loeb arvesti ka tegeliku energiahulga asemel väiksemat suurust. Arvestitele tekitavad mõõteprobleeme peamiselt veel õhk (õhumullid), mitmesugused tahtmatud tahked osakesed küttesüsteemis ning ettenähtust madalamad süsteemirõhud.

Arvestile mitte ettenähtud soojustkandva vedeliku kasutamisel võib tekkida mõõteviga kuni 10%. [3]

Magistritöös on proovitud välja töötada energiaarvestit, mis ei sisalda mehaaniliselt liikuvaid osi ning mida on lihtne paigaldada kas olemasolevatele või rajatavatele küttesüsteemidele. Kavandatav energiaarvesti vajab toimimiseks kolme digitaalset temperatuuriandurit, mis on paigaldatud akumulatsioonimahutil olemasolevatesse sisenditesse. Tavapäraselt kasutatakse selliseid sisendeid akumulatsioonimahuti temperatuuride jälgimiseks termomeetrite abil.

Töös prooviti välja töötada energiaarvestit, mida oleks lihtne paigaldada kas olemasolevatele või rajatavatele küttesüsteemidele. Lahendusena katsetati energiaarvestit, mille toimimiseks paigaldati akumulatsioonimahutile kolm digitaalset temperatuuriandurit tavapäraselt mahutitel olemasolevatesse sisenditesse. Andurite abil oli süsteemi parameetreid teades võimalik arvutada mahutisse salvestunud energia. Teema muudab aktuaalseks asjaolu, et tegemist oleks mõõtelahendusega, kus puuduvad liikuvad osakesed, mis muudab arvesti töökindlamaks ning tänu arvesti lihtsusele oleks tegemist ka majanduslikult vähe kuluka süsteemiga võrreldes tavapäraste energiaarvestitega.

1. KATELSEADMED

1.1 Küttesüsteemide liigitus

Küttesüsteemiks nimetatakse seadet või erinevate seadmete kogumit, tänu millele on võimalik tõsta hoones temperatuuri soovitud väärtusele. Küttesüsteeme saab liigitada kas lokaalseteks või keskküttesüsteemideks. Lokaalsed küttesüsteemid suudavad kütta ainult ümbritsevat ala ning tüüpiliselt on ühes hoones kasutuses rohkem kui üks selline seade. Lokaalseteks kütteseadmeteks on näiteks ahjud ja kaminad. [1]

Keskküttesüsteem koosneb üldiselt ühest kütteseadmest, mis on ühenduses jaotusvõrguga soojusenergia laialijaotamiseks [1]. Kütteseadmeteks võivad olla näiteks erinevatel kütustel toimivad katlad või mõnel muul põhimõttel töötavad kütteseadmed, nagu maasoojuspumbad. Keskküttesüsteem ei pea olema ühe hoone põhine, ehk võimalik on varustada ka suurel hulgal majapidamisi ühe katlamaja abil. Selline lahendus, mida nimetatakse ka kaugkütteks, on kasutuses paljudes kortermajades.

1.2 Keskküttesüsteem

Erinevalt ahjust, kus soojus kantakse üle ja salvestatakse ahjumaterjalis, on keskküttesüsteemi puhul tavaliselt soojuskandjaks vesi. Teatud küttesüsteemides kasutatakse vee asemel näiteks auru või õhku. Vesi on sobiv tänu tema küllaltki kõrgele erisoojusele, mis võimaldab salvestada suurema koguse energiat, tõstes vee temperatuuri sellevõrra vähem. Auru tarvitatakse soojuskandjana peamiselt tööstuse poolt kasutatavates hoonetes. Küttekehas soojust ära andes kondenseerub aur veeks. Tänu väikesele erisoojusele tsirkuleerib aur süsteemis oleva rõhu abil ilma tsirkulatsioonipumpadeta. [4]

Tabelis 1.1 on välja toodud mõningate ainete erisoojused.

Tabel 1.1 Ainete erisoojused [5]

Aine	**Erisoojus, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$**
Vesi	4190
Õhk	1010
Teras	460
Etanool	2430

Vee soojuskandjana kasutamisel on peamisteks probleemideks torustikus tekkiv korrosioon, vee külmumine ning bakterite levik. Lahendusena lisatakse küttesüsteemis olevale veele erinevaid kemikaale.

Vee baasil toimivas keskküttesüsteemis toimub vee liikumine isoleeritud torustikus. Soe vesi tsirkuleeritakse läbi küttekehade, milleks võivad olla radiaatorid, konvektorradiaatorid või põrandaküttetorustik. Konvektor annab enamus soojuse üle konvektsiooni teel. See tähendab, et konvektori juures soojenenud õhk ruumis tõuseb ning jahedam õhk liigub taas küttekeha juurde. Konvektorid on üldiselt võrreldes tavapäraste radiaatoritega mõõtmetelt väiksemad, mis võib teatud olukorras soosida nende kasutamist. [4]

Küttekehasse liikuva vee temperatuur seatakse moodsates küttesüsteemides vastavalt välistemperatuurile [4]. Vee temperatuur on juhitav kolmikventiili abil, kus hoone küttekehadele liikuv vesi segatakse hoonest tagasi tuleva jahedama veega. Ventiili asendit juhitakse kontrolleriga. Samamoodi saab juhtida põrandaküttesüsteemi liikuva vee temperatuuri, kus temperatuurid on üldiselt madalamad võrreldes radiaatoritega.

Kortermajades on korterite kütmine lahendatud püstakute abil. Kasutusel on enamasti kas ühe- või kahetorusüsteem. Püstakud on ühendatud magistraaliga ning magistraal on omakorda ühenduses kütteallikaga. Ühetorusüsteemi puhul läbib pealevooluvesi radiaatorit ning jätkab samas torus liikumist järgmisele korrusele, kus läbib järgmist radiaatorit. Sisuliselt on tegemist jadaühendusega. Radiaatorite ühendamine on lahendatud kolmikventiilidega, mis võimaldavad radiaatoritele vooluhulga reguleerimist ning vajadusel ka vee möödajuhtimist, näiteks hooldustööde käigus. Sellise süsteemi puhul tekib probleem vee jahtumisega süsteemi viimastes radiaatorites, kuna tänu eelnevatele radiaatoritele on vee temperatuur vähenenud. Selle kompenseerimiseks on võimalik kasutada suurema võimsusega radiaatoreid või suurendada vee vooluhulka. Võrreldes kahetorusüsteemiga on

torustiku pikkus sellise süsteemi puhul väiksem, kuid suurenenud vooluhulga tõttu on torude läbimõõt suurem. Teatud juhtudel võib vajalik torude läbimõõt muutuda nii suureks, et lahendusena kombineeritakse hoone kahetorusüsteem korruste ühetorusüsteemiga. [4]

Kahetorusüsteem on tänapäeval levinuim soojuse jaotamissüsteem. Püstakute abil, mis on samamoodi ühendatud magistraaltoruga, juhitakse soe vesi radiaatoritesse. Erinevalt ühetorusüsteemist kasutakse juba radiaatoreid läbinud vee ärajuhtimiseks teist püstakut, mis on ühendatud äravoolu magistraaltoruga. Kahetorusüsteemi puhul on tähtis, et igale radiaatorile oleks tagatud vajaminev vooluhulk. Vooluhulkade seadistamiseks kasutatakse püstakute alguses liiniseadeventiile ning radiaatorite ees reguleerimisventiile. Nii on tagatud igale radiaatorile vajalik vooluhulk. [4]

1.3 Soojusenergia akumuleerimine

Soojusenergia akumuleerimist kasutatakse, et vältida ajalist konflikti soojusenergia tootmise ning tarbimise vahel. Näiteks võimaldab soojuse akumuleerimine kütmist lühiajaliselt, kuid suurema võimsusega, vastupidiselt pidevale madalal võimsusel kütmisele. Täielik salvestamise tsükkel koosneb kolmest osast, milleks on soojusenergia tootmine, salvestamine ning tarbimine. [6]

Soojusenergia salvestamissüsteemi võib kirjeldada kas aktiivse või passiivsena. Aktiivses süsteemis toimub soojusenergia ülekanne salvestamissüsteemi sundkonvektsiooni abil. Sundkonvektsiooni põhimõttel töötavas küttesüsteemis liigutatakse torustikus olevat vedelikku tavaliselt pumba abil. See võimaldab vedeliku efektiivset transporti küttesüsteemis. Aktiivses akumulatsioonisüsteemis võib vedelik olla kasutuses nii soojusenergia transpordiks kui ka salvestamiseks. Teine võimalus on eraldada soojusenergiat transportiv süsteem energiat salvestavast süsteemist. Seda on võimalik teha soojusvaheti abil. Passiivne salvestamissüsteem koosneb tahkest soojust salvestavast ainest ning soojusülekandeks kasutatavast vedelikust, mille eesmärgiks on soojusenergia salvestamine tahkesse ainesse ning salvestunud energia transportimine tarbimiseks. [6]

Akumulatsioonisüsteemi juures on oluliseks omaduseks soojusenergiat salvestava aine energiatihedus ehk energiamahtuvus, mida iseloomustab aine erisoojus, salvestava aine ning soojustkandva vedeliku vaheline võimekus kanda üle energiat ning salvestava aine

mehaaniline ning keemiline stabiilsus. Soojusenergia akumulatsioonilahendusi saab liigitada kolmeks: ilmse soojuse abil salvestamine, varjatud soojuse abil salvestamine ning keemiline soojusenergia salvestamine. [6]

1.4 Ilmse soojuse abil salvestamine

Ilmse soojus abil toimuvat soojusenergia salvestamist nimetatakse ka faasimuutuseta salvestamiseks. Faasimuutus kirjeldab aine olekut, milleks võib olla näiteks vedel või tahke olek, ja lisaks olekule vastavaid struktuurimuutuseid. Ilmset soojust saab kirjeldada aine temperatuurimuutusega, materjali erisoojuse ning soojushulgaga. Salvestunud soojushulk on leitav järgmiselt: [6]

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot c \cdot \Delta T, \tag{1.1}$$

kus Q on salvestunud soojushulk J;

m – aine mass kg;

c – erisoojus $\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$;

T_2 – aine lõpptemperatuur K;

T_1 – aine algtemperatuur K;

ΔT – aine lõpptemperatuuri ja aine algtemperatuuri vahe K.

Faasimuutuseta energiasalvestamisel suurendatakse aine temperatuuri, mis omakorda suurendab aine siseenergiat. Kõige levinum kasutatav vedelik on vesi, mille eeliseks on suur erisoojus, tänu millele on veel kõrge energiatihedus. Vee kasutamisel on puuduseks piiratud temperatuurivahemik. Mõningad tahked materjalid võimaldavad kasutamist suuremas temperatuurivahemikus. [6]

1.5 Varjatud soojuse abil salvestamine

Varjatud soojuse abil soojusenergia salvestamist nimetatakse ka faasimuutusega salvestamiseks ehk latentse soojuse abil salvestamiseks (*latent heat).* Faasimuutusega salvestamine põhineb aine agregaatoleku muutusel. Energiasalvestamise käigus muutub aine agregaatolek ning salvestunud energia kasutamisel toimub vastupidine protsess. Faasimuutusega salvestamisel on salvestunud soojushulk leitav järgmiselt: [6]

$$Q = m \cdot c_t \cdot (T_s - T_1) + m \cdot L + m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_s), \tag{1.2}$$

kus Q on salvestunud soojushulk J;

m – aine mass kg;

c_t – erisoojus aine tahkes olekus J/(kg·K);

T_s – aine sulamistemperatuur K;

T_1 – aine algtemperatuur K;

L – aine sulamissoojus J/kg;

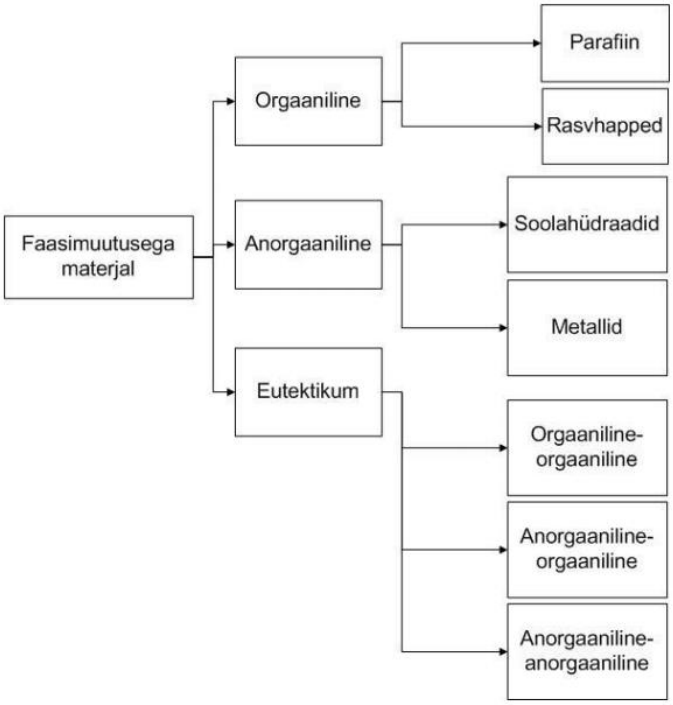
c_v – erisoojus aine vedelas olekus J/(kg·K);

T_2 – aine lõpptemperatuur K.

Faasimuutus toimub püsival temperatuuril. Peale aine agregaatoleku muutust energia salvestamisel toimub edaspidine energia salvestamine faasimuutuseta. Faasimuutusega salvestamise eelis faasimuutuseta salvestamise ees põhineb võimalikul suuremal salvestunud soojushulgal. Faasimuutusega salvestamine võimaldab suuremaid energiatihedusi, tänu millele võivad varjatud soojusega toimivad salvestid olla mõõtmetelt ning massilt väiksemad, võrreldes ilmset soojust kasutatavate salvestitega. Varjatud soojust kasutatavate salvestite puuduseks on probleemid salvesti täitmise ning tühjendamisega. See tuleneb kasutatavate materjalide madalast soojusjuhtivustegurist, mis muudab eelnevalt mainitud protsessid aeglasemaks. Faasimuutusega materjali valides peaks silmas pidama aine sulamistemperatuuri, mis peaks olema sobiv vastavaks otstarbeks, kõrget faasimuutuse soojushulka, mis võimaldab väiksema materjalikoguse juures suuremat energiatihedust,

kõrget erisoojust, mis võimaldab salvestada energiat peale faasimuutust, kõrget soojusjuhtivust, mis kiirendab energia salvestamist ning tarbimist ja aine keemilist stabiilsust, mürgisust ning hinda. [6]

Joonisel 1.1 on näha faasimuutusega salvestamiseks kasutatavad materjalid.



Joonis 1.1 Faasimuutusega salvestussüsteemides kasutatavad materjalid [7]

Parafiin on vahataoline aine, mille kristalliseerumisel eraldub faasimuutuse soojus. Enamus kasutatavatest parafiinidest on keemiliselt stabiilsed, ei tekita korrosiooni ning on suure faasimuutuse soojuse väärtusega 60–269 $kJ \cdot kg^{-1}$, 150 $MJ \cdot (m^3)^{-1}$. Parafiinidel on tavaliselt madal soojusjuhtivus 0,2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, neil on faasimuutusel märgatav mahumuutus ning tegemist on tuleohtlike ainetega. Tänu mainitud negatiivsetele omadustele on vajalik aine salvestamine mahutites, mis suurendavad salvestussüsteemi kulukust ning vähendavad süsteemi võimekust tänu suurenenud soojustakistusele, mis on tekitatud mahuti poolt. Plastikust mahutite kasutamine ei ole parafiiniga otstarbekas. [6, 8, 9]

Võrreldes parafiiniga on rasvhapped kokkupuuteks metallidega sobivamad, mis on oluline soojussalvesti valimisel. Erinevaid rasvhappeid kombineerides on võimalik tekitada soojuskandja, millel on erinev sulamistemperatuur. Nagu parafiin, ei ole rasvhape mürgine,

on keemiliselt stabiilne ning omab sobivat temperatuurivahemikku, mis on kõlbulik näiteks päikesekollektoriga kasutamiseks. Sarnaselt parafiiniga on rasvhapetel suur faasimuutuse soojuse väärtus 125–250 $kJ \cdot kg^{-1}$. Rasvhapped omavad parafiinile sarnast soojusjuhtivust sulamisel ning tahkumisel ei teki märkimisväärset mahumuutust. Rasvhapete puuduseks on nende valdavalt kõrge hind võrreldes parafiinidega. [6, 9, 10]

Soolahüdraadid on soola ja vee sulamid, mis koos moodustavad tahke aine. Võrreldes orgaaniliste ainetega on anorgaanilistel ainetel, ka soolahüdraatidel, suurem faasisiirde soojuse väärtus aine ühiku kohta 86–328 $kJ \cdot kg^{-1}$, 350 $MJ \cdot (m^3)^{-1}$, suurem soojusjuhtivus 0,7 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ning soodsam hind. Erinevalt orgaanilistest ainetest on soolahüdraatide puhul tegemist korrosiooni tekitavate ühenditega, mis lühendab nende kasutamiskõlbliku iga ning suurendab hooldusele ning aine mahutamisele tehtavaid kulutusi. Erinevalt orgaanilistest ainetest võib soolahüdraatidel olla probleeme inkongurentse sulamisega, mis tähendab, et sulamise käigus tekkiva vedeliku koostis erineb algsest tahke aine koostisest. Soolahüdraadid võivad vajada jahutamist, et tagatud oleks aine tahkumine. Soolahüdraate on erineva koostisega, mis tähendab, et leidub ühendeid, millel ei ole probleeme inkongurentse sulamisega, kuid vastavate omadustega soolahüdraate kasutatakse harva. [6, 9, 11]

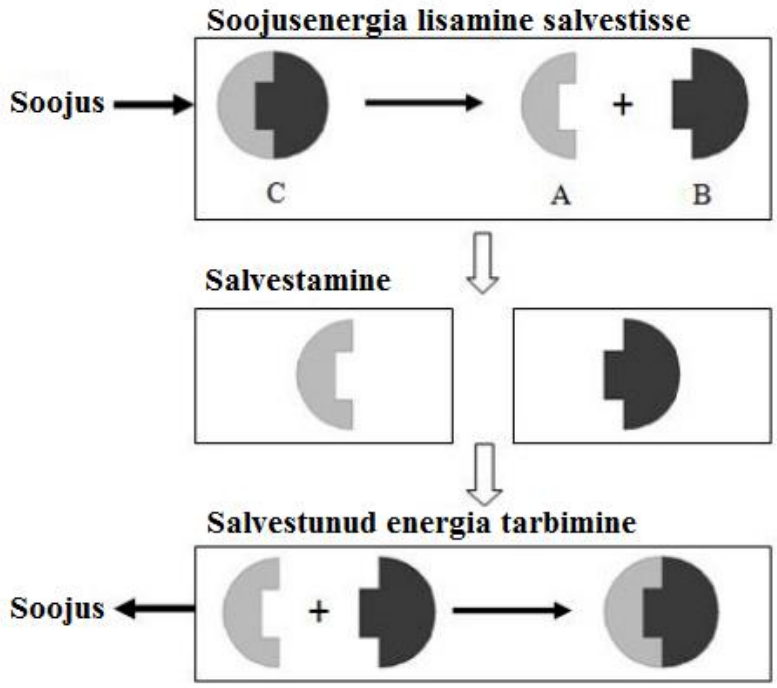
Faasimuutusega salvestussüsteemides kasutatavad metallid on madalate sulamistemperatuuridega. Metallid omavad kõrget soojusjuhtivust 40,6 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, aga ka suurt massi, mis piirab nende kasutamisvõimalusi. Tänu suurele massile jääb metallide faasisiirdesoojuse väärtus massiühiku kohta madalaks, võrreldes eelnevalt nimetatud ainetega 25–90,9 $kJ \cdot kg^{-1}$. Lisaks mainitud probleemidele piirab metallide kasutamist ka kõrge hind. [6, 9]

Eutektikumid on ained, mis koosnevad kahest või rohkemast komponendist. Eutektikumide puhul ei esine soolahüdraatidega esinevat nähtust, kus vedeliku koostis on tahke aine koostisest erinev. Eutektikumid moodustavad kristalliseerumisel segu, mis koosneb komponentide kristallidest. [6]

1.6 Keemiline salvestamine

Soojusenergia keemiliseks salvestamiseks on vajalik keemiliste reaktsioonide pöördumine. Energiat salvestisse lisades hakkavad toimuma endotermilised reaktsioonid, ehk protsessid mis vajavad toimimiseks energiat. Selle tulemusena termokeemiline aine muundatakse keemiliselt kaheks komponendiks, mida on võimalik eraldi salvestada. Vastupidine reaktsioon toimub, kui eraldunud komponendid liidetakse ning tulemuseks on algne aine, mille tekkimise käigus eraldub soojusenergia. Salvestist vabaneb soojus eksotermilise reaktsiooni abil. Endotermilise reaktsiooni käigus eraldunud esimene aine võib olla hüdroksiidioon, hüdraat, karbonaat või ammoniaagiühend. Teiseks eraldunud ühendiks võib olla vesi, vingugaas, ammoniaak, vesinik või mõni muu sobiv ühend. Endotermilises reaktsioonis kasutatav aine on tavaliselt tahkes või vedelas olekus. Reaktsioonikäigus tekkivad ühendid võivad olla kas gaasilises, vedelas või tahkes olekus. Reaktsioonide kulgemiseks on vajalik katalüsaator, mis lihtsustab keemiliste reaktsioonide toimimist. Keemilistes reaktsioonides on oluline suur energiatihedus. Enamasti on keemiliste protsesside abil saadud soojusenergia tihedus suurem faasimuutuseta ja faasimuutusega saavutatavatest energiatihedustest. [2, 6, 12]

Joonisel 1.2 on kujutatud termokeemilise soojusenergia salvestamise tsüklit.



Joonis 1.2 Termokeemiline soojusenergia salvestamine [12]

Sorptsiooni protsessi käigus salvestub energia desorptsiooni abil, mille käigus eemalduvad ainest selle mõned komponendid. Selle protsessi käigus toimub aine aurustumine ning kondenseerumine. Salvestunud soojus eraldub, kui aine, mis kondenseerus, aurustatakse ning seotakse jälle teise ainega, mida nimetatakse ka sorptsiooniks. Tühjaks laadimise tsükli käigus mõned molekulid sorbaadi, ehk veega tugeva sideme, mille lõhkumisel toimub endotermiline reaktsioon. [6]

Sorptsioonisüsteemid võivad olla kas suletud või avatud süsteemid. Suletud sorptsioonil põhineval süsteemis toimub soojusvahetus adsorbendiga, ehk adsorbeeruva ainega soojusvaheti abil. Süsteemi energiatihedus on madalam avatud sorptsioonisüsteemist, kuna adsorbeeruv aine on süsteemi osa. Kasutades silikageeli või tseoliiti adsorbeeruva ainena, võib see moodustada süsteemi kogumassist 30-40%. Suletud süsteemi eelisteks võrreldes avatud süsteemi suurem väljundtemperatuur kütmise eesmärgiks ja madalam väljundtemperatuur jahutamiseks. [2]

Avatud sorptsioonisüsteemis toimub õhu abil soojusvahetus adsorbendiga. Lisaks transpordib õhk veeauru. Desorptsiooni käigus eemaldab soojenenud õhk adsorbendist vee, mis jahutab süsteemi. Adsorptsiooni käigus niiske jahe õhk siseneb adsorbenti, mis imendab veeauru ning vabastab soojuse. Õhk lahkub süsteemist soojenenud ning kuivana. [2]

Keemilistel reaktsioonidel põhinev soojussalvesti on sobiv pikaajaliseks soojusenergia salvestamiseks, kuna protsessi käigus ei ole märgatavaid soojuskadusid. Salvestamine toimub tavaliselt toatemperatuuridel. [12]

1.7 Põlemine

Põlemine leiab aset, kui kütus reageerib õhuhapnikuga, ehk hapendajaga. Keemilis-füüsikalise protsessi käigus, kus toimub kütuse põlevaine ja õhuhapniku ühinemine, eraldub saadusena põlemissoojus [13]. Eksotermilise reaktsiooni käigus lisaks soojusele, eraldub ka süsinikdioksiid ning vesi. Teades suitsugaasi koostist, on võimalik parandada põlemise efektiivsust. Põlemise efektiivsuse all mõeldakse põlemisprotsessi täielikkust. Et saavutada maksimaalset põlemise efektiivsust, on vajalik täielik põlemine, mis tähendab, et kütusest on kasutatud kõik energia ja põlenud on kõik süsiniku ja vesiniku osakesed. [14]

Et muuta põlemine võimalikult efektiivseks ning vähendada atmosfääri paisatavate kahjulike ainete hulka, on vajalik teha suitsugaasianalüüs. Põlemise efektiivsus on tähtis, sest kõrgem efektiivsus võimaldab säästa kütust ning seeläbi ka kütusele tehtavaid kulutusi.

Kütuse põlemiseks vajalik aeg koosneb kütuse õhuhapnikuga kontakti viimisega ajast, kütuse soojenemisest ning ajast, mis kulub kütuse ja õhuhapniku vahel toimuvaks keemiliseks reaktsiooniks. Aeg, mida on vaja kulutada kütuse ettevalmistamiseks põlemisele, oleneb kütuse agregaatolekust. Põlemist, kus kütus on õhuhapnikuga samas, gaasilises olekus, nimetatakse homogeenseks põlemiseks. Kui kütus on tahkes või vedelas faasis, nimetatakse sellist põlemist heterogeenseks. Gaasilise kütuse puhul ei moodusta aeg, mis kulub õhuhapniku ja gaasi kuumutamiseks süttimiseks sobiliku temperatuurini, märkimisväärset osa. Vedelkütuste puhul lisandub süttimiseks sobiliku temperatuurini kuumutamiseks kuluvale ajale ka kütuse aurustamiseks ning termiliseks lagunemiseks kuluv aeg. Tahkekütuste puhul lisanduvad süttimiseks sobiliku temperatuurini kuumutamiseks kuluvale ajale niiskuse aurustamiseks ning lendosiste eraldumiseks kuluv aeg. [13, 14]

Reaalselt ei ole täieliku põlemise olukord saavutatav tänu mitmesugustele muutujatele ning paratamatutele soojuskadudele. Et saavutada täielikule põlemisele võimalikult lähedane olukord, on vaja suurendada põlemisprotsessi viidavat õhukogust. Seda õhukogust, mis on vajalik kütusest kogu energia kättesaamiseks, nimetatakse lisaõhuks. Rikas põlemine kirjeldab olukorda, kus põlemiskambris on ideaalsest olukorrast rohkem kütust. Vaese põlemise puhul on põlemiskambris ideaalse olukorraga võrreldes rohkem õhku kui kütust. Põlemisprotsessides tekib enamasti põlemise käigus lisaks erinevaid keemilisi ühendeid. Kõrvalsaaduste, nagu süsinikoksiidi, ehk vingugaais, lämmastikoksiidi, lämmastikdioksiidi, vääveldioksiidi ja tahma tekkimist tuleks vältida. Põlemiskambrisse viidav lisaõhk vähendab vingugaasi teket, lastes süsinikoksiidil reageerida hapnikuga. Mida vähem suitsugaasis vingugaasi leidub, seda täielikumaks muutub põlemine, sest vingugaas sisaldab kasutamata energiat. Negatiivsest küljest põhjustab lisaõhk soojuskadusid ning põlemiskolle jahtub, mis põhjustab vingugaasi teket. Seega on vajalik maksimaalse efektiivsuse saavutamiseks korrektne lisaõhukogus, et hoida soojuskaod ning vingugaasi kogus optimaalsena. [14]

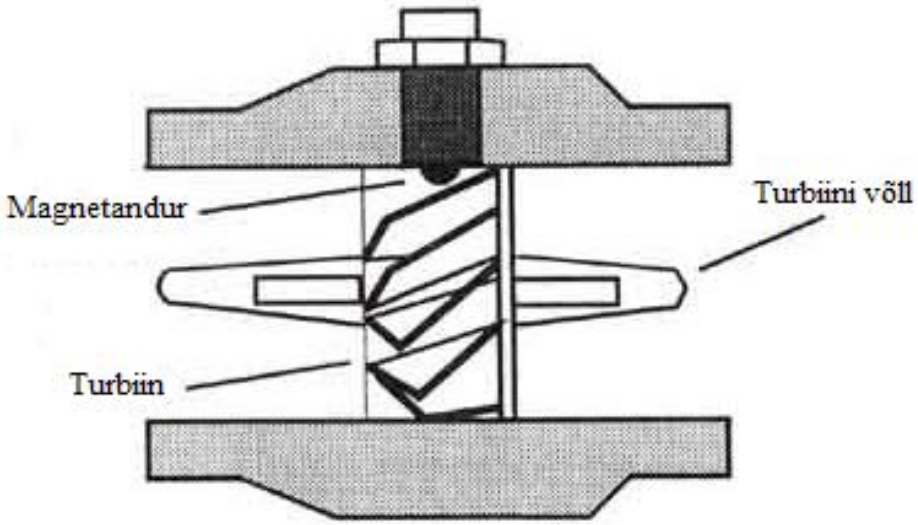
2. SOOJUSENERGIA ARVESTID

2.1 Soojusarvesti

Soojusarvesti on seade, mida kasutatakse küttesüsteemides tarvitatud soojusenergia mõõtmiseks. Seade koosneb kahest temperatuurisensorist ning vedeliku vooluhulga loendurist. Temperatuure mõõdetakse torul, mille kaudu voolab soojenenud vedelik süsteemi ning torul, kus voolab süsteemist väljunud, jahtunud vedelik. Selliseid torusid kutsutakse vastavalt ka pealevoolu- ning tagasivoolutoruks. Vooluhulka on võimalik mõõta erinevatel tööpõhimõtetel töötavate lugejatega. Üldiselt paiknevad vedeliku vooluhulgalugejad süsteemi tagasivoolutorustikul. Teades süsteemi siseneva ning sealt väljuva vedeliku temperatuuri ja vedeliku vooluhulka, on seadme kontrolleril võimalik arvutada tarbitud energia. Peamiseks erinevuseks soojusarvestite vahel on seadmete vooluhulgalugejate tööpõhimõtted. [3]

2.2 Turbiiniga vooluhulgalugeja

Turbiiniga vedeliku vooluhulgaarvestid kasutavad vooluhulga mõõtmiseks vedeliku liikumist, mis paneb liikuma seadmes oleva turbiini. Vastavalt turbiini liikumiskiirusele ja seadme vedeliku liikumiseks mõeldud ava läbimõõdule on võimalik arvutada vedeliku vooluhulk. Üldiselt on turbiini telg vedeliku voolusuunaga 90° nurga all. Enamasti kasutavad sellised arvestid elektroonilisi mõõtevahendeid täpsuse ja seadme lihtsuse eesmärgil. Mehaanilised ühendused turbiiniga suurendaksid arvestite hooldusvajadust ning mõjutaksid arvesti töökindlust. Turbiini pöörlemissageduse mõõtmine näiteks magnetite abil võimaldab eraldada turbiini ning seal voolava vedeliku ülejäänud seadmest. Joonisel 2.1 on kujutatud turbiiniga vooluhulgalugeja. [3]

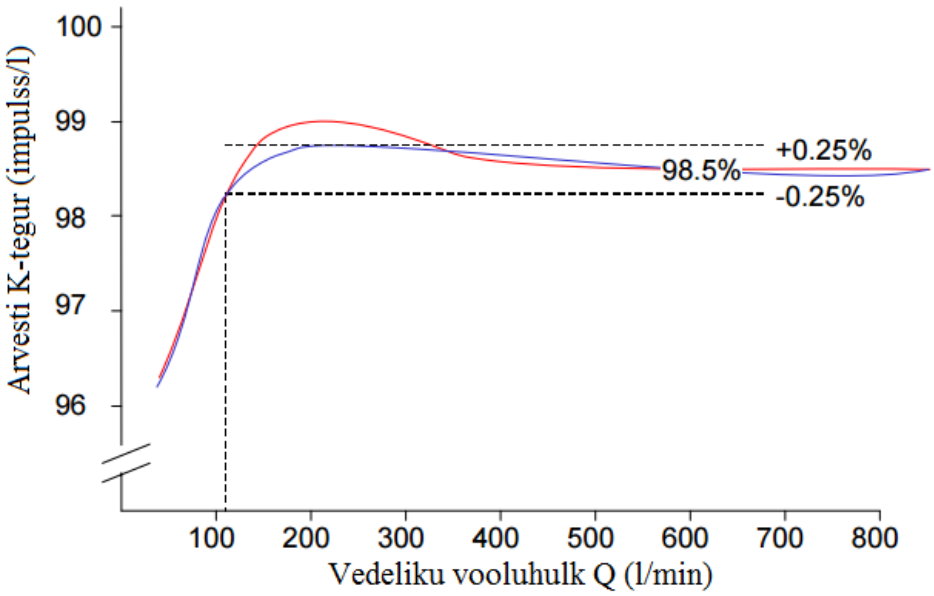


Joonis 2.1 Turbiiniga vooluhulgalugeja [15]

Joonisel 2.1 kujutatud vooluhulgalugejal asetseb turbiiniratas otseselt vedeliku vooluhulgas. Iga turbiinilaba on magnetiseeritud. Kui turbiin pöörleb, liiguvad magnetid mööda andurist, mis fikseerib turbiini liikumise. Tiiviku möödumisel andurist tekib impulss. Mida suurem on vedeliku vooluhulk, seda kiiremini impulsid tekivad. Leides impulsside keskmise arvu ajaühikus, on võimalik arvutada vedeliku vooluhulk ning arvestades kogu tehtud impulsside arvu, saab leida kogu voolanud vedeliku koguse. [15]

Arvesti rootori pöörlemisest tingitud impulsside arvu võrreldes vedeliku vooluhulgaga nimetatakse K-teguriks (*K-factor).* Ideaalses olukorras oleks arvestil tekkinud impulsside ning vedeliku vooluhulga vahel lineaarne sõltuvus. Praktiliselt on vedeliku voolamisest tekkinud moment mõjutatud hõõrdumisest, viskoossusest ning magnetilistest takistustest. Eelnevalt mainitud tegurid on kõik sõltuvad vedeliku voolukiirusest. Seega vastava vedeliku voolukiiruse juures on K-teguri väärtus sõltuv vedeliku viskoossusest, voolukiirusest, turbiini laagritest, turbiinilabade karedusest, turbiinilabade servade teravusest ning vedeliku voolamise karakteristikutest. Mainitud tingimused mõjutavad K-teguri lineaarsust ning erinevusi arvestite lineaarsustel võib tähendada ka ühe tootja arvesti partiis. [16]

Joonisel 2.2 on kujutatud turbiiniga vooluhulgalugeja K-teguri sõltuvust vedeliku vooluhulgast.



Joonis 2.2 Arvesti K-teguri sõltuvus vedeliku vooluhulgast [16]

Madalatel voolukiirustel on turbiiniga vooluhulgalugejatel probleeme turbiini rakendumise kiiruses, mis on tingitud laagrite hõõrdejõust, vedeliku viskoossusest ning magnetilisest takistusest, mis tekib rootori labade ja anduri vahel. Joonisel 2.2 on näha, et vastava arvesti jaoks madalamal vedeliku vooluhulgal langeb K-teguri väärtus märgatavalt. Ideaalis peaks vedeliku vooluhulga ja K-teguri vahel olema joonisel kujutatud lineaarne seos ilma märgatavate tõusude ja langustega. Joonisel on sinise joonega kujutatud punase joonega näidatud vedelikust madalama viskoossusega vedelik. Umbes 200 l/min vooluhulga juures on näha, et madalama viskoossusega vedelik omab lineaarsemat seost võrreldes suurema viskoossusega vedelikuga. Muutus suurendab tänu lineaarsemale seosele arvesti mõõtetäpsust. Jooniselt 2.2 võib tähendada, et antud arvesti jaoks ei ole optimaalne volumeetriline voolukiirus alla 400 $l \cdot min^{-1}$. [16]

Tavaliselt on suuremat vedeliku vooluhulka mõõta võimaldavad arvestid võrreldes väiksemate arvestitega vähem mõjutatud vedeliku viskoossusest. See aga ei tähenda, et võimaluse korral tuleks kasutada ettenähtust suuremaid arvesteid. Õigesti valitud arvesti välistab olukordasid, kus vedeliku vooluhulk muutub ebasobimatult väikseks, mis omakorda põhjustab arvesti sõltuvuse muutumist mittelineaarseks, seega mõjutades mõõtmistäpsust. Turbiiniga vooluhulgalugejatele on ettenähtud minimaalsed ning maksimaalsed vooluhulgad, mis peaksid tagama, et seadme sõltuvus on lineaarne. Enamasti soovitatakse

süsteemile arvestit, mis on võimeline mõõtma 20-30% suuremat vooluhulka süsteemi maksimaalse vooluhulgaga võrreldes. [16]

Kuna arvesti turbiini pöörlemist mõõdetakse kontaktivabalt, on võimalik arvesti kasutamine süsteemides, kus rõhud ulatuvad kuni 64 Mpa. Sellist rõhku ei esine küttesüsteemides, aga kirjeldatud meetoditel toimiv arvesti on sobiv ka erinevate vedelike vooluhulga mõõtmiseks. Kõrge rõhutaluvus eeldab ka vastavate materjalide kasutamist süsteemis. Korrektse arvesti installatsiooni ning hoolduse korral on tegemist täpsete seadmetega, mis on võimelised määrama vooluhulka täpsusega ± 0,5% tegelikust vooluhulgast. Samuti on tegemist seadmetega, mis võimaldavad mõõta vedeliku vooluhulka laias vahemikus (4 $l \cdot min^{-1}$ – 800000 $l \cdot min^{-1}$). Arvesti kasutamiseks sobivad temperatuurid on sõltuvad ainult konstruktsioonis kasutatavatest materjalidest, kus süsteemis oleva vedeliku kõrgeimad temperatuurid võivad ulatuda kuni 600 °C ning madalaimad temperatuurid kuni –220 °C. [16]

Arvesti peamiseks puuduseks on rootori olemasolu. Kuna tegemist on liikuva osaga, esineb rootoril kulumist. Lisaks ei sobi selline arvesti kasutamiseks süsteemides, kus on tahkeid osakesi või märgatavalt korrosiooni. Seade vajab regulaarset hooldust ning kalibreerimist mõõtmistäpsuse säilitamiseks. Kuna arvesti toimimiseks on oluline rootori pöörlemise ning arvestit läbinud vedeliku lineaarne seos, on vajalik teada süsteemis oleva vedeliku viskoossust ning seade sellele vastavalt kalibreerida. Eriti oluline on kalibreerimine just madalatel vooluhulkadel. Turbiiniga arvesti ei ole sobiv kasutamiseks kõrge viskoossusega vedelikus. Sellise vedeliku suur hõõrdumine põhjustab süsteemis rõhulangust. [16]

2.3 Ultraheli vooluhulgalugeja

Ultraheli vooluhulgalugejad kasutavad vooluhulga arvestamiseks ultraheli. Seade töötab põhimõttel, kus ultraheli signaal saadetakse läbi toru, olles vedeliku vooluga nurga all. Selline vooluhulgalugeja toimib ultraheli levimiseks kulunud aja erinevuste põhimõttel. Ultrahelisignaal edastatakse muundurite abil, kus üks muundur toimib saatjana ning teine vastuvõtjana. Aeg, mis kulub signaalil jõudmaks saatjalt vastuvõtjale on seotud vedeliku voolukiiruse ning heli levimise kiirusega vedelikus. Signaal võib liikuda kas vedeliku voolusuunas või vedeliku voolusuunale vastupidiselt. Aeg, mis signaalil kulub liikumiseks

saatjalt vastuvõtjale vedeliku voolusuunas on väiksem kui aeg, mis kulub liikumiseks vastu vedeliku voolusuunda. Aja erinevus, mis kulub signaali liikumiseks, on otseselt seotud vedeliku voolukiirusega, sest vedelikus levivad signaalid on kiirendatud, levides voolusuunas ning aeglustatud, levides vastu voolusuunda. Saatja ja vastuvõtja rollid vahetuvad pidevalt. Kuna muundurid asetsevad vedeliku voolule tavapäraselt nurga all, on võimalik muundurite funktsioone pidevalt vahetades mõõta signaali levimiseks kulunud aega nii päri- kui ka vastuvoolu. Vedeliku vooluhulk ehk volumeetriline voolukiirus torustikus on leitav järgmiselt: [17]

$$q = v \cdot A, \tag{2.1}$$

kus q on vedeliku volumeetriline voolukiirus $m^3 \cdot s^{-1}$;

v – vedeliku voolukiirus $m \cdot s^{-1}$;

A – toru ristlõike pindala m^2.

Vedeliku voolukiirus on arvutatav järgmiselt [18]:

$$v = \frac{L^2}{2 \cdot X} \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1 \cdot \tau_2} = \frac{L^2}{2 \cdot X} \cdot \frac{\Delta\tau}{\tau_1 \cdot \tau_2} \tag{2.2}$$

kus L on muundurite vaheline kaugus m;

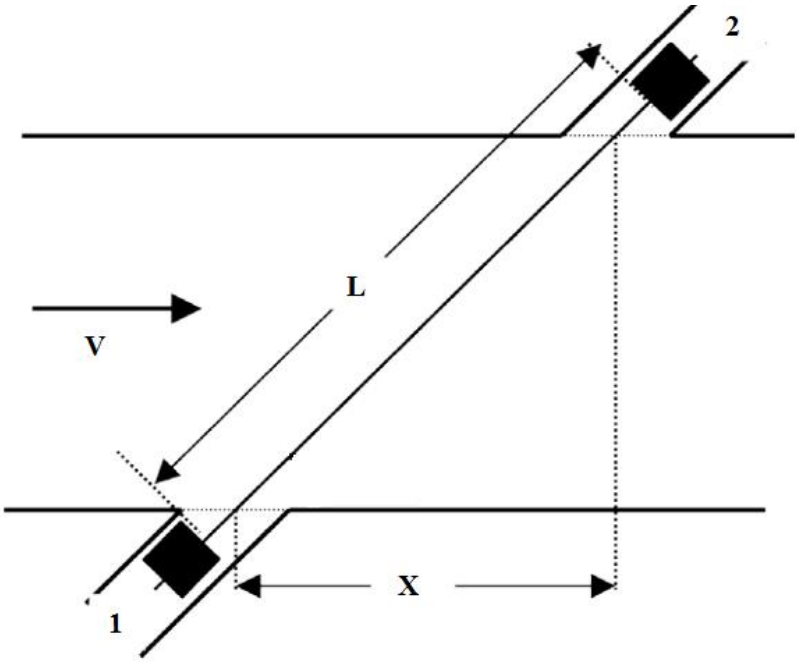
X – toruga paralleelselt muundurite vahekaugus m;

τ_1 – pärivoolu signaali levimiseks kuluv aeg s;

τ_2 – vastuvoolu signaali levimiseks kuluv aeg s;

$\Delta\tau$ – aja, mis kulub signaali levimiseks pärivoolu ning aja, mis kulub signaali levimiseks vastuvoolu vahe.

Joonisel 2.2 on kujutatud ultraheli vooluhulgaarvesti diagramm.



Joonis 2.2 Ultraheli vooluhulgaarvesti [18]

Muundurid, mis on joonisel 2.2 tähistatud vastavalt 1 ja 2 on paigutatud vedeliku voolusuunaga nurga alla. Nende vaheline kaugus on tähistatud tähisega L. Valemis 2.2 mainitud suurus X tähistab kahe muunduri vahelist kaugust pikki toru. Lisaks vedeliku voolukiirusele arvutatakse ultraheli abil toimivas arvestis ka heli levimiskiirus, mis on leitav järgmiselt: [19]

$$c = \frac{L}{2} \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1 \cdot \tau_2} \tag{2.3}$$

kus c on heli kiirus $m \cdot s^{-1}$.

Kuna ultraheli vooluhulgalugeja poolt tehtud mõõtmiste peamiseks tulemuseks on signaali liikumiseks ühest muundurilt teisele kuluv aeg, on väära aja lugemi puhul lugejal kuvatav tulemus samuti väär. Seega on tähtis aeg-ajalt kontrollida arvesti poolt mõõdetud tulemuste ühtivust eraldi arvutatud heli levimiskiirusega. Kui tulemused erinevad üksteisest märkimisväärselt, on selge, et tehtud mõõtmised ei ole soovitud täpsusega. Tulenevalt ultrahelil põhineval vooluhulgalugeja tööpõhimõttel on selline seade võimeline iseseisvalt teostama diagnostikat. [19]

Arvestitel, mis on mõeldud torule kinnitamiseks, on vajalik jälgida toru pinna seisukorda. Erinevad lahtised osakesed ning korrosioon toru pinnal mõjutavad signaali levimist läbi vedeliku. Korrodeerunud torule arvesti kinnitamine on võimalik juhul, kui korrosiooni kiht on õhuke ning tasane toru tasapinnaga. Vajalik võib olla värvikihi olemasolul selle eemaldamine, kui märgata on selle koorumist või juhul, kui tegemist on paksu kihiga. [17]

Lisaks eelnevalt kirjeldatud ultraheliga toimivale arvestile on kasutuses ka arvestid, mis kasutavad toimimiseks Doppleri efekti. Sarnaselt, on torule kinnitatud saatja ja vastuvõtja. Saatja abil saadetakse vedelikku ultrahelisignaal, mis põrkub vedelikus olevate osakestega, milleks võivad olla erinevad tahked osakesed või õhumullid. Saadetud signaali lainepikkus avaldub: [20]

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} \tag{2.4}$$

kus λ_1 on saadetud signaali lainepikkus m;

f_1 – saadetud signaali sagedus Hz.

Kuna vedelikus olevad osakesed on teatud kiirusega liikumas, kuvab vastuvõtja erinevat signaali sagedust võrreldes algselt väljastatud signaali sagedusega. Selline nähtus tekib, sest vedelikus olevad peegeldavad osakesed liiguvad pidevalt mõõteseadmest eemale. Peegeldunud signaali lainepikkus avaldub: [20]

$$\lambda_2 = (c - 2 \cdot v_p \cdot \cos\alpha) / f_1 \tag{2.5}$$

kus λ_2 on peegeldunud signaali lainepikkus m;

v_p – peegeldava osakese kiirus m·s^{-1};

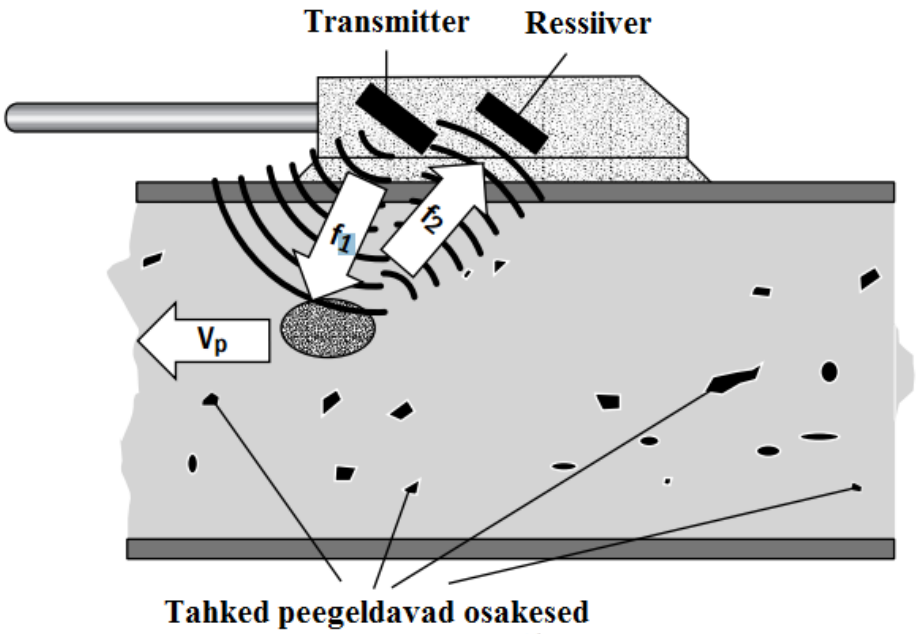
α – signaali ja peegeldava osakese vaheline nurk.

Signaalide sageduse erinevus enne ning pärast peegeldumist on lineaarses sõltuvuses peegeldava osakese liikumiskiirusega, kusjuures nendevaheline seos avaldub: [20]

$$f_2 - f_1 = \Delta f = \frac{2 \cdot v_p \cdot \cos\alpha \cdot f_1}{c} \tag{2.6}$$

kus Δf on saadetud signaali sageduse ning peegeldunud signaali sageduse vahe Hz.

Joonisel 2.3 on kujutatud Doppleri printsiibil toimiva ultraheli vooluhulgalugeja tööpõhimõtte diagramm.



Joonis 2.3 Doppleri printsiibil toimiva arvesti tööpõhimõte [20]

Erinevalt joonisel 2.2 kujutatud arvestist, on näha, et Doppleri printsiibil toimiva arvesti muundurid ei ole paigutatud vastastikku üksteise suunas. See tuleneb arvestite tööpõhimõtete erinevusest, kus esimesel juhul mõõdetakse aega, mis kulub ultraheli signaalil jõudmaks ühelt muundurilt teisele. Joonisel 2.3 kirjeldatud seadmes on eesmärgiks aga

signaali peegeldumine. Mõlemal seadmel on kasutuses vähemalt kaks muundurit, mis on tavaliselt paigutatud toruga nurga alla. [20]

Doppleri efekti kasutavad arvestid vajavad toimimiseks vedelikus ühtlases koguses signaali peegeldavaid osakesi. Osakesed peavad olema piisavate mõõtmetega, et tagatud oleksid peegeldused. Torustikus on vajalik piisavalt suur voolukiirus, et ei tekiks peegeldavate osakeste ladestumist. [20]

2.4 Elektromagnetiline vooluhulgalugeja

Elektromagnetilised arvestid toimivad Faraday seaduse põhiselt, mille kohaselt tekib juhis pinge, kui elektrijuht liigub läbi magnetvälja. Sellises süsteemis on elektrijuhiks küttesüsteemis soojust kandev vedelik. Tekkinud pinge on proportsionaalne vedeliku voolukiirusega ning teades kas arvesti või toru läbimõõtu, võrdne ka vedeliku volumeetrilise voolukiirusega. [21]

Tekkinud pinge avaldub lihtsustatul kujul järgmiselt [21]:

$$U = k \cdot B \cdot \bar{v} \cdot D \tag{2.7}$$

kus U on pinge V;

k – elektromagnetilise vooluhulgalugeja konstant;

B – magnetvälja tugevus T;

$\bar{v}$ – keskmine voolukiirus $m \cdot s^{-1}$;

D – toru läbimõõt m.

Vedeliku volumeetriline voolukiirus on määratav järgmiselt [21]:

$$q = U \cdot \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot k \cdot B} \tag{2.8}$$

kus q on vedeliku volumeetriline voolukiirus $m^3 \cdot s^{-1}$.

Vedeliku liikumisest läbi magnetvälja tekkinud pinge registreeritakse kahe elektroodi abil, mis on kokkupuutes vedelikuga. Elektroodidest liigub pinge muundurisse. Muunduris eemaldatakse ebavajalikud signaalid ning võimendatakse mõõdetud väärtust, et muuta tulemused töödeldavaks. Arvesti toimimiseks vajalik magnetväli tekitatakse kahe elektromagneti abil. Vedelikus olevad elektrit juhtivad osakesed on jaotunud ühtlaselt. Kui torustikus vedeliku liikumist ei toimu siis kahe elektroodi vahel pinget ei teki. [21]

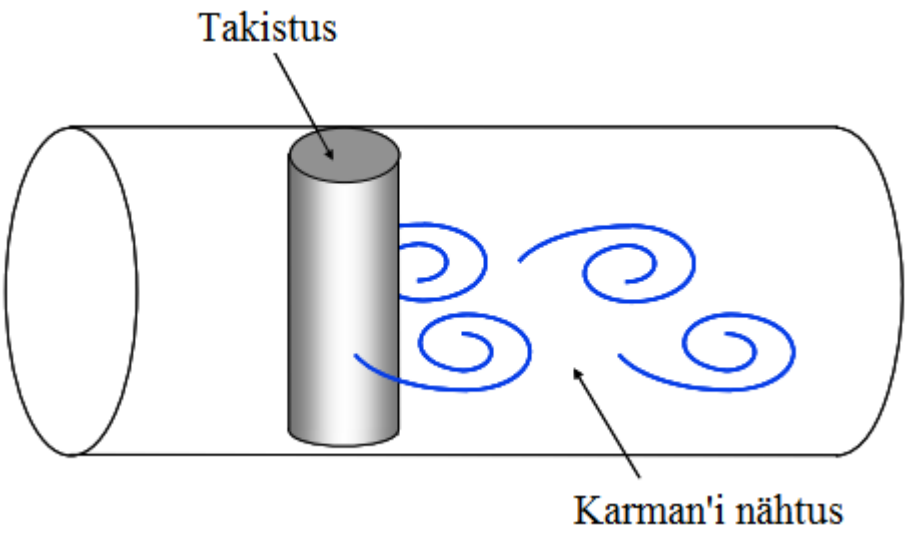
Vedeliku voolamisel avaldab arvesti poolt tekitatud magnetväli vedelikus olevatele osakestele mõju, tänu millele lahutatakse vedelikus olevad positiive ning negatiivse laenguga osakesed. Tulemusena jaotuvad mainitud osakesed vastastikku toru seinade lähedale. Edasi tekib pinge, mis on mõõdetav kahe elektroodi abil. Mida suurem on voolukiirus, seda suurem on vedelikus laetud osakeste vahekaugus üksteisest ning tekkinud pinge. Elektroodid mõõdavad ka ebavajalikke signaale, milleks võivad olla vedelikust tingitud elektrokeemilised nähtused või arvesti välised elektromagnetväljad. Et selliseid signaale filtreerida, tekitatakse magnetväli pulseeruva alalisvoolu abil. Selline lahendus põhjustab pidevat magnetvälja polaarsuse muutumist. Samuti muutub elektroodidel mõõdetud pinge polaarsus vastavalt. [21]

Elektromagnetilised vooluhulgalugejad võimaldavad vedeliku liikumist mõõta mõlemas suunas. Mõõtetäpsus ei ole märgatavalt mõjutatud torustikus olevast rõhust, voolava vedeliku viskoossusest, temperatuurist või vooluhulgast. Tulenevalt arvesti tööpõhimõttest, hõlmab tekitatav magnetväli täielikult toru ristlõiget, kus vedelik voolab. Iga vedelikus leiduv elektrit juhtiv osake lisab elektroodide poolt mõõdetud pingeväärtusele. Tänu sellele mõõdetakse vedeliku voolukarakteristikuid terve toru lõikes. Selline põhimõte võimaldab arvestil paikneda ka torustikus olevate kumeruste lähedal, mis võivad mõjutada teatud määral vedeliku vooluprofiili. Elektromagnetilisel vooluhulgalugejal ei ole liikuvaid osi, mis tähendab, et lugeja ei tekita torustikus vedeliku voolamisel takistusi. Samuti ei teki süsteemis rõhulangusi vedeliku lugejast läbi voolamisel. [21]

Elektromagnetismil põhinevad arvestid võimaldavad kõrgeid mõõtmistäpsuseid. Tootjapoolseid juhiseid järgides, võib mõõteviga olla väiksem kui 0,15% mõõdetud tulemusest. Paljudel seadmetel on tähendatud standardhälvet, mis on madalam kui 0,03% mõõdetud väärtusest. [21]

2.5 Keeristel põhinev vooluhulgalugeja

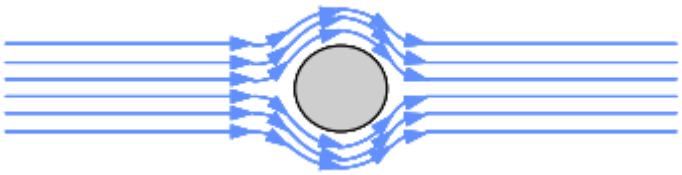
Keeriste tekitamisel põhinevad vooluhulgalugejad toimivad nähtusel, kus vedeliku, gaasi või auru teekonnale on asetatud ette takistus. Kuna liikuv aine ei saa jätkata varem läbitud suunas, eralduvad ainest välised kihid, mis moodustavad keeriseid tekkinud madalrõhualas peale takistust. Keerised liiguvad aine voolusuunas ning moodustavad nn. Karman'i nähtuse. Keerised tekivad vaheldumisi mõlemalt poolt takistust sagedusega, mis on vastava Reynoldsi arvu vahemikus võrdeline keskmise aine vooluhulgaga torustikus. Reynoldsi arv määrab, kas vedeliku voolamisel on tegu laminaarse või turbulentse vooluga. Laminaarset voolamist iseloomustab aineosakeste ühtlane liikumine ning voolukiirus. Turbulentse voolamise korral on tegu sellise aine voolamisega, kus liikumine on korrapäratu ning võib esineda keeriseid. Aine voolab siiski voolusuunas. Joonisel 2.4 on kujutatud torus tekkivaid keeriseid. [16]



Joonis 2.4 Keeriste tekkimine arvestis [16]

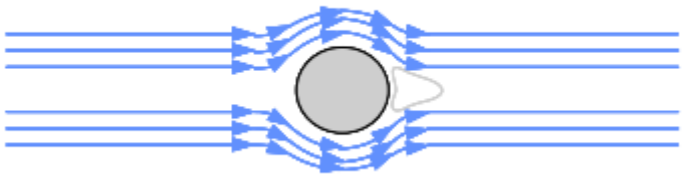
Joonisel 2.4 on vedeliku teekonnale asetatud silindriline takistus. Tulemusena tekib peale silindrit madalrõhuala. Keerised tekivad vaheldumisi kord ühelt poolt, kord teiselt poolt

takistust. Rõhumuutused, mis tulenevad keeriste tekkimistest, liigutavad arvesti andurit, mis fikseerib keeriste tekkimise. [16]



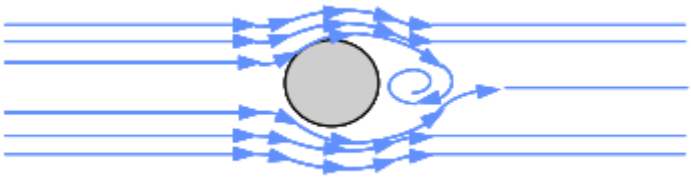
Joonis 2.5 Vedeliku laminaarne voolamine [16]

Joonisel 2.5 on kujutatud olukorda arvestis, kus vedelik voolab aeglase kiirusega. Selliselt voolab vedelik ühtlaselt takistuse ümber tekitamata keeriseid. Samas ei registreeri arvesti andur keeriste tekkimist, kuna keeriseid ei ole tekkinud ning vooluhulka ei ole võimalik määrata. [16]



Joonis 2.6 Madalrõhuala tekkimine [16]

Vooluhulga suurenedes hakkab takistuse taha tekkima madalrõhuala kujutatuna joonisel 2.6.



Joonis 2.7 Turbulentse voolu ning keeriste tekkimine [16]

Joonisel 2.7 on kujutatud olukorda, kus vedeliku vooluhulk suureneb veelgi ning peale takistust hakkab tekkima turbulentne vool, tänu millele tekib madalrõhuala ühes küljes keeris. Peale keerise eemale liikumist tänu vedeliku voolule tekib uus keeris madalrõhuala teisel küljel. Selline protsess jääb korduma, ning keerised tekivad vastavalt kord ühel küljel ning kord teisel küljel. [22]

2.6 Soojusarvestite probleemid

Soojusarvestid on praktikas paljudel juhtudel paigaldatud tootjapoolseid juhiseid eirates. Sellistel juhtudel on leitud tekkinud mõõtmisvigu kuni -40%. Negatiivne väärtus tähendab, et arvesti kuvab tegelikust energiahulgast väiksemat kogust. Suurimad tekkinud mõõtevead on tingitud vääralt paigutatud temperatuurianduritest, mis on ettenähtud paigaldamiseks torude sisemuses olevatesse sisenditesse. Kodustes majapidamistes on aga tähendatud andureid, mis on kinnitatud torude peale, kuvades tegelikust temperatuurist madalamaid väärtuseid. Lisaks vääralt paigaldatud temperatuurianduritele, on seadmete tootjate sõnul torustikus vabad gaasid ning mitte ettenähtud tahked osakesed märgatava mõõtmisvea põhjuseks. Gaasid (tavaliselt õhk) ning tahked osakesed võivad põhjustada probleeme seadmele vastava vooluhulgalugeja töös. Potentsiaalseks probleemiks on soojusarvestid, mis ei ole kalibreeritud töötamaks küttesüsteemis olevas vedelikus. Sellistel juhtudel on nähtud mõõtmisvigu kuni 10%. [3]

Laboratoorsete katsetuste käigus on selgunud, et ultraheli soojusarvestid on eriti tundlikud torustikus olevale õhule. Muudel tööpõhimõtetel toimivatel soojusarvestitel ei ole gaasist tingitud probleemid märkimisväärsed. Enamasti tekib probleem küttesüsteemis olevast õhust ning paigaldamise käigus tehtud vigadest. Näiteks võib olla probleemiks süsteemis olev madal rõhk, mis võib olla tingitud erinevatest teguritest. Üheks põhjuseks võib olla soojusarvesti paigutamine pumba lähedusse. Selliste probleemide lahendamisel ning vältimisel oleks võimalik vähendada soojusarvestite mõõtevigade riske. [3]

3. SOOJUSAKUMULAATOR ENERGIA ARVESTUSSÜSTEEMINA

3.1 Katseseadmed

Alternatiivse soojusenergia arvestussüsteemi katsetamine ja väljatöötamine toimus peamiselt Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi katlalaboris. Mõõtesüsteemi katsetati ka Tartu linnas paiknevas ridaelamus. Joonisel 3.1 on näha Eesti Maaülikooli katlalabor.

Joonis 3.1 Eesti Maaülikooli katlalabor

Katlalaboris oli kasutusel toodetud soojusenergia akumuleerimiseks akumulatsioonimahuti „*AKP-1500*“. Antud mahuti veemaht on 1500 l. Katsetuste jaoks kütmine toimus katlalaboris kahe erineva katla abil. Katel „*LUK-25*“ kütmiseks olid kasutusel halupuud. Joonisel 3.1 on näha teine katsetusteks kasutatud katel „*Pelle*“, mis oli varustatud põletiga „*Atmos*“. Kütusena tarvitas põleti puidugraanulid ehk puidupelletid. Katel „*Pelle*“ oli varustatud

integreeritud kontrolleriga „*Fumis Alpha*“, mis juhtis katla suitsugaaside väljatõmbe ventilaatorit ning võimaldas lülitada põleti töörežiimi otse katlal paikneva juhtpaneeliga. Katelde töö optimeerimiseks kasutati erinevaid „*Testo*“ suitsugaasianalüsaatoreid. Eriti oluliseks osutusid analüsaatorid põleti primaarõhu seadistamisel.

Katlalabori akumulatsioonimahutile oli paigutatud kokku 18 digitaalset temperatuuriandurit. Andurid olid ühendatud lauaarvuti *RS-232* pordiga. Mõõtetulemuste salvestamine toimus operatsioonisüsteemis „*Linux“* kasutades tarkvara „*DigiTemp“*. Mõõtetulemuste salvestamine toimus iga kolmekümne sekundi järel. Katsetusteks kasutatud temperatuuriandurid olid digitaalsed DS1820 andurid, mis võimaldasid temperatuuri mõõta vahemikus -55°C kuni +125°C täpsusega ±0.5°C [22]. Sarnaste andurite kasutamine analoogsetes mõõtesüsteemides on mugav, kuna mitu andurit on võimalik ühendada ühe kaabli abil. See on võimalik, sest igal anduril on olemas oma seerianumber.

Akumulatsioonimahuti otsale on paigutatud kokku 15 temperatuuriandurit, võrdse vahekaugusega 100 mm. Lisaks olid paagi küljele paigutatud kolm temperatuuriandurit vahekaugusega, mis vastas akumulatsioonimahutil olevate temperatuuriandurite sisendite vahekaugusele. 15 andurit olid kasutuses kolme temperatuurianduriga mõõdetud tulemuste võrdlemiseks. Antud mõõtemetoodika eesmärgiks on saada ligilähedasi tulemusi mahuti küljel paiknevate anduritega termomeetri sisendites paiknevate andurite abil. Termomeetri sisendid on kavandatava soojusarvesti kasutamiseks valitud, sest tavaliselt on akumulatsioonimahutitel analoogsed sisendid olemas. Need on varustatud termomeetritega, mida kasutatakse mahuti temperatuuride jälgimiseks.

Tavaliselt on selliseid sisendeid kolm, kuna akumulatsioonimahuti soojenemisel soojeneb kõigepealt mahuti ülemine osa, siis keskmine ning viimasena mahuti alumine osa, ehk mahutis toimub kihistumine. Selline nähtus tekib, kuna katlast tulev soojenenud vedelik suunatakse mahutisse akumulatsioonimahuti ülalosas paikneva toru abil. Lisaks on kõrgemal temperatuuril oleva vee tihedus väiksem jahedama vee tihedusest, mis põhjustab mahutis oleva soojenenud vee tõusmist kõrgemale ning jahedama vee langemist madalamale. Mahutist katlasse ringlusesse saadetav vedelik saadakse mahuti alumisel osal paikneva toru abil. Selliselt on võimalik jälgida mahutisse salvestunud energiat. Joonisel 3.2 on näha Eesti Maaülikooli katlalabori akumulatsioonimahutile paigutatud temperatuuriandurid.

Joonis 3.2 Eesti Maaülikooli katlalaboris akumulatsioonimahutile paigutatud temperatuuriandurid

Katsetuste käigus oli temperatuurianduritega mahuti külg kaetud 50 mm paksuse klaasvillast soojusisolatsiooniga, et vältida mõõdetud tulemuste mõjutamist ruumitemperatuurist. Lisaks oli isolatsiooniga kaetud mahuti pealmine külg.

Peale Eesti Maaülikooli katlalabori, toimusid mõõtesüsteemi katsetused ka Tartu linnas, Võru tänaval paiknevas ridaelamus. Kütmine toimus katel „*SUN-6*“ abil. Kütusena kasutati halupuid. Erinevalt katlalaboris olevast akumulatsioonimahutist, oli seal tegemist silindrilise mahutiga, veemahtuvusega 1000 l. Mahuti oli energia efektiivsemaks salvestamiseks isoleeritud. Isolatsiooni eemaldamata oli võimalik ligi pääseda kolmele termomeetrile mõeldud sisendile. Kuna mahutilt soojusisolatsiooni eemaldamine ei olnud otstarbekas, ei paigaldatud mahutile analoogset süsteemi katlalaborile, kus mahuti küljel paiknevad ühtlase vahekaugusega viisteist temperatuuriandurit.

3.2 Soojussalvesti kasutamine energiaarvestina

Akumulatsioonimahutisse salvestunud energia leidmiseks on vaja kõigepealt teada süsteemi keskmist temperatuuri, mis on leitav järgnevalt:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} \cdot x_1 + \frac{T_2 + T_3}{2} \cdot x_2, \tag{3.1}$$

kus T on süsteemi keskmine temperatuur K;

T_1 – mahuti ülemise anduri temperatuur K;

T_2 – mahuti keskmise anduri temperatuur K;

T_3 – mahuti alumise anduri temperatuur K;

x_1 – esimese ja teise anduri vahemikku jääva vedeliku massi suhe süsteemi vedeliku kogumassi;

x_2 – teise ja kolmanda anduri vahemikku jääva vedeliku massi suhe süsteemi vedeliku kogumassi.

Valemis nähtavad tegurid x_1 ja x_2 on mõeldud kirjeldamaks vastavate andurite vahemikku jääva vedeliku massi suhet süsteemi vedeliku kogumassi. Tegurid on valemis, et muuta mõõdetud tulemusi täpsemaks. Selliselt sobib mõõtesüsteem kasutamiseks akumulatsioonimahutitel, millel ei ole temperatuuriandurite sisendid jaotatud mahuti seinal ühtlaselt.

Lisaks tuleb vedeliku massi arvestades võtta arvesse ka torustikus ning katlas oleva vedeliku mass, sest enamasti moodustab see süsteemi kogumahust märgatava osa. Kuna katlas ja torustikus oleval vedelikul on üldiselt sarnane temperatuur akumulatsioonimahutisse saabuva vedelikuga, tuleks torustiku ja katlas oleva vee maht arvestada kui esimese ja teise anduri vahemikku jääva vedelikuna.

Mahutisse salvestunud energia on leitav järgmiselt:

$$E_1 = \Delta T \cdot c \cdot m, \tag{3.2}$$

kus E_1 on salvestunud energia kJ;

ΔT – süsteemi temperatuurimuutus K;

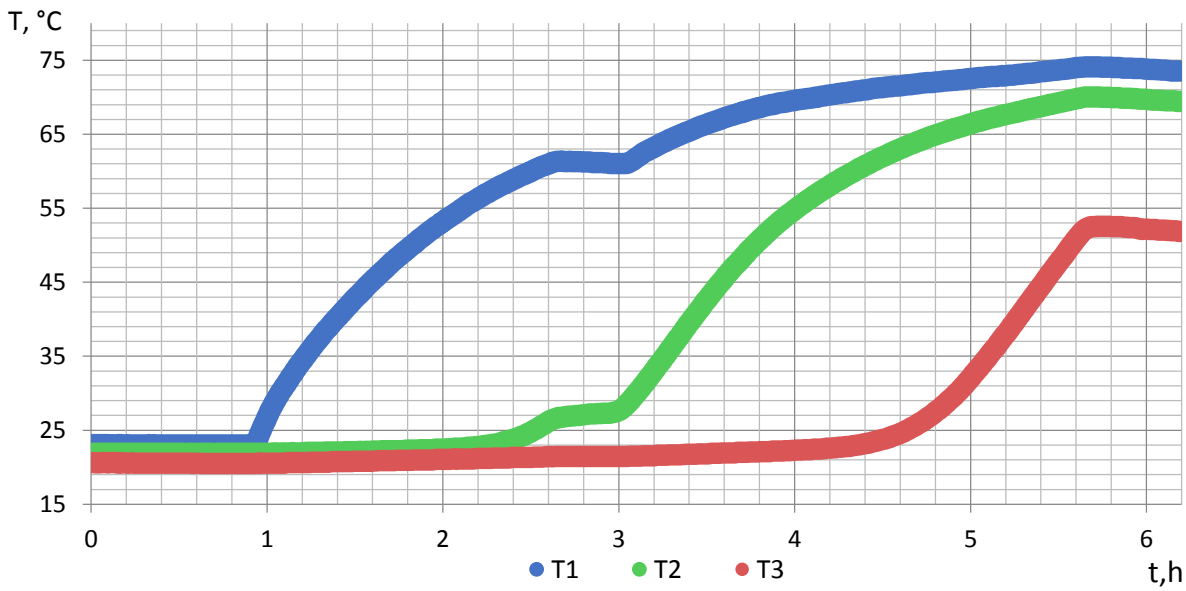
c – soojustkandva vedeliku erisoojus $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

m – soojustkandva vedeliku mass kg.

Tulenevalt kasutatud kütusest, on võimalik leida katla otsene kasutegur, ehk suurus mis iseloomustab, kui palju kasulikku energiat saadi vastava koguse kütuse põletamisel. Puidugraanulite puhul võib kütuse energiasisaldus olla tootja poolt antud. Halupuude energiasisaldus tuleks määrata, lähtuvalt kütuse niiskusest.

3.3 Akumulatsioonimahuti temperatuurid

Joonisel 3.3 on näha 14. märtsil 2016 toimunud akumulatsioonimahuti temperatuuri muutus kütmise käigus. Kütmine toimus Eesti Maaülikooli katlalaboris, katlaga „Pelle“, millele oli paigaldatud põleti „Atmos“. Katlapäeviku väljavõte kütmisest on näha lisas A.



Joonis 3.3 Katlalabori akumulatsioonimahuti temperatuuri muutus kütmisel

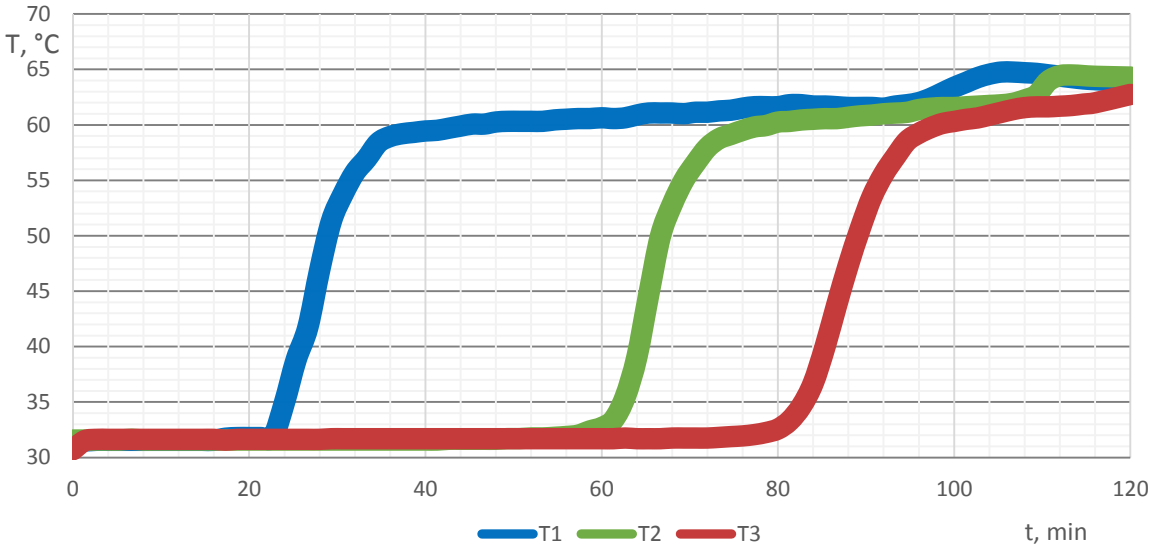
Joonisel 3.3 on kujutatud kolme termomeetrisisendisse paigutatud kolme digitaalse temperatuurianduri väärtuste muutust ajas. Andmetöötlus on teostatud tarkvara „*MS Excel*“ abil. Andur tähisega T1 on mahutile paigutatud kõige ülemine andur. Tähis T2 kujutab mahuti keskele paigutatud andurit. T3 tähistab mahuti alumist temperatuuriandurit. Joonisel on näha, et mahuti hakkas soojenema umbes kümme minutit enne katse esimese tunni lõppu. Eelnev aeg kulus katla süütamisele ning katlas oleva vee soojendamiseks temperatuurini, mille juures avanes termoklapp ning vesi hakkas ringlema läbi akumulatsioonimahuti. Antud juhul oli tegemist mehaanilise termostaadiga, mis avanes umbes 72 °C juures. Termoklapp ei avanenud täielikult, vaid hoidis konstantset väljundtemperatuuri.

Joonisel on näha kütmise käigus mahutis toimuv kihistumine. Kõigepealt soojeneb mahuti ülalosa ning järk-järgult soojenevad alumised kihid. Selline nähtus tekib, sest katlast tulnud soe vesi lisatakse mahutisse ülalt ning katlasse taas ringlusesse minev vedelik saadakse mahuti alumises osas paikneva toru kaudu. Lisaks on soojema vee tihedus väiksem jahedama vee tihedusest, mis tingib soojema vee tõusmise mahutis kõrgemale. Jaheda veega toimub vastupidine protsess. Enne katse kolmanda tunni lõppu on näha lühiajaline temperatuuritõusu peatumine. See oli tingitud põleti kalibreerimisest, põleti võimsuse tõstmiseks. Kolmandal anduril ei ole samal ajal muutust märgata, põhjusel, et soojenenud vesi ei olnud selleks ajaks jõudnud mahuti alumisse otsa. Katse kestis umbes viis tundi ja 30 minutit, peale mida on näha mahuti jahtumine.

Võru tänava ridaelamus tehtud esimesel katlakatsetusel kasutati katlas kütusena kokku umbes 16 kg halupuitu. Katset iseloomustasid pidevad koldeukse avamised segamiseks.

Katla tööd iseloomustavad mõlema katse puhul kolm akumulatsioonimahutile paigaldatud temperatuuriandurit, mille abil tehti mõõtmisi iga minuti järel. Katlapäeviku väljavõte esimesest kütmisest on näha lisas B ning väljavõte teisest kütmisest lisas C.

Joonisel 3.4 on kolme anduriga mõõdetud akumulatsioonimahuti temperatuurid.

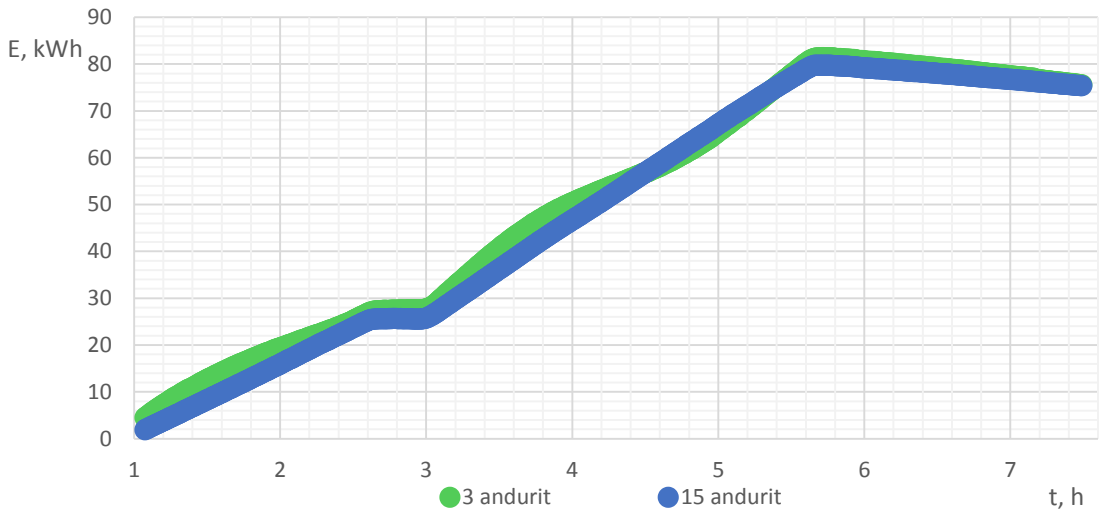


Joonis 3.4 Võru tänava akumulatsioonimahuti temperatuuri muutus kütmisel

Sarnaselt katlalabori katsetustele on näha mahutis kihistumist. Temperatuurid tõusid mahutis märgatavalt kiiremini võrreldes joonisel 3.3 kujutatud temperatuuridega. Kiirem temperatuuride tõus oli põhjustatud mahuti väiksemast mahust võrreldes katlalaboris paikneva akumulatsioonimahutiga. Katlad olid sarnase võimsusega, umbes 20 kW.

3.4 Akumulatsioonimahutisse salvestunud soojusenergia

Joonisel 3.5 on kujutatud kütmise käigus Eesti Maaülikooli katlalaboris olevasse mahutisse salvestunud energiat.



Joonis 3.5 Akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutus

Joonisel 3.5 on näha katse käigus mahutisse salvestunud energia. Antud joonis on saadud, kasutades eelnevalt mainitud valemeid 3.1 ning 3.2. Sarnaselt joonisele 3.3 on näha põleti kalibreerimiseks tehtud kütmise lõpetamine enne katse kolmanda tunni algust. Samuti on näha enne katse kuuendat tundi algav energia vähenemine, mis tähendab, et akumulatsioonimahuti temperatuur langes, andes energiat ruumi, kus mahuti paiknes. Võrreldes kahel erineval meetodil leitud tulemusi, on näha, et tulemused ei lange alati kokku. Erinevused esinevad kütmisel, kus kolme anduri abil mõõdetud tulemus osutub 15-ne anduri abil mõõdetud tulemusest suuremaks. Võrreldes kütmise käigus mõõdetud tulemustega, langevad jahtumisel mõõdetud tulemused kokku paremini.

Et täpsustada kolme anduri abil leitud tulemust võrreldes 15-ne anduri abil mõõdetud suurustega, leiti nende vaheline lineaarne seos.

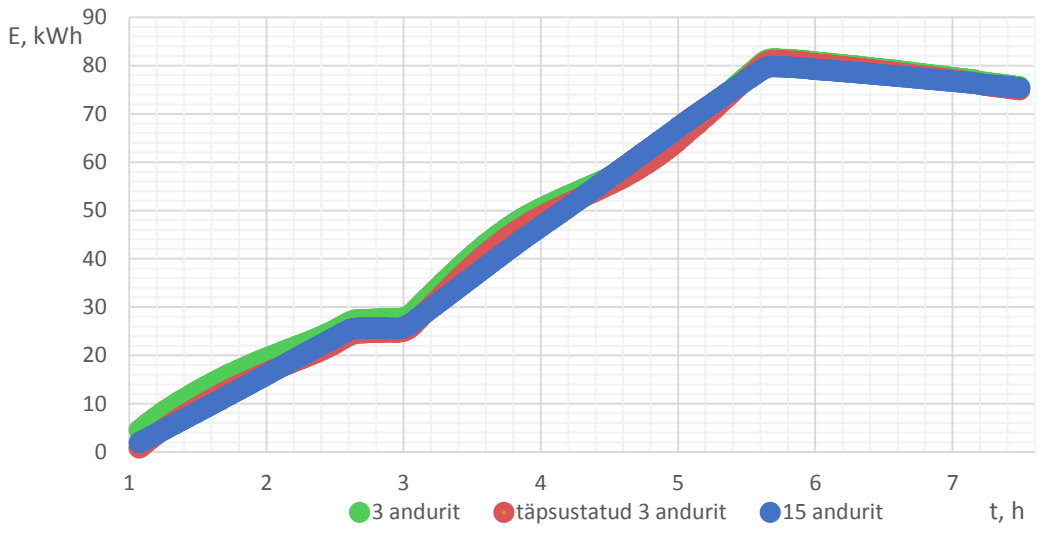
$$E = 1{,}0437 \cdot E_1 - 3{,}895, \tag{3.3}$$

kus E on kolme digitaalse temperatuurianduri abil leitud täpsustatud salvestunud energia kJ;

E_1 – kolme digitaalse temperatuurianduri abil leitud salvestunud energia kJ.

Leitud seose determinatsioonikordajaks on 0,9975. Joonisel 3.6 on näha akumulatsioonimahutisse salvestunud energia. Tegemist on eelnevalt kirjeldatud katsega,

kuid joonisel on lisaks näha kolme temperatuurianduri abil mõõdetud modifitseeritud tulemus.

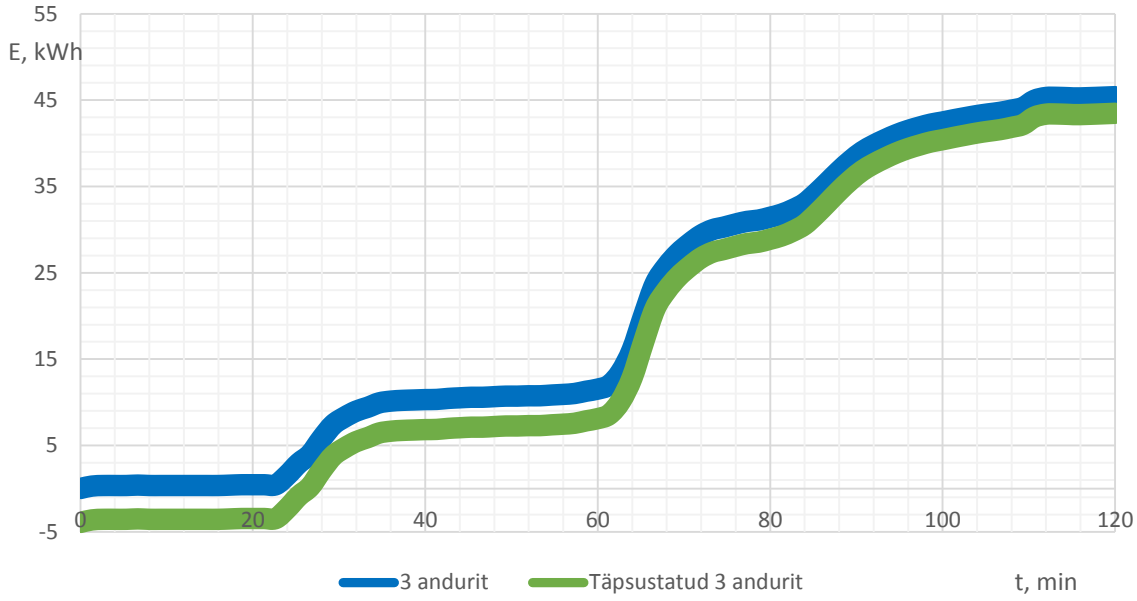


Joonis 3.6 Akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutus

Võrreldes jooniseid 3.5 ja 3.6 on näha, et kasutades leitud seost, muutub kolme temperatuurianduri abil leitud tulemus enamasti sarnasemaks 15-ne anduri abil mõõdetud tulemusele. Märkimisväärselt paranesid katse esimese kahe tunni jooksul mõõdetud tulemused. Võrdlemisi suur mõõteerinevus katse alguses võis olla tingitud sellest, et akumulatsioonimahuti keskel olev veekiht ei olnud veel soojenenud ning oli seega algtemperatuuril, mis tähendas, et kaks kolmest temperatuuriandurist mõõtsid samuti enne kütmise algust mahutis olnud temperatuuri.

Katseandmetest on näha, et võrrandi 3.3 abil leitud salvestunud energia on kasutatav hetkest, kui 15-ne anduri abil leitud salvestunud energia väärtus on vähemalt 4 kWh. Enne seda, on võrrandi 3.3 abil leitud tulemused kas negatiivsed, või märkimisväärselt erinevad 15-ne anduri abil mõõdetud tulemustest. Võrrandi 3.3 ning 15-ne anduri abil mõõdetud tulemuste standardhälve on 1,53 kWh ning lineaarne korrelatsioonikordaja 0,9987. 15-ne anduri abil mõõdetud tulemuse ning kolme anduri abil mõõdetud tulemuse standardhälve on 2,33 kWh ning lineaarne korrelatsioonikordaja 0,9980.

Joonisel 3.7 on kujutatud Tartu linnas, Võru tänava ridaelamus akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutus kütmise käigus.

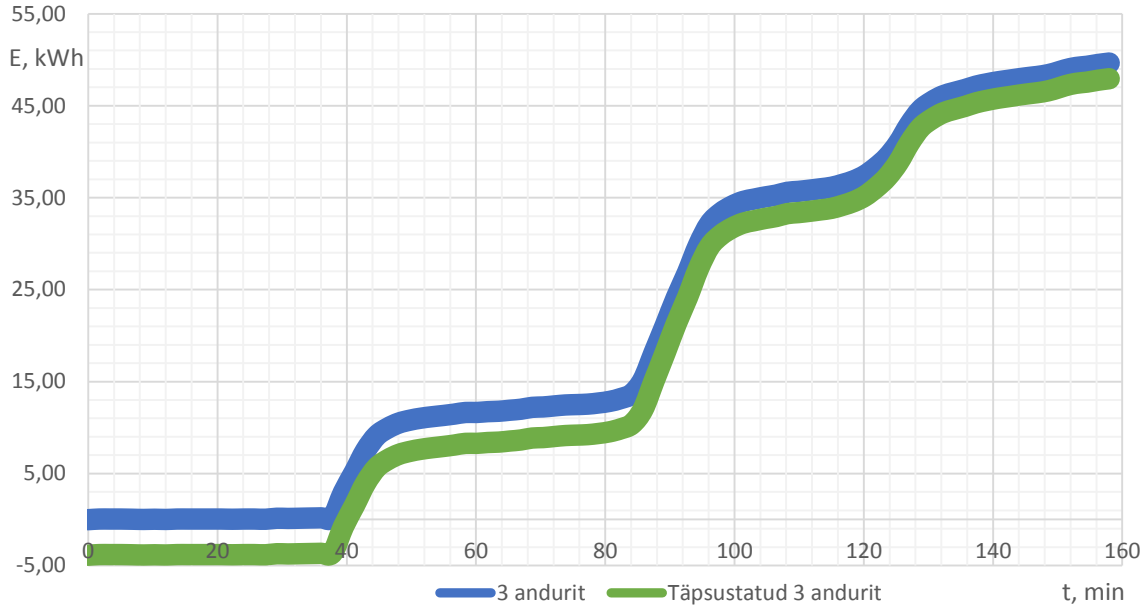


Joonis 3.7 Esimesel katsel akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutus

Võrreldes katlalaboris tehtud katsetustega, on joonisel 3.7 kujutatud energia muutus märgatavalt vähem lineaarsem. Kuigi katla töö oli muutuva võimsusega, mis oli tingitud koldeukse avamisest, kütuse segamisest ning kütuse lisamisest, ei olnud katlas põlemine praktiliselt peatunud, nagu võib näha joonisel 3.7 ajavahemikus 30 – 60 min. Joonisele on lisatud ka võrrandiga 3.3 täpsustatud mõõtetulemus, mis energia salvestumist lineaarsemaks ei muutnud. Ajavahemikus 0 – 25 min. on näha võrrandit 3.3 kasutades tekkiv probleem, kus piisava akumulatsioonimahutisse salvestunud energiata annab võrrand negatiivseid salvestunud energia väärtuseid. Selles ajavahemikus toimus katlas ning torustikus oleva vee soojenemine temperatuurini, mille juures termoklapp avanes ning soojenenud vesi hakkas läbi akumulatsioonimahuti ringlema.

Teisel katsel ei toimunud nii tihedat kolde avamist ning segamist, võrreldes esimese katsega. Prooviti kasutada ainult keskmise suurusega halgusid. Kokku sai ära põletatud 19 kg puitu, kuid umbes 0,5 kg puitu jäi veel koldesse, kui katse lõpetati. Kütust lisati iga 30 minuti järel. Katse lõppedes, kui enam kütust ei lisatud, toimusid ka mõningased segamised.

Joonisel 3.8 on kujutatud teisel katsel akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutust.



Joonis 3.8 Teisel katsel akumulatsioonimahutisse salvestunud energia muutus

Joonisel 3.8 on näha, et katlakütmine ühtlaselt kütust koldesse lisades ning segamist võimaluse korral vältides energia salvestumist akumulatsioonimahutisse lineaarsemaks ei muutnud. Seega antud mahuti korral selline mõõtemetoodika vähemalt kütmise käigus vaadeldes ei toimi. Kui mahuti on kütmise lõppedes ühtlaselt soojenenud sobib antud lahendus süsteemi parameetrite hindamiseks.

Katla keskmine väljundvõimsus vaadeldava kütmisperioodi käigus on leitav järgmiselt:

$$P_v = \frac{E_p}{t_p}, \tag{3.4}$$

kus P_v on katla keskmine väljundvõimsus kW;

E_p – vaadeldava perioodi jooksul salvestunud energia kWh;

t_p – vaadeldava perioodi kestus h.

Katla kasutegur on leitav võrreldes katlasse sisestatud kütuse küttevääртust ning põlemise tulemusena salvestunud energiat:

$$\eta_k = \frac{E}{Q_p}, \tag{3.5}$$

kus η_k on katla kasutegur;

E – akumulatsioonimahutisse salvestunud energia kWh;

Q_p – Põletatud puidu energiasisaldus.

Tabelis 3.1 on näha esimese katse tulemused:

Tabel 3.1 Esimese katse tulemused

Salvestunud energiat kokku	45,39	kWh
Salvestunud energia võimsuse arvutamise perioodil	43,79	kWh
Vaadeldud perioodi kestus	2,08	h
Katla keskmine võimsus	21,05	kW
Puidu kütteväärtus	4,20	$kWh \cdot kg^{-1}$
Põletatud puidu kogus	16	kg
Kogu kütuse energiasisaldus	67,13	kWh
Katla kasutegur	0,68	

Tabelis 3.2 on näha teise katse tulemused:

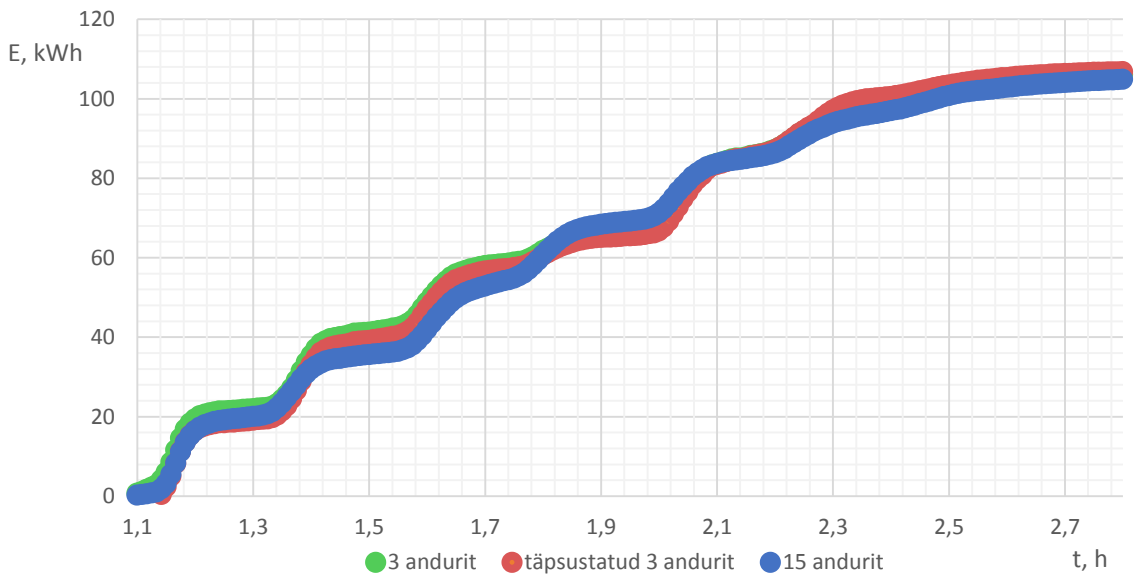
Tabel 3.2 Teise katse tulemused

Salvestunud energiat kokku	49,65	kWh
Salvestunud energia võimsuse arvutamise perioodil	47,14	kWh
Vaadeldud perioodi kestus	2,28	h
Katla keskmine võimsus	20,68	kW
Puidu kütteväärtus	4,20	$kWh \cdot kg^{-1}$
Põletatud puidu kogus	18,5	kg
Kogu kütuse energiasisaldus	77,61	kWh
Katla kasutegur	0,64	

Tabelitest 3.1 ja 3.2 on näha, et katla teisel katsel saavutatud kasutegur oli 4% võrra madalam esimesel katsel leitud kasutegurist.

Katlalaboris katsetuste käigus mõõdetud tulemuste võrdlemiseks kasutati antud energiaarvestiga paralleelselt arendatavat seadet. Võrdlemiseks kasutatav energiaarvesti mõõtis katlast väljuva vee temperatuuri, katlasse siseneva vee temperatuuri ning ringleva vedeliku kogust, mida mõõdeti veearvestite abil. Süsteem oli koostatud nii, et võimalik oleks eraldi mõõta katlalaboris paikneva kahe katla parameetreid. Kui arvestit oli läbinud sätestatud kogus vedelikku (vastavalt ühel katlal 1 liiter ning teisel katlal 10 liitrit), saadeti tööstuskontrollerisse impulss. Olenevalt ajast, mis kulus impulsi tekkimiseks, suutis seade arvutada ning kuvada katla väljundvõimsuse ning toodetud energiahulga [23].

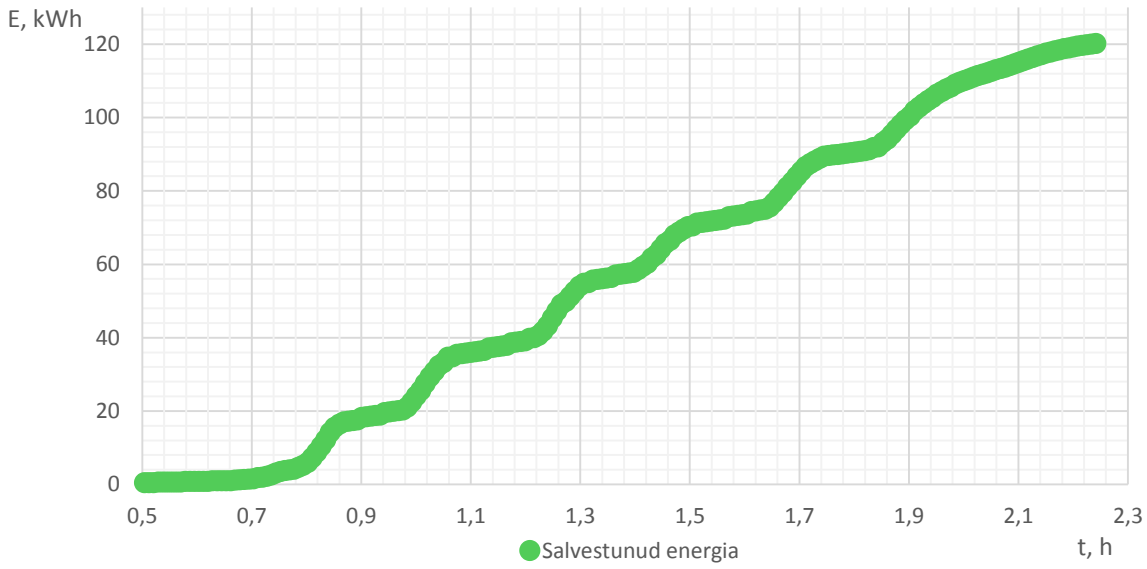
Kütmine toimus kahe katla abil samaaegselt. Kasutusel olid katel „*LUK-50*“ ning katel „*Pelle*“. Joonisel 3.9 on kujutatud akumulatsioonimahutisse salvestunud energiat, mis on leitud mahutil paiknevate temperatuuriandurite abil.



Joonis 3.9 Temperatuuriandurite abil leitud salvestunud energia

Võrreldes joonist 3.6, kus kütmine toimus ainult katel „*Pelle*“ abil, on joonisel 3.9 kujutatud salvestunud energia muutumine vähem lineaarsem. See oli põhjustatud katlale „*LUK-50*“

paigutatud termoklapist, mis vee temperatuuri tõusmisel hakkas järk-järgult avanema ning temperatuuri langedes jällegi sulgus. Sellised lühiajalised termoklapi avanemised ning sulgumised põhjustasid olukorra, kus klapi avatud olekus oli katla väljundvõimsus ligi kolm korda suurem tegelikust püsivast väljundvõimsusest. Joonisel 3.10 on näha tööstuskontrolleri baasil toimiva energiaarvestiga leitud akumulatsioonimahutisse salvestunud energia.



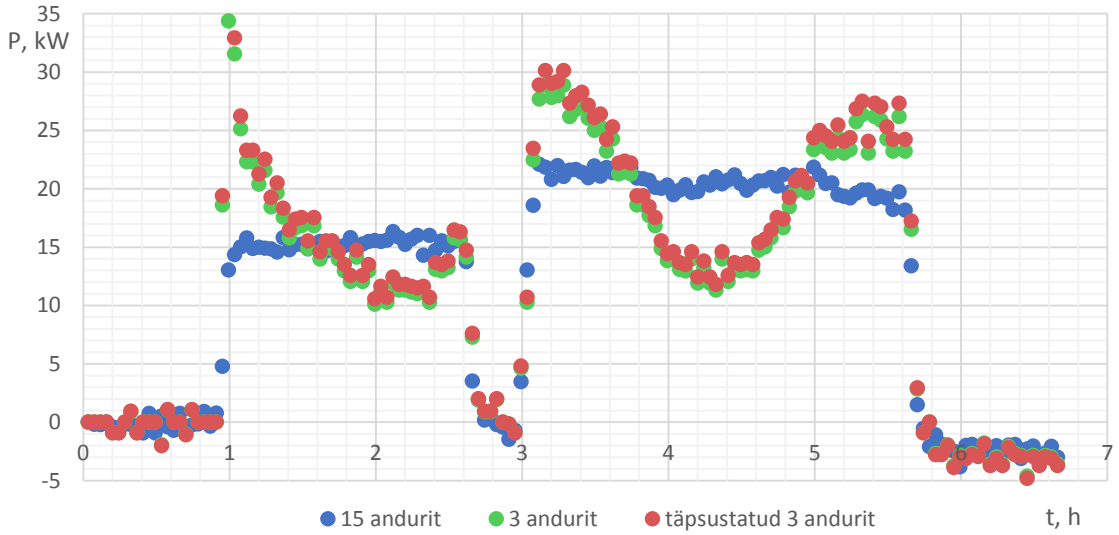
Joonis 3.10 Tööstuskontrolleri baasil toimiva arvesti abil leitud energia

Võrreldes joonist 3.9 ning 3.10 on näha, et katse lõpus leitud salvestunud energia kogused on erinevad. Akumulatsioonimahutil paiknevate andurite abil on tulemuseks umbes 107 kWh ning tööstuskontrolleri abil toimiva arvesti abil on leitud tulemuseks umbes 120 kWh.

Mahutil paiknevate temperatuurianduritega leitud tulemuse täpsustamiseks on võetud lisaks arvesse ka mahutis toimuvat pidevat vedeliku jahtumist kütmise käigus, mis on tingitud eralduvast kiirgus- ning konvektsioonisoojusest. Eralduv soojus leiti korrigeeritud *Wageneri* võrrandi abil ning võrrandi täpsust kontrolliti peale kütmise lõppemist toimuva vedeliku jahtumisega, mis kinnitas leitud tulemust [24]. Kuna enamasti oli kasutatav akumulatsioonimahuti soojusisolatsioonita, eraldus kütmise käigus mahutilt umbes 6 kWh soojusenergiat. Eraldunud soojusenergia on lisatud joonisel 3.9 kujutatud energiahulgale, et parandada mõõdetud tulemuste täpsust.

3.5 Katla väljundvõimsus

Akumulatsioonimahutile paigutatud temperatuuriandurite abil prooviti leida katla väljundvõimsust, mis on leitav vaadeldes salvestunud energia muutust ning selleks kulunud aega. Joonisel 3.11 on kujutatud katla väljundvõimsuse muutus katse käigus.



Joonis 3.11 Katla väljundvõimsuse muutus ajas

Jooniselt 3.11 on näha, et kolme anduri abil mõõdetud tulemused ei ühti enamasti 15-ne temperatuurianduri abil mõõdetud tulemustega kütmise käigus. Kolme anduri abil mõõdetud tulemustes esineb märgatavaid tõususid ning languseid. Samuti ei paranda märkimisväärselt saadud tulemusi võrrandis 3.3 kirjeldatud seose kasutamine. Erandiks on olukorrad, kus akumulatsioonimahutile soojusenergiat juurde ei lisandu.

Enne katse esimest tundi, kus toimus katla käivitamine ning katlas oleva vee soojenemine on kõigil kolmel meetodil saadud tulemused sarnased. Enne katse kolmandat tundi, kus toimus katla ajutine peatamine on samuti näha kolmel meetodil leitud tulemuste sarnasust. Peale katse viiendat tundi, kus katel seisati ning akumulatsioonimahuti hakkas jahtuma ühtisid samuti tulemused. Olenemata eelnevalt mainitud sarnasustest mõõtetulemustes võib siiski väita, et kolm temperatuuriandurit akumulatsioonimahutil ei ole sobivad katla hetkeliste väljundvõimsuste kirjeldamiseks.

3.6 Järeldused

Uuritud energiaarvesti vajaks täiendavaid võrdluseid kalibreeritud soojusarvestiga. Töös võrdluseks kasutatud tööstuskontrolleri baasil toimiva energiaarvesti abil leitud tulemus erines temperatuurianduritega leitud tulemusest umbes 11%. Muude soojusarvestitega võrdlemiseks katseid ei teostatud. Süsteemi katsetades esines olukordi, kus mõõdetud tulemused ei olnud ühtivad tegeliku olukorraga. Silindrilise akumulatsioonimahuti puhul oli näha katla püsiva töö korral järskusid salvestunud energia tõususid ning perioode, kus energiat mahutisse ei salvestunud. Selline nähtus oli ilmselt tingitud kolme mahutile paigutatud temperatuurianduri vahelisest kaugusest. Katlalaboris oleva kandilise mahuti puhul selliseid probleeme ei esinenud, kusjuures andurite vahelised kaugused olid ligilähedased silindrilisel mahutil olevate anduritega, kuid erinesid akumulatsioonimahutite mahtuvused (1000 liitrit ning 1500 liitrit).

Et sellist süsteemi kasutada olukorras, kus kütmise jooksul toimub ka pidev tarbimine, on vaja tarbiva süsteemi soojusenergeetilist mudelit. Näitena võib tuua olukorra, kus katel töötab pideva võimsusega 20 kW ning hoone tarbib soojusenergiat võimsusega 15 kW. Sellisel juhul kuvaks energiaarvesti katla väljundvõimsuseks 5 kW, kuna mahutisse salvestub soojusenergiat võimsusega 5 kW ning ülejäänud toodetud 15 kW tarbitakse hoone poolt. Modelleerides hoone soojuskaod vastavalt välistemperatuurile oleks sellist olukorda võimalik vältida.

KOKKUVÕTE

Energiaarvesti katsetamiseks oli Maaülikooli katlalaboris paiknevale akumulatsioonimahutile paigutatud kokku 18 digitaalset temperatuuriandurit, kusjuures 15 andurit olid kasutusel kolme anduri abil leitud tulemuste võrdlemiseks. Kasutades andureid katla kütmisel salvestunud energia iseloomustamiseks esines erinevusi tulemustes, mis olid leitud mainitud kahel meetodil. Et muuta kolme anduri abil mõõdetud tulemusi sarnasemaks 15-ne anduri abil mõõdetud tulemustega, leiti nende vahel lineaarne seos.

Katsetulemustest oli näha, et lineaarse seose abil leitud võrrandit kasutades muutuvad tulemused soovitult sarnasemaks 15-ne anduri abil mõõdetud tulemusi, kuid seose kasutamine eeldab, et akumulatsioonimahutisse on salvestunud juba eelnevalt soojusenergiat. Katlalaboris kasutataval mahutil oli selleks energia väärtuseks umbes neli kWh. Enne mainitud väärtust, on lineaarse seose abil leitud võrrandit kasutades salvestunud energia väärtused kas negatiivsed või erinevad märgatavalt 15-ne anduri abil mõõdetud tulemustest. Kolme anduri ning 15-ne anduri abil mõõdetud tulemuste standardhälve on 2,33 kWh ning lineaarne korrelatsioonikordaja on 0,9980. Vastavalt kasutades kolme anduri abil leitud tulemuste täpsustamiseks leitud võrrandit on 15-ne anduri ning täpsustatud kolme anduri abil leitud tulemuste standardhälve 1,53 kWh ning lineaarne korrelatsioonikordaja 0,9987.

Kasutades energiaarvestit katla väljundvõimsuse iseloomustamiseks selgus, et kolme anduri abil mõõdetud tulemused ei ühti kütmise käigus 15-ne anduri abil mõõdetud tulemustega. Kui 15-ne anduri abil mõõdetud katla väljundvõimsus oli enamasti ühtlane ning lineaarne siis vastupidiselt oli kolme anduri abil mõõdetud tulemuses näha märgatavaid tõususid ning languseid. Seega võib öelda, et selline energiaarvesti ei sobi katla väljundvõimsuse iseloomustamiseks.

Võrreldes akumulatsioonimahutile paigutatud temperatuuriandurite abil leitud salvestunud energia väärtuseid katlalaboris paralleelselt arendatava tööstuskontrolleril põhineva arvestiga selgus, et tulemused erinevad umbes 11%. Seega vajaks temperatuuriandurite abil toimiv energiaarvesti täiendavaid võrdluseid kalibreeritud seadmetega. Lisaks Eesti

Maaülikoolis paiknevale akumulatsioonimahutile katsetati energiaarvestit ka teise, silindrilise akumulatsioonimahutiga. Teostatud kahel katsetusel ei olnud võimalik soovitud tulemusi saavutada. Olenemata katla üldiselt stabiilsest tööst, esines leitud salvestunud energia väärtustes järske tõususid ning olukordi, kus nähtavalt energiat mahutisse ei salvestunud.

Et sellist süsteemi kasutada olukorras, kus kütmise käigus toimub ka pidev tarbimine, on vaja tarbiva süsteemi soojusenergeetilist mudelit.

KIRJANDUS

1. *Introduction to home heating systems. Prestigehomes.* Kättesaadav: http://www.prestigehomes.ca/resources/Green_Energy_Efficiency/Introduction%20To%20Home%20Heating%20Systems-.pdf (21.03.2016)

2. L. F. Cabeza, I. Martorell, L. Miro, A. I. Fernandez, C. Barreneche. *Introduction to thermal energy storage (TES) systems.* – Hispaania : Universitat de Lleida, Universitat de Barcelona. – 28 lk.

3. *An Investigation into low Errors Final Report. Aecom.* Kättesaadav: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/375976/An_Investigation_into_Heat_Meter_Measurement_Errors_Final_Report_AECOM.pdf (30.03.2016)

4. Angelstok, F. Küttesüsteemid. – Tallinn : Sisekaitseakadeemia, 2009. – 29 lk.

5. Visk, U. Soojus. – Tartu : Tartu Ülikool, 2008. – 30 lk. Kättesaadav: http://www.teaduskool.ut.ee/sites/default/files/teaduskool/oppetoo/fys_soojus.pdf (21.03.2016)

6. A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja, I. Drovtar. Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad. – Tallinn : Tallinna tehnikaülikool, 2015. – 183 lk.

7. A. Rosin, S. Link, I. Drovtar. Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele Osa II Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad. – Tallinn : Tallinna tehnikaülikool, 2013. – 58 lk.

8. F. Bruno, M. Belusko, M. Liu, N.H.S. Tay. *Using solid-liquid phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems.* – Austraalia : *University of South Australia.* – 45 lk.

9. Zakir Khan, Zulfiqar Khan, A. Ghafoor. *A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. Bournemouth University, National University of Sciences and Technology Pakistan, 2015.* – 27 lk.

10. H. Fauzi, H. S. C. Metselaar, T. M. I. Mahlia, M. Silakhori. *Sodium laurate enhancements the thermal properties and thermal conductivity of eutectic fatty acid as phase change material (PCM). Center of Advanced Material, Department of Mechanical Engineering, University Malaya, Malaysia Department of Mechanical Engineering, University Tenaga Nasional, Selangor, Malaysia Department of Chemical Engineering, Syiah Kuala University,* 2013. – 5 lk.

11. M. Kenisarin, K. Mahkamov. *Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs*. – Suurbritannia *: Department of Mechanical and Construction Engineering, Northumbria University.* – 32 lk.

12. A. H. Abedin, M. A. Rosen. *A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems.* – Kanada : *Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Ontario.* – 5 lk.

13. Küte ja ventilatsioon õppematerjalid. Tallinna Tehnikaülikool. Kättesaadav: https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/12._Polemine.pdf (27.03.2016)

14 Biarnes M., Freed B., Esteves J. *Combustion. E Instruments International LLC.* Kättesaadav: http://www.e-inst.com/docs/Combustion-Booklet-2013.pdf (27.03.2016)

15. *Turbine Flow Meters. Industrial Electronics.* Kättesaadav: http://www.industrial-electronics.com/DAQ/industrial_electronics/input_devices_sensors_transducers_transmitters_measurement/flow_meters/turbine_flow_meter.html (27.04.2016)

16. M. A. Crabtree. *Industrial Flow Measurement. – The University of Huddersfield,* 2009. – 244 lk. Kättesaadav: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/instrumentation/INDUSTRIAL_FLOW_MEASUREMENT.pdf (07.05.2016)

17. Asyiddin, N. *Fluid Flow Measurement.* Kättesaadav: http://piyushpanchal2007.mynetworksolutions.com/images/3._FLOW.pdf (03.05.2016)

18. *North Sea Flow Measurement Workshop. Daniel measurement and control white paper.* Kättesaadav: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Daniel%20Documents/NSFMW-2004-Advanced-USM-Diagnostics-techWpaper.pdf (04.05.2016)

19. J. Lansing. *Principles of operation for ultrasonic gas flow meters.* Kättesaadav: http://asgmt.com/wp-content/uploads/pdf-docs/2003/1/11.pdf (04.05.2016)

20. F. Hofmann. *Fundamentals of Ultrasonic flow measurement for industrial applications.* Kättesaadav: http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Caudal/HB_ULTRASONIC_e_144.pdf (04.05.2016)

21. F. Hofmann. *Principles of Electromagnetic Flow Measurement.* Kättesaadav: http://www.krohnecd.com/pdf/KOG_Liquid/Praxis%20der%20MID%20EN_LR.PDF (06.05.2016)

22. *High Percision 1- Wire Digital Thermometer.Maxim Integrated*. Kättesaadav: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf (02.05.2016)

23. T. Tepponainen. Tööstuskontrolleri baasil katelseadmete õppelabori katlastendidele energiaarvesti koostamine. – Tartu : Eesti Maaülikool, 2016.

24. G. Ebler. *Fachkunde für Hafner, öbvhpt.* – Wien, 2004. – 208 lk.

25. M. Koger. Soojussalvesti energiabilanss. – Tartu : Eesti Maaülikool, 2016.

THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE AS A THERMAL ENERGY METER

Summary

To get an understanding of the thermal energy meter, a total of 18 1-wire type temperature sensors were placed on an accumulation tank in Estonian University of Life Sciences' boiler laboratory. Fifteen of the 18 sensors were used to compare the results gathered from the three sensors. During testing, it was noted that there were differences when comparing results gathered from the previously mentioned two methods. In order to make the results gathered from three sensors more in line with the results gathered from the fifteen results, a linear correlation was formed.

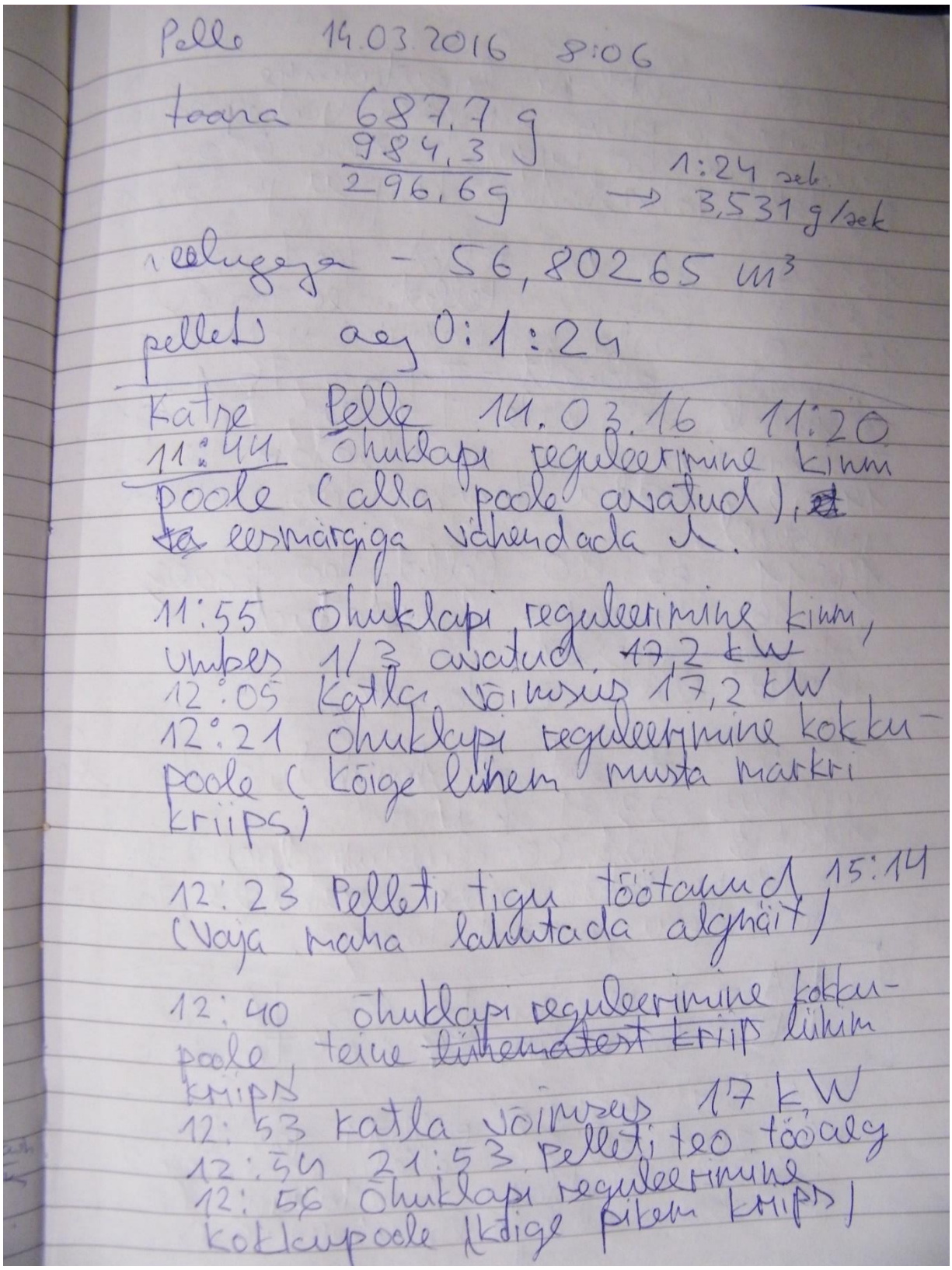
One can see from the results, that using the equation found by forming the previously mentioned linear correlation, the differences between the results gathered using three and fifteen sensors became smaller. However when using the equation, a certain amount of energy must already have been stored in the accumulation tank. The amount of energy needed when using the accumulation tank in the boiler laboratory was about four kWh. Before the mentioned amount of energy stored, the results when using the equation were either negative or noticeably smaller when compared to the results found with the fifteen sensors. The standard deviation between the results from the three sensors and fifteen sensors was 2,33 kWh and the correlation coefficient was 0,9980. When using the equation found with the linear correlation between the two methods the standard deviation was 1,53 kWh and the correlation coefficient was 0,9987.

When trying to use the thermal energy meter to describe the output power of a boiler it was noted that the results gathered from using the three sensors were not in line with the results measured using fifteen sensors. When the results using fifteen sensors were rather linear and no noticeable increases or decreases were seen, then the results from the three sensors were different. There were sizeable increases and decreases in the output power of the boiler, when the results from fifteen sensors were perfectly linear. In conclusion this thermal energy meter can not be used to describe the output power of the boiler accurately.

When comparing the results using the three sensors on the accumulation tank to a different type of a thermal energy meter, which was being developed, it was found that the results differed about 11 %. However the thermal energy meter that was used for the comparison was not calibrated, so further testing is required. In addition to the accumulation tank in Estonian University of Life Sciences' boiler laboratory, tests were carried out with a cylindrical accumulation tank. It was found out that the thermal energy meter could not deliver the desired results. The stored energy described by the thermal energy meter seemed to show that no energy was being stored at all in the tank, and then at the next period a very rapid energy accumulation proceeded. This was not descriptive of the burning process of the boiler. To use this kind of a thermal energy meter in a situation, where energy is being consumed from the accumulation tank, a model is needed of the consuming system. For example when a boiler's output power is 20 kW and a building is consuming 15 kW from the accumulation tank, then the energy meter would show that energy is being added in to the tank at a rate of 5 kW, instead of the actual 20 kW.

LISAD

Lisa A. 14.03.2016 katlapäeviku väljavõte



Pelle 14.03.2016 8:06
taara 687,7 g
984,3 g
296,6 g → 1:24 sek → 3,531 g/sek
reelugeja - 56,80265 m³
pelleti aeg 0:1:24

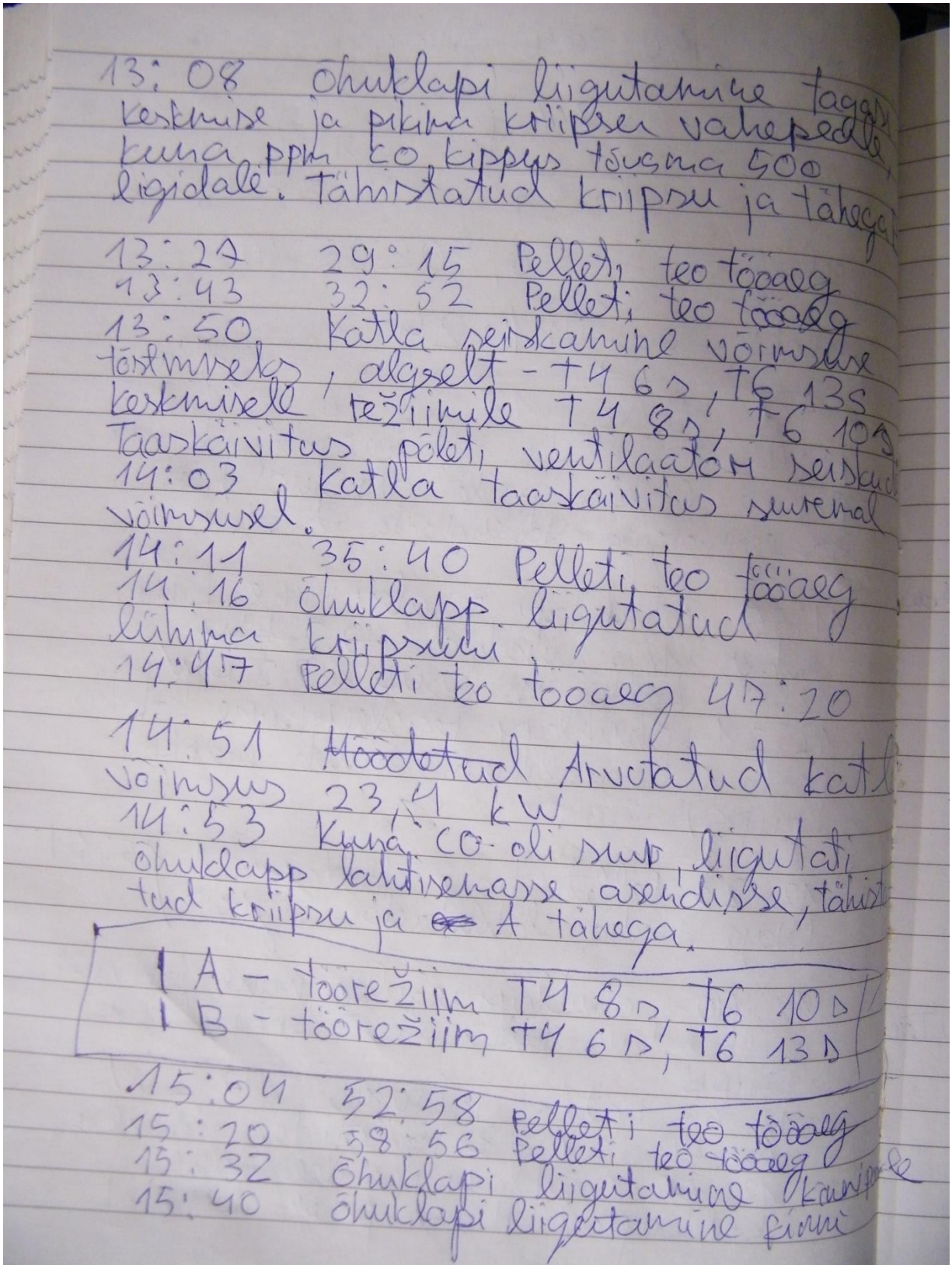
Katse Pelle 14.03.16 11:20
11:44 Ohuklapi reguleerimine kinni poole (alla poole avatud), et ~~ta~~ eesmärgiga vähendada λ.

11:55 Ohuklapi reguleerimine kinni, umbes 1/3 avatud. ~~17,2 kW~~
12:05 Katla võimsus 17,2 kW
12:21 Ohuklapi reguleerimine kokku-poole (kõige lähem musta markri kriips)

12:23 Pelleti tigu töötamud 15:14 (Vaja maha lahutada algnäit)

12:40 Ohuklapi reguleerimine kokku-poole teine ~~lähemalt kriip~~ lähim kriips
12:53 katla võimsus 17 kW
12:54 21:53 Pelleti teo. tööaeg
12:56 Ohuklapi reguleerimine kokkupoole (kõige pikem kriips)

Joonis A.1 Katlapäeviku väljavõte A 14.03.2016



13:08 Ohuklapi liigutamine taaskäivitus keskmise ja pikima kriipsu vahepeale, kuna ppm CO kipsus tõusma 500 ligidale. Tähistatud kriipsu ja tähega

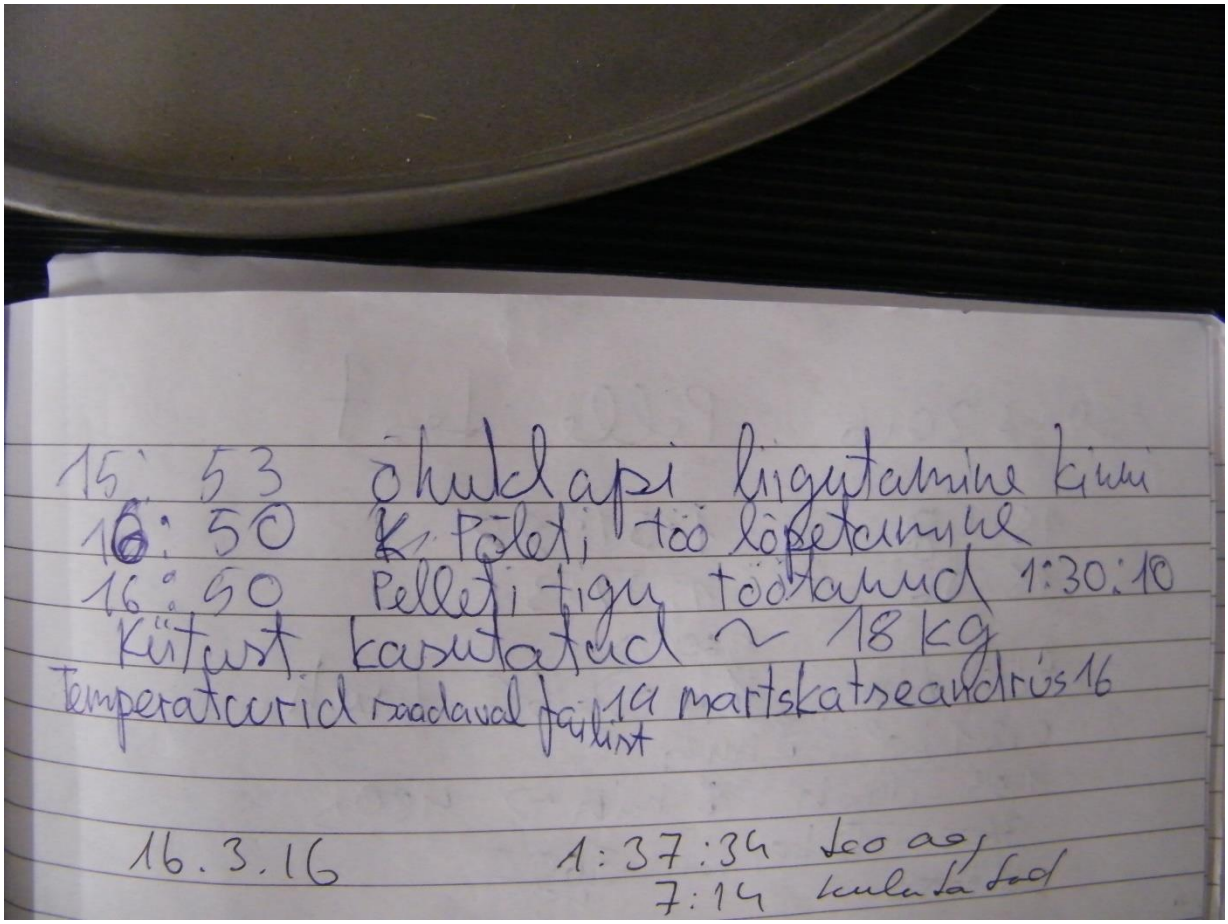
13:24 29:15 Pelleti teo tööaeg
13:43 32:52 Pelleti teo tööaeg
13:50 Katla seiskamine võimsuse tõstmiseks, algselt - T4 6 ▷, T6 13 ▷ keskmisele režiimile T4 8 ▷, T6 10 ▷ Taaskäivitus põleti, ventilaatori seiskudes
14:03 Katla taaskäivitus suurema võimsusel.
14:11 35:40 Pelleti teo tööaeg
14:16 Ohuklapp liigutatud lühima kriipsuni
14:47 Pelleti teo tööaeg 47:20

14:51 ~~Hoodatud~~ Arvutatud katla võimsus 23,4 kW
14:53 Kuna CO oli suur, liigutati ohuklapp lahtisemasse asendisse, tähistatud kriipsu ja A tähega.

A – töörežiim T4 8 ▷, T6 10 ▷
B – töörežiim T4 6 ▷, T6 13 ▷

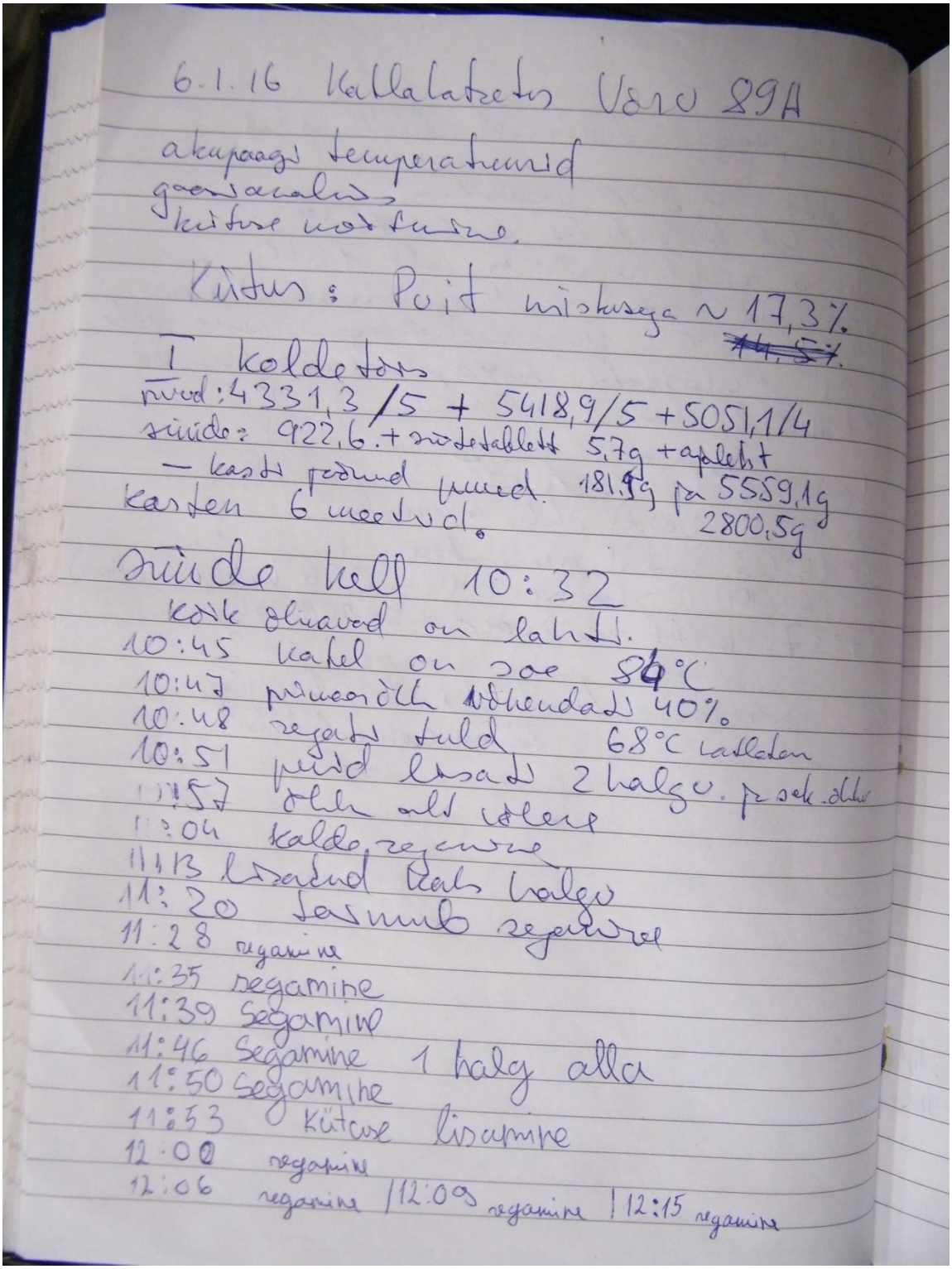
15:04 52:58 Pelleti teo tööaeg
15:20 58:56 Pelleti teo tööaeg
15:32 Ohuklapi liigutamine kaugemale
15:40 Ohuklapi liigutamine fiksi

Joonis A.2 Katlapäeviku väljavõte B 14.03.2016



Joonis A.3 Katlapäeviku väljavõte C 14.03.2016

Lisa B. 06.01.2016 katlapäeviku väljavõte



6.1.16 Kallalaterts Varu 89A

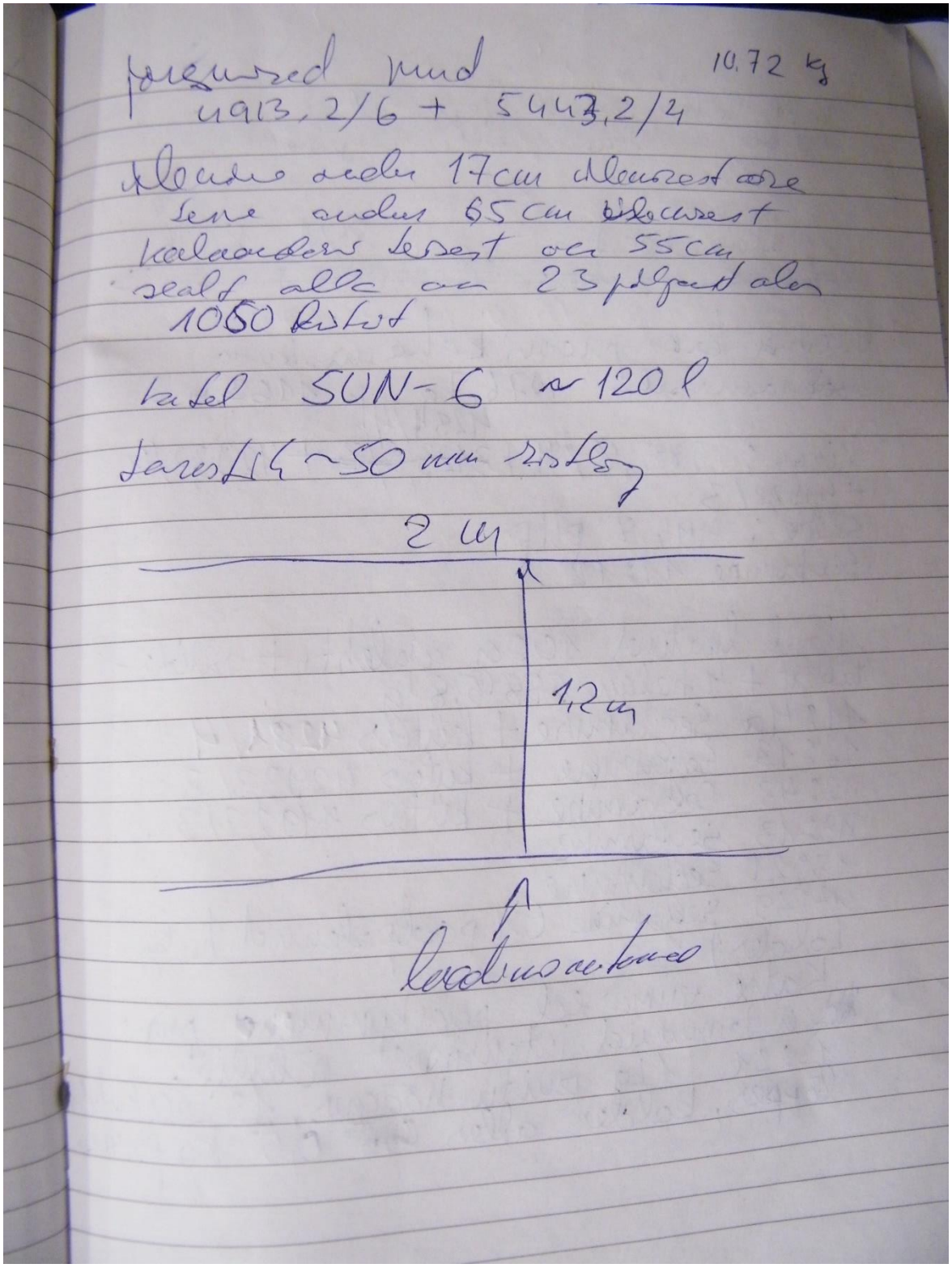
akupaagi temperatuurid
gaasianalüüs,
kütuse mõõtmine.

Kütus: Puit niiskusega ~ 17,3%
~~14,5%~~

I keldetöö
puud: 4331,3/5 + 5418,9/5 + 5051,1/4
süüde: 922,6. + süütetabletid 5,7g + apteeki
— kasti põhjud puud. 181,9g pa 5559,1g
kasten 6 meetrid. 2800,5g

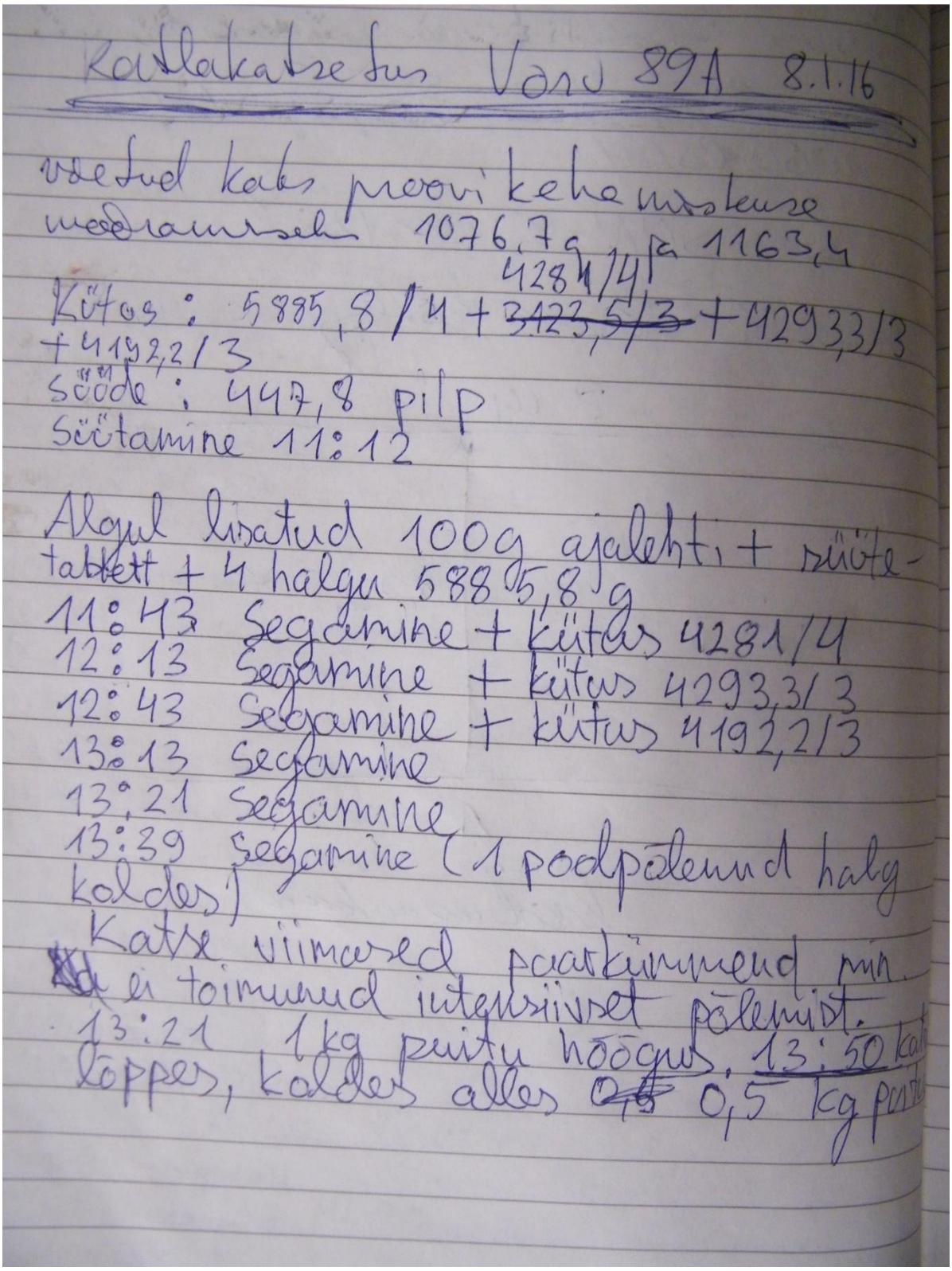
süüde kell 10:32
kõik ohuavad on lahti.
10:45 katel on soe 84°C
10:47 primaarõhk vähendati 40%
10:48 segati tuld 68°C katlaten
10:51 puid lisati 2 halgu. pa sek. õhku
10:57 õhk oli vähene
11:04 keldesegamine
11:13 lisatud kaks halgu
11:20 lisamub segamine
11:28 segamine
11:35 segamine
11:39 segamine
11:46 segamine 1 halg alla
11:50 segamine
11:53 kütuse lisamine
12:00 segamine
12:06 segamine | 12:09 segamine | 12:15 segamine

Joonis B.1 Katlapäeviku väljavõte A 06.01.2016



Joonis B.2 Katlapäeviku väljavõte B 06.01.2016

Lisa C. 08.01.2016 katlapäeviku väljavõte



Katlakatse fus Varu 89A 8.1.16

vsetud kaks proovikehamõõtmise
mõõtmised 1076,7 g, pa 1163,4
4284/4
Kütus: 5885,8/4 + ~~3423,5/3~~ + 4293,3/3
+ 4192,2/3
Sõõde: 447,8 pilp
Süütamine 11:12

Algul lisatud 100g ajalehti + süütetablett + 4 halgu 5885,8 g
11:43 Segamine + kütus 4281/4
12:13 Segamine + kütus 4293,3/3
12:43 Segamine + kütus 4192,2/3
13:13 Segamine
13:21 Segamine
13:39 Segamine (1 poolpõlenud halg koldes)
Katse viimased paarkümmend min. ei toimunud intensiivset põlemist.
13:21 1 kg puitu hõõgus. 13:50 kat
lõppes, koldes alles ~~0,5~~ 0,5 kg puit

Joonis B.1 Katlapäeviku väljavõte 08.01.2016

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Andrus Reier,

(28/07/1992)

annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Soojussalvesti energiaarvestina,

mille juhendajad on Mart Hovi, Külli Hovi,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. 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 _____

allkiri

Tartu, 23.05.2016

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

_____ _____

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev)*