EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Leo Laur

INFRAPUNA-VAAKUMKUIVATI SOOJUSTEHNILINE MUDEL

INFRARED-VACUUM DRYING MODEL

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi, MSc
lektor Külli Hovi, MSc
lektor Uko Bleive, MSc

Tartu 2016

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

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Leo Laur		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Infrapuna-vaakumkuivati soojustehniline mudel			
Lehekülgi: 78	Jooniseid: 25	Tabeleid: 16	Lisasid: 12

Osakond: Energeetika

Uurimisvaldkond: T140 Energeetika, T200 Soojustehnika, rakenduslik termodünaamika

Juhendajad: Mart Hovi, Külli Hovi, Uko Bleive

Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2016

Soojuskuivatamine on oma olemuselt väga energiamahukas tehnoloogiline protsess. Rakendades kõige optimaalsemat kuivatustehnoloogiat lähtudes kuivatatava materjali iseärasustest ja soovitud lõpptoote omadustest saavutatakse märgatav energiasääst. Töö eesmärgiks oli uurida taimsete materjalide infrapuna-vaakumkuivatamise eeliseid teiste teadatuntud kuivatusmeetodite ees ning leida optimaalne kuivatusrežiim õunte infrapuna-vaakumkuivatamisel. Töös on käsitletud arvutus- ja katsemetoodikat. Arvutusmetoodikana on koostatud kiirgus- ja ainelevi seoste põhjal soojusvahetuse mudel SciLab keskkonnas, võimaldades modelleerida kuivatusprotsessi temperatuure ja materjali niiskuse muutumist ajas. Katsemetoodika käigus teostati üheksa eksperimenti rõhul 78,8 kPa, 64,6 kPa ja 52,5 kPa ning kiirguri võimsustel 100 W, 150 W ja 200 W. Töös jõuti järeldustele: mida suurem alarõhk ja kiirgusvõimsus, seda suurem kuivamiskiirus, vaakumi tekitamisega imetakse veeauru kambrist välja ning kuivatamiseks ei sobi püsiva võimsusega infrapunakiiritamine. Polli kuivati parendamine vajab täiendavaid uuringuid. Enne reaalseid katseid tuleks võimalikud variandid läbi proovida simulatsioonikeskkonnas.

Märksõnad: soojuskuivatamine, SciLab, matemaatiline mudel, õunte kuivatamine, kuivatised

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: Leo Laur		Speciality: Energiakasutus	
Title: Infrared-vacuum Drying Model			
Pages: 78	Figures: 25	Tables: 16	Appendixes: 12

Department: Energeetika

Field of research: T140 Energy research, T200 Thermal engineering, applied thermodynamics

Supervisors: Mart Hovi, Külli Hovi, Uko Bleive

Place and date: Tartu 2016

Drying is the most energy intensive process in food industry. Therefore new techniques must be studied and dryers designed to minimize energy consumption. Vacuum-infrared drying method is investicated in this paper, having advantages against convective drying. SciLab software was used to construct mathematical model for calculating the change of moisture content and temperatures in drying chamber. Calculated results were compared with experimental results. Apple slices were dried at pressures 52,5 kPa, 64,6 kPa and 78,8 kPa and with infrared radiation at power levels of 100 W 150 W and 200 W in a laboratory scale infrared-vacuum dryer. The result revealed faster drying with increase of the infrared radiation power and with decrease of air pressure, vacuum ensures the rapid removal of evaporated moisture from the drying chamber and the constant heating is not the best for drying apple slices. The further investications should be made to prevent Polli dryer. Mathematical simulations should be made before real experiments.

Keywords: FIR heater, apple chips, mathematical modeling, SciLab, drying kinetics

SISUKORD

SISSEJUHATUS 8
1. TEMAATIKA ÜLEVAADE 10
1.1. Aiasaaduste kuivatamine 10
1.2. Erinevad puuviljade ja marjade kuivatid 12
1.2.1. Kuivatamine toatemperatuuril atmosfäärirõhul 12
1.2.2. Solaarkuivatid 12
1.2.3. Kambertüüpi konvektiivkuivati 13
1.2.4. Tunnel-tüüpi konvektiivkuivati 14
1.2.5. Kondensatsioonkuivatid 14
1.2.6. Vaakumkuivatid 15
1.2.7. Infrapunakuivatid 16
1.2.8. Mikrolainekuivatid 17
1.2.9. Sublimatsioonkuivatid 18
1.2.10. Infrapuna-vaakumkuivati 19
1.3. Õunte kuivatamine 20
1.4. Õunakrõpsud 21
1.5. Polli aiandusuuringute keskuse kuivati 23
2. METOODIKA 25
2.1. Katsetusmetoodika 25
2.2. Arvutusmetoodika 30
3. KATSETE KÄIK 37
3.1. Esimene katse 37
3.2. Teine katse 40
3.3. Kolmas katse 43
3.4. Neljas katse 45
3.5. Viies katse 46
3.6. Kuues katse 47
3.7. Seitsmes katse 47
3.8. Kaheksas katse 48
3.9. Üheksas katse 49
4. ARUTELU 50
4.1. Kokkuvõte katsetest 50
4.2. Järeldused 51
4.3. Pooltööstusliku infrapuna-vaakumkuivati parendamine 54
KOKKUVÕTE 55
KASUTATUD KIRJANDUS 57
SUMMARY 61
LISAD 63
Lisa A. Infrapunakiirguskuivati mudel SciLab keskkonnas 64
Lisa B. Infrapunakiirguskuivati esimese katse skript 65
Lisa C. Esimese katseseeria mõõdetud temperatuurid 69
Lisa D. Teise katseseeria mõõdetud temperatuurid 70
Lisa E. Kolmanda katseseeria mõõdetud temperatuurid 71
Lisa F. Neljanda katseseeria mõõdetud temperatuurid 72

Lisa G. Viienda katseseeria mõõdetud temperatuurid....73
Lisa H. Kuuenda katseseeria mõõdetud temperatuurid....74
Lisa I. Seitsmenda katseseeria mõõdetud temperatuurid....75
Lisa J. Kaheksanda katseseeria mõõdetud temperatuurid....76
Lisa K. Üheksanda katseseeria mõõdetud temperatuurid....77
LIHTLITSENTS....78

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ASAE – *American Society of Association Executives*

$cos\varphi$ – võimsustegur

$CaCl_2$ – kaltsiumkloriid

C_{aur} – vee aurustumissoojus, kJ/kg

d – määravmõõde, m

F_2 – kiiritatav pind, m^2

FIR – lähi-infrapunakiirgus lainepikkustel 25...1000 µm (ingl. *Far Infrared Radiation*)

g – raskuskiirendus, g = 9,81 m/s^2

Gr – Grashofi arv

H_{12} – vastastikune kiirguspind, m^2

I – elektrivool, A

k – soojusläbikandetegur, $W/(m^2 \cdot K)$

k_{klaas} – soojusläbikandetegur läbi klaasi, $W/(m^2 \cdot K)$

k_{sein} – seina soojusläbikandetegur õhust väliskeskkonda, $W/(m^2 \cdot K)$

$k_{äär}$ – soojusläbikandetegur läbi duralumiiniumist ukseääre, $W/(m^2 \cdot K)$

LAN – kohtvõrk (ingl. *Local Area Network*)

m – niiske materjali mass, kg

m_n – materjalis sisalduva vee mass, kg

NIR – kaug-infrapunakiirgus lainepikkustel 0,7...25 µm (ingl. *Near Infrared Radiation*)

Nu – Nusselti arv

P – võimsus, W

PID – tagasisidestatud juhtimisskeem (ingl. *Proportional Integral Derivative*)

T_1 – kiirguri pinna absoluutne temperatuur, K

T_2 – soojendatava keha absoluutne temperatuur, K

T_p – õhk-piirikihi absoluutne keskmine temperatuur, K

t_1 – kiirguri pinna temperatuur, °C

t_2 – soojendatava keha temperatuur, °C

t_p – õhk piirikihi keskmine temperatuur vaadeldava keha pinnal, °C

t_s – soojusülekande pinna temperatuur, °C

$t_{õ}$ – soojuskandja temperatuur, °C

U – pinge, V

USB – universaalne järjestiksiin (ingl. *Universal Serial Bus*)

VAC – vahelduvpinge (ingl. *Voltage in Alternating Current*)

v_p – soojuskandja kinemaatiline viskoossustegur, m^2/s

W – tahke materjali niiskus niiske materjali massi suhtes, %

W_2 – tahke materjali soovitud niiskus niiske materjali massi suhtes, %

α – soojusülekandetegur, $W/(m^2 \cdot K)$

α_{kiirg} – kiirgusliku soojusülekande soojusülekandetegur, $W/(m^2 \cdot K)$

α_{sise} – soojusülekandetegur kuivati sees, $W/(m^2 \cdot K)$

$\alpha_{välis}$ – soojusülekandetegur kuivati välispinnalt keskkonda, $W/(m^2 \cdot K)$

δ – materjalikihi paksus, m

δ_{DurAl} – duralumiiniumist sisekihi paksus, m

δ_{klaas} – klaasi paksus, m

δ_{Ter} – terasest väliskihi paksus, m

β_p – õhu ruumpaisumistegur, 1/K

Δt – soojusülekande pinna ja soojuskandja temperatuuride vahe, °C

ε_1 – kiirgava keha mustvärvusaste

ε_2 – soojendatava keha mustvärvusaste

ε_t – soojusvahetuses osalevate kehade taandatud mustvärvusaste

λ – materjali soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$

λ_{DurAl} – duralumiiniumi soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$

λ_{klaas} – klaasi soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$

λ_p – kuiva õhu erisoojusjuhtivus, $W/(m \cdot K)$

λ_{Ter} – terase soojusjuhtivustegur, $W/(m \cdot K)$

φ_{21} – keskmine nurktegur

SISSEJUHATUS

Soojuskuivatamine on juba oma olemuselt väga energiamahukas tehnoloogiline protsess. Lähtudes kuivatatava materjali iseärasustest ja soovitud lõpptoote omadustest tuleb rakendada optimaalset kuivatustehnoloogiat, mis tagab märgatava säästu. [1] Antud uurimustöö eesmärgiks oli uurida taimsete materjalide infrapuna-vaakumkuivatamise eeliseid ning leida optimaalne kuivatusrežiim õunte infrapuna-vaakumkuivatamisel.

Uurimustöö sai alguse Polli aiandusuuringute keskuse esindaja Uko Bleive huvist uurida infrapuna-vaakumkuivatust eesmärgiga suurendada Polli väiketööstusliku infrapuna-vaakumkuivati efektiivsust.

Andmaks parimaid soovitusi kuivati efektiivsemaks muutmiseks tuli töö autoril end eelnevalt kurssi viia infrapuna-vaakumkuivatusega kirjanduse abil. Nõuannete andmiseks oli vaja uurida erinevaid aiasaaduste töötlemisviise ning õppida kuivatamise teooriat.

Uurimustöös kasutati arvutus- ja katsemetoodikat. Arvutusmetoodikana koostati infrapuna kiirguskuivati lihtsustatud soojusvahetuse mudel programmis SciLab. Tulemustena on võimalik graafikutel näha suhtelise niiskuse muutust ajas ning kuivatusprotsessi temperatuure. Katsemetoodika käigus koostati infrapuna-vaakumkuivati katseseade, milles toodeti õunaviiludest õunakrõpse (*apple chips*) [2] erinevatel rõhu ja kiirguri võimsuse väärtustel.

Käesoleva uurimustöö eesmärgid ning nende saavutamiseks paika pandud ülesanded on järgmised:

1. Tutvuda enim kasutatavate aiasaaduste kuivatustehnoloogiatega.
   - Uurida kirjandusest olemasolevaid kuivateid ja kuivatamise meetodeid.
   - Uurida mujal tehtud katseliste töötlemiste tulemusi infrapuna-vaakumkuivatuse valdkonnas.
2. Leida parameetrid, mida õunte kuivatamisel on vaja järgida.
   - Leida kirjandusest antud uurimustöö seisukohast olulisemad parameetrid, mida õunte infrapuna-vaakumkuivatamisel järgida.

3. Koostada kiirgus- ja ainelevi matemaatiliste seoste alusel kiirguskuivati soojusvahetuse mudel.
   - Selgitada välja aurumiseks kuluv aeg.
   - Selgitada välja kuivamise temperatuurid.
4. Koostada infrapuna-vaakumkuivati katseseade.
   - Selgitada välja vaakumi mõju õunte kuivatamisel.
   - Selgitada välja infrapunakiirguse mõju õunte kuivatamisel.
   - Selgitada välja infrapunakiirguse ja vaakumi koosmõju õunte kuivatamisel.

Magistritöö ülesandeid ja eesmärke on vaadeldud neljas peatükis, mis jagunevad kolme põhijaotisesse:

- Esimeses osas tutvutakse aiasaaduste kuivatamise teoreetilise poolega ning enim kasutatavate kuivatustehnoloogiatega. Tutvutakse infrapuna-vaakumkuivatamisega ning selles valdkonnas tehtud uurimustöödega.
- Teises osas selgitatakse uurimustöös kasutatud metoodikat.
- Kolmandas osas esitatakse katsetuste käik ja katsetulemused. Samuti esitatakse kolmandas osas arutelu, milles antakse ka soovitused Polli aiandusuuringute keskuse infrapuna-vaakumkuivati efektiivsuse suurendamiseks.

Magistritöö koostaja on tänulik Polli aiandusuuringute keskuse esindajale Uko Bleivele, kelle eestvedamisel algatati teema uurimine, ning saadi õunu katsete teostamiseks.

Töö autor on tänulik Veli Palgele toetavate mõtete eest infrapuna-vaakumkuivati lihtsustatud soojusvahetuse mudeli loomisel SciLab keskkonnas.

Samuti tuleb tänada Arvo Leolat lüpsi- ja jahutusseadmete laborisse lubamise eest.

Eriti tänab töö koostaja juhendajat Mart Hovi teemavaliku, erinevate eksperimentide võimaldamise ja magistritöö koostamisele kaasaaitamise eest.

1. TEMAATIKA ÜLEVAADE

1.1. Aiasaaduste kuivatamine

Kuivatamine on toiming, mille käigus vähendatakse materjali niiskust selle pinnalt ja seesmistest kihtidest. Eemaldatavaks vedelikuks võib olla vesi või mõni muu orgaaniline vedelik. Levinud niiskuse eraldamise meetodid on mehaaniline, füüsikalis-keemiline ja soojuslik kuivatamine. [1, 3]

Mehaaniline niiskuse eraldamine muljumise või tsentrifuugimise teel on ökonoomne, kuid sobib vaid väga niiske materjali eelkuivatamiseks [3]. Seotud niiskuse eraldamine selle meetodiga on enamikul juhtudel praktiliselt võimatu [1].

Füüsikalis-keemiline kuivatamine toimub niiskuse sidumisega hügroskoopsete ainetega nagu keedusool või silikageel. Meetod on rakendatav põhiliselt laborikatsetustes ja väiketööstuses. [1, 3]

Soojuslik kuivatamine põhineb materjalis leiduva liigvee aurustamisel. Kuivatamisel toimub soojuse üleandmine materjalile, soojuse levimine materjalis, niiskuse difundeerimine materjali pinnale ja sealt aurustamine. Seega kuivatamise ajal toimub nii soojus- kui ka massilevi. Liigvee aurustamiseks kuluv soojus manustatakse kas konvektiivselt, konduktiivselt või kiirguslikult. Soojuslik kuivatamine on oma olemuselt üks energiamahukamaid tehnoloogilisi protsesse. [1, 3] Käesolevas töös käsitletakse soojuslikku kuivatamist.

Aia- ja metsasaaduste kuivatamist loetakse üheks vanimaks bioloogiliseks säilitusmeetodiks. Kuivatatud marjad, juurikad ja seemned võimaldasid juba ürginimestel toiduvaeseid perioode üle elada Toiduainete kuivatamine kui säilitusmeetod on enim levinud just soojema kliimaga riikides. Tööstuslikud kuivatid võeti kasutusele rosina ja urjuki vajaduse järsu suurenemisega. [4]

Puuviljade ja marjade kuivatamine põhineb mikroorganismide elutegevuseks vajaliku vee kättesaadavuse piiramisel toidus. Samuti vähenevad viljades sisalduvate ensüümide

aktiivsus ja biokeemilised muutused. Tööstuslik kuivatamine on üks energiamahukamaid toiduainete konserveerimise meetodeid. [5]

Puuviljade ja marjade kvaliteedi tagamiseks tuleb koristamine läbi viia kiiresti ja ühtlases koristusküpsuse faasis [6]. Seega tuuakse enamasti sügisesel koristusperioodil taimsete saaduste töötlemiskeskustesse suurtes kogustes küpseid puu- ja juurvilju. Saadused tuleb kiirelt töödelda valmistoodanguks või suunata säilituskambritesse taimsete materjalide kiire riknemise tõttu. [7] Enamlevinud töötlemisprotsessid aiasaadustest valmistoodangu saamiseks on: 1) mahla valmistamine, 2) mooside või hoidiste valmistamine, 3) kuivatamine, 4) puuviljade hoiustamine jahehoidlates. [8]

Tänapäevased uued ehitusmaterjalid ja tehnoloogiad on aidanud oluliselt parandada puuviljade säilitustingimusi. Paranenud on puuviljade säilivus tänu uute sortide aretamisele, säilitustingimustealastele uuringutele ning kasvuaegsete tegurite agrotehnikaga parandamisele. Tänu paranenud hoiustustingimustele on võimalik aastaringselt tarbida värskeid puuvilju või marju. See aga on vähendanud vajadust küpsete aiasaaduste kiireks töötlemiseks mahlaks, moosiks või kuivatatud saadusteks. Puuviljade säilitamisel muudetud gaasilises keskkonnas on levinud meetodid [9]:

- modifitseeritud atmosfääriga jahehoidlad;
- kontrollitud atmosfääriga jahehoidlad;
- ülimadala hapnikusisaldusega jahehoidlad;
- dünaamilise kontrollitud atmosfääriga jahehoidlad.

Pärast saagi koristamist aeglustub viljades elutegevus ning jätkub hingamine ja vee auramine. Viljas hakkab vähenema tärklise, suhkru, rasvade, hapete ja teiste ainete sisaldus. Hingamisest oleneb viljade kvaliteet ja säilimise kestvus. Mida intensiivsem on hingamine, seda suuremad on toitainete kaod ja seda kiiremini rikneb vili. Hingamist ei tohi täielikult katkestada, kuna siis katkeb viljas kogu elutegevus, millele järgneb kiire riknemine. Säilitustehnika ülesandeks on pidurdada hoidlates viljade hingamist miinimumini. [10]

Hoolimata edasiarenenud säilitustehnoloogiatest on kuivatised nõutud produkt, kuna vähese massi kohta sisaldub palju energiat, vitamiine ja teisi bioaktiivseid ühendeid. Samuti on kuivatatud puuvilju ja marju tänu kõrgele toitainete, kaalu suhtele sobilik näiteks matkale kaasa võtta [4].

1.2. Erinevad puuviljade ja marjade kuivatid

1.2.1. Kuivatamine toatemperatuuril atmosfäärirõhul

Kõige lihtsam viis puuviljade kuivatamiseks on kuivatamine toatemperatuuril atmosfäärirõhul. Sellise kuivatusviisi eelised teiste koduste säilitusmeetodite ees on [4]:

- ei nõua kulukat sisseseadet;
- ei vaja lisaenergiat;
- kuivatised ei nõua spetsiaalseid säilitusnõusid;
- kuivatamine ei nõua lisaainete ja konservantide kasutamist;
- kuivatiste säilitamine võtab vähe ruumi;
- saaduste säilitamiseks sobib kuiv ruum;
- kuivatised säilivad ka aastaid, kaotamata oma väärtust.

Samas on ka kodusel puuviljade ja marjade kuivatamisel rida puudusi [4]:

- käsitöö suur osa;
- kuivatusprotsess kestab kaua;
- kuivatusprotsessi tingimusi raske kontrollida;
- liigse kuivtoidu tarbimine võib põhjustada puhitustunnet ning valuaistinguid.

Suurema kuivamiskiiruse saavutamiseks soovitatakse koduses majapidamises kasutada pliidi, ahju, praeahju, saunalava või keskkütteradiaatori soojust. Samuti soovitatakse aiasaadusi kuivatada kuivatussõelal või –restil. Levinud on ka kodustes majapidamistes kasutatavad kappkuivatid. [4]

1.2.2. Solaarkuivatid

Solaarkuivatite eeliseks teiste kuivatite ees on nende lihtsus. Enamasti on solaarkuivatid suhteliselt odava hinnaga ning kuivatamiseks ei vajata lisaenergiat. Kuivatamiseks vajaminev energia saadakse päikesekiirgusena. Kuivatusviisidena on kasutusel: 1) otsene, 2) kaudne, 3) kombineeritud, 4) vabakonvektsiooniga ning 5) sundkonvektsiooniga solaarkuivatamine [11]. Solaarkuivatid on enim levinud lõunamaades, kuni 40 laiuskraadini, kus summaarne päikesekiirgus küündib 1800...2800 kWh/m^2 aastas. Eestis

on aasta keskmine päikesekiirgus 1150 kWh/m^2 aastas ning suhteline õhuniiskus 81%. [5] Seega ei ole solaarkuivatamine Eesti kliimatingimustes protsessi ebaühtluse ning aegluse tõttu mõttekas.

1.2.3. Kambertüüpi konvektiivkuivati

Kambertüüpi konvektiivkuivatid sobivad puuviljade ja marjade väiketööstuslikuks kuivatamiseks, kus korraga kuivatatakse 20...100 kg niisket taimemassi. Kuivatites ringlev kuum õhk toodetakse elektrilise kalorifeeriga või biomassi ning maagaasi põletamisega. Kuivatusõhk ringleb soojusvaheti ja kuivatuskambri vahel nii, et õhujaotus oleks kõigi kuivatusaluste suhtes ühtlane. [5]

Lihtsaim kamberkuivati koosneb kuivatuskambrist, soojusallikast, ventilaatorist, kuivatusõhu ringlussüsteemist ning automaatikast. Väiksemates kamberkuivatites toodetakse enamasti soojust elektrilise kalorifeeriga. Suuremate kuivatite puhul ei ole soojuse tootmine elektriga enam otstarbekas, kasutatakse gaasipõleteid ning biomassi põleteid. [5]

Niiske materjal asetatakse esmalt perforeeritud roostevabast metallist või sünteetilisest kangast valmistatud kuivatuskandikutele. Seejärel asetatakse kandikud kuivati riiulitele. Kuivatusõhku on võimalik suunata vertikaalselt või horisontaalselt materjali alt ja pealt. Vertikaalsel suunal on kuivatusõhu takistus suurem kuid samas on materjali kokkupuude kuivatusõhuga intensiivsem. Horisontaalsel suunal on kuivatusõhu liikumine kiirem ning sellist kuivatit saab kasutada suurema koguse puuviljade või marjade kuivatamiseks. [5]

Pannes kuivatis õhk ringlema kasutatakse paremini ära soojendatud õhu küllastusvõimet ning hoitakse kokku soojusenergialt. Niiskusega küllastunud kuivatusõhku tuleb pidevalt kambrist eemaldada ja asendada välisõhuga. Välisõhk puhastatakse filtreerimise teel võõrkehadest ning suunatakse soojusvahetisse, kus õhk soojendatakse ning suunatakse edasi kuivatisse. [5]

1.2.4. Tunnel-tüüpi konvektiivkuivati

Tunnelkuivateid kasutatakse enamasti suurema koguse puuviljade või marjade kuivatamiseks. Kuivatuskambri moodustab koridor, milles paiknevad teisaldatavad vagonetid kuivatuskandikutega. Tunnelkuivateid on läbitava või ühepoolselt avatava planeeringuga. [5]

Materjal liigub vagonettidel tunnelkuivatis kuivatusõhu liikumisele vastupidises suunas. Tunnelis on vagonetid paigutatud võimalikult tihedalt, et kuivatusõhk ei leiaks otseteed. Kuivati vagoneti riiulite paigutus ja mõõtmed on planeeritud nii, et kuivatusõhk läbiks kuivatuskambrit võimalikult ühtlaselt. [5]

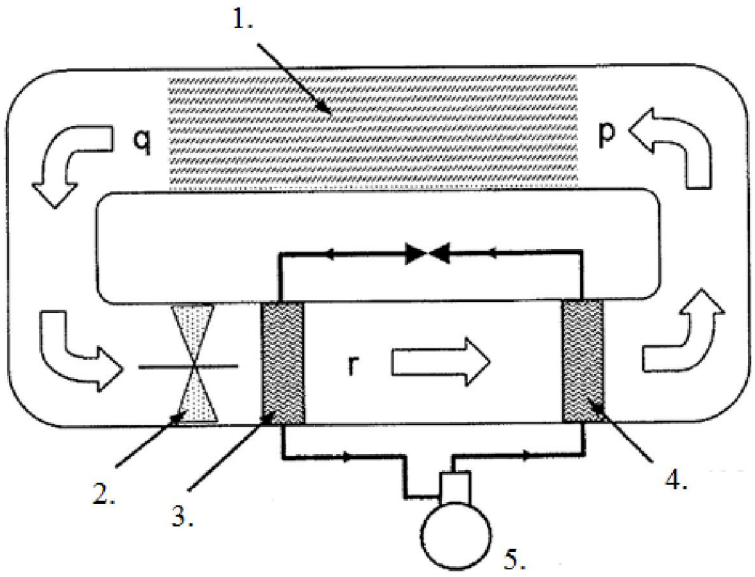
Soojuse tootmiseks kasutatakse enamasti gaasipõleteid või elektrikalorifeere. Õhu ühtlaseks liikumiseks tunnelis peavad õhukanalid olema õigesti dimensioneeritud ning ventilaator võimeline liigutama suuri õhukoguseid. Tunnelkuivatites on probleemiks kuivatusõhu ühtlase jaotuse tagamine, materjal kuivab soojusallikapoolses tunneliosas ja ülemistel kandikutel paremini. Sellest tulenevalt on vaja kuivatuskandikuid kuivatusprotsessi kestel ümber tõsta. [5]

1.2.5. Kondensatsioonkuivatid

Kondensatsioonkuivatis (*Heat pump dryer*) [12] eemaldatakse küllastunud niiskust külmale pinnale või soojuspumba aurustile kondenseerimisega. Kondensatsioonkuivatite eeliseks on [5]:

- Materjali saab kuivatada madalamal temperatuuril alandades kuivatusõhu niiskust ilma temperatuuri oluliselt tõstmata. Tagab toote parema kvaliteedi.
- Kuivatusõhku ei pea vahetama niiske väliskeskkonna õhuga.
- Kuivati on madala energiavajadusega tagades madalamad tootmiskulud kui elektriliste tunnel- ja kamberkuivatite puhul.

Kondensatsioonkuivati koosneb kuivatuskambrist, ventilaatorist, õhukanalitest ning soojuspumbasüsteemist, kuhu kuuluvad kompressor, aurusti ja soojusvaheti. Kuivati on kas suletud või poolkinnise kuivatusõhuringlusega. [5] Kondensatsioonkuivati skeem on toodud joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Kondensatsioonkuivati skeem: 1 – kuivatuskamber; 2 – ventilaator; 3 – aurusti; 4 – kondensaator; 5 – kompressor [12: 252]

Ventilaatoriga juhitakse puuviljadest ja marjadest eraldunud veeaur läbi soojuspumba aurusti ja kondensaatori. Niiskus kondenseerub aurusti ribide külmal pinnal ning vesi eemaldatakse protsessist. Vee kondenseerumissoojus aurustil kantakse soojuspumba abil kondensaatorile. Aurustil jahtunud õhk suunatakse läbi kondensaatori, kus see soojendatakse. Sõltuvalt külmakandjast ja kompressorist saab soojuspumbaga tõsta kuivatusõhu temperatuuri 70°C-ni. Kuna kuivatusõhu liikumise kiirus on madal, on oluline kuivatusõhu ühtlane suunamine kuivatuskambris. Soojuse ja õhu kadu läbi välispiirete mõjutab oluliselt kuivati efektiivsust. [5]

1.2.6. Vaakumkuivatid

Puuviljade ja marjade kuivatamine vaakumis võimaldab kuivatada materjali madalamatel temperatuuridel ja vähendada kuivatamiseks kuluvat aega. Vähendatud rõhu keskkonnas langeb vee küllastuspunkt ning vesi hakkab aurustuma madalamatel temperatuuridel. Kuivatades vee küllastuspunkti lähedastes tingimustes tekib materjalis kõrge aururõhk, mille tulemusel toimub intensiivne vee auramine materjalist. [5]

Vaakumkuivateid ei käsitleta täiesti eraldiseisva kuivatitüübina, vaid vaakumit kasutatakse teistes kuivatitüüpides, nagu [5]: 1) kontakt-, 2) kondensatsioon-, 3) infrapuna-, 4) mikrolaine- ja 5) sublimatsioonkuivatites. Vaakumkuivatid valmistatakse enamasti roostevabast terasest ning tugeva konstruktsiooniga. Vaakumkuivati komplekti kuulub sobiva tootlikkusega vaakumpump ja automaatika. Vaakumkuivatid on suletud kuivatusõhuringlusega. [5]

Esimene patent vaakumkuivatitele registreeriti 1922 Rootsis puidukuivatuse valdkonnas, esimene kiirguslik vaakumkuivati ehitati 1970. aastal [12]. Vaakumkuivatite näol on tegemist areneva tehnoloogiaga. Tänu toodangu kõrgele kvaliteedile värvuse, tekstuuri, niiskuse, vitamiinide sisalduse ja maitse osas on antud tehnoloogial kõrge potentsiaal. [12]

1.2.7. Infrapunakuivatid

Infrapunakiirgus on elektromagnetkiirgus lainepikkustel 0,7...1000 µm, jäädes nähtava valguse ja mikrolainekiirguse vahele. Lainepikkustel 0,7...25 µm esineb lähi-infrapunakiirgus (*NIR*) ning lainepikkustel 25...1000 µm esineb kaug-infrapunakiirgus (*FIR*). Lähi-infrapunakiirgust kasutatakse enamasti kaugjuhtimispultides ja kaug-infrapunakiirgust kütteseadmetes. Kuivatamiseks sobib seega pigem kaug-infrapunakiirgus. [5, 12]

Iga keha temperatuuriga üle absoluutse nulli kiirgab soojust. Lähi-infrapunakiirgurid töötavad temperatuuridel 1200...3800 °C, kaug-infrapunakiirgurid temperatuuridel 450...1200 °C. Üldiselt kehtib seaduspärasus: mida pikem lainepikkus, seda madalam on kiirguri temperatuur. Kui kiirguri pinna temperatuur jääb alla 260 °C, muutub kiirguslevi ebaefektiivseks. Efektiivne kiirguslevi toimub lainepikkustel 1,17...5,4 µm, kiirguri temperatuuridel 260...2200 °C. [12]

Kiirguskuivateid kasutatakse laki- või värvikelme kuivatamiseks metall- või puitmaterjalidel, tekstiili ja õhukeste puitmaterjalide kuivatamiseks ning toiduainetööstuses puuviljade, marjade, maitsetaimede, pähklite jne. kuivatamiseks [1]. Infrapunakiirgus levib ka vaakumis ning selle eeliseks võrreldes konvektiivkuivatamisega on see, et kiirgus levib läbi õhu või vaakumi kiirgurilt materjalile ilma ümbritseva keskkonna temperatuuri

tõstmata. Kiirgus neeldub materjali pinnakihtides, muutudes soojusenergiaks, mida on vaja vee aurustamiseks [5].

Kiirguskuivatamisel peab arvestama asjaoluga, et materjali kuivamiskiirust ei ole võimalik alati soojusülekande intensiivistamisega suurendada, kuna kuivamiskiirus ei sõltu ainult välisest soojuslevist, vaid ka materjali eripäradest ning niiskuse edasikandumisest süvakihtidest pinnale [1]. Materjali neelamisvõime ja pinnakihtide soojusjuhtivus on olulised kiirguskuivatamisel, kuna infrapunakiirgus ei tungi väga sügavale materjali sisse ning soojendab põhiliselt pinnakihte. Kiirguskuivatamiseks sobivad materjalid, mille pinnakiht on hea soojusjuhtivusega, kuna siis on pinnakihi ülekuumenemiseks tõenäosus väiksem. [12]

Infrapunakuivatamise katsetes on saavutatud õunte kuivatamisel võrreldes konvektiivse kuivatamisega häid tulemusi, kuivatamise lühem aeg ja kuivatiste parem kvaliteet [13, 14]. Sama tulemus saadi ka porgandite kuivatamisel, kui infrapunakuivatamise järgselt olid ka kuivatatud porgandid ilusama värvusega kui konvektiivses kuivatis kuivatatud porgandid. Samuti säilitasid infrapunakuivatis kuivatatud saadused parema värvuse peale 12-kuulist hoiustamist. [15]

1.2.8. Mikrolainekuivatid

Mikrolainekiirgus on elektromagnetkiirgus lainepikkustel 1...1000 mm, jäädes infrapunakiirguse ja televisioonilevi lainepikkuse vahele. Mikrolainekiirgusega kuumutamiseks kasutatakse sagedusi 300 MHz...300 GHz. Ameerika Ühendriikides kasutatakse 915 MHz lainepikkust toiduainetööstustes ning 2450 MHz lainepikkust kodumajapidamisseadmetes. [12]

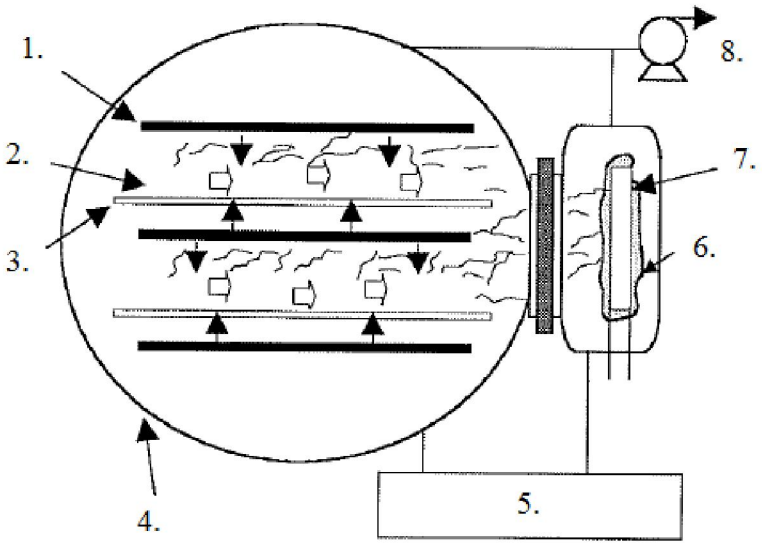
Kuivatatavas materjalis tekib soojus vesinikuaatomite pideva ümberpaiknemise tagajärjel veemolekulides. Selle tulemusel tekib tugev aururõhk materjali sisekihtides ning intensiivne vee aurumine materjali pinnalt. Materjali ülekuumenemise vältimiseks peab kuivatatav materjal magnetroni suhtes liikuma, enamasti tagab liikumise konveier või trummel. Oluline on materjali peenestusaste ja sümmeetria. Samuti on oluline teada kuivatatava materjali puhul mikrolainete tungimise sügavust ja kiirgusvoo tugevust. [5, 12]

Mikrolainekuivatid on kas pidev- või tsükkeltoimega kuivatid, kus niiskus kondenseeritakse külmale pinnale või eemaldatakse kuivatusõhuga. On leitud, et ainult 50...70 % tarbitud elektrienergiast muundatakse magnetroni poolt mikrolaineteks ning väike osa sellest neeldub materjalis. [5] Oma suure energiatarbe tõttu ei ole mikrolainekuivatamine niiskete materjalide lõpuni kuivatamiseks majanduslikult otstarbekas, seda kasutatakse kombineerituna konvektiivkuivatusega protsessi kiirendamiseks kuivatamise lõppfaasis.

1.2.9. Sublimatsioonkuivatid

Sublimeerides aurustatakse jäätunud materjalist niiskus ilma materjali üles sulatamata. Selleks külmutatakse puuviljad või marjad esmalt temperatuuril -40...-80 °C, vältides nii suurte jääkristallide teket. Peenestatud materjalist, mille temperatuur peaks olema -35 kuni -43 °C sublimeeritakse niiskus. [5]

Sublimatsioonkuivati koosneb silindrilisest vaakumkambrist, jahutussüsteemist, kondensatsioonipinnast ja vaakumpumbast [5]. Kuivati skeem on toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Sublimatsioonkuivati skeem: 1 – kiirgusallikas; 2 – külmutatud materjal; 3 – riiul; 4 – kuivatuskamber; 5 – jahutussüsteem; 6 – jää; 7 – kondensaator; 8 – vaakumpump [12]

Kondensaatoriga eemaldatakse kuivatusõhust materjalist aurunud niiskus. Kondensaatori pinna temperatuur on vahemikus -55...-80 °C. Materjali soojendamiseks kasutatakse sublimatsioonkuivatites infrapuna- või mikrolainekiirgust. [5]

Antud tehnoloogia on leidnud põhilist kasutust ravimitööstuses, kuid järjest enam kasutatakse seda ka toiduainetööstuses. Sublimeerimine muudab protsessi energiamahukaks, kuid tänu kuivatiste heale kvaliteedile kasutatakse seda tehnoloogiat ka kosmose-, spordi- ja sõjatööstuses [12].

1.2.10. Infrapuna-vaakumkuivati

Selle kombineeritud meetodi puhul on võimalik tänu vaakumile kuivatada materjali madalamal temperatuuril, kuna vähendatud rõhul langeb vee küllastuspunkt alla 100 °C ning soojendada materjali efektiivsemalt tänu infrapunakiirguse iseloomule ümbritsevat keskkonda mitte soojendada. Arvestatav energia kokkuhoid saavutatakse kuivatusaja lühenemisega. Samuti räägib meetodi kasuks ka toodete kõrge kvaliteet.

Positiivseid tulemusi aiasaaduste infrapuna-vaakumkuivatamisel on saadud erinevates uurimustöödes:

1. Hafezi *et al.* 2014. Saavutati energia kokkuhoid vaakumi kasutamisel infrapunakuivatamisel, tänu kuivatusprotsessi lühenemisele võrreldes infrapunakuivatamisega atmosfäärirõhul [16].
2. Swasdisevi et al. 2007. Leiti optimaalne materjali temperatuuri ja paksuse ning kuivati rõhu vahekord lähtudes kuivatamise ajast ja kuivatise kvaliteedist [17].
3. Liu et al. 2014. Koostati matemaatiline mudel soojus- ja massilevi protsesside simuleerimiseks. Tulemusi kontrolliti eksperimentaalselt [18].
4. Kouchakzadeh, A., Haghighi, K. 2011. Kuivatati pistaatsiapähkleid kaheksa korda kiiremini, kui konvektiivkuivatamisel [19].
5. Laur, L. 2016. Leiti, et kuivatades infrapuna-vaakumkuivatis rõhul 53 kPa kuivasid õunaviilud ligikaudu 36 korda kiiremini kui kuivatades toatemperatuuril atmosfäärirõhul 101 kPa ja 1,5 korda kiiremini kui kuivatades infrapunakiirguriga atmosfäärirõhul [7].

Seega võib öelda, et infrapuna-vaakumkuivatamisel on aiasaaduste kvaliteetsel kuivatamisel potentsiaali.

1.3. Õunte kuivatamine

Õunad on tähtsuselt neljas toitaineterikas aiasaadus maailmas [20]. Neid kasutatakse nii erinevates toitudes, kui ka niisama värskelt söömiseks. Lisaks söömisele kasutatakse õunu näiteks kosmeetikas. Häid tulemusi on õunamaskid andnud vinnide, akne ja tedretähnide ravis. Samuti hinnatakse õunamahla kui nahka puhastavat, värskendavat ja noorendavat vahendit. [21]

Õunad sisaldavad rohkelt vett, olenevalt sordist on neis 70...90 % bioaktiivset vett. Üks tähtsamaid õuna komponente on puuviljasuhkur ehk fruktoos, mida eestimaistes õuntes on keskmiselt 6,5...6,7 %. Õunte säilitamisel suhkrusisaldus tõuseb, kuna enamik tärklisest muutub suhkruks. Üheks oluliseks õunte koostisosaks on ka C-vitamiin ehk askorbiinhape. [21] Õunad sisaldavad üle kolmesaja loodusliku ühendi, nende hulgas ka väidetavalt südamehaiguste riski vähendavat salitsüülhapet ning vähihaiguste riski vähendavaid antioksüdante ja polüfenoole [22]. 100 grammi õunu annab keskmiselt 48 kcal energiat [21].

Õunte kuivatamisel tuleb lisaks suurusele ja küpsusele tähelepanu pöörata ka sordist tingitud eripäradele, sest kõikidest õunasortidest ei saa head kuivatatud toodet. Hea tulemuse annavad enamasti sordid, millel on valge ja tihe sisu ning hapukas maitse. Tööstuslikuks kuivatamiseks tuleks õunad jagada suuruse järgi mitmesse rühma. [4] Kuivatamistehnoloogia valikul tuleks lähtuda lõpptoote soovitavast kvaliteedist.

Õunte kuivatamisel on täheldatud temperatuuri tõustes ja kuivatusaja pikenedes fenoolsete ühendite ja antioksüdantide langust kuivatistes. Optimaalne kuivatustemperatuur oleks 50...60 °C. Materjali temperatuuri tõustes üle 70 °C hakkab tootes kasulike ainete sisaldus vähenema. Lühiajaliselt 70 °C kuivatades fenoolsete ühendite ja antioksüdantide vähenemist ei toimu. [23] Ka õunte eeltöötlusel on kuivamise kineetikale oluline mõju. Õunade blanšeerimisel kuumas vees, kuumas 0,6 % $CaCl_2$ vesilahuses ning auruga blanšeerides saavutati paremad niiskuse, värvuse, tekstuuri ja kuivamiskiiruse näitajad [24].

Õunte infrapunakiirgusega kuivatamisel tuleb arvestada, et kiirgus ei tungi õuntes sügavamale kui 7,4 mm [12]. Seega on infrapunakiirgusega võimalik töödelda vaid õhukesi õunaviile.

1.4. Õunakrõpsud

Õunakrõpsud (*apple chips*) saadakse õhukeste 2...3 mm paksuste õunaviilude kuivatamisel madala veesisalduseni. Selle tulemusel saadakse rasvavabad salitsüülhappe, antioksüdantide, polüfenoolide ning vitamiiniderikkad tervislikud krõpsud [25]. Eesti suuremates poekettides ja internetipoodides saadaval olevad sarnased tooted on:

1. Kommi asemel, kuivatatud õunakuubikud, 40 g. Toote pakend koos õunakuubikutega on toodud joonisel 1.3. Pakendaja Rhumveld Baltic, päritolumaa Tšiili. Saadaval Tartu Lõunakeskuse Maksimarketis.

Joonis 1.3. Kuivatatud õunakuubikud Kommi asemel 40g

Vee sisalduse määramiseks tootes kasutati ASAE standardit [26]. Niiskuse määramise metoodikat on täpsemalt seletatud materjalid ja metoodika osas. Katseliselt leiti, et toote suhteline niiskus niiske materjali massi suhtes on 14,35 % [27]. Toote toitumisalane teave on toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Kuivatatud õunakuubikute Kommi asemel toitumisalane teave 100 g kohta toote pakendilt

Energiasisaldus, kcal	Rasvad, g	Süsivesikud, g	Millest suhkrud, g	Valgud, g	Sool, g
409	0	92	77	1	0

2. Õunakrõps Jonathan, 40 g. Toote pakend koos õunakrõpsudega on toodud joonisel 1.4. Tootja Nobilis Zrt, Ungari. Toode on saadaval e-poes Vitamiinikuller.ee ja valitud Selveri poodides [28, 29].

Joonis 1.4. Õunakrõps Jonathan 40 g

Toote suhteliseks niiskuseks niiske materjali massi suhtes saadi 10,59 %. Toote toitumisalane teave on toodud tabelis 1.2.

Tabel 1.2. Õunakrõps Jonathan toitumisalane teave 100 g kohta toote pakendilt

Energia-sisaldus, kcal	Rasvad, g	Süsi-vesikud, g	Millest suhkrud, g	Kiud-ained, g	Valgud, g	Sool, g	Polü-fenoolid, g
358	0,4	79	73	14,7	2,2	0,05	6,2

Pakendil on öeldud, et toode on tehtud kolmest mahlasest õunast, pakendi sisule ei ole lisatud suhkrut ega maitseaineid ning kuivatisi ei ole praetud ega küpsetatud.

3. Õuna krõps Golden 40 g. Tootja Nobilis Zrt, Ungari. Toode on saadaval e-poes Vitamiinikuller.ee ja valitud Selveri poodides [28, 29].
4. Saaremaine õunakrõps. Pakendis on 30 g kuivatatud saadust, milles värske- ja kuivatatud õuna suhe on 1/10. Tootja Tehumardi, Eesti. Saadaval e-poes Vitamiinikuller.ee [28].
5. Kuivatatud õunarõngad. Pakendis on 200 g kuivatatud saadust. Tootja Arimex, Eesti. Saadaval Prisma poekettides [30].

Õunakrõpse või sarnaseid tooteid on saadaval ka erinevates mahepoodides ja laatadel. Kuid üldiselt on tegu spetsiifilise tootega, mida jaekaubandusest valdavalt ei leia.

1.5. Polli aiandusuuringute keskuse kuivati

Polli aiandusuuringute keskuses toimub puuvilja- ja marjakultuuride sordiaretus ning kasvutehnoloogiate, taimekaitse ja maheviljeluse alane teadustöö. Lisaks on võimalik väikeettevõtjatel kasutada uusima tehnoloogiaga varustatud tootearenduskeskust ja katsekööki. Ettevõtjal on võimalik toota oma viljadest mahlu, hoidiseid, seemneõlisid, kuivatisi ja marjajahusid. [8]

Pollis kasutatakse taimsete materjalide kuivatamiseks pooltööstuslikku infrapuna-vaakumkuivatit BKS VF-12 (joonis 1.5) mis võimaldab toota kuni 50...100 kg kuivatisi nädalas, kuid tegelik tootmisvõimekus sõltub toorainest ning selle kogusest [8].

Joonis 1.5. Polli aiandusuuringute keskuse pooltööstuslik infrapuna-vaakumkuivati BKS VF-12

Vaakumkuivati on roostevabast terasest ning tugeva konstruktsiooniga. Kuivati tehnilised andmed on toodud tabelis 1.3.

Tabel 1.3. Polli infrapuna-vaakumkuivati BKS VF-12 tehnilised andmed [31]

Pikkus, m	**Laius, m**	**Kõrgus, m**	**Töödeldava toor-aine maht, kg**	**Keskmine kuivatusaeg, h**	**IP kaitseklass**
2,1	2,4	2,1	12...36	1...6	51

Kasutusjuhendi järgi on kuivatis võimalik kuivatada materjali kuni 1 cm paksuse ühtlase kihina. Kuivatatav materjal jaotatakse ühtlase kihina roostevabast terasest perforeeritud kandikule, mis seejärel asetatakse kuivati riiulitele. Infrapunakiirgurid asetsevad statsionaarselt iga kandiku kohal ühtlase jaotusega. Uks suletakse tõmmitsatega ning seejärel lülitatakse sisse vaakumpump. Protsessi alustamiseks käivitatakse kuivati juhtimiskontroller, millena on kasutuses temperatuuri- ja niiskusanduritega puidukuivatuskontroller. Kontroller juhib kiirgurite sisse- ja väljalülitamist vastavalt seadistatud temperatuuridele. [31] Materjalist aurunud veeaur kondenseeritakse kuivati sisepinnal. Kondenseerunud vesi koguneb kuivati põhjal olevasse kogumisvanni. Materjalist aurunud vesi eemaldatakse kuivatist pärast kuivatamise lõppemist.

2. METOODIKA

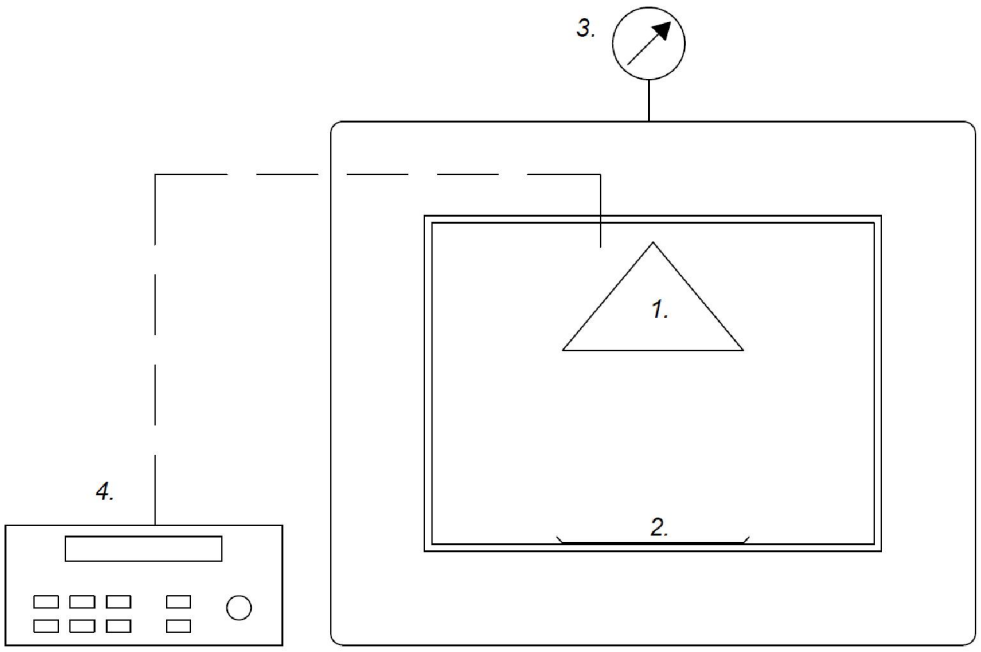
2.1. Katsetusmetoodika

Infrapuna-vaakumkuivati soojustehniliste protsesside uurimiseks kasutati põhilise meetodina eksperimenti. Katsete teostamiseks koostati infrapuna-vaakumkuivati katseseade, mille mõõtmed on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Infrapuna-vaakumkuivati kuivatuskambri mõõtmed

Pikkus, m	Laius, m	Kõrgus, m	Seina pindala, m^2	Ruumala, m^3
0,48	0,37	0,27	0,71	0,048

Kuna Polli aiandusuuringute keskuse pooltööstusliku infrapuna-vaakumkuivatiga katsete tegemiseks oleks vaja rakendada palju elektrienergiat ja aega on eksperiment läbi viidud väiksemas katseseadmes. Katsete käigus leiti temperatuuride muutus kuivatusprotsessi käigus ja materjali kuivatamise aeg. Katseseadme skeem on toodud joonisel 2.1. [7]



Joonis 2.1. Infrapuna-vaakumkuivati skeem: 1 – infrapunakiirgur; 2 – kandik, millele asetatakse kuivatatav materjal; 3 – vaakummeeter; 4 – andmehõiveseade [7]

Kuivatuskambri sein on valmistatud 6 mm paksusest alumiiniumist. Väliskeskkonnast isoleerib kuivatuskambrit 1 mm paksune teraskorpus ja nende vaheline 75 mm õhuvahe. [7] Infrapunakiirguri kõrgus kandikust on 160 mm. Infrapunakiirgur nimivõimsusega 1 kW on toodud joonisel 2.2.

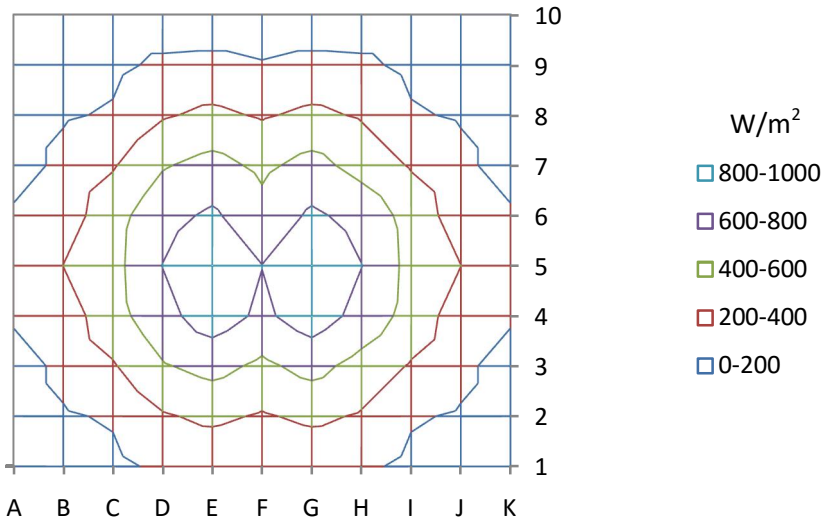
Joonis 2.2. Katsetes kasutatud infrapunakiirgur ja energiaarvesti

Infrapunakiirguri kiirgusjaotus on määratud eksperimentaalselt bilanssmeetriga. Mõõtmise käigus oli kiirguri kaugus bilanssmeetrist 0,65 m ja mõõdetud võimsus 164,25 W. Kiirguri võimsuse arvutamiseks on mõõdetud voolu ampermeetriga E526, millega on võimalik voolu mõõta mõõtepiirkondades 2,5 ja 5 A. Pinget mõõdeti voltmeetriga I275462, mille mõõtevahemik on 0...600 V. Kiirguri võimsus ühefaasilises võrgus on arvutatud valemiga

$$P = I \cdot U \cdot cos\varphi, \tag{2.1}$$

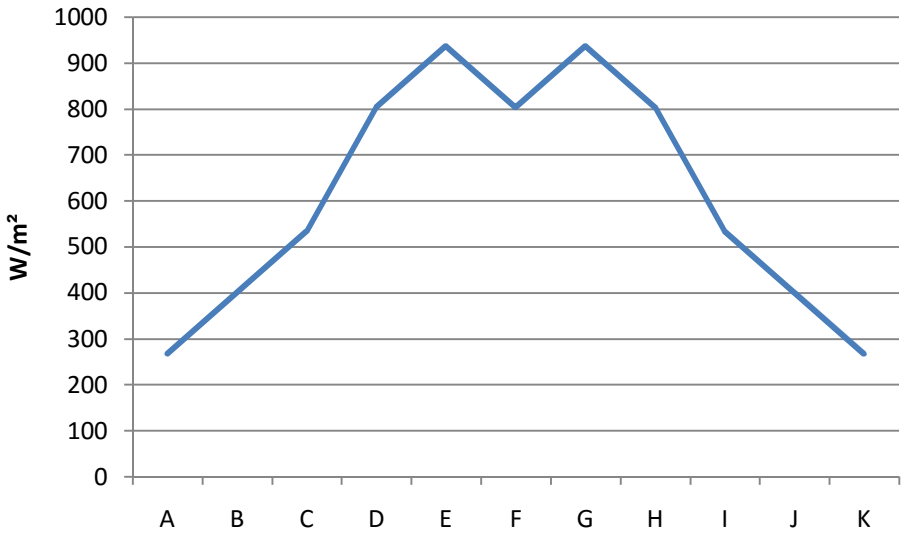
kus P on kiirguri võimsus W;
I – kiirgurit läbiv vool A;
U – kiirgurile rakendatav pinge V,
$cos\varphi$ – võimsustegur, aktiivkoormuse puhul $cos\varphi = 1$.

Infrapunakiirguri kiirgusjaotus võimsusel 200 W ja kõrgusel 0,16 m on leitud tabelarvutusprogrammiga Excel ning toodud joonisel 2.3.



Joonis 2.3. Infrapunakiirguri kiirgusjaotus

Kiiritustihedus on mõõdetud ruutude A1...K10 keskpunktis, iga ruut seejuures on mõõtudega 0,15 x 0,15 m. Kiiritustihedus kiirguri keskteljel ruutudel A5...K5 on toodud joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Infrapunakiirguri kiiritustihedus keskteljel

Kandik mõõtmetega 0,225 m korda 0,32 m, millel õunaviile kuivatatakse, on plastikust. Kuivatusprotsessi käigus mõõdeti temperatuure K-tüüpi termopaaridega, millega on võimalik mõõta vahemikus 0...200 °C [32]. Kuivatamise käigus mõõdeti [7]:

1) temperatuuri kandiku pinnal, infrapunakiirgusväljas;

2) õhutemperatuuri kuivatis;
3) kuivati tagumise seina temperatuuri;
4) materjali temperatuuri kandiku keskel;
5) materjali temperatuuri kandiku ääres;
6) kuivati välispinna temperatuuri ülemisel pinnal;
7) kuivati välispinna temperatuuri küljel;
8) kiirguri korpuse temperatuuri;
9) kuivati klaasi välispinna temperatuuri;
10) ümbritseva keskkonna temperatuuri.

Kuna katsed kestsid 83 minutist 236 minutini, eeldas see suuremahuliste andmemassiivide kogumist ja töötlemist. Andmete kogumiseks kasutati andmehõiveseadet Agilent 34972A, millega salvestati temperatuure kolm korda minutis. Saadud andmeid töödeldi tabelarvutusprogrammiga Excel. Seadme mõõtetäpsus K-tüüpi termopaaridega on 2,1 °C või 1,4 % mõõtetulemusest [33]. Andmehõiveseadme Agilent 34972A tehnilised andmed on toodud järgnevalt [33]:

- kolm andmehõivemooduli pesa;
- võimekus mõõta 11 erinevat sisendsignaali, nende hulgas: 1) temperatuuri termopaaride ja termistoridega, 2) alalis- ja vahelduvvoolu, 3) alalis- ja vahelduvpinget, 4) takistusi, 5) sagedusi;
- ühildub 34970A tüüpi moodulitega;
- kerge ühendada arvutiga USB 2.0 või 1Gbit LAN abil;
- USB pesa andmete salvestamiseks ning transpordiks;
- graafiline võrguliides;
- tasuta BenchLink tarkvara andmete käsitlemiseks.

Rõhu vähendamiseks kuivatuskambris kasutati Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi vaakumagregaatide laboris paiknevat DeLaval DVP 800 vaakumpumpa. Vaakumpumba tehnilised andmed on toodud järgnevalt [34]:

- töötab 3-faasilises võrgus, 400 VAC/ 50...60 Hz;
- pumba tootlikkus 900 l/m;
- pumba kiirus 1725 rpm;
- mootori võimsus 2,2 kW;
- vähim tekitatav alarõhk 20 kPa;
- suurim tekitatav alarõhk 55 kPa.

Materjalina kasutati Polli aiandusuuringute keskusest saadud õunu Alesja. Tegemist on introdutseeritud talisordi õunadega, viljad on keskmise suurusega ja sobivad kuivatamiseks väga hästi [35]. Õuntes sisalduv niiskus on määratud ASAE standardile tuginedes. Õunte niiskuse määramiseks kuivatati õunaviile konvektiivses kuivatis vähemalt 24 h temperatuuril üle 100 °C [26]. Õuntes sisalduv niiskus on arvutatud valemiga [27]

$$W = \frac{m_n}{m} \cdot 100, \tag{2.2.}$$

kus W on tahke materjali niiskus niiske materjali massi suhtes %;
m_n – materjalis sisalduva vee mass kg;
m – niiske materjali mass kg.

Õunte algniiskuseks kogumassi suhtes määrati eksperimentaalselt 87 %, vastavalt ASAE standardile [26].

Materjali kaalumiseks kasutati digitaalset kaalu Kern 440-33N. Tegemist on manuaalse kaaluga, ehk kaalutav objekt tuleb käsitsi asetada kaaluplaadi keskele ning samuti ei sobi see dünaamiliseks mõõtmiseks, kus kaalutava materjali kaal väheneb näiteks kuivamise tõttu. Kaalu tehnilised andmed on toodud järgnevalt [36]:

- loetavus 0,01 g;
- maksimaalne mõõdetav mass 200 g;
- reprodutseeritavus 0,01 g;
- minimaalne mõõdetav mass 0,02 g;
- stabiliseerimise aeg 3 s;
- töötemperatuur 5...35 °C.

Lähtuvalt kaalu mõõtepiirkonnast kuni 200 g ja kandiku massist 133,8 ± 0,2 g oli võimalik kandikule asetada kuni 66 g kuivatatavat materjali.

Infrapunakiirguse ja vaakumi seose leidmiseks kuivatamisel tehti üheksa katset infrapunakiirguri võimsustel 100 W, 150 W ja 200 W ja absoluutse rõhu väärtustel 52,5 kPa, 64,6 kPa ja 78,8 kPa. Katsed toimusid Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi lüpsi- ja jahutusseadmete laboris 24.03.2016 kuni 14.04.2016. Õunaviilud asetati ühtlaselt kandikule, andurid paigaldati kuivatisse, kuivati välispinnale ning kuivatatavasse materjali. Kuivati uks suleti tõmmits kruvidega ja käivitati vaakumpump. Enne kiirguri

sisselülitamist lasti rõhul kuivatuskambris üks minut stabiliseeruda. Seejärel lülitati sisse infrapunakiirgur, mille võimsust reguleeriti autotrafoga E30 pinget reguleerides. Kuivatamise käigus jälgiti, et seadistatud pinge ja rõhu väärtus oleks kogu protsessi käigus muutumatu.

2.2. Arvutusmetoodika

Kiirgus- ja ainelevi matemaatiliste seoste põhjal on loodud lihtsustatud dünaamiline soojusvahetuse mudel programmis SciLab (lisa A). Mudel võimaldab modelleerida kuivatamisprotsessi temperatuure ja soojusvooge läbi välispiirete lähtuvalt sisendparameetritest:

1. T_aeg – kuivatusprotsessi aeg, s. Selle aja vältel modelleerib programm protsessi.
2. P – kiirguri võimsus, W.
3. T_materjal – soovitud temperatuur, milleni materjali kuumutatakse, °C.
4. t_valis – ümbritseva keskkonna temperatuur, °C.
5. W_2 – materjali soovitud lõppniiskus, %.
6. Del1 – materjalikihi paksus kandikul, m.
7. m_materjal – kuivatatava materjali mass kandikul, kg.

Olenevalt kuivatatavast materjalist tuleb sisestada ka materjali sisendparameetrid:

1. Gam_1 – materjali tihedus, kg/m^3.
2. Lam1 – materjali soojusjuhtivustegur, W/(m·K).
3. c_1 – materjali erisoojus, J/(kg·K).
4. W_materjal – materjali algne niiskussisaldus, %.
5. Eps_2 – materjali mustvärvusaste.

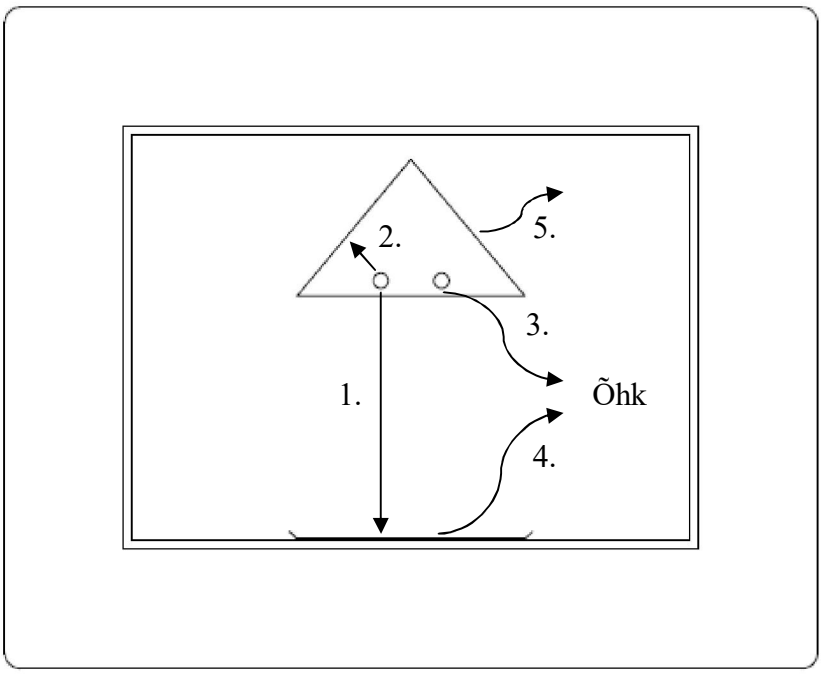
SciLab mudeli esimese katse skript on toodud lisas B, kus on näha ka erinevate sisendparameetrite väärtused ning viidatud algallikatele.

Kuivatuskambri ja infrapunakiirguri mõõtmete alusel on leitud nende pindala ning ruumala geomeetriliste valemite alusel. Tulemused on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Kuivatiosade arvutatud pindalad ja ruumalad

	Pindala, m^2	**Ruumala, m^3**
Kuivatuskamber	0,691	0,0479
Infrapunakiirgur	0,01	$1{,}38 \cdot 10^{-5}$
Kiirguri korpus	0,157	0,0025
Materjal (õunaviilud)	0,072	$1{,}44 \cdot 10^{-4}$
Klaas	0,092	0,0092
Ukseäär	0,023	$1{,}39 \cdot 10^{-4}$
Õhk kuivatuskambris	–	0,0453

Enamus infrapunakiirgusest neeldub kuivatatavas materjalis ning väike osa neeldub kiirguri korpuses. Mudelis on arvestatud, et vabakonvektsiooniga toimub soojusülekanne õhku kiirgusallikatelt, materjalilt ja kiirguri korpuselt. Mudeli kiirgusliku ja konvektiivset soojuslevi kirjeldab joonis 2.5.



Joonis 2.5. Soojuslevi protsessid kuivatis: 1 – kiirguslik soojuslevi kiirgurilt materjali; 2 – kiirguslik soojuslevi kiirgurilt korpusesse; 3 – konvektiivne soojuslevi kiirgurilt õhku; 4 – kovektiivne soojuslevi materjalilt õhku;5 – konvektiivne soojuslevi korpuselt õhku

Infrapunakiirguse levimisel kuivatis on arvestatud, et 83 % kiirguri tarbitavast võimsusest muundub infrapunakiirguseks, millega soojendatakse kuivatatavat materjali, kiirguri korpust ja õhku. Omakorda 17 % sellest kulub materjalist niiskuse aurustamiseks. Töös on

kehadevahelise kiirgusliku soojusvahetuse arvutustel tuginetud Stefan-Boltzmanni seadusele. Kiirguslikud soojusülekandetegurid on arvutatud valemiga 2.3 [37]

$$\alpha_{kiirg} = \frac{5{,}67 \cdot \varepsilon_t \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \cdot H_{12}}{t_1 - t_2}, \tag{2.3.}$$

kus α_{kiirg} on kiirgusliku soojusülekande soojusülekandetegur W/(m^2·K);
ε_t – soojusvahetuses osalevate kehade taandatud mustvärvusaste;
T_1 – kiirguri pinna absoluutne temperatuur K;
T_2 – soojendatava keha absoluutne temperatuur K;
H_{12} – vastastikune kiirguspind m^2;
t_1 – kiirguri pinna temperatuur °C;
t_2 – soojendatava keha temperatuur °C.

Kiirguslikus soojusvahetuses osalevate rööpsete kehade taandatud mustvärvusastmed on leitud avaldisega [37]

$$\varepsilon_t = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \tag{2.4.}$$

kus ε_1 on kiirgava keha mustvärvusaste;
ε_2 – soojendatava keha mustvärvusaste.

Vastastikune kiirguspind on leitud seosega [38]

$$H_{12} = \varphi_{21} \cdot F_2, \tag{2.5.}$$

kus φ_{21} on keskmine nurktegur;
F_2 – kiiritatav pind m^2.

Soojusläbikandetegurite arvutamisel kiirgurilt materjali ja kiirgurilt korpusesse on kasutatud valemit [39]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{kiirg}} + \frac{\delta}{\lambda}}, \tag{2.6.}$$

kus k on soojusläbikandetegur kiirgurilt soojendatavale kehale W/(m^2·K);
δ – materjalikihi paksus m;
λ – materjali soojusjuhtivustegur W/(m·K).

Kuivati mudelis on lihtsuse mõttes kasutatud materjalilt, kiirguri korpuselt ja infrapunakiirgurilt õhku soojusülekandetegurite arvestamisel vabakonvektsiooni valemeid. Õhkpiirikihi keskmine temperatuur on arvutatud valemiga [40]

$$t_p = \frac{t_s + t_{õ}}{2}, \tag{2.7.}$$

kus t_p on õhk piirikihi keskmine temperatuur vaadeldava keha pinnal °C;
t_s – soojusülekandepinna temperatuur °C;
$t_{õ}$ – soojuskandja temperatuur °C.

Vastavalt saadud temperatuurile on valitud kuiva õhu soojusjuhtivustegur, kinemaatiline viskoossustegur ja Prandtli arv tabelist [41: 147]. Ruumpaisumistegur on arvutatud valemiga [40]

$$\beta_p = \frac{1}{T_p}, \tag{2.8.}$$

kus β_p on õhu ruumpaisumistegur 1/K;
T_p – õhk-piirikihi absoluutne keskmine temperatuur K.

Vabakonvektsiooni dünaamikat iseloomustab Grashofi arv, mis on leitav valemiga [40]

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{v_p^2} \cdot \beta_p \cdot \Delta t, \tag{2.9.}$$

kus Gr on Grashofi arv;
g – raskuskiirendus, g = 9,81 m/s^2;

d – määravmõõde, vertikaalpindade puhul on selleks seina kõrgus, horisontaalpindadel nende väikseim mõõde ning horisontaalsetel varrastel või torudel nende läbimõõt m;

v_p – soojuskandja kinemaatiline viskoossustegur m^2/s;

t_2 – soojendatava keha temperatuur °C.

Grashofi ja Prandtli arvude korrutise alusel valitakse konstant C ja astmenäitaja n väärtused tabelist [40: 28]. Soojusülekande intensiivsust iseloomustav Nusselti arv on leitav valemiga [40]

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \tag{2.10.}$$

kus Nu on Nusselti arv.

Soojusülekandetegur on arvutatav Nusselti sarnasusarvust valemiga [40]

$$\alpha = Nu\frac{\lambda_p}{d}, \tag{2.11.}$$

kus α on soojusülekandetegur $W/(m^2 \cdot K)$;

λ_p – kuiva õhu erisoojusjuhtivus $W/(m \cdot K)$.

Sarnaselt valemile 2.6 on arvutatud soojusläbikandetegurid materjalist, kiirguri korpusest ja infrapunakiirgurist õhku valemiga [39]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}}. \tag{2.12.}$$

Soojusvoogude arvutamisel läbi piirete on esmalt leitud soojusläbikandetegurid. Soojusläbikandetegur kuivatist ümbritsevasse keskkonda läbi seina on arvutatav valemiga [39]

$$k_{sein} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sise}} + \frac{\delta_{DurAl}}{\lambda_{DurAl}} + 2 \cdot \frac{1}{\alpha_{sise}} + \frac{\delta_{Ter}}{\lambda_{Ter}} + \frac{1}{\alpha_{välis}}}, \quad (2.13.)$$

kus k_{sein} on seina soojusläbikandetegur õhust väliskeskkonda W/(m^2·K);
α_{sise} – soojusülekandetegur kuivati sees W/(m^2·K);
δ_{DurAl} – duralumiiniumist sisekihi paksus m;
λ_{DurAl} – duralumiiniumi soojusjuhtivustegur W/(m·K);
δ_{Ter} – terasest väliskihi paksus m;
λ_{Ter} – terase soojusjuhtivustegur W/(m·K);
$\alpha_{välis}$ – soojusülekandetegur kuivati välispinnalt keskkonda W/(m^2·K).

Seina sise- ja väliskihi vahel on 0,075 m paksune õhuvahe. Soojusläbikandetegur kuivatist ümbritsevasse keskkonda läbi ukseklaasi on arvutatav valemiga [39]

$$k_{klaas} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sise}} + \frac{\delta_{klaas}}{\lambda_{klaas}} + \frac{1}{\alpha_{välis}}}, \quad (2.14.)$$

kus k_{klaas} on soojusläbikandetegur läbi klaasi W/(m^2·K);
δ_{klaas} – klaasi paksus m;
λ_{klaas} – klaasi soojusjuhtivustegur W/(m·K).

Ukseäär on kuivatuskambri osa, mis ulatub 35 mm jagu välja kuivatuskambrit ümbritsevast terasest kestast. Seega on soojusvoog läbi duralumiiniumist ukseääre tunduvalt suurem ning selle soojusläbikandetegur on leitud valemiga [39]

$$k_{äär} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sise}} + \frac{\delta_{DurAl}}{\lambda_{DurAl}} + \frac{1}{\alpha_{välis}}}, \quad (2.15.)$$

kus $k_{äär}$ on soojusläbikandetegur läbi duralumiiniumist ukseääre W/(m^2·K).

Vee aurustamiseks materjalist on lihtsuse mõttes võetud vee aurustumissoojuseks $C_{aur} = 2500\ kJ/kg$ [27]. Aurustumiseks kuluva soojusenergia ja vee aurustumissoojuse suhtena leitakse aurustunud vee mass. Kogu veeaur imetakse vaakumiga kuivatuskambrist välja. Materjali suhteline niiskus niiske materjali massi suhtes leitakse valemiga 2.2.

Kiirgusvõimsusest kulub mudelis 17 % materjalist vee aurustamiseks. Kui materjalis sisalduv niiskus langeb soovitud väärtuseni W_2, viiakse kiirgurile antav võimsus nulli.

Kiirguskuivati SciLab mudeli tulemustest on näha graafiliselt muutuvatena:

- välistemperatuuri;
- kuivati õhutemperatuuri;
- materjali temperatuuri;
- kiirguri korpuse temperatuuri;
- klaasi temperatuuri;
- seina väliskihi temperatuuri.

Graafiliselt muutuvana on näha ka suhteline niiskus materjalis ning soojusvood läbi välispiirete:

- läbi ukseääre;
- läbi seina;
- läbi klaasi.

SciLab keskkonnas loodud matemaatiline mudel on eelduseks eksperimentide tegemiseks, võimaldades läbi mängida erinevad soovitud olukorrad. Matemaatiline mudel modelleerib kuivatamise temperatuurid, soojusvood läbi välispiirete ning materjali suhtelise niiskuse. Selle alusel on võimalik enne eksperimentaalse katse sooritamist hinnata, millist kiirguri võimsust rakendada ning kui kaua võtab kuivatamine aega. Kuna matemaatilises mudelis ei ole kirjeldatud kõiki protsesse, mis eksperimendis aset leiavad ei ole oodata, et matemaatilise- ja katselise mudeli tulemused üks-ühele ühtiksid.

3. KATSETE KÄIK

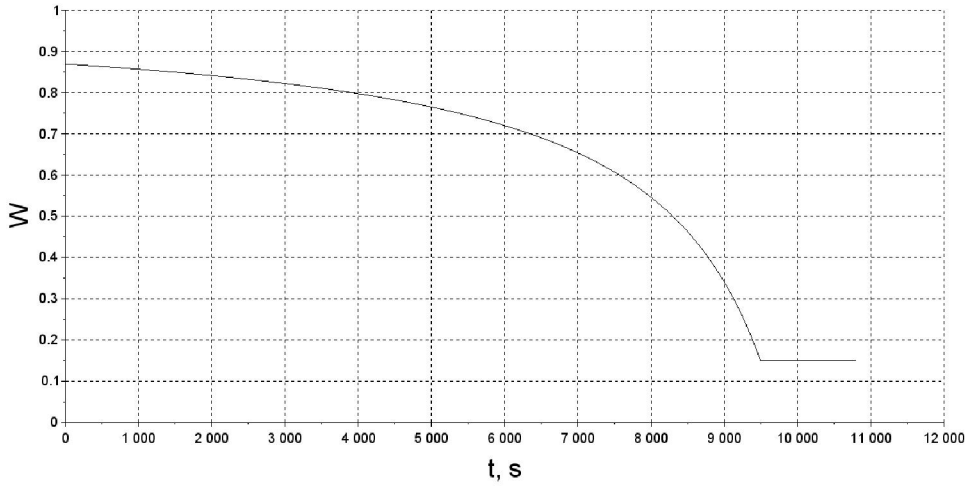
3.1. Esimene katse

Katsete eesmärgiks oli tuvastada rõhu, kiirgusvõimsuse ja kuivamiskiiruse vaheline seos. Esimeses katses alustati kõige väiksemast vaakumi ja kiirgusvõimsuse väärtusest. Esimese katse lähteandmed on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Esimese katse lähteandmed

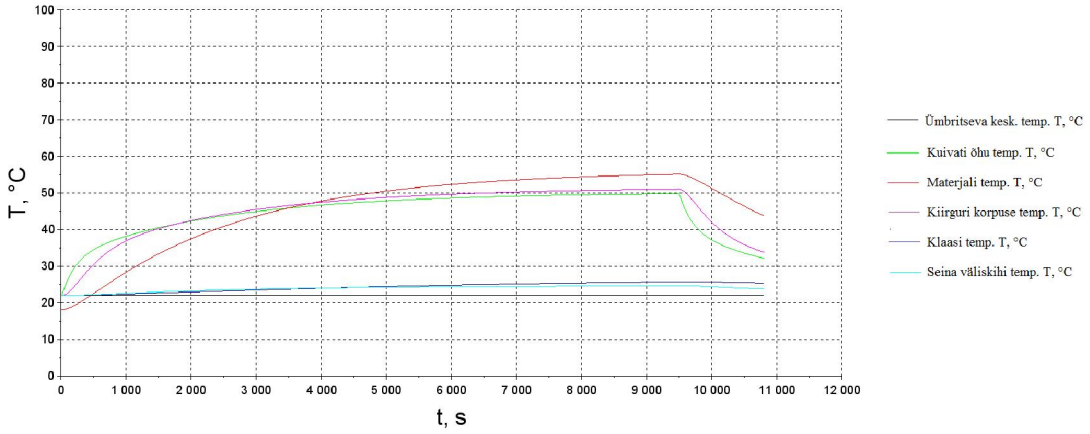
Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
78,8	100	63,21	2...3	22

Enne eksperimenti modelleeriti lähteandmete põhjal katse SciLab keskkonnas. Tulemustest on näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimus 9500 s (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Materjali suhtelise niiskuse muutus ajas (esimene katse SciLabis)

SciLabi mudeli väljund on kujutatud joonisel 3.2.

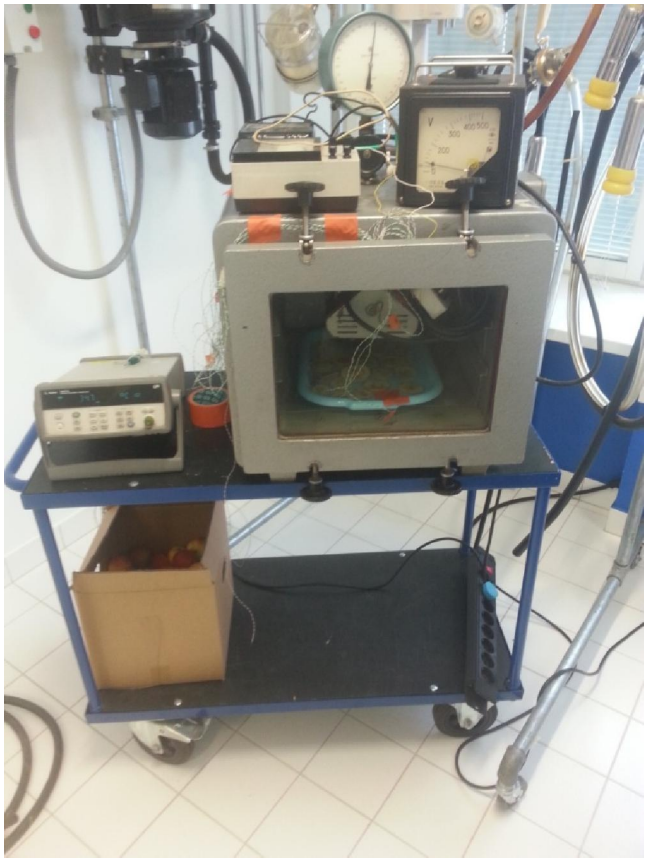


Joonis 3.2. Modelleeritud temperatuurid kuivatis (esimene katse SciLabis)

Enne eksperimenti kaaluti tühi kandik, fikseeriti tulemus, viilutati õunad ning asetati kandikule. Kandikule asetatud niisked õunaviilud on näha joonisel 3.3. Kandiku tühjale alale kinnitati kandiku temperatuuri mõõtev termopaar.

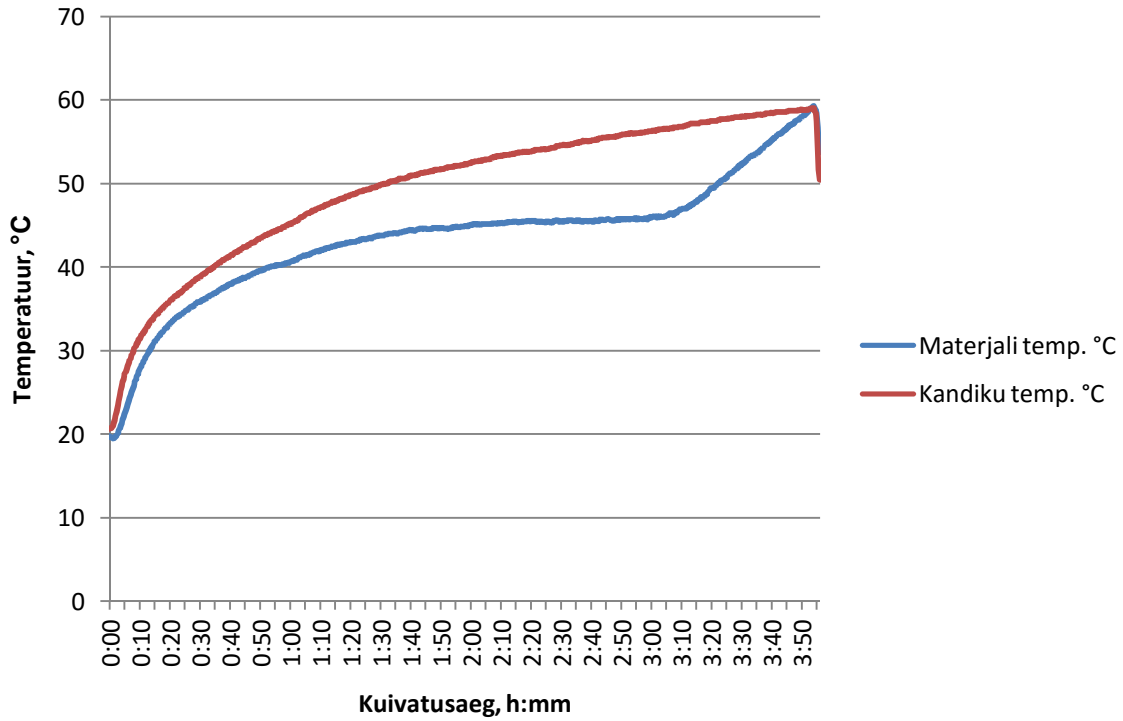
Joonis 3.3. Niiskete õunaviilude asetus kandikul

Õunaviiludega kandik asetati kuivatuskambrisse, uks suleti, käivitati vaakumpump ja andmehõiveseade ning lasti rõhul kuivatuskambris umbes minut stabiliseeruda. Seejärel reguleeriti autotrafoga kiirgurile vastav pinge. Katseseade on toodud joonisel 3.4.



Joonis 3.4. Infrapuna-vaakumkuivati katseseade

Kuivatamise käigus jälgiti andmehõiveseadme kuvarilt protsessi temperatuure. Oluliste temperatuuridena jälgiti materjali ja kandiku temperatuuri. Õunaviilude puhul oli tegu märja kehaga ja kandiku puhul kuiva kehaga, sellest tulenevalt oli ka kandiku temperatuur kõrgem. Kuivamise lõppfaasis hakkas aga materjali temperatuur tõusma. Kiirgur lülitati välja kui materjali keskmine temperatuur tõusis kandiku temperatuurini (joonis 3.5), millest võib järeldada et materjal kuivas tasakaaluniiskuseni.



Joonis 3.5. Infrapuna-vaakumkuivatuse materjali ja kandiku temperatuurid esimeses katses

Katse kestis 3 h ja 51 min, seega 1 h ja 13 min kauem kui SciLab mudeliga modelleeritud protsess. Katse lõpuks oli materjali mass 10,72 g, seega eraldus katse käigus materjalist 52,49 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 13,63 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 21,71%. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad, väga krimpsu tõmmanud ning pisut pruunikad. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas C.

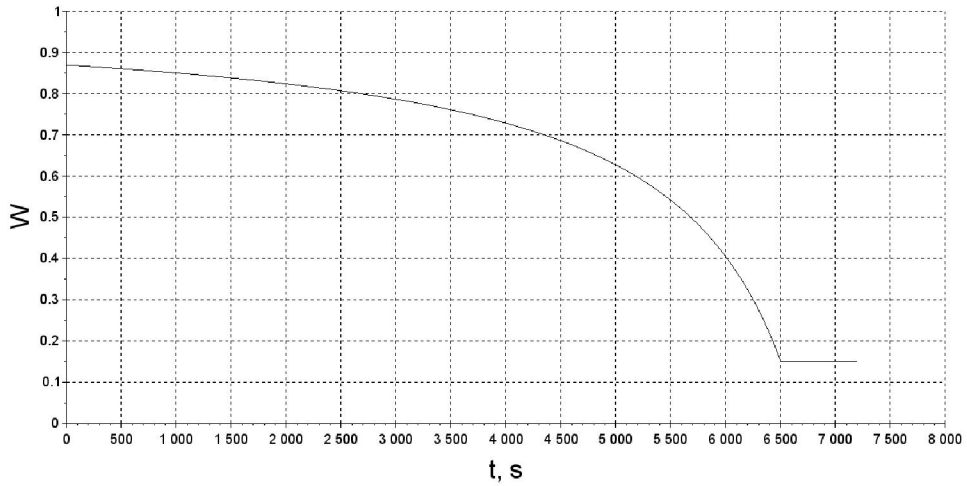
3.2. Teine katse

Teises katses jäi rõhk samaks aga tõsteti kiirguri võimsust. Teise katse lähteandmed on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Teise katse lähteandmed

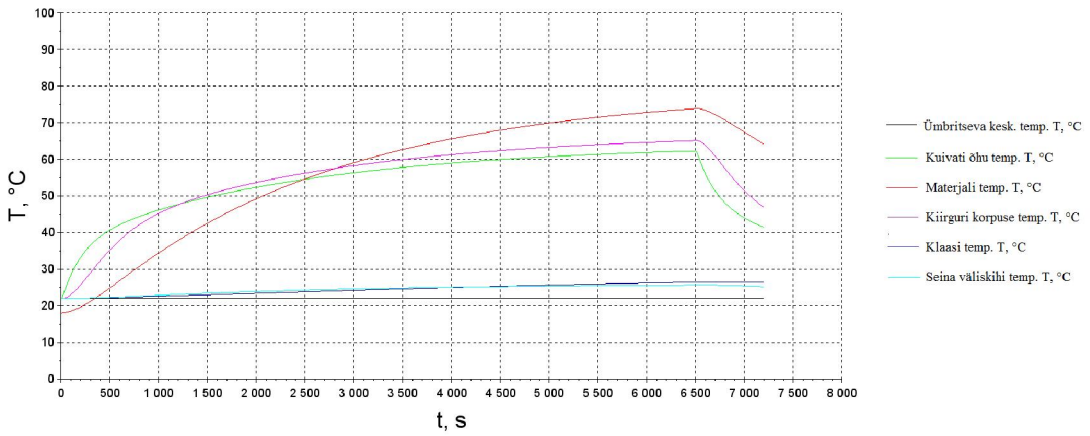
Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
78,8	150	64,97	2...3	22

Enne eksperimenti modelleeriti lähteandmete põhjal katse SciLab keskkonnas. Teise katse tulemustest on näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimus 6500 s (joonis 3.6).



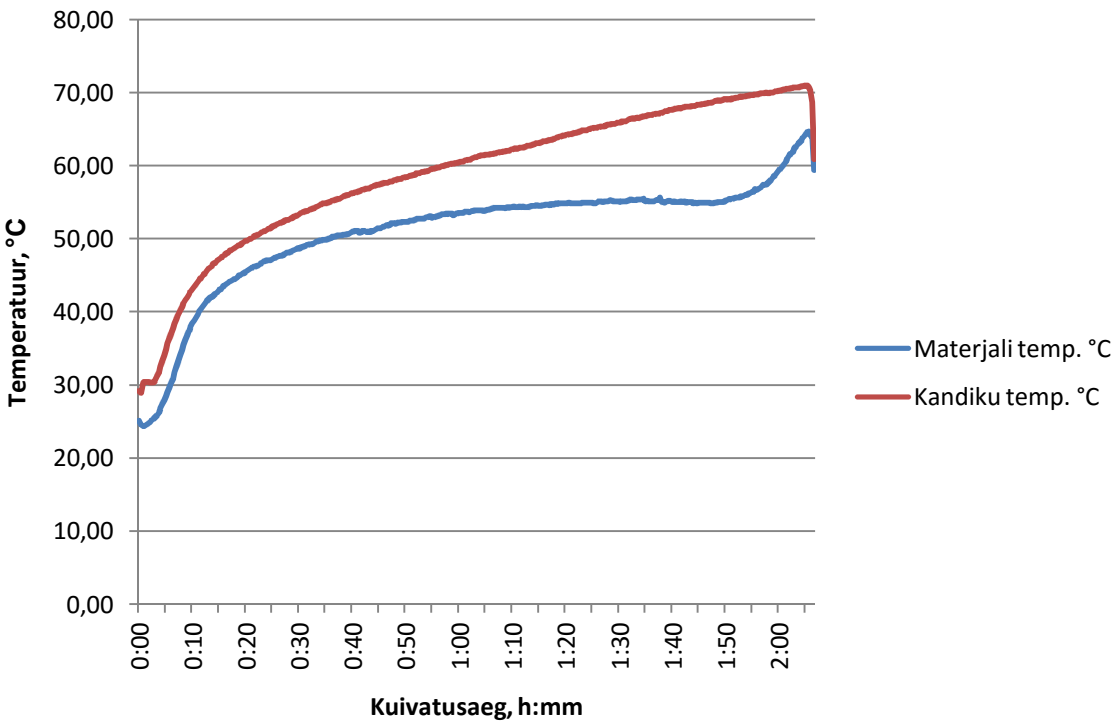
Joonis 3.6. Materjali suhtelise niiskuse muutus ajas (teine katse SciLabis)

SciLabi mudeli väljund on kujutatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7. Modelleeritud temperatuurid kuivatis (teine katse SciLabis)

Teise eksperimendi käigus toimiti samas järjekorras nagu esimese katse käigus. Materjali kiiritati infrapunakiirguriga kuni materjali keskmine temperatuur tõusis kandiku temperatuurini (joonis 3.8), millest võib järeldada et materjal kuivas tasakaaluniiskuseni.



Joonis 3.8. Infrapuna-vaakumkuivatuse materjali ja kandiku temperatuurid teises katses

Katse käigus läks kuivati klaas väga uduseks, millest võib järeldada, et kuivati õhus oli veeauru kontsentratsioon suur (joonis 3.9).

Joonis 3.9. Kondenseerunud vesi klaasil teises katses

Katse kestis 2 h ja 5 min, seega 17 min kauem kui SciLab mudeliga modelleeritud protsess. Katse lõpuks oli materjali mass 10,09 g, seega eraldus katse käigus materjalist 54,88 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 26,35 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 20,76 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja krimpsu tõmmanud. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas D.

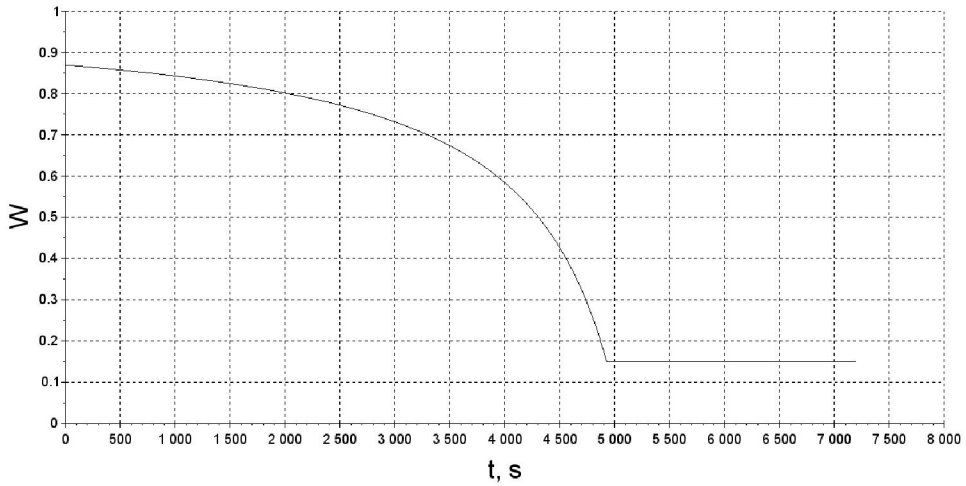
3.3. Kolmas katse

Kolmandas katses rõhku ei muudetud kuid tõsteti veelgi kiirguri võimsust. Kolmanda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Kolmanda katse lähteandmed

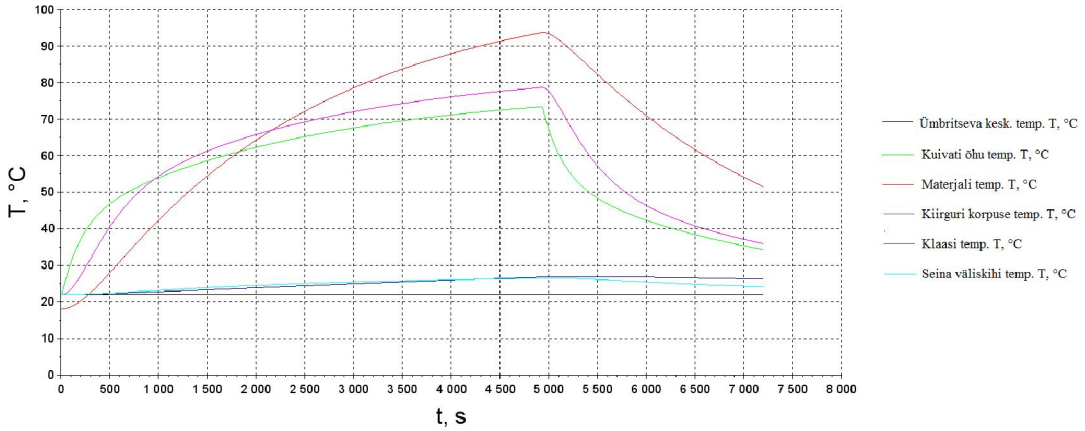
Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
78,8	200	65,64	2...3	22

Enne eksperimenti modelleeriti lähteandmete põhjal katse SciLab keskkonnas. Teise katse tulemustest on näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimus 4900 s (joonis 3.10).



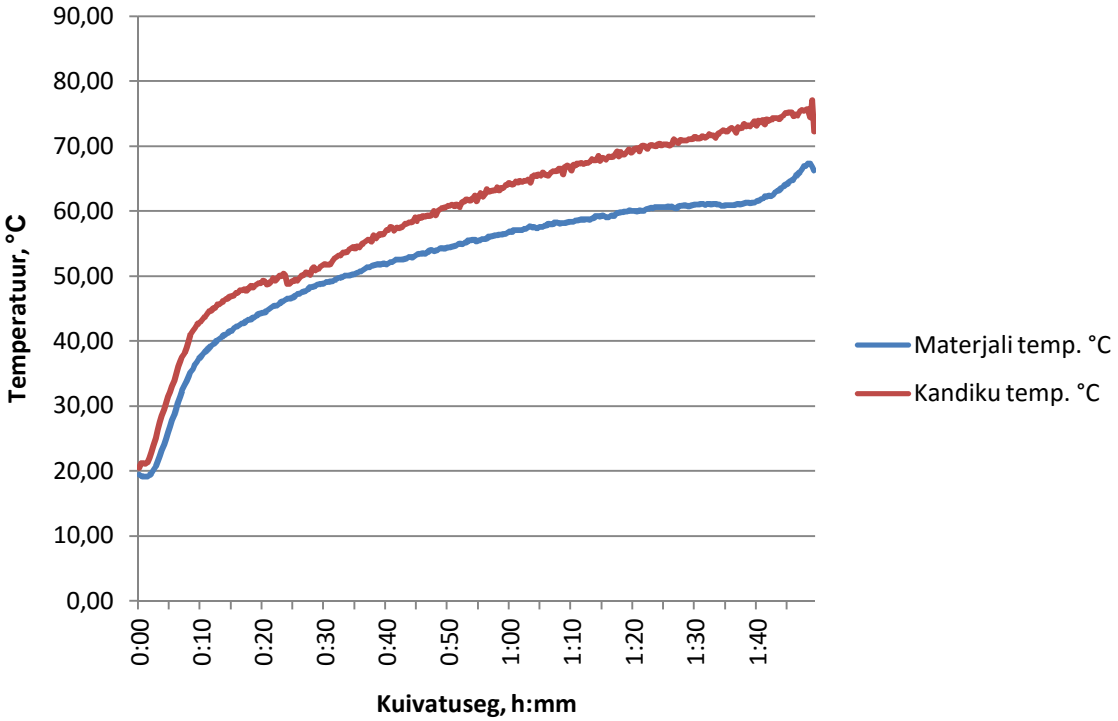
Joonis 3.10. Materjali suhtelise niiskuse muutus ajas (kolmas katse SciLabis)

SciLabi mudeli väljund on kujutatud joonisel 3.11.



Joonis 3.11. Modelleeritud temperatuurid kuivatis (kolmas katse SciLabis)

Kolmanda eksperimendi käigus toimiti samas järjekorras nagu esimestes katsetes. Katse lõpetati enne kui materjali temperatuur võrdsustus kandiku temperatuuriga, kuna materjali temperatuur keskel ületas tunduvalt kandiku temperatuuri tõustes temperatuurini 80 °C. Materjal kandiku ääres aga oli samal ajal madalama temperatuuriga. Kandiku temperatuuri ning materjali keskmise temperatuuri võrdlus kuivatamise jooksul on näha joonisel 3.12.



Joonis 3.12. Infrapuna-vaakumkuivatamise materjali ja kandiku temperatuurid kolmandas katses

Katse käigus läks kuivati klaas väga uduseks, millest võib järeldada, et kuivati õhus oli veeauru kontsentratsioon suur (joonis 3.13).

Joonis 3.13. Kondenseerunud vesi klaasil kolmandas katses

Katse kestis 1 h ja 49 min, seega 27 min kauem kui SciLab mudeliga modelleeritud protsess. Katse lõpuks oli materjali mass 10,59 g, seega eraldus katse käigus materjalist 55,05 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 30,30 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 23,43 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja krimpsu tõmbunud. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas E.

3.4. Neljas katse

Neljandas katses vähendati rõhku kuivatis, kiirguri võimsuseks reguleeriti 100 W. Neljanda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Neljanda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
64,6	100	63,28	2...3	22

Neljanda katse lähteandmete põhjal modelleeriti katse SciLab keskkonnas. Tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimus 9500 s ning temperatuurid muutusid sarnaselt esimesele katsele (joonised 3.1 ja 3.2). Õhk kuivatis tõusis temperatuurini 50 °C ja materjal temperatuurini 55 °C. Neljanda eksperimendi käigus toimiti samas järjekorras nagu eelnevate katsete käigus. Katse lõpetati materjali temperatuuri võrdsustumisel kandiku temperatuuriga.

Neljas katse kestis 3 h ja 22 min, seega 44 min kauem kui SciLab mudeliga modelleeritud protsess ja 29 min vähem kui esimene eksperimentaalne katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 57 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 10,29 g, seega eraldus katse käigus materjalist 52,99 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 15,59 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 16,11 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja krimpsus. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas F.

3.5. Viies katse

Viiendas katses jäi rõhk samaks, mis eelmises katses, aga tõsteti kiirguri võimsust. Viienda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Viienda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
64,6	150	69,10	2...3	22

Viienda katse lähteandmete põhjal modelleeriti katse SciLab keskkonnas. Tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimub 6900 s ning temperatuurid muutuvad sarnaselt teisele katsele (joonised 3.6 ja 3.7). Õhutemperatuuriks prognoosis mudel 63 °C ja materjali temperatuuriks 75 °C.

Viies katse kestis 2 h ja 10 min, seega 22 min kauem kui SciLab'iga modelleeritud protsess ja 5 min kauem kui teine katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 80 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 10,05 g, seega eraldus katse käigus materjalist 59,05 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 27,21 g/h. Materjali suhteline niiskus

oli katse lõppedes 20,4 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja väga hea tekstuuriga. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas G.

3.6. Kuues katse

Kuuendas katses jäi rõhk samaks, nagu eelmises katses, aga tõsteti kiirguri võimsust. Kuuenda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Kuuenda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
64,6	200	65,55	2...3	22

Kuuenda katse lähteandmete põhjal modelleeriti katse SciLab keskkonnas. Tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimuks 4900 s ning temperatuurid muutuksid sarnaselt kolmandale katsele (joonised 3.10 ja 3.11). Õhutemperatuuriks kuivatis oleks 73 °C ja materjali temperatuuriks 93 °C.

Kuues katse kestis 1 h ja 38 min, seega 16 min kauem kui SciLab mudeliga modelleeritud protsess ja 11 min vähem kui kolmas katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 75 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 9,90 g, seega eraldus katse käigus materjalist 55,65 g vett. Protsessi keskmine kuivamiskiirus oli 34,14 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 20,4 %. Kuivatamise käigus läks klaasi äärmine osa uduseks, millest võib järeldada, et kuivati õhus oli suur veeauru kontsentratsioon. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja väga hea tekstuuriga. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas H.

3.7. Seitsmes katse

Seitsmendas katses vähendati rõhku kuivatis veelgi ning kiirguri võimsuseks reguleeriti 100 W. Seitsmenda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.7.

Tabel 3.7. Seitsmenda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
52,5	100	63,77	2...3	22

Seitsmenda katse lähteandmete põhjal modelleeriti katse SciLab keskkonnas. Tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimuks 9600 s ning temperatuurid muutuksid sarnaselt esimesele ja neljandale katsele (joonised 3.1 ja 3.2).

Seitsmes katse kestis 3 h ja 3 min, seega 23 min kauem kui SciLab'iga modelleeritud protsess ning 48 min vähem kui esimene ja 21 min vähem kui neljas katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 60 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 9,81 g, seega eraldus katse käigus materjalist 53,96 g vett. Keskmine kuivamiskiirus oli 17,69 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 19,98 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja väga hea tekstuuriga. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas I.

3.8. Kaheksas katse

Kaheksandas katses jäi rõhk samaks, nagu eelmises katses, aga tõsteti kiirguri võimsust. Kaheksanda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.8.

Tabel 3.8. Kaheksanda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
52,5	150	62,83	2...3	22

Kaheksanda katse lähteandmete põhjal modelleeritud SciLab mudeli tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimuks 6300 s ning temperatuurid muutuksid sarnaselt teisele ja viiendale katsele (joonised 3.6 ja 3.7).

Kaheksas katse kestis 1 h ja 46 min, seega vaid 1 min kauem kui SciLab'iga modelleeritud protsess ning 19 min vähem kui teine ja 24 min vähem kui neljas katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 68 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 10,33 g, seega eraldus katse käigus materjalist 52,5 g vett. Protsessi keskmine

kuivamiskiirus oli 29,71 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 26 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja väga hea tekstuuriga. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas J.

3.9. Üheksas katse

Üheksandas katses olid alarõhk ja kiirguri võimsus suurimad. Üheksanda katse lähteandmed on toodud tabelis 3.9.

Tabel 3.9. Üheksanda katse lähteandmed

Rõhk, kPa	Kiirguri võimsus, W	Materjali mass, g	Õunaviilude paksus, mm	Ruumi temperatuur, °C
52,5	200	64,4	2...3	22

Üheksanda katse lähteandmete põhjal modelleeritud SciLab mudeli tulemustest oli näha, et kuivamine soovitud niiskuseni toimuks 4800 s ning temperatuurid muutuksid sarnaselt kolmandale ja kuuendale katsele (joonised 3.10 ja 3.11).

Üheksas katse kestis 1 h ja 23 min, seega vaid 3 min kauem kui SciLab'iga modelleeritud protsess ning 26 min vähem kui kolmas ja 15 min vähem kui kuues katse. Katse jooksul tõusis kandiku ja materjali temperatuur 70 kraadini. Katse lõpuks oli materjali mass 10,49 g, seega eraldus katse käigus materjalist 53,91 g vett. Keskmine kuivamiskiirus oli 38,98 g/h. Materjali suhteline niiskus katse lõppedes oli 17,06 %. Kuivanud õunaviilud olid krõbedad ja väga hea tekstuuriga. Kõik mõõdetud temperatuurid on toodud lisas K.

4. ARUTELU

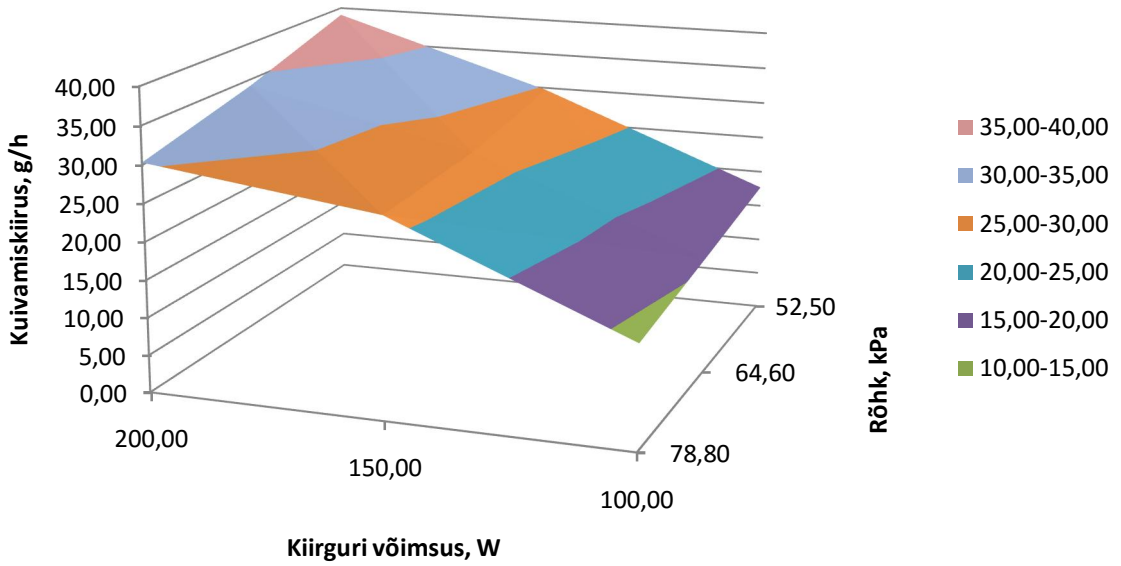
4.1. Kokkuvõte katsetest

Katsete tulemustest on selgelt näha, et kuivatis olev rõhk ja kiirguri võimsus mõjutavad oluliselt kuivamise kestust. Nagu ka arvata võis, kulus kõige rohkem aega kuivatades suurimal rõhul (78,8 kPa) ja väikseima kiirgusvõimsusega (100 W) (tabel 4.1. rida 1). Kiireim tulemus saadi aga kuivatades väikseima rõhuga (52,5 kPa) ning suurima kiirgusvõimsusega (200 W) (tabel 4.1. rida 9). Parema ülevaate saamiseks tehtud katsetest on katsete tähtsamad tulemused toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Katsetulemuste koondtabel

Katse nr.	Rõhk, kPa	Võimsus, W	Aeg, h	Materjali algmass, g	Materjali lõppmass, g	Aurustunud niiskus, g	Suhteline niiskus lõpus, %	Keskmine kuivamiskiirus, g/h
1.	78,8	100	3:51	63,21	10,72	52,49	21,71	13,63
2.	78,8	150	2:05	64,97	10,09	54,88	20,76	26,35
3.	78,8	200	1:49	65,64	10,59	55,05	23,43	30,30
4.	64,6	100	3:24	63,28	10,29	52,99	16,11	15,59
5.	64,6	150	2:10	69,10	10,05	59,05	20,40	27,21
6.	64,6	200	1:38	65,55	9,90	55,65	11,38	34,14
7.	52,5	100	3:03	63,77	9,81	53,96	19,98	17,69
8.	52,5	150	1:46	62,83	10,33	52,50	26,00	29,71
9.	52,5	200	1:23	64,40	10,49	53,91	17,06	38,98

Katsetulemuste alusel on koostatud ruumiline joonis rõhu, võimsuse ja keskmise kuivamiskiiruse kohta (joonis 4.1).



Joonis 4.1. Kuivamiskiiruse sõltuvus kiirguri võimsusest ja kuivati rõhust

Katsetulemustest võib järeldada, et mida suurem on vaakum ja kiirguri võimsus, seda suurem on kuivamiskiirus ja lühem on kuivamisaeg. Sarnaste tulemusteni on jõudnud ka Hafezi [16], Swasdisevi [17] ja Kouchakzadeh [19]. Kuivamiskiiruse puhul peab arvestama ka asjaoluga, et liiga suure kuivamiskiiruse puhul võivad materjali koed kahjustada saada ning materjal hapraks muutuda [42]. Seega ei tohiks kuivatamisel lähtuda ainult kuivamiskiirusest vaid prioriteediks tuleks seada kõrge kuivatise kvaliteet.

4.2. Järeldused

Infrapuna-vaakumkuivatamisel on palju eeliseid teiste meetodite ees, võimaldades kuivatada kiiremini, parema kvaliteediga ja väiksema energiakuluga võrreldes konvektiivkuivatamisega.

Töös käsitletud katsemetoodika miinusena võib välja tuua suhtelise niiskuse suure erinevuse kuivatistes olles vahemikus 11,38...26,00 %. Hoolimata katseliselt saadud toodangu suhteliselt heast kvaliteedist: krõbedus, tekstuur, värvus, oli niiskus pisut suurem

võrreldes poest saadava toodanguga (Jonathan Apple Crisps 10,59 % ja Kommi asemel 14,35 %). Seega võib öelda, et materjali kui märja keha temperatuuri võrdsustumisel kandiku kui kuiva keha temperatuuriga ei saa ühtlase niiskusega toodangut. Selleks, et määrata täpset materjali niiskust kuivatamise ajal, oleks mõistlik kuivatatavat materjali kogu protsessi vältel kaaluda. Sensoorne kontrollimine tuleks välistada, kuna selle käigus avatakse uks ning kuivatuskambri rõhk ja temperatuur võrdsustuvad ümbritseva keskkonna omaga. Edasise kuivatusvajaduse korral tooks see endaga kaasa lisanduva energiakulu protsessi taaskäivitamiseks.

Mõõdetud kiirguri võimsuse ja töötatud aja alusel on arvutatud selle energiatarve. Kuna vaakumpumba võimsust ei reguleeritud, vaid rõhu suurendamiseks kuivatuskambris avati rohkem ventiili ning vaakumpump oli katseseadme jaoks pisut üledimensioneeritud, siis vaakumpumba energiatarvet ei ole arvestatud. Kiirgur töötas protsessi vältel konstantse võimsusega, seega saab tarbitud võimsuse ja töötatud aja alusel leida kiirguri energiatarbe eri rõhkudel, tulemused on toodud tabelis 4.1.

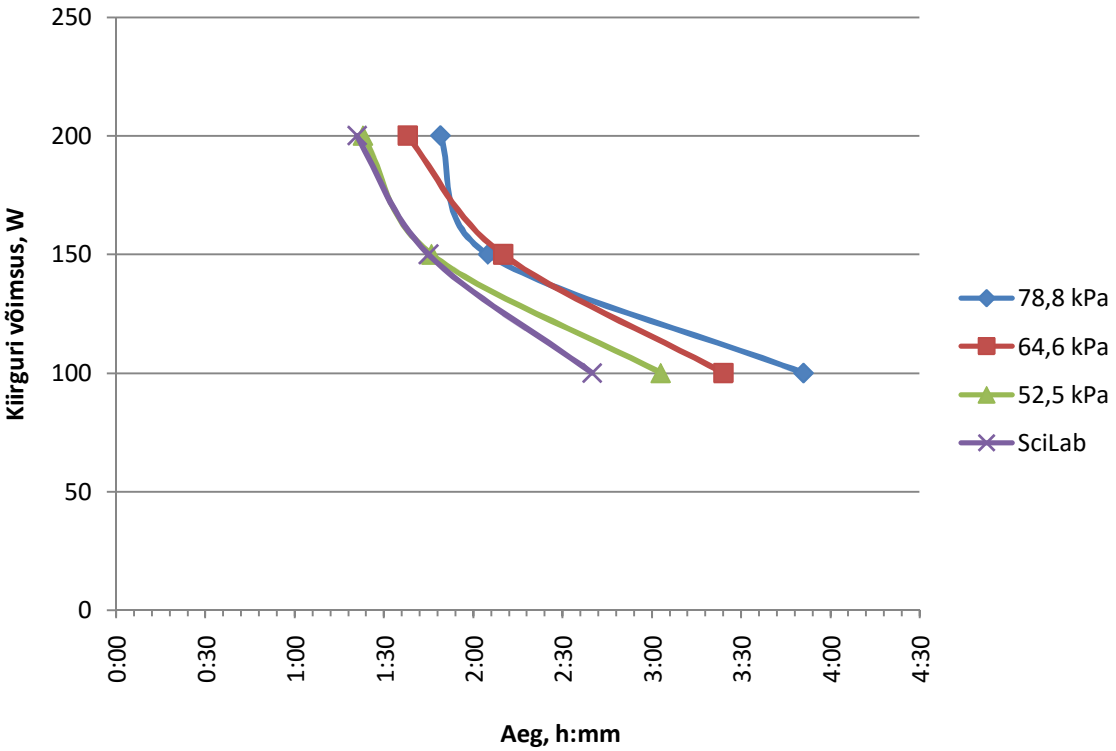
Tabel 4.1. Kiirguri elektrienergia tarve

Rõhk, kPa	**Kiirguri poolt tarbitud energia erinevatel võimsustel, W·h**		
	100W	**150W**	**200W**
78,8	385	312,4	363,3
64,6	340	325	326,6
52,5	305	265	276,7

Tulemustest on näha, et kiirguri võimsuse suurenemisel 100-lt 150-le väheneb kiirguri elektrienergia tarve märgatavalt seoses kuivatusprotsessi lühenemisega. Vaakumpumba energiatarvet arvestamata võib öelda, et antud katseseadme optimaalne kuivatusrežiim on rõhul 52,5 kPa ja kiirguri võimsusel 150 W.

Mida suurem kiirguri võimsus ja väiksem on vaakum, seda rohkem veeauru on kuivatusõhus. Suurema vaakumi tekitamisel tõmmatakse rohkem niiskust kambrist ümbritsevasse keskkonda nagu on ka selgunud Mongpraneet *et al.* uuringust [43]. Seega peab kuivatuskambris olev rõhk ja kiirgurile antav võimsus olema omavahel tasakaalus, ehk suurendades kiirguri võimsust, on vaakumpumbal vaja rohkem veeauru kuivatuskambrist välja imeda.

Võrreldes matemaatilise mudeli tulemusi eksperimentaalsetega selgus, et vee aurustumiseks kuluv aeg ja temperatuurid on pisut erinevad. SciLab mudeli ja eksperimentide tulemused kiirguri võimsuse ja aja sõltuvusest on toodud joonisel 4.2.



Joonis 4.2. Modelleeritud ning katseliselt leitud ajakulu sõltuvus kiirguri võimsusest

Kaheksanda ja üheksanda katse aurumiseks kulunud aeg oli väga lähedane SciLabi mudeli tulemustega. Seega võib SciLab mudelit edukalt kasutada rõhul 52,5 kPa ja kiirguri võimsustel 150...200 W kuivamise aja leidmiseks. Samuti saab SciLab mudeliga küllaltki täpse ettekujutuse, kui kõrgele tõusevad temperatuurid kuivatis. Mudeli edasiarendustena võiks erinevad seosed dünaamilisemaks muuta ning arvestada materjalist vee aurustamisel ka rõhku ja temperatuuri. Ühtlase materjali temperatuuri saavutamiseks kuivatamise vältel tuleb mudelisse lisada PID-regulaator, mis reguleeriks kiirguri võimsust vastavalt materjali hetketemperatuurile.

Katsetulemustest on näha, et valitud kuivatusrežiim, kus kasutati infrapunakiirguril püsivat võimsust, ei olnud otstarbekas, sest materjali temperatuur tõusis üle 70 °C. Suuremate võimsuste korral kuivas materjal kandiku keskel võrreldes kandiku äärealaga kiiremini. Kiirguri võimsust oleks hea reguleerida tagasisidestatud juhtimisahelaga materjali temperatuuri järgi.

4.3. Pooltööstusliku infrapuna-vaakumkuivati parendamine

Polli aiandusuuringute keskuse kuivati puhul peetakse probleemiks liigset õhuniiskust kuivatis. Sealses kuivatis töötab vaakumpump valdavalt protsessi alguses, et kambris alarõhk tekitada. Kuivatamise kestel ei ole vaja vaakumpumpa käivitada, sest alarõhk säilib kuivatuskambris protsessi jooksul. Seega ei ole otstarbekas suurendada alarõhku kuivatis.

Eksperimendid töös kasutatud laboratoorse katseseadmega näitasid ilmekalt, et imedes kuivatist rohkem õhku välja, eemaldatakse seeläbi ka veeaur. Selline meetod toimis katseseadme puhul, kuid Polli kuivati puhul mitte, sest seal eemaldatakse materjalist aurustunud veeaur kuivati sisepinnale kondenseerimisega. Seega oleks soovitatav Polli kuivati puhul täiendavalt uurida:

- veeauru kondenseerumise ja süsteemist välja juhtimise võimalusi;
- vaakumi ja infrapunakiirguse täpsemat reguleerimist materjali sisestatud temperatuurianduri järgi;
- materjalist tulenevate iseärasuste nagu tihedus, läbimõõt, poorsus arvesse võtmist erinevates kuivatamise faasides ja kuivatusprogrammi vastavat reguleerimist.

Polli aiandusuuringute keskuse kuivati edasiste uuringute tulemusel saaks muuta kuivatamisprotsessi kiiremaks ja energiasäästlikumaks. Töö käigus SciLab simulatsioonikeskkonnas loodud dünaamiline mudel infrapuna-vaakumkuivati protsesside kirjeldamiseks, annab võimaluse mõista ka Polli kuivati edasiarenduse perspektiivi. Eeltoodud eesmärgi saavutamiseks tuleb töös kasutatud dünaamilist mudelit täiendada erinevate moodulite, sisendite ja väljunditega.

KOKKUVÕTE

Taimseid saaduseid on kuivatatud juba ürgajast. Kuivatamist loetakse üheks vanimaks bioloogiliseks säilitusviisiks, mille käigus piiratakse mikroorganismide elutegevuseks vajaliku vee kättesaadavust. Eriti levinud on aiasaaduste kuivatamine soojema kliimaga riikides, kus on võimalik kuivatada lahtiselt päikese käes või solaarkuivatitega. Eestis ja teistes parasvöötme riikides ei ole selline kuivatusviis protsessi ebaühtluse ning aegluse tõttu otstarbekas. Seega tuleb meie kliimatingimustes kasutada soojusliku kuivatamist. Soojuskuivatamine on oma olemuselt energiamahukas tehnoloogiline protsess hoolimata kasutatava meetodi efektiivsusest.

Kuivatised on nõutud toode just tänu kõrgele energia, vitamiinide ja teiste bioaktiivsete ühendite sisaldusele oma vähese massi kohta. Kvaliteetseid kuivatatud tooteid kasutatakse ka kosmose-, spordi- ja sõjatööstuses. Õunakrõpsu näol on tegemist õhukeste madala niiskuseni kuivatatud õunaviiludega, mis omavad tugevat potentsiaali asendamaks komme ja kartulikrõpse. Õunakrõpsud on rasvavabad ning sisaldavad rohkelt antioksüdante, polüfenoole ja vitamiine.

Töös on kirjeldatud erinevaid taimsete saaduste kuivatustehnoloogiaid ning välja toodud erinevate meetodite eelised ja puudused. Järjest enam võetakse kasutusele kombineeritud meetodeid, kus kasutatakse mitme kuivatustehnoloogia kasulikke omadusi. Antud töös on lähema vaatluse all infrapuna-vaakumkuivatamine, kus kasutatakse ära kahe meetodi eelised. Alandades rõhku kuivatuskambris langeb vee keemispunkt ning vesi hakkab aurustuma madalamatel temperatuuridel. Kuivatamisel vee keemispunkti lähedastes tingimustes tekitatakse materjalis kõrge aururõhk, mille tulemusel hakkab vesi intensiivselt materjalist aurustuma. Kaug-infrapunakiirguse (*FIR*) eeliseks konvektiivkuivatamise ees on see, et kiirgus levib läbi õhu või vaakumi kiirgurilt materjalile ilma ümbritseva keskkonna temperatuuri tõstmata.

Magistritöös uuritud infrapuna-vaakumkuivatamise eelisteks on vähene energiatarve, kõrge toodete kvaliteet ja suurem kuivamiskiirus, kui konvektiivkuivatamisel. Kiirguskuivatamisel peab arvestama ka materjalikihi paksuse ja eripäradega. Infrapunakiirgus ei tungi sügavale materjali sisse soendades põhiliselt pinnakihte. Seega

sobivad kiirguskuivatamiseks materjalid, mille pinnakiht on hea soojusjuhtivusega, kuna siis on pinnakihi ülekuumenemise tõenäosus väiksem. Töös selgus, et infrapuna-vaakumkuivatamiseks sobivad kirjanduse alusel kõige paremini hapukad talisordi õunad. Kuivatada on võimalik kuni 7,4 mm paksuseid õunaviile, mille kuivatamisel ei tohiks temperatuur üle 70 °C tõusta.

Töös on käsitletud katsetusmetoodikat, mille käigus kasutati katsevahendina infrapuna-vaakumkuivati katseseadet. Kuivamiskiiruse sõltuvuse leidmiseks kiirguri võimsusest ja kuivati rõhust teostati üheksa katset kiirguri võimsustel 100 W, 150 W ja 200 W ja absoluutse rõhu väärtustel 52,5 kPa, 64,6 kPa ja 78,8 kPa.

Arvutusmetoodikana on koostatud kiirgus- ja ainelevi matemaatiliste seoste põhjal lihtsustatud dünaamiline soojusvahetuse mudel SciLab keskkonnas. Programm võimaldab modelleerida kuivatusprotsessi temperatuure ja materjali niiskuse muutumist ajas. Modelleeritud ja eksperimendi tulemusi võrreldes selgus, et arvutusmetoodika tulemused sarnanesid katsetulemustega enim rõhul 52,5 kPa ja kiirguri võimsustel 150...200 W.

Katsete käigus tuvastati alljärgnevad asjaolud:

- mida suurem on vaakum ja kiirguri võimsus, seda suurem on kuivamiskiirus ja lühem on kuivamisaeg;
- katseseadme optimaalne kuivatusrežiim lähtudes vaid kiirguri energiatarbest, vaakumpumba energiatarvet arvestamata, on rõhul 52,5 kPa ja kiirguri võimsusel 150 W;
- vaakumpump imeb alarõhku tekitades veeauru kuivatuskambrist välja;
- kuivatamiseks ei sobi püsiva võimsusega infrapunakiiritamine.

Polli aiandusuuringute keskuse infrapuna-vaakumkuivati kohta võib öelda, et veeauru kõrge osakaal kuivatusõhus on tingitud halvast veeauru ärajuhtimisest. Kuna veeauru ei juhita ära mitte vaakumpumba vaid kondenseerimisega, tuleks täiendavalt uurida:

- veeauru kondenseerumise ja süsteemist välja juhtimise võimalusi;
- vaakumi ja infrapunakiirguse täpsemat reguleerimist materjali sisestatud temperatuurianduri järgi;
- materjalist tulenevate iseärasuste arvesse võtmist erinevates kuivatamise faasides ja kuivatusprogrammi vastavat reguleerimist.

Enne reaalseid tegevusi tuleks võimalikud variandid läbi proovida simulatsioonikeskkonnas.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Poobus, A., Tiikma, T.** (2002). Kuivatustehnika. Tallinn: TTÜ. 137 lk.
2. **Adonis, M., Kahn, M. T. E.** (2009). Evaluation of hybrid dryer for the production of apple chips. – *Journal for New Generation Sciences.* Vol. 7, No. 2, pp. 8-22.
3. **Liiske, M., Hovi, M., Lepa, J., Palge, V.** (1998). Soojusprotsesside matemaatilised mudelid ja energiakulu. Tartu: Eesti Põllumajandusülikool. 87 lk.
4. **Niiberg, T., Põldma, E.** (1998). Kuivatamine. Tallinn: Maalehe raamat. 111 lk.
5. Puuviljade ja marjade kuivatamine. (2011). /Koost. U. Bleive. Tartu: Eesti Maaülikool. 36 lk.
6. Puuviljade ja marjade väiketöötlemine ning säilitamine. Tartu: Eesti Maaülikool. 24 lk.
7. **Laur, L., Hovi, M., Hovi, K., Bleive, U.** (2016). Infrapuna-vaakumkuivati mudel soojustehniliste protsesside uurimiseks. – *X Magistrantide teaduskonverentsi „Inimene ja tehnoloogiad" kogumik.* Tartu: Eesti Maaülikool. lk 42-47.
8. Polli aiandusuuringute keskus. – *Eesti Maaülikooli põllumajandus- ja keskkonnainstituut.* http://polli.emu.ee/ (04.05.2016).
9. Nüüdisaegsed puuviljahoidlad. (2008). /Koost. U. Bleive. Tartu: Eesti Maaülikool. 32 lk.
10. **Vahur, J., Koop, A.** (1967). Kartuli, köögi- ja puuviljade säilitamine ning hoidlad. Tallinn: Valgus. 209 lk.
11. **Mustayen, A. G. M. B., Mekhilef, S., Saidur, R.** (2014). Performance study of different solar dryers: A review. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* No. 34, pp. 463-470.
12. Food drying science and technology. (2008). /Eds. Y. H. Hui, C. Clary, M. M. Farid, O. O. Fasina, A Noomhorm, J. Welti-Chanes. Lancaster: DEStech Publications. 781 pp.
13. **Sats, R.** (2006). Kuivatatud õuna kvaliteet sõltuvalt kuivatusviisist ning eeltöötlemise meetodist. (Bakalaureusetöö). Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja Keskonnainstituut, aianduse osakond. Tartu.

14. **Nowak, D., Lewicki, P. P.** (2004). Infrared drying of apple slices. – *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. No. 5, pp. 353-360.
15. **Ruut, A.** (2007). Kuivatatud porgandi kvaliteet sõltuvalt kuivatusviisist ning eeltöötluse meetodist. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja Keskonnainstituut, aianduse osakond. Tartu.
16. **Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., Sajadiye, S. M., Ferdavani, M. E. K.** (2014). Evaluation of energy consumption of potato slices drying using vacuum-infrared method. – *IJABBR*. Vol. 2, Issue 10, pp. 2651-2658. [e-ajakiri] http://www.ijabbr.com/article_9990_1344.html (29.03.2016).
17. **Swasdisevi, T.,** *et al.* (2007). Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. – *Songklanakarin J. Sci. Technol.* Vol 29, Issue 3, pp. 809-816.
18. **Liu, Y., Zhu, W., Luo, L., Li, X., Yu, H.** (2014). A Mathematical model for Vacuum far-infrared drying of potato slices. – *Drying technology*. Vol. 32, Issue 2, pp. 180-189.
19. **Kouchakzadeh, A., Haghighi, K.** (2011). Modeling of vacuum-infrared drying of pistachios. – *Agricultural engineering International: CIGR journal*. Vol. 13, No. 3, pp. 1-7.
20. **Hazervazifeh, A., Nikbakht, A. M., Moghaddam, P. A.** (2016). Novel hybridized drying methods for processing of apple fruit: Energy conservation approach – *Energy*. Vol. 103, pp. 679-687.
21. **Eskla, V. jt.** (1999). Õun aias ja köögis. Tallinn: Maalehe raamat. 173 lk.
22. **Schwarcz, J.** (2007). An apple a day: The myths, misconceptions and truths about the foods we eat. Toronto: HarperCollins publishers Ltd. 365 lk.
23. **Wojdylo, A., Figel, A., Oszmianski, J.** (2007). Influence of temperature and time of apple drying on phenolic compounds content and their antioxidant activity. – *Polish journal of food and nutrition sciences.* Vol. 57, No. 4, pp. 601-605.
24. **Velic, D., et al.** (2007). Study of the drying kinetics of Granny Smith apple in tray drier. – *Agriculturae Conspectus Scientificus*. Vol. 72, No. 4, pp. 323-328.
25. **Moreno, J., Espinoza, C., Simpson, R., Petzold, G., Nunez, H., Gianelli, M. P**. (2015). Application of ohmic heating/vacuum impregnation treatments and air drying to develop an apple snack enriched in folic acid. – *Innovative food science and emerging technologies.* Vol. 33, pp. 381-386.

26. Moisture measurement: Unground grain and seeds. S362.2. (1998). St. Joseph: ASAE. https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=2&AID=24272&CID=s2000&T=2 (30.03.2016).
27. **Treier, V., Hovi, M.** (1997). Kuivatusõpetus: Õppe- ja käsiraamat põllusaaduste ja puidu kuivatajale. Tartu: EPMÜ. 64 lk.
28. Õunakrõps Jonathan 40g. – *Vitamiinikuller.ee.* http://vitamiinikuller.ee/toode/ounakrops-jonathan-40g/ (07.05.2016).
29. Õuna krõps Jonathan 40g. – *Selver AS.* https://www.selver.ee/ouna-krops-jonathan-40-g (07.05.2016).
30. Kuivatatud õunarõngad 200g. – *AS Prisma Peremarket*. https://www.prismamarket.ee/entry/kuivatatud-ounarongad-200-g/4771249814180 (07.05.2016).
31. Vaakumkuivatuskambri BKS VF-12 kasutusjuhend. (2009). BKS. 8 lk.
32. Type of thermocouples. – *Reotemp Instrument Corporation: Thermocoupleinfo*. http://www.thermocoupleinfo.com/ (10.05.2016).
33. Agilent 34970A Data acuisition/switch unit family: produkt overview. (2012). Agilent Technologies. http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-5290EN.pdf (10.05.2016).
34. DeLaval vacuum pump DVP 900F/1400F/2000F: Memo. (2010). DeLaval International AB. 60 lk.
35. Õun Alesja. – *Eesti Maaülikool: Eesti puuviljade ja marjakultuuride sordivaramu*. http://sordivaramu.emu.ee/sort2.php?id=742 (10.05.2016).
36. Operating instruction precision balances: Kern 440. (2009). Balingen: Kern and Sohn GmbH. 32 lk.
37. Elekterkuumutus: Elekterkuumutusseadmete teooria ja arvutuse alused. /Koost. V. Palge
38. **Ots, A.** (2011). Soojustehnika aluskursus. Tallinn: TTÜ kirjastus. 816 lk.
39. **Palge, V**. (2008). Soojusleviprotsesside modelleerimine scilab`i keskkonnas: õppematerjal. Tartu: Eesti Maaülikool, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 94 lk.
40. Soojus- ja ainelevi alused. (1989)./Koost. V. Treier. Tartu: EPA rotaprint. 88 lk.
41. Tehniline termodünaamika ja soojusülekande alused: ülesannete kogu. (1972). /Koost. V. Treier. Tartu: EPA rotaprint. 160 lk.

42. **Nowak, D., Lewicki, P. P.** (2005). Quality of infrared dried apple slices. – *Drying Technology.* No. 23, pp. 831-846.
43. **Mongpraneet, S., Abe, T., Tsurusaki, T.** (2002). Accelrated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. – *Journal of food engineering*. Vol. 55, Issue 2, pp. 147-156.
44. **Mitropoulos, D., Lambrinos, G.** (2007). Delicious Pilafa apple density changes as a quality index of mass loss degradation during storage. – *Journal of food quality.* No. 30, pp. 527-537.
45. **Lisowa, H., Wujec, M., Lis, T.** (2002). Influence of temperature and variety on the thermal properties of apples. – *International agrophysics*. Vol. 16, pp. 43-52.
46. **Holman, J. P**. (2010). Heat transfer: Tenth edition. New York: McGraw-Hill. 725 lk.

INFRARED-VACUUM DRYING MODEL

SUMMARY

Food drying is one of the oldest preservation methods for agricultural products. Drying is a process of moisture removal due to mass and heat transfer. Drying reduces the water and microbiological activity of the matherial improving the food stability. Also drying is the most energy intensive process in food industry. Therefore new techniques must be studied and dryers designed to minimize energy consumption.

In this paper many dryers and techniques are described. Vacuum-infrared drying method is investicated mainly in this paper. Mentioned method has a number of advantages against convective drying. Faster drying speed, lower energy consumption and better quality of products.

The mathematical model of mass and heat transfer was constructed for infrared-vacuum drying of apple slices on the basis of energy and diffusion equations. SciLab 5.5.2 software was used to calculate the change of moisture content, temperatures in drying chamber and in apple slices in different drying conditions. Calculated results were compared with experimental results at varying conditions. As a result comparison shows that the model results fit well with experimental at pressure 52,5 kPa and infrared radiation at power level of 150...200 W.

The infrared-vacuum drying of apple slices was performed in a laboratory scale vacuum dryer for producing apple chips. Apple slices with inital moisture content of 87 % were dried at pressures 52,5 kPa, 64,6 kPa and 78,8 kPa and with infrared radiation at power levels of 100 W, 150 W and 200 W. The result revealed:

- drying time decreases with the increase of the infrared radiation power and the decrease of air pressure;
- minimum energy consumption of FIR heater for drying apple slices was calculated at condition of infrared power 150 W at pressure 52,5 kPa;
- vacuum ensures the rapid removal of evaporated moisture from the drying chamber;
- the constant heating is not the best for drying apple slices.

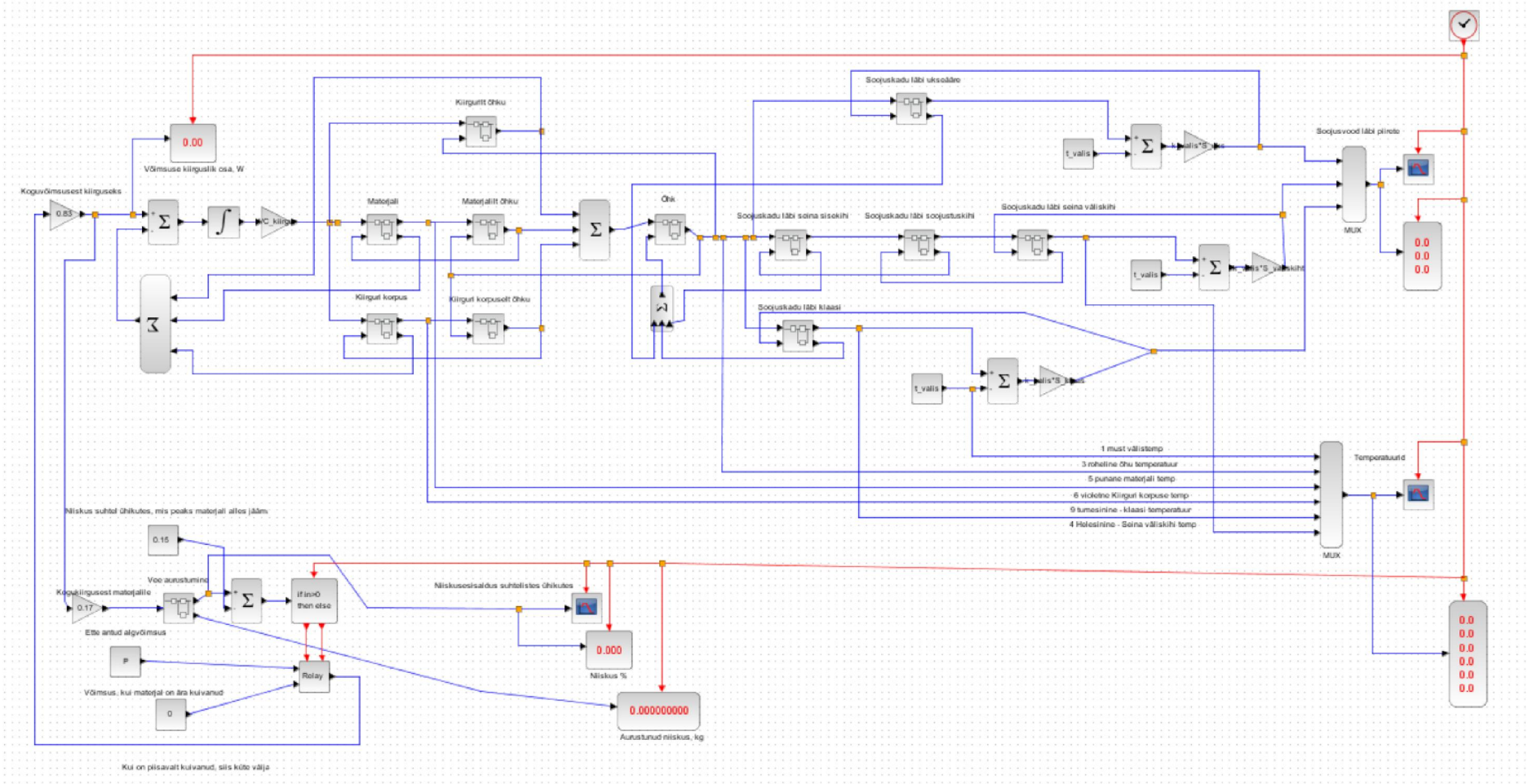
Polli Horticultural research center infrared-vacuum dryer has a problem thus evaporated moisture is not removed from the process fast enough. The further investigations should be made:

- evaporated moisture condensing and removal possibilityes;
- vacuum and infrared radiation accurate regulation thru monitoring matherial temperature;
- considering specificities of matherial.

The SciLab model for infrared-vacuum dryer constructed in this work can be used for Polli dryer further researches.

LISAD

Lisa A. Infrapunakiirguskuivati mudel SciLab keskkonnas



Lisa B. Infrapunakiirguskuivati esimese katse skript

```
//Kuivati mudeli script
//KATSE 1
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//SOOVITUD PARAMEETRITE SISESTAMINE
////////////////////////////////////////////////////////////////////////
T_aeg=10800; //s, Kuivatamise aeg
P=100 ;//W, Kiirguri võimsus
T_materjal=50 ;// C, Soovitud materjali temperatuur
W_2=15; // %, Soovitud materjali niiskus
t_valis=22 ;//C, Ruumi temperatuur, kus kuivati paikneb
Del1=0.002; //m materjalikihi paksus kuivatusplaadil, lõigatud viilu paksus
m_materjal=64.02/1000; //kg, Materjali mass
//MATERJALI ÕUN PARAMEETRID
Gam_1=849,8; // kg/m3 Õuna tihedus [44]
Lam1=0.537; // W/m*K Õuna erisoojusjuhtivus [45]
c_1=3829; //J/(kg*K) Õuna erisoojus [45]
W_materjal=87 ;//%, Materjali algne niiskussisaldus, leitud eksperimentaalselt
Eps_2=0.81; //Mustvärvusaste kartul [46]
////////////////////////////////////////////////////////////////////////

//Kuivatuskambri mõõtmed
l=0.48; //m kambri pikkus ehk sügavus
w=0.37; //m laius
h=0.27; //m kõrgus

//Soojusallikaks on infrapuna kiirgur
L_kiirgur=2*0.29; //m kiirguri traadi spiraali pikkus
D_kiirgur=0.0055; //m (5.5mm spiraali läbimõõt) kiirguri traadi spiraali läbimõõt
Sp=%pi*D_kiirgur; //kiirguri traadi spiraali ümbermõõt
Skogu=Sp*L_kiirgur; //m2 traadi spiraali välispindala, kiirgav pind
Skiirgur=(%pi*(D_kiirgur^2))/4; //m2, traadi ristlõikepindala
V_kiirgur=Skiirgur*L_kiirgur; //m3 kiirguri traadi ruumala
Gam_2=8400; //kg/m3 Nikroomi tihedus
c_2=450; //J/kg*K Nikroomi erisoojus
C_kiirgur=V_kiirgur*Gam_2*c_2; //Kiirguri soojusmahtuvus

//Algandmed
Alph_sise=8; // W/(m2*K) soojusülekandetegur
Alph_valis=20; //W/(m2*K)
Gam_ohk=1.3; //õhu tihedus merepinnal
c_ohk=1000; //Õhu erisoojus J/(kg*K)

//Soojusmahtuvused
S_materjal=0.225*0.32; //m2 kuivatusplaadi pindala(kuivatamiseks mõeldud alus)
V_materjal=S_materjal*Del1; //Materjalikihi ruumala
```

V_korpus2=((0.15*0.09)/2)*0.375; *//Kiirguri korpuse ruumala, mille hõivab kuivati ruumalast*
V_kuivati=(l*w*h)-V_korpus2-V_materjal; *//m3 kuivati ruumala*
C_kuivati=V_kuivati*Gam_ohk*c_ohk; *//Kuivati õhu soojusmahtuvus*
C_materjal=V_materjal*Gam_1*c_1; *//Materjali soojusmahtuvus*

//Kiirguri soojusjuhtivus
T_1=300+273.15; *// KELVINITES Kiirguri pinna absoluutne temperatuur////////////////////////////////*
T_2=T_materjal+273.15; *//MATERJALI temperatuur pinnal, Temperatuur,mida soovime saavutada//*
Eps_1=0.95; *//Mustvärvusaste Nikroomtraat 50...500 C, oksüdeeritud* [41: 149]
Eps_t=1/((1/Eps_1)+(1/Eps_2)-1); *//Kehade taandatud mustvärvusaste*
Fii1=0.5; *//Keskmine nurktegur*
F1=S_materjal; *//Kiiritatav materjali pind*
H1=Fii1*F1 ;*//Vastastikune kiirguspind*
Alph_kiirgur=5.67*(10^-8)*Eps_t*((T_1^2)+(T_2^2))*(T_1+T_2)*H1; *//Soojusjuhtivus kiirgurilt materjali*
teg1=5.67*(10^-8)*Eps_t; *//Tegur soojusjuhtivusteguri arvutamiseks*
k2=1/((1/Alph_kiirgur)+(Del1/Lam1)); *//Soojusjuhtivustegur Kiirgurilt materjali*

//Kiirguri korpuse soojusjuhtivus
T_3=50+273.15; *//KIIRGURI KORPUSE PINNA TEMPERATUUR//*
Eps_3=0.56; *//MUSTVÄRVUSASTE Teras, valtsitud pind 50 C* [41: 149]
Eps_t2=1/((1/Eps_1)+(1/Eps_3)-1); *//Kehade taandatud mustvärvusaste*
Fii2=0.5; *//Keskmine nurktegur*
F2=0.375*0.15; *//m2, Kiiritatav korpuse pind*
H2=Fii2*F2 ;*//Vastastikune kiirguspind*
Alph_kiirgur2=5.67*(10^-8)*Eps_t2*((T_1^2)+(T_3^2))*(T_1+T_3)*H2; *//Soojusjuhtivus kiirgurilt korpusesse*
teg2=5.67*(10^-8)*Eps_t2; *//Tegur soojusjuhtivusteguri arvutamiseks*
Del2=0.0005; *//m (=0,5mm) kiirguri korpuse paksus*
Lam2=58.15; *//W/m*K TERASE ERISOOJUSJUHTIVUS (Ehk KORPUS ON ÕHUKESEST LEHTTERASEST)*
k3=1/((1/Alph_kiirgur2)+(Del2/Lam2)) *//Kiirgurilt korpusesse*
S_korpus=(0.375*0.15)+(0.15*0.09)+2*(0.375*0.117); *//Kiirguri korpuse pind m2*
V_korpus=S_korpus*Del2; *//Korpuse alumise kiirguri poolse külje LEHTTERASE RUUMALA*
Gam_teras=7830; *//kg/m3* [41: 145]
c_teras=465; *//J/kg*K* [41: 145]
C_korpus=V_korpus*Gam_teras*c_teras; *//Kiirguri Korpuse soojusmahtuvus*

//KONVEKTIIVSE SOOJUSLEVI ARVUTUSED
S_uks=(0.38+0.28)*0.035; *//Ukseääre pindala*
//Materjalilt õhku soojusülekandetegur Treier, V. Soojuslevi alused.
d_1=0.225; *//m, Määravmõõde, kandiku laius*
t_p=(T_materjal+40)/2; *//Õhk-piirikihi keskmine temperatuur materjali pinnal*
//Tabelist lk 26 t=50 C Treier, V. Soojuslevi alused.
Lam_p=2.896*10^-2; *//W/(m*K)*

v_p=17.95*10^-6; *//m2/s*
Pr=0.698
T_p=t_p+273.15; *//K*
Beet_p=1/T_p; *//1/K*
Gr=(9.81*d_1^3*Beet_p*(T_materjal-40))/v_p^2; *//Grashofi arv*
Nu=0.54*(Gr*Pr)^0.25; *//Nusselti arv*
Alph_1=(Nu*Lam_p)/d_1*1.3; *//W/(m2*K), Soojusülekandetegur, horisontaalse pinna soojuslevi on 30% suurem kui jahutav keskkond on üleval pool*
k11=1/((1/Alph_1)+(Del1/Lam1)); *//Materjalilt õhku*

//Kiirguri korpuselt õhku soojusülekandetegur
d_2=0.15; *//m, Määravmõõde, korpuse laius*
t_p2=(65+40)/2; *//Õhk-piirikihi keskmine temp korpuse pinnal*
//Tabelist lk 26 t=50 C Treier, V. Soojuslevi alused.
Lam_p2=2.896*10^-2; *//W/(m*K)*
v_p2=17.95*10^-6; *//m2/s*
Pr2=0.698
T_p2=t_p2+273.15; *//K*
Beet_p2=1/T_p2; *//1/K*
Gr2=(9.81*d_2^3*Beet_p2*(65-40))/v_p2^2; *//Grashofi arv*
Nu2=0.54*(Gr2*Pr2)^0.25; *//Nusselti arv*
Alph_2=(Nu2*Lam_p2)/d_2*1.3; *//W/(m2*K), Soojusülekandetegur*
k12=1/((1/Alph_2)+(Del2/Lam2)); *//Korpuselt õhku*

//Kiirgurilt õhku soojusülekandetegur
d_3=D_kiirgur; *//m, Määravmõõde, traadi läbimõõt*
t_p3=(1000+40)/2; *//Õhk-piirikihi keskmine temperatuur materjali pinnal*
//Tabelist lk 26 t=500 C Treier, V. Soojuslevi alused.
Lam_p3=5.746*10^-2; *//W/(m*K)*
v_p3=79.38*10^-6; *//m2/s*
Pr3=0.687
T_p3=t_p3+273.15; *//K*
Beet_p3=1/T_p3; *//1/K*
Gr3=(9.81*d_3^3*Beet_p3*(1000-40))/v_p3^2; *//Grashofi arv*
Nu3=0.54*(Gr3*Pr3)^0.25; *//Nusselti arv*
Alph_3=(Nu3*Lam_p3)/d_3*1.3; *//W/(m2*K), Soojusülekandetegur*
k13=1/(1/Alph_3); *//Kiirgurilt õhku*

//SEINA SISEKIHT
Del3=0.006; *//6mm kuivati sisekihi paksus*
Lam3=164.4; *//Duralumiinium* [41: 145]
k4=1/((1/Alph_sise)+(Del3/Lam3)); *//Läbi seina metallikihi*
S_sisekiht=((w*h)+2*(l*w)+2*(l*h))-S_uks; *//kambri sisepind m2*
Gam_dural=2800; *//kg/m3 duralumiiniumi tihedus* [41: 145]
c_dural=883; *//J/kg*K duralumiiniumi erisoojus* [41: 145]
V_sisekiht=Del3*S_sisekiht; *//Duralumiiniumist kuivati sisekihi ruumala*
C_kuiv_sisekiht=V_sisekiht*Gam_dural*c_dural; *//Sisekihi soojusmahtuvus*

//SEINA SOOJUSTUS
Del4=0.075; *//7,5cm isolatsiooni paksus*

k5=1/(1/Alph_sise); *//Soojusläbikandetegur*
*//Lam4=0.0372; //W/m*K Klaasvatt*
//k5=1/(Del4/Lam4); //Läbi seina isolaatsioonikihi
Gam_klaasvatt=Gam_ohk;
//Gam_klaasvatt=200; //kg/m3
c_klaasvatt=c_ohk;
*//c_klaasvatt=670; //J/kg*K*
V_isolatsioon=Del4*S_sisekiht; *//Isolatsioonikihi ruumala*
C_isolatsioon=V_isolatsioon*Gam_klaasvatt*c_klaasvatt; *//Isolatsioonikihi soojusmahtuvus*

//SEINA VÄLIMINE KIHT
Del5=0.001; *//1mm väliskihi paksus*
Lam5=Lam2;
k6=1/(Del5/Lam5); *//Läbi seina väliskihi välja*
S_valiskiht=2*(0.495*0.53)+2*(0.495*0.45)+(0.525*0.45)+((0.525*0.45)-(0.38*0.28));
//väliskihi pindala
V_valiskiht=Del5*S_valiskiht; *//m3 Terasest kuivati väliskihi ruumala*
C_valiskiht=V_valiskiht*Gam_teras*c_teras; *//Väliskihi soojusmahtuvus*

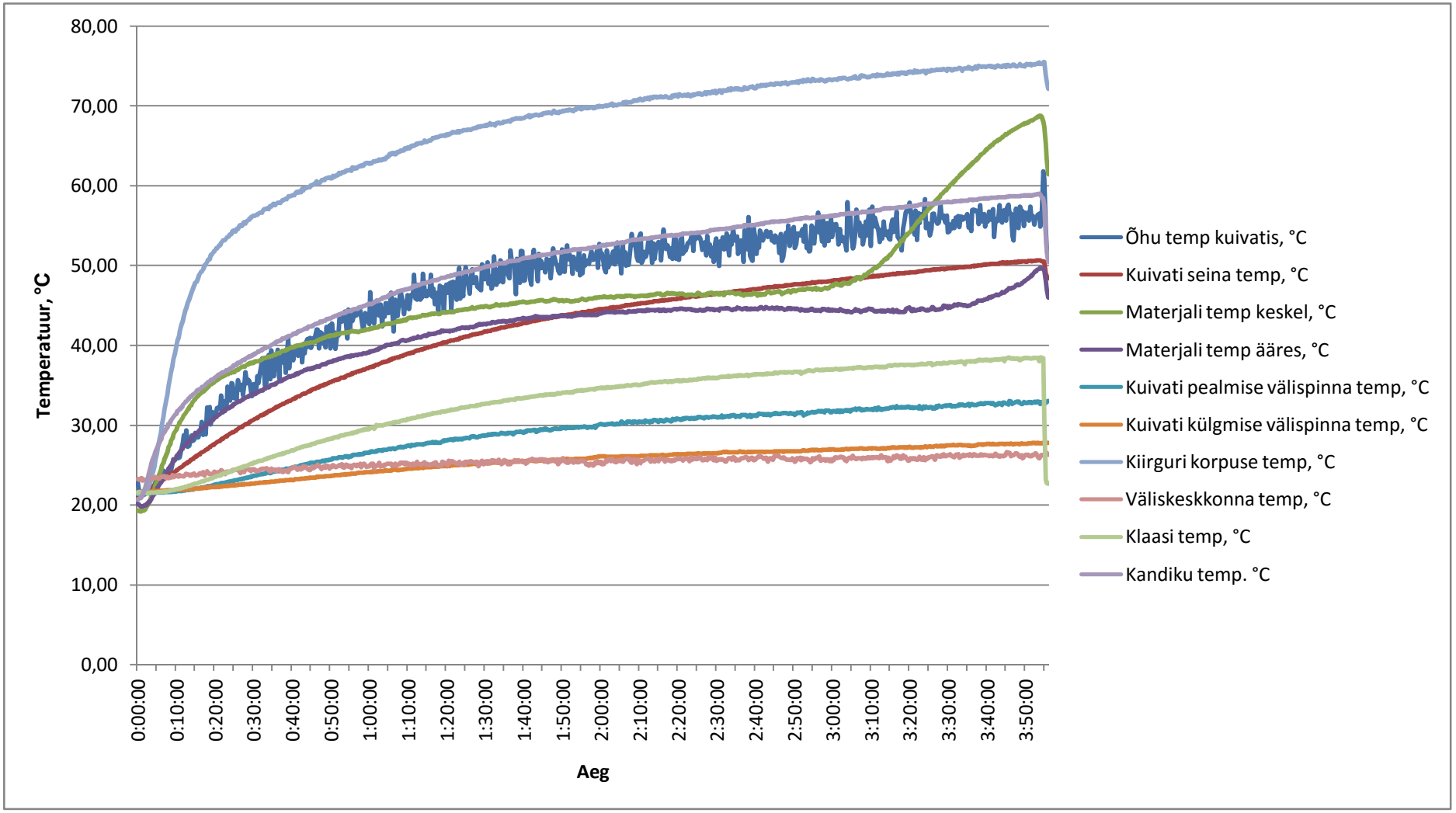
//KLAAS
Del6=0.1; *//Klaasi paksus 10cm*
Lam6=0.7443; *//W/m*K Klaas* [41: 145]
k7=1/((1/Alph_sise)+(Del6/Lam6)); *//Kuivati õhust läbi klaasi välja*
S_klaas=0.36*0.255; *//klaasi pindala m2*
Gam_klaas=1500; [41: 145]
c_klaas=670; [41: 145]
V_klaas=Del6*S_klaas; *//klaasikihi ruumala*
C_klaas=V_klaas*Gam_klaas*c_klaas; *//Klaasikihi soojusmahtuvus*

//UKSE ÄÄRE KAUDU SOOJUSKADU
Del7=Del3;
Lam7=Lam3;
k8=1/((1/Alph_sise)+(Del7/Lam7)); *//Kuivati õhust läbi ukseääre välja*
V_uks=Del7*S_uks;
C_uks=V_uks*Gam_dural*c_dural;

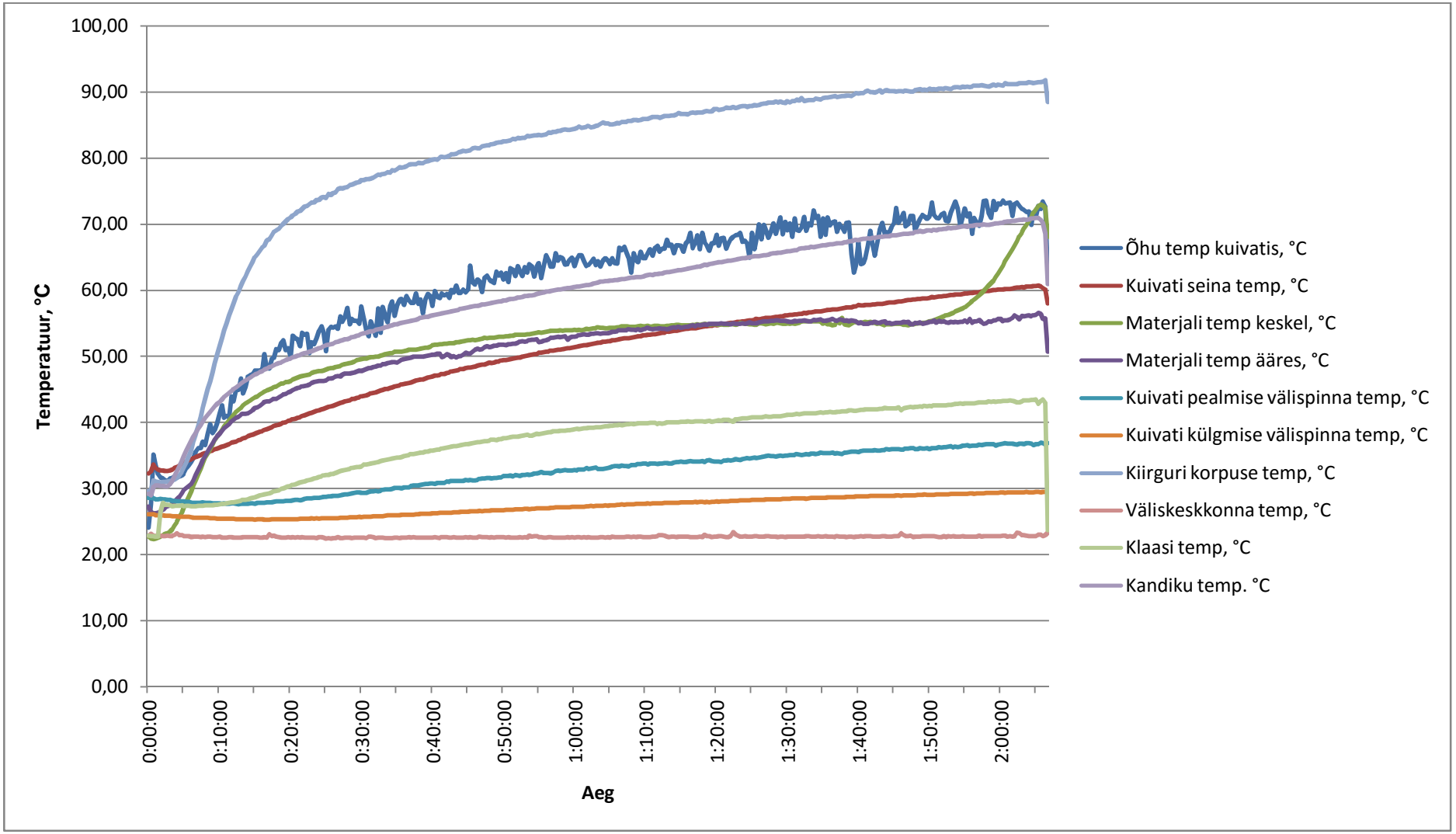
k_valis=1/(1/Alph_valis); *//Kuivati välispinnalt ümbritsevasse keskkonda*

C_aur=2500; *//kJ/kg Vee aurustussoojus* [27: 42]

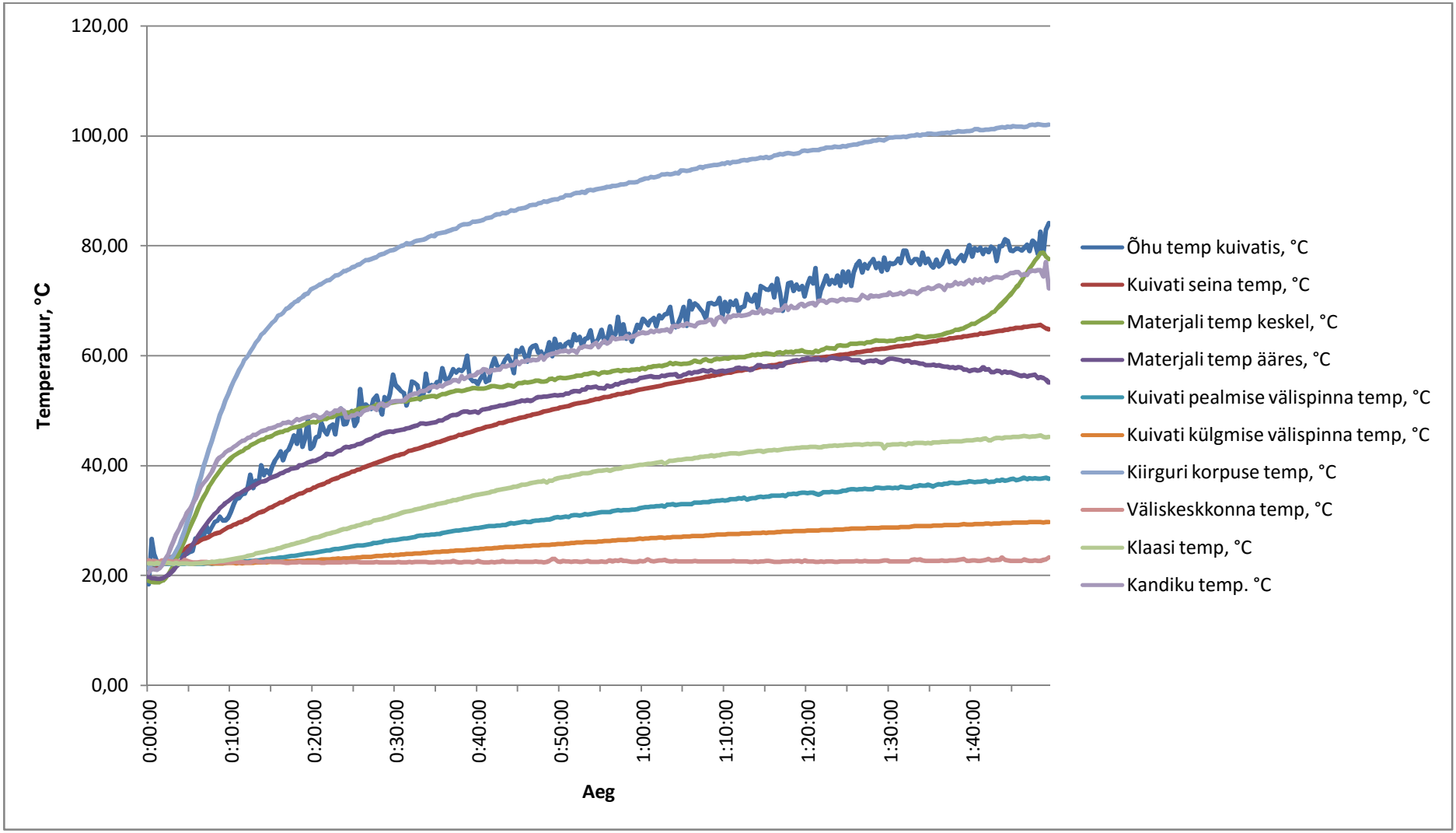
Lisa C. Esimese katseseeria mõõdetud temperatuurid



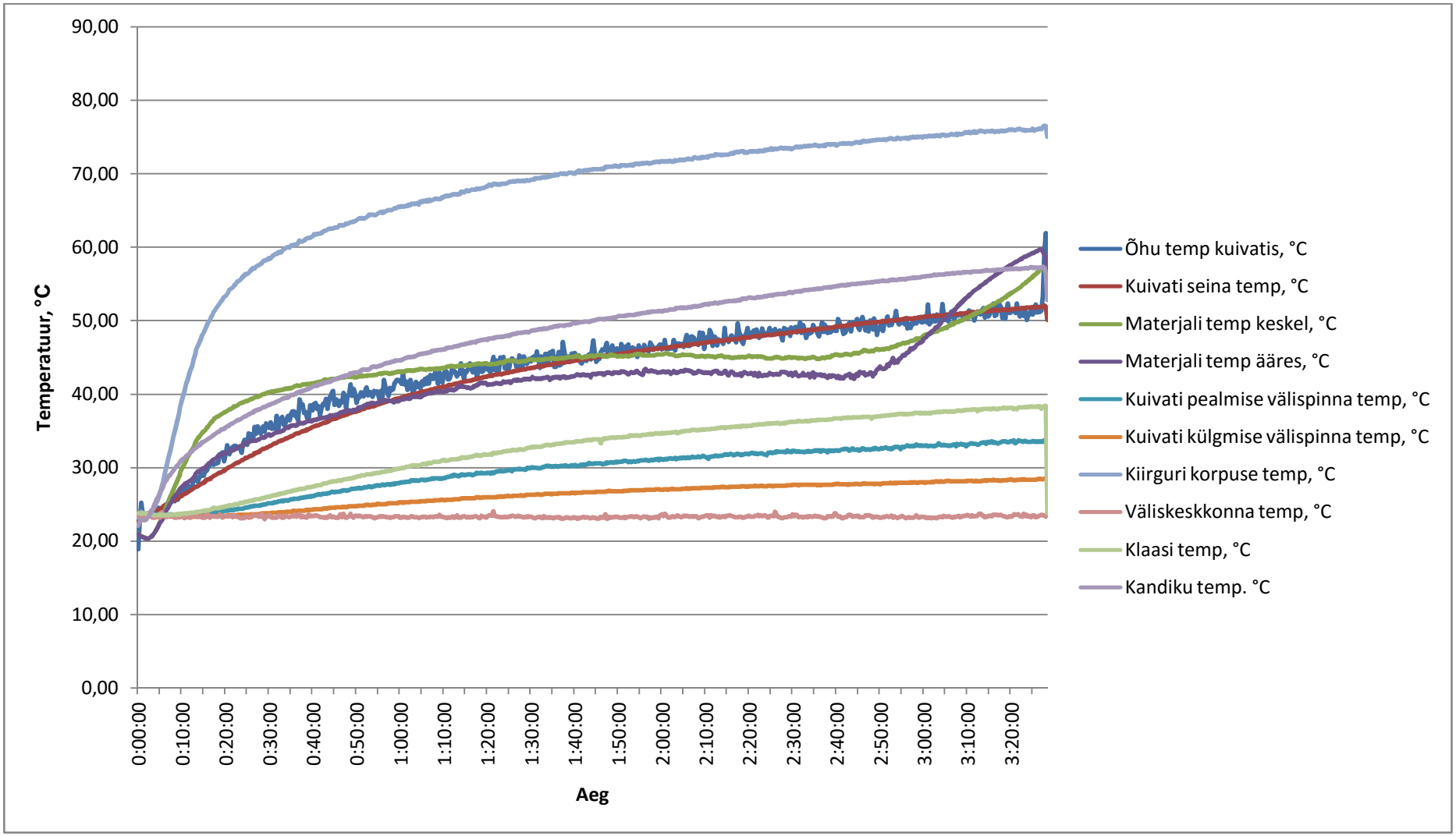
Lisa D. Teise katseseeria mõõdetud temperatuurid



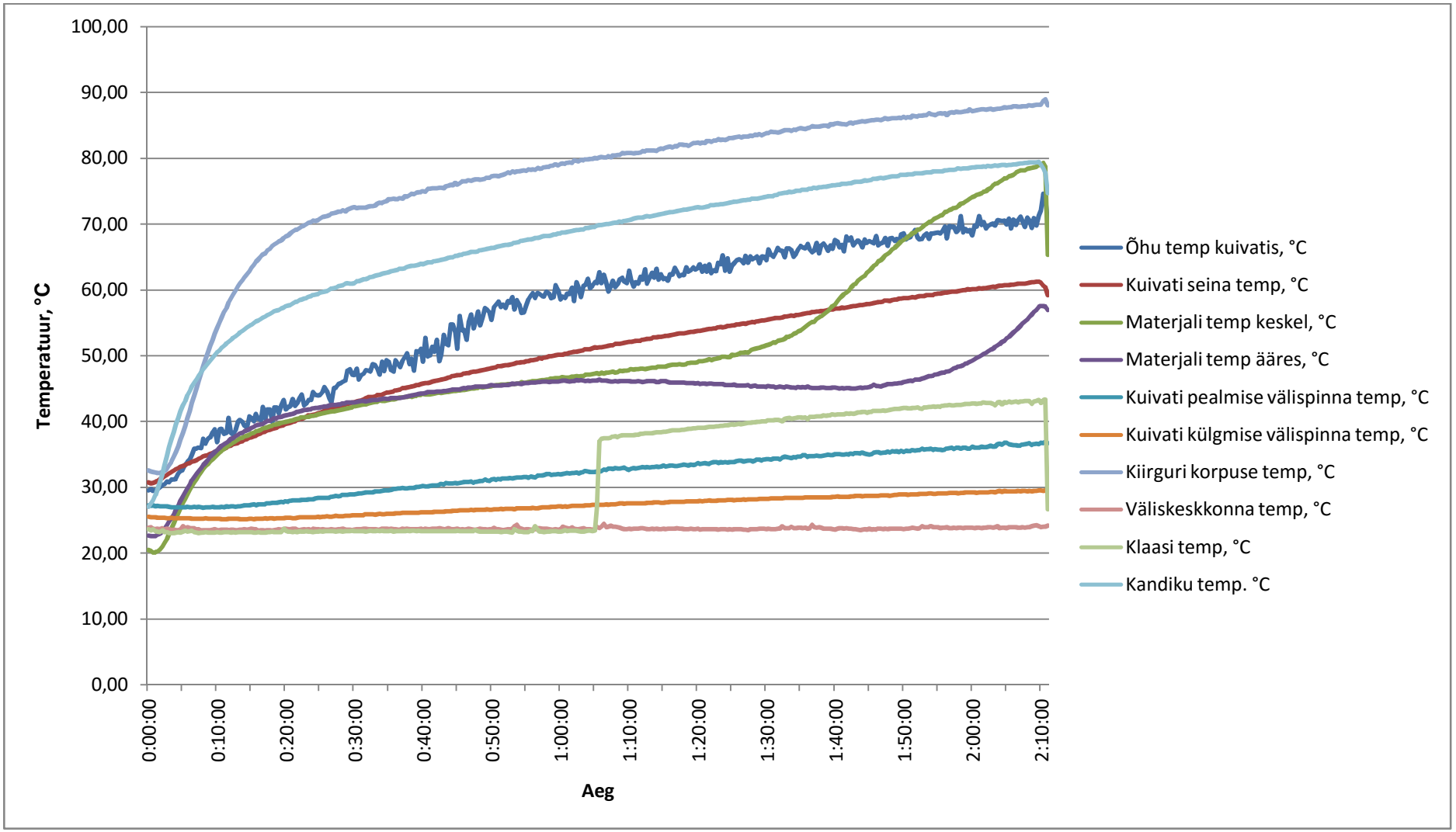
Lisa E. Kolmanda katseseeria mõõdetud temperatuurid



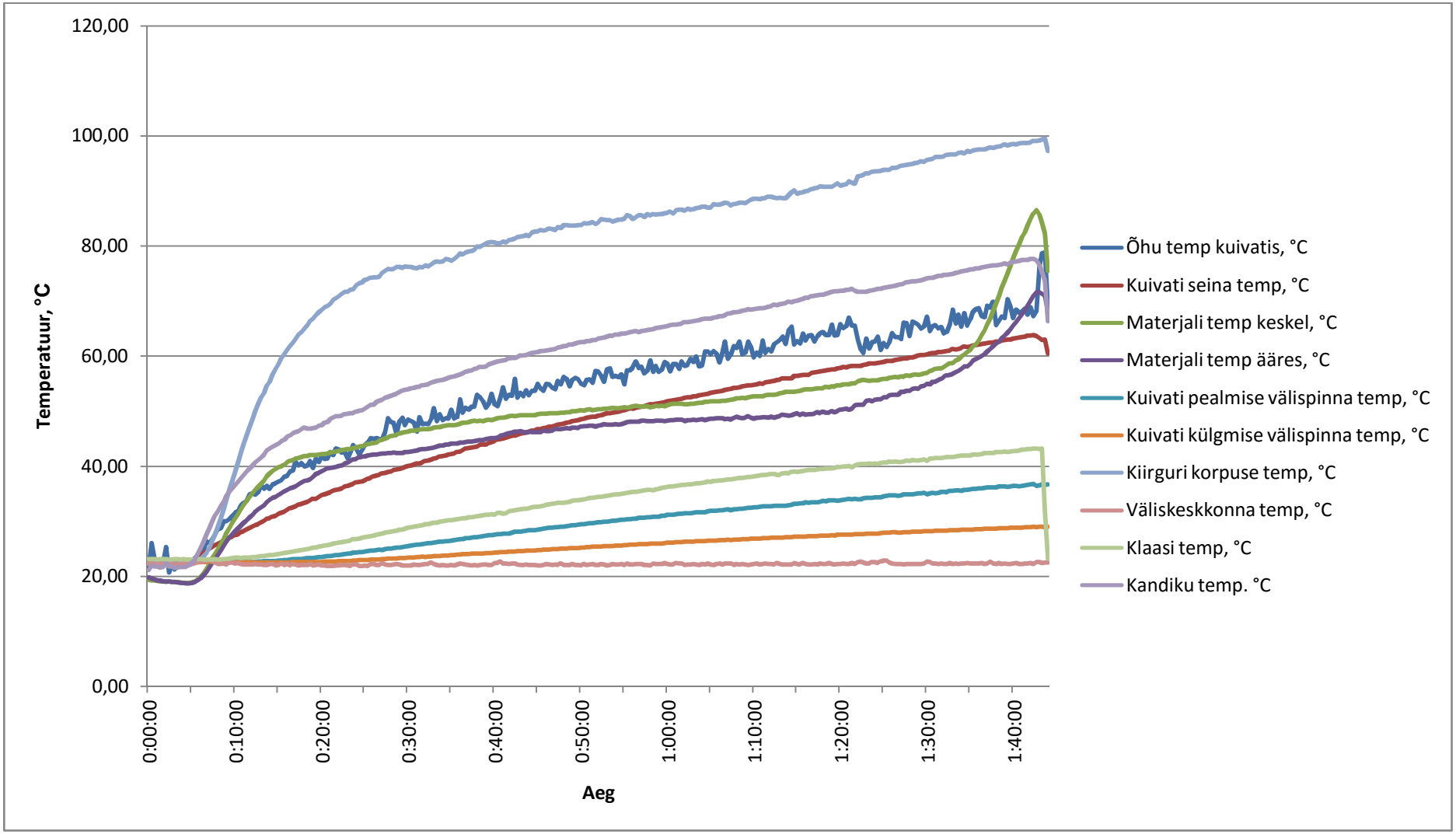
Lisa F. Neljanda katseseeria mõõdetud temperatuurid



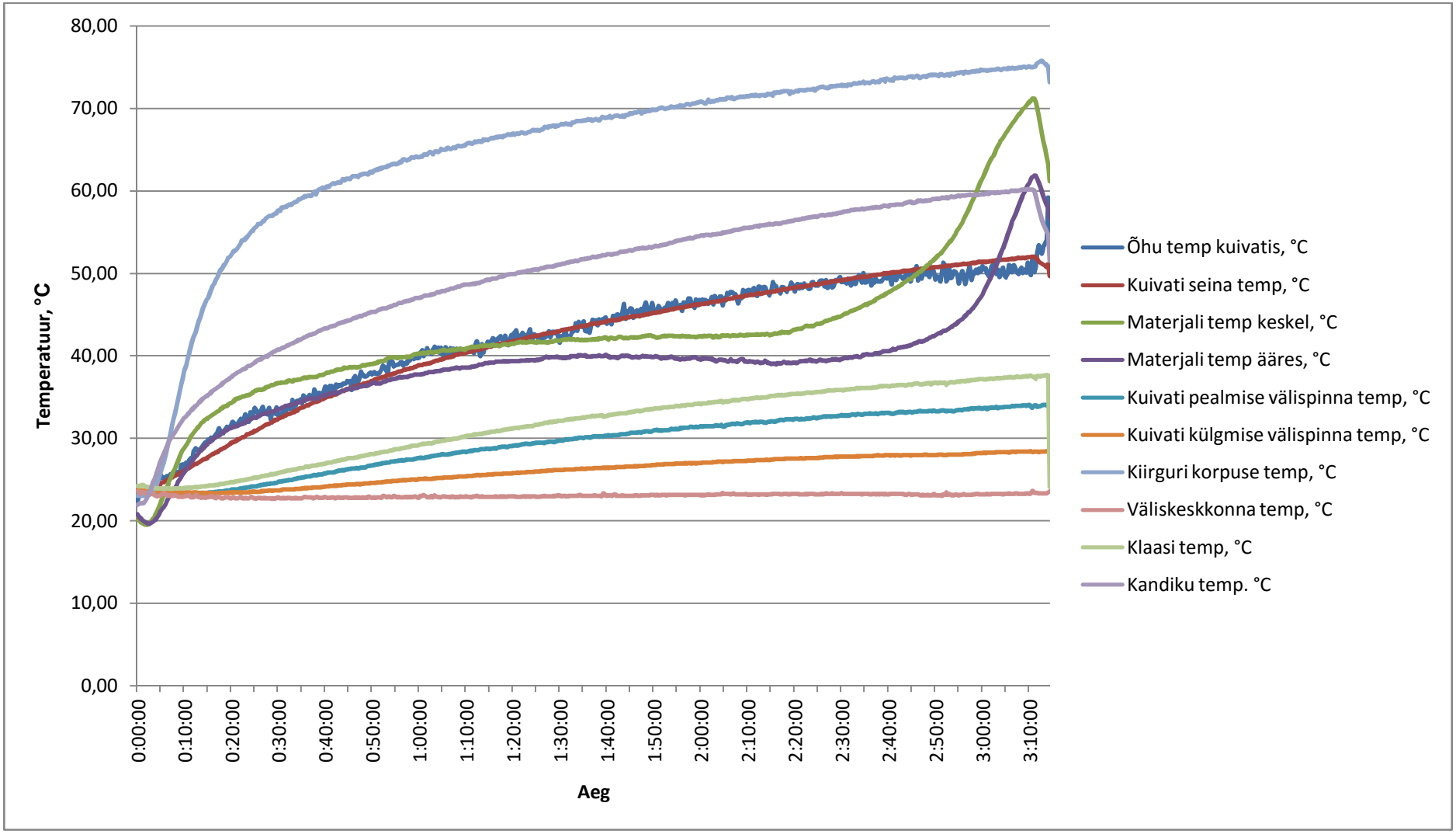
Lisa G. Viienda katseseeria mõõdetud temperatuurid



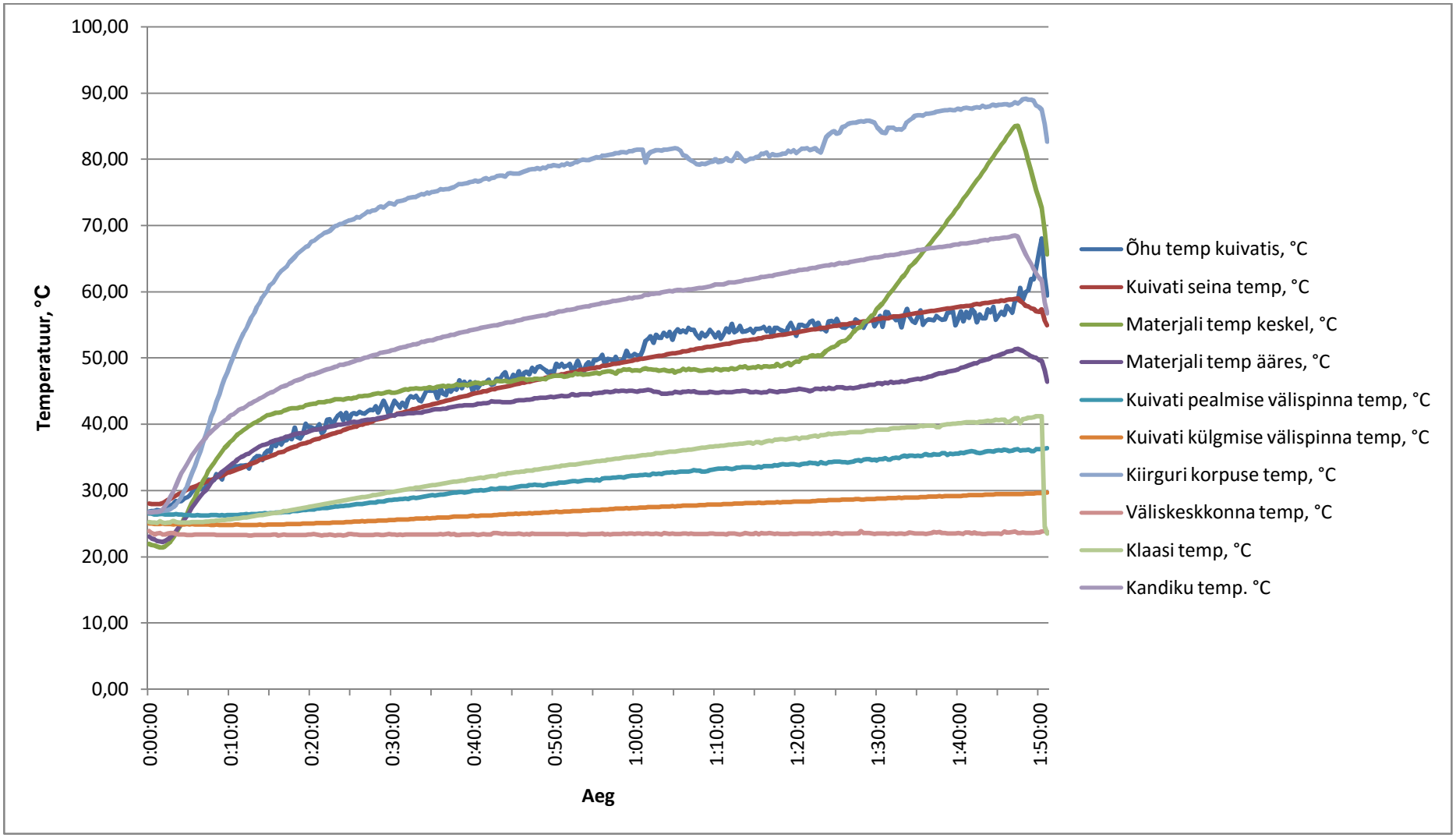
Lisa H. Kuuenda katseseeria mõõdetud temperatuurid



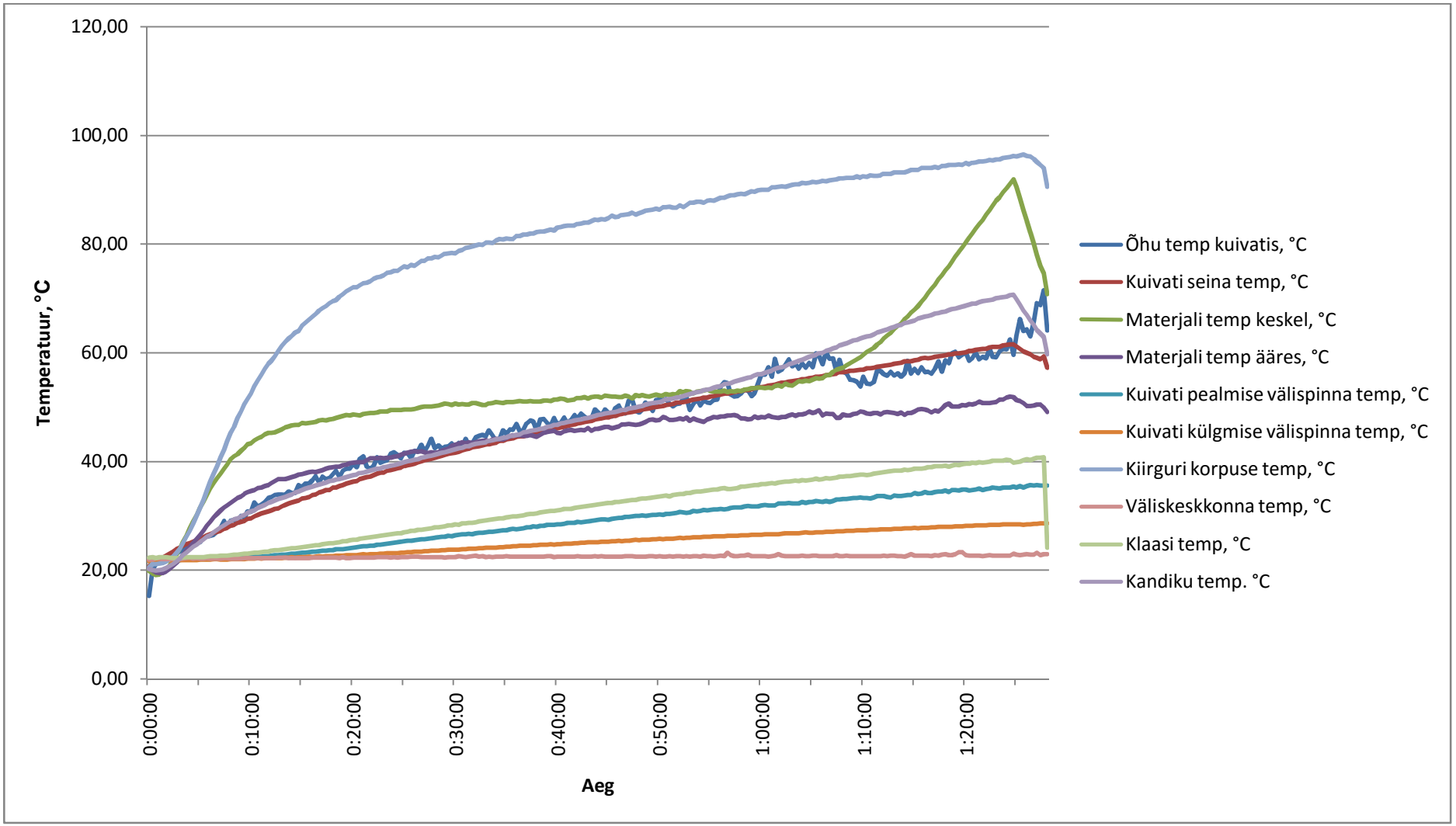
Lisa I. Seitsmenda katseseeria mõõdetud temperatuurid



Lisa J. Kaheksanda katseseeria mõõdetud temperatuurid



Lisa K. Üheksanda katseseeria mõõdetud temperatuurid



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

Mina, Leo Laur,
(sünnipäev pp/kuu/aa 11.03.1990)

annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Infrapuna-vaakumkuivati soojustehniline mudel, mille juhendajad on Mart Hovi, Külli Hovi ja Uko Bleive,

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, _____
(*kuupäev*)

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

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

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

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